

ENSEIGNER LES SCIENCES DE LA TERRE EN TENANT COMPTE DES REPRÉSENTATIONS

Marie Sauvageot-Skibine

Centration sur les représentations et obstacles et centration sur l'enseignement sont en relation étroite

apprentissage
et enseignement
de la géologie :

une diversité
d'études
didactiques

analyse
des représen-
tations et...

constructions
conceptuelles
visées par
l'enseignement

le savoir
scientifique
et l'histoire de
sa construction

Après un numéro consacré aux représentations et aux obstacles à l'apprentissage de concepts en géologie, ce numéro se centre plus spécifiquement sur le point de vue de l'enseignement. Par ces deux numéros, nous espérons rassembler un ensemble significatif de contributions récentes à la recherche en didactique dans ce domaine particulier. Les contributions réunies sont également représentatives de la diversité des questionnements et des études relatives à un champ particulier de connaissance, et à ce titre peuvent être transposées à d'autres domaines de savoir en sciences expérimentales.

La séparation en deux numéros est à l'évidence assez arbitraire, tant il est vrai que les conceptions s'expriment de façon plus fonctionnelle dans des tâches particulières plutôt que dans des questionnaires, ce qui conduit les recherches actuelles à s'intéresser à des séquences d'enseignement où ces tâches peuvent s'insérer aisément. Il est certain par ailleurs que ces études sont essentiellement motivées par un projet de modification de l'enseignement. Les interprétations construites à partir des résultats servent alors de point d'appui à une construction de réponses pédagogiques aux obstacles épistémologiques identifiés. Ce n'est d'ailleurs que par rapport à une construction conceptuelle qu'elles empêcheraient, que les représentations peuvent être qualifiées d'obstacles.

Le lien apparaît également dans le recours à une même grille d'analyse pour trouver une organisation significative au projet d'enseignement et pour interpréter les représentations et les obstacles qui se manifestent chez les apprenants. L'analyse historique sert fréquemment de révélateur, en ce sens qu'elle peut faire prendre conscience, avec le recul que permet l'étude de temps révolus, des problèmes successifs que la discipline scientifique a dû résoudre pour se constituer.

On trouvera donc dans ce numéro des prolongements de travaux rapportés dans le numéro précédent : Jean-Charles Allain présente successivement les représentations et obstacles qui se manifestent chez de jeunes élèves à propos des tremblements de terre. Christian Orange développe, avec Denise Orange, le rôle des modèles en géologie, en le reliant

deux numéros
complémentaires

aux modèles utilisés en biologie, pour poser la question des relations entre les deux disciplines. D'autres contributions centrées plutôt sur les représentations s'appuient sur une analyse des savoirs de référence et des savoirs à enseigner pour les analyser (Laperrière-Tacussel) et déterminer les obstacles épistémologiques et didactiques. À l'inverse, Gouanelle et Schneeberger dans ce numéro construisent leurs propositions d'enseignement et de formation sur le repérage des obstacles qu'elles ont identifiés.

**Contribution de ce numéro à la réflexion
sur la prise en compte par l'enseignement
des obstacles à la construction de concepts
dans les sciences de la Vie et de la Terre**

la conceptualisation du négatif
et son statut

Guy Rumelhard s'intéresse à la conceptualisation du négatif dans les sciences de la Vie et de la Terre. Que ce soit sous forme d'inhibition, de suppression ou de répression permanente à propos du concept de régulation, d'annulation ou de fonction active de suppression en immunologie, de perte de matière et d'effacement des traces dans le concept d'érosion, de disparition dans le concept de subduction, la fonction négative est partout, comme le vocabulaire employé le montre.

dans différents
domaines des
sciences de la
Vie et de la Terre

Si la génétique se construit contre l'idée d'héritage, et le concept d'anatomie comparée contre le rêve et l'imagination, il est possible de considérer l'absence sans valeur négative. En référant le mode de vie et le comportement d'un animal à son milieu, et non plus à l'homme, Darwin gomme l'infériorité des animaux. Contrairement à l'habitude qui définit la santé par l'absence de maladie, Canguilhem la situe dans le "plus que positif". *"La santé est un luxe biologique, celui de pouvoir tomber malade et de s'en relever."* Cela devient un concept *"en attente de sa mise en épreuve"*. La biologie moléculaire propose elle aussi une définition positive, en changeant de référent : la mort n'est plus le contraire de la vie, mais *"une fonction génétiquement programmée"*. Avec le jeu du brassage génétique produisant sans arrêt du nouveau, le concept de vivant devient "ce qui peut potentiellement exister".

le vocabulaire
qui l'exprime est
polysémique

La polysémie des préfixes *anti*, *contre* et *non* n'introduit pas toujours un sens négatif, et ne permet pas de le prévoir à la lecture du mot. Leur variété plus ou moins confuse peut aider à comprendre comment ils peuvent faire obstacle. Après avoir tracé les trois grandes étapes du travail des scientifiques, l'auteur conclut en défendant l'idée d'une évolution vers un plus grand désordre, idée qui intègre la fonction négative.

biologie et
géologie...

Christian et Denise Orange s'interrogent sur les raisons de faire enseigner de nos jours la biologie et la géologie par les mêmes enseignants. Un rapide historique retrace l'évolution de ces deux disciplines, depuis leur origine commune dans

<p>... ont en commun la modélisation de systèmes complexes</p>	<p>les sciences naturelles jusqu'à cette nouvelle dénomination, qui les regroupe sous l'expression de "sciences de la Vie et de la Terre". Pour les auteurs, ce regroupement se justifie par l'existence de la même exigence : modéliser des systèmes complexes, à l'aide de modèles à compartiments de matière ou d'énergie d'une part, de modèles à rétroaction d'autre part. Ils comparent un modèle en physiologie des métabolismes (comportement du cholestérol dans l'organisme humain) et le modèle géologique BLAG (les cycles du carbone et du calcium dans l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère). Des points communs sont mis en évidence : les compartiments ne sont pas donnés mais construits, et ces modèles, dans un cas comme dans l'autre, visent à comprendre une dynamique. Quant aux modèles de rétroaction, la régulation de la glycémie en biologie et le système couplé océan-atmosphère en géologie, ils peuvent être construits, malgré leur spécificité, selon le même mode.</p>
<p>des parentés dans les modèles</p>	<p>Une seconde caractéristique commune aux deux disciplines concerne la présence de "processus contingents" dans les deux cas, comme la disparition d'une espèce et l'arrivée d'un tremblement de terre. Ces phénomènes, qui n'obéissent pas au hasard, exigent pour se produire un certain nombre de conditions, et sont irréversibles.</p>
<p>de mêmes obstacles à la modélisation...</p>	<p>Travailler à la modélisation des systèmes complexes trouve sa justification dans la similitude de raisonnements-obstacles mis en jeu par les élèves (étudiants de première année d'IUFM et élèves de Première S), tels que le raisonnement séquentiel qu'ils utilisent aussi bien à propos de nutrition cellulaire qu'à propos de tectonique des plaques.</p>
<p>... favorisent une synergie dans les projets de formation</p>	<p>Les auteurs concluent que leur analyse ne conduit pas automatiquement à la nécessité de faire enseigner les deux disciplines par le même professeur, d'autres rapprochements étant possibles et riches. Ils affirment cependant que ce qui conditionne le choix des disciplines à coupler (biologie-chimie ou biologie-géologie) doit relever d'une synergie didactique.</p>
<p>le décalage entre mots et concepts</p>	<p>Le vocabulaire hérité de la géologie antérieure à la tectonique des plaques est devenu source d'ambiguïté : le même mot ne désigne plus la même réalité. Christiane Haguénauer met l'accent sur le décalage advenu entre les concepts et les mots qui les désignent. La granulite, qui identifiait il y a trente ans un granite à deux micas, désigne aujourd'hui une roche métamorphique formée à partir de roches basiques, comme les basaltes ou les marnes.</p>
<p>nécessite un travail sur les cadres de référence</p>	<p>Puisqu'il ne peut changer les mots, l'enseignant est invité à préciser les cadres de référence, en entraînant les élèves à mobiliser les concepts dans des cadres repérés dans l'espace et le temps. Partir de la surface pour construire le concept de recyclage des roches, c'est la stratégie proposée par Christiane Haguénauer. Elle pense que l'ouverture des cycles permet d'éviter de réduire à un aspect technique (représentation circulaire) le concept de recyclage (transformation de la matière). Les observations de surface favorisent</p>

cycles ouverts et recyclage de la matière

la construction du concept de recyclage de la matière (à cause du cycle ouvert) et permettent l'application du principe d'actualisme. Elle revalorise ainsi la géologie dite de surface, qu'on pourrait avoir tendance à minorer par rapport à celle dite des profondeurs.

des obstacles pour comprendre la formation des fossiles

Colette Gouanelle et Patricia Schneeberger partent d'une analyse des représentations de jeunes élèves sur les fossiles et une caractérisation des obstacles à la compréhension de leur formation. Elles décrivent des propositions d'activités d'enseignement à proposer pour dépasser ces obstacles : construire une échelle des temps géologiques en ficelle, mouler des coquilles dans du plâtre, visiter une exposition pour répondre à des questions, remettre en ordre les étapes d'une bande dessinée. Ces propositions sont insérées dans un dispositif de formation professionnelle destiné aux enseignants de l'école primaire, qui a pour ambition de constituer une entrée facilement maîtrisable dans l'enseignement scientifique en même temps qu'une introduction à la réflexion didactique.

propositions pour la classe et pour la formation professionnelle

activités sur des images

Jean-Charles Allain propose un dispositif didactique utilisant des images pour faire évoluer les conceptions des élèves de dix ans sur les séismes : des images descriptives mais aussi des images qui rendent visible l'invisible, des images pour rendre lisible, ou des images pour rendre perceptible ce qui ne l'est pas à échelle humaine. Dans ce dispositif, les séquences d'enseignement alternent avec des épreuves-test qui permettent de suivre pas à pas les conceptions des élèves exprimées en réponse à la question : "*Peux-tu expliquer pourquoi la terre tremble ?*" L'article analyse trois cas contrastés. Bien que les parcours soient différents, on observe pour l'ensemble du groupe une évolution satisfaisante : les élèves adhèrent majoritairement aux théories mobilistes à la fin de la séquence d'enseignement, et voient dans les mouvements des plaques la cause essentielle des séismes. Cependant l'idée que le magma est uniforme sous les plaques subsiste. C'est une limite de la construction conceptuelle obtenue à cet âge, renforcée d'ailleurs par les documents eux-mêmes, ce sera le rôle de l'enseignement ultérieur de la dépasser. L'auteur constate l'efficacité des images qui fournissent des éléments d'explications, en faisant ressortir l'essentiel. Les images en mouvement apparaissent plus efficaces que les images fixes. Les images des vidéos permettent aux enfants de schématiser les mécanismes des tremblements de terre. Ces images jouent un rôle irremplaçable dans la construction des concepts scientifiques, en favorisant des opérations mentales de déséquilibre et d'élaboration des connaissances.

pour faire évoluer les idées des élèves sur les séismes

les images explicatives semblent jouer un rôle déterminant

Marie Sauvageot-Skibine tente de répondre au dilemme rencontré par les enseignants des sciences de la Vie et de la Terre : intéresser les élèves, les motiver et poser un problème scientifique comme le demandent les Instructions officielles. Or le point de départ des élèves n'est jamais un

de la curiosité
des élèves
au problème
scientifique :

problème scientifique, car celui-ci ne peut être posé correctement que si on connaît la réponse. L'enseignant, lui, peut le faire, mais il risque de ne pas captiver les élèves, le problème pouvant leur paraître "parachuté" ou académique. Après avoir recensé les différentes façons de démarrer une séquence, l'article propose de faire un détour, en partant d'une situation qui suscite la curiosité, pour poser un problème scientifique avec les élèves, sans que celui-ci soit annoncé comme tel.

l'exemple
d'une situation-
problème sur
la formation
des fossiles

L'expérience menée dans des classes de collège prend comme point de départ une émission de télévision sur les dinosaures et la question d'un chanteur populaire à un paléontologue. C'est en essayant de répondre à cette question que les élèves travailleront à franchir un obstacle, celui de la préexistence de la roche par rapport au fossile. L'article retrace la séquence et l'analyse à l'aide d'une grille proposée par l'équipe de didactique des sciences de l'INRP. La présence des dix caractéristiques des situations-problèmes est examinée à la lumière des réactions des élèves. Cette tentative qui déstabilise l'enseignant, au moins au début, a le mérite d'essayer de rendre le savoir opérant.

Le renouvellement de la géologie n'est que partiellement reflété dans ces deux numéros

didactique de
la géologie et
réalité de
l'enseignement

Les numéros 20 et 21 d'*Aster* espèrent apporter une contribution à la réflexion sur l'enseignement de la géologie. Penser un peu plus l'enseignement scientifique, et tout particulièrement celui des sciences de la Terre, en termes de séquences centrées sur des obstacles, pourrait aider les enseignants, parfois un peu déroutés par l'évolution récente et rapide de cette discipline.

Nous sommes bien conscients, par rapport à ce dernier aspect, des limites de ce que nous proposons dans ces deux numéros. Si le thème des volcans et des tremblements de terre est particulièrement bien représenté, il faut savoir cependant que cela reflète la réalité de l'enseignement. Pour des raisons retracées par certains auteurs, comme l'attrait du spectaculaire, l'accrochage sur l'actualité, ce sont des thèmes parmi les plus traités en géologie, en tous cas à l'école primaire. Certaines propositions l'utilisent comme point de départ pour aborder la structure de la terre. Une variété d'autres thèmes font par ailleurs l'objet d'études, depuis la formation des fossiles ou des roches à la géologie de surface.

Des articles hors du thème central

dessin d'humour
et réseau
conceptuel des
apprenants

Dans le numéro précédent, un article analysait, en contrepoint par rapport au thème central, une approche originale de travail sur les conceptions des élèves et sur l'élaboration d'images mentales de concepts, qui utilisait deux dessins d'humour se rapportant au génie génétique.

savoirs
théoriques,
savoirs pratiques

obstacles
épistémologiques
et sémiologie

Ce numéro est également complété par deux articles qui ne se rattachent pas directement au thème. Nous tenons à garder dans la revue la possibilité de publication d'articles d'actualité, qui offrent une ouverture et permettent de rendre rapidement compte de certains travaux. L'article de Peny Papadogeorgi sur la notion d'hybridation est issu d'un mémoire de DEA. Il propose une réflexion épistémologique à propos d'un contenu d'enseignement très lié à une technique de production agricole, ce qui oblige à se poser la question des relations entre savoirs théoriques et savoirs pratiques. Marc Weisser, s'appuyant sur sa thèse, emprunte son cadre théorique à la sémiologie de Peirce pour interpréter d'une façon nouvelle les processus d'apprentissage scientifique dans le contexte scolaire.

Marie SAUVAGEOT-SKIBINE
Attachée linguistique,
Service culturel de l'ambassade
de France
Le Caire, Égypte

LA FONCTION NÉGATIVE DANS LES SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

Guy Rumelhard

En biologie et en géologie la conceptualisation du négatif (inhibition, suppression, catabolisme, érosion, subduction, etc.) a rencontré de nombreux obstacles tous liés à une très forte dévalorisation de tout ce qui peut constituer une destruction, une dégradation, une disparition. Cet article analyse donc certains de ces obstacles spécifiques à tel domaine, ou communs à plusieurs. Cette conceptualisation occupe une place latérale, ou, au contraire, centrale selon qu'il s'agit d'analyser des lois de la nature, ou son organisation, ou bien de raisonner sur le jeu des possibles en intégrant, dans une dernière étape, le concept d'entropie.

Dans les diverses disciplines des Sciences de la Vie et de la Terre, on peut relever des mots, des expressions ou des concepts qui désignent "quelque chose de négatif" : inhibition, inactivation, tolérisation, inhibiteur, répresseur, supprimeur, antagoniste, antihormone, catabolisme, cataclysme, érosion, subduction, chaos, etc. Nous nous proposons de rechercher s'il n'existerait pas des propriétés ou des obstacles communs à ces différentes **conceptualisations du négatif** permettant de caractériser ce que l'on pourrait nommer "une fonction négative". Nous analyserons quelques exemples en biologie et en géologie.

1. LE NÉGATIF EST PRÉSENT DANS TOUS LES DOMAINES

1.1. Les mécanismes de régulation

En biologie le concept de régulation apparaît comme une nécessité des systèmes. À toute activation ou amplification doit nécessairement correspondre une fonction négative : inhibition ou suppression, sinon le système risque de s'emballer. L'un des premiers mécanismes de régulation a consisté à mettre des pierres lourdes sur les roues des moulins à vent, certaines étant accrochées par des cordes et pendant librement de manière à freiner automatiquement toute accélération inopinée... et à permettre au meunier de dormir ! Mais un objet technique n'est pas immédiatement un concept, et encore moins la généralisation de ce concept aux diverses situations que l'on peut percevoir actuellement comme analogues. L'importance de cette fonction négative dans les divers domaines où se spécifie le concept de régula-

dans un système, à toute amplification doit correspondre un frein

tion semble toujours **sous-estimée**, ou **retardée**, ou **confondue** avec l'opposition de deux **forces antagonistes**, ou avec la simple absence d'action.

Dès 1906 Sherrington analyse la contraction d'un muscle extenseur obtenue en réaction à son étirement, puis l'inhibition de cette contraction réflexe lors de la traction sur le muscle antagoniste fléchisseur (Dewaele, 1994). Il affecte d'un signe plus (+) et d'un signe moins (-) les deux muscles dont les réactions sont croisées. Mais chez lui, initialement, l'idée d'une régulation de la longueur, que l'on nomme réflexe myotatique, n'est pas présente. Sherrington conçoit l'inhibition mais dans le cadre de deux **influences antagonistes** et non pas comme un mécanisme propre à chaque muscle.

l'inhibition est
un blocage actif

Il serait très significatif de suivre l'apparition et l'extension du **concept d'inhibition** dans l'étude du **système nerveux** ainsi que dans la compréhension du fait que certaines hormones inhibent, alors que, initialement, le terme signifie "exciter". Notons simplement que, lors de l'étude des réflexes conditionnels et de leur inhibition, on a longtemps considéré que la répétition du signal conditionnel seul entraînait la **disparition** de la réaction conditionnelle et non pas son inhibition. L'idée d'un **blocage actif négatif** est-elle plus difficile à concevoir qu'une absence ?

il existe
nécessairement
des mécanismes
suppresseurs

L'ensemble des **réactions immunitaires** n'est conçu comme formant un **système fonctionnel** qu'au début des années 1970. Antérieurement il s'agissait plutôt de réactions déclenchées de manière circonstancielle. La nécessité d'une fonction négative apparaît alors (inhibition, suppression). Dans la mesure où le système n'est pas seulement anatomique, mais fonctionnel, dans la mesure où des cellules et des anticorps sont fabriqués brusquement et en très grand nombre, il doit exister une **fonction de régulation** visant à **freiner** et revenir à l'état initial, il doit exister des "cellules suppressives". Ainsi Richard Gershon constate en 1971 qu'en transférant des cellules spléniques d'animal tolérant à un antigène donné, il inhibe la réponse à cet antigène chez l'hôte qui est normalement répondeur. Il attribue d'abord cet effet à une substance immuno-suppressive, puis à des lymphocytes qu'il nomme "suppresseurs". Il ne semble pas concevable qu'un lymphocyte puisse se multiplier et sécréter ses produits de manière illimitée d'autant que la réaction est initialement "explosive" (effet booster). Quand un lymphocyte inactif est stimulé pour répondre, l'effet est amplificateur, et quand la cellule répondeuse est très active l'effet régulateur est suppresseur (Moulin, 1991). En fait le mécanisme exact et parfois l'existence même de ces cellules suppressives sont encore en discussion.

Depuis le début des années 1960, la génétique moléculaire tente de donner un contenu précis et de plus en plus complexe au concept de **régulation génétique**. Sans détailler ici tous les travaux de F. Jacob, J. Monod et de bien d'autres,

induction
généralisée ou
répression
permanente

nous soulignerons seulement que le concept de répresseur a eu quelque mal à s'imposer. Dans les années soixante, Léo Szilard et Jacques Monod se sont affrontés sur le choix du modèle à adopter pour la régulation enzymatique chez *Escherichia coli*. Monod était en faveur d'un modèle d'induction généralisée où la synthèse était déclenchée par un activateur. Dans un second temps, il se rallia au modèle par répression proposé par Szilard en 1960. La **répression permanente** de la synthèse de l'enzyme est un phénomène qui caractérise le gène sauvage. Szilard concevait d'autres applications du modèle par répression, par exemple dans sa théorie raffinée de la formation des anticorps : l'antigène entre dans le lymphocyte où il se lie aux récepteurs qui répriment la formation d'anticorps. L'antigène lève cette inhibition. Monod avait trouvé initialement difficile d'admettre la répression comme la situation normale. Une répression occasionnelle serait plus facile à admettre qu'une répression permanente (Morange, 1994).

1.2. L'immunologie

Bien avant la conceptualisation des cellules suppressives le négatif avait fait son apparition parmi les réactions immunitaires dans deux domaines.

la sélection
clonale implique
une tolérance

Tout d'abord l'annulation d'une réaction immunitaire normalement attendue et la conceptualisation de l'idée de tolérance, tolérance naturelle au soi, ou tolérance acquise dans un but thérapeutique. Le cadre théorique hypothétique de la sélection clonale imaginé par Burnet implique la tolérance, c'est-à-dire une **fonction active de suppression** des réactions contre son propre "soi", pour rendre compte de ce qui peut apparaître comme une simple absence de réponse immunitaire dans une approche simplement empirique. Il faut concevoir plus qu'une **simple absence** de réponse.

l'autodestruction
de soi-même

L'autre domaine de l'immunologie qui implique du négatif concerne l'auto-immunité et les **maladies auto-immunes**. Au début du siècle les scientifiques, encouragés par les nombreuses réussites dans le domaine des vaccins contre des cellules infectieuses, tentent également de fabriquer des sérums cytotoxiques pour tel ou tel organe mais dans un but thérapeutique : détruire de manière très spécifique. Mais les procédures d'immunisation sont grossières et les résultats incertains. Finalement toutes les tentatives d'utilisation thérapeutique des sérums cytotoxiques ou de leurs antagonistes, les antisérums, ont échoué. Après la première guerre le thème de l'auto-immunité **disparaît** des discours. Au nombre des facteurs expliquant cette disparition Anne-Marie Moulin propose d'ajouter *"la montée, entre les deux guerres, de la psychanalyse et des théories psychologiques de la maladie. À cette période la psychologie et la psychanalyse ont pris en charge nombre de maladies-frontières ou de troubles inclassables. Dans la théorie psychanalytique, le moi jouait un grand rôle et assurait des fonctions de suppression"*

le moi freudien
a une fonction
de suppression

*des affects, expliquant nombre de déplacements et de refoulements. Par opposition l'idée de la maladie se faisait, en médecine, plus réductionniste et plus positive sinon positiviste. Le **travail du négatif**, l'autodestruction devenait l'apanage de la « psyché ». Réciproquement la fonction régulatrice du moi était ainsi perdue pour la biologie et renvoyée à des instances conçues d'une manière de moins en moins matérielle, contrairement aux premières orientations de Freud." On voit se dessiner actuellement, et précisément dans le domaine de l'immunologie, des tentatives pour rapprocher le "soma" et la "psyché" et réintégrer une fonction négative au cœur de l'immunologie. Par ailleurs l'idée d'auto-immunité resurgit dans le domaine très particulier et longtemps isolé de l'hématologie. On a continué à rechercher des nouveaux groupes sanguins en inoculant des globules rouges à des individus appartenant à la même espèce, et à des espèces différentes. La découverte du système rhésus en 1940 réapporte brutalement l'idée négative et insupportable d'anticorps fabriqués "logiquement" par la mère contre son propre enfant (Moulin, 1991).*

1.3. L'érosion des terres émergées

l'érosion est
une perte

La géologie offre plusieurs exemples de conceptualisation du négatif au premier rang desquels il faut certainement placer l'érosion des terres émergées. Comme le montre G. Gohau, la géologie naissante de la fin du XVIIIème siècle et du début du XIXème siècle bute sur cette **perte de matière**. Toutes les théories de la Terre depuis Descartes ont pour ambition d'expliquer la **formation** du globe et non sa destruction. Descartes lui-même ne semblait pas se préoccuper de la lente destruction des reliefs par l'érosion. Mais même si d'autres auteurs s'en préoccupent, tel Bourguet, et tentent de les évaluer, ils ne leur font jouer aucun rôle positif (Gohau, 1990).

Hutton paraît avoir été le premier à comprendre le rôle de la destruction des reliefs dans le cycle géologique. L'existence d'une discordance angulaire telle qu'il la figure en 1795 (voir ci-contre), c'est-à-dire l'observation de couches redressées surmontées de couches horizontales, avait bien été remarquée mais de manière anecdotique. L'idée de discordance suppose que les terrains redressés par les mouvements tectoniques ont été ensuite arasés par l'érosion avant d'être à nouveau recouverts par la mer permettant ainsi le dépôt de couches horizontales. Le négatif est intégré dans le cycle géologique, où il joue un rôle précis. Mais la contrepartie de l'érosion est que les cycles **effacent les traces** de leur passage. Le passé antérieur au dernier cycle doit être considéré comme à jamais perdu. Ainsi ce concept de discordance ne permet pas immédiatement de datation sinon de manière relative : le mouvement est postérieur à la couche tectonisée la plus récente et antérieur à la plus ancienne des couches non affectées. Mais toutes les couches tectonisées sont-elles

pour autant de même âge, et soulevées par une **révolution unique** qui aurait effacé toute trace antérieure ?

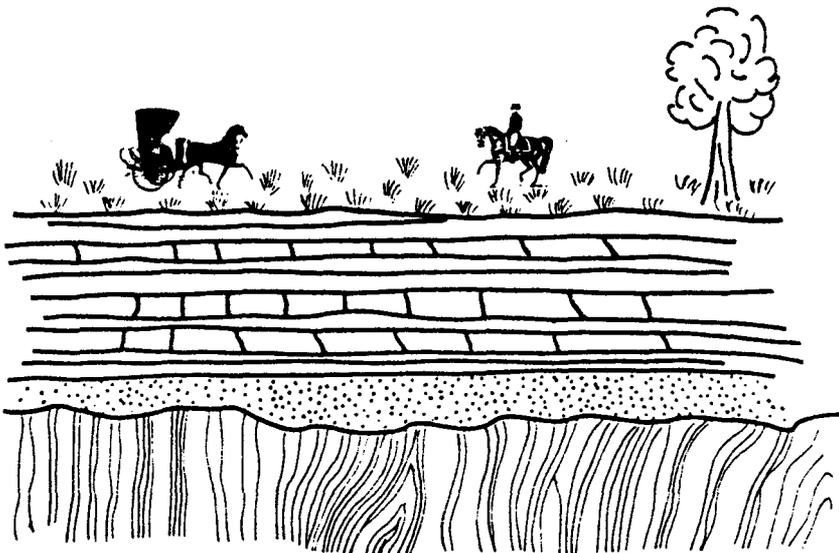
On verra ainsi d'autres auteurs plus préoccupés de datation des terrains, plus préoccupés d'analyser les "archives de la Terre", continuer à ne **tenir aucun compte** de l'érosion et des discordances. Elie de Beaumont n'observe pas à proprement parler les discordances ; il voit en plaine les couches horizontales, puis en montagne les couches redressées. C'est parce qu'il ne tient pas vraiment compte de l'érosion qu'il opère ainsi.

Il faudra encore du temps pour comprendre que si l'érosion efface les archives, elle laisse cependant des empreintes qu'il est possible de déchiffrer. La base de la géologie réellement historique réside dans sa capacité à transformer en archive tout ce qui vient déranger accidentellement l'organisation de la nature, et non à le rejeter comme accident.

On peut alors concevoir **plusieurs cycles d'érosion** interrompus par des événements tectoniques et orogéniques aboutissant à chaque fois à des formes nouvelles.

Figuration d'une discordance angulaire d'après Hutton (*Theory of the Earth*, 1795)

Extrait de Gabriel GOHAU. *Histoire de la Géologie*. La Découverte. p. 122



Les couches inférieures verticales sont les « racines » d'anciens plis qui ont été en partie détruits par l'érosion. Sur la surface d'aplanissement est revenue une mer qui a déposé les couches supérieures horizontales.

1.4. La subduction

l'érosion explique
les discordances

Dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, en géologie, on conçoit qu'il existe des zones d'accrétion dans lesquelles se forment un plancher océanique nouveau, des zones de collision entre plaques qui créent des chaînes de montagne, et des zones de subduction dans lesquelles une plaque s'enfonce sous une autre à de très grandes profondeurs. Les modalités précises en sont variées.

certaines
plaques
disparaissent

Dans un article sur la subduction, Xavier Le Pichon (1980) écrit que *"la subduction est sans conteste le phénomène dynamique et énergétique majeur de notre globe"*. Une grande partie du volcanisme et des séismes lui correspond en effet. Mais, poursuit-il, si ses manifestations indirectes sont nombreuses, spectaculaires et parfois dramatiques, c'est un phénomène difficile à caractériser par des manifestations **directement observables** "en surface" de la Terre, cette "surface" étant cachée, en tout état de cause, sous 3 à 11 km d'eau, et le phénomène se poursuivant sur plus de 400 km en profondeur. Selon cet auteur, il existe une difficulté supplémentaire liée à la nature même de la subduction qui est de **faire disparaître** et non de créer. Nous mettrions ici le doigt sur un "obstacle épistémologique" : comment observer positivement une disparition ? Cette difficulté rejoint les difficultés rencontrées pour caractériser l'invisible, les microbes par exemple, ou les anticorps avant de disposer de techniques appropriées. Pour conceptualiser une disparition il faut une **théorie forte**. L'empiriste sera ici pris en défaut.

peut-on observer
une disparition ?

Séismes et volcans sont bien évidemment connus et décrits depuis longtemps. Les volcanologues et les géophysiciens ont dressé des cartes des guirlandes insulaires, dessiné le lieu géométrique des tremblements de terre, lieu qui s'enfonce à plus de 400 km selon un plan décrit par Wadati dans les années trente et confirmé par Benioff. Le volcanologue japonais Kuno émet l'hypothèse que l'origine des laves se situe sur ce plan. Et pourtant le concept de subduction n'interviendra qu'après la compréhension du fonctionnement des dorsales. Pour les dorsales les **observations positives** et **directes** sont nombreuses : mesure des distances grâce aux satellites, mesures des anomalies magnétiques et établissement de la carte en "peau de zèbre", datation des couches par carottage, exploration avec les soucoupes Cyana et Alvin.

On pourra ainsi observer que, dans les manuels scolaires et universitaires, le rôle des dorsales a été très fortement exagéré et celui de la subduction **très minoré**, la subduction est "déduite" de l'existence d'une expansion océanique, à condition bien évidemment de ne supposer ni augmentation de volume de la Terre, ni lieu de rétraction ou de compression. Les dorsales constituent même parfois le "moteur" de la tectonique des plaques, alors que les auteurs actuels

il est aisé
d'observer
une apparition

attribuent à "la **traction des zones de subduction**" 80 % de l'énergie nécessaire au déplacement (Thomas, 1992).

Il reste cependant que, dans l'état actuel, la disparition semble irrémédiable, et l'espoir de retrouver un plancher océanique daté de plus de 200 millions d'années vain. En attendant, comme pour l'érosion, de savoir convertir des indices en "archives de la Terre".

2. LE JEU DES POSSIBLES ET DES CONCEPTS EN ATTENTE

2.1. Penser les combinaisons conduit à penser les pertes

l'idée d'atavisme
récuse les pertes

La pensée commune admet volontiers que des créations d'êtres ou de choses ont lieu, mais que "rien ne se perd". La génétique mendélienne apporte la supposition d'une combinatoire d'éléments (qui seront nommés gènes). Dès que les gènes sont nombreux, les possibilités de gamètes le sont aussi. Toutes les fécondations n'auront pas nécessairement lieu, sauf sur de très grands nombres, et ainsi certaines combinaisons seront "**perdus**" dans la descendance. Ce que nous expliquent également les mécanismes de la méiose. On a pu montrer que la pensée des élèves s'appuie au contraire sur le modèle humain de l'**héritage** et accepte difficilement cette perte. Les travaux de Naudin, parfois considéré comme précurseur de Mendel, s'appuient sur une conception de l'**atavisme**. Il cherche la **vitesse de "retour"** aux caractères ancestraux qui ne peuvent avoir disparu (Rumelhard, 1986).

toutes les
combinaisons
possibles ne sont
pas retenues

Les promoteurs de l'anatomie comparée proposent le concept de plan d'organisation. Certains auteurs considèrent alors les éléments qui entrent dans la constitution de ces organisations comme des unités isolables et dont on peut **concevoir des combinaisons** à l'infini. Or l'une des idées importantes de l'anatomie comparée est précisément d'affirmer que toutes les combinaisons ne sont pas possibles. Tout n'est pas permis dit Buffon. Tout ne peut pas être. Avant que n'apparaisse une pensée transformiste susceptible d'expliquer "*la descendance avec modifications*" comme dira Darwin, il faut d'abord créer une rupture dans "*la chaîne continue des êtres*". La pensée commune croit volontiers que tout est possible, sans règles (Rumelhard, 1995). Pour concevoir le transformisme, il faut **retrancher des possibilités** de variation et non pas en ajouter. La fonction négative apparaît ici comme une fonction réaliste, destructrice de rêves et d'imaginations trop libres !

Darwin ne pense pas explicitement en termes de combinatoire. Il adopte cependant les calculs prévisionnels de Malthus qui proposent un modèle d'évolution des popula-

tions. Le concept de sélection naturelle en dérive, en dépit d'un terme mal choisi car il ne s'agit pas d'un choix positif électif-sélectif. Darwin a une idée féconde du négatif car il conçoit que la confrontation des individus aux contraintes du milieu entraîne l'élimination des moins aptes. C'est ce même terme qui sera repris par les immunologistes pour désigner la "sélection clonale" sans toutefois lever les ambiguïtés du mot.

2.2. L'absence n'a pas de valeur négative

certains organes
ont disparu

Les classifications zoologiques de type dichotomique utilisent souvent des distinctions en présence/absence : Vertébrés Gnathostomes et Agnathes (présence/absence de mâchoire inférieure) ; placentaires et aplacentaires, etc. Mais **la signification de l'absence** n'est pas toujours la même. Si les Orvets sont apodes, on peut considérer, dans le cadre de la théorie sur l'évolution, qu'il s'agit d'une **disparition**. Si les Myxines n'ont pas de mâchoire inférieure, il est tentant de considérer "qu'elle n'est pas encore apparue" puisque tous les autres Vertébrés en ont une.

Lorsque Lamarck est chargé de classer "les animaux sans vertèbres", on peut considérer que l'expression désigne simplement un ensemble hétéroclite dans lequel il s'agit de mettre de l'ordre. L'appellation est alors provisoire. Mais comme il prétend classer les animaux selon une **série unique linéaire et progressive**, selon "une échelle des êtres", le terme d'invertébré désigne alors **un manque** qui conduit à les considérer comme inférieurs. Cette définition par la négative devient un obstacle dans la mesure ou elle empêche d'observer les différences positives qui font l'originalité des divers embranchements (*).

ceci n'implique
aucune infériorité

Par ailleurs Darwin propose de référer le mode de vie et le comportement d'un animal à son milieu spécifique de vie, milieu qui comprend d'autres vivants. L'Orvet et la Myxine n'ont alors aucune **infériorité**. Toute hiérarchisation de valeur qui prend bien entendu le point de vue humain comme référence, doit alors disparaître. L'animal n'est pas un être privatif par rapport à l'homme. L'animalité ou, pire, la bestialité, avait valeur négative et méprisante pour l'homme. L'animal ne contient pas, en creux, la promesse de la future apparition de l'espèce humaine. Réciproquement l'animalité cesse d'être tenue pour la menace permanente de l'humanité, le risque de sa dégradation. "L'animalité c'est le souvenir de l'état pré-scientifique de l'humanité, c'est sa pré-histoire organique et non pas son anti-nature métaphysique." (Canguilhem, 1968)

(*) Dans un autre domaine, mais dans le même ordre d'idée, on conviendra que parler de non-croyant ou d'incroyant vise à dénier un statut positif à celui qui est apparemment "privé de quelque chose".

2.3. La santé s'éprouve au contact de la maladie

l'enseignement
ne définit pas
la santé

L'enseignement de la biologie ne se préoccupe en général pas de définir positivement la santé. Il se contente souvent de la formule célèbre de R. Leriche : "c'est la vie dans le silence des organes", définition négative par l'absence apparente de pathologie ressentie ou détectée (Canguilhem, 1966).

L'enseignement se propose également explicitement de réaliser une éducation à la santé qui n'est pas toujours une éducation à la responsabilité. L'observation des manuels donne plus le sentiment d'une volonté de normaliser les attitudes et les comportements. Tout se passe comme s'il suffisait de décrire certaines maladies, leurs risques et les moyens de les prévenir. Fumer du tabac est (statistiquement) dangereux pour soi et pour son entourage, donc il faut éviter de fumer, et éviter de se trouver dans la situation d'inhaler la fumée des autres. Voilà la santé.

la santé
s'éprouve au
contact de la
maladie

G. Canguilhem, l'un des premiers, a défini la santé non pas uniquement comme un état, ni seulement comme la capacité à conserver, ou à restaurer la normalité et les normes qui la constituent, mais surtout comme **la capacité à les dépasser** et à en **instaurer de nouvelles**. "*L'abus possible de la santé fait partie de la santé*", et cette formule sera aisément admise par un adolescent qui souhaite se dépasser sinon "s'éclater". Autre formule : "*la santé est un luxe biologique, celui de pouvoir tomber malade et de s'en relever*". À condition d'admettre qu'un luxe biologique n'est pas un superflu, mais bien au contraire une fonction de première et élémentaire nécessité. La définition est cette fois dans l'ordre du plus-que-positif. La santé devient le concept d'une **aveur latente, un concept en attente de sa mise à l'épreuve**. Avant de tomber malade, on ne sait pas si on s'en relèvera. Le concept de santé **s'éprouve** au contact de valeurs négatives que sont les maladies (Canguilhem, 1966).

le contraire
n'est pas le
contradictoire

Pour mieux définir un concept scientifique, on cherche parfois à caractériser son contraire et son contradictoire. Ainsi le mot de pathologie est parfois considéré comme équivalent de maladie dans certains cas au moins. Il est alors immédiatement couplé au "normal". C'est l'occasion de confronter un concept à son contraire et son contradictoire. Nous ne ferons ici que poser les questions. Pathologique est-il un concept identique à celui d'anormal ? Est-il le contraire ou le contradictoire du normal ? Et normal est-il identique à sain ? Et l'anomalie est-elle même chose que l'anormalité ? Et que penser enfin des monstres ? Et toutes les pathologies, du daltonisme au cancer sont-elles comparables quant à leurs conséquences sur la vie biologique, affective, sociale ? (Canguilhem, 1965).

2.4. La définition de la vie intègre la mort

Il ne serait pas paradoxal que la plupart des manuels d'enseignement de biologie ne cherchent pas à définir ce qu'est "la vie" si ce mot avait l'évidence d'une chose aussi directement observable que l'est, pour le géologue, la surface visible de la Terre, et ses manifestations dynamiques (séismes, volcans, érosion).

Bien évidemment on peut, après des discussions historiquement longues, retenir quelques propriétés communes aux "corps vivants" telles la croissance et la multiplication.

les définitions
vitalistes
ont échoué

Jean Rostand qui dirige en 1965 la publication du volume *Biologie de l'Encyclopédie de la Pléiade* souligne cette difficulté : *"encore que nous soyons dans l'impossibilité de définir à la rigueur le phénomène connu sous le nom de vie, on s'accorde à distinguer, dans les productions de la nature, les corps bruts et les corps vivants, ceux-ci étant suffisamment caractérisés par la faculté d'accroissement, qui entraîne l'aptitude à la reproduction"* (Rostand, 1965). Son rationalisme militant l'a conduit à congédier d'une manière qu'il pense définitive les débats philosophiques et à exorciser toute métaphysique. Pour lui le progrès décisif provient d'un rationalisme de laboratoire qui distingue rigoureusement "les données d'observation ou d'expériences" et leur interprétation, qui sépare les "faits" et les hypothèses. Il admet que le biologiste moderne devient "un inventeur de phénomènes", un "contremaitre de la création" qui produit une nouvelle nature, qui ajoute à la réalité, mais qui cherche fondamentalement à l'expliquer en termes uniquement physico-chimiques et mathématiques. Or à l'époque on n'a trouvé aucune loi ou aucune entité qui pourrait constituer "le secret de la vie". Et en 1962 un chimiste, E. Kahane, a pu écrire *"La vie n'existe pas"*. Il faut comprendre que toute définition positive de la vie a échoué : le vitalisme qui a tenté de s'opposer aux excès d'un réductionnisme s'érigeant en philosophie et non pas seulement en méthode d'investigation, n'a produit aucun concept convaincant et opérant qui pourrait lui être opposé.

pour chaque
individu,
la vie existe

Dans le vocabulaire courant, le mot vie reste et restera indéracinable. Il est très largement utilisé pour désigner de manière métaphorique et fortement valorisée tout ce qui semble avoir au moins partiellement telle ou telle propriété des vivants : mobilité, chaleur, croissance, multiplication, sensibilité. Sous cet angle, dit une publicité pour une eau minérale recueillie sous des laves volcaniques : *"la Terre est une planète vivante, en activité. Les volcans sont les manifestations de cette vie intérieure"*... et l'eau minérale filtrée sur ces laves ne peut qu'avoir des propriétés favorables.

Pendant tout le XIX^{ème} siècle, après la création du mot biologie (science de la vie) en 1802, la question "qu'est-ce que la vie ?" est une question vive de la recherche. Claude Bernard, cofondateur de la Société de Biologie, propose deux formules volontairement contrastées : *"la vie c'est la*

création" (1865) et "*la vie c'est la mort*" (1875). On pourrait penser que ces deux formules ont totalement perdu de leur actualité et de leur acuité depuis l'apparition de la biologie moléculaire. En effet F. Jacob (1970) écrit "*on n'interroge plus la vie aujourd'hui dans les laboratoires*". Mais on continue d'interroger "les vivants" (au pluriel), et si on ne cherche plus "les lois", ou "les secrets de la nature", F. Jacob tente cependant de décrire "*la logique du vivant*" (au singulier). La description de la prodigieuse diversité des vivants n'exclut pas la question de l'unité du vivant.

la vie intègre
la mort

La définition de la vie conçue par Bichat en 1802 comme "*l'ensemble des forces qui s'opposent à la mort*" conserve un caractère vitaliste. Que sont ces forces antagonistes qui s'affrontent ? Comment caractériser positivement une fonction de résistance à la dégradation et à la destruction ? La biologie moléculaire propose de considérer la mort non pas comme le **contraire** de la vie, mais comme une fonction génétiquement programmée. Le contraire de la vie c'est la déviation, la déformation, la création de monstruosité ou de vivants monstrueux. Par ailleurs, et nous y avons déjà fait allusion, la création d'un brassage génétique par le jeu de la sexualité propose un rôle positif à la mort, à travers les contraintes du milieu.

la vie c'est le jeu
des possibles

L'autre formule de Claude Bernard aurait pu prendre une coloration romantique que rappelle le sens premier du mot végétation : non pas végéter, mais proliférer. Mais si l'on veut bien ne pas la cantonner dans la description de la "biodiversité", et dans la célébration du "génie végétal" ou du "génie animal", on peut dire que la génétique moléculaire est venu effacer (exorciser) toute trace de romantisme et de métaphysique contenue dans l'expression "*la vie c'est la création*". Les mécanismes génétiques produisent incessamment du nouveau qui sera **confronté aux conditions du milieu**. Le concept de vivant n'est plus uniquement le concept de ce qui existe positivement, mais de **ce qui peut potentiellement exister**. C'est le concept du "jeu des possibles" à un moment donné, dans un milieu donné, une sorte de **concept en attente** de sa réalisation. Et si, de plus, l'expérimentateur est lui-même créateur de situations et d'objets biologiques nouveaux, qui n'existent pas dans la nature, il apparaît alors de manière nette que l'objet "vivant" étudié est un **objet conçu et construit**, et non plus seulement un objet "donné" par l'observation directe. La définition opératoire est alors de l'ordre du "plus-que-positif" !

Les gènes suppresseurs modifient la lecture du code génétique.
(Extrait de WATSON. *Biologie moléculaire du gène*. Édiscience.)

« Des erreurs dans la lecture du code génétique se produisent aussi dans les cellules vivantes. Ce sont ces erreurs qui expliquent le phénomène des gènes suppresseurs. Pendant de nombreuses années, on considéra leur existence comme un paradoxe inexplicable. On connaissait de nombreux exemples dans lesquels les effets de mutations nocives étaient annulés par un second changement génétique. Il était très facile d'expliquer certaines de ces mutations secondaires car il s'agissait de *réversions* qui rétablissent la séquence nucléotidique mutée dans sa structure originale. Mais il était beaucoup plus difficile de comprendre d'autres mutations, localisées dans des positions différentes sur le chromosome et qui suppriment les effets d'une mutation au site A en produisant un changement génétique au site B. Ces mutations de type *suppresseur* se divisent en deux catégories : celles dues à un changement des nucléotides dans le gène où s'est produite la mutation originale, encore que sur une autre portion du gène (suppression *intragénique*) et celles se produisant dans un autre gène (suppression *intergénique*). Les gènes qui provoquent la suppression des mutations d'autres gènes sont appelés *gènes suppresseurs*. »

Mutation faux-sens ou contre-sens

remplacement d'un codon spécifique d'un acide aminé par un autre codon correspondant à un autre acide aminé (*missense* en anglais).

Mutation non-sens

remplacement d'un codon spécifique par un codon qui ne correspond à aucun acide aminé, mais à l'un des trois codons terminateur de chaîne (*nonsense* en anglais).

Mutation reverse

mutation qui restitue la séquence initiale des nucléotides d'un allèle précédemment modifié par une mutation (retour à l'état initial mal traduit en français par "inverse").

Mutation suppressive

qui rétablit, en tout ou partie, une fonction annulée par une mutation initiale, mais qui est localisée dans un autre site génétique que cette dernière.

3. LE NÉGATIF N'EST PAS SEULEMENT LE CONTRAIRE. LES PRÉFIXES ANTI, CONTRE, NON, ET LES AUTRES

Dans les exemples précédents plusieurs concepts négatifs semblent se présenter simplement comme le contraire d'un concept positif. Ce n'est certainement pas systématiquement le cas et si inhibition ou suppression sont le contraire de stimulation ou activation, le catabolisme l'inverse de l'anabolisme, l'inverse de l'expansion océanique n'est pas la contraction, mais la subduction.

les préfixes ont
plusieurs sens

On peut cependant tenter d'explorer les divers sens possibles de préfixes utilisés pour créer des termes scientifiques à partir d'autres termes scientifiques existants. On peut ainsi espérer dégager quelques indications sur la variété des sens et leur éventuelle confusion qui peut faire obstacle.

Les mots se décomposent en éléments lexicaux dont certains peuvent être regroupés en préfixes ayant au moins partiellement une signification propre. Nous nous garderons de penser qu'une catégorie de préfixes puisse avoir une signification unique, ni que plusieurs préfixes ne puissent avoir le même sens étymologique initial, ni qu'ils ne sont pas modifiés par la construction du mot auquel ils participent. Nous avons retenu principalement les préfixes anti, contre et non. Parfois les dictionnaires, dans le but de mieux définir un terme, ajoutent son antonyme (ici le i s'élide), mais il apparaît très vite que ce "contraire" peut avoir des significations variées (contraire, contradictoire, renversement) qui ne clarifient pas le sens positif. Sans compter que, par antiphrase, y compris en science, on peut jouer de l'euphémisme ou de l'ironie.

distinguer
le contraire,
le renversé et
le réversible

Anti est d'origine grecque et signifie en général "contre". C'est un préfixe remarquablement fécond car il permet de composer un grand nombre de mots nouveaux à la demande en l'ajoutant devant un mot existant pour désigner en général "le contraire". Mais tous les mots construits avec anti en préfixe ne signifient pas cela (antiphonaire, antienne). Par ailleurs l'opposé d'anti est "pro" qui dérive du latin et signifie "pour", à ne pas confondre avec le "pro" grec qui signifie "devant" ou "avant" comme dans programme, ou prophase. Sans analyser la totalité des mots ayant anti pour préfixe on peut distinguer plusieurs significations possibles parmi les termes du domaine scientifique :

- antimatière ou antiproton ne seraient que des particules affectées du signe "moins", le négatif de la matière mais aussi sa dématérialisation ;
- anticlinal désigne deux couches de terrain inclinées en sens contraire ou opposé, mais antipode ajoute l'idée d'un renversement ;
- deux muscles antagonistes agissent en **sens opposé**, sans que l'un soit privilégié, mais l'antidote, l'antitoxine, l'anti-

le négatif peut être valorisé

dépresseur agissent contre, empêchent, combattent, évitent, et sont fortement valorisés ;

- l'individu anti-nucléaire agit activement pour porter la **contradiction** vis-à-vis de ceux qui sont favorables à l'utilisation civile ou militaire de ce type d'énergie.

Et les scientifiques n'ont pas toujours apporté le soin nécessaire à la fabrication de mots nouveaux : anticorps est anti car il a longtemps été désigné comme l'effecteur, ce qu'il n'est plus. Antigène n'est anti rien, et se contente de "donner naissance" (gène) aux anticorps (anti), et encore pas toujours !

On pourrait également examiner : antigestatif, codon antisens, antioncogène, anticoopérativité dans le cas des enzymes allostériques.

Contre a en général le sens d'une opposition mais pas dans les mots contre-chant ou contrepoint musical. Lui aussi sert à fabriquer, à la demande, de nombreux mots en se plaçant devant avec un trait d'union, ou non.

Au niveau des concepts scientifiques on retrouve également plusieurs sens possibles :

- le contre-poison correspond à l'antidote ; comme le contraceptif il est **valorisé** ;
- la contre-régulation conduit à un effet de sens opposé, même s'il n'est pas exactement symétrique (insuline/glucagon...) ; dans ce cas on pourrait parler de **renversement** (hypo/hyper) ;
- le contre-coup est de sens inverse, mais il s'y ajoute l'idée de **conséquence** indirecte ;
- au plan de la méthode scientifique, la contre-épreuve a le sens d'une contre-expertise, c'est-à-dire d'une **épreuve de contrôle**. C'est Claude Bernard qui l'introduit, mais le contenu exact de cette épreuve reste à inventer dans chaque expérience. De même toute hypothèse avancée par un savant sera contrecarrée par des objections, ou des contre-propositions. Mais rien ne dit comment les inventer.

Non est également utilisé devant certains mots avec un trait d'union, et permet une création efficace. La racine grecque "u" (non) n'est utilisée que dans utopie (non, lieu = topos) et le très rare uchronie (non, temps).

le non-soi doit être différencié

Les mathématiciens définissent, en logique, A et non A. Simple partition en deux classes que l'immunologiste imite à tort avec le soi et le non-soi. En effet le système immunitaire différencie précisément le non-soi pour le reconnaître spécifiquement et non pas comme une catégorie globale unique qu'identifierait une sorte de "colle universelle" du non-soi !

- Non-fumeur n'a pas simplement la signification d'une absence ou d'un interdit ; le non-fumeur n'a pas seulement envie de faire le contraire, il veut s'opposer activement, et même **apporter la contradiction**.

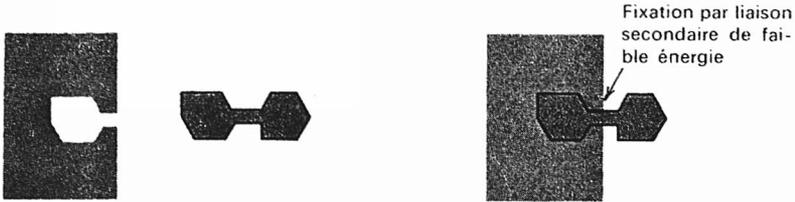
- Les géométries non-euclidiennes ne sont pas "opposées", mais simplement **construites autrement**, sur d'autres

non peut signifier
autrement

axiomes, un peu comme dans le tissu non-tissé les fibres sont reliées autrement de manière physique ou chimique.

D'autres préfixes sont utilisés : **"in"** qui se transforme au contact des mots qu'il précède en il, ir, im comme dans incoagulable, irréductible, immuniser etc. Sur le mode imagé on peut aussi citer **para, cata** (du haut en bas, image de la descente, donc de la dégradation et du négatif). Arrêtons-nous encore un instant sur le mot **inverse**. Certaines mutations génétiques sont dites et à tort "reverses" en anglais et inverses en français, mais le fran-glais propose en français "mutations reverses". En anglais, la "reversion" est le retour ou la réversibilité et non pas l'inversion. Quant au mathématicien il sait bien que les nombres inverses ne sont ni renversés, ni réversibles !

Schéma illustrant les effets des co-répresseurs et des inducteurs sur l'activité des répresseurs. Selon que les enzymes sont inductibles ou répressibles, les répresseurs libres sont soit actifs soit inactifs.
(Extrait de WATSON. *Biologie moléculaire du gène*. Édiscience. p. 386.)



(a) Répresseur *actif* de la β -galactosidase + β -galactoside (inducteur) \rightleftharpoons complexe *inactif* répresseur-inducteur

(Empêche la synthèse de β -galactosidase)

(Incapable de contrôler la synthèse de β -galactosidase)



Répresseur *inactif* de l'histidine + histidine (co-répresseur) \rightleftharpoons complexe *actif* co-répresseur répresseur

(Incapable de contrôler la synthèse des enzymes de la biosynthèse de l'histidine)

(Contrôle le taux de synthèse des enzymes de biosynthèse de l'histidine)

CONCLUSION

Il est peu utile de rappeler la dévalorisation évidente attachée *a priori* à tout ce qui est négatif : destruction, disparition, dégradation. Nous avons souligné dans les divers exemples, et selon les cas, une attitude qui va de la simple inattention, au refus et au rejet violent. De la simple érosion, ou de la désorganisation apparente des couches de terrain, à la maladie des animaux ou de l'homme, ou à l'autodestruction par maladie auto-immune.

il faut une théorie
pour chercher
les indices
d'une disparition

Ce refus entretient le mythe de l'atavisme, de l'héritage que l'on conserve et éventuellement enrichit, le mythe du retour, de la réversibilité ou la croyance dans le fait que "rien ne se perd". Nous avons noté la confusion entre le contraire et le contradictoire, l'inverse, le renversement et le réversible. La séduction du spectacle de la lutte, de l'affrontement entre forces opposées, induit la pensée par couples opposés, par couples antagonistes ou forces contraires (hypo/hyper). La conceptualisation du négatif implique de disposer d'un modèle ou d'une théorie pour "observer" les indices d'une disparition, pour comprendre, derrière une simple absence, la présence d'un blocage actif.

Si l'on accepte de tracer à grands traits les étapes du travail des scientifiques, on peut faire la distinction suivante.

- Il existe une étape entièrement positive au cours de laquelle on recherche, derrière un désordre apparent de la nature, **des régularités, des invariants et des "lois"** ; et plus particulièrement en biologie et géologie, faute de trouver des "lois", **on recherche un ordre**, une organisation. Le négatif est ici exclu ou intégré positivement.

- Une autre étape a consisté à se doter de modèles proposant une combinatoire permettant de **raisonner sur des cas possibles**. Positivement cette combinatoire permet d'imaginer des cas très rares, et un brassage des patrimoines génétiques. Mais il faut ici intégrer la perte, la sélection, les cas non réalisés ou létaux.

le principe de
dégradation,
second principe
de la thermo-
dynamique

- Une étape plus difficile à franchir a consisté à tenir compte d'un accroissement de l'entropie, autrement dit d'une **évolution vers un plus grand désordre**. Le concept de régulation qui a dû, pour se constituer, abandonner l'idée d'une harmonie préétablie, s'est d'abord présenté comme le concept du maintien, ou du "retour" à un état initial. Il devient actuellement une fonction de **retardement de la dégradation** inévitable. Cette fois le négatif est au cœur-même du concept (Rumelhard, 1994).

Finalement, le progrès conceptuel consiste à intégrer réellement la flèche du temps, c'est-à-dire l'impossible retour, la perte irrémédiable, l'intervention d'événements non prévisibles, la mise à l'épreuve des valeurs négatives : maladie et guérison jamais assurée, monstruosité. La fonction négative

devient la fonction réaliste, destructrice de rêves. Même si l'ordre peut provenir, temporairement et statistiquement du désordre, en biologie et géologie la science constitue le réel comme le lieu de l'impossible retour.

Guy RUMELHARD
Lycée Condorcet, Paris
Équipe de didactique des sciences
expérimentales, INRP

BIBLIOGRAPHIE

- CANGUILHEM G. (1965). "Le normal et le pathologique". In *Connaissance de la vie*. Paris, Vrin, p. 155-169.
- CANGUILHEM G. (1966). *Le normal et le pathologique*. Paris, PUF.
- CANGUILHEM G. (1968). "L'homme et l'animal du point de vue psychologique". In *Études d'histoire et de philosophie des Sciences*. Paris, Vrin, p. 112-125.
- DEWAELE J. (1994). "Activité de modélisation dans l'enseignement du réflexe myotatique". In *La régulation en biologie*. Paris, INRP, p. 107-129.
- GOHAU G. (1990). *Les sciences de la terre aux XVIIe et XVIIIe siècles. Naissance de la Géologie*. Paris, Albin Michel, p. 270, 329-331 et 345-348.
- JACOD F. (1970). *La logique du vivant*. Paris, Gallimard.
- LE PICHON X. (1980). "La subduction : quand la terre s'enfonce sous la terre". *La Recherche*, 109, p. 272-281.
- MORANGE M. (1994). *Histoire de la biologie moléculaire*. Paris, La Découverte.
- MOULIN A.-M. (1991). *Le dernier langage de la médecine*. Paris, PUF, p. 322-327.
- ROSTAND J. (1965). *Biologie. Encyclopédie de la Pléiade*. Paris, Gallimard.
- RUMELHARD G. (1986). *La génétique et ses représentations*. Berne, Peter Lang.
- RUMELHARD G. (1995). "Permanence, métamorphose, transformation". *Biologie-Géologie (Bulletin de l'APBG)* 2, p. 333-345.
- RUMELHARD G. (1994). "Histoire didactique du concept de régulation en biologie". In *La régulation en biologie*. Paris, INRP, p. 39-65.
- THOMAS P. (1992). "Structure et dynamique du globe terrestre". In PÉRILLEUX E. *Enseigner la géologie au collège et au lycée*. Paris, Nathan, p. 150.

GÉOLOGIE ET BIOLOGIE : ANALYSE DE QUELQUES LIENS ÉPISTÉMOLOGIQUES ET DIDACTIQUES

Christian Orange
Denise Orange

La géologie et la biologie, deux disciplines issues des sciences naturelles, sont enseignées en France par le même professeur. Ce regroupement a-t-il encore une signification épistémologique et didactique ? Nous voulons montrer que ces deux domaines sont confrontés l'un comme l'autre à des modélisations de systèmes complexes de matière et d'énergie et que cette convergence peut être utilisée pour faciliter la maîtrise par les élèves de tels modèles. Plus généralement, c'est la question de la synergie didactique entre disciplines qui est posée.

Biologie et géologie sont liées dans l'enseignement français. Ne doit-on voir dans ce regroupement qu'une trace de péri-péties historiques ou peut-on lui trouver un véritable intérêt didactique ?

Cette interrogation paraît nécessaire à un moment où la vaste entreprise de réforme des programmes, commencée en 1988, est tentée de faire éclater la biologie-géologie au profit d'autres regroupements.

biologie-géologie
une discipline
ambiguë ?

Il est vrai qu'il y a dans cette discipline, héritière des sciences naturelles, beaucoup d'ambiguïtés. Les sections universitaires correspondantes sont maintenant nettement séparées ; et s'il est clair que les professeurs de biologie-géologie se démènent, par l'intermédiaire de leur association (l'APBG) pour conserver ces deux enseignements, beaucoup d'entre eux se disent moins attirés par la géologie et assez peu enclins à l'enseigner.

Sans prétendre analyser complètement le problème, nous voulons ici proposer des axes de recherche, avec deux intentions :

- montrer que, si les liens entre biologie et géologie ont nettement changé, ils ne sont pas des points de vue épistémologique et didactique, insignifiants ;
- explorer la possibilité de s'appuyer sur ce double enseignement pour aider les élèves à dépasser certaines difficultés de compréhension ou de raisonnement qu'ils rencontrent dans l'un et l'autre de ces domaines.

Nous commencerons par replacer la discipline scolaire biologie-géologie dans son contexte historique ; puis nous présenterons quelques convergences épistémologiques des sciences de la vie et des sciences de la Terre ; pour finir,

nous comparerons certaines difficultés des élèves en biologie et en géologie, en particulier dans la fonction explicative du temps.

1. DE L'HISTOIRE NATURELLE AUX SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

Comprendre les rapports entre biologie et géologie dans l'enseignement nous oblige à nous pencher brièvement sur une histoire qui explique sinon justifie leur regroupement dans une même discipline scolaire. Il s'agit de donner un contexte aux analyses didactiques qui vont suivre.

des sciences
naturelles...

La discipline scolaire qui est retenue au début du XIX^{ème} siècle, lorsque les programmes d'enseignement se fixent, est l'histoire naturelle ou sciences naturelles. Elle peut se prévaloir, à cette époque, d'une unité naturaliste qui est avant tout une unité de méthodes : les domaines scientifiques qu'elle réunit ont alors pour méthode d'investigation principale, l'observation (1).

Cela ne va pas durer : dans la deuxième partie du même siècle, la physiologie, par exemple, devient expérimentale avec en particulier les travaux de Claude Bernard.

aux sciences
de la Vie et
de la Terre

Cependant, malgré l'évolution méthodologique et la séparation de plus en plus nette des activités scientifiques qui les composent, les sciences naturelles restent longtemps à l'école une discipline unifiée, dans son intitulé tout au moins. S'il est vrai que les termes de biologie ou de géologie apparaissent, au cours des années soixante, comme titre de certains manuels (de Terminale ou de Quatrième par exemple) on trouve "*Sciences naturelles*" sur des livres de Seconde jusqu'en 1985 (2). Viendront après les "*Sciences et techniques biologiques et géologiques*" (1987), puis les "*Sciences de la Vie et de la Terre*" (1992).

Pendant ce temps, dans les universités, la séparation est consommée. C'est d'abord la mise en place des maîtrises de spécialité qui font qu'une partie des futurs enseignants de biologie-géologie n'ont pratiquement pas étudié la géologie. Finalement, on propose même en 1993 de supprimer les licences et maîtrises de sciences naturelles (3).

Tout cela a des effets sur l'enseignement lui-même. La géologie, relativement peu présente dans les programmes, est absente des examens jusqu'en 1994 (4). Les enseignants de biologie-géologie étant le plus souvent des biologistes, Marc Tardy, président du Groupe technique disciplinaire des

-
- (1) ASTOLFI J.-P., RUMELHARD G. ; article "Biologie" in *Dictionnaire encyclopédique de l'éducation* ; Paris, Nathan, 1994.
 - (2) Alors que d'autres s'intitulent "Écologie" (*Écologie, Classe de Seconde*, collection Désiré, Armand Colin).
 - (3) Voir *Biologie-Géologie*, revue de l'APBG ; 1993, 1, p. 23.
 - (4) Si on excepte l'évolution. Mais est-ce de la géologie ou de la biologie ?

sciences de la Terre et de l'Univers (5), estime qu'au début des années 90, en lycée, la partie géologie n'est enseignée que dans 30% des cas. Les prétextes sont bien connus : les programmes chargés et la nécessaire préparation à l'année de Terminale.

En 1992, le Conseil National de Programmes envisage une nouvelle délimitation des domaines disciplinaires des CAPES. Il propose des regroupements nouveaux comme biologie-chimie et physique et sciences de la Terre et de l'Univers. Si le maintien d'un CAPES biologie-géologie est envisagé, c'est avec ce commentaire :

biologie-géologie
ou
biologie-chimie ?

• *Le couplage biologie-géologie est maintenu. Il peut être en partie justifié par l'approche naturaliste commune aux deux disciplines. Mais depuis qu'elles ont recours à des lois physico-chimiques pour devenir plus explicatives, elles ont divergé. Une bonne formation en chimie est certainement plus nécessaire à l'appropriation des mécanismes fondamentaux de la vie qu'une formation en géologie.* » (6)

On a là ce qui peut paraître comme les conclusions naturelles du rapide historique que nous venons de tracer. Ces propositions n'ont pas encore été suivies d'effet ; mais, comme en réaction, la géologie est, depuis les nouveaux programmes de lycée (1992), présente à tous les niveaux, y compris en Terminale.

Que reste-t-il alors des sciences naturelles, sinon une juxtaposition de deux disciplines par habitude et nécessité de ne pas multiplier les catégories d'enseignants ? La biologie et la géologie ont-elles encore quelque chose de commun du point de vue des connaissances et de leurs apprentissages ?

2. BIOLOGIE ET GÉOLOGIE : QUELQUES CONVERGENCES ÉPISTÉMOLOGIQUES

Il y a cependant quelques raisons de compliquer cette chronique d'une séparation annoncée. Des indices semblent contredire l'évolution nécessairement divergente de la biologie et de la géologie : ainsi Claude Allègre, l'un des géologues les plus célèbres de France et certainement l'un de ceux les plus opposés dans les années 70/80 aux approches strictement naturalistes, écrit maintenant des livres où il est question de biologie. L'un d'eux s'intitule même : *Introduction à une histoire naturelle* (7). Caprice d'une star de la science ou

tout n'est pas
si simple !

-
- (5) Rapporté par CHEVALIER G. ; "Une révolution dans la conception des programmes" in *Sciences à l'école : les raisons du malaise ; Science et Vie hors série* n°180, septembre 1992, p. 144.
 - (6) L'APBG analyse les propositions du Conseil National des Programmes : *Biologie-Géologie*, 1992, 1, p. 21-24.
 - (7) ALLÈGRE Cl. ; *Introduction à une Histoire naturelle* ; Paris, Fayard, 1992.
ALLÈGRE Cl. ; *Écologie des villes et écologie des champs* ; Paris, Fayard, 1993.

trace d'une nouvelle façon de nouer biologie et géologie ? Derrière une préoccupation fort louable au sujet des rapports entre l'Homme et la nature, que traduit le fait qu'un scientifique s'autorise à changer ainsi de domaine (8) ?

Si on cherche ce qu'il y a de commun aujourd'hui à la biologie et à la géologie, on peut interroger leurs objets d'études, complémentaires : il s'agit, dans l'un et l'autre cas, d'étudier des particularités d'un certain système, la Terre. La géologie est bien l'étude de la Terre, même si elle a des relations avec l'ensemble des sciences de l'Univers ; la biologie est l'étude d'un phénomène, la vie, apparue sur une planète particulière, la Terre.

Mais il y a plus, et de plus fondamental : nous voulons mettre en avant deux caractéristiques communes à la biologie et à la géologie.

La première se rapporte à la modélisation des systèmes complexes. La phrase du Conseil National des Programmes citée plus haut appuie ses analyses des relations entre la biologie et la géologie sur le développement dans ces deux domaines d'explications physico-chimiques : « *depuis qu'elles ont recours à des analyses physico-chimiques pour devenir plus explicatives, elles ont divergé* ».

Il est vrai que ce n'est pas la même chimie qui est en cause dans ces deux sciences, et la physique n'y joue pas le même rôle ; les modèles de la biologie moléculaire ne mobilisent pas *a priori* les mêmes réactions que la différenciation magmatique.

Mais peut-on réduire la biologie et la géologie à des problèmes d'analyses physico-chimiques ? Ce serait là limiter ces deux sciences à une approche réductionniste (9) stricte qui négligerait par trop l'organisation des systèmes. La Terre et les êtres vivants sont des systèmes complexes (10) dont l'étude nécessite le recours à d'autres descriptions dont certaines sont communes à la biologie et à la géologie. Nous allons illustrer cela simplement par deux types de modèles : les modèles à compartiments de matière ou d'énergie d'une part, les modèles à rétroaction de l'autre.

penser les
systèmes...

(8) Cette évolution dans les livres de vulgarisation de Claude Allègre semble accompagner un changement de thème de recherche de son équipe qui est passée d'une géologie profonde à une géologie externe.

(9) Le terme "réductionniste" n'est aucunement employé ici de manière péjorative ou polémique. Il définit, selon René Thom, des modèles dont le projet est d'expliquer un phénomène par une description, à un niveau microscopique, du même domaine spatial.

THOM R. ; *Paraboles et catastrophes* ; Paris, Flammarion, 1983, p. 10, 84, 85.

(10) On prend ici la définition que H.A. Simon donne pour les systèmes complexes : ils s'agit de systèmes « *dans lesquels le tout est plus que la somme des parties, non pas dans un sens métaphysique, mais dans un sens pragmatique important, tel que, étant donné les propriétés des parties et les lois de leur interaction, il n'est pas trivial d'en inférer les propriétés du tout* ». Cité par Mayr :

MAYR E. ; *Histoire de la biologie* ; Paris, Fayard, 1989 (1982), p. 63.

et penser
l'histoire

La seconde caractéristique commune que nous voulons pointer, et qui n'est certainement pas étrangère à la première, concerne le rapport au temps dans les deux champs scientifiques comparés ici. Il s'agit, en particulier, d'étudier l'idée de "processus contingents" qui ressort des analyses de Gould, d'Allègre et de Stengers (11).

2.1. Les modèles à compartiments en biologie et en géologie

« Les modèles à compartiments sont utilisés pour représenter principalement les transferts de matière (flèches) entre des unités fonctionnelles ou de stockage qui sont représentées par des compartiments différents (boîtes). » (12)

transferts de
matière et
d'énergie...

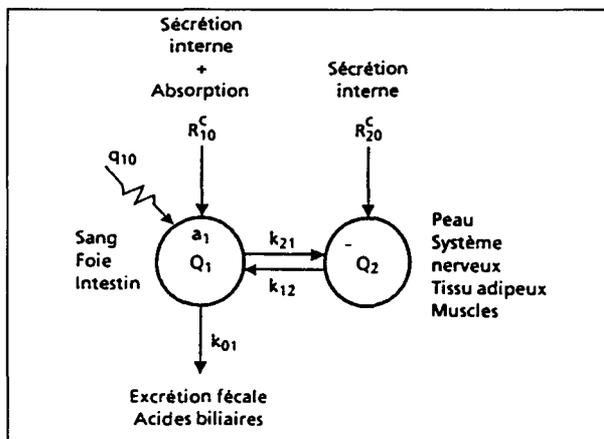
À ce titre de tels modèles sont utilisés dans plusieurs domaines biologiques : physiologie des métabolismes, écologie, dynamique des populations. Mais ils sont également présents en géologie.

en biologie...

La figure 1 correspond à un modèle compartimental en physiologie des métabolismes (13). Il décrit le comportement du cholestérol dans l'organisme humain. Sa construction nécessite le recours à des indicateurs marqués (cholestérol marqué au ^{14}C) : c'est ce que signifie l'entrée q_{10} dans le compartiment 1.

Figure 1 - Représentation bicompartimentale du système cholestérol

(D'après Magot et Champarnaud, *La modélisation des métabolismes*, Paris, Masson, 1989)

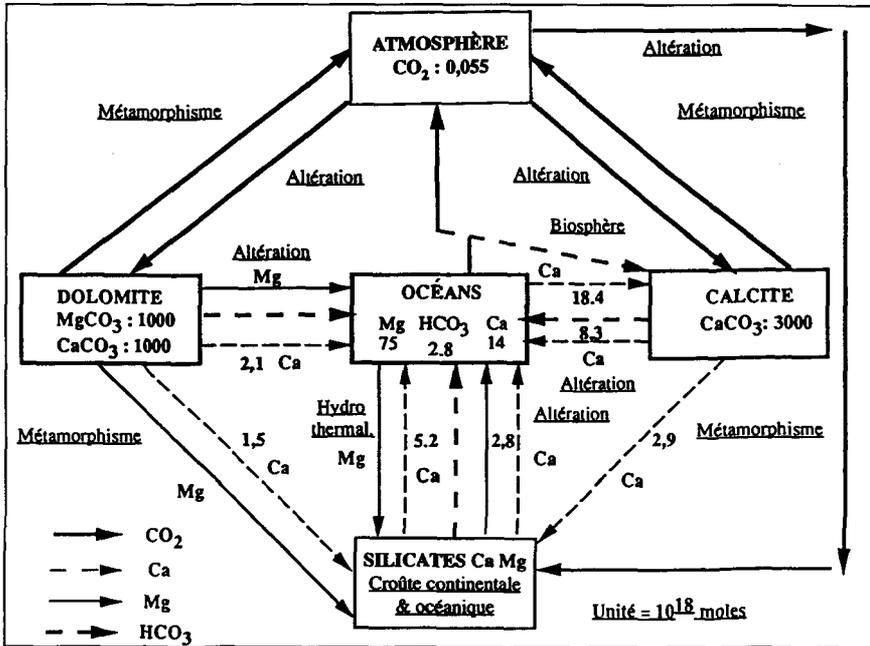


- (11) GOULD St. J. ; *La vie est belle* ; Paris, Seuil, 1991 (1989), p. 307-
STENGERS I. ; *L'invention des sciences modernes* ; Paris, Flammarion (Champs), 1995 (1993), p. 158-.
- (12) PAVE A. ; *Modélisation en biologie et en écologie* ; Lyon, Aléas, 1994.
- (13) MAGOT T., CHAMPARNAUD G. ; *La modélisation des métabolismes* ; Paris, Masson, 1989.

et en géologie

La figure 2 est une représentation du modèle géologique BLAG (Berner, Lasaga et Garrels) par Michel Steinberg (14) : il s'agit d'une description des cycles du carbone et du calcium dans l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère.

Figure 2 - Cycle simplifié du CO₂ et du calcium ne tenant pas compte des sulfates
(D'après Berner, Lasaga et Garrels)



Ce ne sont là que des exemples. Mais toutes les questions de nutrition, de la cellule à l'écosystème, peuvent être traitées par de tels modèles à compartiments. En géologie, ces modèles sont utilisés aussi bien en sédimentologie qu'en géochimie interne (15).

Le principe de tels modèles peut paraître très simple. Chaque compartiment est décrit par des variables définissant des flux d'entrée et de sortie de matière (élément chimique, molécule...) ou d'énergie, et par une variable d'état (concentration, énergie interne, masse totale...); il répond à une équation bilan qui définit la variation par unité de temps de la variable d'état en fonction de la somme algébrique des flux d'entrée et de sortie :

$$\text{variation de la variable d'état} = \text{somme des flux d'entrée} - \text{somme des flux de sortie}$$

(14) STEINBERG M. ; *Sédimentation et dynamique terrestre*, conférence donnée lors des journées nationales de l'APBG, Paris, novembre 1994.

(15) Voir, par exemple : VIDAL P. ; *Géochimie* ; Paris, Dunod, 1994, p. 109-.

Cette apparente simplicité pourrait rendre triviale l'utilisation des compartiments en géologie et en biologie. Mais derrière de tels modèles se cachent des caractéristiques épistémologiques qui méritent d'être remarquées.

Tout d'abord, s'il est clair que les méthodes empiriques des différents domaines utilisant des modèles compartimentaux varient en fonction des objets d'étude, un principe reste : les compartiments ne sont pas donnés, ils sont construits.

Rien, *a priori*, ne pose le nombre des compartiments de cholestérol comme étant égal à deux : ce choix provient de résultats expérimentaux mais aussi des projets du modélisateur.

les compartiments
ne sont pas donnés
mais construits

De même dans le modèle BLAG des éléments sont négligés comme les sulfates de calcium par exemple, toujours en fonction d'éléments théoriques et empiriques. Quant aux modèles à réservoirs du manteau terrestre, ils peuvent comporter deux, trois ou davantage de compartiments en fonction des données dont on veut rendre compte, sans que la signification de ces compartiments soit toujours totalement clarifiée (16).

D'autre part ces modèles ne cherchent pas simplement à faire le bilan de transferts et de réserves du système étudié. Ils visent à en comprendre le dynamisme : après détermination des paramètres (identification), le modèle cholestérol permet de prévoir les réponses du système à telle ou telle perturbation ; quant aux projets de Steinberg, ils consistent à « envisager le cycle global du CO₂, y compris dans ses aspects "internes", pour comprendre celui des carbonates », en mettant bien en avant que la tectonique des plaques est le principal moteur des variations (17).

Enfin l'utilisation de tels modèles par les scientifiques ne va pas de soi. S'ils s'imposent progressivement en biologie par exemple, c'est avec quelques problèmes : les physiologistes ou les écologues ont assez souvent regardé cette modélisation comme discutable, en partie parce qu'elle abandonne l'aspect descriptif naturaliste (18). On est là devant un choix méthodologique et épistémologique.

Ces modèles à compartiments de matière et d'énergie posent également problème aux élèves. Les études que nous avons pu mener en lycée (19), montrent qu'ils se heurtent à des difficultés dont certaines tiennent à leurs modes d'explication et de raisonnement spontanés par rapport aux flux de

(16) Ibidem.

(17) STEINBERG M., op. cit. (14).

(18) ORANGE C. ; *Intérêt de la modélisation pour la définition de savoirs opérants en biologie-géologie ; exemple de la modélisation compartimentale au lycée* ; Thèse de doctorat de l'Université de Paris 7, 1994, p. 117-121.

MATTHEY W. ; "L'écologie, prototype d'approche globale" in SCHWARTZ E. (éd.) *La révolution des systèmes* ; Fribourg, Delval, 1988.

(19) ORANGE C., 1994, Ibidem.

matière et d'énergie et d'autres à des obstacles propres aux domaines modélisés. Il y a donc un vrai travail didactique à faire autour de ces modèles, et leur utilisation possible sur des domaines variés, en biologie et en géologie, est un des éléments à prendre en compte.

2.2. Les modèles à rétroaction en biologie et géologie

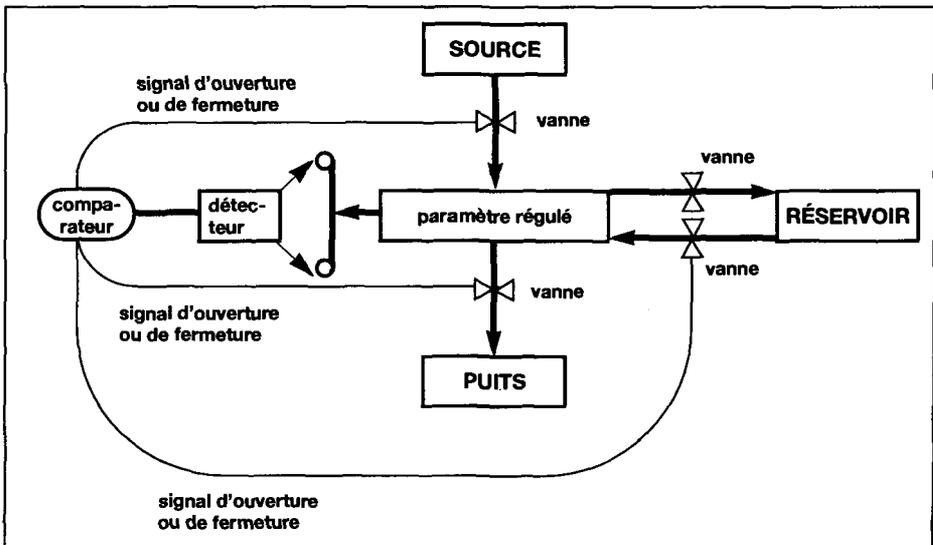
mécanismes régulateurs...

« Le concept de régulation est un de ceux sur lesquels repose la biologie moléculaire », écrit François Jacob (20). On a donc là un concept central de la biologie, ce qui explique qu'il est enseigné en lycée depuis 1952 (21).

en biologie...

On peut dire, pour simplifier, que la question des régulations en biologie est essentiellement étudiée au lycée au travers de modèles cybernétiques, même si cela est rarement explicite dans les manuels (22). Ces modèles, dont la figure 3 donne un exemple (23), s'appuient sur un certain nombre de concepts dont celui d'information et celui de rétroaction.

Figure 3 - Structure d'un modèle de régulation
(à partir du modèle général de J. de Rosnay, *Le macroscopie*, Paris, Seuil, 1975, p. 66)



(20) JACOB, F. ; *La logique du vivant* ; Paris, Gallimard, 1970.

(21) RUMELHARD G. ; "Un exemple de modélisation en biologie : les mécanismes de régulation" in MARTINAND J.-L. et al., *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences* ; Paris, INRP, 1992.

(22) SCHNEEBERGER P. ; *Problèmes et difficultés de l'enseignement d'un concept transversal : le concept de régulation* ; Thèse de doctorat de l'Université de Paris 7, 1992.

(23) D'après Joël de Rosnay, modifié :

Mais le **concept de rétroaction** est également utilisé en géologie. Nous prendrons un exemple dans le système couplé atmosphère-océan. Voici comment Gurvan Madec (24) décrit le fonctionnement de ce système aux latitudes moyennes :

et en géologie

« Aux moyennes latitudes, l'océan est un partenaire stabilisateur. Dans ces régions, chaque bassin océanique est caractérisé par une vaste circulation anticyclonique résultant à la fois du contraste nord-sud de la température dans l'océan et du forçage par les vents... Cette circulation océanique est un puissant moyen pour l'océan de transporter de la chaleur vers les pôles. Elle est au cœur d'une rétroaction du système couplé océan-atmosphère : si la circulation océanique ralentit, elle transporte moins de chaleur ; le contraste thermique nord-sud s'accroît dans l'océan et par contrecoup dans l'atmosphère, ce qui intensifie les vents et donc relance la circulation océanique. Nous avons là une rétroaction dite négative qui tend à ramener le système vers son état d'équilibre. » (25)

Des explications de même nature peuvent également être évoquées pour la stabilité à moyen terme de structures profondes comme le manteau terrestre avec ses cellules de convection : si le gradient de température y augmente, les cellules de convection accélèrent, ce qui fait croître le flux d'énergie sortant, diminuer le gradient ... et ralentir la convection.

De tels mécanismes peuvent être qualifiés de régulateurs. Mais il faut comprendre que, contrairement aux régulations biologiques évoquées plus haut, ils ne correspondent pas à des modèles cybernétiques.

régulation
cybernétique

Dans ces derniers, on distingue en effet deux types de flux :

- d'une part les flux de matière ou d'énergie entre source, compartiment principal, puits et réserves ;
- d'autre part les flux d'information entre le détecteur comparateur et les "vannes" (voir fig. 3).

Autrement dit, dans un modèle cybernétique « le retour en arrière n'est pas un flux d'énergie » (26).

Les modèles géologiques donnés ici en exemple possèdent une rétroaction uniquement faite de flux d'énergie (sous forme de "courants" divers : solides, liquides ou gazeux). Nulle part on ne peut distinguer un détecteur comparateur qui traduit en informations les valeurs de la variable d'état

ROSNEY J. de ; *Le macroscopie* ; Paris, Seuil, (collection Points), 1975, p. 65-66.

(24) Chargé de recherche au CNRS, laboratoire d'océanologie dynamique et de climatologie de l'université de Paris 6.

(25) MADEC G. ; "La machine océan" in *L'océan Planétaire, Science et Avenir Hors série n° 98*, 1994.

(26) PAPERT S. ; "Épistémologie de la cybernétique" in PIAGET (dir.) *Logique et connaissance scientifique* ; Paris, Gallimard (*Encyclopédie de la Pléiade*), 1967, p. 831.

régulation
thermodynamique

du compartiment principal. Les variations des variables d'état des compartiments sont directement responsables, de part les principes de la thermodynamique, du flux d'énergie. Il s'agit de simples compensations, premier stade de la régulation selon Piaget (27).

Il ne faudrait pas en déduire que ces deux types de régulations, cybernétique et thermodynamique, sont spécifiques l'un de la biologie, l'autre de la géologie. Il est des problèmes où ils doivent l'un et l'autre être invoqués.

Ainsi, pour ce qui est de la régulation des populations animales par la compétition intraspécifique, on peut opposer deux modèles différents (28) :

les deux
invoquées pour
le même
phénomène

- le premier voit dans la concurrence pour la nourriture l'origine directe d'un rétrocontrôle ; en cas d'augmentation de la densité, le manque de nourriture (diminution du flux d'entrée d'énergie) provoquerait des famines et augmenterait la mortalité ;
- le second utilise des régulations étho-écologiques liées, par exemple, aux concurrences pour des territoires ou le statut social ; en cas de densité importante, ces interactions limiteraient la reproduction ou provoqueraient des migrations avant que le manque de nourriture ne se fasse sentir.

Le premier modèle est thermodynamique, le second cybernétique.

Comprendre cette alternative explicative demande de bien saisir la structure de chacun de ces modèles et leurs différences.

On voit donc que l'étude comparative de la biologie et de la géologie permet de dégager l'importance du concept de rétroaction dans les systèmes de matière et d'énergie, et la variété des logiques régulatrices impliquées.

Comme dans le cas des modèles à compartiments, des études didactiques (29) ont montré qu'un certain nombre de difficultés, voire d'obstacles, gênaient l'apprentissage des concepts de régulation. Les variations des phénomènes étudiés et des modèles mis en jeu sont des paramètres didactiques certainement importants pour ces apprentissages.

Plus généralement la comparaison biologie/géologie ouvre la possibilité d'étudier les phénomènes de couplage entre différents sous-systèmes : couplages entre les réactions chi-

(27) PIAGET J. ; "L'épistémologie des régulations" in *L'idée de régulation dans les sciences* ; Paris, Maloine, 1977.

(28) voir, par exemple :
BARBAULT R. ; "Biodémographie, logistique des populations naturelles" in *Encyclopædia Universalis*, Supplément 1985, p. 555.

(29) Voir :
RUMELHARD G., 1992, op. cit. (21).
SCHNEEBERGER P., 1992, op. cit. (22).
RUMELHARD G. ; *La régulation en biologie* ; Paris, INRP, 1995.

miques cellulaires, couplages entre les différentes parties du globe terrestre (30) etc.

des systèmes
complexes mixtes

Si on étend maintenant à des systèmes encore plus complexes notre analyse comparative de la modélisation, il apparaît que compartiments et rétroactions peuvent être utilisés simultanément dans des modèles qui relèvent d'une double approche biologique et géologique. C'est le cas, par exemple, de la question de l'effet de serre et des conséquences des activités humaines sur le climat. Réservoirs géologiques et biologiques sont en interrelation étroite et des concepts biologiques (photosynthèse, respiration...) et géologiques (circulations, profondeur de compensation des carbonates...) sont nécessaires pour développer un problème dont la complexité est présentée par Claude Allègre dans son livre *Économiser la planète* : « On se trouve dans ce qu'on appelle la logique des systèmes complexes, avec interactions, rétroactions, contrôles, etc. » (31)

Dans de tels systèmes, il apparaît de plus en plus clairement que la question du temps prend une dimension fondamentale qui donne à la biologie et à la géologie des caractéristiques épistémologiques remarquables.

2.3. La biologie et la géologie, sciences historiques

Dans son livre *La vie est belle*, Stephen Jay Gould s'appuie sur la récente réinterprétation de la faune des schistes de Burgess par Whittington, Briggs et Conway Morris, pour montrer qu'il existe certaines sciences qui ne répondent pas à la "méthode scientifique" telle qu'elle est généralement conçue.

processus
contingents...

Il faut mettre en question les conceptions traditionnelles sur le progrès et la prédictibilité dans l'histoire de la vie, et introduire une notion bien connue des historiens : la contingence. « On est obligé à présent de regarder l'imposant spectacle de l'évolution de la vie comme un ensemble d'événements extraordinairement improbables, parfaitement logiques en rétrospective et susceptibles d'être rigoureusement expliqués, mais absolument impossibles à prédire et tout à fait non reproductibles. » (32)

Aucune loi ne permet de rendre compte de la disparition d'une espèce, par exemple. Un ensemble complexe d'événements a concouru à ce résultat et nous pouvons juste découvrir certains d'entre eux à partir des traces laissées dans les formations géologiques.

Contrairement aux résultats expérimentaux, une explication historique ne peut être vérifiée par répétition ; elle ne peut

(30) COURTILLOT V. ; *Origines et manifestations dynamiques de l'énergie interne du globe* ; conférence donnée lors des journées nationales de l'APBG, Paris, novembre 1994.

(31) ALLÈGRE Cl. ; *Économiser la planète* ; Paris, Fayard, 1990, p. 193. Voir le chapitre 6 : "L'homme modifie-t-il le climat ?"

(32) GOULD St. J., 1991, op. cit. (11), p. 10.

pas non plus être ramenée à la simple mise en œuvre de lois (33).

et explications
historiques

La contingence sur laquelle insiste Gould, et qui entre en jeu aussi bien dans la décimation de la faune de Burgess que dans l'extinction des dinosaures selon la théorie d'Alvarez (34), ne doit pas être confondue avec le simple hasard. Tout n'est pas possible ; il existe des raisons nécessaires de tel ou tel événement, mais rarement des causes suffisantes. *« Une explication historique ne repose pas sur des déductions directement tirées des lois de la nature, mais d'une séquence imprévisible d'états antécédents, dans laquelle tout changement majeur à n'importe quel stade altérerait le résultat final. Ce dernier est contingent, en ce sens qu'il est dépendant de tout ce qui s'est produit auparavant - c'est ainsi que l'histoire impose sa marque ineffaçable. »* (35)

Il y a, dans la biologie et dans la géologie, une part qui relève d'explications historiques. Si vous rembobinez le film de l'histoire de la Terre, dit encore Gould, et si vous le laissez se dérouler à nouveau avec un petit nombre de changements judicieux, il n'est pas sûr que l'on aboutisse au monde d'aujourd'hui.

Ces idées sont reprises par Allègre et c'est dans ce sens que celui-ci utilise le terme d'Histoire naturelle : *« La démarche historique, qui cherche à reconstituer l'origine des choses, leur mode de genèse, leur développement, qui montre le rôle du temps, ses effets cumulatifs, ses changements de rythme... peut apporter beaucoup à la pensée scientifique. »* (36)

le temps
irréversible

Contrairement aux approches de la physique classique, cette démarche est marquée par la flèche du temps, l'irréversibilité. *« Le déroulement du temps confère à l'histoire un caractère particulier par rapport à toute construction intellectuelle cherchant à rendre compte de la nature. La vision historique a donc une originalité irremplaçable. »*

Il s'agit pour Allègre, comme pour Gould, de réhabiliter l'approche historique longtemps délaissée au profit de la science déterministe qui minimise le rôle du temps dans tout ce qu'il a d'incertain (37).

Isabelle Stengers, épistémologue qui a travaillé avec Prigogine sur les phénomènes irréversibles, s'appuie également sur les analyses de Gould et voit dans l'affirmation de singularité des sciences historiques, qu'elle appelle aussi les sciences de terrain par opposition aux sciences de laboratoire (38), un événement épistémologique crucial. Pour elle,

(33) Ibidem, p. 308-309.

(34) Selon cette théorie, l'extinction serait liée à la percusion de la Terre par une grosse météorite ce qui aurait entraîné des changements importants des conditions de vie.

(35) Ibidem, p. 312-314.

(36) ALLÈGRE Cl., 1992, op. cit. (7), p. 8.

(37) Ibidem (p. 358-360).

(38) STENGERS I., 1995, op. cit. (11), p. 158.

le livre *La vie est belle* conteste la suprématie des sciences théorico-expérimentales. Qu'il s'agisse de la théorie d'Alvarez ou de la question de l'effet de serre, « des scientifiques représentent désormais parmi nous la question des temps longs et enchevêtrés à l'origine des choses ». Avec les processus contingents, « les scientifiques ... ne sont plus ceux qui apportent des "preuves", stables, mais des incertitudes. L'incertitude irréductible est la marque des sciences de terrain. » (39)

l'incertitude
irréductible

Les parties de la biologie et de la géologie qui s'intéressent à la genèse et à l'évolution des systèmes complexes ont donc un rapport au temps différent des sciences physico-chimiques classiques. On a là une autre convergence épistémologique de ces deux domaines scientifiques qu'on ne peut négliger didactiquement.

2.4. Conclusions

l'étude
des systèmes
complexes et de
leur évolution
caractérise
la biologie et
la géologie

Si l'approche physico-chimique stricte, nécessaire pour la maîtrise d'un certain nombre de problèmes, semble séparer nettement la biologie et la géologie, l'étude du fonctionnement et de l'histoire de systèmes complexes de matière et d'énergie paraît les rapprocher (40). Ce type d'objets peut même être considéré comme une caractéristique de la discipline scolaire biologie-géologie, par rapport aux autres disciplines des "sciences de la nature" (physique et chimie).

Certes, il n'y a pas dans l'approche systémique indépendance par rapport aux référents empiriques. Chaque domaine garde ses spécificités et il reste toujours une opposition irréductible entre systèmes inertes et systèmes vivants : ceux-ci ne peuvent au bout du compte jamais se réduire à ceux-là car, pour reprendre les analyses de Jacques Monod, ils se reproduisent (morphogenèse autonome) et ils sont dotés d'un projet (téléonomie) (41).

Mais il n'en reste pas moins que des méthodes et des structures de modélisation sont communes à la biologie et à la géologie et qu'elles s'appliquent dans les deux cas à des sous-systèmes du système Terre, dont l'interaction est évidente dans des problèmes scientifiques comme ceux de l'effet de serre, de la couche d'ozone (42) et des grandes crises biologico-géologiques.

La particularité des objets d'étude de la biologie et de la géologie apparaît clairement dans leur rapport au temps. C'est l'aspect didactique de cette question que nous voulons

(39) Ibidem, p. 163-164.

(40) Comme elle les rapproche de domaines comme l'économie, par exemple. Mais celle-ci s'intéresse à d'autres objets que la matière et l'énergie.

(41) MONOD J. ; *Le hasard et la nécessité* ; Paris, Seuil (coll. Points), 1970, p. 23-29.

(42) Voir, par exemple : RASOOL I. ; *Système Terre* ; Paris, Flammarion (Dominos), 1993.

approfondir maintenant en prenant l'exemple d'un type de problèmes : ceux concernant ce qu'on peut appeler la stabilité structurelle des systèmes.

3. LE TEMPS DANS LES RAISONNEMENTS SPONTANÉS DES ÉLÈVES AU SUJET DES SYSTÈMES BIOLOGIQUES ET GÉOLOGIQUES

Ce domaine est actuellement en cours d'étude (43). Nous n'aborderons donc qu'une petite partie des problèmes didactiques qu'il pose en nous limitant à la question de la stabilité structurelle des systèmes biologiques et géologiques.

la stabilité
structurelle
des systèmes...

Lors de la modélisation de nombreux systèmes biologiques et géologiques, il faut identifier et expliquer leur stabilité structurelle : c'est-à-dire la pérennité dans le temps de leurs formes et d'autres caractéristiques malgré les flux qui les traversent et les perturbations. Cela est nécessaire pour comprendre les rapports entre structures et fonctions ; c'est également indispensable pour penser la genèse et l'évolution de ces systèmes dans toute leur complexité.

vivants...

Une telle stabilité est omniprésente dans les systèmes biologiques : *turn-over*, milieu intérieur, renouvellement des structures sont des concepts qui, d'une manière ou d'une autre renvoient à cette stabilité. Et cela est au cœur même de la vie si, pour suivre René Thom (44), on admet que l'aporie fondatrice de la biologie est de « rendre compte de la relative stabilité des formes des êtres vivants en dépit du flux continu des molécules qui les composent ».

et non vivants

Mais de telles stabilités structurelles existent également dans des systèmes non vivants : que l'on pense aux tourbillons d'une rivière (45), aux courants atmosphériques et marins, ou aux structures (dorsales, zones de subduction...) de la tectonique des plaques.

Face à de tels problèmes, il apparaît que les élèves mettent en jeu, en biologie comme en géologie, des types de raisonnement qui font obstacle à la compréhension des systèmes correspondants. Nous allons en donner ici quelques exemples.

3.1. Les élèves face à des problèmes de stabilité structurelle en biologie

Nous développerons surtout un exemple en le complétant par un rapide inventaire de problèmes analogues.

(43) Équipe de didactique des sciences, CERSE Université de Caen, IUFM et MAFPEN Académie de Caen.

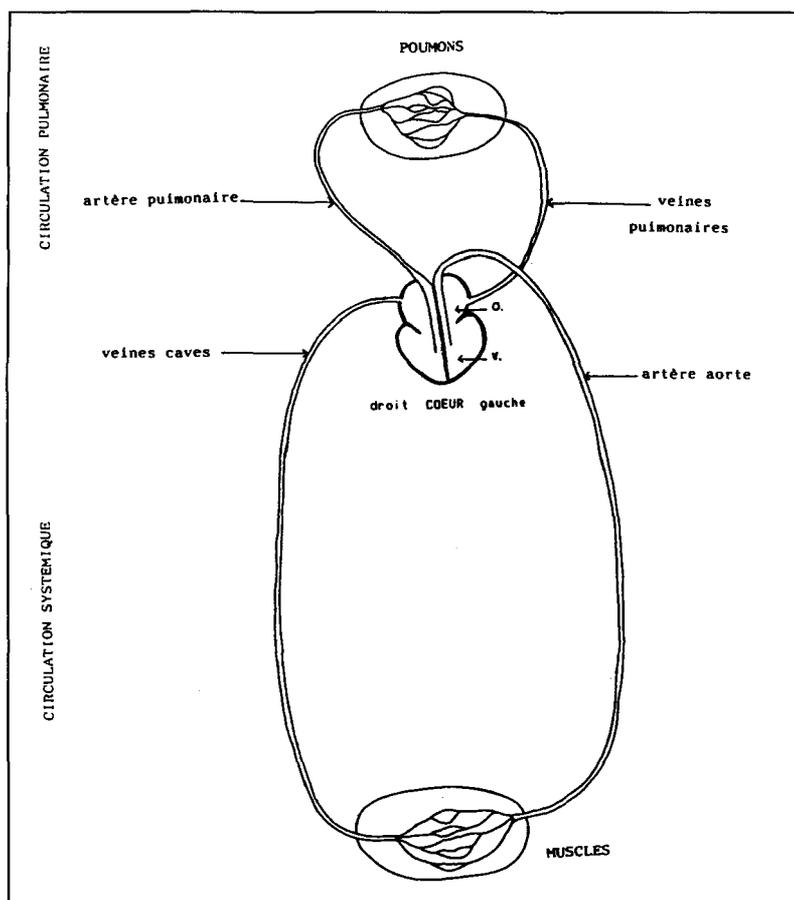
(44) THOM R., 1983, op. cit. (9), p. 159.

(45) Au sujet des tourbillons voir : MORIN E. ; *La nature de la nature* ; Paris, Seuil (coll. Points), 1977, p. 183.

Il s'agit d'un travail qui a été mené avec des élèves de lycée (Première S, option sciences expérimentales) et des étudiants de première année d'IUFM préparant le concours de professeur des écoles (PE) (46).

La situation est la suivante. Après que la classe ait clairement identifié les besoins nutritifs d'une cellule humaine (entrées de petites molécules organiques et d'oxygène, sortie de CO_2 , eau et déchets azotés), on propose aux élèves ou aux étudiants le schéma de circulation reproduit à la figure 4.

Figure 4 - Schéma incomplet de circulation sanguine proposé comme base pour la construction du modèle



(46) Recherche menée par Christian Orange, Denise Orange, Christian Ridaou.

quel modèle pour la nutrition des cellules ?

Il paraît vite clair à tous qu'un tel schéma permet d'approvisionner les cellules en oxygène et de récupérer le CO₂.

On demande alors aux élèves (ou aux étudiants) de placer sur ce circuit, qu'ils peuvent modifier comme ils le veulent, le tube digestif et les reins de façon à satisfaire les autres conditions de la nutrition des cellules (approvisionnement en petites molécules organiques, élimination des déchets azotés). Dans une très grande majorité, ils construisent des modèles du type de celui de la figure 5.

Le tube digestif, les organes (avec les cellules), et les reins y sont disposés en série et dans cet ordre.

Il faut comparer cette proposition avec le modèle généralement admis de la circulation sanguine (figure 6) : organes divers, reins, tube digestif y sont placés en parallèle.

Figure 5 - Circulation et nutrition : un exemple de modèle d'élève (1^{ère} S)

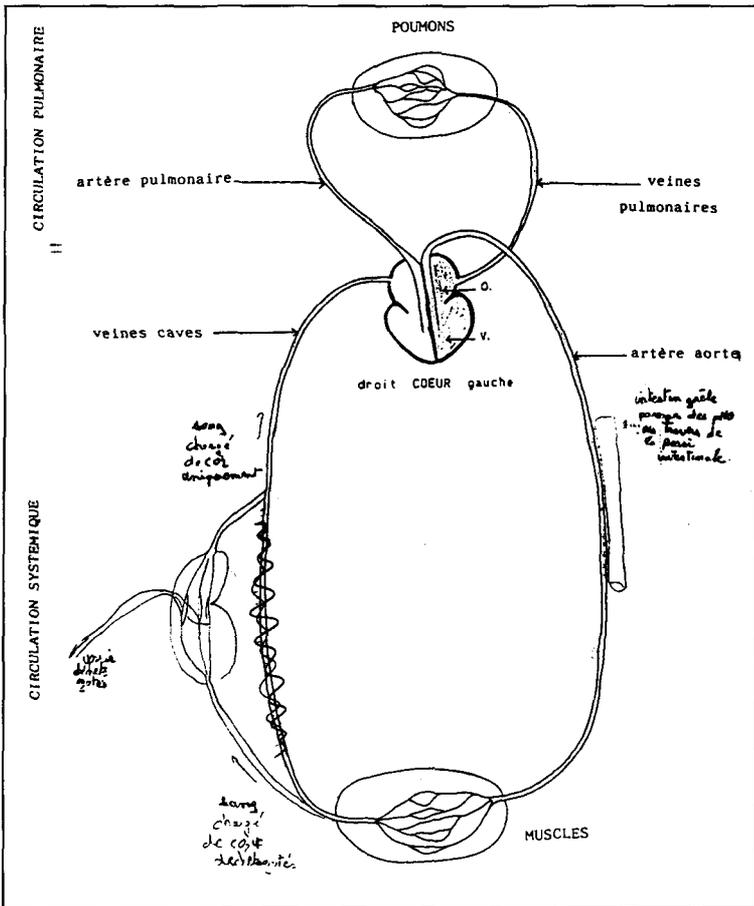
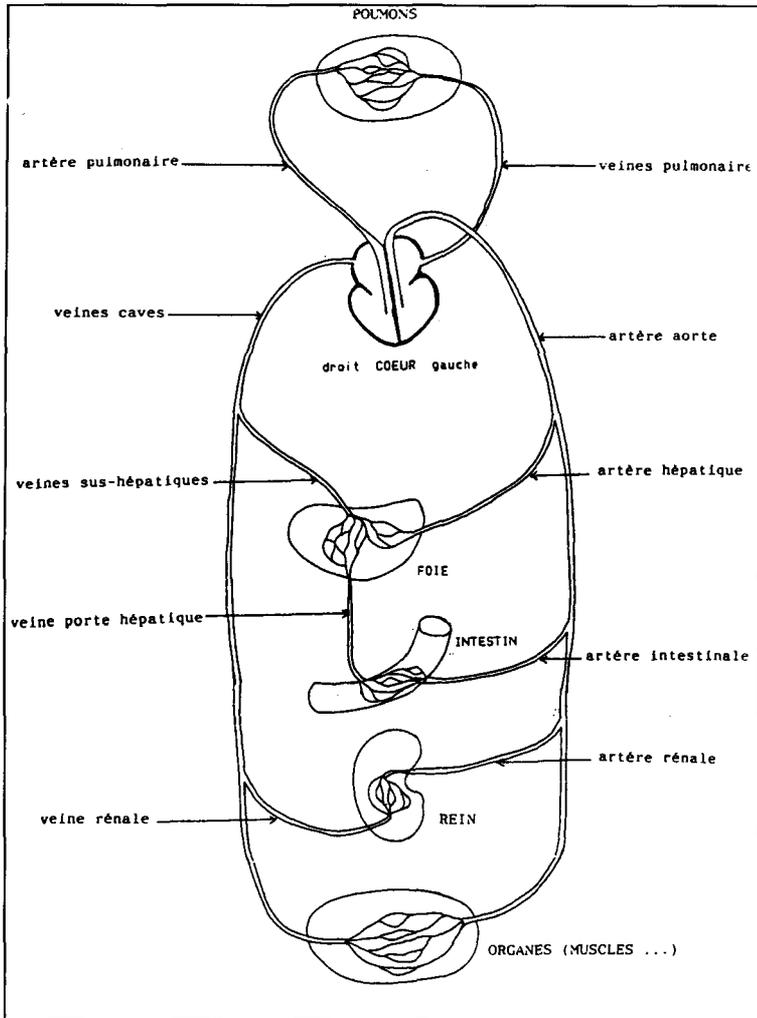


Figure 6 - Circulation et nutrition : le modèle des physiologistes



le modèle en
série proposé
par les élèves

Le raisonnement qui conduit les élèves et les étudiants (47) à une organisation en série est très régulièrement explicité ainsi : le tube digestif doit être placé avant les organes dont on considère la nutrition car il faut que le sang qui leur parvient soit riche en petites molécules organiques. Le sang qui sort de ces organes est chargé de déchets azotés, il doit donc passer le plus vite possible par les reins pour être nettoyé ou filtré.

(47) Dont certains ont fait des études universitaires de biologie.

Il est clair que les élèves utilisent ici, pour construire ou justifier un modèle en série, un raisonnement par "mise en histoire" qui facilite leur compréhension du problème en le simplifiant.

le modèle
en parallèle...

D'ailleurs l'analyse dans un deuxième temps du schéma de la figure 6 met très généralement les élèves dans l'embarras. Il conçoivent mal la place du tube digestif : pourquoi est-il placé aussi loin, dans le circuit, des organes qu'il doit approvisionner ? Mais surtout ce sont les reins dont ils ne comprennent pas le rôle dans une telle organisation, car ils ne peuvent pas évacuer les déchets que viennent de rejeter les cellules : le sang contenant des déchets (sang sale, donc) circule alors partout !

compris que par
une approche
compartimentale

Le modèle en parallèle ne peut être compris que par une approche compartimentale qui ne sépare pas dans le temps les différents événements : à un moment donné, le compartiment sanguin contient une certaine quantité d'urée bien en dessous de la concentration limite ; au même instant les organes provoquent des entrées d'urée dans ce compartiment et les reins assurent des sorties. Si les sorties sont égales aux entrées, l'état "normal" se maintient : on n'est pas sur un schéma d'évacuation mais d'équilibre dynamique.

raisonnements
par "mise en
histoire" en
biologie...

Dans le même domaine, celui de la nutrition, l'ancienne façon de classer les protides dans les aliments plastiques et les glucides-lipides dans les aliments énergétiques relève également de cette tendance à mettre en "histoires simples" : un nutriment est limité dans ce cas à une seule histoire possible, bien linéaire.

Derrière ces approches séquentielles de la nutrition, que Claude Bernard avait déjà stigmatisées en faisant le procès de la nutrition directe (48), on peut voir autant d'obstacles au concept de milieu intérieur.

Autre exemple de mise en jeu d'un raisonnement séquentiel en biologie : un élève de lycée, après avoir pris conscience, lors du cours, que l'oxygène intervenait à la fin de la "chaîne respiratoire", demande à l'enseignant pourquoi on accorde alors tant d'importance à l'oxygène dans la respiration ; venant à la fin de la chaîne d'oxydo-réduction, il ne sert pas à grand-chose. Il apparaît là encore que la mise en histoire de la phosphorylation oxydative, favorisée certainement par la présentation des cours et des manuels, ne permet pas de comprendre le véritable sens de ce système ni la nécessité de l'oxygène.

(48) BERNARD Cl. ; *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* ; Paris, Vrin, 1966 (prem. éd. 1885), p. 122.

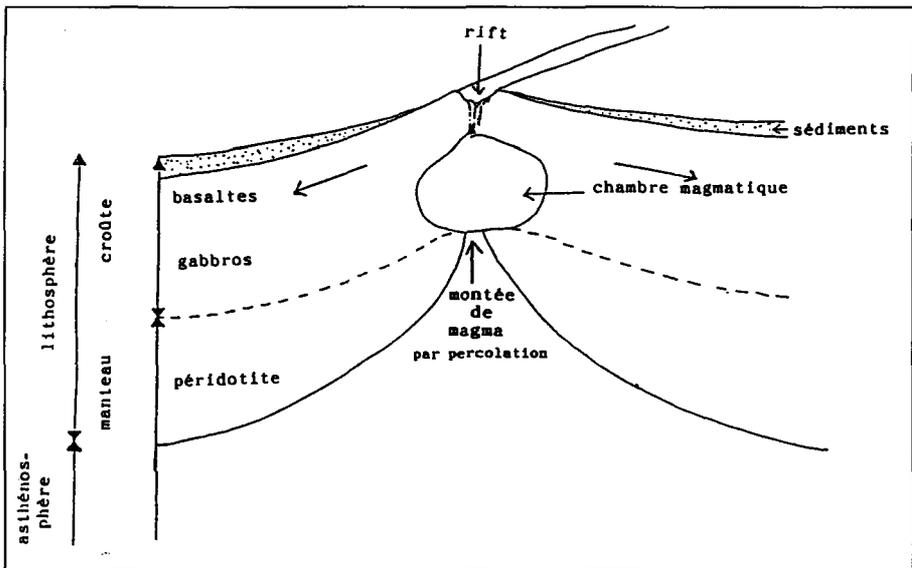
3.2. Les élèves face à des problèmes de stabilité structurale en géologie

Ce mode de raisonnement séquentiel qui empêche de percevoir le problème de la stabilité structurale se rencontre également en géologie. C'est le cas dans des problèmes relevant d'une approche compartimentale, bien sûr, mais aussi dans des domaines qui paraissent pourtant bien différents, comme celui de la tectonique des plaques.

Nous prendrons l'exemple de la représentation par des élèves de lycée du fonctionnement d'une dorsale.

La situation est la suivante : on présente à des élèves (Première S) un schéma en coupe d'une dorsale océanique (figure 7) dont ils connaissent déjà l'organisation pétrologique et le principe général : il s'agit d'une zone d'accrétion.

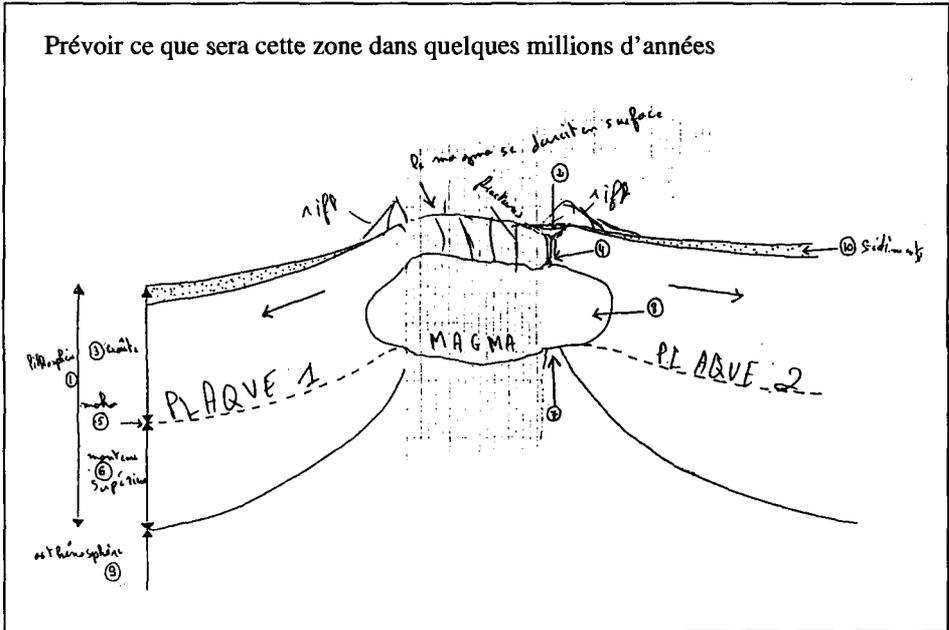
Figure 7 - Coupe d'une dorsale



... et en géologie

On leur demande alors d'imaginer l'évolution de cette dorsale au cours du temps. Très généralement leur réponse, orale ou schématisée, est la suivante : les deux parties de la dorsale se sont écartées et la solidification du magma en surface de la chambre magmatique comble le trou et forme un nouveau plancher (voir figure 8).

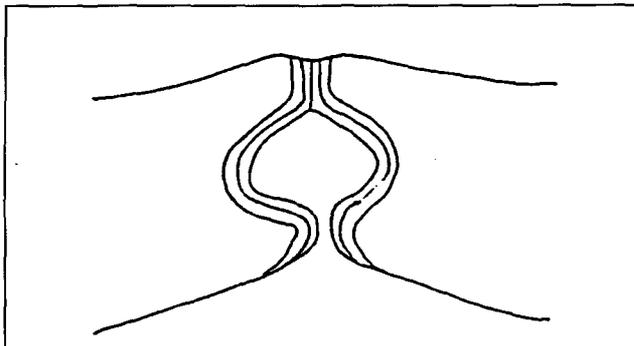
Figure 8 - Évolution d'une dorsale généralement prévue par les élèves (Première S)



En fait, cette "mise en histoire", certainement encouragée par la question portant sur l'évolution dans le temps, les amène à une description qui les empêche de percevoir un point important du problème : la stabilité de la structure "dorsale" au cours du temps.

Ainsi la mise en place du nouveau plancher ne peut se limiter à la surface de la chambre magmatique : il doit y avoir formation d'une nouvelle lithosphère sur toute son épaisseur, comme l'indique le schéma de la figure 9.

Figure 9 - Schéma de l'évolution d'une dorsale qui respecte la stabilité structurelle



Autre cas, celui des concepts d'énergie renouvelable et d'énergie non renouvelable (Première S, option sciences expérimentales). Là encore une première approche conduit les élèves à une distinction en termes d'histoires différentes : une énergie renouvelable est encore approvisionnée de nos jours, alors qu'une énergie non renouvelable a été stockée une fois pour toute. Pourtant, aujourd'hui, il se forme du charbon et du pétrole. Il y a donc tout un travail didactique à mener pour que les élèves comprennent que c'est le rapport entre les flux de production et les flux d'utilisation qui fait véritablement la différence : en dessous d'un certain taux de consommation, le pétrole pourrait être considéré comme une énergie renouvelable.

3.3. Nécessité de problématiser le temps en biologie et en géologie

Les exemples présentés ci-dessus n'ont pas été complètement développés : des analyses plus précises des données recueillies sont en cours. Mais ils permettent de s'apercevoir que la construction de modèles par les élèves débouche souvent, en géologie comme en biologie, sur des "mises en histoires", des raisonnements séquentiels.

généralité des raisonnements séquentiels...

Ce type de raisonnement, dans sa généralité, n'est d'ailleurs pas spécifique de ces deux domaines puisqu'il correspond assez bien au raisonnement séquentiel déjà décrit en didactique de la physique (49).

obstacles à la compréhension des systèmes complexes

Mais, contrairement à ce qui se passe souvent en sciences physiques, il ne s'agit pas en biologie et en géologie de dépasser le raisonnement séquentiel en évacuant le temps. Si la mise en petites histoires, syncrétisme de temps et de causalité, est un obstacle à la compréhension du fonctionnement des systèmes complexes, le temps et l'histoire restent nécessaires pour l'intelligence de leur genèse et de leurs transformations ; et cela peut également être la cause de difficultés didactiques.

des petites histoires aux explications historiques

Ainsi des élèves de Seconde à qui l'on demande d'expliquer pourquoi la Terre est la seule planète du système solaire où la vie existe, donnent des explications qui ne renvoient qu'aux caractéristiques actuelles des planètes. Jamais ils ne replacent ce problème dans l'évolution historique concomitante de la Terre et de la biosphère.

Il faut donc problématiser la fonction du temps en géologie et en biologie pour comprendre que, si de nombreux systèmes relevant de ces sciences sont stables structurellement, cela est paradoxalement nécessaire à leur développement et à leur évolution dans une autre échelle de temps.

(49) Voir, par exemple :

VIENNOT L. ; "Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique" in *Didaskalia*, 1993, 1, p.13-27.

CLOSSET J.-L. ; "Raisonnements en électricité et en hydrodynamique" in *Aster* n° 14 *Raisonnement en sciences*, 1992, p. 143-155.

Il s'agit donc de passer des petites histoires à une véritable approche systémique et historique.

On voit en quoi une prise de conscience par les élèves de leurs raisonnements spontanés et de leurs limites est nécessaire pour les préparer à aborder de telles ruptures ; il y a tout intérêt à utiliser pour cela une gamme diversifiée de problèmes, biologiques et géologiques.

4. CONCLUSION : INTÉRÊT DES SYNERGIES DIDACTIQUES... ET POURQUOI PAS ENTRE BIOLOGIE ET GÉOLOGIE ?

Par cette comparaison épistémologique et didactique nécessairement limitée, nous avons avant tout voulu montrer que tout n'est pas si simple dans les relations ou les non-relations entre deux domaines comme la biologie et la géologie.

apprendre
à partir
de problèmes
diversifiés

Nous avons également souhaité insister sur l'intérêt, pour l'apprentissage de quelques grands concepts, de les faire opérer dans une vaste gamme de problèmes débordant le cadre étroit d'un domaine précis. Plus généralement, l'analyse des conceptions des élèves et la caractérisation des obstacles épistémologiques en termes de grands modes de raisonnement, telles qu'elles semblent se développer actuellement en didactique des sciences (50), conduisent de plus en plus à penser à des interactions didactiques entre les disciplines concernées, sans pour autant remettre en cause la spécificité de chaque domaine conceptuel.

Tout ceci est à mettre en relation avec la recommandation du rapport Bourdieu-Gros (51) de « privilégier tous les enseignements propres à offrir des modes de pensée dotés d'une validité et d'une applicabilité générales ».

On est là sur un enjeu didactique important qui reste à étudier et à explorer. On voit en particulier se profiler la possibilité d'une synergie de la biologie et de la géologie pour aider les élèves à construire des outils de raisonnement et de modélisation communs à ces deux champs disciplinaires.

Cependant, la possibilité d'une synergie didactique entre la biologie et la géologie ne permet naturellement pas de conclure à la nécessité de l'enseignement de ces deux

(50) VIENNOT L. ; "Obstacle épistémologique et raisonnement en physique : tendance au contournement des conflits chez les enseignants" in BEDNARZ, GARNIER, *Construction des savoirs* ; Ottawa, Agence de l'Arc, 1989.

ORANGE C. ; "Le concept d'obstacle en didactique des sciences : nécessité d'une approche plurielle" in *Le problème et l'obstacle en didactique des sciences* ; Documents du CERSE, Université de Caen, n°60, 1993.

(51) *Principes pour une réflexion sur les contenus d'enseignement* ; La documentation française, 1989.

penser
aux synergies
didactiques
possibles...

domaines par le même professeur. D'autres regroupements sont envisageables dont l'analyse mettrait en évidence des liens épistémologiques différents mais intéressants. Alors que la liaison biologie-géologie pourrait, comme nous l'avons montré, favoriser la compréhension des systèmes complexes dans leur fonctionnement et leur évolution, une discipline scolaire biologie-chimie, par exemple, donnerait certainement la possibilité d'enrichir des approches plus analytiques.

... et faire
des choix

Il faut donc **faire des choix** de disciplines scolaires en fonction des savoirs et des types de problèmes dont on veut privilégier l'apprentissage et la maîtrise. Et cette idée de synergie didactique nous semble beaucoup plus importante à mettre en avant que les arguments d'utilité en sens unique qu'emploie le Conseil National des Programmes lorsqu'il affirme, comme nous le notions plus haut, qu'« *une bonne formation en chimie est certainement plus nécessaire à l'appropriation des mécanismes fondamentaux de la vie qu'une bonne formation en géologie* ».

En tout cas, dans l'état actuel des choses, on peut conclure en direction des partisans de la biologie-géologie qu'il ne sert à rien de revendiquer le maintien de cette discipline si tout n'est pas fait pour en tirer des avantages dans la gestion des apprentissages.

Christian ORANGE
IUFM et MAFPEN, Académie de Caen
CERSE, Université de Caen
Denise ORANGE
Lycée Le Brun, Coutances
MAFPEN, Académie de Caen

LE RECYCLAGE, UN CONCEPT ACTUEL POUR COMPRENDRE UNE SCIENCE DU PASSÉ TOURNÉE VERS L'AVENIR

Christiane Haguenaer

Le concept de cycle, intégrateur des variations dans l'espace et le temps, a une valeur heuristique dans les sciences de la Vie et de la Terre lorsque les concepts qu'il associe sont validés dans des cadres de référence bien définis et repérés dans le cadre de lecture en évolution des élèves : une intégration que le vocabulaire hérité de l'histoire des sciences géologiques ne facilite pas. Des choix portant sur les seuls cycles fermés dans les cadres de référence considérés contribuent à renforcer la tendance implicite des élèves à clore les cycles, même pour des cadres de référence et de lecture qui ne le permettent pas. Les corrélations structurées pour apprendre à exploiter et sauvegarder donc à comprendre notre environnement nous font assister à l'ouverture des cycles et prendre en compte le concept économique de recyclage des déchets. Les choix didactiques actuels portant sur des cadres de référence nouveaux, favorables à l'ouverture des cycles, permettent d'éviter de réduire à son aspect technique le concept de recyclage, tout aussi heuristique que le concept de cycle et que les phénomènes de la nature illustrent largement.

Science de genèse, la géologie met en relation dynamique les variations des systèmes terrestres avec différentes échelles d'espace et de temps. Du cadre local au cadre global, de l'histoire actuelle aux témoins du passé, le recyclage des matériaux de la planète participe à cette dynamique qui met en jeu les différentes formes d'énergie. L'établissement de corrélations entre facteurs aide à comprendre l'environnement géologique pour concilier son exploitation et sa sauvegarde. Il appelle une structuration favorable aux apprentissages. Mais un obstacle didactique résulte du décalage d'évolution des concepts et des mots qui les désignent : de nombreux termes qui ont un sens explicité dans les dictionnaires géologiques sont couramment utilisés avec un autre sens, plus ou moins implicite.

1. RECYCLAGE DES MOTS ET CONCEPTS

Comme Lavoisier pour ajuster le vocabulaire de la chimie aux savoirs du XVIII^e siècle, les géologues du XX^e siècle ont tenté de définir des termes hiérarchisés significatifs des progrès de la connaissance de la Terre. Mais les mots nouveaux coexistent avec les précédents dont certains changent de sens pendant que perdurent des sens anciens abusivement

définir le cadre
de référence
d'un mot
consiste à
préciser...

étendus en l'absence de limites claires de leur validité : de leur cadre de référence. Ils constituent un héritage riche mais disparate, lourd à gérer, embarrassant à recycler, donc une source de contraintes didactiques.

1.1. Contraintes didactiques liées à l'héritage des mots et concepts de l'histoire des sciences en géologie

Le nom des principales roches garde l'empreinte du passé. Un exemple ponctuel illustre ce propos : interrogé sur le métamorphisme, un candidat à l'oral de l'agrégation demande une lame mince de granulite et dispose d'une granulite au sens ancien du terme ; il la projette, en décrivant les minéraux de métamorphisme attendus, là où se trouvent les minéraux caractéristiques de ce granite à deux micas. Les étiquettes des collections des laboratoires des collèges et lycées témoignent du même obstacle : combien de "marnes" se révèlent dépourvues du carbonate de calcium qui participe, en quantité notable, à la définition du concept. Il y a 150 ans, l'anglais Lyell déplorait déjà ces noms donnés *mal à propos*. Mélange de calcaire et d'argile dit le dictionnaire français de géologie le plus courant ; mais un calcaire est une roche ; une argile l'est aussi dans certains contextes, mais plus souvent un minéral. Mélange de minéraux conviendrait mieux mais, si les minéraux argileux sont facilement décelables par leurs propriétés, la mise en évidence du minéral calcite passe le plus souvent par celle du carbonate de calcium, corps composé qui la constitue et n'est pas propre à ce minéral. Pour d'autres roches, la taille des constituants et leur mode d'agencement s'ajoutent à leur nature minéralogique dans la définition. C'est le cas pour les grès, autrement dit les sables quartzeux consolidés, la taille des grains intervenant seule pour désigner un sable ; l'association du sable de Fontainebleau au grès du même nom, omniprésent dans les tiroirs, renforce la confusion entre sable et sable quartzeux. Que dire, dans un cadre plus vaste, des roches cristallines ainsi qualifiées par référence à l'état de leurs minéraux pourtant commun avec d'autres roches. Et comment justifier par l'histoire des sciences l'autre qualificatif d'éruptives abusivement étendu des roches volcaniques aux roches plutoniques quand, dès les années 1830-1840, Lyell nommait séparément les deux types de roches : il reprenait, avec des mots nouveaux, la théorie de l'Anglais Hutton qui, à la fin du XVIIIe siècle, invoquait une chaleur souterraine hypothétique pour expliquer l'origine des "granits". Lyell faisait en outre appel à la chaleur pour expliquer les roches qu'il désignait comme métamorphiques, roches transformées qui doivent leur structure cristalline à l'action de la chaleur, anciennes les roches aqueuses, sédimentaires précise-t-il en 1842, et roches plutoniques, au qualificatif également nouveau. "Le flot de l'observation avance avec une telle rapidité, que les perfectionnements de la théorie précèdent les changements

...les limites
à l'intérieur
desquelles la
signification
donnée au mot
reste valide

des mots d'hier
encore employés
aujourd'hui,
même si le savoir
a changé

de la nomenclature, et, essayer de traduire de nouvelles vérités par des mots employés d'abord à exprimer une opinion différente ou contraire, c'est tendre, par la force de l'association, à perpétuer l'erreur ; de telle sorte que des dogmes abandonnés par la raison, laissent encore derrière eux une forte empreinte sur l'imagination."

En l'absence d'explication à la chaleur de la Terre, les neptuniens du XVIII^e siècle opposaient à Hutton l'origine aqueuse des granites. De même pour les neptuniens du XIX^e siècle, face à Lyell dont l'idée du métamorphisme avait précédé la démonstration. Mais, avec le temps, l'évidence du bien-fondé des hypothèses sur l'origine des gneiss et mica-schistes ou des granites installe un doute en France au XIX^e siècle, insuffisant cependant, en l'absence de repères chronologiques, pour faire revenir les géologues sur l'idée ancrée par les maîtres allemands du caractère primitif de ces roches. On peut voir dans la place, encore actuelle, au bas des légendes de cartes, des gneiss et granites d'âge physique aujourd'hui connu, une réminiscence de la croyance en leur ancienneté et une illustration de la notion d'obstacle épistémologique.

Au début du XX^e siècle, l'adjectif magmatique se développe avec son sens génétique actuel après la découverte de la radioactivité qui offre une source de chaleur suffisante pour entraîner la "fusion ignée de la croûte de granit" affirmée par Lyell. En dépit des résistances, la physique crée les ponts reliant la géologie à l'astronomie. Elle sert l'évolution des esprits. Mais les problèmes liés au vocabulaire demeurent. Quelques exemples choisis parmi les plus courants font apparaître la disparité des critères pris en compte dans la définition actuelle des roches (fig. 1).

ROCHES		STRUCTURE	TEXTURE (OU STRUCTURE) Taille Agencement des constituants		COMPOSITION MINÉRALOGIQUE	COMPOSITION CHIMIQUE	CRITÈRE GÉNÉTIQUE
SÉDIMENTAIRES	Conglomérat		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>
	Sable		<input type="checkbox"/>				
	Grès		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
	Calcaire					<input type="checkbox"/>	
MÉTAMORPHIQUES	Micaschiste	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	Gneiss	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
MAGMATIQUES	Granite	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
	Basalte			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

Figure 1. Critères de définition des roches les plus courantes : leur disparité constitue une source de difficulté pédagogique

Une expérience conduite avec des classes de Quatrième prouve que les élèves emploient facilement des termes clairs, sinon simples, comme silicarénite pour définir un grès et calcarénite ou ferriarénite pour désigner un calcaire ou un minerai de fer oolithiques. Mais, pour les roches dont les constituants ont des dimensions supérieures ou inférieures à celles des grains de sable, les mots restent peu accessibles et leur paraphrase lourde d'emploi. Une telle approche apparaît cependant utile pour éclairer une prise de conscience de la diversité des critères de définition des mots anciens encore utilisés.

matière, un mot ambigu qu'il faut préciser dans les différents cadres de référence : des roches, des minéraux, etc.

Dans les dictionnaires géologiques français actuels, cycle exprime bien la composante historique de la géologie mais masque le recyclage qui, pourtant, mérite un premier rôle dans tous les cadres de référence de la matière. L'idée sous-jacente à recyclage, du passage dans un nouveau cycle d'opérations, ouvre l'économie à la technique plus qu'à l'écologie et la géologie. Pour éviter d'en fermer le sens, il importe tout à la fois de renouer avec l'économie de la nature chère au XVIIIe siècle et d'analyser les faits avec objectivité.

À l'aube du XVIIIe siècle, magma signifiait résidu ; à la fin du XIXe siècle, il passe de la chimie à la géologie ; au milieu du XVIIIe siècle, détritit valait pour les débris de roches, au milieu du XIXe siècle, il donne naissance à détritique : des mots qui s'accordent avec l'idée actuelle du recyclage. Détritique entre en concurrence avec clastique, un mot un peu plus ancien. L'étymologie du premier évoque l'usure, celle du second la cassure. Tous deux qualifient à la fois les débris ou clastes, qui renseignent sur les matériaux recyclés dans les roches sédimentaires qu'ils constituent. D'autres mots les remplacent : hérité s'oppose aujourd'hui à néoformé qui qualifie les matériaux des roches dites d'origine chimique dont les minéraux naissent en fait d'un processus physico-chimique. Si le matériel est hérité du continent, on le dit terrigène, un mot du milieu du XIXe siècle qui veut dire né de la terre, par opposition à biogène - ou biodétritique ou bioclastique - et chimogène. Mais le suffixe "gène" signifie aussi "qui donne naissance".

avec le temps, le cadre de lecture des faits grandit et les cadres de référence qui le constituent se multiplient...

Le recyclage et la néoformation des mots et expressions valent aussi pour les cadres emboîtant et emboîté des cadres de référence des roches et des minéraux : cadre du globe et cadre de l'atome. Dès 1924, Joly explique *le renouvellement continu de l'énergie* de la Terre par la désintégration de l'atome quand le météorologue Wegener fait encore dériver les continents par le jeu de forces cosmiques inconnues, extérieures à la Terre. En 1944, Holmes fait disloquer et entraîne les massifs continentaux par des courants d'un substratum visqueux glissant sous la croûte terrestre ; il les explique par une inégale répartition des éléments radioactifs de la croûte. L'accumulation des données des années cinquante conduit à l'expression de la tectonique des plaques puis de la tectonique globale, cause du cycle interne de la

...ce qui impose
de préciser les
concepts

matière qu'explique en dernier ressort la radioactivité du globe comme la radioactivité du Soleil fournit l'énergie du cycle externe de matière de la Terre. Mais l'histoire des sciences retient Wegener, de préférence à Holmes, en partie parce que les arguments nombreux contre sa théorie aident à se souvenir de lui et, par voie de conséquence, de l'expression devenue source d'obstacle. Une enquête auprès des élèves montre l'ambiguïté du mot dérive qui rend interchangeables dans leur mémoire les plaques et les continents : une extension abusive qui s'explique par la permanence des mots mais aussi par une simplification didactique faisant porter les premières observations des élèves sur des limites de plaques confondues avec des limites de continents.

Ainsi, coupés de leurs racines, les mots hérités de l'histoire des sciences soutiennent mal les concepts.

1.2. Participation de la géologie au recyclage de la matière dans les conceptions des élèves et des enseignants

résultats d'une
vaste enquête...

L'enquête a porté sur plus de 800 élèves des écoles, des collèges ou des lycées, suivis au cours de leur scolarité. Ils devaient citer tous les cycles qu'ils connaissaient pour me permettre d'approcher le cadre de leurs intérêts à un moment donné, autrement dit leur cadre de lecture. Ils devaient par ailleurs donner leur(s) définition(s) de cycle et représenter graphiquement les cycles de leurs choix.

• Le cycle de l'eau

De loin le plus représenté, le cycle de l'eau montre des discontinuités liées aux programmes de l'école élémentaire, du collège, en particulier des classes de Sixième et de Quatrième, et du lycée en classe de Seconde. Lourd d'héritage, il reste didactiquement stable à l'école élémentaire. Il y a plus de cent ans, le programme du cours primaire moyen disait : *"Les trois états de l'eau. Idée générale de la circulation de l'eau..."* et les conseils pédagogiques adressés aux enseignants de cette classe précisaient : *"Suivre l'eau dans ses voyages aériens, terrestres et souterrains... montrer que l'eau, repassant successivement par les mêmes états, opère dans la nature un cycle complet."* Aujourd'hui, il s'exprime ainsi dans les nouveaux programmes du cycle des approfondissements : *"Le cycle de l'eau dans la nature. État liquide, état gazeux, état solide."*

Aux premiers schémas touffus des ouvrages scolaires de la fin du siècle dernier a succédé, après une quinzaine d'années, un cycle clarifié par un schéma circulaire animé par des flèches, facile à mémoriser, au moins dans son parcours aérien. Malheureusement, la fonction régulatrice des réservoirs d'eau s'efface devant leur communication.

Le fait que quelques élèves seulement, en moyenne par classe élémentaire, représentent l'eau solide montre bien

...sur l'évolution des conceptions avec la transformation du cadre de lecture ou champ des savoirs et intérêts des élèves

l'extension du cadre de lecture des élèves appelle une réorganisation du savoir...

ce qui impose de relativiser l'évolution des résultats pour un cadre de référence donné

que l'idée de la circularité prend largement le pas sur celle du recyclage. Le collège montre une décroissance de cette représentation qui tend vers zéro au lycée, surtout dans les classes Terminales. Pendant ce temps, la prise en compte par la géologie du ruissellement et de l'infiltration se développe après le cours de géographie de la classe de Sixième et surtout après les cours de géologie des classes de Quatrième et de Seconde. Les meilleurs scores du collège se situent en classe de Quatrième (enquête effectuée en fin d'année) et ceux du lycée se placent en classe de Première (enquête en début d'année, après le cours de Seconde et en préalable au programme de géologie). Outre une évolution globale dans le sens de la fermeture du cycle de l'eau, le graphique (fig. 2) montre, dans le détail, des reculs ou étalements du savoir, témoins des réajustements succédant aux enrichissements impulsés par le programme. L'expression de la composante géologique du cycle montre que la représentation des nappes d'eau progresse peu et se maintient difficilement : au lycée les tentatives non valides de représentation des nappes montrent que, dans la moitié des cas, elles sont vues comme des réservoirs indépendants du circuit de l'eau, des poches dans lesquelles l'homme puise en risquant de les épuiser. L'aquifère n'est pratiquement jamais représenté et le substratum formé d'une roche à très faible perméabilité apparaît de façon si ponctuelle qu'il n'est pas exprimé sur le graphique dont les réponses sont ramenées à cent pour chaque niveau de classe. Pourtant, l'extension de l'enquête à autant de professeurs en stage de formation continue montre qu'ils représentent des nappes réellement fonctionnelles, ouvertes au recyclage naturel de l'eau.

Une observation tempère les résultats de l'enquête : si des élèves des classes Terminales du lycée construisent des cycles moins complets que des élèves de l'école élémentaire, les meilleures productions des plus jeunes se ressemblent, comportant une grande part d'héritage. On note en particulier la généralité du sens de rotation du cycle impulsé par Boule au travers des ouvrages scolaires du début du siècle. À l'opposé, les élèves de classes Terminales reconstruisent des cycles personnalisés avec, souvent, des indices d'un élargissement du cadre de lecture qui leur fait représenter des arbres, sur les trajets ascendant et/ou descendant de l'eau, mais aussi d'autres données sur des cycles d'éléments n'appartenant pas au cycle de l'eau annoncé. La difficulté consiste à reconstruire un cycle valide dans un cadre de référence précis après élargissement du cadre de lecture.

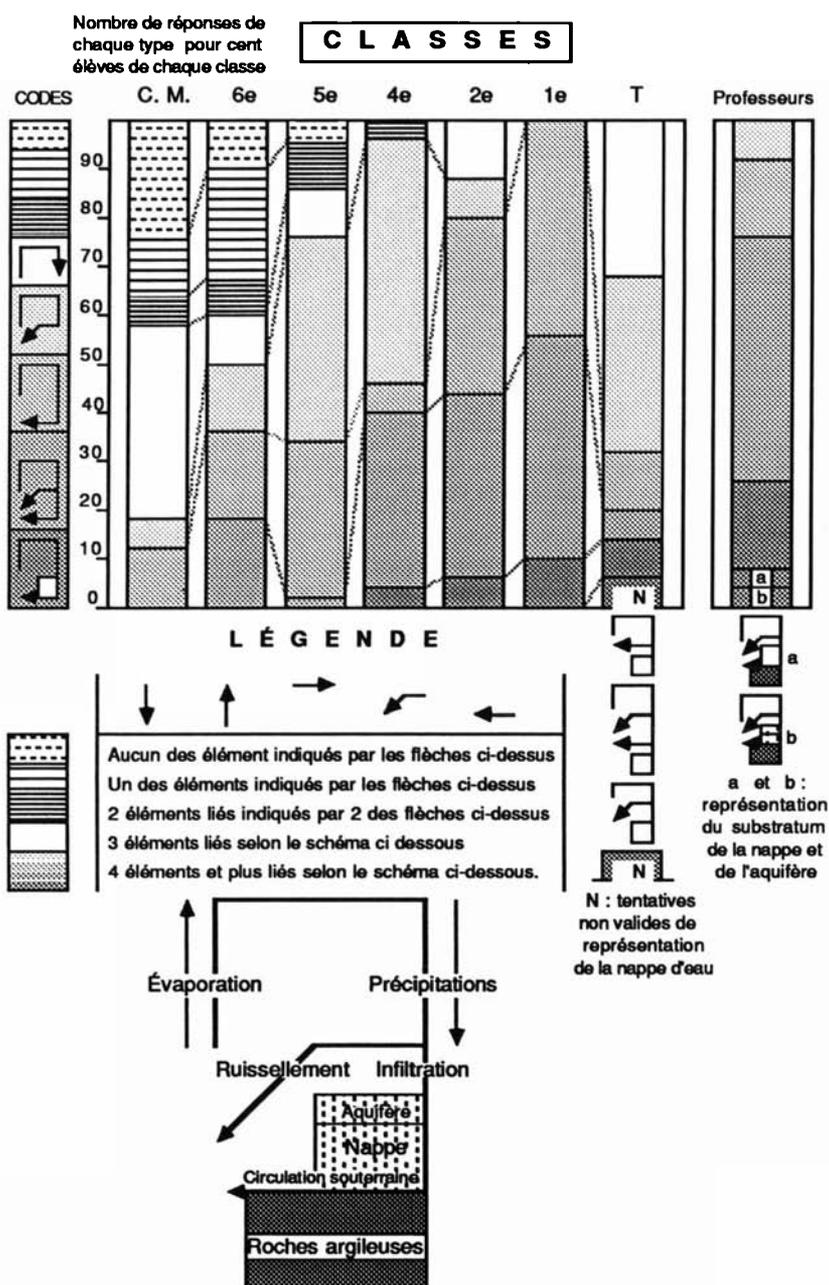


Figure 2. Évolution de l'expression des conceptions des élèves sur le cycle de l'eau et mise en évidence de la faible représentation des éléments géologiques significatifs du recyclage naturel de l'eau des nappes

• Les autres cycles géologiques

L'étude des autres cycles géologiques conduit aux mêmes conclusions, plus contrastées que pour le cycle de l'eau. Cité pour la première fois à l'issue de la classe de Quatrième, le cycle orogénique (moins d'un pour douze élèves en moyenne) et le cycle sédimentaire (à peine plus représenté que le précédent) s'imbriquent, complétant ou compliquant le cycle passe-partout "des roches" confondu avec l'un ou l'autre, voire avec les deux précédents. Définis par des enchaînements fléchés de mots, ils sont très peu représentés graphiquement et manifestent davantage les cycles évolutifs de la géologie historique que le recyclage de la matière des roches. Quelques cycles d'érosion mal définis et non visualisés ouvrent le concept à la géographie ; ils restent seuls dans les quelques tentatives de restitution de cycles géologiques en classe de Seconde.

dans les
apprentissage
comme dans
l'histoire des
sciences...

Comme pour le cycle de l'eau, les élèves des classes Terminales reconstruisent des cycles inspirés de la biologie sur lesquels certains tentent de placer des souvenirs géologiques. Deux élèves sur trois des classes littéraires s'attachent aux seuls échanges aériens mettant en jeu le dioxygène et le dioxyde de carbone contre un élève sur dix des classes scientifiques. Comme dans l'histoire des sciences, il est sinueux le chemin qui relie les échanges gazeux à la nutrition des Végétaux ! Pour 28 élèves sur 137 - soit environ un sur cinq - des classes Terminales scientifiques qui choisissent de développer graphiquement le cycle de l'eau, 30, autrement dit une part sensiblement égale, s'attachent au cycle du carbone associé ou non à un autre élément. Pour un élève sur trois en moyenne des classes littéraires et économiques qui développe le cycle de l'eau, à peine un sur douze choisit le cycle du carbone. L'idée du recyclage est présente, sinon le mot mais elle concerne surtout la matière organique. Les mots déchets et décomposition sont ceux qui reviennent le plus souvent dans les textes et sur les schémas : le premier pour un élève de classe littéraire sur trois contre pratiquement aucun pour le second, le premier pour un élève de classe scientifique sur dix contre plus de la moitié pour décomposition. Mais, avant de conclure à une meilleure appropriation du concept de recyclage de la matière organique par les élèves des classes scientifiques, une analyse plus fine des réponses s'impose ; elle montre la diversité des "produits nutritifs" de décomposition de la matière organique du sol, utilisés par les plantes : des ions, des sels minéraux et du dioxyde de carbone mais aussi de l'humus et du carbone "dont les végétaux se nourrissent".

Rendant compte, en 1792, des connaissances dans ce domaine, Lavoisier compare la croyance ancienne qui voit la plante prélever son carbone dans l'humus et l'hypothèse des chimistes modernes qui, dit-il employant pour la première fois le terme de milieu que Lamarck exportera vers les

...il faut du temps pour réorganiser le savoir après agrandissement du cadre de lecture

sciences naturelles, cherchent si "dans l'air au milieu duquel croît la plante", elle trouve le carbone entrant dans sa composition. Il était naturel, poursuit-il, de soupçonner qu'elle le tire "de l'humus, du terrain et du fumier" dans lesquels elle croît.

Chassez le naturel, il revient au galop. Il est difficile d'imaginer comment du vivant peut se nourrir dans l'air quand on sait la fertilité de la terre végétale, dite encore *terre végétale* au XVIIIe siècle : la terre nourricière, l'humus, à qui l'humanité doit son nom... En dépit de la preuve apportée par Th. de Saussure à l'aube du XIXe siècle que les plantes croissent en utilisant le carbone du gaz carbonique, les agronomes du XIXe siècle continuent à voir dans le fumier la source du carbone des végétaux : ils font passer ce *principe nutritif* des plantes, de la terre végétale à sa partie soluble. En l'absence de références chimiques précises, l'extension du cadre de lecture aux substances dissoutes ne suffit pas pour briser les croyances.

Le mot décomposition utilisé par les élèves masque, tout comme déchet, le degré de transformation de ce qui est recyclé. L'obstacle rencontré est du même type pour cette décomposition des corps composés organiques en corps minéraux que, dans le cadre de référence plus limité de la matière organique, pour le transfert de matière entre les vivants : l'absence de repères sur le niveau de dégradation de cette matière organique réduit ce transfert au modèle simpliste combattu par Claude Bernard dans ses *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux Animaux et aux Végétaux*.

Dans un cadre de référence plus vaste, biochimique et géochimique à la fois, la preuve est faite au lycée qu'un transfert de matière s'opère de la roche-mère du sol aux vivants qui l'exploitent. Pourtant, les élèves envisagent la seule dégradation des composés organiques construits par les vivants, en aucune façon celle des composés minéraux des roches : une conception réductrice de la décomposition.

la difficulté de structurer le cadre de lecture en associant les cadres de référence de la matière aux différentes échelles de la biologie et de la géologie

La géologie dynamique manque dans l'expression des conceptions des élèves au travers de leurs productions spontanées. Loin des restitutions plus ou moins fidèles des élèves des classes de Quatrième, les données reconstruites par les lycéens portent, quand elles existent, sur les gisements de charbon nés de la "décomposition des végétaux". Mais, hors des circuits naturels actuels comme les nappes d'eau, ils constituent des stocks isolés que l'homme (sur)exploite en produisant du dioxyde de carbone. Quant aux carbonates, ils sont totalement absents.

L'extension de l'enquête aux professeurs en stages de formation continue montre pourtant, comme pour le cycle de l'eau, des conceptions ouvertes associant biologie et géologie : deux sur trois citent le cycle de l'eau, pratiquement un sur deux le cycle du carbone et ceux qui choisissent de représenter ce dernier témoignent de la place

importante du recyclage dans les différents cadres de référence de leur cadre lecture. Les cycles sédimentaires et d'érosion, orogénique et de Wilson (rifting, océanisation, subduction, collision) s'y trouvent également, mais moins illustrés. Le "cycle des roches", enfin, nommé et représenté par presque autant de professeurs que le cycle de l'eau, pose le principal problème didactique relatif au recyclage en géologie : deux professeurs sur trois corrigent l'expression ambiguë en le désignant comme cycle des constituants ou cycle de la matière des roches. D'autres la placent entre guillemets ou utilisent, plus ou moins implicitement, des codes de flèches différents pour exprimer l'hétérogénéité de mise en relation des grands groupes de roches : par leur devenir et par le recyclage de leur matériel.

Ainsi, les conceptions des élèves et des enseignants témoignent de difficultés relatives aux différents niveaux de recyclage de la matière. L'exemple du "cycle des roches" encourage à faire la part d'héritage et de néoformation aux sens propre et figuré, aux plans matériel et intellectuel.

1.3. Critères didactiques du choix des mots et concepts géologiques relatifs au recyclage de la matière

L'histoire montre comment l'usage d'un vocabulaire commun dans des cadres de lecture différents ou incertains masque l'évolution des concepts, favorise les généralisations abusives dans des cadres de référence d'espace et de temps faussés par les croyances et l'impossibilité d'observer les faits au delà de la portée des instruments du moment.

À la fin du XVIII^e siècle, le Genevois H.-B. de Saussure décrit les "veines" de granite des Alpes. Ayant réussi à faire fondre du calcaire pur, il annonce l'origine éruptive du Mont-Blanc. Mais, devant l'infusibilité du quartz et face aux critiques qui opposent la masse des montagnes à la toute petite quantité de calcaire fondu, il rejoint, vingt ans plus tard, en 1796, les neptuniens alpins qui donnent au granite une origine aqueuse et imaginent des causes anciennes pour expliquer les roches primitives : la terre fluide se serait déchargée de substances dissoutes dans les conditions du Déluge. Le système des neptuniens exprime l'idée d'une histoire linéaire, finie, de la Terre.

À la même époque, Hutton, médecin de la "circulation perpétuelle" du sang et agronome préoccupé du maintien de l'équilibre du sol, ne voit sur terre aucun indice de commencement et de fin et trouve dans les roches des fragments provenant de la destruction de roches plus anciennes. En l'absence de repère temporel, il voit se succéder dans un renouvellement circulaire hors du temps : précipitation, consolidation, dépression, fusion, injection, destruction et nouvelles formations.

Sa théorie entre tardivement en France, après la démonstration de l'Anglais Hall, qui prouve par l'expérience, en 1801, que l'on produit du marbre en chauffant du calcaire comprimé fortement, après surtout la reprise par son compatriote Lyell, de l'idée des destructions et rénovations cycliques successives illustrée par les faits en considérant que se sont produites, en des endroits différents mais simultanément, des roches sédimentaires, métamorphiques, volcaniques et plutoniques, et cela pour chaque période géologique sous l'influence de l'eau et de la chaleur. Au milieu du XIXe siècle, Thomson - Lord Kelvin - contribue en Angleterre à la (re)découverte du principe de la thermodynamique qui fait de la chaleur une forme dégradée de l'énergie. La question de l'irréversibilité apparaît liée à l'inévitable problème de la durée de la Terre. Par comparaison avec l'érosion et la sédimentation actuelles, Lyell estime le début du Primaire à 240 millions d'années. Mais c'est une erreur, dit-il, de confondre géologie et cosmogonie : le géologue ne s'occupe pas de "*l'origine des choses*". En 1862, Lord Kelvin tente de déterminer l'âge de la Terre : entre 100 et 200 millions d'années, 400 millions au plus, des valeurs que les géologues trouvent insuffisantes.

La découverte de la radioactivité à la fin du XIXe siècle permet à la fois de reculer dans le temps le début de l'histoire de la Terre et de dater les phénomènes géologiques : un cycle du plancher océanique dure environ 200 millions d'années ; les continents se recyclent depuis plus de 500 millions d'années. La croûte océanique et la croûte continentale atteignent des âges d'ordres de grandeur comparables à ceux auparavant attribués à la Terre. Mais le recyclage de leur matière se poursuit depuis des milliards d'années. Lyell pouvait donc y voir une histoire cyclique.

La Terre est soumise à un flux d'énergie mesurable à notre échelle des temps et lié, à l'échelle de son histoire, au flux de matière dû à la radioactivité de ses éléments. Le changement de cadre temporel ouvre le cycle de matière de la Terre. Les scientifiques qui placent aujourd'hui la Terre dans un univers infini de durée importante mais finie lui bâtissent une histoire linéaire. Le passage à l'histoire de la Terre dans le système solaire change l'échelle des temps, avec une durée de l'ordre de 4,5 milliards d'années. La remontée à l'histoire présolaire, pour s'intéresser à l'origine des éléments de la Terre, l'étend à 15 milliards d'années. Mais, de même que l'âge d'un grès n'est pas celui du quartz de ses grains, l'âge de la Terre n'est pas celui de sa matière.

Les mots ne suffisent pas pour accéder aux concepts évolutifs liés au recyclage de la matière. Mais, si l'enseignant ne peut changer le vocabulaire de la géologie, il a, par rapport à l'évolution du savoir dans l'histoire des sciences, l'avantage du recul de la connaissance. Puisque ce sont surtout les difficultés liées aux confusions de cadres de référence qui se répètent, de l'histoire aux apprentissages, il aide l'élève à

cycles de
matière ouverts
ou fermés :
une question
de cadre
de référence

préciser les limites de validité des concepts en l'entraînant à les mobiliser dans des cadres repérés dans l'espace et le temps ; il favorise ainsi leur structuration et leur appropriation.

Les observations de surface relatives au recyclage actuel de la matière s'imposent prioritairement dans les programmes. Elles permettent d'ancrer dans l'expérience des faits appartenant à des cadres de référence d'espace et/ou de temps moins directement accessibles. Elles assurent la mise en œuvre du principe dit de *l'actualisme ou principe de l'uniformitarisme* qui dit que les lois régissant les phénomènes géologiques actuels valent aussi pour le passé.

des oppositions de l'histoire qui portent en fait sur des cadres de référence différents, imprécis

C'est le neptunien genevois De Luc qui a introduit précocement en France l'expression "*causes actuelles*" dans le but de réfuter la théorie de Hutton, son contemporain. Ce dernier affirme comme une évidence que d'anciens fragments de roches provenant de la destruction de roches ayant existé "*dans un ancien état du globe*" ont dû être transportés comme d'autres fragments voyagent dans le "*système visible actuellement*" : des mots qui seuls peuvent "*rendre l'expression anglaise*", écrit en 1815 Murray, le traducteur français de Hutton et de Playfair, défenseur anglais de la théorie huttonienne.

L'application du principe de l'uniformitarisme en classe ne peut porter sur les seules formations anciennes ; elle suppose que l'élève dispose de sédiments ou de laves jeunes à la formation desquels il pourrait assister pour expliquer les conditions de genèse des roches plus anciennes qui leur ressemblent. Mais quand les échantillons de lave font défaut dans les collections, ces effets du volcanisme actuel sont remplacés par les roches volcaniques anciennes dont on veut justement démontrer la nature volcanique. Nul doute, dans ces conditions, que les conclusions du raisonnement paraissent évidentes !

les apprentissages ne répètent pas les erreurs de l'histoire des sciences...

Aujourd'hui, l'évolution du concept de cycle de l'eau aux différentes échelles d'espace et de temps s'accélère. En participant aux problèmes actuels, le cycle rejoint l'idée de recyclage aux plans quantitatif et qualitatif. Les élèves ont conscience des enjeux qui le concernent mais ils ont de la circulation de l'eau une idée qu'ils étendent implicitement au delà de ses limites de validité. Si le manque d'eau des régions à sol superficiel et/ou de sous-sol très fracturé est connu, si le déversement d'une substance toxique en pays calcaire se traduit par une pollution immédiate, ces faits soutiennent des modèles auxquels les médias sensibilisent mais qu'ils contribuent à généraliser abusivement aux nappes d'eau situées dans des aquifères poreux et perméables. La relation causale apparaît immédiate dans les premiers cas mais l'idée vient difficilement, sans démonstration de la circulation des nappes d'aquifères poreux, du décalage d'espace et de temps entre les phénomènes et leur enregistrement. Ignorer l'extension abusive de la perméabi-

...car
l'enseignant est
là pour aider à
cerner les cadres
de référence,
de validité
des concepts

de l'intérêt
d'ancrer les
phénomènes
géologiques
dans un cadre
de référence
accessible en
surface

lité de structure la renforce. Un cadre de référence mettant en évidence l'incidence de la capillarité sur la perméabilité de texture aide à cerner les limites de la perméabilité de fracture dans le cadre qui lui convient. Mais les élèves transfèrent difficilement la notion d'eau capillaire dans les aquifères. La fonction du contenant s'exprime dans aquifère (qui contient de l'eau). La nappe qui s'y trouve est souvent qualifiée d'aquifère, un terme ambigu qui peut laisser croire qu'elle contient l'eau et non qu'elle est l'eau. Quand elle est dispersée dans les pores d'un aquifère, elle comprend de l'eau libre, circulante si les pores communiquent entre eux, mais aussi de l'eau capillaire en quantité parce que ses pores, nombreux, ont des dimensions faibles par rapport aux fissures. Les forces de capillarité s'opposent aux forces de gravité et retiennent l'eau autour des grains. Les conceptions invalides, générales et durables, de stocks d'eau accumulée, réserve liquide souvent indépendante de l'eau circulante, révèle la difficulté du concept. Si la séparation des échelles de dynamiques différentes d'espace et de temps facilite l'apprentissage, seul un décroisement en retour fait transférer les acquis du cadre textural au cadre structural pour lequel le concept de perméabilité appliqué à la circulation karstique était jusque-là opérationnel. La prise en compte globale de ses différents cadres de référence rend fonctionnel le concept de perméabilité en déterminant sa validité par rapport aux conceptions initiales (fig. 3).

L'idée d'un réservoir souterrain est ancienne : Platon plaçait dans la Terre une immense quantité d'eau pour alimenter les sources et rivières. Par le raisonnement, Bernard Palissy dit l'impossibilité que les cavernes aient pu fournir toute l'eau sortie des sources en montagne depuis la création du monde. Une partie seulement de l'eau évaporée et retombée en pluie trouve sur son chemin des cavernes et toutes les eaux descendent dans la terre jusqu'à ce qu'elles rencontrent un fond "*imperméable*". L'auteur construit ainsi le cycle de l'eau, sinon dans les mots, du moins dans les faits.

En 1674, Perrault, le frère du conteur, considéré comme le père du cycle de l'eau, rompt, par l'expérience et par le calcul, avec les réservoirs imaginaires et inutiles en quantifiant localement le recyclage souterrain de l'eau. Il plonge dans l'eau un tube de verre rempli de sable sec. L'eau monte plus haut que dans le récipient où il se trouve. Cette eau, dit-il, "*demeure suspendue sans descendre en bas où son poids la devrait attirer... elle ne quittera le sable que par évaporation*". Convaincu que les eaux de la pluie suffisent pour faire couler les sources toute une année, il affirme qu'elles sont retenues par la terre et fait ouvrir le sol sur cinquante centimètres en montagne pour vérifier ses dires. Trois années durant, il évalue la quantité d'eau de quelques rivières pour savoir si celle qui tombe alentour de leur cours suffit pour les faire couler toute une année : il en faut environ la sixième partie et il en reste cinq fois autant pour nourrir les plantes et subir l'évaporation. Mariotte reprend

la démonstration en l'illustrant graphiquement et conclut qu'il n'est pas besoin de faire intervenir des cavités souterraines. Mais l'unité de temps prise en compte, l'année dont on sait aujourd'hui qu'elle est une durée trop grande pour l'atmosphère, devient jusqu'au XXe siècle l'obstacle à la globalisation du recyclage aérien.

Des problèmes mobilisant la perméabilité de texture et de structure dans des cadres d'espace et de temps déterminés précisent leurs limites de validité et éclairent la dynamique spatiale et temporelle de l'eau.

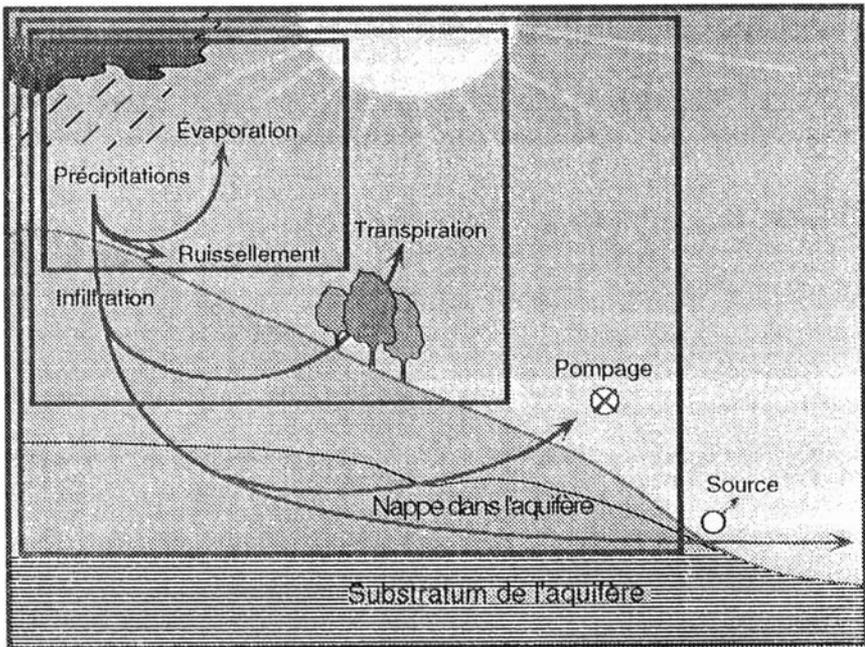


Figure 3. Cadres de référence locaux du devenir de l'eau de pluie

Cadres du devenir, aérien et superficiel, par évaporation et par ruissellement, cadres, moins accessibles, de la zone capillaire du sol soumise à l'évapotranspiration et de l'aquifère poreux et perméable dont la nappe est exploitée par pompage, cadre du substratum de faible perméabilité, à la limite duquel l'eau jaillit en source à la base de l'aquifère

Faire monter l'eau dans des roches avant de casser les échantillons aide les élèves à comprendre que si la roche constituant l'aquifère présente à la fois une perméabilité de texture et une perméabilité de fissures (de structure), l'explication des observations de terrain doit intégrer les deux échelles de phénomènes. Des mesures comparées de per-

quantifier les phénomènes dans des cadres de référence clairs donne accès au rôle régulateur de la capillarité dans le recyclage de l'eau

méabilité de roches, de granulométries diverses font relativiser les phénomènes liés à la texture et à la structure. Connaissant la perméabilité globale, de texture et de structure, donc la vitesse de circulation de l'eau dans un aquifère, les élèves peuvent estimer le temps que l'eau tombée sur un massif a mis pour atteindre un site de pompage. Pour une distance de cent kilomètres dans des grès, un calcul montre, par exemple, que l'eau exploitée résulte de précipitations très antérieures à Astérix !

Outre les différences de progression dans la verbalisation et l'expression graphique suivant les élèves, suivant les niveaux, suivant les types de classes, le suivi de l'enquête montre la part d'héritage, grande dans les textes, et la part de néoformation, plus importante dans les dessins souvent très mobilisateurs. La prise en compte complémentaire des deux moyens de communication aide à faire évoluer les conceptions sous-jacentes à leur manifestation.

Ainsi, une approche par les phénomènes actuels superficiels facilite la structuration des mots et concepts dans les cadres de référence constituant le cadre de lecture en évolution. Long à mettre en œuvre mais révélateur des conceptions, l'entraînement des élèves à l'expression graphique contribue à structurer la pensée.

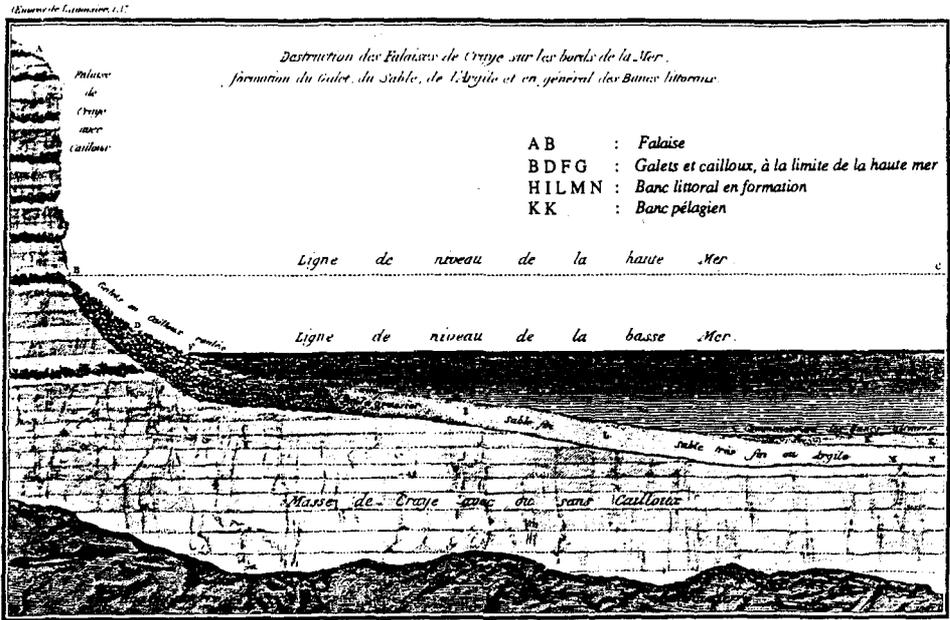
2. RECYCLAGE DE LA MATIÈRE

Enraciné loin dans l'histoire, le mot matière s'utilise aujourd'hui comme une sorte de joker dans des situations indéfinies ou avec de jeunes élèves pour qui un mot plus précis, hors de leur cadre de lecture, serait inadapté. Le recyclage le plus accessible en géologie est assuré par l'eau qui entraîne de la matière, plus souvent désignée par matériel dans les situations concrètes.

2.1. Recyclage de matériel géologique dissous et non dissous

En 1770, le jeune chimiste Lavoisier montre que l'idée de la transmutation de l'eau en terre transmise depuis Aristote est une supposition gratuite ; il conclut ses expériences sur le rapport entre la nature des terrains granitiques et quartzeux, schisteux ou calcaires et celle des eaux qui en sortent : *"Quel guide plus sûr pour le minéralogiste que l'examen des eaux ?"* En 1773, il évalue la dissolution des terres dans les eaux minérales : celles que l'on dit minérales *"improprement appelées du nom de minérales"* par les chimistes qui se sont appliqués à les analyser, et celles jugées à tort non minérales dont ils ont négligé l'examen. L'eau en circulation transporte une partie de la matière de la terre.

En 1788, les chimistes se préoccupent de minéralogie et de l'exploitation des roches. Lavoisier généralise dans un mémoire à l'Académie ses observations de terrain montrant comment la mer étale ses plus gros débris. Vingt ans plus tôt, les neptuniens ont appris au jeune minéralogiste que les volcans seraient dus à l'incendie du charbon de terre né de forêts immenses ensevelies par des catastrophes anciennes arrivées à la Terre et que l'eau, agent universel, est la cause de tous les dépôts. Il montre, sur le terrain, que la matière, de même nature que les côtes, décroît suivant le mouvement des eaux, comme dans les lavages opérés dans les mines (fig. 4).



SUR LES COUCHES MODERNES HORIZONTALES QUI ONT ÉTÉ DÉPOSÉES PAR LA MER.
(Planche I).

(Lavoisier (1788), tome V)

Figure 4. Destruction des falaises et formation de bancs de matières littorales supposées par Lavoisier

Les mêmes "cailloux" usés composent les anciens bancs qui alternent avec d'autres bancs formés d'amas de coquilles intactes évoquant la tranquillité. Comment, dit Lavoisier, des effets si différents peuvent-ils appartenir à une même cause ? Il y a deux manières, poursuit-il, de présenter les

de la difficulté
de changer
de cadre
de référence
en phase de
recherche

objets : la première, qu'on suit dans la recherche, consiste à remonter des phénomènes aux causes qui les ont produits, la seconde, utile pour les enseigner, à supposer la cause et à faire voir que les phénomènes présentés par l'observation cadrent exactement avec ces suppositions. Lavoisier suppose des mouvements alternés de la mer, causes anciennes déduites par le raisonnement de l'observation des effets anciens. Mais, dit-il, la durée des temps actuels ne permet pas d'affirmer que ces causes sont actuelles.

de la difficulté
d'intégrer un
concept à un
ancien cadre de
référence après
extension du
cadre de lecture
en phase de
recherche

Le cadre limité dans lequel il travaille permet à l'homme de terrain de trouver les variations relatives dans le temps par rapport à celles de l'espace et d'en donner une représentation graphique dans une succession de planches d'une étonnante précision. Dans les réflexions sur l'instruction publique qu'il présentera à la convention nationale en l'An II de la République - en 1793, l'année précédant sa mort - il plaidera en faveur des images pour rendre sensibles les idées imprimées dans les ouvrages destinés aux enfants. Mais le dessin des falaises de craie présente avec précision les bancs supposés témoins d'une destruction littorale par l'agitation de l'eau. La connaissance actuelle de cet exemple concret renseigne sur l'origine effective des "cailloux" qui résultent d'un concrétionnement *in situ* de silice sous forme d'opale dans le sédiment carbonaté : une présence qui témoigne en fait de conditions physico-chimiques du milieu de sédimentation favorables au recyclage de la silice non envisagé par le chimiste pourtant averti de sa solubilité.

En fait, par suite des vicissitudes de l'histoire, le mémoire présenté à l'Académie quatre ans avant sa dissolution ne verra pas vraiment le jour avant 1892, longtemps après la publication en France des œuvres de Lyell !

de la facilité de
structurer le
cadre de lecture
en cadres de
référence avec
le recul de la
connaissance

Dans l'enseignement, le matériel non dissous est le plus facile à voir circuler d'une roche à une autre dans les conditions de surface actuelles. Il s'agit de lithoclastes, fragments de roches précédentes - sédimentaires, magmatiques ou métamorphiques - ou de minéraux plus ou moins altérés qui deviendront les matériaux hérités de roches nouvelles, sédimentaires. Les ions dissous dans l'eau participeront à la néoformation *in situ* de minéraux nouveaux des roches sédimentaires. À défaut d'un vocabulaire facile, le repérage des matériaux dans des cadres de référence précis aide à caractériser, par ces matériaux recyclés, les roches sédimentaires dites d'origine détritique et/ou chimique (fig. 5).

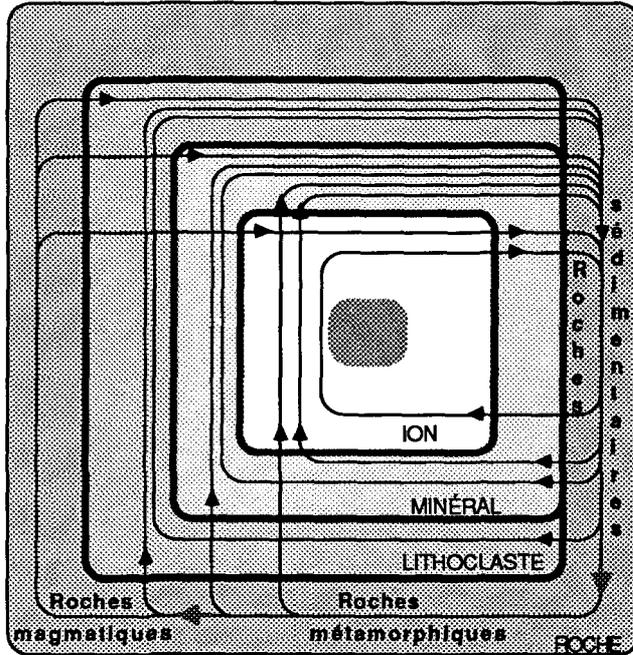


Figure 5. Matériaux issus de l'érosion des roches – sédimentaires, magmatiques et métamorphiques – et susceptibles d'être recyclés dans des roches nouvelles, sédimentaires

Les pointes de flèches noires indiquent les changements de cadres de référence des roches, lithoclastes, minéraux ou ions. Les pointes grises évoquent en revanche une transformation des roches dans le cadre de référence du même nom.

Portant sur les transformations du matériel des roches, le concept dynamique de recyclage complète le concept de cycle centré sur l'origine des roches sédimentaires.

Ainsi, l'expression graphique aide à clarifier les concepts relatifs à l'origine des constituants recyclés dans les roches sédimentaires que les mots hérités de l'histoire des sciences rendent peu accessibles.

2.2. Relation des différents cycles de matière aux échelles spatio-temporelles de la géologie

Le "cycle des roches" qui relie les roches sédimentaires, métamorphiques et magmatiques est un cycle ouvert. L'érosion, par les agents externes, des roches sédimentaires, métamorphiques et magmatiques portées à la surface libère des matériaux que, sauf exception, le transport et le dépôt dispersent et qui sont recyclés dans des roches sédimen-

de l'existence de cycles ouverts, artificiellement combinés en un cycle fermé par télescopage de plusieurs cadres de référence

taires différentes. Le bouclage du cycle impose d'associer par la pensée les cadres de référence distincts des matériaux recyclés, des roches dans lesquelles ils sont recyclés et de l'ensemble lithologique et structural soumis à l'érosion par l'élévation des roches entraînées dans l'ascension crustale. Un seul mot, cycle, associe ainsi une succession dans le temps, des transformations et des déplacements de matière (fig. 6).

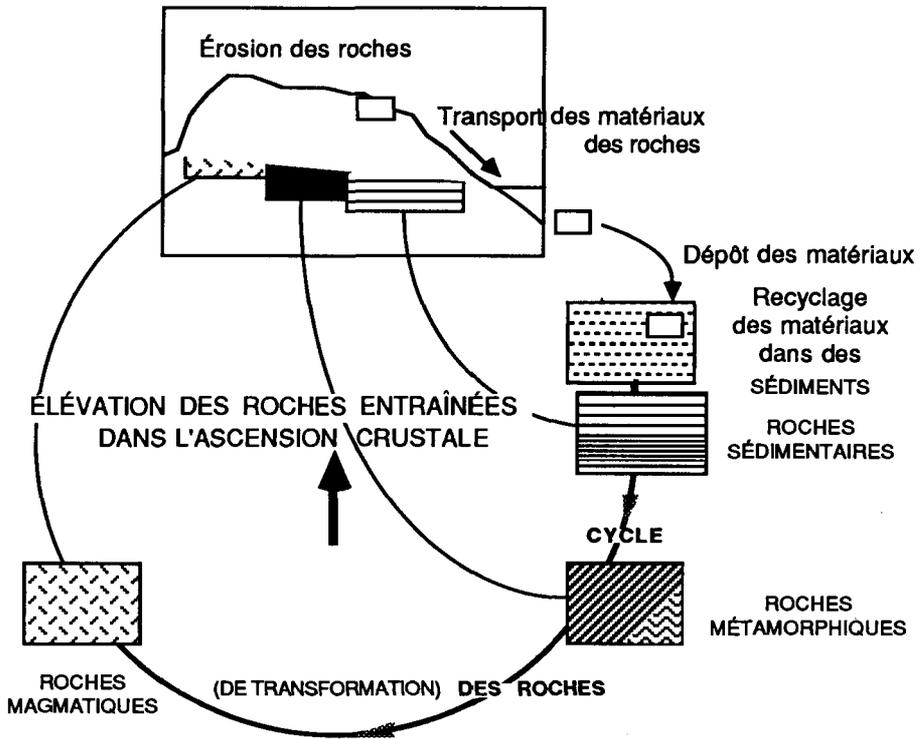


Figure 6. "Cycle des roches", purement conceptuel, exprimant un enchaînement de phénomènes appartenant aux cadres de référence différents des matériaux des roches, des roches elles-mêmes et d'un ensemble lithologique et structural

Les différentes flèches noires évoquent des déplacements de matière d'importances diverses, les longues flèches grises codent pour un devenir.

Cette fermeture artificielle du cycle, purement conceptuelle, heuristique en apparence pour celui qui le construit, constitue en fait, pour celui qui le reçoit, une source de confusion qui explique les restitutions partielles diverses le concernant, plus ou moins imbriquées avec les cycles sédimen-

taires et orogénique, voire avec le cycle de Wilson. La conversion du "cycle des roches" en recyclage des matériaux des roches permet de faire de ces derniers des boîtes noires dont l'ouverture pourra être assurée par une étude géochimique.

La diversité des échelles d'espace et de temps encourage à appliquer prioritairement le principe de l'uniformitarisme à des formations géologiques directement accessibles pour faire la différence entre les facteurs climatiques, lithologiques et structuraux du recyclage de la matière. C'est le cas des formations superficielles : plaquettes et éboulis ou formations alluviales dans une approche dynamique des phénomènes. Beaucoup plus fragmentées donc plus perméables que les roches dont elles sont issues, les formations superficielles subissent plus intensément, par leur structure et leur lithologie, l'action érosive de l'eau libératrice de leurs matériaux.

Les matériaux des roches recyclés sur place dans les formations superficielles constituent les formations autochtones, de même nature minéralogique et/ou chimique que les formations qu'elles recouvrent (fig. 7).

Les facteurs climatiques, ou agents d'érosion, participent activement au recyclage des matériaux des roches. Les facteurs lithologiques déterminent la vulnérabilité des roches dont les minéraux subissent l'altération génératrice des matériaux de ces formations. Mais les facteurs lithologiques expriment l'action d'agents qui, antérieurement, ont recyclé les matériaux de ces roches : ils constituent un effet de facteurs d'érosion dans le passé, l'enregistrement d'un recyclage ancien.

de l'intérêt
d'accéder au
concept de
recyclage par
les formations
superficielles
autochtones...

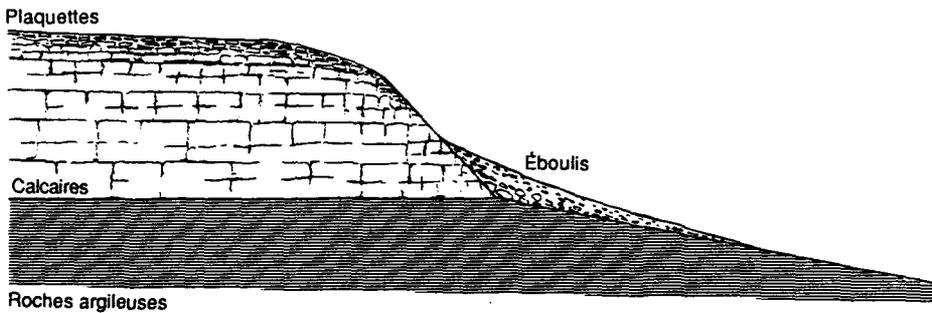


Figure 7. Formations superficielles autochtones résultant du recyclage actuel, sur place, de matériel géologique par des agents d'érosion sur des calcaires et des roches argileuses dont le pendage et la lithologie déterminent la vulnérabilité

Cette lithologie responsable de l'altérabilité des minéraux constitutifs des roches dépend elle-même du recyclage ancien de matériaux par des agents d'érosion.

... et
allochtones

Les matériaux recyclés dans les formations superficielles à distance des roches dont ils proviennent constituent les formations allochtones, de nature généralement différente des formations qu'elles recouvrent (fig. 8).

L'eau, agent d'érosion, de transport et de dépôt alluvial évolue dans l'espace avec les conditions topographiques. Les stratifications obliques expriment des classements successifs du matériel, suivis de reprises de matériel par l'érosion : des recyclages incessants. Autrefois, ces stratifications étaient dites entrecroisées : un qualificatif impropre qui prenait en compte l'intersection virtuelle des dépôts de matériel recyclé et du matériel nouveau recyclé à sa place ; ni réel, ni matériel, l'entrecroisement résulte d'une superposition purement conceptuelle d'images successives en un même lieu.

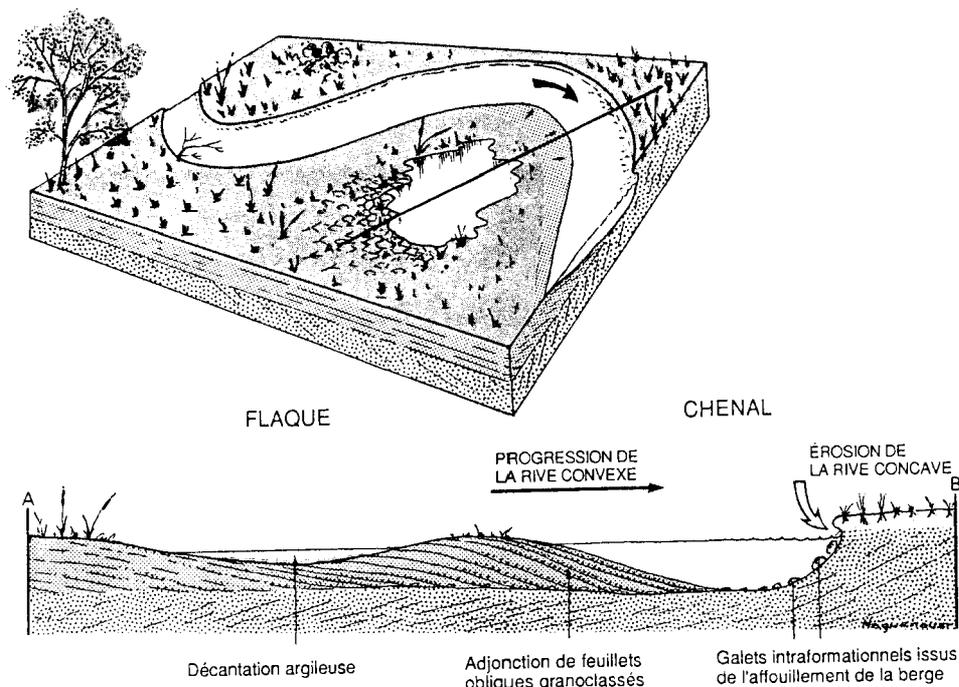


Figure 8. Formations superficielles allochtones résultant du recyclage, à distance du lieu de provenance, de matériel géologique par l'eau, agent d'érosion, de transport et de dépôt

Les argiles de débordement se décantent lentement dans la flaque à l'écart du trajet de la rivière pendant que celle-ci dépose en feuillets granoclassés des matériaux de l'amont sur sa rive convexe et recycle sur place les galets nés de l'érosion de sa rive concave.

Les formations superficielles constituent des maillons facilement accessibles de chaînes de recyclage qui montrent qu'une partie seulement du matériel concerné par ce recyclage est durablement enregistrée. Par leur accessibilité dans l'espace et le temps, elles préparent aux changements d'échelle dans l'application du principe de l'uniformitarisme.

Ainsi, une approche dynamique, par le recyclage de la matière, du cadrage des phénomènes géologiques dans l'espace et dans le temps aide à lever l'obstacle de l'enregistrement, toujours partiel, de ces phénomènes.

2.3. Relations des facteurs du recyclage de la matière en géologie

Les formations superficielles donnent accès à la méthode consistant à rechercher dans la lithologie, autrement dit dans la composition minéralogique et/ou chimique des roches, et dans leur structure, une explication à leurs propriétés et à rechercher dans l'histoire des roches une explication à cette lithologie et à cette structure, donc à trouver les facteurs de l'incidence des agents d'érosion sur les roches et, par l'application du principe de l'uniformitarisme, les facteurs ayant participé au recyclage générateur du matériel des roches.

de l'intérêt de respecter une progressivité dans les changements de cadres

Les propriétés des roches carbonées et des roches associées s'expliquent par leur lithologie et leur structure qui se comprennent par leur histoire sédimentaire et postsédimentaire et donnent accès aux facteurs du recyclage ayant présidé à la formation de ces roches : facteurs externes au bassin sédimentaire, liant le recyclage aux agents d'érosion, de transport et de dépôts continentaux (fluviaux ou lacustres) et marins, et facteurs internes de l'appel de sédimentation de ces dépôts dans un site d'accumulation déterminé par la subsidence (fig. 9).

de l'intérêt de revenir aux cadres de référence précédents après agrandissement du cadre de lecture

L'enregistrement sédimentaire exprime un recyclage beaucoup plus important de matériel cent fois déposé, cent fois repris, qui se manifeste, entre les séquences, par des galets, y compris de charbon, témoins du remaniement de dépôts précédents, et, à l'intérieur des séquences, par des stratifications obliques en feuillets granoclassés. L'ensemble des roches nées d'un enfouissement rapide par suite de la subsidence et de l'apport sédimentaire important constituent des molasses ou témoins d'une hydrodynamique contemporaine du démantèlement d'un orogène (fig. 9).

L'énergie mise en œuvre par les facteurs externes vient du Soleil : énergie lumineuse et calorifique intervenant dans la production de matière organique et entretenant, par le cycle de l'eau, le transport du matériel recyclé. L'énergie qui s'exprime par les facteurs internes vient de la Terre : énergie calorifique responsable de la subsidence et du rajeunissement des reliefs. L'intervention conjointe des facteurs assure l'entraînement gravitaire du matériel recyclé.

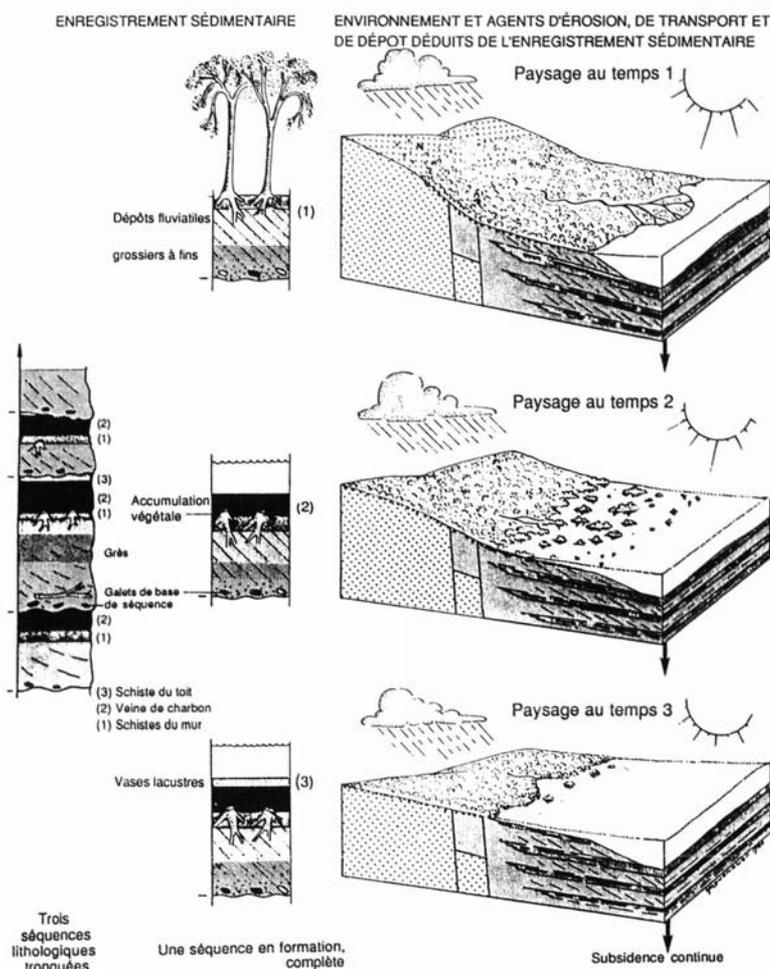


Figure 9. Explication régionale de l'action de facteurs interne et externe du recyclage dans des formations molassiques à charbon : facteur tectonique de la subsidence intervenant sur le relief et appelant la sédimentation et facteur d'érosion, de transport et de dépôt : l'eau

Quand le matériel recyclé compense la subsidence, la forêt se maintient ; quand l'alluvionnement fluvial progresse sur le domaine lacustre, elle s'étend en plaine (en haut) ; quand les eaux fluviales quittent cet endroit pour un autre plus déprimé, l'alluvionnement diminue localement et les eaux lacustres transgressent par le jeu de la subsidence, la forêt est localement noyée (au milieu), son matériel végétal est recyclé sous forme de charbon s'il est enfoui rapidement sous les sédiments ; les apports fluviaux étant réduits, seules se déposent de fines particules minérales sur la matière végétale en cours de diagenèse (en bas). La subsidence qui se poursuit appelle les eaux fluviales qui érodent et recyclent plus ou moins les sédiments précédents. Il s'ensuit une nouvelle séquence à charbon reposant sur la précédente tronquée.

L'enregistrement des variations de la sédimentation en un lieu dans le temps aide à reconstituer des variations dans l'espace à un moment donné : un moment de l'ordre du millier d'années pour les séquences à charbon, du million d'années pour des modifications importantes de rivages d'un bassin sédimentaire.

La richesse en fer du minerai sédimentaire lorrain s'explique par un recyclage du fer préconcentré dans un sédiment marin littoral soumis à une exondation consécutive à une régression de la mer (fig. 10).

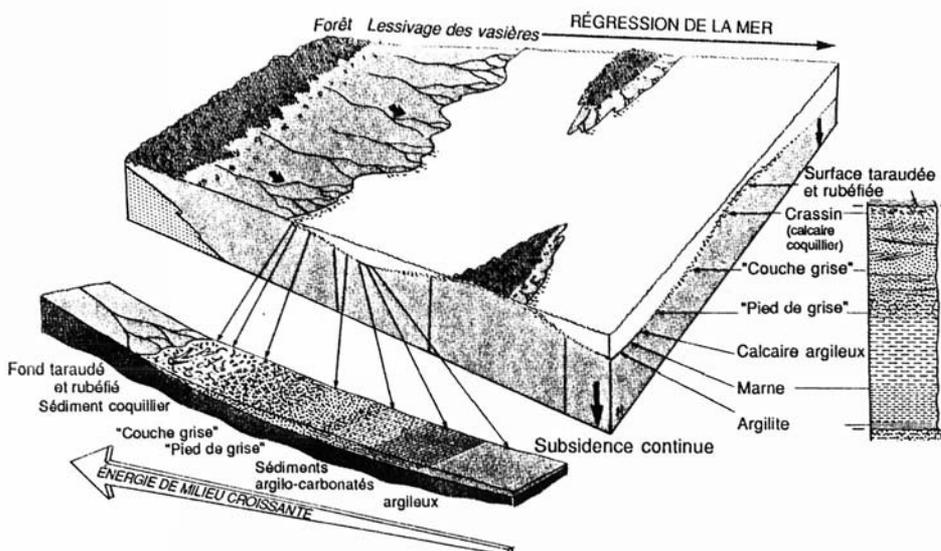


Figure 10. Explication de l'action de facteurs interne et externe du recyclage du fer dans un bassin sédimentaire : facteur tectonique de la subsidence qui appelle la sédimentation et facteur d'érosion, de transport et de dépôt : l'eau

En régressant, la mer abandonne les vasières d'un grand bassin marin, formées dans des conditions réductrices favorables au transport du fer rapidement enfoui et conservé sous sa forme réduite. Facilement mobilisé par les fleuves, le fer, recyclé avec des carbonates et des argiles, est déposé et concentré dans des bassins marins subsidents limités par le retrait de la mer.

Variant dans le temps, comme aujourd'hui dans l'espace, et autrefois dans l'espace à un moment donné, comme dans le temps, le milieu sous-marin confiné, réducteur, évolue dans l'espace vers un milieu littoral ouvert, oxydant, comme la "couche grise" passe à la "couche rouge" des mineurs.

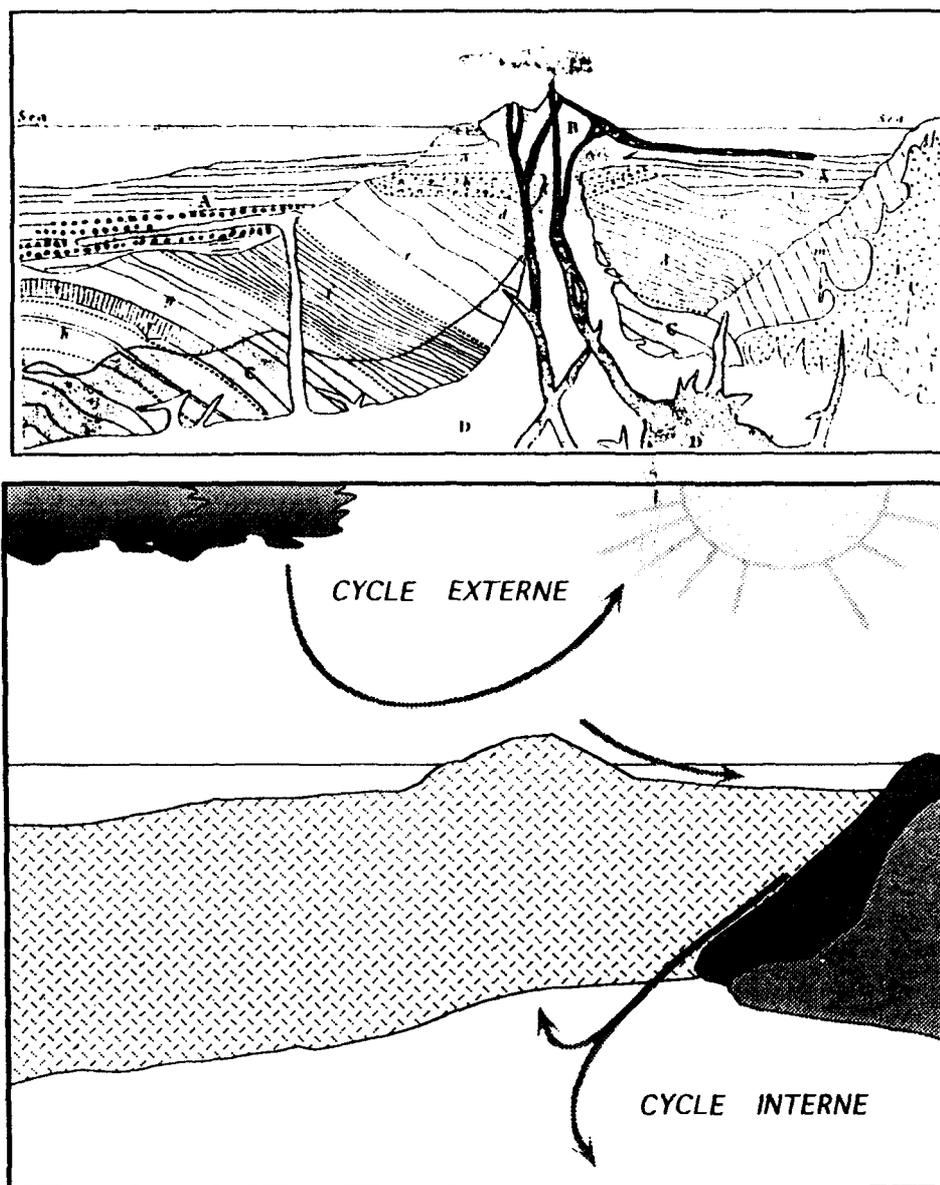


Figure 11. Explication de l'action des facteurs externes et internes du recyclage de la matière à une échelle inspirée d'une représentation synthétique de Lyell

Cette représentation vise à montrer la permanence des causes sans universalité des changements, dans une dynamique cyclique de l'espace et du temps où les quatre types de roches : roches aqueuses ou sédimentaires (A : de a à m), roches volcaniques (B), roches métamorphiques (C), roches plutoniques (D) peuvent être contemporaines en différents points du globe avant d'être ensuite remplacées par d'autres en ces différents points.

de l'intérêt de
revenir à un cadre
de lecture ancien
devenu cadre de
référence actuel
du cadre de
lecture
considérablement
grandi

L'action conjuguée des facteurs internes et externes du recyclage montre des interactions grandes. Animée par le soleil, l'eau participe au recyclage de matière, continu et partiel, des deux cycles de la Terre. À l'hydratation du matériel recyclé en surface répond la déshydratation du matériel recyclé en profondeur. En dernière analyse, ce recyclage s'explique par la radioactivité donc un flux de matière non recyclée à l'échelle de l'histoire de la Terre. Une coupe imaginaire de grande ampleur, par Lyell en 1838, constitue une synthèse explicative dans le cadre de référence de la partie externe de la Terre. Complétée d'un soleil, source d'énergie du cycle externe de matière de la Terre, elle constituerait un schéma fonctionnel actuel, animé par des flèches dont l'emploi multisémantique appelle un codage pour passer au service des apprentissages (fig. 11).

CONCLUSION

La géologie embrasse une grande diversité de concepts parmi lesquels ceux de cycle et de recyclage ont en commun d'aider l'élève à structurer son savoir en cadres de références à l'intérieur de son cadre de lecture en évolution : plus dynamique encore que le concept de cycle et moins susceptible de l'extension abusive sous-jacente à l'*a priori* de la circularité, le concept de recyclage a une valeur heuristique dans une science où les transformations ne sont jamais définitivement bouclées.

Christiane HAGUENAUER
IUFM de Lorraine

BIBLIOGRAPHIE

- ARISTOTE. *Météorologie*. Paris, Durand, 1863, et J. Vrin, 1941.
- ASTOLFI J.-P., DEVELAY M. (1989). *La didactique des sciences*. Paris, PUF.
- AUBERT E., REIGNIER A. (1909). *Nouvelle histoire naturelle élémentaire*. Enseignement primaire supérieur. Paris, E. André.
- AUDIGIER F., FILLON P. (1985). *Énergie, un enseignement pluridisciplinaire*. Paris, INRP, Collection *Rencontres Pédagogiques* n° 4.
- BACHELARD G. (1934). *Le nouvel esprit scientifique*. Paris, PUF.
- BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- BERNARD Cl. (1878-79). *Sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Paris, Baillière.

- BONNIER G. (1902-1913). *Leçons de Choses*. Paris, Librairie générale de l'enseignement.
- BOULE M. (1904). *Conférences de géologie*. Paris, Masson.
- BRUCKER E. (1925). *Cours complet d'histoire naturelle à l'usage de l'Enseignement secondaire*. Paris, Larousse.
- CARNOT S. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris, Bachelier.
- CAUSTIER E. (1923-1928). *Géologie à l'usage des élèves des collèges et lycées*. Paris, Vuibert.
- CAYEUX L. (1941). *Causes actuelles et causes anciennes en géologie*. Paris, Masson.
- CLAUSIUS R. (1850). "Über die bewegende Kraft der Wärme..." *Ann. der Physik und chemie*. Dritte Reihe, N. Band. Leipzig, J. von Poggendorff.
- DAGUILLON A. (1893-1896). *Cours complet d'histoire naturelle*. Paris, E. Belin.
- FOURMARIÉ P. (1933-1944). *Principes de géologie*. Paris, Masson, 1^e et 2^e éd.
- GIORDAN A. (1986). "Quelques conditions pour vulgariser la science aux enfants". *Revue française de pédagogie*, juillet, août, sept. 1986, p. 57-67.
- GOHAU G. (1987). *Histoire de la géologie*. Paris, La Découverte.
- GROULT M., LOUIS P., ROGER J. (1988). *Transfert de vocabulaire dans les sciences*. Paris, CNRS.
- HAGUENAUER B. et C. (1980). *Géologie en Lorraine*. Colmar, Mars et Mercure.
- HAGUENAUER C. (1991). *Comprendre par les cycles et les cycles pour apprendre ou le concept de cycle, indicateur de la connaissance, des sciences de la nature à l'écologie forestière*. Thèse Université de Nancy I.
- HAGUENAUER C. et coll. (1992). "Comprendre et prévoir la dynamique des nappes d'eau" in *Activités scientifiques informatisées : visualiser, analyser, modéliser*. Paris, INRP, p. 73-140.
- HAGUENAUER C. (sous presse). "Le concept de cycle : un modèle et ses limites pour apprendre et pour évaluer l'abstraction" in *Actes des 5èmes Rencontres de l'AEDB*, Barcelone.
- HAGUENAUER C. (1994). "Formation disciplinaire et pratique pédagogique des professeurs de lycées et collèges en Biologie - Géologie" in *Pratiques et Formations*. Nancy, CRDP, p. 47-78.

HAGUENAUER C. (1994). "La flèche, outil transposable dans les sciences" in A. Giordan, J.-L. Martinand et D. Raichvarg Éditeurs, *L'alphabétisation scientifique et technique, Actes des XVIes JIES*, p. 261-266.

HAGUENAUER C. et coll. (1994). *Éconappe : écoulement et économie des nappes d'eau souterraine : logiciel de modélisation de la dynamique des nappes d'eau*. Paris, EDF-INRP.

HAGUENAUER C. (1994). *Pour comprendre et prévoir les variations des nappes d'eau, entrez dans le cycle de l'eau*. Paris, INRP-EDF.

HAGUENAUER C. (1995). Savoir de l'ingénieur et savoir scolaire : conditions d'une transposition réussie en hydrogéologie in A. Giordan, J.-L. Martinand et D. Raichvarg Éditeurs, *Que savons-nous des savoirs scientifiques et techniques ? Actes des XVIIes JIES*. p. 513-516.

HAGUENAUER C. (1995) Les cycles, modèles réducteurs et/ou concepts intégrateurs du savoir scientifique. - *Ib.* p. 249-254.

HAGUENAUER C. et coll. (1996, à paraître). *Hydro nappe ou Hydrogéologie des nappes d'eau souterraine : logiciel de modélisation de la dynamique spatiale des nappes d'eau*. Paris, EDF-INRP.

HAGUENAUER C. et coll. (1996, à paraître). *Pour comprendre et prévenir les risques de surexploitation et de pollution des nappes d'eau ou de déstabilisation des ouvrages, gérez le cycle de l'eau*. Paris, INRP-EDF.

HAUG E. (1903-1904). "Le cycle des phénomènes géologiques". *La science au XXe siècle*, 1e année p. 343-349, 2e année p. 17-19.

HUTTON J. (1795-1799). *Theory of the Earth with proofs and illustrations*. Edinburgh, Vol. I - II, London, Vol. III.

INSTRUCTION PRIMAIRE, journal d'éducation pratique (1888-1897). Paris, H. Belin.

JOXE A. (1830). *Cours d'histoire naturelle*. Paris, E. Belin.

LAVOISIER A.-L. de (1789). *Traité élémentaire de chimie*. Paris, P. Cuchet. 2 t.

LAVOISIER A.-L. de (1788, 1862-1893) *Œuvres*. Paris, Imprimerie impériale.

LYELL Ch. (1856-1857). *Manuel de géologie élémentaire*. Paris, Langlois et Leclercq, 2 t. et suppl.

LYELL Ch. (1838-1873). *Principes de géologie*. Paris, Garnier, 2 t.

- MARIOTTE E. (1679). *Essai de physique ou Mémoires pour servir à la science des choses naturelles*. Paris, E. Michallet.
- MARIOTTE E. (1700). *Traité du mouvement des eaux...* Paris, Jombert.
- MEIRIEU Ph. (1989). *Enseigner, scénario pour un métier nouveau*. Paris, ESF.
- MURRAY J. (1815). *Examen comparatif des systèmes géologiques fondés sur le feu et sur l'eau...* Traduit par C. A. Basset. Paris, Bossange-Masson.
- ORIA M. (1945-1959). *Géologie à l'usage des élèves*. Paris, Hatier.
- PALISSY B. (1961) *Œuvres complètes*. Paris, A. Blanchard.
- PERRAULT P. (1674). *De l'origine des fontaines*. Paris, P. Le Petit.
- PIAGET J., GARCIA R. (1983). *Psychogenèse et histoire des sciences*. Paris, Flammarion.
- PLAYFAIR J. (1802) *Explication sur la théorie de la Terre par Hutton*. Traduit par C.A. Basset, 1815. Paris, Bossange-Masson.
- SAUCEROTTE C. (1835). *Éléments d'histoire naturelle : Minéralogie-géologie*. Paris, A. Delalain, Germer-Baillière. Lunéville, Creusat.
- SAUSSURE H.-B. de (1803). *Voyage dans les Alpes*. Neuchâtel, S. Fauche.

ENSEIGNER LES FOSSILES À L'ÉCOLE PRIMAIRE

Colette Gouanelle
Patricia Schneeberger

Au cycle 3 de l'école élémentaire (enfants de 9 à 11 ans), les programmes prévoient l'étude des traces de l'histoire des êtres vivants, les fossiles. Les réponses collectées en interrogeant des élèves de ce niveau sur la nature, l'âge et la formation des fossiles font apparaître des représentations qui souvent font obstacle à la compréhension des principes de la paléontologie.

L'histoire de la géologie révèle des similitudes entre les représentations des enfants et certaines théories explicatives concernant les fossiles. L'analyse des obstacles qu'il a fallu franchir pour que les idées sur les fossiles évoluent peut aider à mieux cerner les difficultés que rencontrent les enfants dans la construction du concept de fossile.

Après avoir défini les objectifs-obstacles, nous présenterons quelques situations susceptibles de faire évoluer les représentations des enfants sur les fossiles et l'histoire des êtres vivants.

Par ailleurs, de nombreux enseignants négligent cette partie du programme alors que les enfants sont très intéressés par ces questions. Pour encourager les instituteurs à enseigner l'histoire des êtres vivants, nous proposons aussi bien en formation initiale qu'en formation continue un module consacré à l'enseignement/apprentissage du concept de fossile. Nous présenterons ce module en précisant comment il est conduit par les formateurs et comment il est perçu par les formés.

Les grands Reptiles du secondaire fascinent les enfants et leur succès est accru par l'influence des médias et de diverses manifestations culturelles ou commerciales (films, émissions télévisées, expositions...). L'enseignant ne peut ignorer cet engouement, il peut au contraire profiter de l'intérêt que suscitent les monstres disparus pour proposer aux élèves une étude objective des fossiles, dans le cadre des activités scientifiques.

Cette étude, inscrite au programme du cycle 3, est indispensable car la plupart des élèves ignorent l'interprétation scientifique actuelle des fossiles et admettent tout simplement l'idée d'évolution du vivant. On pourrait croire qu'ils connaissent cette théorie alors qu'ils l'acceptent comme un dogme, qu'ils ne remettent pas en cause. Or un des objectifs de l'enseignement des sciences à l'école élémentaire est de favoriser l'acquisition de l'esprit critique, ce qui suppose qu'on présente aux élèves les théories scientifiques en leur montrant les arguments qui les fondent et les domaines où elles s'appliquent. En ce sens, l'étude des fossiles constitue une piste intéressante pour aborder l'évolution du vivant et appréhender le statut des théories scientifiques.

l'intérêt de
l'enseignement
de la géologie à
l'école primaire :

développement
de l'esprit
critique et
apprentissage
conceptuel

L'enseignement de la géologie permet donc d'associer une dimension critique à l'apprentissage conceptuel et présente ainsi un double intérêt. À ce titre, il est important que les enseignants ne négligent pas cette partie du programme. Pour organiser leur enseignement, ils ont besoin d'outils et nous avons mis en place, dans ce domaine, un dispositif de formation que nous nous proposons de décrire. À propos de l'enseignement du concept de fossile, nous essayons aussi de montrer comment le modèle constructiviste, dont nous nous réclamons, peut être mis en œuvre.

1. DES CONCEPTIONS FRÉQUENTES CHEZ LES ÉLÈVES

Plusieurs situations nous ont, depuis une dizaine d'années, permis de faire émerger des représentations d'élèves de CM sur les fossiles et la fossilisation. Nous présenterons un certain nombre de réponses que nous avons analysées.

1.1. Les situations mises en œuvre

Classe n° 1 : réponses orales recueillies, au début des années 1980, dans une classe de CM2 (enfants de 10 et 11 ans, en 5ème année d'école primaire) au cours d'une discussion motivée par l'observation de roches calcaires, contenant des fossiles et apportées par des enfants. Il s'agissait de réponses à la question *"Pour vous, qu'est-ce qu'un fossile ?"*

Toutes les idées émises ont été notées au tableau, au fur et à mesure de leur formulation.

- Classe n° 2 : réponses écrites des élèves d'une classe de CM (enfants de 9 à 11 ans) à la question *"Comment se forment les fossiles ?"*. Cette question a été posée au retour d'une visite d'exposition sur les fossiles de la région, intitulée *"Il y a ... 135 millions d'années de la Provence à l'Aquitaine"* ; cette exposition était réalisée autour des fossiles du plateau de Canjuers par le Muséum d'Histoire Naturelle de Bordeaux, durant l'année scolaire 1985-1986. Elle abordait les questions de l'évolution des êtres vivants et l'étude des paléomilieux ; un panneau était consacré à la fossilisation.

Les élèves ont répondu individuellement en s'exprimant, à la demande du maître, par une bande dessinée, le plus souvent explicitée par quelques phrases.

- Classe n° 3 : recueil de données réalisé durant l'année scolaire 1991-1992. À partir de l'observation de fossiles contenus dans des fragments de roches calcaires et apportés par les élèves, la question *"Comment se sont formés ces fossiles ?"* a été posée.

qu'est-ce
qu'un fossile
pour un élève
de l'école
élémentaire ?

des réponses
dans une variété
de situations

Les élèves se sont exprimés sous la même forme que dans la classe précédente.

- Classes n° 4 et n° 5 : recueils réalisés durant l'année scolaire 1994-95. Il s'agit de réponses d'élèves de CM2 (enfants de 10 et 11 ans) de deux classes différentes, la consigne donnée étant : *"Explique comment se forme un fossile (sous forme de texte ou de dessins)"*. Cette question fait partie d'un prétest effectué avant la visite des élèves à l'exposition du Muséum d'Histoire Naturelle sur les Dinosaures. Cette exposition présentait notamment des maquettes animées mais aussi des panneaux explicatifs, dont un sur la fossilisation.

L'analyse des réponses nous a permis d'appréhender les conceptions de certains de ces élèves.

1.2. Analyse des réponses

Les réponses des élèves de la classe n°1 ont été retranscrites dans le document 1.

Les réponses obtenues dans les classes n° 2 à 5 ont fait l'objet d'une analyse retranscrite dans le tableau du document 2.

Document 1. Inventaire des réponses à la question :

« Pour vous, qu'est-ce qu'un fossile ? »

C'est une marque déposée sur une pierre calcaire ou une roche, par un os, la coquille d'un coquillage, des ossements d'animal et conservée depuis des millions d'années.

C'est l'empreinte d'un coquillage placée dans la roche.

C'est une pierre fragile trouvée en creusant la roche.

C'est une pierre sur laquelle est déposé un insecte, une feuille ou une coquille et qui prend sa forme.

C'est un coquillage qui s'est incrusté sur une pierre et qui y est resté plusieurs millions d'années et y a laissé une marque.

C'est une chose (coquillage, insecte, ossements, poisson) qui est restée longtemps sur une roche et s'y est dessinée.

C'est une marque dans les roches au bord des rivières (poisson, insecte).

C'est une pierre molle ou dure, l'homme préhistorique s'en servait en la taillant.

C'est, par exemple, un oiseau qui s'est posé sur la roche ; des années après, il s'est imprimé dans la pierre.

C'est un objet (animal, poisson, insecte, végétation) resté 100 ans sur la roche ; l'empreinte y est restée.

C'est un coquillage posé sur une roche humide, qui reste assez longtemps et, quand il part, il reste sa trace.

Document 2. Fossiles et fossilisation au C.M.

Conceptions répertoriées des élèves	Classe n° 2 31 élèves	Classe n° 3 27 élèves	Classe n° 4 24 élèves	Classe n° 5 23 élèves	Total 105 élèves
- pas d'explication	1		13	7	20 %
- explications confuses	5	3	5	3	15 %
- le fossile est une pierre (pas d'être vivant à l'origine)		1	1	3	5 %
- l'animal meurt de mort naturelle ou de vieillesse	4	12			15 %
- l'animal meurt par impact de météorite ou de volcan	1	1		1	3 %
- la chair est mangée	4	1			4,5 %
- la chair se décompose	2	5	1		8 %
- la chair disparaît, se détache	1	3	2		6,5 %
- le cadavre ou squelette s'enfonce dans la vase, boue, argile, sable humide, calcaire mou	6	8	2	2	17 %
- le cadavre ou squelette ou coquille se pose sur une pierre puis disparaît en laissant une marque	4	2		1	6,5 %
- le squelette ou coquille s'incruste dans une pierre (dans l'eau ou à l'air libre)	3	14	4	3	25,5 %
- l'animal est enfermé dans la lave rejetée par un volcan		1			1 %
- c'est une empreinte de passage (pas ou serpent)		1		1	2 %
- c'est une empreinte dégagée par des archéologues		1		1	2 %
- le squelette ou reste d'animal est recouvert par des sédiments ou enseveli	9	1			10 %
- le fossile se forme dans la mer, l'eau	10	3	1	5	18 %
- l'eau se retire ou s'évapore après fossilisation	5	3		3	10,5 %
- le sédiment meuble durcit	1	1		1	3 %
- le squelette ou la coquille se transforme en pierre		3	1		4 %
- durées en dizaines ou centaines d'années	1	1		1	3 %
- durées en millions d'années	4	3			6,5 %
- durées en milliards d'années		1			1 %

Dans les classes n° 4 et 5 on voit apparaître un nombre important de non-réponses (13 élèves/24 et 7 élèves/23). Par ailleurs, dans chacune des classes n° 2 à 5, on trouve un certain nombre de réponses ininterprétables ou confuses (5/31, 3/27, 5/24 et 3/23).

Une des idées recueillies lors de l'étude n° 1, en réponse à la question *"Qu'est-ce qu'un fossile ?"*, montre l'influence de l'étude de la Préhistoire : *"C'est une pierre, l'Homme préhistorique s'en servait en la taillant"*. Cette influence avait déjà été mentionnée dans le document réalisé dans le cadre d'une recherche innovation du Ministère de l'Éducation nationale (1). C'est peut-être la similitude de méthode de prospection (fouilles archéologiques ou paléontologiques) qui fait confondre le fossile avec l'outil préhistorique ; ceci d'autant plus facilement que les élèves n'ont pas de repères temporels en géologie.

On constate également, dans chacune des classes, qu'un certain nombre d'élèves n'établissent pas de relations entre les fossiles et des organismes vivants ; il ne s'agit pour eux que de pierres rares ou "fragiles" ; ceci apparaît surtout dans les prétests (3/23 dans la classe n° 5). S'agit-il là d'une confusion avec les minéraux souvent associés aux fossiles dans les expositions à but mercantile ?

un fossile a
presque toujours
pour origine un
animal mort

Chez la plupart des enfants, prévaut l'idée d'une formation qui a pour origine un animal mort, le plus souvent de mort naturelle (28/31 dans la classe n° 2 et 13/27 dans la classe n° 3). Nous n'avons trouvé qu'une production où l'exemple choisi est un végétal. Le plus souvent, c'est pour eux le squelette ou la coquille de l'animal, qui, après disparition de la chair, subit des transformations ou y participe.

les fossiles se
forment dans
des roches
préexistantes

Sauf en ce qui concerne l'étude de la classe n° 2 (où l'on a visité l'exposition avant), le fossile est souvent considéré comme le résultat de l'incrustation ou de l'impression d'un reste dur (squelette, coquille) dans un sédiment meuble ou mou (6/31, 8/27, 2/24 et 2/23). Le plus étonnant est le nombre d'élèves faisant état de fossiles qui se forment par incrustation dans une pierre dure (3/31, 14/27, 4/24 et 3/23). On peut repérer un certain nombre de verbes significatifs : *"s'incruste"*, *"use la pierre et laisse son empreinte"*, *"s'enfonce dans la roche"*, *"s'enfonce dans la vase"*, *"s'enfonce dans le calcaire mou"*, *"se grave sur une pierre"*, *"s'imprime dans la boue"*, *"durcit dans la roche"*, *"se fait introduire dans une pierre"*, *"va être imprégné sur la pierre, rentre dedans"*, *"s'évapore dans la roche"*.

L'idée de contemporanéité du fossile et de la roche qui le contient n'apparaît jamais. Le fossile se forme toujours postérieurement à la roche dans laquelle on le trouve. Au

(1) DEUNFF J., LAMEYRE J. et al., *Contribution à la définition de modèles didactiques pour une approche de la géologie à l'école élémentaire et dans la formation des maîtres*, M.E.N. Direction des Écoles, 1990, réédité C.R.D.P. de Poitou-Charente, 1995.

mieux, le sédiment était encore meuble au moment où "il est arrivé".

L'explication par l'enfouissement et le recouvrement par des sédiments n'apparaît que dans la classe n° 2, où les enfants avaient visité l'exposition sur les fossiles de Canjuers. Dans ce cas, beaucoup d'élèves ont essayé de reproduire les textes et schémas des panneaux expliquant la fossilisation (9/31) ; notons que ces explications tenaient une place importante dans l'exposition. C'est aussi dans cette classe que l'on trouve le plus grand nombre d'enfants évoquant une fossilisation dans l'eau.

Les productions des élèves présentent différents modes de fossilisation :

- premier cas : la partie minéralisée de l'animal (squelette, coquille) subsiste et est retrouvée telle quelle lors des fouilles (16 élèves/31 dans la classe n°2, 19 élèves/27 dans la classe n° 3, 5/24 et 5/23 dans les classes n° 4 et 5) ;
- deuxième cas : l'animal ou ses restes minéraux ont laissé leur moule ou leur empreinte (4 élèves/31, 2/27 et 1/23). Parfois on ne trouve que le moule d'un passage (des pas de dinosaure dans une réponse de la classe n° 2, passage d'un serpent dans une réponse de la classe n° 5 ; d'autres fois c'est le stationnement assez long d'un ver de terre dans la classe n° 3) ;
- troisième cas : les restes de l'animal (minéralisés ou non) se sont transformés en pierre (3/27 dans la classe n° 3, 1/24 dans la classe n° 4).

il arrive que
la matière
animale se
transforme
en pierre

Le facteur temps est relativement peu mentionné, si ce n'est comme cause de la fossilisation, au même titre que le poids de l'animal ou l'absence de dureté du support dans lequel il s'incruste ou s'enfonce. N'ayant pas conscience de l'échelle des temps géologiques, les enfants comptent tantôt en dizaines ou centaines d'années (un siècle leur paraît déjà très long) tantôt en millions d'années (lorsqu'ils ont visité une exposition où l'on a attiré leur attention sur l'âge des fossiles) et plus rarement en milliards d'années.

un siècle, c'est
déjà vieux pour
un fossile !

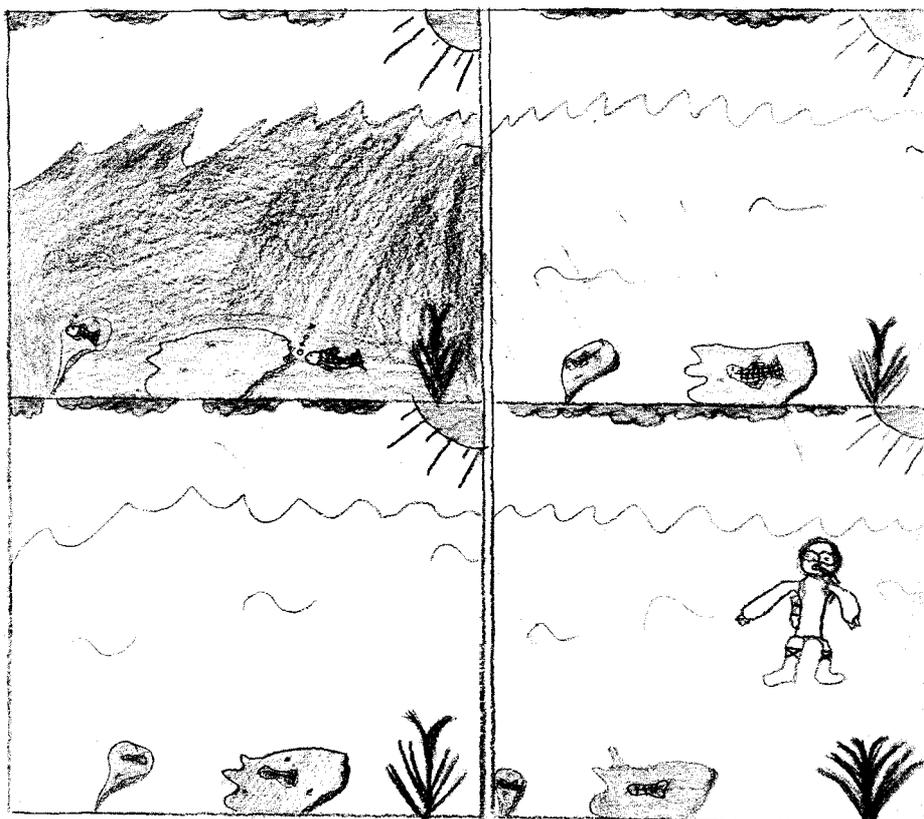
Même si nous ne pouvons prétendre dans ces conditions (il est difficile de procéder à de véritables enquêtes auprès d'élèves de l'école élémentaire) connaître toutes les conceptions des élèves sur la fossilisation, ce travail nous a permis de repérer certaines tendances.

1.3. La fossilisation vue par les élèves

Avec quelques variantes, on retrouve le même scénario chez la plupart des élèves. Plusieurs étapes de la fossilisation sont imaginées (un exemple est fourni avec le document 3).

- Un animal (rarement un végétal) meurt : généralement de mort naturelle ou vieillesse, plus rarement accidentellement ou suite à l'impact d'une météorite ou d'une éruption volcanique.

Document 3. Un scénario d'élève sur la fossilisation



- 1^{er} vignette : le poisson s'approche d'une pierre, et, se coince dedans.
 2^{ème} vignette : le poisson dans la pierre, se débat et n'est sans bouger.
 3^{ème} vignette : des années passent, des millions d'années, le squelette apparaît.
 4^{ème} vignette : le premier homme apparaît alors dans la mer, et rapporte la pierre.

l'animal, mort
ou vif, pénètre
dans la pierre

- Son corps (parties molles) se décompose ou est mangé, plus rarement les élèves disent que sa peau se détache (on ne sait comment).

- Ce qu'il en reste (squelette ou coquille le plus souvent) s'enfonce dans un matériau mou, ou meuble, ou pierre ramollie par l'humidité. Très souvent c'est dans une pierre dure qu'il s'incruste : soit en tombant dessus, soit qu'un rocher tombe sur le cadavre ou que l'animal est projeté contre un rocher et y pénètre. Cette pénétration peut se

faire sous l'eau ou en dehors. Parfois l'animal ou ce qu'il en reste ne laisse que son empreinte ou l'empreinte de son passage. Pour certains élèves (2/105), le fossile est l'empreinte laissée après le retrait des restes de l'animal par un archéologue. Il est très rare que, lors de prétests, les élèves parlent d'enfouissement dans des sédiments.

- Au mieux, le substrat se durcit lorsqu'il ne l'était pas au départ, ce qui fait qu'on retrouve le fossile dans une roche. Parfois les restes de l'animal se sont pétrifiés.

- Après une visite dans un musée, les enfants évoquent très souvent les fouilles qui ont permis de découvrir le fossile : la roche qui le contient ayant été mise à nu parce que l'eau s'est retirée ou évaporée (11 cas/105). Il est rare qu'une orogénèse soit évoquée (1 cas).

1.4. Origines possibles des conceptions des élèves

Comme le soulignent Deunff et Lameyre (1990, 1995) (voir note 1), les erreurs relevées dans les productions d'élèves peuvent indiquer des obstacles à une approche plus scientifique de la fossilisation. Rappelons que la conception de l'élève peut constituer un obstacle quand elle fournit *"une explication ou une interprétation qui, par sa simplicité, s'impose comme une évidence et empêche de se poser les questions qui feraient avancer la connaissance"* (2). Nous pouvons en effet rappeler un certain nombre d'erreurs déjà détectées dans le document cité plus haut et que nous avons retrouvées dans les classes observées :

- le catastrophisme qui amène certains élèves à imaginer la mort de l'animal ou sa transformation en fossile comme liée à un impact de météorite ou une éruption volcanique ;
- une certaine forme d'affectivité qui fait choisir plus volontiers l'animal comme exemple et qui amène les enfants à raconter l'histoire du fossile à l'aide de l'exemple d'un individu particulier, sous forme de chronique ;
- la non-maîtrise de l'échelle des temps géologiques : les enfants sont incapables de se représenter des durées très longues et surtout de relativiser les durées des différentes périodes géologiques (la non-maîtrise de la notion d'échelle au sens mathématique en est sûrement une des causes) ;
- le temps est souvent perçu comme une des causes qui permet à un reste d'animal de pénétrer dans une pierre ;
- une attitude fixiste, sans doute liée à la lenteur relative des phénomènes, qui constitue une difficulté à imaginer un dynamisme dans le paysage géologique ; c'est ce qui fait que les enfants ne pensent pas qu'une orogénèse et une érosion aient pu se produire ;
- le défaut de notions de chimie, qui empêche de s'imaginer des transformations chimiques de type fermentation, dissolution ou précipitation de carbonate de calcium ;

des erreurs
qui peuvent
constituer
des obstacles à
la construction
des savoirs

(2) ASTER (Équipe de recherche), *Procédures d'apprentissage en sciences expérimentales*, Paris, INRP, 1985, p. 208.

- la non-connaissance ou la méconnaissance de la formation des roches sédimentaires, qui empêche d'imaginer l'enfouissement sous des sédiments.

Pour essayer de mieux comprendre ce qui fait obstacle à la construction d'un concept, divers auteurs (3) se sont appuyés sur l'analyse de la construction historique de ce concept. Cette démarche nous a paru intéressante et nous l'avons appliquée au cas du concept de fossile. En effet, l'analyse que propose l'histoire des sciences peut aider à identifier la nature des obstacles repérés chez les élèves.

2. LE DÉBAT SUR L'ORIGINE DES FOSSILES

Étymologiquement, fossile vient du latin *fossilis* et désigne tout ce qui est tiré de la terre, aussi bien les roches et minéraux que les *animaux pétrifiés* ; progressivement ce terme ne s'est plus appliqué qu'aux restes d'êtres vivants.

2.1. Des explications contradictoires

L'existence des fossiles est connue depuis l'Antiquité et il semble que, dès le VII^{ème} siècle avant notre ère, l'école grecque, représentée par des auteurs comme Thalès et Anaximandre, ait imaginé le déplacement des mers sans toutefois se baser sur des observations précises. Les mêmes idées se retrouvent au VI^{ème} siècle avant J.-C. chez les Pythagoriciens mais il s'agit là encore d'opinions, reprises plus tard par Ovide dans un style poétique. D'autres auteurs anciens (Hérodote, Straton de Lampsaque puis Strabon) ont apparemment compris l'origine des fossiles mais leurs idées furent oubliées, malgré les efforts de quelques savants comme Albert le Grand (1193-1280). Il faut en effet attendre le XVII^{ème} siècle pour que la nature des fossiles soit véritablement démontrée et le XVIII^{ème} siècle pour que leur origine soit définitivement admise. Auparavant, diverses interprétations des fossiles, souvent contradictoires, ont été avancées et ont parfois coexisté ; nous en donnons ici quelques exemples, empruntés aux ouvrages de G. Gohau (4) et d'Ellenberger (5).

- Ce sont des animaux qui ont vécu jadis et qu'une vertu minéralisante a changés en pierre (d'après Avicenne).

plus de vingt
siècles pour
comprendre
l'origine
des fossiles

-
- (3) Citons par exemple les travaux de Marie Sauvageot-Skibine sur la digestion, ceux de Guy Rumelhard sur la génétique, ou ceux de Patricia Schneeberger sur la régulation et bien d'autres encore.
 - (4) GOHAU G., *Une histoire de la Géologie*, Paris, Éditions La Découverte, 1990.
 - (5) ELLENBERGER F., *Histoire de la Géologie*, Paris, Technique et Documentation - Lavoisier, 1988 (tome 1) et 1994 (tome 2).

des
interprétations
variées

- Les Glossopètres (en réalité dents de requin isolées) seraient tombées du ciel lors des éclipses de lune (d'après Pline).
- Les nummulithes (dont la vraie nature ne sera connue qu'au XIX^{ème} siècle) étaient considérées comme les restes pétrifiés de la nourriture des ouvriers qui ont construit des édifices avec les pierres sur lesquelles on observe ces fossiles (c'était le cas des pyramides d'Égypte).
- Ce sont des espèces perdues parce que trop pêchées (Bernard Palissy).
- Ce sont des coquilles disséminées sur la Terre au moment du Déluge.
- Ce sont les reflets d'antiques insuccès du Créateur (ou même des créations de Satan).

Certaines de ces explications paraissent fantaisistes à nos yeux mais, exprimées par des hommes de grand renom dont les écrits ont eu beaucoup d'influence, elles faisaient autorité auprès de leurs contemporains. Si ces idées nous font maintenant sourire c'est parce que nous les trouvons simplistes : leur fragilité nous semble évidente. Aujourd'hui en effet, la récolte de coquilles d'animaux marins loin des rivages actuels est considérée comme le moyen le plus convaincant pour démontrer les anciens mouvements de la mer et l'expliquer à un public même profane.

2.2. Les grandes options sur l'origine des fossiles

À partir du Moyen Âge, plusieurs interprétations des fossiles, défendues chacune par des auteurs différents, sont en concurrence. On trouve dans les écrits de Fracastoro (1517) le premier exposé de cette controverse.

• *L'explication diluvienne*

les fossiles
comme vestiges
de l'invasion
des eaux

Le mythe du Déluge est omniprésent dans beaucoup d'esprits depuis l'Antiquité et son influence s'est renforcée du fait de la place qu'il occupe dans les Écritures. Le respect des textes sacrés, considérés comme scientifiquement exacts, a conduit de nombreux auteurs à admettre l'existence du Déluge qui constituait une des deux grandes étapes de l'histoire de la Terre et des êtres vivants, l'autre étant la Création. Selon cette conception, on expliquait la présence de coquilles d'animaux marins sur la terre ferme, en les tenant comme les vestiges de l'invasion des eaux qui pendant cent cinquante jours, d'après le Livre de la Genèse, recouvrirent entièrement les continents.

L'explication diluvienne, qui aurait été introduite par Ristoro d'Arezzo au XIII^{ème} siècle, aura curieusement peu d'adeptes avant l'explosion diluvianiste de la fin du XVII^{ème} siècle. Réfutée par Léonard de Vinci puis par Bernard Palissy, cette conception trouve en Luther un ardent partisan au XVI^{ème} siècle mais elle est défendue ensuite par Descartes et rencontre encore beaucoup de succès au XVIII^{ème} siècle. Nous verrons plus loin qu'en imposant des durées courtes, la réfè-

rence au Déluge constitua un obstacle pour comprendre la formation des roches sédimentaires.

• **La thèse de la génération spontanée**

les fossiles
comme jeux
de la nature

Pour expliquer les différences entre les coquilles trouvées dans les roches et celles des animaux actuels, certains auteurs ont prétendu que les fossiles étaient non pas des restes d'êtres vivants mais des *lapides sui generis* c'est-à-dire des formations minérales spontanées. Au début du XVIème siècle, la thèse de la génération spontanée des fossiles connaissait un grand succès ; elle s'exprimait avec une terminologie variable dont l'étude fait apparaître les multiples formes de cette croyance, inspirée de la philosophie néoplatonicienne.

Cette opinion est combattue par Léonard de Vinci qui s'appuie sur des observations précises des gisements fossilifères. Bernard Palissy a tenté, cinquante ans plus tard, d'expliquer la présence de coquilles sans homologues actuels en avançant l'idée que "*leur genre s'est perdu*" (intuition géniale qui sera reprise et débattue par la suite). L'argumentation utilisée par ces deux contradicteurs, fondée sur une axiomatique biologique, n'a apparemment pas suffi à convaincre leurs contemporains. Il est vrai que la thèse de la génération spontanée s'est longtemps appliquée non seulement aux fossiles mais également aux cristaux et aux êtres vivants eux-mêmes. Durant le XVIIème siècle, de nombreux auteurs expliquent les ossements fossiles en les attribuant à la génération spontanée.

des résistances
dans les
mentalités

La thèse de la formation *in situ* des fossiles renaît en plein âge des Lumières avec Langius en 1708 et Elie Bertrand en 1752, deux auteurs suisses qui préfèrent retenir cette option alors que l'origine organique semblait avoir été établie grâce aux travaux de Sténon. Cet exemple montre qu'en dépit des découvertes géologiques et paléontologiques, qui semblaient clore le débat sur la signification des fossiles, des résistances ont persisté dans les mentalités des savants.

• **L'explication par l'ancien séjour naturel de la mer**

Depuis l'Antiquité, on postulait que des mers s'étaient asséchées pour expliquer la présence de coquilles sur le continent et Léonard de Vinci, reprenant les idées des auteurs anciens, a exprimé une vision comparable en cherchant à préciser le mécanisme de la fossilisation. Bernard Palissy a lui-même reconnu l'origine organique des fossiles mais sans admettre le déplacement des mers, dont il semble refuser l'idée (sans doute par respect de l'Écriture).

Les partisans de l'explication par le déplacement lent des mers sont peu nombreux au XVIème siècle. Un des ses détracteurs, Goropius, prétend que, contrairement aux allégations des Anciens, elle ne permet pas d'expliquer la présence de coquilles fossiles dans les plus hautes montagnes

les fossiles
comme témoins
du déplacement
des rivages

car pour lui les rivages sont immuables. La nature organique des fossiles ne sera admise que plus tard et il faudra attendre deux siècles pour que l'explication diluvienne de l'origine des fossiles recule devant l'affirmation argumentée du déplacement des mers. Voltaire lui-même était réfractaire à la thèse de l'ancien séjour naturel de la mer pour expliquer la présence de fossiles d'animaux marins sur les continents ; il exprima son désaccord dans un texte connu sous le nom de "lettre italienne" qui fut sévèrement critiqué par Buffon.

S'opposant aux autres interprétations des fossiles, la solution qui paraît à nos yeux la plus naturelle ne s'est pas imposée sans difficultés. L'apparente naïveté de certaines explications, aujourd'hui abandonnées, peut être en partie attribuée au fait que les auteurs qui les ont exprimées ne disposaient pas des éléments qui ont permis de comprendre la signification générale des fossiles. Pour que la construction du concept de fossile soit possible, plusieurs conditions sont en effet nécessaires et nous essayerons de les définir plus loin. Cependant, nous avons vu que certaines conceptions fausses ont continué à être affirmées pendant longtemps alors que des travaux sérieux permettaient de récolter des données et d'établir des théories qui allaient à l'encontre de ces idées. Ce constat montre, avec d'autres, que la construction du savoir est complexe et l'histoire des sciences permet de rendre compte des obstacles qu'il a fallu dépasser pour que certaines théories soient acceptées.

2.3. Obstacles et conditions de possibilité

L'idée d'obstacle, issue des ouvrages de G. Bachelard, est abondamment illustrée dans les travaux de Canguilhem à propos de l'histoire de quelques concepts de biologie (hormone, régulation...). Dans le cas qui nous intéresse, l'histoire des sciences montre que la signification générale des fossiles s'est établie lorsqu'on a pu dépasser l'emprise de certaines opinions qui s'étaient imposées, parfois défendues avec autorité.

Par ailleurs, l'histoire des sciences permet de repérer les conditions qui ont rendu possible l'émergence de certains concepts en favorisant des idées nouvelles ou des théories oubliées. En ce qui concerne le concept de fossile, quels sont les obstacles et les conditions de possibilité qui ont jalonné son histoire ?

• La durée de la Terre

La solution actuellement retenue pour expliquer la formation des fossiles suppose une durée longue du passé géologique, or pendant des siècles la chronologie courte biblique domina le sens commun. Héritage des Pères de l'Église, le temps biblique est centré sur l'Homme si bien que les durées courtes, passées et futures, s'imposent dès la Renaissance, remplaçant les cycles interminables des

forte influence
des chronologies
courtes

Anciens. Les temps géologiques sont d'abord évalués à 6 000 ans en suivant les affirmations de la Bible. Après avoir pris à la lettre les six jours de la Création, les croyants ont fini par accepter de les étaler sur une longue période mais la chronologie longue n'est acceptée qu'à la fin du XVIIIème siècle.

Un des premiers à oser s'écarter du récit de la Genèse fut Buffon et il lui en coûta quelques ennuis avec la faculté de théologie. Prudemment, il annonce une durée de 75 000 ans au lieu des trois millions d'années auxquelles l'avaient conduit ses spéculations mais ces valeurs étaient encore difficilement concevables à cette époque. Voltaire, quant à lui, ose avancer des millions d'années, cherchant avec d'autres à faire reculer la thèse des chronologies courtes. L'influence de l'esprit des Lumières aidant, l'affirmation des durées longues paraît moins subversive, d'autant plus que des opinions semblables sont exprimées un peu partout en Europe.

chronologie longue
et rejet de
l'anthropocentrisme

La victoire de la chronologie longue s'est effectuée sans rupture mais elle a nécessité (ou entraîné) un changement radical du rapport entre l'Homme et l'Univers conduisant au rejet de l'anthropocentrisme. Le progrès de la connaissance du terrain a certainement favorisé cette mutation, certains phénomènes (l'érosion en particulier) ne pouvant objectivement s'expliquer qu'en ayant recours aux durées longues.

• **La séparation entre le monde vivant et le règne minéral**

En expliquant l'emprise qu'exerça jusqu'au XVIIème siècle la thèse de la génération spontanée des fossiles, F. Ellenberger (1988, p.152) évoque *"le refus de postuler une frontière tranchée entre le règne minéral et le monde vivant"*. D'ailleurs, la terminologie appliquée aux objets trouvés dans le sous-sol est basée essentiellement sur des ressemblances (Belemnites signifiant ainsi "qui a la forme d'une flèche") et ne distingue pas les véritables fossiles du reste du monde minéral.

la faculté
d'organisation
est propre
à la vie

Sous l'influence du néo-platonisme, les auteurs du XVIème siècle attribuent volontiers la formation des fossiles à une force créative (*vis plastica*) de même nature que celle qui produit les plantes et les animaux. Césalpino postule au contraire que le règne vivant et le règne minéral sont deux mondes séparés et il rejette la thèse de la génération spontanée des fossiles. Posant en axiome que la faculté d'organisation est propre à la vie, Césalpino n'a pu convaincre ses contemporains qui voyaient dans les fossiles l'œuvre d'une force organisatrice capable de produire des imitations d'êtres vivants.

Plus tard (en 1667-69), Sténon a démontré l'origine organique des fossiles sur la base d'observations minutieuses, donnant raison à la clairvoyance de Césalpino.

• **La signification des couches du sous-sol**

La question de l'origine des fossiles est indissociable de nombreux autres problèmes et en particulier de celui de la formation des roches sédimentaires. Déjà, la science médiévale avait élaboré des théories explicatives audacieuses sur la formation des couches rocheuses en imaginant un lien entre l'érosion et la sédimentation marine mais les savants de la Renaissance n'ont pas repris ces idées. Léonard de Vinci avait compris que les terrains qui contiennent les fossiles se sont déposés au fond de l'eau mais, n'étant pas publiés, ses textes ne sont pas connus de ses contemporains, ni même des générations suivantes.

Pour expliquer la présence de coquilles au sein des roches à l'intérieur même des montagnes, Bernard Palissy fait appel à une "*substance salsitive et germinative*" apportée par la percolation des eaux de pluies. À cette époque en effet, la signification de couches du sous-sol n'a pas encore été établie et, le problème de l'origine des fossiles étant envisagé isolément, il paraissait sans doute plus simple d'imaginer une formation *in situ*. On sait d'ailleurs le succès que connut la thèse de la génération spontanée des fossiles, à laquelle Bernard Palissy était néanmoins opposé.

la théorie
des strates :
une véritable
révolution
conceptuelle

Grand fondateur de la géologie moderne, Sténon introduit dans les sciences de la Terre les termes *stratum* et *sedimentum* qu'il a empruntés à la chimie et à la médecine. On lui doit d'avoir compris et exposé clairement (en 1667) le principe de formation des couches du sous-sol par dépôts successifs au sein d'un fluide. Notons que Sténon se tait sur l'origine des sédiments argilo-sableux et ne lie pas la sédimentation à l'érosion. On peut penser qu'étant partisan de la thèse diluvienne, donc d'une chronologie courte, il ne s'autorise pas le recours à un processus qui exige des durées importantes. Plus tard un autre diluvianiste, Woodward, reprenant l'explication de Sténon, explique que le Déluge a dissous en masse l'ancienne terre et qu'ensuite a eu lieu une resédimentation en strates ordonnées. Les apports de Sténon restent néanmoins essentiels pour comprendre l'origine des fossiles présents dans les roches sédimentaires et surtout, en posant le principe de superposition des couches selon l'ordre d'ancienneté, ils rendent possible la reconstitution de l'histoire de la Terre sur la base d'observations de témoins du passé.

• **Immutabilité des faunes**

La succession des faunes est aujourd'hui reconnue par les scientifiques et admise par tous, ou presque. Cependant cette idée ne s'est imposée qu'à une époque relativement récente de l'histoire des sciences.

Bernard Palissy a reconnu comme d'anciens organismes, des formes n'ayant pas d'homologues vivants actuels, pensant qu'ils avaient disparu parce que trop pêchés. Même s'il rend ces animaux contemporains de l'Homme (ce qui peut

nous étonner quand il s'agit des ammonites), il a le mérite d'expliquer rationnellement ces fossiles. Le terme "*espèces perdues*" sera repris au XVII^{ème} siècle par Hooke et Leibniz qui avancent des idées audacieuses sur les relations entre ces créatures et les formes actuelles.

accepter l'idée
d'une succession
de faunes

Le principe de la succession chronologique des faunes dans le temps n'est pas compatible avec le dogme religieux de la Création unique selon lequel toutes les espèces seraient apparues sous leur forme actuelle et en même temps. Pendant longtemps, ce qui paraissait surtout inconcevable aux yeux des croyants et inacceptable pour l'Église c'est l'idée d'une transformation des espèces. Le premier qui, au XVIII^{ème} siècle, eut l'audace d'affirmer l'existence d'une filiation entre les espèces, l'abbé Soulavie, fut contraint à se rétracter. Ses contemporains furent plus prudents et il faut attendre le XIX^{ème} siècle avec Lamarck pour que le transformisme puisse s'exprimer en opposition avec le fixisme qui domina le siècle précédent. On sait ce qu'il advint ensuite : l'accueil que reçurent les idées de Darwin et le développement qu'elles trouvèrent à travers les travaux de ses successeurs, ces derniers s'attachant à rechercher les mécanismes de l'évolution des êtres vivants.

Avant de chercher une théorie expliquant la succession des faunes, il était nécessaire d'en accepter le principe et on peut penser que les efforts de muséologie du XVI^{ème} et du XVII^{ème} ont favorisé ce changement de mentalités. En effet, la constitution de riches collections de fossiles a permis d'effectuer des comparaisons et de repérer les variations de faune d'une couche à l'autre.

• *Le catastrophisme opposé à l'uniformitarisme*

Les partisans des chronologies courtes faisaient le plus souvent intervenir des cataclysmes, comme le Déluge, pour expliquer le modelé du relief ou la disparition des faunes anciennes. Certes, Aristote et Ovide avaient déjà pensé faire intervenir des causes lentes mais pour reconnaître la valeur de telles visions, on est obligé d'admettre des durées longues, ce que les fidéistes déclaraient incompatibles avec le texte de la Bible.

des
changements
 Brusques ou des
causes lentes

L'actualisme ou uniformitarisme postule au contraire que les phénomènes géodynamiques passés s'expliquent par les mêmes causes que celles qui agissent aujourd'hui, excluant les grandes mutations évoquées par les catastrophistes. Cette théorie s'est imposée au XIX^{ème} siècle seulement, avec Lyell dont l'œuvre eut un succès considérable.

La querelle entre actualistes et catastrophistes est donc ancienne mais il faut reconnaître que si l'uniformitarisme est actuellement tenu comme un principe fondamental en géologie, les fondateurs de la stratigraphie paléontologique étaient au contraire partisans de changements brusques.

Ce dernier exemple montre la complexité de l'histoire de la construction du savoir dont le cheminement n'est pas

linéaire, contrairement à ce qu'on a tendance à croire lorsqu'on se réfère à l'idée de progrès. Ce rapide exposé ne prétend pas, bien évidemment, être exhaustif, et il faudrait citer bien d'autres obstacles et conditions de possibilité pour vraiment comprendre l'émergence de la signification des fossiles. Retenons simplement qu'ils furent de différentes natures, tant conceptuelle que théologique ou idéologique.

3. COMMENT AIDER LES ÉLÈVES ?

La didactique de la biologie a repris l'idée d'obstacle pour l'appliquer à l'apprentissage des concepts scientifiques. Après avoir repéré les obstacles à la construction du concept de fossile, il conviendra de trouver des situations pédagogiques permettant d'aider les élèves à les dépasser.

3.1. Quels sont les obstacles ?

Plusieurs auteurs (6) ont rapproché certains obstacles rencontrés auprès des élèves de ceux que révèle l'histoire des sciences : on pourrait faire de même pour les obstacles qui sont liés à la connaissance des temps géologiques. Cependant, pour les géologues anciens il s'agit seulement d'obstacles conceptuels (méconnaissance de l'âge de la Terre par exemple) alors que pour les enfants, ils se doublent sans doute d'une inaptitude à se représenter des durées relatives en géologie. D'autre part, il semble peu probable qu'à l'heure actuelle les enfants soient gênés par des considérations religieuses ; nous n'avons trouvé aucune réponse y faisant allusion. Néanmoins, il est certain que l'éclairage apporté par l'histoire des sciences est en mesure de nous aider à analyser les réponses des enfants.

Toutefois, malgré certaines similitudes (maîtrise des temps géologiques, modèle de fossilisation dont parfois l'idée de génération spontanée, fixisme), la construction du concept de fossile, en CM aujourd'hui, diffère donc de celle qui fit évoluer cette idée autrefois et on ne peut espérer faire franchir les obstacles aux élèves comme les scientifiques ont pu le faire (7).

3.2. Quelles situations peut-on proposer ?

- *Obstacles que l'on peut espérer voir dépasser*

On donnera priorité, en CM, aux obstacles qui peuvent être surmontés, tels que ceux qui sont liés à la maîtrise du temps et à la compréhension de la formation des roches

(6) Voir note 3.

(7) SAUVAGEOT-SKIBINE M., "De la représentation en tuyaux au concept de milieu intérieur" in *Aster* n° 17, *Modèles pédagogiques* 2, Paris, INRP, 1993, p. 203.

les élèves ne peuvent revivre la construction historique des connaissances

se repérer par rapport à l'échelle des temps géologiques

savoir que les fossiles sont contemporains de la roche qui les contient

sédimentaires. Il nous paraît donc nécessaire que l'enseignant se fixe un certain nombre d'objectifs-obstacles (le concept d'objectif-obstacle a été défini par Martinand) (8), c'est-à-dire d'objectifs précis qu'il essaiera d'atteindre pour aider les élèves à modifier leurs conceptions.

Il faudrait donc, pour aider les élèves à modifier leurs conceptions :

- leur faire prendre conscience de la durée des temps géologiques et les aider à se repérer par rapport à l'échelle des temps en géologie ;
- les aider à construire un autre modèle explicatif de la fossilisation en relation avec la sédimentation.

Ceci devrait permettre de passer au niveau de formulation suivant : les fossiles sont des témoins de la vie du passé ; ils sont parfois très anciens (plusieurs millions d'années) ; ils se sont formés en même temps que la roche qui les contient, c'est-à-dire par enfouissement dans des sédiments ; les plus anciens sont (sauf bouleversements ultérieurs) dans les couches de terrain les plus profondes.

Il va de soi que, dans une perspective constructiviste de l'apprentissage, il conviendrait de partir des conceptions des élèves afin de générer, par le biais de la confrontation, un conflit socio-cognitif susceptible de faire douter certains élèves et de les aider à faire évoluer leur système explicatif. Pour atteindre ces objectifs, on pourra passer par des situations qui conduiront vers des réalisations concrètes et compléter par des activités de documentation.

Nous allons proposer trois types d'activités susceptibles, nous l'espérons, de faire progresser la connaissance des élèves sur les fossiles et la fossilisation.

• Faciliter la représentation des temps géologiques

Le simple examen de la figuration des temps géologiques que proposent les manuels ne suffit généralement pas pour que les élèves se représentent correctement les durées et l'échelle. Très souvent, les ères sont représentées par des bandes de couleurs et largeurs variables sans qu'aucune échelle ne soit mentionnée ; presque toujours, cette échelle est variable elle aussi, et l'ère quaternaire peut apparaître aussi longue que l'ère primaire si l'on ne prend la peine de calculer les durées de chacune. Nous avons souvent fait l'expérience de demander à des enfants quelle est la plus longue ; les réponses obtenues sont majoritairement influencées par la largeur des bandes de couleur et peu d'enfants, même au CM2, pensent à calculer la durée à l'aide des nombres qui marquent les débuts de ces ères. De plus, l'ère quaternaire dont ils connaissent un certain nombre d'événements à travers l'étude de l'histoire ne peut,

(8) MARTINAND J.-L., *Connaître et transformer la matière*, Berne, Peter Lang, 1986.

savoir que
l'humanité vient
juste de naître

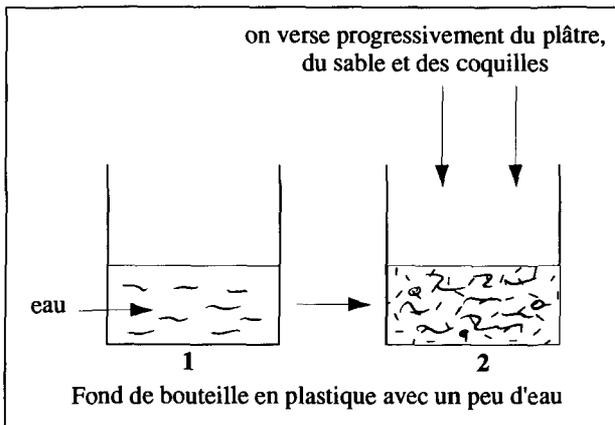
passer par la
représentation
concrète des
temps
géologiques

à leurs yeux, qu'être très longue, en regard des autres ères sur lesquelles ils n'ont pas d'information. D'autre part, le remède qui consiste à inciter les élèves à calculer les durées des ères ne suffit pas, nous en avons souvent fait l'expérience, pour modifier leur représentation des durées en géologie.

Nous proposons de faire construire une échelle des temps géologiques plus concrète, c'est-à-dire à l'aide d'une pelote de grosse ficelle. Le protocole que nous allons décrire est celui qui nous est apparu le plus efficace parmi ceux qui sont parfois présentés dans des documents (par exemple dans le document établi par le Muséum d'Histoire Naturelle de Bordeaux).

On choisira comme unité pour représenter le temps (l'unité en géologie étant le million d'années : MA), une unité de longueur de ficelle : 1 cm par exemple. Ensuite on calculera puis l'on mesurera les longueurs correspondant à des durées marquantes (ères par exemple) et l'on pourra placer des repères et des étiquettes aux points correspondant à des événements connus (début d'ères, apparition ou disparition de certains groupes d'êtres vivants...). Ce travail qui nécessite plusieurs dizaines de mètres de ficelle est plus facile à réaliser dans la cour. La construction de cette "ficelle chronologique" par les enfants nous paraît nécessaire pour leur faire prendre conscience des durées relatives et de l'échelle des temps géologiques. On peut aussi y replacer la période historique afin de leur en montrer la faible durée relative. Ceci permet aussi de repérer que les Dinosaures avaient disparu bien longtemps avant l'apparition de l'Homme.

• Aider à modéliser la sédimentation



fabriquer des
"faux fossiles"

Les enfants ayant compris, pour la plupart, que les fossiles sont des restes minéralisés d'animaux (on ne peut aborder les transformations chimiques à l'école élémentaire) ou des moulages de ces parties dures, on peut leur proposer de rechercher, comme on le ferait en technologie, toutes les solutions possibles pour réaliser des moules et des moulages (de coquilles par

exemple), ce qui correspond à un choix de matériaux et de protocole à suivre. On va donc les amener à envisager d'autres possibilités que l'utilisation d'un matériau mou ou meuble dans lequel on obtiendrait un moulage uniquement par pression, mais on peut les inciter à choisir un matériau

qui passerait de l'état "liquide" à l'état solide. Le matériau le mieux adapté à ce genre d'opération paraît être le plâtre de Paris que l'on peut faire tomber en pluie dans l'eau et dans lequel on peut à intervalles de temps connus, introduire du sable, des coquilles ou autres ossements, jusqu'à absorption totale de l'eau. Ainsi, on recrée le processus de sédimentation et on fait une première approche de la stratigraphie ; on peut même colorer le plâtre. On pourra ensuite casser le plâtre pour trouver les moules et empreintes et dater (ou plutôt minuter) les différentes couches : la plus ancienne étant toujours au fond. On peut espérer qu'ainsi les enfants comprendront mieux comment ont pu se former certains types de fossiles : coquilles, moules et moulages.

montrer l'étroite
relation entre
la fossilisation et
la formation
d'une roche

Cette activité a le mérite de donner à l'expérience une place authentique par rapport à la démarche scientifique. En outre, comparée à la simple réalisation de moulages en pâte à modeler, elle montre la contemporanéité des fossiles avec le plâtre (donc la roche) dans lequel on les trouve ; les moulages en pâte à modeler ne font, en effet, que conforter l'idée que la roche existait déjà (plus ou moins longtemps) avant. Un inconvénient persiste cependant à cette représentation du modèle explicatif de la fossilisation sous forme de "modèle réduit" ; en effet les durées sont elles aussi très réduites, cette procédure va donc plutôt à l'encontre du franchissement de l'obstacle "du temps" en géologie. Il est par conséquent indispensable de travailler en parallèle sur la représentation des temps géologiques (comme il est expliqué plus haut).

**• Exploiter la visite d'une exposition
et/ou lire des documents**

Ayant travaillé, avec des maîtres sur l'exploitation réalisée à partir de la visite d'une exposition sur les Dinosaures (9), exposition très médiatisée, nous nous sommes rendu compte que les élèves ont surtout été attirés par l'animation particulièrement prégnante des maquettes et tout le côté mythique que représentent ces animaux disparus de notre planète. Dans ce domaine, ils font rarement la différence entre réalité et fiction et ils sont prêts à accepter tout enseignement dogmatique.

Par ailleurs, ayant réalisé une enquête d'opinion auprès des élèves d'une classe à leur retour de l'exposition, nous nous sommes aperçues qu'ils ont moins été attirés par les connaissances scientifiques conceptuelles (comme la fossilisation des Dinosaures) que par des informations de type "encyclopédique" (telles que la taille ou le poids). Une des

(9) SCHNEEBERGER P., "Des Dinosaures à l'école ou : Et si on allait à l'Expo. ?" in *Actes des XVIèmes Journées Internationales sur la Communication, l'Éducation et la Culture Scientifiques et Industrielles*, Paris, A. Giordan, J.-L. Martinand et D. Raichvarg Éditeurs, 1994.

chercher des
réponses dans
une exposition

questions qui leur étaient posées par écrit, lors de cette enquête, était : *"As-tu appris des choses nouvelles ? Si oui, lesquelles ?"*. Le dépouillement des réponses recueillies dans une classe révèle que, sur 23 élèves en CM2 :

- 3 élèves seulement répondent en évoquant les processus de fossilisation ;
- 7 élèves disent avoir appris de nouveaux noms de Dinosaures ;
- 9 élèves ont apprécié les informations concernant la taille, le poids... et notamment les records (le plus long, le plus gros, le plus petit...) ;
- 5 élèves sont heureux d'avoir appris (!) ou entendu les cris ;
- 3 élèves seulement font référence à la période à laquelle ils vivaient.

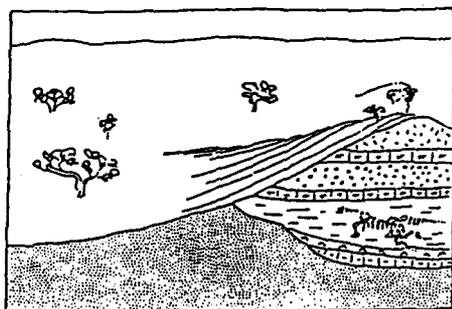
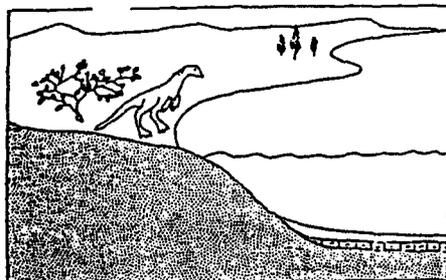
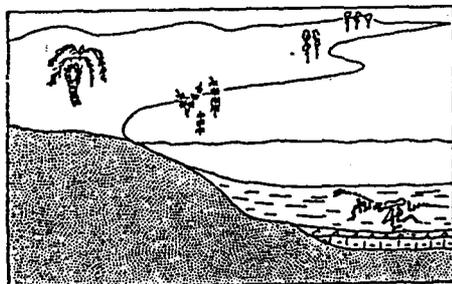
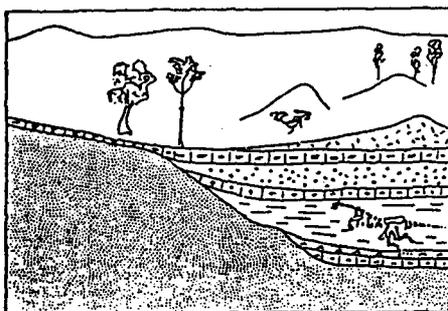
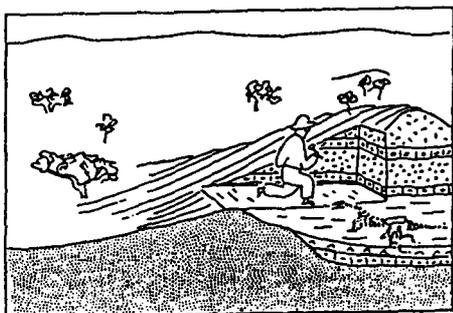
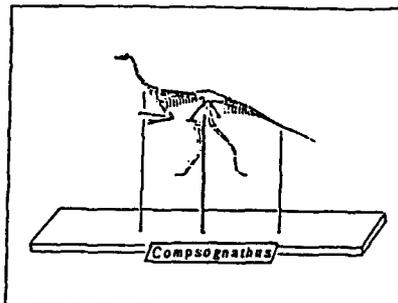
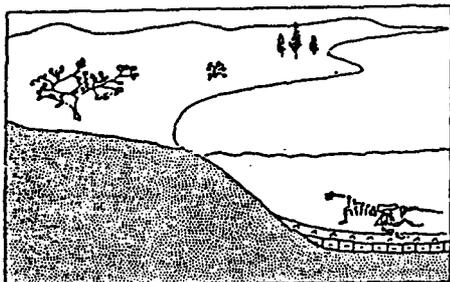
Il nous paraît donc indispensable, en ce qui concerne ces problèmes de fossilisation et d'échelle des temps géologiques, que tout travail de documentation (dans une exposition ou à l'aide d'autres documentaires) soit suscité par des questions précises et éventuellement des hypothèses formulées à la suite d'une première approche en classe ; approche au cours de laquelle on aura pris le soin de faire émerger les conceptions des élèves et où les réponses auront été confrontées afin de dégager toutes les idées à vérifier, en les reformulant au besoin, et toutes les questions restées sans réponses, en les précisant.

reconstituer une
chronique

Avec ou sans visite d'exposition, la fossilisation peut être expliquée sous forme d'une bande dessinée (document 4) proposée par le Muséum d'Histoire Naturelle de Bordeaux et que certains maîtres utilisent avec les élèves de CM2 en la leur donnant dans le désordre. La remise en ordre chronologique des vignettes oblige les élèves à analyser et décoder complètement les images. C'est aussi un excellent exercice pour amener les élèves à établir des relations aussi étroites que possible entre les différentes images et pour appréhender ainsi les processus de la fossilisation.

Les activités présentées ci-dessus ont été construites avec pour objectif d'aider les élèves à dépasser les obstacles relatifs aux temps géologiques et à la formation des fossiles. Il apparaît en effet nécessaire de proposer des activités adaptées rendant possible le franchissement de ces obstacles afin de permettre aux élèves de construire le concept de fossile.

Document 4. Bande dessinée dans le désordre
extraite d'un document du Muséum d'Histoire Naturelle de Bordeaux



4. APPRENDRE À ENSEIGNER LES FOSSILES

Les développements qui précèdent ont fait apparaître les difficultés que doivent surmonter les élèves pour comprendre la notion de fossile et donc la nécessité de construire des situations pédagogiques adaptées. Ce simple constat ne suffit pas pour permettre aux enseignants d'organiser leur enseignement ; leur formation doit inclure à la fois une analyse du contenu et une réflexion sur l'apprentissage des concepts scientifiques avant de leur présenter des stratégies pédagogiques possibles.

4.1. Présentation du module de formation

Nous proposons ici une présentation chronologique des différentes étapes du module de formation que nous avons élaboré.

- **Première étape : mise en situation**

Dans un premier temps nous demandons aux formés de faire état de leurs connaissances sur la question des fossiles, de leur nature, de leur origine, de leur mode de formation. Cet exercice peut être proposé par exemple à l'occasion d'une sortie au cours de laquelle des échantillons de roches ont été récoltés ou encore à propos de l'observation des roches utilisées dans les constructions traditionnelles de notre région (calcaire riche en fossiles).

Cette situation permet aux formés d'apprendre à exprimer et à connaître leurs représentations mentales, ce qui constitue un de nos objectifs de formation. De plus, elle conduit à réfléchir aux situations de départ qu'il pourront proposer aux élèves et à la place qu'ils accorderont aux représentations de ceux-ci.

Au cours de l'échange qui suit cette mise en situation, il apparaît le plus souvent des incertitudes sur la signification des fossiles. Le formateur recense alors toutes les interrogations manifestées par les formés et reformule au besoin les questions qui feront l'objet d'une étude plus approfondie.

- **Deuxième étape : analyse du contenu**

Le formateur propose de rechercher des réponses aux problèmes posés en travaillant par groupe et en utilisant différents moyens d'investigation : observation de fossiles variés, documentation, sortie sur un site géologique, visite d'une exposition ou d'un musée, manipulations.

Chaque groupe travaille sur une des questions retenues par le formateur et doit communiquer ses résultats aux autres, sous forme synthétique.

Exemples de questions soumises à une recherche

- Comment se forme un fossile ?
- Quelles sont les espèces que l'on peut reconnaître dans une collection de fossiles ?

une démarche
identique à celle
qui est proposée
aux élèves

- Quelles informations nous donnent les fossiles sur l'histoire de la Terre ?

Au cours de cette phase, les formés peuvent éventuellement corriger leurs erreurs sur la signification des fossiles et apprendre à mieux connaître les méthodes utilisées par les géologues.

À l'issue de ces travaux, le formateur demande de construire une trame conceptuelle (dont le principe est rappelé) qui fasse apparaître tous les éléments constitutifs du concept de fossile ainsi que les articulations logiques qu'on peut établir entre ces sous-concepts (le document 5 en présente un exemple). Le formateur peut alors aider les enseignants à effectuer cette tâche en leur proposant des phrases définissant les différentes notions constitutives du concept de fossile. Les enseignants en formation travaillent d'abord en groupe puis ils doivent présenter aux autres leur trame en précisant la logique qui a présidé à sa construction. Une discussion, organisée au moment de la confrontation des trames réalisées par les formés, permet de montrer l'intérêt de ce type d'outil qui donne une vue d'ensemble et fait apparaître les éventuels pré-requis relatifs à la compréhension de la notion de fossile. Ce qui importe surtout c'est le travail d'élaboration de cette trame qui nécessite de la part des formés une réorganisation de leur savoir. Dans cette perspective, l'analyse d'un contenu d'enseignement est considéré non plus comme une simple mise au point ou révision mais comme une réflexion à valeur pédagogique.

introduire
une réflexion sur
l'organisation
du savoir

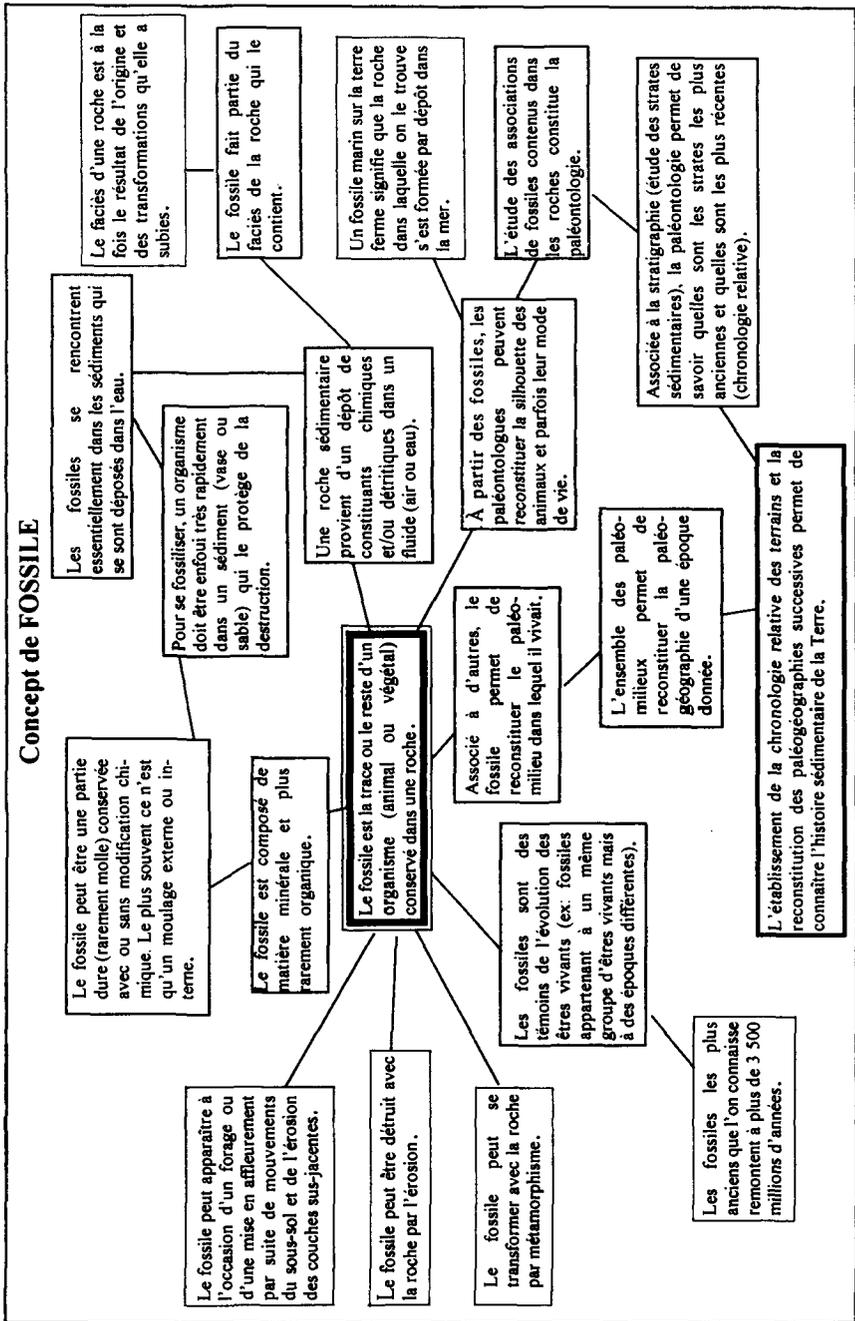
• *Troisième étape : analyse des représentations des élèves*

Après avoir envisagé le contenu de l'enseignement, il s'agit d'étudier comment on peut aborder la notion de fossile à l'école primaire. Nous disposons d'enregistrements de séquences de classe au cours desquelles le maître commence par faire émerger les représentations des élèves pour essayer ensuite de les faire évoluer. La présentation de cette démarche, à l'aide d'un de ces films, permet de poser le problème de la diversité des représentations des élèves et de leur origine.

poser le
problème de
la diversité et
l'origine des
représentations

Nous proposons alors aux formés d'analyser les résultats obtenus à l'occasion d'études comme celles que nous avons présentées plus haut (en 1.) : ils doivent classer les réponses des élèves en repérant les représentations qu'elles permettent de révéler. La nature des modèles explicatifs utilisés spontanément par les élèves et leur rôle dans l'apprentissage font l'objet d'une discussion au cours de laquelle le formateur introduit l'histoire des sciences comme un outil pour appréhender les obstacles à la construction du savoir.

Document 5. Trame conceptuelle "fossile"



• **Quatrième étape : éclairages apportés par l'histoire des sciences**

Il s'agit d'aider les formés à repérer quelques-uns des obstacles et conditions de possibilité qui ont jalonné la construction historique du concept de fossile, puis à mettre en relation ces données avec l'analyse des représentations des élèves.

l'histoire des sciences comme outil pour la formation

En utilisant des textes qui relatent quelques étapes de l'histoire de la formation du concept de fossile, nous essayons de montrer les difficultés qu'il a fallu surmonter pour aboutir à la conception actuelle. Transposée au cadre des situations de classe, cette réflexion permet de considérer les conceptions des élèves avec un regard différent et de comprendre en quoi elles peuvent constituer des obstacles à l'apprentissage.

• **Cinquième étape : phase d'application**

Le formateur présente une stratégie qui consiste à construire des situations visant à faire évoluer les représentations des élèves. Au cours de cette phase, illustrée par des exemples issus des travaux décrits plus haut (voir 3.), nous insistons sur la nécessité qu'il y a de bien définir les progrès que l'élève doit accomplir, de savoir se limiter dans ses exigences et d'évaluer l'évolution des représentations.

apprendre à construire des situations pédagogiques adéquates

Les formés sont ensuite invités à construire des situations sur le même modèle en choisissant d'autres objectifs-obstacles et à les tester dans des classes.

4.2. Les réactions des formés

Les réactions du public varient selon que l'on s'adresse à des enseignants en stage ou à des futurs professeurs des écoles. En effet, dans le cadre de la formation initiale, nous présentons à plusieurs reprises, à propos de différents domaines d'enseignement, la démarche qui consiste à prendre en compte les représentations des élèves alors qu'elle est souvent nouvelle pour les stagiaires que nous rencontrons en formation continue.

L'idée d'utiliser l'histoire des sciences pour analyser les représentations des élèves, qui constitue la principale originalité de ce travail, est généralement perçue avec intérêt par les différentes catégories de formés. Cependant, cette méthode effraie souvent du fait de l'immense culture qu'elle suppose chez l'enseignant et du temps de préparation qu'elle exige. En effet, les ouvrages d'histoire des sciences existants s'adressent à un public averti et les données que l'on voudrait en extraire ne sont pas directement accessibles. Cette remarque paraît justifiée et ne saurait qu'encourager les chercheurs en didactique des sciences à poursuivre le travail déjà engagé dans ce domaine.

mieux qu'une
recette,
un modèle
pédagogique
de référence

se former, c'est
changer de
conceptions

Il est bien évident, toutefois, que nous cherchons essentiellement à montrer aux formés les présupposés qui sont à la base de la démarche pédagogique à laquelle nous voulons les initier. En effet, cette démarche, parfois qualifiée de *nouvelle pédagogie* pour les sciences, peut être appréhendée comme une recette que certains enseignants utilisent comme une sorte de rite sans trop en voir l'intérêt et la portée. Ce module de formation est donc l'occasion d'explicitier à quelle épistémologie et à quelles théories de l'apprentissage cette pratique peut être rattachée.

Par ailleurs, en ce qui concerne l'analyse du contenu, les formés sont souvent surpris par la méthode utilisée à cette fin et notamment par l'élaboration de la trame conceptuelle dont ils ne voient pas toujours l'intérêt, dans l'immédiat. Beaucoup d'entre eux rencontrent des difficultés dans ce travail car il les oblige à opérer un changement dans leurs modes de pensée. En effet, le plus souvent, l'image qu'ils ont des sciences s'apparente davantage à une accumulation de savoirs alors que ce que nous proposons relève d'une analyse systémique. Nous avons toutefois observé, chaque fois que nous avons proposé une telle situation, tant en formation initiale qu'en formation continue, que les formés s'impliquent dans la tâche demandée de façon très sérieuse. Eux-mêmes s'aperçoivent, *a posteriori*, du travail qu'ils ont accompli dans leur façon de percevoir la science.

Notons enfin que les formés interrogés déclarent, à l'issue de ce module, avoir découvert l'intérêt de l'enseignement de la géologie à l'école primaire et parfois remis en cause leur aversion pour la géologie. Donner le goût d'une discipline, et particulièrement de la géologie qui est souvent délaissée à l'école primaire, ne constitue-t-il pas un des objectifs de la formation ? Quant aux effets de cette formation sur les pratiques pédagogiques, ils restent à vérifier, même si les enseignants affirment qu'ils procéderont désormais différemment, en utilisant les résultats des analyses proposées.

CONCLUSION

La conception de l'enseignement des sciences qui semble encore prédominer aujourd'hui chez les enseignants tend à privilégier l'accumulation des connaissances pour expliquer la construction du savoir. S'il est vrai qu'un défaut de savoir peut représenter un obstacle, il ne suffit pas toujours à expliquer l'émergence tardive de certaines explications. L'exemple que nous avons choisi d'étudier, permet de montrer, en utilisant l'histoire des sciences, le parcours sinueux qui conduit à la construction d'un concept scientifique.

Dans le cadre de la formation, la référence à l'histoire des sciences est souvent appréciée par les enseignants qui la

considèrent comme un moyen d'enrichir leur culture. Du point de vue du formateur, l'histoire des sciences peut être utilisée comme outil pour éclairer l'enseignement d'un concept. C'est dans cette perspective que nous avons travaillé pour construire le module de formation présenté. La stratégie que nous utilisons à cette occasion permet de conduire une réflexion sur l'apprentissage des concepts de la géologie et d'envisager une pratique pédagogique basée sur le modèle constructiviste.

vers
l'appropriation
du modèle
constructiviste

Ce module est en effet l'occasion de montrer de façon concrète, c'est-à-dire en se basant sur des situations de classe, comment prendre en compte les représentations des élèves et les faire évoluer. Les obstacles relatifs aux temps géologiques et à la formation des fossiles étant très fréquents en CM, il faut en effet aider les maîtres à construire un enseignement efficace qui permette aux élèves de progresser ultérieurement par rapport aux problèmes d'évolution et de stratigraphie.

Colette GOUANELLE
Patricia SCHNEEBERGER
IUFM de Bordeaux
Équipe de recherche en didactique de la
biologie et de la géologie du LADIST

UN DISPOSITIF DIDACTIQUE UTILISANT DES IMAGES POUR FAIRE ÉVOLUER LES CONCEPTIONS DES ÉLÈVES DE DIX ANS SUR LES SÉISMES

Jean-Charles Allain

Cet article présente un dispositif conçu autour d'une sélection d'images et d'activités variées sur ces images. Les conceptions des élèves de neuf-dix ans sont évaluées tout au long de cette progression pour tenter de montrer que les images sont une aide à la schématisation, une aide pour franchir certains obstacles et qu'elles participent à la construction des concepts.

Il semble difficile, à l'époque actuelle, d'aborder à l'école élémentaire, en cycle III, le sujet "séismes et éruptions volcaniques" sans utiliser des images de toutes sortes ; les manuels scolaires actuels en sont un exemple. Depuis 1985, ce sujet d'étude figure dans les Instructions officielles concernant l'enseignement de la biologie et de la géologie à l'école élémentaire. Il est repris en 1994 pour le cycle III. Il s'agit seulement pour cette tranche d'âge de neuf à dix ans de faire comprendre, à partir de l'étude des volcans et des tremblements de terre que "la Terre est une planète active" et que "la répartition des volcans et celle des tremblements de terre s'expliquent par une structure discontinue de la croûte terrestre" et de procéder à "une approche simple du modèle proposé par les géologues pour expliquer cette répartition".

une recherche
INRP

La réflexion sur un enseignement qui s'appuie sur des activités autour des images n'est pas encore très avancée. Nous sommes là, en marge d'un domaine peu exploré de la didactique et les travaux que nous conduisons, au sein de l'Institut National de Recherche Pédagogique (1), nous laissent penser que l'on doit créer des situations didactiques facilitatrices des apprentissages dans lesquelles les images ne seraient plus considérées simplement comme apportant des informations illustratives mais aidant à la structuration des connaissances.

Notre but est de suggérer que des images bien choisies, incluses dans un dispositif didactique pertinent, sont une aide pour faciliter l'évolution des conceptions des jeunes

- (1) Certains des résultats présentés ici sont empruntés aux travaux de l'équipe de recherche INRP dirigée par Gérard Mottet (Allain, Boutot, Chaix, Dinard, Grosjean, Mahieu, Minguez) : "Représentations imagées et traitement des connaissances" (1988-1992) et "Des images pour apprendre les sciences" (1992-1995). Département "Technologies nouvelles et éducation".

élèves sur ces problèmes. Les conditions de choix des images seront précisées, et par l'analyse d'une série de tests proposés aux élèves, nous tenterons d'évaluer leurs effets sur la construction des connaissances.

1. UNE SÉLECTION D'IMAGES

des images
descriptives

À cause de leur caractère attractif et de l'intérêt spontané que leur portent les élèves, il est important d'utiliser des images qui "collent" à l'actualité, à la réalité observable ; par exemple, les images des incidences matérielles et humaines des catastrophes sismiques, des tremblements de terre filmés en direct : images du Bay Bridge ou autres images des séismes de San Francisco (1989), de Los Angeles (1994) ou de Kôbê (1995), des images de volcan en activité comme la fameuse nuée ardente de l'Unzen (1991) qui a englouti K. et M. Krafft. Ce sont toutes des images descriptives très réalistes.

des images...

Mais nous avons aussi recherché quelles étaient les images qui pouvaient rendre accessible, de la manière la plus simple et la plus efficace possible, l'idée de la dynamique du globe terrestre :

pour rendre
visible l'invisible

- des photographies de failles, celle d'El Asnam en Algérie, ou, plus souvent, la faille de San Andreas vue d'avion ;
- des images qui rendent visible ce qui n'est pas accessible à l'observation directe, telles les images de laves émises dans les dorsales ;

pour rendre lisible

- des images à forte valeur explicative, telles des coupes (coupe d'un volcan, exemple celle du Pinatubo figurant les liens avec une zone de subduction), des graphiques (sismogrammes), des cartes (répartition géographique mondiale des volcans, des séismes et frontières des plaques), des schémas (bloc-diagramme de la faille de San Andreas) ;

pour rendre perceptible

- des images qui montrent en mouvement des phénomènes géologiques imperceptibles à l'échelle humaine (dessins animés de la dérive des continents, de l'expansion océanique comparée à un trottoir roulant ou encore l'affrontement de la plaque indienne et de la plaque asiatique conduisant à la formation de l'Himalaya). Même parmi les images fixes, des images utilisant des procédés pour figurer le mouvement peuvent être sélectionnées : celles qui comportent des flèches pour indiquer la direction du mouvement des plaques, des cercles concentriques servant à visualiser les ondes sismiques et leur propagation dans toutes les directions, des images en séquence, par exemple les images successives des continents au cours des temps géologiques ou encore le schéma d'une faille "avant" et "après" un tremblement de terre.

Lors de la mise en place d'un des dispositifs d'expérimentation, c'est le film du CNDP *La Terre, astre vivant* (2) qui fut choisi pour la variété de ses images.

2. DES IMAGES SUPPORTS D'ACTIVITÉS

des situations-
images

Les images ne sont pas d'emblée des instruments de connaissance. Elles ne le deviennent que si on met en place des activités didactiques appropriées. Il s'agit de créer des situations que G. Mottet nomme "**situations-images**" (3) dans lesquelles les élèves manipulent activement ces objets : choisir, ordonner, commenter, compléter des images, voire même en produire pour décrire ou expliquer un phénomène. La perspective de cette stratégie se démarque d'un modèle pédagogique de transmission. Elle se rapproche plutôt d'un modèle constructiviste dans le sens où l'accent est mis sur l'analyse préalable de la matière à enseigner, sur la prise en compte des conceptions des élèves et sur l'activité intellectuelle des élèves dans diverses situations. Il ne s'agit pas d'une simple illustration des concepts par des images ; bien au contraire, au cours de ces activités de classe, c'est à partir de l'analyse des images et à partir de la production de nouvelles images (schémas explicatifs) que se construit activement la connaissance.

Les images citées, précédemment, sont utilisées pendant des séquences de classe. Certaines d'entre elles permettent un accès à des phénomènes invisibles. Nous avons donc recherché quelles informations les élèves en tiraient et avons supposé que ces images faciliteraient la compréhension des causes de phénomènes tectoniques dont seules les conséquences sont apparentes. Ainsi, des images de "sortie de laves" dans les rifts au fond des océans doivent-elles permettre de comprendre ce qui se passe dans les dorsales océaniques quand deux plaques s'écartent l'une de l'autre. De la même façon, des images de simulation qui montrent l'affrontement de deux plaques donnent une explication au déclenchement de très nombreux séismes, à la montée de magma et à la formation de volcans.

Une des hypothèses que nous formulons est que les images, par les activités de modélisation qu'elles autorisent, constituent pour les élèves un espace de **confrontation** et de contrôle de leurs propres conceptions internes, un lieu de **mise à l'épreuve** de celles-ci et, finalement, un moyen de fissurer ces conceptions et d'en construire de nouvelles.

(2) BAYARD, A., PICREL, M. (1986). *La terre, astre vivant*. Paris : CNDP, 20'.

(3) La notion de "*situation-image*" a été proposée par Gérard Mottet dans le compte rendu de recherche (1990) : "*Il était une fois... la vie - un dessin animé à l'école*". Paris : INRP (à paraître). Elle sera développée dans le numéro 22 d'*Aster, Images et activités scientifiques*.

3. UN DISPOSITIF DIDACTIQUE

3.1. Des activités en classe avec des images facilitant la compréhension des causes des séismes

un dispositif
rigoureux

Afin de permettre à l'équipe de recherche (maîtres formateurs et professeurs d'UFM) de suivre de manière rigoureuse l'évolution des conceptions des élèves à propos de la compréhension des causes des tremblements de terre, une progression présentant une alternance de séquences d'enseignement et d'épreuves-tests d'évaluation a été élaborée. Cette progression a été réalisée dans deux classes de Cours Moyen, d'environ 25 élèves chacune, en 1990 et 1991 (Mottet, Allain, Bentot, Minguez, 1995), puis, reprise, en 1995 avec des images nouvelles en fonction de l'actualité sismique. Les séquences de classe comportaient pour les élèves, des tâches à accomplir sur des images de toutes sortes ; il s'agissait par exemple de rechercher des informations pour une définition ou un fonctionnement, de fournir une explication verbale à partir d'une image, de produire des schémas explicatifs.

L'exploitation des données recueillies dans ces dispositifs, a fait l'objet d'une analyse interprétative qui a mis à jour des tendances générales mais aussi des variations individuelles dans la construction des connaissances (voir plus loin).

recueil des
conceptions
initiales

Les conceptions initiales ont d'abord été repérées avant toute activité concernant le sujet (pré-test T1), avant tout apport d'information, dans le cadre scolaire, dans le but de repérer les différentes stratégies mentales utilisées par les élèves pour résoudre les problèmes qui leur étaient posés : *"Explique à l'aide d'un dessin ce qu'est pour toi un volcan."* et *"Peux-tu expliquer pourquoi la terre tremble ?"*. Leur analyse (et celle de près de 200 autres élèves) montre, sur ce sujet, une extraordinaire diversité (Allain, 1995). Elle révèle les multiples confusions concernant les causes naturelles qu'émettent ces jeunes élèves lorsqu'il s'agit d'expliquer les séismes. Néanmoins, ces conceptions doivent être considérées, en définitive, plutôt comme des protoconcepts en construction, efficaces temporairement que comme des obstacles très solidement ancrés.

des séquences
d'enseignement...

Consécutivement, deux séquences sont réalisées. Elles s'appuient sur la comparaison-confrontation des conceptions initiales des élèves, puis sur l'analyse de textes documentaires et l'analyse de photographies (cf. les images choisies).

La première séquence porte sur les volcans. En effet, diverses questions se posent aux élèves quant à la nature de la lave, son origine et son devenir, à sa montée dans le volcan et, à la localisation des volcans. Des images de différents volcans sont présentées ; les élèves doivent rechercher dans ces images les indices permettant d'approfondir la définition d'un volcan et de comprendre qu'il existe deux

grands types de volcans : les volcans à coulées de lave, et les volcans à éruptions explosives. Pour finir, une carte de la localisation des volcans dans le monde est analysée. Cette approche géographique se révèle indispensable pour mettre en évidence des zones où les volcans sont nombreux et alignés, et des zones où ils ne sont pas représentés.

avec
confrontation
des premières
conceptions...

La deuxième séquence est organisée autour de deux questions successives : *"Qu'est-ce qu'un tremblement de terre ? Pourquoi la terre tremble-t-elle ?"* Le point de départ est la confrontation des conceptions initiales des enfants. Quelques dessins, jugés les plus significatifs parce qu'ils proposent des solutions très diverses, sont affichés au tableau et sont le support d'une analyse collective. Il s'agit, essentiellement, de provoquer chez les élèves, la prise de conscience de l'hétérogénéité de leurs points de vue, des confusions entre différentes causes naturelles et de la nécessité de rechercher une solution commune conforme à la réalité scientifique. Des images descriptives de catastrophes sismiques sont utilisées alors pour affiner la définition. Puis, avec un tout autre type d'image (le sismogramme, image graphique), les élèves progressent rapidement : la notion d'ondes qui se propagent dans l'écorce terrestre devient, alors, plus évidente.

et recherche de
nouvelles
- explications

Enfin, la question : *"Pourquoi la terre tremble-t-elle ?"* est abordée. Le maître fait trouver l'argument géographique de la "dérive des continents" à partir de l'analyse d'une carte géographique mondiale : emboîtement Amérique du Sud - Afrique. *"On pourrait dire que c'était accroché : ça a presque la même forme."* Une carte du fond de l'océan Atlantique est alors donnée, elle doit bien faire apparaître la dorsale océanique *"dans le grand précipice, à chaque fois ça s'écarte et ce qui est à côté s'écarte aussi"*. Ainsi, à partir de ce document imagé, les enfants ont l'idée que du magma peut monter dans ces zones particulières et provoquer l'écartement des plaques. Une dernière carte de la répartition des plaques, dans le monde, est étudiée. Après ces séquences de classe, un nouveau relevé des conceptions est effectué (T2).

Plus tard, une troisième séquence est organisée autour de la projection du film *La terre, astre vivant* ou d'extraits de films documentaires tels ceux de la série *La Planète miracle* (4) comportant, par exemple, un dessin animé de la dérive des continents, et d'extraits de journaux télévisés (images des derniers tremblements de terre de Los Angeles ou de Kôbé) ; ce visionnement est suivi d'un débat collectif dirigé, et de la production par les élèves de schémas explicatifs. À partir des propositions des élèves, un schéma de synthèse est réalisé, et les dernières conceptions recueillies (T3).

Des post-tests, réalisés un mois après (T4), puis trois mois après (T5) ont permis de vérifier la persistance des concep-

(4) NAKAZATO, T. (1988). *La naissance des grandes chaînes de montagne*. (Série *La Planète miracle*). NHK, Antenne 2. 50'.

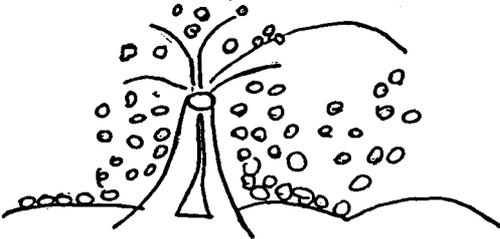
post-tests
décalés
dans le temps

tions des enfants lors de la mise à l'épreuve de leurs systèmes explicatifs ; nous pensons qu'ils pourraient être productifs pour résoudre d'autres problèmes à base d'images non encore utilisées dans la classe (coupe de l'écorce terrestre à légender et à flécher, choix justifié d'images pour expliquer un séisme particulier).

PRÉ-TEST T1

1) Peux-tu expliquer pourquoi la terre tremble ?

La Terre Tremble parce - que quand il ya de volcans qui s'alument ça fait évacuer une grosse couche de roche et en retombant ça fait trembler la Terre .



Niveau 0

2) As-tu déjà vu un reportage à la télévision sur ce sujet ? : Oui / ~~Non~~
Si tu réponds oui, dans quelle émission ?

Dans le journal de 20h00 (sur la 5)

Figure 1. Exemple d'épreuve-test (T1) réalisée par un élève de CM1

3.2. Principes d'évaluation

Tous les tests ont été conçus pour repérer l'évolution des conceptions des enfants quant aux causes des tremblements de terre. Sans doute, ces tests conçus dans un but d'évaluation jouent-ils, aussi, un rôle dans l'apprentissage, puisque, dans un cas, on demande aux élèves de fournir des explications grâce aux images et, dans l'autre, on utilise des images pour que les élèves mobilisent leur savoir. Certains de ces tests offrent des questions ouvertes et des questions fermées. Ils supposent des réponses explicatives sous forme de texte écrit ou de schéma. D'autres apportent des éléments visuels nouveaux (photographies, schémas, cartes) que les enfants doivent utiliser pour résoudre des problèmes : analyse, interprétation de schémas, classement ou/et choix d'images, voire production d'un schéma.

un pré-test...

Tout d'abord trois tests écrits ont été réalisés : pré-test T1 (fig. 1) servant au recueil des conceptions initiales et à la mesure de l'impact de la télévision extrascolaire ; test T2 après les deux premières séquences ; test T3 (fig. 2) après la troisième séquence, intégrant des images télévisuelles sur les mouvements des plaques. Ils ont servi après dépouillement et analyse des réponses, à repérer et à mesurer l'évolution des conceptions des enfants concernant la question : *"Peux-tu expliquer pourquoi la terre tremble ?"*. Le test T3 demandait, en plus, aux élèves, de citer les images qui les avaient *"le plus aidé à répondre"*.

des tests...

Des post-tests de conceptions légèrement différentes - T4 et T5 (voir plus loin des illustrations de ces deux tests dans les parcours individuels d'élèves, fig. 8 à 10) - ont permis de mesurer, après une période de maturation, les effets des images dans l'acquisition des connaissances et de vérifier si les modifications des conceptions des enfants étaient perceptibles. On voulait observer si les enfants avaient réellement changé de modèle mental et pouvaient l'utiliser par transfert dans une situation nouvelle pour résoudre un nouveau problème.

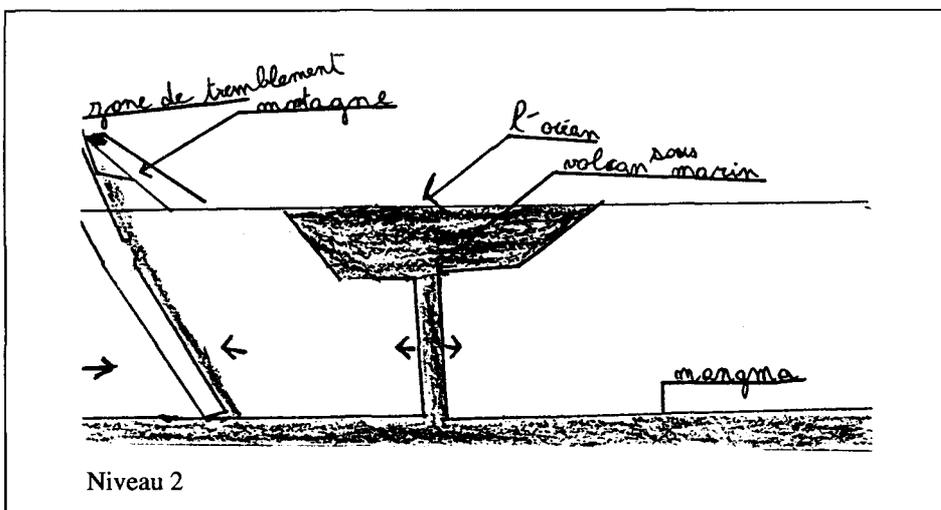
et des post-tests

Le post-test T4 consistait en la restitution d'un schéma de synthèse élaboré collectivement, un mois auparavant. Il s'agissait de vérifier la persistance des acquis en évitant les difficultés de la formulation écrite et, de constater le degré d'influence d'une image à valeur explicative sur l'évolution des modèles mentaux des enfants.

Le dernier post-test T5 était construit dans l'optique de vérifier, après quatre mois de maturation, la permanence des acquis et leur réinvestissement dans de nouvelles situations plus complexes, exigeant d'interpréter de nouvelles images. Il est donc différent des tests précédents, avec des variables en partie nouvelles (images non encore utilisées dans la classe, tâches différentes : tri, jugement sur la pertinence de ces images), mais il est évalué, quand même, selon des critères identiques. Pour ce post-test nous avons imaginé deux types d'épreuves.

TEST T3

1) Le film que tu as vu doit te permettre d'expliquer par un schéma pourquoi la terre tremble. Fais ce schéma.



2) Quelles images du film t'ont le plus aidé pour comprendre ?

Quand les scientifiques étaient sous l'eau et
quand ils ont montré la maquette et
aussi (quand on la visionne sous-marine) a vu le magma
(quand la fissure sous-marine)

Figure 2. Exemple d'épreuve-test (T3) réalisée par un élève de CM1

Un premier type comporte la lecture d'un schéma de synthèse sur lequel l'élève doit traduire, par des flèches, le mouvement que laissait supposer l'image. Il devait aussi placer des légendes significatives. Il s'agissait de raisonner au niveau global de la théorie explicative. La tâche était homogène et très explicite.

Un second type, très différent du précédent, propose à l'élève des images qu'il devait juger plus ou moins pertinentes pour expliquer le séisme de San Francisco, puis, plus tard, celui de Kôbè. Les cinq images présentées (vue de faille, bloc-diagramme, cartes à différentes échelles et image des dégâts) étaient nouvelles, c'est-à-dire non encore utilisées dans la classe. Elles concernaient un exemple précis de séisme, à la différence de la première épreuve qui présentait un schéma globalisant. Dans cette épreuve, la difficulté portait surtout sur la dialectique figuratif/explicatif.

À partir des réponses aux tests, l'état de compréhension de chaque élève est évalué approximativement et réparti en quatre niveaux (les élèves n'ont pas connaissance de cette notation) :

différents
niveaux atteints
par les élèves

- niveau 0 = pas de réponse ou réponse inexacte ou incongrue,
- niveau 1 = réponse faisant apparaître un élément exact,
- niveau 2 = réponse faisant apparaître plusieurs éléments satisfaisants,
- niveau 3 = réponse reflétant une bonne compréhension du mécanisme.

D'autres critères sont pris en compte pour cette évaluation du niveau atteint :

- niveau de complexité du schéma,
- degré d'abstraction du schéma,
- réalisation d'un schéma en coupe, avec un pouvoir explicatif supérieur,
- indication de mouvement par des flèches,
- accord entre formes représentées et mouvement.

Les différents niveaux de compréhension correspondent, en fait, à des formulations de plus en plus élaborées. Chaque nouvelle étape atteinte par les enfants, se substitue à la précédente, en la chassant ou en l'intégrant en partie.

Exemples de niveaux observés à propos de la définition d'un tremblement de terre

Niveau 0 : *"Je pense qu'un léger décalage de temps sur les rotations de la Terre peut créer un tremblement de terre."*

"Parce que la terre vibre à cause des tempêtes violentes ou des grosses choses très lourdes."

"Parce qu'il y a des produits qui enlèvent la couche d'ozone."

"Parce que le vent soulève la terre."

"À cause du froid."

"À cause des météorites qui se tapent contre la Terre."

Niveau 1 : *“Un tremblement de terre, c’est le choc entre deux continents.”*

“Il y a dans quelques pays comme un tout petit ravin, ça se rapproche et se frotte.”

Niveau 2 : *“C’est quand deux plaques se rencontrent, ça fait un gros boum et ça fait des ondes.”*

“Quand les morceaux de terre se rapprochent et se touchent.”

Niveau 3 : *“Quand une plaque rencontre une autre plaque, l’une d’entre elles passe sous l’autre, ce qui la fait fondre.”*

L’examen rapide de ces réponses montre que les enfants de CM, au niveau 0 font des confusions entre différents phénomènes naturels : couche d’ozone, météorite, planète, tempête... En fait, ne connaissant pas la cause exacte des séismes, ils lui suppléent une autre cause naturelle.

Avec le premier niveau, il existe déjà une relation, en partie correcte, de cause à effet, mais l’explication reste incomplète. Avec le deuxième niveau, les enfants changent de formulation et, le concept de plaque chasse, en partie, celui de continent. Quant au troisième et dernier niveau atteint, il fait apparaître une conception dynamique de l’écorce terrestre et de son découpage en plusieurs plaques. À ce stade, nous pouvons estimer que l’enfant a acquis une vision correcte, pour son jeune âge, de la théorie explicative.

4. IMPORTANCE DES IMAGES EXPLICATIVES

L’analyse des données recueillies permet de repérer quelques tendances générales concernant l’importance des images et des activités sur ces images, dans la construction des connaissances.

4.1. Les images spectaculaires de l’inconnu

attirance vers le spectaculaire...

Quand on les interroge en classe, les enfants reconnaissent avoir été frappés, en priorité, par les images spectaculaires de l’inconnu : par exemple, celles des volcans sous la mer. On peut certes taxer les élèves d’attirance vers le spectaculaire, mais aussi remarquer que ces images retenues apportent des informations sur le mécanisme de la naissance des fonds océaniques : volcanisme effusif sous-marin des rifts océaniques. Toutes ces images **rendent visibles des phénomènes invisibles**.

mais également vers les images de l’inconnu

En revanche, ils sont peu frappés par les images réalistes (exemple : destruction d’immeubles), peut-être parce que ces images sont devenues courantes, banalisées par les apports extra-scolaires.

4.2. Fort impact des images explicatives

Dans l'interprétation des causes des séismes, par exemple, plus de la moitié des élèves reconnaissent – lors d'un questionnaire (*"Quelles images du film vous ont le plus aidé à comprendre ?"*) et à l'occasion de quelques entretiens individuels – avoir été **aidés par les images à valeur explicative** : carte, coupe, dessin animé, maquette facilitant la compréhension d'un mécanisme.

des images
schématisantes

Sans doute ces images, que nous appelons "images explicatives", sont des images possédant une valeur explicative dans un contexte particulier d'apprentissage. Elles fournissent des éléments d'explication. Ce sont des images le plus souvent simplifiées, schématisantes qui facilitent la construction conceptuelle (par exemple : une coupe de l'écorce terrestre peut aider à intégrer l'idée d'expansion océanique dans les dorsales). Grâce à leur simplification et à leur plus ou moins grand degré d'abstraction, elles font ressortir l'essentiel, à voir et à comprendre, d'un phénomène complexe, notamment les relations entre la répartition des volcans et des tremblements de terre et, les mouvements des plaques.

4.3. Des images plus pertinentes que d'autres

Toutes les images ne sont pas aussi efficaces, les unes que les autres, dans la construction du concept abordé. Pour ces jeunes élèves, les **images en mouvement** apparaissent plus efficaces que les images fixes dans le processus de modélisation d'un réel aux mouvements imperceptibles. C'est très net à propos de la représentation animée, en coupe, de l'expansion océanique dans la dorsale médio-atlantique, qui figure dans un dessin animé présenté (et, qui est repris dans certains journaux télévisés, à l'occasion de catastrophes sismiques). Celui-ci propose une **analogie** pour permettre la compréhension de la montée de magma dans les dorsales et le mouvement du fond des océans à partir du rift. Il utilise la comparaison avec le mouvement d'un trottoir roulant. Notons, cependant, qu'il renforce trop l'idée que, l'expansion océanique est le seul moteur du mouvement des plaques, alors que les scientifiques estiment, plutôt, que c'est leur enfoncement dans les zones de subduction qui joue le rôle le plus important dans l'entraînement des plaques.

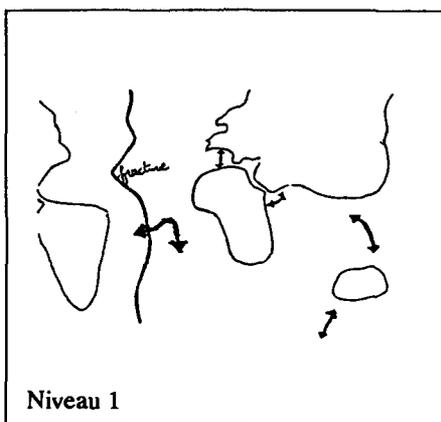
des
représentations
imagées du
mouvement
des plaques

Ce dessin animé n'est pas une photographie du réel, mais une vision éloignée de la réalité, filtrée, simplifiée. C'est par des procédés de métaphores ou d'analogies, tel le modèle technologique utilisé dans ce cas, qu'un ensemble d'éléments simples se substitue à un réel beaucoup plus complexe. Avec ce type d'images, les jeunes enfants peuvent alors comprendre la montée de magma au cœur d'une dorsale océanique et l'écartement de ses deux lèvres. *"On voyait que ça s'écartait, c'était impressionnant."*

4.4. L'utilisation d'images aide les élèves à produire des schémas

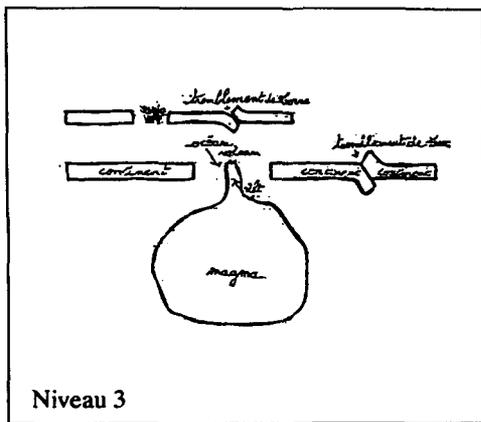
Les différentes images télévisuelles ont fourni aux enfants des **indices facilitateurs** pour la construction de schémas. À l'issue de visionnements d'extraits de films, les enfants proposent, d'ailleurs eux-mêmes, la réalisation de schémas (fig. 3 à 6) pour expliquer les mécanismes des tremblements de terre. Ils envisagent différentes solutions : cartes (fig. 3), globe terrestre en entier, globe en coupe, coupe de l'écorce terrestre avec indications de mouvement (fig. 4, 5 et 6). Tous les dessins présentés ici ont été réalisés à l'occasion de tests individuels et ne correspondent, en aucune façon, à une simple recopie de certaines images des films présentés.

production de schémas



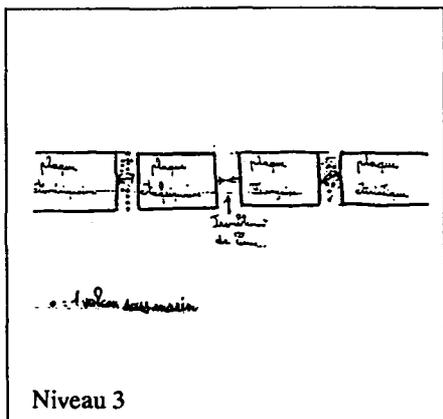
Niveau 1

Figure 3. Production de Florent, élève de CM, après visionnement d'extraits de films (T3)



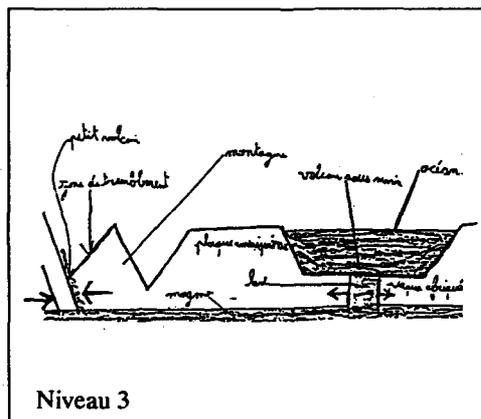
Niveau 3

Figure 4. Production de Cédric (idem T3)



Niveau 3

Figure 5. Production de Damien (idem T3)



Niveau 3

Figure 6. Production de David (idem T3)

Florent par exemple (fig. 3), évoque, par une carte mondiale l'idée de dérive des continents, avec fléchage du sens des déplacements, mais, il n'envisage pas d'affrontement entre les continents. La production de Cédric (fig. 4) témoigne d'un fort degré de schématisation : il représente des montées de magma au fond des océans et une collision entre les plaques, avec subduction, mais, il ne donne pas d'indications de mouvement.

Damien (fig. 5) effectue une représentation très symbolisée (qui n'était absolument pas présente dans les images utilisées en classe) et, précise par des flèches l'écartement ou le rapprochement des plaques. Quant à David (fig. 6), son schéma est logique, mais il fait apparaître un obstacle difficile à vaincre, à cet âge : il imagine que les plaques sont situées au-dessus d'une couche uniforme de magma.

Il faut remarquer le niveau important, de simplification et d'abstraction, atteint par ces enfants de dix ans. Leurs schémas sont dépouillés à l'extrême et, néanmoins très clairs et explicites.

5. L'ÉVOLUTION DES CONCEPTIONS DES ÉLÈVES

Dans ce paragraphe une idée graphique des cheminements de tous les élèves d'une classe et, une analyse plus fine du parcours de trois de ces élèves sont présentées.

5.1. Cheminements individuels des élèves d'une classe de Cours Moyen

Une lecture des itinéraires (fig. 7) suivis par chaque enfant, confirme que la majorité d'entre eux est en progression quasi régulière et reste à un niveau satisfaisant, quatre mois après. Ce type de représentation graphique permet, également, une nette mise en évidence de tendances :

- tous les élèves d'une classe ne sont pas au même niveau, dès le départ d'une activité (T1) ;
- une majorité d'enfants passe, rapidement, du niveau 0 au niveau 2, ou 3, entre T1, T2, T3 ;
- après le visionnement du film (T3), un grand nombre d'enfants restent longtemps à un bon niveau 2 ou 3 ;
- quatre mois plus tard (T5), une légère déperdition est observée avec un retour en arrière des conceptions de quelques élèves ; ce dernier cas de figure témoigne de la difficulté à faire changer de modèle mental tous les élèves d'une même classe ; certains reprennent, en effet, une partie de leur conception ancienne en y greffant des idées nouvelles apportées par le dispositif. Néanmoins, le changement conceptuel, provoqué par ces activités, semble persistant pour une majorité d'élèves.

des variations
individuelles

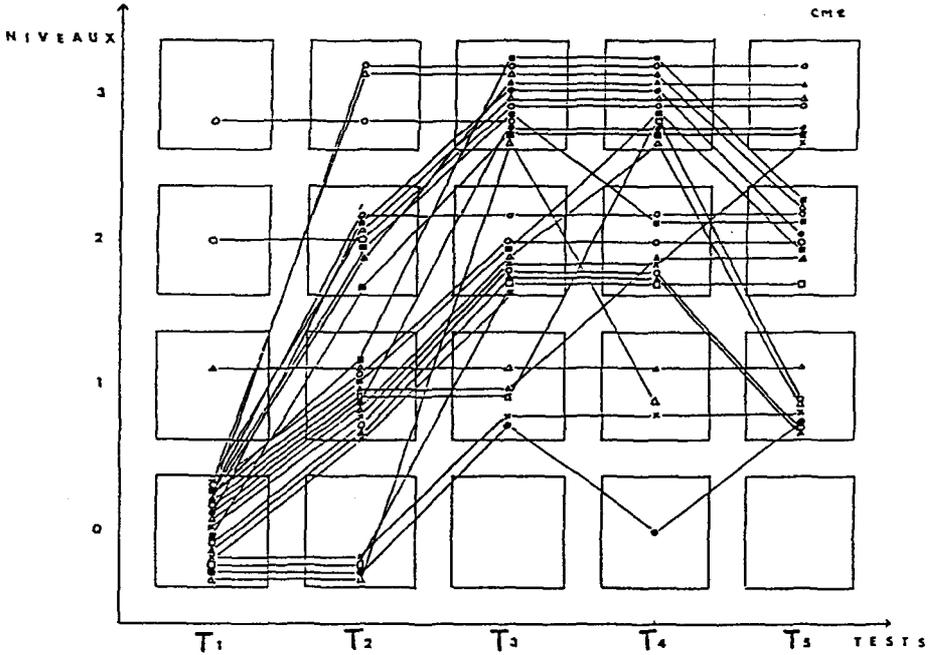


Figure 7. Visualisation des cheminements individuels d'une classe de Cours Moyen

5.2. Exemples de parcours individuels

• **Guillaume (fig. 8)**

une conception
initiale déjà très
correcte

Qualifié de "bon élève", il est l'un des rares à évoquer, dès le pré-test (T1), la dérive des continents et un affrontement entre eux. En T2, le schéma qu'il réalise, témoigne d'un fort degré d'abstraction (en coupe, fléché et en deux étapes). Ses commentaires renforcent l'idée qu'il a déjà atteint un bon niveau de conceptualisation. En T3, le déplacement des plaques est correct, mais persiste encore une forte idée d'écartement dû à la montée de magma dans le rift et, l'idée incorrecte d'une couche continue de magma sous l'écorce terrestre. Remarquons aussi, la qualité du vocabulaire de cet élève de neuf ans : ligne de fracture, rift, plaque.

Un mois après (T4), son schéma est d'excellente qualité graphique et correct, compte tenu du modèle construit en classe et de ses limites : l'expansion océanique, comme seul moteur de la dérive, est, en fait, une conception en partie inexacte, d'un point de vue scientifique. Quatre mois plus tard (T5), il réalise sans problème la nouvelle tâche à accomplir et, il est le seul élève à utiliser l'excellente dénomination de "phénomène naturel".

• **Cécile (fig. 9)**

des volcans...

aux plaques qui
se déplacent

Qualifiée, elle aussi, de “bonne élève” par le maître de la classe, elle fait appel, comme beaucoup d’autres, avant toute activité sur le sujet (T1), aux volcans pour expliquer les causes des tremblements de terre : *“Quand un volcan est en éruption, la lave très chaude qui coule arrive sur le sol. Elle est tellement chaude qu’elle fait trembler la terre.”* En T2, après avoir intégré de nouveaux apports (analyse de documents), elle change radicalement de conception et envisage un déplacement de plaques (en fait, dans son esprit, de continents) : *“Avant l’Inde était attachée à l’Afrique. Mais l’Inde commença à se détacher de l’Afrique et elle s’attacha à l’Asie. La plaque de l’Inde poussa la plaque de l’Asie et provoqua un tremblement de terre et construisit l’Himalaya.”*

En T3, après l’utilisation d’un film en classe, elle réalise un schéma très correct, qui, parce qu’il est en coupe, très dépouillé et fléché, témoigne d’un progrès intellectuel et marque l’impact des images explicatives utilisées pendant la séquence. Un mois plus tard (T4), elle restitue le schéma qui avait été élaboré en commun : le fléchage est bon et les relations sont nettes entre affrontement de plaques et formation de volcans, de séismes et de chaînes de montagnes.

Quatre mois plus tard (T5), son interprétation du schéma (à légender et à flécher) témoigne de la persistance d’un bon niveau : *“Dans la mer, il y a des volcans sous-marins qui écartent les plaques. L’une part d’un côté et l’autre, de l’autre côté. Celle qui part d’un côté rencontre une autre plaque. Cela produit un tremblement de terre.”* Mais, on remarquera, pour cette tranche d’âge, les limites du modèle construit, évoquées précédemment.

• **Mimouna (fig. 10)**

des volcans...

aux continents...

et aux plaques

Nous abordons avec elle un autre profil d’élève qualifié de “faible” par le maître. La conception initiale (T1) montre un attrait pour le spectaculaire et un impact fort des volcans. Après que le sujet ait été abordé en classe (T2) on note un net progrès à travers le remplacement pur et simple du mot “continent” par celui de “plaque” sans que le changement conceptuel soit profond : *“Parce que les continents se détachent par endroits et par d’autres se rapprochent. Ces deux continents s’appellent des plaques. Une plaque se pousse contre l’autre et forme une montagne et l’autre un volcan. Et pendant que les deux plaques se poussent, la terre se met à trembler et cela provoque les tremblements de terre.”*

En T3, après travail sur des images animées, la réalisation d’un schéma (même imparfait et d’un niveau graphique modeste) témoigne encore d’autres progrès dans la construction des connaissances chez cette élève. En T4, un mois après, certaines notions subsistent (plaques et relation entre séismes et volcans et formation de montagnes) mais, d’autres s’effacent déjà (absence d’indication de mouvement et absence de la montée de laves dans les rifts).

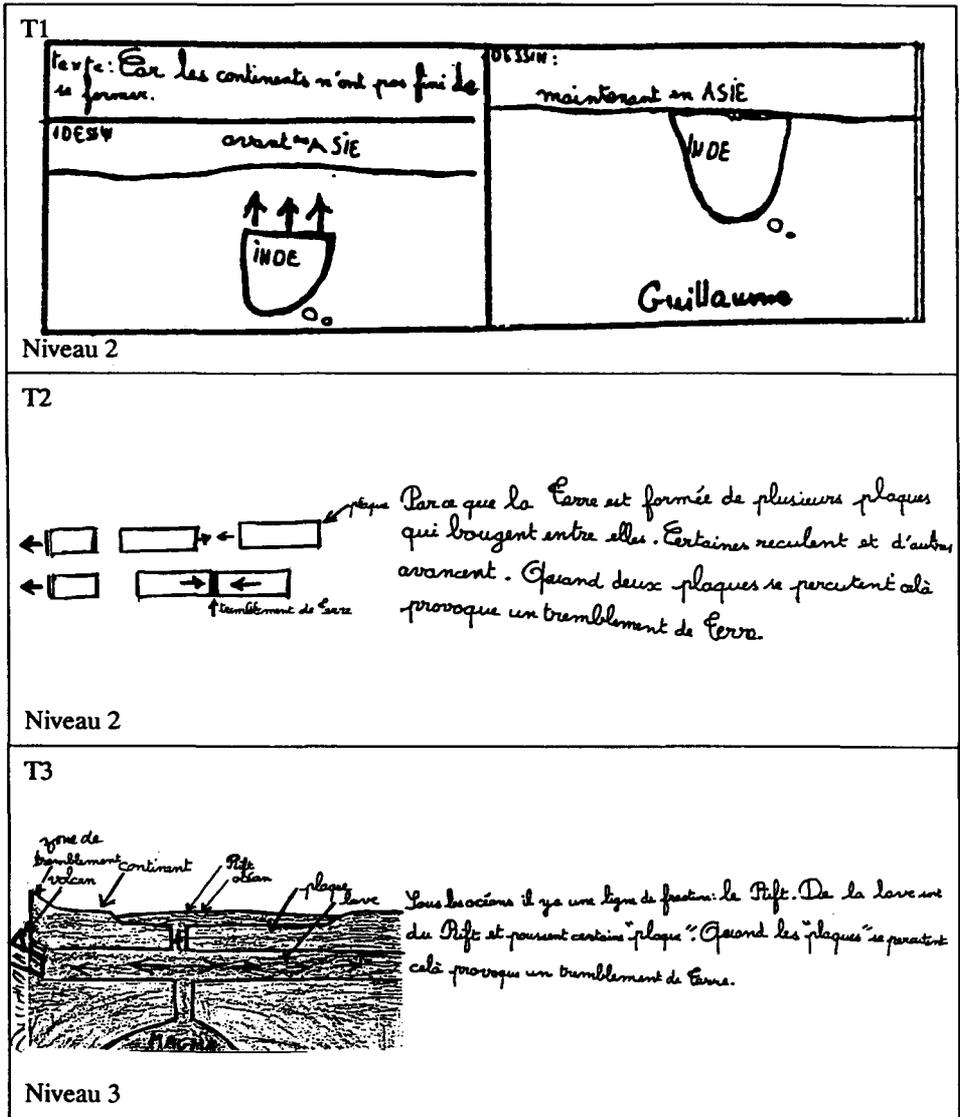


Figure 8. Évolution des réponses de Guillaume à la question "Peux-tu expliquer pourquoi la terre tremble ?"

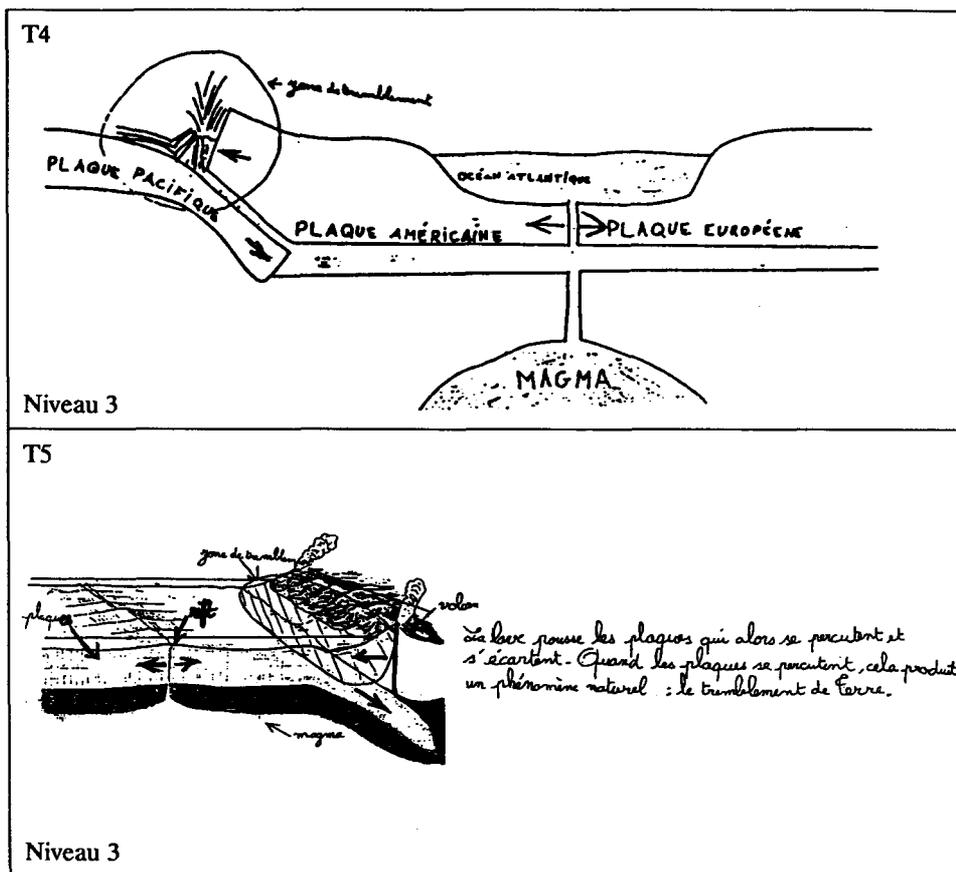


Figure 8 (suite) Évolution des réponses de Guillaume à la question
 “Peux-tu expliquer pourquoi la terre tremble ?”

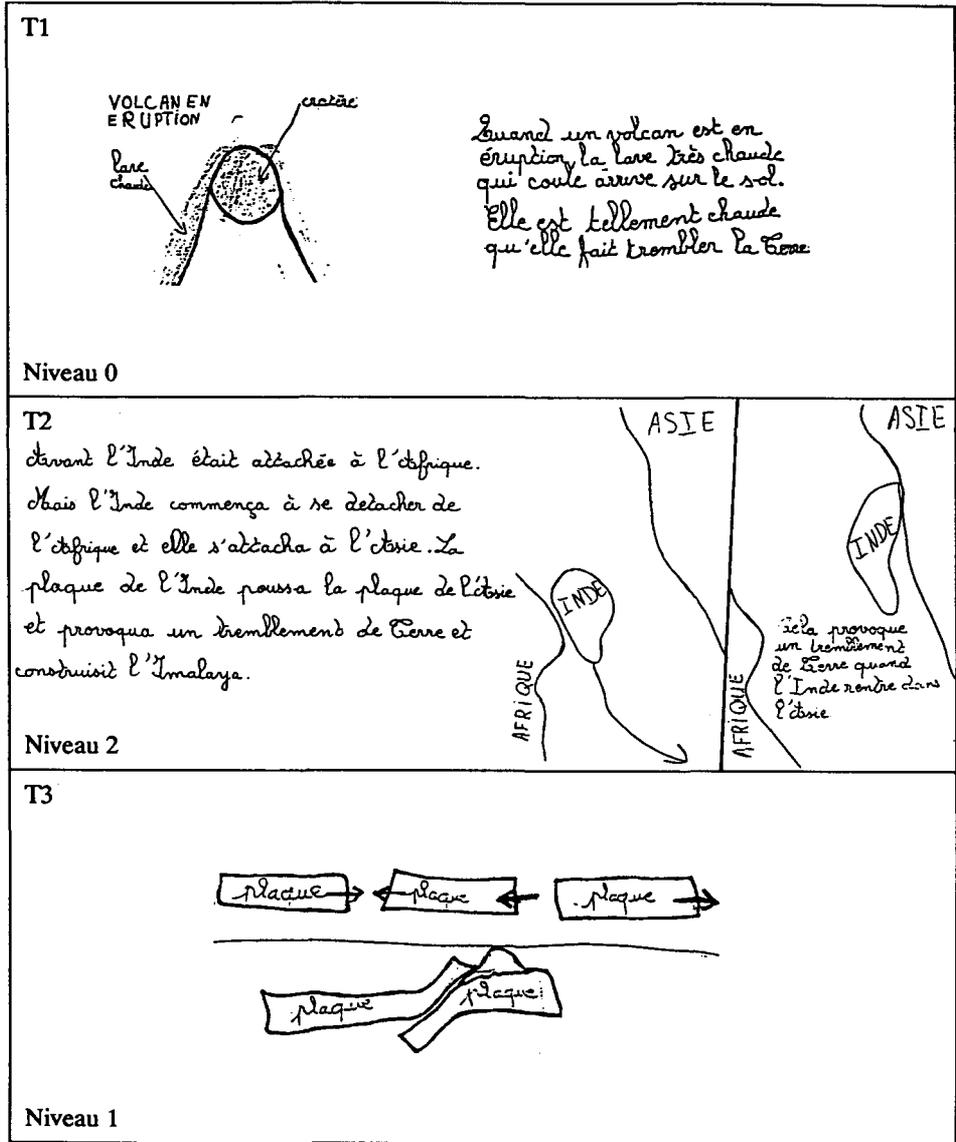


Figure 9. Évolution des réponses de Cécile à la question "Peux-tu expliquer pourquoi la terre tremble?"

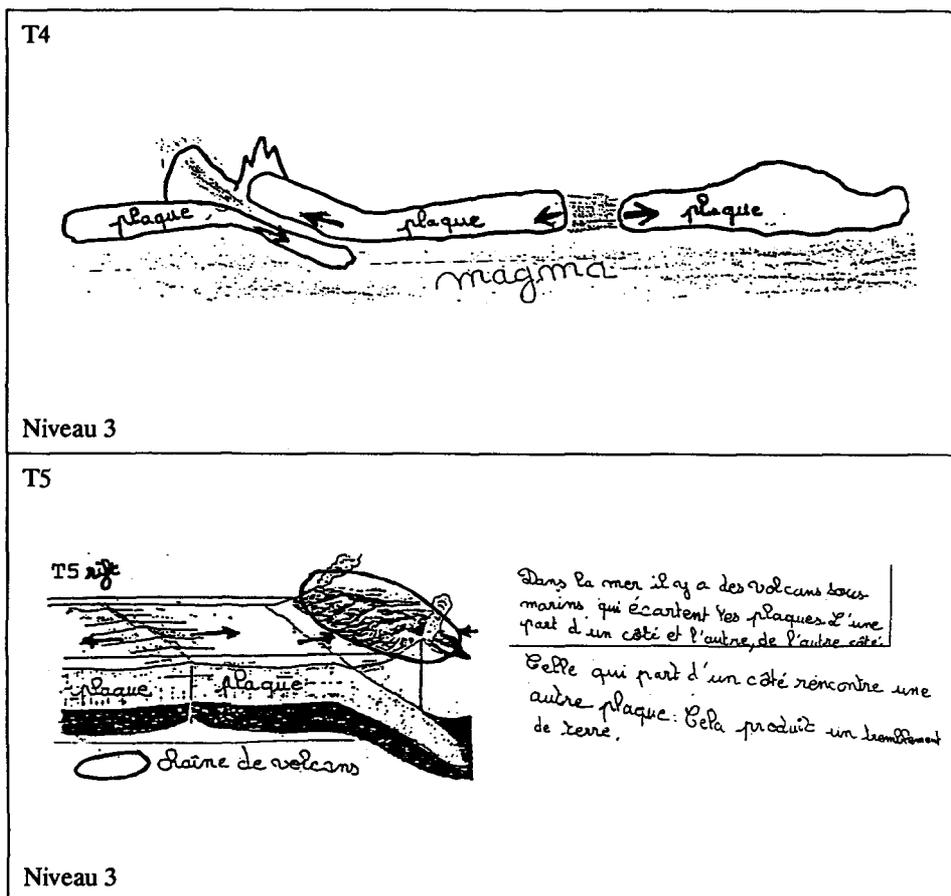


Figure 9 (suite) Évolution des réponses de Cécile à la question
 "Peux-tu expliquer pourquoi la terre tremble ?"

T1



Les tremblements de terre se produisent souvent à cause des volcans qui se mettent en éruption et cela produit souvent des tremblements de terre.

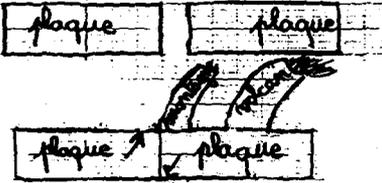
Niveau 0

T2

Parce que les continents se détachent par endroits et par un autre il se rapproche. Les deux continents s'appellent des plaques. Une plaque se pousse contre l'autre et forme une montagne et l'autre un volcan. Et pendant que les deux plaques se poussent la terre se met à trembler et cela provoque les tremblements de terre.

Niveau 2

T3



Niveau 2

Figure 10. Évolution des réponses de Mimouna à la question "Peux-tu expliquer pourquoi la terre tremble?"

Quatre mois plus tard (T5), les inexactitudes, repérées précédemment, persistent bien que l'élève ait nettement progressé : *"Les tremblements de terre se provoquent à cause de deux plaques qui se rentrent dedans et provoquent parfois des chaînes de montagnes ou parfois un volcan marin. Sur le coup, les appareils s'agitent, font de drôles de formes sur un papier [difficile lecture d'un sismogramme vu en classe]. Les maisons, appartements s'écroulent et les gens s'agitent. Pendant des jours et des jours, les gens gesticulent ou n'arrêtent pas de bouger et en fin de compte le pays (ou la ville) est endommagé."* Des progrès existent, mais un net retour en arrière traduit, dans ce cas, une certaine résistance au changement conceptuel et le retour au simple domaine du descriptif (manifestations catastrophiques et conséquences humaines).

Ces trois exemples sont présentés parce qu'ils sont significatifs de l'hétérogénéité des élèves et des divers modes repérés de construction du concept. Cependant, d'autres variations auraient pu également être citées :

différentes
façons de
changer de
conceptions

- niveaux 0,0,1,1,1 d'un élève en difficulté pour lequel l'idée de plaque est acquise, mais, pas celle de la dynamique d'ensemble (des confusions dans le sens des mouvements des plaques lors du T5 par exemple) ;
- niveaux 0,2,2,2,3, bons niveaux atteints rapidement, avec même une progression, en fin de parcours, témoignant d'une bonne intégration du nouveau modèle...

Parallèlement, on remarque que quelques élèves, considérés habituellement comme "faibles" dans cette classe, ont bien réussi aux tests comportant l'utilisation d'images et ont même atteint un bon niveau 2 ou 3, à la fin de nos activités.

6. DES OBSTACLES FRANCHIS EN PARTIE

Certains des obstacles ou difficultés, repérés par l'analyse des conceptions initiales (voir Aster N° 20), ont été franchis au cours de cette progression. Par exemple, les élèves n'attribuent plus aux seuls volcans les causes des séismes ; ils ne confondent plus toutes les causes naturelles et, ils adhèrent massivement à une conception mobiliste, dans laquelle les mouvements des plaques sont la cause essentielle des tremblements de terre. Pour certains, le changement conceptuel est radical (cf. Cécile, fig. 9) grâce aux apports imagés ; pour d'autres, il était déjà engagé, avant la classe, grâce à des apports médiatiques extrascolaires (cf. Guillaume, fig. 8) ; et, pour d'autres enfin, le changement est plus progressif avec, parfois, un certain retour en arrière (cf. Mimouna, fig. 10).

certains
obstacles sont
franchis...

Des difficultés subsistent cependant pour la plupart des élèves de neuf-dix ans testés, comme l'idée d'une couche de magma uniforme sous les plaques. C'est une idée très forte-

d'autres
subsistent

ment ancrée à quelques rares exceptions près (cf. Cédric, fig. 4). Cette conception est fautive scientifiquement puisque l'on sait que le manteau a la consistance de l'acier et qu'il est pourtant animé de mouvements de convection, à l'échelle des temps géologiques. Il faut préciser que le maître de la classe n'a pas transmis cette nouvelle hypothèse et que, la majorité des dessins animés de simulation et des schémas de livres de vulgarisation scientifique ou de manuels scolaires, continue à reproduire le manteau sous les plaques comme une couche de magma (rouge), tout comme l'image que nous avons utilisée pour le post-test T5 (fig. 8) ! Cependant, cette conception inexacte se révèle efficace provisoirement, pour ces jeunes élèves, car elle leur permet d'admettre qu'une couche puisse se déplacer au-dessus d'une autre.

Alors patience ! Donnons rendez-vous à ces élèves en Quatrième de collège et en lycée pour atteindre un niveau supérieur de formulation de ces concepts...

7. CONCLUSION : DES IMAGES POUR APPRENDRE DES SCIENCES

des images...

Dans ce dispositif didactique, les images qui permettent aux élèves de découvrir et de comprendre ces phénomènes scientifiques, ont changé de statut : ce ne sont plus de simples illustrations séduisantes, attrayantes. Nous avons tenté de montrer pour la construction de ce concept global que les images, par la perturbation intellectuelle qu'elles provoquent, aident les jeunes élèves, ignorant les causes des séismes en raison de leur jeune âge, à créer de nouveaux modèles mentaux (assortis parfois d'erreurs). Par ailleurs, elles les aident aussi, sans aucun doute, quand ils possèdent déjà une idée sur la question, à changer de modèle explicatif.

comme aides au
changement
conceptuel...

Ces images devraient être considérées comme des **instruments de traitement des connaissances**, selon l'expression proposée par G. Mottet, des aides didactiques indispensables à l'enseignement de ces notions. Elles pourraient agir, grâce aux activités dont elles sont le support, dans le changement conceptuel en mettant à l'épreuve les conceptions personnelles de la majorité des enfants, en contribuant à leur fissuration, puis à leur restructuration. Une véritable appropriation cognitive de ces images doit s'effectuer.

comme
instruments de
traitement des
connaissances

Enseigner les sciences aujourd'hui, à notre avis, ne peut plus se faire sans tenir compte des extraordinaires potentialités des images, à condition que celles-ci soient intégrées de manière pertinente dans un dispositif didactique. Il faut faire appel à toutes les complémentarités pour accéder au réel et à sa représentation. Non seulement, les images expo-

sent un savoir qui peut provoquer un déséquilibre efficace chez l'apprenant mais elles ont également un rôle privilégié dans l'évolution des conceptions et par conséquent dans les processus d'élaboration des connaissances.

Jean-Charles ALLAIN
IUFM de Bourgogne, Dijon
Équipe INRP "Des images pour
apprendre les sciences"

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLAIN, J.-Ch., CHAIX, J.-P., DINARD, G., GROSJEAN, P., MAHIEU, B. (1990). "J'ai vu à la télé... pourquoi la terre tremble". Paris, INRP (document interne).

ALLAIN, J.-Ch. (à paraître). « "On T.V., I saw... why there are earthquakes" or Pictures for learning science ». In *Actes du colloque "Les nouveaux modèles pour apprendre"*. Genève-Chamonix, IUBS-CBE/Association européenne de didactique de la biologie.

ALLAIN, J.-Ch. (1994). *L'évolution des conceptions d'élèves de huit-dix ans à propos des causes des tremblements de terre grâce à l'utilisation d'images*. Mémoire de DEA. Paris VII.

ALLAIN, J.-Ch. (1995). "Séismes, éruptions volcaniques et intérieur de la Terre : conceptions d'élèves de huit à dix ans". In *Représentations et obstacles en géologie*. Aster, N° 20. Paris, INRP.

MOTTET, G. (1993). "Des images pour apprendre les sciences". In *Images et enseignement. Ressources 95*, N° 3. Cergy, CDDP Val d'Oise.

MOTTET, G. (1993). "Images et démarches scientifiques - une orientation de recherche". In *Science et technique en spectacle. Actes des 15^{èmes} journées internationales sur la communication, l'éducation et la culture scientifiques et techniques*. Giordan, A., Martinand, J.-L. & Raichvarg, D. éditeurs. Paris, Université Paris VII.

MOTTET, G. & al. (1994). "Des images pour apprendre les sciences". In *Actes du colloque Audiovisuel, formation initiale et formation continue des enseignants, 23-25 novembre 1992*. Paris, INRP.

MOTTET, G., ALLAIN, J.-Ch., BOUTOT, B., MINGUEZ, R. (1995). *Volcans et tremblements de terre - Images descriptives, images explicatives*. Paris, INRP.

RESSOURCES AUDIOVISUELLES

Quand la terre tremble. Radiovision RVE, N° 260. Paris, CNDP.

Une classe volcanique. (1989). Nice, CRDP. V.H.S. 13'.

Séisme aux Philippines. (1991). Nice, CRDP. (Livret et 12 diapositives).

Djibouti, naissance d'un océan. (1991). Paris, Nathan. (Cassette VHS + livret pédagogique, niveau collège).

La Fournaise, volcan sous surveillance. (1991). Paris, Nathan. (Cassette VHS + livret pédagogique, niveau collège).

Mystérieux océans. (1991). Paris, Nathan.

La grande secousse. Big one la menace. (1994). *Envoyé spécial.* Paris, France 2.

Champs magnétiques. (1994). Paris, Nathan. (Cassette VHS + livret pédagogique, niveau lycée).

Dérive des continents. (1994). Paris, Nathan. (Cassette VHS + livret pédagogique, niveau collège).

Structure et dynamique du globe - Croûte et manteau. (1994). Paris, Nathan. (Cassette VHS + livret pédagogique, niveau collège).

Erebus. (1994). Génération 3. Paris, France 3 / CNDP. (Quatre épisodes).

ADAMS, G. & FORSBERG, R. (1992). *America : les grands volcans.* Chicago, Questar video. 55'.

AFANASSIEFF, J. (1993). *Kamtchatka les volcans.* MC 4. 22'.

ATTENBOROUGH, D. (1989). *La formation de la terre.* (série *La planète vivante / Le monde vivant*, diffusée par Time Life). Londres, BBC. VHS. 55'.

BALL, E. (1993). *Oman la plus belle ophiolite du monde.* Montpellier, Laboratoire de Tectophysique / Université / Cyclopes Images / CRDP. 14'.

BARNES, M. (1990). *Le tremblement de terre de Californie : 1989, le dernier avertissement.* BBC. 50'. (Diffusé sur Planète).

BAYARD, A., PICREL, M. (1986). *La terre, astre vivant.* Paris, CNDP, 20'.

BERGOUZAT, M. (1995). *Maurice et Katia Krafft, au rythme de la terre.* Paris, La Sept/Arte/SZ Productions. 90'.

BOSCHERON, T. (1992). *Quand la terre gronde...*, N° Spécial E = M6. Une émission de N. Goldzah et Mac Lesggy. Paris, M6 / VM Productions. 80'.

BONALDI, J. (1993). *Dis Jérôme...? La tectonique des plaques.* (Épisodes de 5'). Canal +.

BRETT, J. & SUZUKI. (1991). *Le mont Pinatubo.* NHK. 50'.

BROUSMICHE, G. & MASSAYOSHI, N. (1995). *Tokyo : le jour où la terre tremblera.* Paris, Bonnes Nouvelles Multimédias. 30'. (Diffusé dans *Reportages*, TF1).

CHALVRON, A. de & GALEASSI, E. (1995). *Demain le Vésuve.* Paris, France 2. (Un reportage pour *Envoyé spécial*).

DAUPHIN, J.-M. (1992). *Les splendeurs naturelles d'Europe, Les volcans d'Europe.* Téléconcept. 55'. (Diffusé par Planète).

DELOUCHE, J.-P. (1991). *Le mont Etna.* Prod., Nicoloso, O. et A. 45'.

GOLDZAH, N. (1995). "Volcans d'Auvergne" - "Images du centre de la Terre" - "Volcans et lave". In *E=m6 Junior*, magazine animé par Mac Lesggy et C. Avon. Paris, M6-VM Productions.

GREGORY, A. (1994). *Tremblements de terre : un instant de terreur.* USA, ABC/Kane Productions International. 44'.

HERMANNSSON, J. (1989). *La violence de la terre.* Islande, Tefra films. Six épisodes de 25'. (Diffusé par Planète).

HIROZ, P.-A. (1994). *Erebus, la montagne fumante.* Une expédition de J.-L. Etienne. Paris, France 3 / Gedeon / Elf Partenariat. 25'.

HIROZ, P.-A. (1994). *Erebus volcan des glaces.* Une expédition de J.-L. Etienne. Paris, France 3 / Gedeon / Elf Partenariat. 53'.

JULIEN, O. & SERRANO, E. (1995). *Expédition Erebus.* Paris, France 3 / Gedeon / Elf Partenariat. 14'. (Diffusé dans la série *Quand la terre gronde*, La Cinquième/ CNDP).

KIMMERLING, P. (1994). *La Terre, astre vivant.* Génération 3. Paris, France 3 / CNDP. (Quatre épisodes).

KIMMERLING, P., BAYARD, A., UBERSCHLAG, J. *La chaleur de la Terre.* Paris, CNDP. VHS, 16'.

KRAFFT. (1988). *La Fournaise, un volcan dans la mer.* Jeulin. VHS, SECAM, 26'.

LALLEMANT, P. (1994). *Volcans : il était une fois la vie sur terre. La marche du siècle*, une émission de J.-M Cavada. Paris, France 3 / Théophraste. (1h 40').

LARA, R. (1990). *Une classe volcanique*. Nice, CRDP. Vidéocassette, 13'.

LYNCH, J. (1991). *L'héritage du volcan - Les conséquences de l'éruption du Mont Saint Helens, en 1980*. BBC. 47'. (Diffusé par Planète).

MACHADO, T. (1994). *Le diable afar*. Paris, Canal+. 50'.

NAKAZATO, T. (1988). *La naissance des grandes chaînes de montagne*. (Série *La Planète miracle*). NHK, Antenne 2. 50'.

PREVOST, J.-L. (1984). *Haroun Tazieff raconte sa terre*. Paris, Telfrance. (Épisodes de 50').

SANO, H. (1988). *La grande fissure*. (Série *La Planète miracle*). NHK / Antenne 2. 50'.

SINGTON, D. (1991). *Terre en fusion*. BBC. 55'. (Diffusé par Arte).

TAZIEFF, H. (1959). *Les rendez-vous du diable*. Paris, UGC. 1h 40'.

TAZIEFF, H. (1984). *Les volcans : Etna et Niragongo*. Videogram' Passion. VHS.

TAZIEFF, H. (1990). *Sur les volcans du monde*. BT sonore. PEMF. 30'.

TAZIEFF, H. & WILLEMIN, P. (1994). *Le feu de la Terre*. Paris, France 2 / Gaumont Télévision / Ciné documents Tazieff. (série documentaire en 6 volets de 55' : "Du volcan interdit à la montagne de Dieu", "Etna : sur les traces d'Empédocle", "Le triangle de l'Afar", "La cordillère des volcans", "Java", "Les cratères fertiles").

Des ressources complémentaires sont indiquées dans l'ouvrage de MOTTET, G., ALLAIN, J.-Ch., BOUTOT, B., MINGUEZ, R., *Volcans et tremblements de terre - Images descriptives, images explicatives*, cité dans les références bibliographiques.

UNE SITUATION-PROBLÈME EN GÉOLOGIE : UN DÉTOUR DE L'ANECDOTIQUE AU SCIENTIFIQUE

Marie Sauvageot-Skibine

Si "faire des sciences" consiste à résoudre des problèmes scientifiques, il convient de se demander : qui pose le problème ? Il semble que seul celui qui connaît la réponse puisse poser correctement un problème scientifique, et ce ne peut être alors que l'enseignant. Mais dans ce cas, cela risque de rester "son" problème. Si l'élève pose, pour sa part, une question qui l'intéresse, un problème pour lui, il peut le résoudre et rester à un niveau fonctionnel, sans que soit envisagé un problème scientifique. C'est ce double écueil que tentent d'éviter les situations-problèmes, telles que nous les avons testées, et dont nous détaillerons ici un exemple, en géologie. Nous analyserons cet essai, à l'aide d'une grille de critères établie au cours d'une de nos recherches à l'INRP.

faire des sciences :
résoudre
des problèmes,
surmonter
des obstacles

Dire avec Bachelard que faire des sciences, c'est résoudre des problèmes au sens de surmonter des obstacles, est une idée tout à fait acceptée de nos jours. Cerner les obstacles, les reconnaître, est une tâche difficile à laquelle se sont attelés cependant un certain nombre de chercheurs. Les difficultés actuelles concerneraient plutôt l'élaboration de séquences prenant en compte ces obstacles. L'un des traitements pédagogiques appropriés tourne autour de ce que les didacticiens de mathématique et de physique ont appelé situations-problèmes. Celles-ci ont fait l'objet de nombreux articles, depuis le puzzle de Brousseau (1). Ces propositions ont intéressé tous les chercheurs soucieux de trouver une pratique pédagogique cohérente avec leur conception constructiviste de l'apprentissage (2), même si certains ont émis des critiques et fait d'autres propositions (3).

Cependant, il semble que tous les didacticiens ne soient pas d'accord sur leur utilisation, ou la limitent au collège, et que d'autres leur préfèrent des "situations problématiques" en mathématiques au lycée ou dans l'enseignement supérieur (4).

Toutes ces discussions concernent les sciences physiques et les mathématiques. Où en est la situation en biologie ? Dans son livre "De l'apprentissage à l'enseignement" (5), Michel Develay donne un exemple de situation-problème, en classe de Troisième. Avant lui, et avec lui, l'équipe de Victor Host avait distingué, pour l'école primaire, les activités fonctionnelles et les activités de résolution de problèmes (6). Plus récemment, l'équipe INRP de didactique des sciences expérimentales a essayé de dégager les caractéristiques d'une situation-problème en biologie, tentant par là, de préciser sa spécificité par rapport à la physique et aux mathématiques (7).

situations-
problèmes
en biologie...

... et en géologie

Reste à analyser des situations-problèmes précises, testées dans des classes et semble-t-il assez réussies du point de vue de l'enseignant et des élèves, à l'aide de cette grille, pour essayer de caractériser une situation-problème en biologie-géologie. Ce sera l'objet de cet article, à l'aide d'une séquence de la classe de Quatrième (élèves de 14 ans, troisième année de collège).

Avant cette analyse nous examinerons les difficultés à poser un problème scientifique avec les élèves, et nous essaierons de montrer que la situation-problème a le mérite, grâce à un détour, de pouvoir apporter des réponses à un problème scientifique, de s'attaquer aux obstacles rencontrés au cours de la construction d'un concept, tout en intéressant les élèves.

1. IL FAUT POSER UN PROBLÈME SCIENTIFIQUE, COMME LE DEMANDENT LES CHERCHEURS ET LES PROGRAMMES.

Cette nécessité apparaît incontournable de nos jours, en France, en ce qui concerne les sciences expérimentales. Chacun a à l'esprit cette affirmation de Bachelard, de 1938 (8) :

toute
connaissance
est une réponse
à une question

"Avant tout il faut savoir poser des problèmes. Et quoi qu'on dise, dans la vie scientifique, les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes. C'est précisément ce sens du problème qui donne la marque du véritable esprit scientifique. Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi, rien n'est donné, tout est construit."

C'est je crois, dans cette optique, que le numéro 117 de *Recherches pédagogiques*, donne une définition du problème :

"On dira qu'il y a problème scientifique chaque fois que la réponse à une question, la poursuite d'une action, se heurtent à des obstacles de nature diverse (moteurs, techniques, psychologiques, épistémologiques...) débouchant sur la construction d'invariants (grandeurs, propriétés, relations qui se conservent), cette construction d'invariants impliquant le recours à l'observation, à l'expérimentation, au tâtonnement expérimental."

toute leçon
doit être
une réponse...

Quand Bachelard parle de poser des problèmes, il parle d'une problématisation théorique, mais plus de quarante ans auparavant, John Dewey, lui, parlait de problème en termes pragmatiques, dans une optique de pédagogie fonctionnelle (9). *"Rien ne peut être fait problème pour quelqu'un, simplement parce qu'on lui accole l'étiquette problème, ou encore parce que c'est une chose difficile et rébarbative... Pour que l'enfant se rende compte qu'il a affaire à un problème réel, il faut qu'une difficulté lui apparaisse comme étant sa*

difficulté à lui, comme un obstacle né au cours de son expérience, et qu'il s'agit de surmonter."

mais on peut
en rester à
un niveau
fonctionnel

Dans un cadre constructiviste, pour que le savoir soit acquis, il faut répondre aux problèmes des élèves. C'est parce que les questions que pose l'apprenant sont des vraies questions fonctionnelles, que le savoir est mieux assimilé par lui. Mais les problèmes posés alors par les élèves sont des problèmes pratiques et non théoriques. Et il y a là une grosse difficulté, celle de rester à un niveau fonctionnel, sans faire un détour par une théorisation. Le bulleur de l'aquarium est en panne ou absent, les poissons vont-ils "crever" ? Il existe un risque de court-circuit possible d'un problème pratique, pourtant lié à un problème scientifique concernant la respiration des poissons. Les élèves peuvent réparer ou installer un bulleur pour un élevage, et empêcher les poissons de mourir, sans faire le détour par le concept de respiration branchiale et d'échanges gazeux. Le problème pratique, fonctionnel, peut très bien se passer de détour théorique.

une question
ne peut être
que mal posée

Bachelard et Dewey situent le problème par rapport au savoir et par rapport à l'élève, et tout irait bien si les élèves posaient eux-mêmes un problème scientifique. Or, avec Canguilhem, nous pouvons dire que, historiquement, le problème n'est pas formulé au début de la recherche. Au cours de son analyse à propos du vitalisme il affirme "... nous estimons que les questions authentiquement importantes sont des questions mal posées. Une question ne paraît jamais bien posée qu'au moment où elle reçoit sa solution, c'est-à-dire où elle s'évanouit comme question... Il faut bien dire qu'une question bien posée n'est déjà plus une question puisqu'elle enferme tous les éléments de la réponse. Sans paradoxe une question ne peut, en tant que telle, être que mal posée." (10)
Un travail de rectification s'opère tout au long de la recherche.

il y a absence
de problème
dans un certain
nombre de cas

En conséquence, seuls les enseignants dans la classe sont aptes à poser un problème scientifique. Mais dans ce cas, le problème posé par l'enseignant ou le manuel reste bien souvent académique, sans grande signification pour l'élève. C'est une question, posée sans doute légitimement par ceux qui savent, pour faire apprendre. Il suffit d'avoir confiance.

Il peut y avoir différents obstacles à l'idée de démarrer le travail scientifique par un problème, il y a même absence de problème dans un certain nombre de cas. Les naturalistes, dont les objectifs peuvent se résumer par les trois verbes "nommer, décrire, classer", ne posent pas de problème. La vision empiriste de la biologie, qui requiert essais et tâtonnements, et pense que la science résulte d'une suite de découvertes accidentelles dues au hasard ou au génie, ne pose pas de problème.

Lorsque le savoir dérive directement des faits d'observation, même si on parle de méthode comme dans le positivisme, on n'a pas problématisé malgré une apparence de méthodologie

en 1968,
les programmes
demandent
de poser
un problème

scientifique. Enfin, avec le pragmatisme, lorsque le savoir résulte de la résolution de problèmes pratiques, et est validé par l'efficacité de l'action, comme pour l'ingénieur ou le médecin, le résultat peut être acquis sans qu'un problème scientifique soit posé.

Cependant, les programmes demandent aussi de poser des problèmes. C'est dans la circulaire du 17 octobre 1968 que le Recteur Gauthier précisait :

"Les programmes scolaires de la classe de 6ème comportent trois termes : organisation, milieu, biologie. Dans cette trilogie, les études biologiques doivent devenir prioritaires, car elles seules permettent de poser des "problèmes", des problèmes dynamiques même et d'actualité qui intéressent le plus nos élèves."

L'accent est mis indiscutablement sur le fait d'intéresser les élèves, de rendre la classe de sciences vivante et attrayante. Les manuels de l'époque proposent au mieux une question du type :

"Comment les vertébrés se nourrissent-ils ?"

"Comment capturent-ils leur nourriture ?"

"Comment expliquer la variation du régime alimentaire ?"

ou bien

"Que donner à manger à ton animal ?"

Ce qui illustre les deux versants du problème, versant théorique ou versant fonctionnel. Mais le plus souvent, les titres des leçons des manuels ressemblent plutôt à : *"Chasse et repas des carnivores"* ou *"Les prédateurs à la recherche de leurs proies"*, ce qui conduit très facilement à des descriptions de comportements alimentaires, sans problématisation.

en 1993,
des manuels
proposent
des problèmes

En 1993, les manuels de 2^{nde} et 1^{ère} S, des éditions Nathan présentent un encadré intitulé : *"Les problèmes scientifiques à résoudre"* (11).

Examinons le manuel de 1^{ère} S, et essayons de caractériser les problèmes scientifiques posés. Sur vingt-six "problèmes scientifiques à résoudre", concernant les onze chapitres de biologie et de géologie, deux seulement sont posés sous une forme interrogative :

"Comment l'affrontement de deux plaques de lithosphère continentale dans les zones de convergence explique-t-il la formation d'une chaîne de montagnes ?"

"Par quels mécanismes certaines roches de chaînes de montagnes ont-elles pu être enfouies en profondeur puis remises à l'affleurement, déformées et transformées ?"

Une question pouvant cacher une affirmation, et une affirmation être interrogative, la forme ne nous renseigne pas sur la présence ou la nature d'un problème.

Cinq fois sont abordés des problèmes d'origine :

- origines des matériaux constitutifs de l'organisme embryonnaire,
- origine de la diversité des individus d'une espèce et, par là, origine de l'identité biologique de chacun d'eux,

- origine de l'énergie qui met en mouvement les masses atmosphériques et océaniques,
- origine et modalités de la dissipation de l'énergie interne,
- origine des magmas associés à la dissipation de l'énergie interne.

Trois problèmes de mises en relation :

- relation entre la température à la surface de la Terre et les mouvements d'eau et d'air,
- relation entre la dissipation de l'énergie interne et la dynamique des fonds océaniques,
- relation entre les propriétés physiques et chimiques des enveloppes et l'organisation interne du globe terrestre.

Deux fois sont étudiées des influences :

- influence de divers facteurs sur la consommation d'énergie d'un organisme,
- influence des activités humaines sur le cycle du carbone.

Une fois des conditions :

- les conditions de la sédimentation actuelle et passée.

ce ne sont que
des mécanismes

Ce sont donc surtout des **mécanismes** qui demandent à être explicités : le mot mécanisme est utilisé six fois, modalités trois fois ; cinq autres phrases portent sur différents mécanismes, sans contenir ce mot (ce sont des mécanismes de conversion, de transfert, de mise en place, d'ajustement, d'utilisation).

Il est toujours question majoritairement de mécanismes dans le manuel Nathan de Terminale S, publié en 1994. Notons par exemple : *"Les mécanismes assurant le maintien du nombre de chromosomes d'une génération à la suivante"*.

Poser des problèmes reviendrait-il à expliquer des mécanismes ? Ce type d'explication apparaît tout à fait fertile, pour communiquer et faire comprendre des résultats scientifiques. Il sous-entend une certaine docilité intellectuelle de l'élève, et n'aiguise pas automatiquement sa curiosité. On reste dans un exercice scolaire, indispensable pour réussir ses examens.

2. COMMENT POSER UN PROBLÈME SCIENTIFIQUE AVEC LES ÉLÈVES ?

Ou comment faire si on veut concilier la nécessité de poser un problème théorique, en souhaitant que ce problème devienne celui des élèves ?

2.1. La question du démarrage : peut-on toujours démarrer en posant un problème ?

Oui et non, répond Guy Rumelhard (12).

Oui, parce qu'on peut donner ou faire trouver une liste de problèmes que l'on peut poser partout et toujours.

Où c'est ?

Comment ça marche ? Comment ça fonctionne ? Quel est le mécanisme ?

À quoi ça sert ?

D'où ça vient ?

Comment ça se déplace ?

Comment ça évolue ?

À quelle catégorie ça appartient ?

En quoi c'est fait ? Quelle est la composition chimique ?

Ce sont des problèmes très généraux qui ne sont pas reliés à quelque chose que l'on peut faire sur le plan expérimental ou à un modèle explicatif. Il faut trouver une manière d'opérer.

Non, parce que ça ne donne pas la façon de s'y prendre expérimentalement.

Commencer par formuler un problème peut être inopérant.

La simple question "*En quoi c'est fait ?*" est liée à des procédés de séparation et ensuite d'analyse. Or tant que ne sont pas donnés les procédés utilisés pour séparer les protéines sans les dénaturer, on ne sait pas comment faire. La réponse est de type technique. Dans le principe, il faut séparer, mais comment sépare-t-on ? C'est seulement quand on dispose d'un procédé comme l'électrophorèse qui ne dénature pas les protéines, qu'on peut répondre.

Si on examine un problème bien posé comme "*D'où vient la chaleur animale ?*", la question amène à chercher une source de chaleur, un modèle de combustion, etc. On ne peut séparer le problème, des expériences que l'on fait, des modèles qu'on utilise, et de l'analyse que l'on va faire ensuite. Il est impossible de séparer un problème de la résolution de ce problème. Ce qui est important c'est de relier le problème à quelque chose qui est opératoire.

Poser correctement le problème ne suffit pas, car certains le sont parfaitement, mais n'ont pas de réponse à un niveau d'enseignement donné. Comment un lapin qui mange de l'herbe peut fabriquer du lapin ? La réponse implique le code génétique, donc ne peut être comprise avant la dernière année de collège.

souvent le même type de questions au départ

la difficulté : rendre ces questions opératoires

2.2. Différentes façons de commencer un travail

Comment "démarrer" pour que les activités scientifiques apportent des réponses à des problèmes scientifiques et pour que les activités des élèves aient un sens pour eux ?

Examinons les différentes façons de faire habituelles, à la lumière de ces deux exigences. Pour celui qui sait, il semble toujours possible de rattacher les titres à un problème scientifique, mais c'est une chose quasi impossible pour celui qui ne sait pas. Quel sens les élèves peuvent-ils donner à la leçon, à partir d'un titre ?

• 1. Partir des programmes

On peut citer des phrases des instructions officielles :

- *"Les roches conservent parfois des traces de la vie d'autrefois."* (cycle III)
- *"Une manifestation de l'activité du globe : le volcanisme"* (programme de 4ème)

attrait de
l'activité qui n'est
pas évident

Pour les élèves, le sens de l'activité correspond à la volonté du maître ou des programmes ; c'est la maîtresse qui a raison, ou, il faut le faire pour passer dans la classe supérieure, ou pour avoir des bonnes notes ou pour passer un examen. C'est une activité scolaire nécessaire, dont l'attrait n'est pas évident au premier abord, pour la majorité des élèves.

• 2. Partir d'un problème scientifique posé historiquement

- *D'où vient la chaleur animale ? (Comment expliquer qu'on soit toujours chaud ?)*
- *Le lapin mange de l'herbe et fabrique de la chair de lapin. Comment faire du lapin avec de l'herbe ?*
- Descartes : *"Comment ont été produites les montagnes, les plaines, les mers ?"* (13)
- *"D'où viennent les coquilles ?"* (14)

souvent des
questions
"vraies",
porteuses

Ce point de départ est porteur, comme il l'a été dans le passé. Les questions historiquement posées l'ont souvent été à partir de constatations que chacun pouvait faire dans la nature, que ce soit la chaleur de notre peau, ou la présence de fossiles. Ce sont des questions qui intéressent les élèves, parce qu'elles paraissent "vraies", au sens où elles sont ancrées dans leur quotidien. Mais ils restent souvent muets parce qu'ils n'ont aucune idée de la réponse, qui ne paraît pas à leur portée.

• 3. Partir du vécu quotidien des élèves

Les questions peuvent être posées par l'enseignant, mais à partir de problèmes rencontrés par les élèves dans la vie de tous les jours.

- *Est-ce que je suis obligé de manger ce que je n'aime pas pour être en bonne santé ?*

- *Qu'est-ce que je risque si je ne me lave pas les dents tous les jours ?*

Il s'avère difficile de poser ce type de questions en géologie pour nos élèves, parce que le domaine étudié est beaucoup moins présent dans la vie quotidienne que les fonctions du vivant, à moins d'être un petit italien habitant sur les flancs d'un volcan, ou un jeune japonais craignant les tremblements de terre.

des questions
légitimes...

La légitimité de ces questions apparaît évidente, l'utilité directement perceptible. L'élève est au centre de la question et le premier bénéficiaire. Le risque est d'apporter une réponse en forme de oui/non ou de règle plus ou moins moralisatrice, sans que soient travaillées les notions scientifiques sous-tendues par ces questions.

• 4. Partir des questions des élèves

... ne conduisant
pas souvent à
un problème
scientifique

Spontanément le plus souvent, les questions des élèves sont demandeuses d'une information ponctuelle, souvent chiffrée et ne portant pas sur un problème à résoudre. Les questions sur les monstres, poissons, reptiles et autres mammifères sont du type : *Combien pèsent-ils ? Quelle est leur longueur ? Est-ce qu'ils courent vite ?*

Comment se forme un volcan ? n'est pas un problème que se posent les élèves et n'a pas la force attractive de *Comment se font les bébés ?*

• 5. Partir d'activités fonctionnelles

Que ce soient les cultures, les élevages ou les sorties sur le terrain, les activités fonctionnelles sont des mines très riches pour poser des problèmes scientifiques. Elles ont le mérite d'exister à tous les âges, de la maternelle au lycée. Elles ont le défaut de se suffire à elles-mêmes, si on n'y prend pas garde, ou si on manque soi-même de connaissances concernant les concepts scientifiques en relation avec la situation.

de même,
les activités
fonctionnelles
peuvent se suffire
à elles-mêmes

Prenons l'activité de faire pousser des fleurs pour les mamans, en grande section de maternelle. Il faut arroser les fleurs, fonction répartie en général entre les élèves de la classe, et rappelée par un tableau. À partir d'une telle activité, un certain nombre de questions peuvent être posées. *Quelle quantité d'eau dois-je donner à la jacinthe ou à l'impatience pour qu'elle pousse ? À quel rythme : tous les jours, tous les 8 jours ? Quelle eau dois-je prendre : celle du robinet, l'eau de pluie, l'eau minérale ? Où verser l'eau : sur la terre, les feuilles ?* L'enseignant peut ainsi commencer la construction d'invariants, concernant l'alimentation en eau des plantes vertes. Mais il peut dire aussi : "tu verses à la surface de la terre, tous les deux jours, la moitié de ce récipient". Les élèves seront actifs et la plante poussera tout autant.

Quant aux sorties sur le terrain en géologie, permettant des visites de carrières, de mines, de gisement, des études de

paysage, des sorties spéléo, leurs objectifs peuvent se limiter à observer, décrire, nommer, classer, d'autant plus que les élèves adorent casser du caillou et ramasser des fossiles. Au contraire, le travail sur le terrain peut aider à poser des problèmes, et expliquer ce que l'on voit, faire ce va-et-vient demandé par les programmes entre le réel et la théorie. *Pourquoi d'un côté de la route trouve-t-on du grès arkose, et de l'autre côté de la route, à la même hauteur, du granite rose ?*

Pourquoi trouve-t-on des coquilles d'huîtres au milieu des vignes ?

• **6. Partir de l'imprévu et de l'actualité**

Là, on est certain de capter l'intérêt des élèves, en leur montrant une vidéo qui suscite curiosité et peur, comme celle de la dernière éruption volcanique, ou celle du violent tremblement de terre qui a fait beaucoup de morts. Du gentil dinosaure "Gertie", héros d'un des premiers dessins animés de 1909, aux méchantes créatures géantes assoiffées de sang de Jules Verne ou de Spielberg, on est certain de capter l'attention des élèves. Reste à passer de ce monde terrifiant, réel ou fantasmagorique, à une perspective scientifique. Le problème didactique et pédagogique reste le même, que l'on parte du savoir ou de l'élève, comment relier les deux ?

• **7. Partir d'une question posée par le professeur mettant en jeu la curiosité des élèves (comme en 3. et 6.) et permettant d'arriver à un problème scientifique (comme en 1., 2. et 5.)**

Cette situation-problème oblige à faire un détour, comme pour les activités fonctionnelles, avant d'arriver au problème scientifique. Les élèves ne cherchent pas une réponse à un problème scientifique, ils répondent à une de leurs questions, et pour ce faire, sont obligés de construire des notions, des invariants conceptuels. Mais ils ne peuvent pas trouver de réponses à leur problème si ce travail n'est pas fait.

la situation-
problème
permet un détour

3. UN DÉTOUR NÉCESSAIRE : LA SITUATION-PROBLÈME

à propos de
la fossilisation,
premiers essais
révélant
des impasses...

La séquence décrite ici concerne la notion de fossilisation en troisième année de collège (15). Les élèves ont 14 ans et la géologie ne figure plus à leur programme depuis la dernière année de l'école primaire, soit 10/11 ans.

De nombreux essais, par différents collègues, avaient mis en évidence un certain nombre d'impasses quant à la situation de départ. Ces différentes situations ont été, par contre, très riches pour mettre en évidence les représentations-obstacles concernant la fossilisation.

Lorsque le problème est ainsi posé : *"Je suis une huître fossile du gisement de marne à huitres, voisin du collège. Comment expliques-tu ma présence à cet endroit ?"*, les élèves indiquent la nécessité de la présence de la mer à un moment, dans cet endroit. *"La mer a recouvert notre région."* Cela leur semble bizarre d'imaginer la mer au cœur de la Bourgogne ou dans le Bassin parisien, mais après tout, pourquoi pas ? La mer va et vient.

À la question : *"Et s'il n'existait pas de fossiles ?"*, ils répondent que ce serait dommage :

*"Les animaux d'avant ne seraient pas connus",
"On n'aurait pas la connaissance de dinosaures",
"On ne pourrait pas faire de collections".*

Une autre façon d'aborder le problème, complète le système explicatif des élèves. *"À l'intérieur de la craie, on peut trouver des oursins ou des ammonites, comment expliques-tu leur présence dans la roche ? Tu peux répondre par un texte, un ou plusieurs dessins."* C'est le modèle de l'empreinte qui est mis en œuvre par les élèves : la mer a plaqué les animaux sur le rocher, petit à petit ils s'encastrent, s'impriment et se transforment en roche.

... et aussi des
obstacles

Apparaît donc, à l'évidence, l'obstacle de la préexistence de la roche.

Le choix de partir d'une émission télévisée sur les dinosaures a été guidé par l'assurance de déclencher leur curiosité, et le fait que cette situation soit apparue porteuse. Au cours de l'émission : *Savoir Plus* de François de Closets (16), l'invité Pierre Perret pose la question suivante au paléontologue Philippe Taquet :

"Est-il possible que demain, sous mes poireaux, en Seine-et-Marne ou en Normandie, je trouve un énorme tibia de dinosaure ?"

un démarrage
spectaculaire

Dans la situation proposée, l'élève ne cherche pas une réponse à un problème scientifique. Sa curiosité est piquée au vif par une question ; il donne son opinion, ce qui l'amène à la défendre, et pour être crédible dans le groupe, à chercher des arguments et des preuves. Pris au jeu, il découvre qu'il ne comprend pas certains faits, ce qui le motive pour trouver une explication. Il est impliqué dans le

un savoir opérant

problème, et veut savoir. Sa place dans le groupe et son besoin de comprendre vont le pousser à argumenter, à tester les opinions des autres, à consulter des documents, à prendre conscience de faits qui lui apparaissent contradictoires, à poser de nouvelles questions... Cette activité intellectuelle va lui permettre de construire des notions nouvelles, d'en rectifier et d'en relier d'autres, de déboucher sur un nouveau problème. La réponse au problème scientifique sera le résultat de ce travail. Le tableau suivant essaie de résumer les différentes étapes chronologiques, et la relation entre le comportement de l'élève conditionné par la situation-problème et la réponse au problème scientifique.

Versant situation-problème et comportement de l'élève	Versant problème scientifique et construction conceptuelle
<p>Une question-jeu est posée, concernant la présence ou non de dinosaures à deux endroits différents, en France.</p> <p>Elle entraîne les comportements suivants :</p> <p>je donne mon avis, je défends mon avis, je prouve ce que je dis.</p>	<p>Recherche sur documents pour vérification, argumentation, et construction de notions nouvelles.</p>
<p>Je ne comprends pas la présence d'un dinosaure en Normandie et pas en Seine-et-Marne. Je suis la piste donnée par l'indice "présence de l'argile" en Normandie.</p>	<p>Examen des cartes géologiques, qui montrent la présence de terrains différents dans les deux régions, la superposition de terrains, leur âge...</p>
<p>Je suis présent dans le groupe, je dis ce que j'ai trouvé, je défends mon avis, et/ou je veux comprendre (pris au jeu).</p>	<p>Structuration des connaissances établies.</p>
<p>Je trouve la solution à la question : les terrains de Seine-et-Marne n'ont pas l'âge des dinosaures, ceux de Normandie oui.</p>	<p>Construction d'un lien entre fossile et roche, par l'intermédiaire de l'âge. Nouveau problème à résoudre : comment expliquer que les roches ont un âge ?</p>

une grille
d'analyse
d'une situation-
problème, en
dix points

Je propose d'analyser cette séquence, à l'aide d'une grille élaborée par l'équipe de didactique des sciences expérimentales de l'INRP (17), à la suite des travaux de Roland Charnay et Guy Robardet (18). Cette grille regroupe dix caractéristiques d'une situation-problème et se veut plus spécifique à la biologie que celles produites en mathématiques et en physique. J'ai modifié l'ordre de présentation des caractéristiques, pour me permettre de mieux suivre le déroulement pédagogique de la séquence. Chaque caractéristique numérotée sera présentée en caractères gras, et examinée à la lumière de la séquence choisie.

1 - Les élèves perçoivent la situation qui leur est proposée comme une véritable énigme à résoudre, dans laquelle ils sont en mesure de s'investir. C'est la condition pour que fonctionne la dévolution : le problème bien qu'initialement proposé par le maître devient alors "leur affaire".

une énigme
à résoudre assure
la dévolution
du problème

La situation met en jeu des dinosaures, animaux qui suscitent toujours beaucoup d'intérêt auprès des élèves, même ceux de 14 ans, et non pas des ammonites ou des gryphées. L'idée de trouver un énorme tibia dans un jardin a un caractère exceptionnel, une allure de bonne blague. Une émission de télévision avec Pierre Perret ne fait pas penser à un pensum ou à un problème, mais plutôt à un jeu avec énigme, comme les émissions animées il y a quelques années à la télévision, par Dieuleveult.

2 - L'étude s'organise autour d'une situation à caractère concret, qui permette effectivement à l'élève de formuler hypothèses et conjectures. Il ne s'agit donc pas d'une situation épurée, ni d'un exemple *ad hoc*, à caractère illustratif, comme on en rencontre dans les situations classiques d'enseignement (y compris en travaux pratiques).

Que ce ne soit pas une situation scolaire apparaît à l'évidence, elle met en jeu les jardins de Pierre Perret, un gros os, et une question qui n'est pas : *Y a-t-il des fossiles de dinosaures en France ?*, style de question académique trop souvent posée. De plus, si la vidéo et la télévision sont utilisées à l'école, c'est le plus souvent comme documentaire. La figure sympathique et la curiosité réelle de Pierre Perret apportent un petit air d'école buissonnière. La situation a sans aucun doute, un caractère concret, et le problème de la présence ou non d'un tibia de dinosaure dans un ou dans les deux jardins, est formulé à l'aide d'une phrase simple accessible à tous. Il faut noter également que l'une des régions concernées est celle où vivent les élèves. Ce n'est donc pas étonnant que les élèves se sentent concernés, donnent leur avis spontanément et émettent des hypothèses par rapport à la présence ou non des dinosaures.

les élèves
formulent
des hypothèses
à propos
d'un problème
qui les concerne

Les conditions de vie n'étaient pas réunies, ou, l'opinion publique serait avertie, sont les deux familles d'arguments avancés pour défendre l'absence de dinosaures.

"Le climat n'était pas propice aux dinosaures."

"Il n'y avait pas de végétation, pas d'eau."

"Les dinosaures vivaient au sud, à cause de la chaleur, il fait trop froid en Seine-et-Marne."

"Si en Seine-et-Marne il y avait des résidus de dinosaures, nous en serions informés."

"En Seine-et-Marne il y a beaucoup de cultivateurs, de bâtiments, et on n'a rien trouvé."

"Les gens qui travaillent la terre ou creusent le sol les auraient trouvés."

Les réponses d'élèves permettent de mettre en évidence la logique en fonctionnement dans leurs représentations : les fossiles se trouvent dans le sol, qui correspond à l'épaisseur de la terre retournée par la charrue, au maximum à la profondeur des fondations des maisons ou des tranchées ; le climat, la végétation et le paysage actuels ne sont pas supposés ne pas avoir changé.

Le deuxième clan défend, lui, la présence de dinosaures dans la région.

"Quand les dinosaures étaient sur terre, ils occupaient toute la surface. Alors que ce soit en Normandie, en Seine-et-Marne, en Inde ou en Amérique, si on creuse on peut trouver des fossiles."

"Pas possible qu'il trouve un os de dinosaures car on sait que ces bêtes ont existé il y a plusieurs millions d'années et donc elles ont été sûrement ensevelies sous plusieurs mètres de terre."

Les partisans de cette affirmation expliquent comment les dinosaures sont morts et ont été conservés : *"La terre à l'époque des dinosaures a été recouverte peu à peu au fil des siècles"* (nature de ce qui recouvre très variable : terre, éboulis, détritiques, poussière, sol, feuilles, cendres...). La profondeur d'enfouissement varie de quelques mètres à deux kilomètres.

"Le dinosaure a été conservé, parce qu'il était dans une roche à l'abri de l'humidité qui l'aurait fait pourrir."

"Des millions d'années après la mort des dinosaures, ils sont remontés à la surface à cause des mouvements du sol (tremblements de terre) ou à cause de l'érosion."

Les élèves marquent une nette distinction entre "ce qui recouvre" les dinosaures qui est un matériau léger, friable, et les roches, dures, vives comme du caillou, sur lesquelles reposent les dinosaures.

la situation-
problème est
organisée autour
du franchissement
d'un obstacle

3 - Une situation-problème est organisée autour du franchissement d'un obstacle par la classe, obstacle préalablement identifié.

Les représentations sur la fossilisation et la sédimentation ont été mises en évidence à maintes reprises par les ensei-

gnants du primaire (19) et du collège (20). Ces conceptions resurgissent à propos de la question posée par Pierre Perret. L'enseignant les analyse pour essayer de cerner ce qui fera obstacle à la construction du concept de fossilisation. Pour ce faire nous avons utilisé le réseau dynamique proposé par Jean-Pierre Astolfi et Brigitte Peterfalvi (21). Cet outil pose des questions fondamentales pour la construction d'une séquence. Ce tableau, très difficile à remplir, est – me semble-t-il – un tournant important entre le recueil de représentations et leur prise en charge dans l'élaboration d'une séquence.

un outil
pour élaborer
une séquence
centrée sur
un obstacle

Essayons de préciser son mode d'emploi. Il demande à l'enseignant de définir le concept scientifique visé au cours de cette séquence, les notions que l'on aimerait faire construire aux élèves, en relation avec le programme. Cette première étape a été clarifiée avant la recherche de représentations, puisque c'est par rapport à ce concept que l'on cherche les conceptions des élèves. La seconde étape est postérieure au recueil des représentations. Leur origine n'est pas évidente, pas plus que leur persistance chez certains élèves, malgré des explications fournies et répétées. On peut sans trop de problèmes cerner une conception d'élève qui révèle un écart à la pensée scientifique, sans pour autant avoir une idée bien précise sur la façon d'agir pour réduire cet écart. Essayer de replacer cette représentation dans un ensemble d'idées, cerner ce que ce réseau explique, préciser le mode de raisonnement de l'élève, va aider l'enseignant à caractériser le point de départ de sa séquence. La troisième étape va tenter de formuler le ou les obstacles qui empêchent un passage sans problème de la représentation au concept, à l'aide d'une explication. La rédaction par les enseignants de courtes phrases, exprimant une idée à la fois, sur ce qui fait obstacle et sur ce qu'il empêche de comprendre, n'est pas chose aisée. Les conditions de possibilité posent le même type de difficultés. Il s'agit de raisonner de façon très abstraite sur des idées, en cohérence et en opposition, de situer une rupture entre deux modes de pensée et d'envisager des possibles pour passer de l'un à l'autre. Ces conditions de possibilité du franchissement de l'obstacle vont aider l'enseignant à choisir une situation, dans laquelle les représentations des élèves vont être prises en compte et éprouvées, la nécessité de les modifier rendue obligatoire, et les possibilités de le faire, présentes.

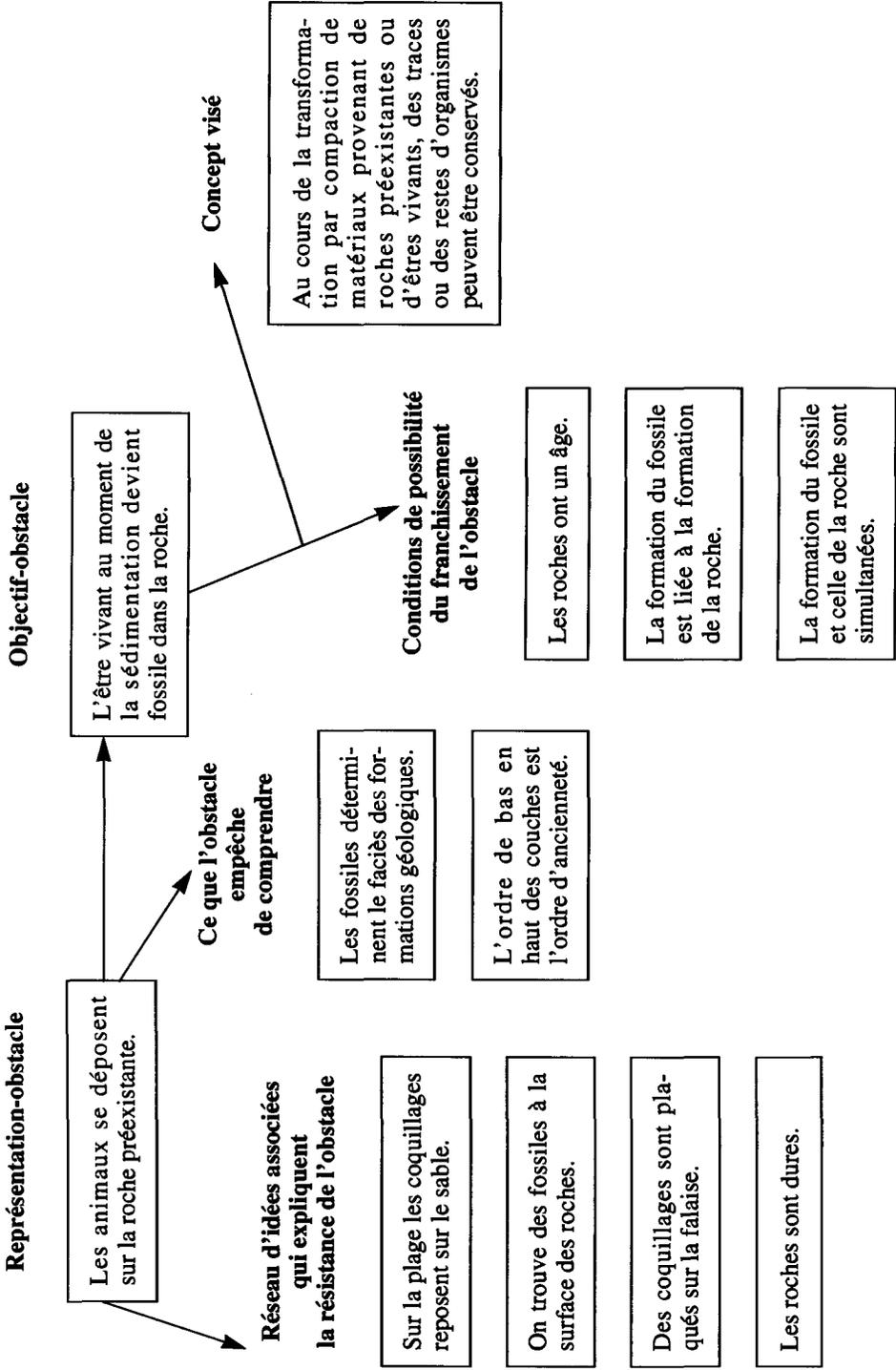
la persistance de
l'obstacle est
due à un réseau
d'idées associées

l'obstacle est
franchissable à
certaines
conditions

Examinons ces différentes étapes, dans l'exemple choisi (cf. schéma ci-contre).

Quel est le concept visé ?

Au cours de la transformation par compaction de matériaux provenant de roches préexistantes ou d'êtres vivants, des traces ou des restes d'organismes peuvent être conservés.



les différents
éléments du
fonctionnement
des obstacles,
dans notre
séquence

Qu'est-ce que les représentations expliquent ?

On peut réunir les conceptions et observations des élèves en un "réseau d'idées associées qui expliquent la résistance de l'obstacle" (22). La présence de certains fossiles à la surface des roches, celle des coquillages sur le sable de la plage, la dureté de la roche et la fragilité actuelle des animaux et plantes laissent penser que les animaux sont morts sur la roche préexistante.

Qu'est-ce qu'elles empêchent de comprendre ?

Si les êtres vivants sont déposés sur les roches, donc après la formation de celles-ci, les fossiles ne peuvent plus déterminer le faciès des formations géologiques, rôle assigné aux fossiles depuis Sténon (23) ; ce qui empêche d'établir le principe de superposition d'après lequel : "L'ordre de bas en haut des couches est l'ordre d'ancienneté, de la plus âgée à la plus récente."

Quel est l'obstacle ? L'objectif-obstacle ?

L'obstacle ici peut être résumé par la non simultanéité de la diagénèse et de la fossilisation. La roche préexiste au fossile, quel que soit l'âge de l'animal. Les élèves avanceront donc d'autres raisons que l'époque de formation, pour expliquer la présence du fossile.

"La roche sédimentaire est préexistante."

"Les animaux se déposent sur la roche préexistante."

L'objectif-obstacle prendra en compte l'obstacle énoncé plus haut et formulera la notion dont la construction est visée pendant la séquence : *l'être vivant au moment de la sédimentation devient fossile dans la roche.*

À quelles conditions l'obstacle peut-il être franchi ?

Il semble nécessaire que les roches se forment au cours du temps, qu'elles aient un âge, que la formation du fossile soit liée à celle de la roche, que ces deux formations soient simultanées.

le besoin de
comprendre
pousse l'élève

4 - L'élève ne dispose pas, au départ, des moyens de la solution recherchée, en raison de l'existence de l'obstacle qu'il doit franchir pour y parvenir. C'est le besoin de résoudre qui conduit l'élève à élaborer ou à s'approprié collectivement les instruments intellectuels qui seront nécessaires à la construction d'une solution.

Pour pouvoir résoudre le problème, il faut chercher l'âge et la nature des terrains, connaître l'âge des dinosaures, et en déduire une possibilité théorique de leur présence à un endroit donné, présence qui ne sera confirmée que si des conditions de fossilisation ont été réunies. La question concerne deux endroits géographiques, il faut donc admettre l'éventualité que tout n'est pas pareil partout.

Les élèves, pensant que les roches n'ont pas d'âge et que la fossilisation est postérieure à la diagénèse, n'ont pas de méthode pour déduire d'un raisonnement la présence ou l'absence des fossiles. Ils n'ont donc pas au départ les connaissances nécessaires à la solution recherchée.

Le besoin de résoudre le problème les amène à vérifier leurs affirmations.

5 - La situation doit offrir une résistance suffisante, amenant l'élève à y investir ses connaissances antérieures disponibles ainsi que ses représentations, de façon à ce qu'elles conduisent à leur remise en cause et à l'élaboration de nouvelles idées.

la situation résiste

La résistance de la situation réside dans la complexité due au nombre et à la variété des terrains et des Sauriens. Les élèves voulant savoir qui a raison, sont amenés à établir les limites de validité de leurs représentations concernant le régime végétarien des dinosaures, le climat chaud, leur présence partout en France, leur âge. Ils peuvent le faire grâce à des documents, choisis par le professeur et apportant les informations nécessaires. L'un d'entre eux est extrait du numéro de *Science et vie* d'octobre 1993, et s'intitule : "Ces 7 dinosaures ont vécu en France". Les élèves extraient de ces documents des informations qui les surprennent, parce que contradictoires avec ce qu'ils pensent :

- on a retrouvé des dinosaures en Normandie, pas en Seine-et-Marne ;
- certains sont carnivores, d'autres herbivores ;
- la taille, l'aspect et les conditions de vie sont très différents ;
- ils n'ont pas tous le même âge : 220 MA, 140 MA, 160 MA...
- certains n'ont été découverts que très récemment : 1955, 1985, d'autres depuis très longtemps : 1841.

les dinosaures
à un endroit et
pas à un autre

Les élèves sont surtout interpellés par le fait qu'on ait trouvé des dinosaures en Normandie et pas en Seine-et-Marne.

Ils apportent de nouvelles explications.

"C'est par rapport au climat que les squelettes de dinosaures ont été retrouvés." (Autrement dit ça ne prouve rien, ils ont pu exister et disparaître sans qu'on les retrouve.)

La logique de l'élève n'est pas abandonnée parce qu'une information est contradictoire, il essaie de trouver une explication qui ne remet pas en cause ce qu'il pense, tout en intégrant ce que le professeur ou le document dit.

"Les différents dinosaures vivaient là où ils se plaisaient le mieux."

"Ils préféreraient les côtes de Normandie, là où il y avait de l'eau."

À l'aide d'un antropomorphisme fréquent chez les élèves, ils permettent aux dinosaures de choisir leur résidence comme nous. L'animal est doté d'une volonté, d'une possibilité de choisir. Toutes les notions ne sont pas travaillées en même temps. Les informations apportées à propos des fossiles ne remettent pas en cause leurs représentations concernant le terrain. Le paysage inchangé, les côtes françaises permanentes leur permettent de trouver une explication. Certains élèves occultent même la présence de dinosaures dans l'Est de la France, présence pourtant nette sur le document, et affirment :

"Ils vivaient tous au bord de la mer car on y trouve plus facilement de la nourriture."

un nouvel indice

Une deuxième information permet d'avancer : **le Lexovisaurus de Normandie a 160 MA et a été trouvé dans de l'argile.** Est-ce que ce pourrait être un indice pour comprendre pourquoi en Normandie et pas en Seine-et-Marne ? Comment avoir une idée de la nature du sous-sol de Seine-et-Marne ?

L'enseignant propose de nouveaux outils : la carte géologique de Seine-et-Marne et celle de Normandie, ainsi que l'échelle des temps géologiques. Nouvelle prise d'informations par les élèves, à partir du travail sur documents : les deux régions ne se présentent pas de la même façon, plusieurs roches sont superposées, les roches ont un âge relatif et absolu.

un nouveau problème

Les élèves ont du mal à admettre que les roches aient un âge, mais acceptent malgré tout cette information, parce que donnée par un document scientifique et par l'enseignant. Cette notion sera travaillée dans une séance suivante, pour assurer un peu mieux ses fondations, car les élèves disent : *"Je ne vois pas le rapport entre les pierres et les animaux"*. La séance n°2 fera fonctionner le modèle de l'empreinte, présenté par les élèves pour expliquer la formation des fossiles : *"le fossile s'enfonce dans la roche"*. En manipulant, ils arriveront à construire des notions comme : *"les roches ont été formées au fil des années à partir de sédiments et d'eau"*, *"les fossiles ont plusieurs millions d'années et ne sont pas enfoncés mais recouverts"*. Cette seconde partie de l'apprentissage, expliquant la fossilisation et la diagenèse et établissant leur simultanéité, ne sera pas analysée en détail ici, faute de place. La réponse à la question de Pierre Perret interviendra à la fin de la première partie.

la présence des dinosaures est reliée à l'âge des terrains

À cette étape du travail, la présence de certains dinosaures à des endroits différents, l'âge des animaux, la nature et l'âge des terrains permettent à beaucoup d'élèves, de **relier dinosaures et terrains, et de solutionner le problème.**

"C'est selon les roches et leur âge."

"On constate que certains fossiles retrouvés coïncident avec certaines roches."

"Drôle de coïncidence avec les terrains jurassiques et crétacés de Normandie, par contre les terrains sont trop jeunes en Seine-et-Marne pour avoir accueilli les dinosaures."

Il pourra donc y avoir des dinosaures si on constate la présence d'une roche du même âge que l'animal. Les élèves ont trouvé une explication logique et étayée, permettant de répondre à la question posée par le chanteur.

6 - Pour autant, la solution ne doit pas être perçue comme hors d'atteinte pour les élèves, la situation problème n'étant pas une situation à caractère problématique. L'activité doit travailler dans une zone proximale, propice au défi intellectuel à relever et à l'intériorisation des "règles du jeu".

la solution est accessible

Il faut que les conditions de possibilité de franchissement de l'obstacle correspondent à l'âge, aux connaissances et aux possibilités intellectuelles des élèves. Les questions que l'enseignant se pose sont de deux ordres : est-il possible, pour des élèves de Quatrième, d'établir la simultanéité de la diagénèse et de la fossilisation ? Est-ce que la situation proposée est suffisamment porteuse ?

Aux deux questions, l'expérience répond oui, au moins pour un grand nombre d'élèves. Il faut noter cependant que la réussite avec un groupe-classe n'entraîne pas nécessairement la même réussite avec d'autres classes. Ce sont les élèves qui décident si la situation est à leur goût, et s'ils veulent s'investir. Il est difficile à l'enseignant de le prévoir. Cependant une situation, élaborée en équipe et testée dans un grand nombre de classes avec satisfaction, a plus de chance de réussir. Une situation-problème est construite en essayant de réunir les conditions optimales et structurales pour que "ça marche".

la solution résulte de la situation

7 - La validation de la solution et sa sanction ne sont pas apportées de façon externe par l'enseignant, mais résultent du mode de structuration de la situation elle-même.

La solution est indépendante de l'enseignant : les dinosaures sont absents d'un endroit et présents dans l'autre. La réponse résulte de la structuration des notions construites : les dinosaures vivaient à un endroit précis, ils ont un âge, les terrains sont superposés et différents, les terrains ont un âge... La structuration est exprimée ici par le mot "coïncidence" employée par les élèves. Cette conclusion invalide la préexistence de la roche et le modèle de l'empreinte. La cassette et Philippe Taquet permettent de vérifier la justesse de la réponse.

" Il faut trouver les terrains correspondant à la période où vivaient les dinosaures. Si les terrains sont plus anciens ou plus récents, vous ne trouverez pas."

C'est donc bien le fonctionnement d'un jeu où on vérifie sa réponse à la fin. Les élèves sont très flattés d'avoir trouvé la même réponse qu'un grand paléontologue.

les élèves engagent leur opinion

8 - L'anticipation des résultats et son expression collective précèdent la recherche effective de la solution, le "risque" pris par chacun faisant partie du "jeu".

Les élèves, amusés et partants pour jouer, proposent une réponse dès que la question est posée, et ne commencent pas par analyser, poser des questions, travailler le problème. Ils donnent chacun leur opinion, s'aperçoivent que tous n'ont pas la même, défendent la leur devant les autres, prennent des risques parce qu'ils sont au stade d'une opinion, et non au stade de référence à des résultats de recherche. C'est cet investissement face aux autres qui va les amener à vouloir vérifier ce qui est dit et qui a raison. C'est pour cela qu'il y a dévolution du problème.

9 - Le travail de la situation-problème fonctionne ainsi sur le mode du débat scientifique à l'intérieur de la classe, stimulant les conflits socio-cognitifs potentiels.

L'enseignant ne pouvant pas décider s'il y a conflit ou non dans la tête de l'élève, ne peut que proposer des situations où il est possible que ces conflits aient lieu. Il est évident que ce n'est pas une organisation de la classe en cours frontal qui va permettre le plus certainement les conflits. L'enseignant installe des moments d'expression écrite individuelle, des moments de confrontation en petits groupes et des moments de discussion en groupe-classe. L'alternance de ces différents modes de gestion de la classe a un impact très important sur le travail des élèves.

Deux types de conflits "ont pu" fonctionner au cours de cette séquence.

ce qui peut
entraîner
des conflits
socio-cognitifs...

Le premier a pu avoir lieu, au cours de la confrontation par petits groupes, entre les opinions exprimées individuellement au préalable par écrit. Opinions différentes des élèves au début de la séquence, par exemple, entre ceux qui pensaient qu'il pouvait y avoir des dinosaures dans les jardins, et ceux d'avis contraire. Le fait d'exprimer oralement ces opinions et de les défendre au sein d'un groupe a pu les assooir et les renforcer. L'absence d'enregistrements des discussions des élèves ne permet pas d'affirmer si ces conflits ont lieu. On peut cependant constater qu'après discussion, certains élèves ont changé d'avis et que d'autres conservent la même opinion. Le facteur influent à ce moment étant vraisemblablement du domaine de la crédibilité de tel ou tel élève, de l'effet leader, et non du domaine de la preuve scientifique. Ce qui fait que tel élève, ayant raison au début, peut très bien changer d'avis en se ralliant à l'opinion d'un copain convaincant.

Un autre type de conflit a pu voir le jour, un peu plus tard dans la séquence, au cours d'une discussion dans le groupe-classe, après un travail individuel à l'aide des documents fournis par le professeur (document *Sciences et Vie*). Un conflit cognitif individuel a pu se faire jour, entre la position soutenue par un élève au début de la séquence, affirmant par exemple l'absence de fossiles, et les informations présentes dans le document, comme la présence du *Lexovisaurus* en Normandie et l'absence de fossiles en Seine-et-Marne. La confrontation entre élèves, qui a suivi, a permis de mettre en commun les différentes informations relevées - tous ne voient pas la même chose -, d'exprimer des réactions face aux découvertes, et d'essayer de concilier ce qu'on pensait avant avec les nouvelles connaissances. Ce type de conflit suit une confrontation avec un document, et se situe au niveau d'une structuration des différentes connaissances présentes à ce moment-là chez l'élève.

... rejoignant
le modèle
du débat
scientifique

Le modèle du débat scientifique mis en œuvre ici, est très valorisant pour les élèves, puisqu'il hausse leur opinion au niveau d'une hypothèse scientifique. Non seulement on leur

demande leur avis, mais on le discute, on le confronte à d'autres opinions, ainsi qu'à des documents et des résultats d'expérience. La discussion entre élèves sur le modèle du débat scientifique est très dynamisante. Le travail sur document prend un tout autre sens, il n'apparaît pas comme un exercice scolaire, mais comme un outil au service de cette dynamique.

10 - Le réexamen collectif du cheminement parcouru est l'occasion d'un retour réflexif, à caractère métacognitif ; il aide les élèves à conscientiser les stratégies qu'ils ont mis en œuvre de façon heuristique, et à les stabiliser en procédures disponibles pour de nouvelles situations-problèmes.

les élèves
explicitent
le cheminement
de leurs idées

Il est très intéressant de faire retracer par les élèves le cheminement des idées, pour concrétiser les stratégies mises en œuvre, et les rendre utilisables pour la suite, en les rendant explicites.

"Avant, je ne savais pas que les roches étaient molles. Je l'ai découvert grâce à la pâte à modeler."

"La difficulté pour moi, c'est le fait que la roche est symbolisée par le dur."

On peut penser que si l'élève a pointé que c'est le problème du dur/mou qui lui faisait conclure au modèle de l'empreinte, il ne refera pas la même erreur, et d'autre part il aura à sa disposition un type d'explication à faire fonctionner avec prudence dans d'autres situations.

Ce réexamen apparaît utile autant pour l'enseignant que pour l'élève. Lorsque l'un d'eux affirme : *"Ce qui m'a permis de comprendre, c'est l'expérience avec le sable et le gravier, l'histoire des strates. Grâce à ça j'ai pu découvrir que l'on trouvait des fossiles que dans les terrains sédimentaires."* cela aide l'enseignant à cerner "ce qui marche" pédagogiquement parlant, tout en sachant que ce qui est efficace avec l'un ne l'est pas avec l'autre. Mais la répétition de ce genre d'affirmations augmente les probabilités d'efficacité.

CONCLUSION

la situation-
problème,
ça marche mais
ce n'est pas
une panacée

Les caractéristiques proposées pour définir une situation-problème en biologie semblent performantes, du moins pour cette situation. Il conviendrait de faire de même avec les autres situations que nous avons testées, dans plusieurs classes de collège, d'un même niveau : en Sixième à propos des besoins nutritifs des plantes vertes, en Cinquième de la communication animale (24) et en Troisième de l'immunologie. Une première analyse semble répondre favorablement. Il apparaît donc possible d'élaborer de telles séquences, à différents niveaux d'enseignement au collège, et par rapport à différents concepts scientifiques. Cependant le petit nombre d'essais connus à ce jour commande la prudence. De plus, ce n'est certainement pas le seul dispositif didactique possible, et d'autres situations peuvent être inventées.

les élèves
aiment travailler

La satisfaction des élèves impliqués dans cette forme de travail est spontanément exprimée, et n'est pas due qu'à l'attrait d'une situation nouvelle : *"c'est nous, qui à peu près faisons le cours", "j'étais impatient de savoir la réponse juste", "elle nous donne un but", "c'était un bon sujet"...* On peut cependant rencontrer auprès de certains élèves, le plus souvent ceux qu'on qualifie de "bons élèves", une certaine réticence due à l'insécurité dans laquelle les plonge cette façon de faire. Ils disent préférer un bon cours magistral, ou au moins un guidage net de l'enseignant.

l'enseignant peut
être déstabilisé

Quant aux réactions des enseignants ayant testé ce type de séquences, elles expriment à la fois une satisfaction certaine, en même temps qu'une inquiétude évidente. *"J'étais déstabilisée et ils l'étaient aussi, mais cela s'est atténué au fil des séances. Nous expérimentons ensemble..."*

La plus grosse difficulté pour les enseignants vivant ce type de situations est **l'insécurité** occasionnée. On est très loin du cours, même lorsque les élèves sont actifs, où tout est prévu. Ici il faut faire des hypothèses de cheminement, prévoir des possibilités, des documents qui peut-être ne serviront pas, ou réagir à l'imprévu, vu les circonstances, en trouvant une solution à un cas de figure non envisagé au cours de la préparation.

Le statut du document n'est plus le même : dans un cours traditionnel, il est là avant tout pour permettre à l'enseignant de suivre l'enchaînement construit et prévu par lui avant la séquence, dans un ordre donné. *"L'usage habituel que je faisais de la carte géologique a pris ici une toute autre dimension. Les élèves cherchaient une réponse à la question de Pierre Perret et pas simplement un inventaire d'informations."* L'enseignant ne sait pas ce que les élèves vont extraire du document d'une part, et le chemin de la réponse à la question n'étant ni tracé ni identique pour tous les élèves, il ne peut pas établir de façon certaine le lien entre le problème et le document d'autre part. C'est là toute la difficulté qui consiste à suivre la logique de l'élève plutôt qu'une

un parfum d'aventure

logique préétablie. Cette façon de faire a donc aussi un parfum d'aventure, pour peu qu'on ne soit pas trop insécurisé. On assiste à un changement d'objectif : il ne s'agit plus d'accumuler du savoir factuel, mais de rendre le savoir opérant. Et c'est ce caractère opérant, qui se manifeste dans le constat d'une difficulté, la formulation d'une question, la mise en œuvre d'une expérience, la recherche d'une réponse qui donne sa signification à la situation. Comment passer d'un cours magistral ou dialogué, ou même d'un cours où les élèves sont actifs, mais dans un déroulement prévu par le professeur, à une situation-problème où la logique en œuvre fait une place à celle de l'élève ? C'est un pari intéressant, tenu par un certain nombre de collègues, qui demande encore beaucoup de recherches pour arriver à surmonter tous les obstacles occasionnés par ce changement.

un autre objectif

Marie SAUVAGEOT-SKIBINE
 Attachée linguistique,
 Service culturel de l'Ambassade
 de France au Caire, Égypte

NOTES

- (1) BROUSSEAU Guy. "Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques", in *Recherches en didactique des mathématiques*, 4.2. Grenoble, La pensée sauvage. 1983.
- (2) CHARNAY Roland. "Apprendre (par) la résolution de problèmes", in *N* n° 42. Grenoble, CRDP. 1987.
 ARSAC Gilbert, GERMAIN Gilles, MANTE Michel. *Problème ouvert et situation-problème*. Villeurbanne, IREM, Université "Claude Bernard". 1988.
 ROBARDET Guy. "Enseigner les sciences physiques à partir de situations-problèmes", in *Bulletin de l'Union des physiciens*, 720. 1990.
- (3) DUMAS-CARRÉ Andrée, CAILLOT Michel, MARTINEZ TORREGROSSA Joaquin, GIL PEREZ Daniel. "Deux approches pour modifier les activités de résolution de problèmes en physique dans l'enseignement secondaire : une tentative de synthèse", in *Aster* 8, *Expérimenter, modéliser*. Paris, INRP. 1989.
- (4) LEGRAND Marc. "Débat scientifique en mathématiques et spécificité de l'analyse", in *Repères IREM*, n°10. 1993.
- (5) DEVELAY Michel. *De l'apprentissage à l'enseignement*. Paris, ESF Éditeur. 1992.
- (6) HOST Victor, MARTINAND Jean-Louis (dir.). *Activités d'éveil scientifiques à l'école élémentaire. V. Démarches pédagogiques en initiation physique et technologique*. Paris, INRP, Coll. *Recherches pédagogiques*, 108. 1980. p. 94.
 ASTOLFI Jean-Pierre (dir.). *Éveil scientifique et modes de communication*. Paris, INRP, Coll. *Recherches pédagogiques*, 117. 1983. p. 13.
- (7) *Documents de ressource en didactique des sciences*. Paris, INRP. 1992. (Document interne).
- (8) BACHELARD Gaston. *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin. 1938.
- (9) DEWEY John. "L'intérêt et l'effort" (première publication en 1895), in *L'école et l'enfant*. Neuchâtel, Delachaux et Niestlé. 6ème édition 1962.
- (10) CANGUILHEM Georges. *La formation du concept de réflexe aux XVIIème et XVIIIème siècles*. Paris, Vrin. 1977. p. 122-124.

- (11) DEMOUNEM Régis, GOURLAOUEN Joseph, PÉRILLEUX Éric. *Sciences de la vie et de la Terre, 1ère S*. Paris, Nathan. 1993.
- (12) Propos extraits d'une intervention orale dans un stage de formateurs IUFM.
- (13) GOHAU Gabriel. "Extraits originaux", in *Les sciences de la terre au XVIIème et au XVIIIème siècles*. Paris, Albin-Michel. 1990. p. 94.
- (14) Ibidem p. 50.
- (15) Ce travail a été élaboré au cours d'une formation UNAPEC, puis testé dans la classe de Martine Delrue à Lagny-sur-Marne.
- (16) CLOSETS François de. *Savoir plus*. "La saga des dinosaures". Antenne 2. 1993.
- (17) Ibidem note (7)
- (18) Ibidem note (2)
- (19) DEUNFF Jeannine, LAMEYRE Jean et al. *Contribution à la définition de modèles didactiques pour une approche de la géologie à l'école élémentaire et dans la formation des maîtres*. MEN. Direction des Écoles. 1990. Réédité au CRDP de Poitou-Charentes. 1995.
- (20) SAUVAGEOT-SKIBINE Marie. *Des séquences centrées sur un obstacle*. MAFPEN-CRDP de Bourgogne. 1994.
- (21) ASTOLFI Jean-Pierre, PETERFALVI Brigitte. "Obstacle et construction de situations didactiques en sciences expérimentales", in *Aster 16, Modèles pédagogiques 1*. Paris, INRP. 1993. p. 112.
- (22) Ibidem note (21)
- (23) GOHAU Gabriel. *Histoire de la géologie*. Paris, La Découverte. 1987. p. 67.
- (24) Ibidem note (20) p. 7 à 50.

BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE

FABRE Michel, ORANGE Christian, RIDAO Christian. *Le problème et l'obstacle en didactique des sciences*. Documents du CERSE. Université de Caen. N°60. Octobre 1993.

FABRE Michel. *Didactique IV : Statut et fonction du problème dans l'enseignement des sciences. Les sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*. CERSE. Université de Caen. N° 4/5 1993.

MEIRIEU Philippe. "Guide méthodologique pour l'élaboration d'une situation-problème", in *Apprendre... oui, mais comment ?*. Paris : ESF Éditeur. 3ème édition : 1988.

ORANGE Christian et Denise. "Mise en œuvre d'une situation-problème en géologie", in *Biologie Géologie (Bulletin de l'APBG) n° 3-1993*.

L'AMBIGUÏTÉ DE LA NOTION D'HYBRIDE ET L'OBSTACLE DE L'UTILITÉ

Peny Papadogeorgi

La possibilité de créer des êtres vivants hybrides n'a pas la simplicité évidente de l'empirisme. Initialement la notion d'hybride signifie union contre nature et a un caractère artificiel. Elle ne peut produire des vivants avantageux et justifie plutôt le caractère monstrueux ou stérile des hybrides. Il faut attendre le milieu du XVIIIème siècle pour que les agriculteurs hybrident empiriquement pour améliorer. La génétique décomposera l'hybride en une mosaïque de caractères hétérozygotes. La pratique empirique est expliquée par la science, mais ne constitue que très tardivement une science appliquée. C'est pourtant de cette façon que l'hybridation est présentée dans les manuels scolaires grecs. Les représentations utilitaristes des élèves les induisent à admettre trop facilement la possibilité d'améliorer les animaux et les végétaux.

Le concept d'hybride présente l'intérêt de se situer à l'intersection entre le **savoir pratique** de l'agriculteur et le **savoir théorique** de la biologie. D'un côté, il s'agit d'une notion liée aux pratiques de production de variétés nouvelles chez les animaux domestiques et les végétaux cultivés. Cette notion correspond plus à un "savoir en acte" qu'à l'application d'un savoir théorique. D'ailleurs les pratiques d'hybridation précèdent historiquement leur explication génétique. De l'autre, ce concept s'inscrit dans le cadre de la théorie génétique et il prend le sens par exemple d'un "test-cross" destiné à contrôler si un individu est homozygote ou hétérozygote pour un couple d'allèles donné.

Dans la perspective d'un savoir pratique, la **notion d'amélioration** a un sens. On attache nécessairement une valeur positive ou négative à la variété nouvelle obtenue par hybridation et on apprécie donc son **utilité**. Or Gaston Bachelard dénonce dès 1938 "*l'obstacle de l'utilité*", dans la perspective d'un savoir théorique. "*Toute trace de valorisation est un mauvais signe pour une connaissance qui vise l'objectivité. Une valeur, dans ce domaine, est la marque d'une préférence inconsciente*", et elle risque de faire **obstacle**. Pour un écologiste par exemple, il n'y a pas d'animaux nuisibles ou utiles, mais pour un agriculteur, il y en a, et cela empêche de concevoir le concept de niche écologique. La production d'hybrides à rendement plus élevé ne conduit pas au transformisme et à la théorie de l'évolution.

Pour préciser ces notions nous avons donc réalisé une enquête en histoire des sciences et des techniques agricoles, et analysé leur présentation dans les manuels scolaires grecs de l'enseignement agricole. Mais une enquête auprès

l'obstacle
de l'utilité

une union
contre nature

des élèves est également nécessaire. En effet, parmi les réponses d'élèves grecs à la question "qu'est-ce qu'un hybride ?", on peut obtenir la phrase suivante : "l'hybride est une insulte". Cette réponse pourrait être simplement le fruit du hasard ou d'une incompréhension. C'est oublier que l'étymologie initiale du mot hybride provient du mot grec "hubris", et a le sens d'**union contre nature**, et même le sens fort de viol. Cette image reste donc présente parmi certains élèves au moins. Il faut noter que cette étymologie est presque totalement ignorée en France, mais elle est également très peu connue en Grèce où l'on pense parfois que le mot hybride provient du français ! Il existe donc des représentations à mettre au jour.

Ces trois types d'enquête doivent permettre de préciser le paradoxe de l'enseignement agricole : peut-on étudier dans ce type d'enseignement un concept en dehors de son contexte de valorisation ou de dévalorisation ? L'appréciation du caractère utile ou rentable est-elle nécessairement un obstacle à surmonter ?

1. ÉVOLUTION HISTORIQUE DES PRATIQUES ET DES SAVOIRS

1.1. La maîtrise du vivant

améliorer les
êtres vivants, et
les expliquer

Le mot hybride est actuellement lié au progrès de l'agriculture dans la mesure où il signifie "un bon produit de croisement contrôlé". Pourtant cet "honneur" attribué à l'hybride est plutôt dû au phénomène de **hétérosis** qui est très particulier et souvent mal expliqué. Dans certains cas l'hybride de première génération est d'une plus grande vigueur que chacun des parents. Cette particularité nommée hétérosis nécessite une étude historique qui doit nous conduire loin dans le temps.

Selon François Dagognet, dans l'histoire de la "maîtrise du vivant", deux objectifs sont présents :

- maîtriser le vivant pour le rendre plus utile, et c'est le travail des cultivateurs et des éleveurs,
- maîtriser le vivant pour expliquer la vie, et c'est le travail des naturalistes et plus particulièrement des hybrideurs.

Les documents historiques nous permettent de remonter jusqu'au VI^{ème} siècle, époque à laquelle les Chinois sélectionnaient les graines et obtenaient de nombreuses variétés de plantes de couleurs différentes en partant de plantes sauvages. Jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle, la pratique des croisements est l'apanage des éleveurs et des cultivateurs, dans l'intention d'augmenter la productivité, d'accroître la résistance aux maladies et au gel dans le cas des plantes, de produire des variétés nouvelles. Cette pratique dessine un itinéraire historique qui reste en grande partie indépendant

de la réflexion scientifique et philosophique sur l'hérédité et sur l'évolution des espèces.

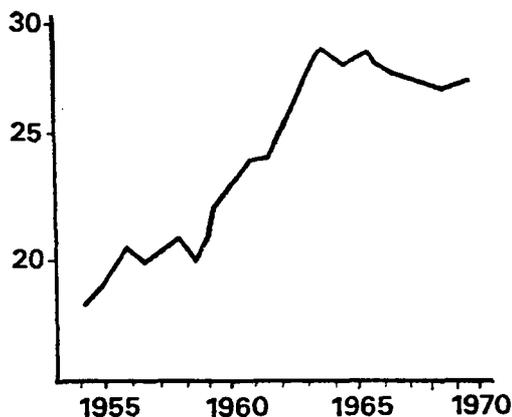
1.2. Hybridation et sélection systématiques

sélectionner
les chevaux

Il faut attendre le XVIIIème siècle pour voir apparaître en Angleterre les premiers efforts méthodiques et systématiques d'amélioration du bétail. On peut citer les éleveurs Gresley et Bakewell qui s'intéressent d'ailleurs aux chevaux de course. Bakewell (1725-1795) fait aussi se reproduire des ovins, et, en sélectionnant dans la descendance les individus ayant des performances améliorées, il donne naissance à des "races pures" pour le caractère considéré. Ce genre de sélection se fait à partir des espèces existantes jusqu'à l'obtention d'un **caractère stable**. (fig.1) Dans la terminologie actuelle, nous dirions qu'un hybride est **hétérozygote** pour certains de ses gènes au moins, c'est-à-dire que les deux allèles qui déterminent un caractère sont différents. Bien évidemment un caractère donné peut dépendre de plusieurs gènes qui ne sont pas tous homozygotes (allèles identiques). Cette explication n'est pas celle du XVIIIème siècle qui reste empirique dans ce domaine.

rendre
homozygotes
certains allèles

Figure 1. Plateau de sélection



Apparition d'un plateau de sélection pour le poids chez la dinde. Au bout d'un certain nombre de cycles de sélection, on observe une tendance à la diminution de la réponse et l'on aboutit à une stabilisation du ou des caractères considérés.

Mais avec le développement de l'agriculture et de l'élevage du bétail, l'Homme adopte de nouvelles relations qualitatives avec la nature. Il produit et crée des êtres vivants qui n'existent pas dans la nature. Il "théorise" son expérience pratique et passe d'une conception empirico-mythologique de la nature à une conception rationnelle. Au XIXème siècle

améliorer
les betteraves
sucrières

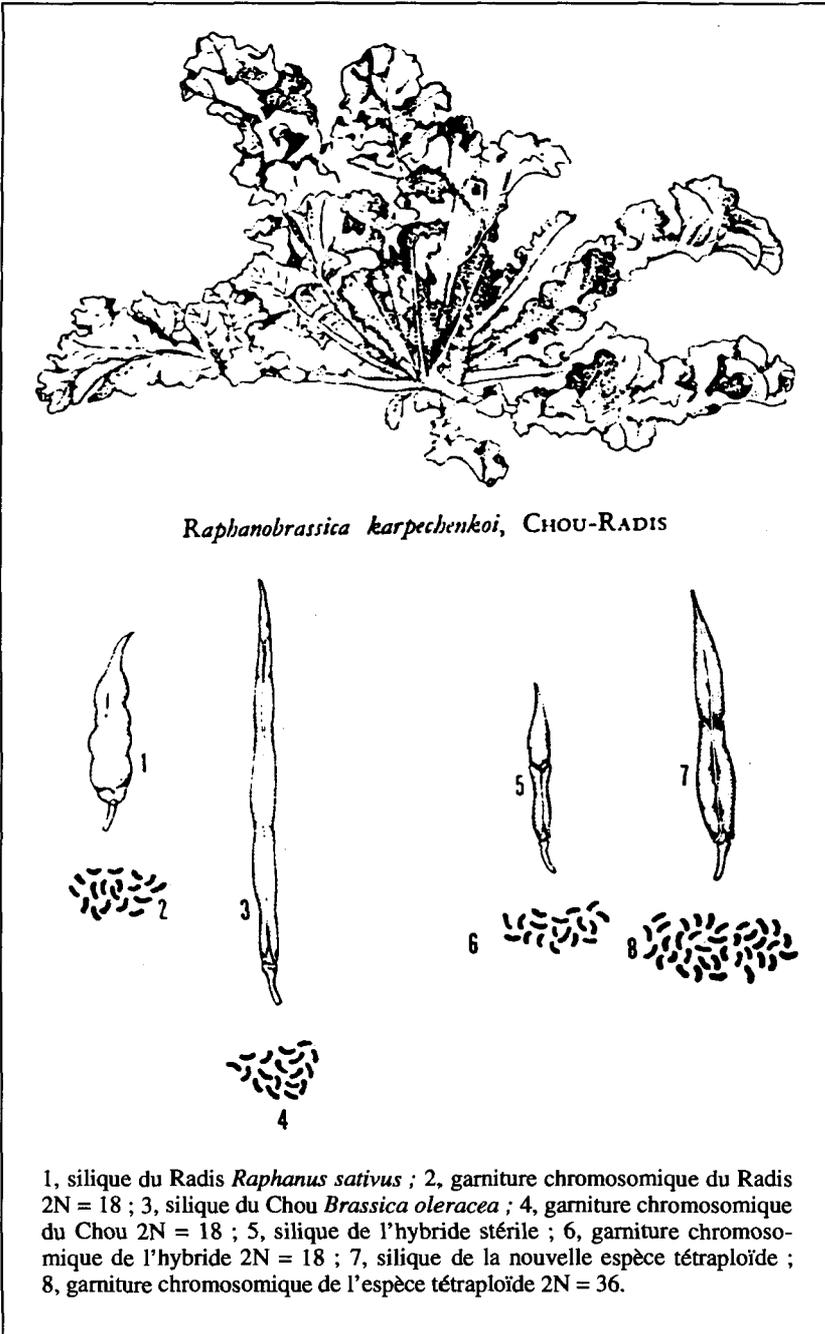
les initiatives pour améliorer, mais également pour expliquer la nature des améliorations deviennent plus nombreuses. En France, Delessert (1812) pratique une amélioration de la betterave à sucre introduite en 1786 par Vilmorin. L'exemple de Delessert est typique d'un genre d'amélioration sans aucun support théorique. Les raisons historiques qui ont conduit à ces recherches sont les suivantes : la petite quantité de sucre qu'on transportait de l'Inde vers l'Europe était employée comme médicament. Apportée en Europe par les Arabes qui inventèrent l'art de cristalliser, la culture de la canne à sucre fut d'abord introduite en Sicile d'où elle fut transportée dans les colonies et les possessions américaines. La France, privée de canne à sucre au temps de Napoléon par le blocus anglais a dû développer réellement la production de sucre de betterave vers le milieu du XIX^{ème} siècle, la sélection ayant fait passer de 8% à 15% la teneur en sucre des racines. Pendant la même période (1822) l'anglais John Goss expérimente des croisements entre variétés de pois à graines vertes et graines jaunes. Serait-ce une coïncidence, Mendel fait les mêmes expériences quelques années plus tard de 1858 à 1865.

Il faut noter que les recherches sur les Légumineuses n'ont pas uniquement un intérêt "théorique" pour les chercheurs. Il s'agit de la nourriture principale du bétail et de l'Homme aussi. À part la facilité de "manipulation", les Légumineuses présentent donc un intérêt économique dans les pratiques quotidiennes d'alimentation. Selon E. Mayr, John Goss (1820) et Alexandre Seton (1824) *"confirmèrent les notions de dominance et de ségrégation et établirent la nature "pure" de ce que nous appellerions aujourd'hui les récessifs"*.

les choux, les
radis, les melons

La différence cruciale entre les hybrideurs d'espèces et les cultivateurs de plantes porte sur le fait que ces derniers étudiaient souvent des caractères individuels, et les suivaient à travers une succession de générations. Ainsi l'agronome français Augustin Sageret (1760-1851) réalise des expériences sur les croisements entre les plantes. En application de cette nouvelle technique, il crée la variété hybride Chou X Radis raifort, Raphanobrassica (fig. 2) Il fait également des études sur les Cucurbitacées et surtout sur le melon. Il a constaté que les hybrides sont plus vigoureux que leurs ascendants et a essayé d'expliquer les "forces" existant chez les végétaux en fonction desquelles les plantes manifestent soit une "tendance primitive" qui les conduit vers la variété initiale, soit une tendance à "multiplier les variétés". On remarque ici les premiers efforts explicatifs concernant la diversité qui se présente dans la deuxième génération des plantes hybrides. Or, puisque l'hypothèse des "particules" portant des caractères héréditaires n'est pas encore émise (il faut attendre Mendel), l'interprétation reste toujours métaphysique, faisant appel à des "forces" inexplicables. *"La plupart de mes expériences, écrit Sageret en 1826, ont été faites avant la lecture des ouvrages de Koelreuther ; [Mendel avait aussi étudié ces travaux] mais le hasard nous avait fait nous*

Figure 2. Création d'une plante tétraploïde
(d'après *Biologie. Coll. Encyclopédie de la Pléiade. Gallimard. p. 1007*).



hétérosis =
vigueur hybride

rencontrer quelquefois sur le même objet, et j'ai été charmé de voir que nous nous accordions... J'ai remarqué cette même tendance à se mêler sur nos melons hybrides ; tous d'ailleurs présentent une végétation vigoureuse, fructifient plus aisément que nos melons ordinaires et produisent des graines nombreuses et fécondes... Accoutumé dès longtemps à voir se former sous mes yeux des hybrides ou variétés, soit que ces mutations fussent dues à mes efforts, soit qu'elles fussent... l'effet du hasard, hasard cependant amené par la réunion de plusieurs espèces et variétés d'une même famille ; j'ai appris, pour ainsi dire, à les deviner."

Sageret constate le phénomène de l'hétérosis (végétation vigoureuse) et attribue cet effet au hasard. Le plus important est qu'il remarque que ces phénomènes se répètent ou reviennent régulièrement et ceci lui permet de pouvoir prévoir les résultats. Aussi peut-il les analyser et les reconnaître. Ceci nous permet de supposer que l'agronome avait établi certaines "lois" ou caractéristiques lui permettant de travailler ainsi.

"M. Vilmorin que j'ai consulté à ce sujet, continue Sageret, se fondant sur plusieurs observations qui lui sont propres et sur celles de plusieurs jardiniers dont il a connaissance, m'a certifié qu'il avait observé de grandes influences sur la production des fleurs doubles et la précocité des plantes selon l'époque du semis et les différents procédés de culture."

Selon J. Piquemal (1965), Sageret publie un article où il pressent l'indépendance des caractères au cours de leur transmission, et entrevoit la notion de "dominance". *"De tels hybrideurs [Sageret, Goss], écrit-il, sont attentifs aux variétés beaucoup plus qu'aux espèces, à la fois parce que les croisements sont alors beaucoup plus faciles, et parce qu'ils s'intéressent généralement à des améliorations de détail."*

l'hybridation, un
levier puissant
pour créer

Un autre expérimentateur, nommé Lecocq, qui a commencé ses travaux vers 1827, constate que pour pratiquer l'hybridation chez les plantes, il faut suivre une méthodologie : stabiliser les caractères, sélectionner, croiser et ensuite greffer pour les reproduire. *"L'hybridation, dit-il, est donc un levier d'une puissance infinie, dont le créateur a permis à l'homme de disposer pour son plaisir."*

Vers 1829, l'expérimentateur Edwards publie une étude sur les caractères physiologiques des races humaines et propose quelques exemples d'expériences réalisées avec des animaux, son but étant de montrer que *"les races différentes d'animaux se croisent suivant la volonté de l'homme... Il forme ainsi un type nouveau, mais intermédiaire... il ne représente ni l'un, ni l'autre."*

Il est évident que, jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, la structure de l'hérédité et surtout son principe explicatif ont échappé aux éleveurs et aux cultivateurs.

Mais, selon O'Neil (1972), ils la comprirent suffisamment pour être capables par sélection artificielle d'éliminer ou de réduire certains caractères qui leur paraissaient indési-

rables, ou au contraire d'en augmenter d'autres qui leur paraissaient souhaitables.

une pratique
sans théorie

Voici un point très important de la recherche historique : les hybrideurs ont été capables de produire les hybrides qu'ils désiraient sans avoir expliqué le phénomène. Ils disposent d'une pratique opératoire sans support théorique et dont ils se font une **représentation fausse**. À la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} Jean-Marc Drouin (1990) peut dire que l'hybridation n'est toujours pas l'application d'un savoir théorique, mais seulement une technique expliquée. Il faudra attendre la génétique mathématique des populations pour que les procédures expérimentales changent et deviennent l'application d'un savoir, et non plus seulement un "savoir en acte".

D'une certaine façon, on peut dire que ce sont des savants tels que Naudin (1863) ou Mendel (1865) qui sont proches des horticulteurs, et non l'inverse.

1.3. Le mot hybride : une notion ambiguë

l'utilité comme
principe
d'explication

L'agriculture n'est pas le seul domaine d'expérimentation et de réflexion dans lequel on peut analyser la problématique de l'hybridation. Si le mot hybride semble naître au XVI^{ème} siècle, la problématique de l'hybridation est bien antérieure et les tentatives d'explication également. Démocrite écrit que le mulet n'est pas un produit de la nature. L'opposition de l'artificiel et du naturel rejoint ce que Gaston Bachelard nomme la pensée préscientifique. Or, selon lui, "*le lien de la connaissance préscientifique et de la connaissance vulgaire est court et fort. Dans tous les phénomènes on cherche l'utilité toute humaine, non seulement pour l'avantage positif qu'elle peut procurer, mais comme principe d'explication*". Dans la vie et l'activité pratique l'Homme utilise des ruses et des artifices quand il ne peut simplement **imiter la nature**, suivant le principe aristotélicien. La construction même du mot hybride conserve cet aspect négatif. En 1596 Hulsius construit le mot "hibride" à partir de deux mots : *ibrida* ou *hibrida* (en latin) qui signifie sang mêlé et *hubris* (*ybris* en grec) qui signifie violence, pour désigner le produit de deux sujets appartenant à des espèces différentes. Cette réunion est "*contre nature*". Et Georges Canguilhem note que "*de l'hybridation à la monstruosité le passage est aisé*". L'inverse de la vie ce n'est pas la mort, mais le monstrueux. La **monstruosité** est l'**anti-nature**, le danger permanent de la reproduction.

Deux représentations viennent donc se heurter dans le mot hybride. L'une **négative** qui correspond au sens originel, et qui demeure puisque l'hybride est mélangé, métis, bâtard, impur. L'autre, **positive** qui recouvre progressivement la première chaque fois que l'hybride est utile, vigoureux, rentable, mais qui ne l'élimine jamais totalement. Ambivalence fondamentale d'une dévalorisation-valorisation.

En France, Valmont de Bomare (1776) donne au mot hybride son écriture actuelle et insiste sur le fait que le mulet ainsi que tous les hybrides à l'état sauvage sont des monstres. C'est ce qui justifie que ces animaux hybrides sont stériles.

créer de
nouvelles
espèces

Au début du XIX^{ème} siècle certains hybridateurs commencent à supposer que l'hybridation permet de **créer de nouvelles espèces**, mais il ne s'agit pas d'évolution au sens où nous l'entendons actuellement. Le fond théorique est proche du lamarckisme. On pourrait parler d'un évolutionnisme sans transformisme (le terme de transformisme désignant initialement la théorie darwinienne). Marcel de Serres (1835) suppose que l'accouplement est possible non seulement entre variétés mais également entre espèces, mais ceci ne se réalise jamais à l'état sauvage. Charles Naudin (1852) admet la possibilité de "*créer dans les espèces telles que la nature nous les fournit, des variétés, des races ou pour mieux dire, de nouvelles espèces artificielles plus directement appropriées à nos besoins*". Il n'y a qu'une différence de degré entre les variétés créées par l'Homme et les espèces naturelles.

Vers 1821 Guillemin dit "*qu'il est probable que beaucoup de plantes dites hybrides sont, ou de véritables espèces, ou des variétés produites par le sol et le climat*". Il faut donc distinguer toutes ces variations et réserver le terme d'hybrides aux seules formes intermédiaires entre deux espèces-mères. Et Landais, en 1836, donne précisément le nom d'hybridation au croisement artificiel et fécond entre deux espèces ou variétés différentes.

le mot hybride
est hybride

Il faut cependant noter que, en littérature, on parle dès 1647 de "mots hybrides" formés de deux ou plusieurs éléments empruntés à des langues différentes. Et d'une certaine façon le mot "*hybride*" lui-même est un hybride de latin et de grec. Cette connotation négative reste ancrée comme le souligne cette phrase de Victor Hugo citée dans l'*Encyclopædia Universalis* : "*L'aspect de cette église, si important qu'il soit, est hybride et discordant*".

1.4. L'apport de Mendel

D'un certain côté, Mendel est proche des horticulteurs, et il intitule ses travaux *Recherches sur les hybrides végétaux*. D'un autre côté, Mendel n'a pas pour but de produire des hybrides, mais d'utiliser les hybrides comme moyen pour comprendre la transmission de certains caractères. D'ailleurs il ne s'intéresse pas à la première génération d'hybrides. On peut trouver *a posteriori* dans son travail les fondements de la génétique et la définition "ouverte" d'un programme de recherche que d'autres réaliseront.

l'hybride est
une mosaïque

L'hybride n'est plus considéré comme un être "*global*" mais comme une "*mosaïque*" de caractères individualisables, qui peuvent se séparer et se recombiner. Du concept global au

concept d'entités individuelles, il y a une révolution bien souvent inaperçue. On retrouve cette confusion sous forme d'un obstacle dans les manuels scolaires et dans la pensée des élèves. Le concept d'hybride change ici totalement de sens et le vocabulaire devra changer également. On désigne **séparément chaque gène** en précisant si les allèles sont hétérozygotes ou homozygotes.

Mendel recherche des régularités, et le grand intérêt historique de sa démarche scientifique consiste dans l'utilisation des mathématiques et de la loi des grands nombres. Il introduit également une symbolique, et réalise des expériences non plus de manière occasionnelle, mais de manière méthodique et systématique. Selon François Jacob cette symbolique a permis un dialogue entre les résultats expérimentaux et la théorie qui dirige les expériences, et prévoit par avance les résultats.

Selon François Dagognet, l'agriculture a traversé deux périodes : celle de l'horticulture, le **temps des jardiniers**, qui usent surtout des capacités de la plante afin de favoriser son essor, sa multiplication par bouturage entre autre ; celle des **interventions productivistes** à grande échelle, de l'industrialisation qui attaque le capital vivant et le transforme pour augmenter la productivité. Même si, en apparence, Mendel reste "*côté jardin*", selon la belle expression de Jean-Marc Drouin, en fait les hybridations intra et interspécifiques s'inscrivent dans le second courant mais comme **un détour**. Le retour aura lieu au début du XXème siècle.

Mendel
côté jardin

1.5. Les pratiques agricoles jusqu'à la découverte de l'ADN en 1953

L'année 1900, les travaux de Mendel sont redécouverts séparément par De Vries, Correns et Tschermak. Mais en fait ils n'ont pas d'application directe immédiate. C'est un autre concept apporté par les travaux de Hugo De Vries qui joue un rôle : celui de mutation. Il travaille sur la plante nommée *Oenothera lamarckiana*, De Vries ne s'est pas assuré qu'il s'agissait d'une lignée pure. Il a, en réalité, utilisé des hybrides. Ainsi ce qu'il croyait être des mutations n'était en réalité que des ségrégations mendéliennes classiques succédant à une génération uniforme d'hybrides.

Les généticiens cherchent cependant à produire artificiellement des **mutations**, et les premières mutations expérimentales sont obtenues par Muller, élève de Morgan, en 1927. Il agit avec des rayons X dans de bonnes conditions de contrôle expérimental et montre une relation de proportionnalité entre la dose de rayons et l'accroissement de mutations obtenues chez les Drosophiles. D'autres travaux confirmeront ces résultats chez les végétaux (maïs, etc.). Ces mutations sont ponctuelles et portent sur un seul gène (couleur des yeux, couleur des graines, etc.), mais elles affectent également des chromosomes entiers. On obtient

les mutants
polyploïdes

des **polyploïdies** (multiplications du nombre des chromosomes par trois, quatre) avec les rayons mais également avec certains produits chimiques (fig. 3). Le mutant peut être hétérozygote, et, d'une certaine façon, l'hybride est cette fois obtenu artificiellement. Mais la définition acquise au niveau des allèles d'un gène n'est pas remise en cause.

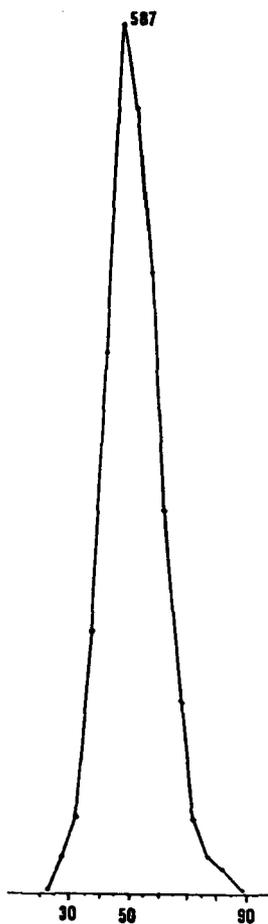
Figure 3. Plantes polyploïdes

Nombre basal b	Progéniteurs	Hybrides allopolyploïdes
12	<i>Nicotiana sylvestris</i> (N = 12) x <i>N. tabacum</i> (N = 24)	2N = 36 allotrip.
8	<i>Prunus domestica</i> (N = 24) x <i>P. cerasifera</i> (N = 8)	2N = 32 allotétrap.
7	<i>Digitalis lutea</i> (N = 28) x <i>D. micrantha</i> (N = 14)	2N = 42 allohexap.
7	<i>Triticum durum</i> (N = 14) x <i>T. vulgare</i> (N = 21)	2N = 35 allopentap.

Les recherches empiriques sur le terrain se poursuivent, mais la sélection de **caractères quantitatifs** (taille, poids) conduit à adopter des méthodes statistiques sur de grands nombres. La variabilité est décrite par les courbes dites de "Gauss-Laplace" (= courbe en cloche) et ces courbes guident les procédés de sélection dans des champs expérimentaux. C'est le statisticien Quetelet qui inaugure ce type de méthode au milieu du XIXème siècle, mais ce sont surtout les travaux du danois Johannsen réalisés sur les variations de poids dans des populations de haricots (fig. 4) qui populariseront ce type de travail. Il faut cependant noter que ce type de génétique reste partiellement indépendant de la génétique mendélienne. Cette dernière n'explique pas la "vigueur hybride" et ne dit pas comment obtenir d'autres sortes d'hybrides. Par ailleurs, l'autofécondation fréquente chez le Pois ou le Haricot s'accompagne d'un effet d'*inbreeding* (= dépression consanguine). Par contre si l'on croise deux lignées "inbred", les descendants ont une vigueur brusquement rétablie. Enfin l'hypothèse mendélienne de la séparation des gènes portés par la même paire de chromosomes ne se vérifie pas toujours aussi favorablement.

la dépression
consanguine

Figure 4. Polygone de fréquence pour le poids de 2 646 graines de Haricot



*En abscisses, le poids des graines ; en ordonnées, leur fréquence ;
587 est le mode de cette population.*

les plantes
allogames

Selon Roupakias (1979), la recherche de caractères qualitatifs se poursuit actuellement essentiellement à partir de **plantes allogames** (fig. 5) chez lesquelles la fécondation est nécessairement croisée (maïs, seigle, tournesol). Mais les hybrides ont des qualités essentiellement dues à la "vigueur hybride", et l'agriculteur doit, chaque année, se procurer les graines produites de manière expérimentale. Les hybrides ne peuvent se conserver tout seuls d'une génération à l'autre.

Figure 5. Types de fécondation chez les plantes cultivées

Principales plantes autogames	
Céréales.....	Blé, orge, avoine, riz, sorgho.
Plantes fourragères.....	Féтуque, vesce.
Plantes de culture industrielle.....	Coton, lin, tabac.
Plantes maraichères et horticoles.....	Pois, arachide, de nombreuses espèces de haricots, soja, laitue, tomate, endive.
Productions fruitières.....	Abricotier, pêcher, oranger, citronnier.
Principales plantes allogames	
Céréales.....	Maïs, seigle.
Plantes fourragères.....	Luzerne, dactyle, trèfle blanc, trèfle violet, ray-grass.
Plantes de culture industrielle.....	Betterave, chanvre, tournesol.
Plantes maraichères et horticoles.....	Artichaut, chou, carotte, céleri, oignon, radis, épinard, fraise, framboise, mûre, asperge, concombre, persil, citrouille.
Productions fruitières.....	Pomme, cerise, vigne, olive, poire, prune, amandier, noisetier, noyer.

1.6. Le génie génétique

Depuis vingt ans, le génie génétique permet d'incorporer directement dans certaines plantes des gènes avantageux pour l'agriculteur. Cette fois la nouvelle plante devrait se nommer non plus un hybride, mais une **chimère**. Les gènes n'appartiennent plus nécessairement à des variétés ou des espèces voisines. Si on reste au niveau de la plante entière le mot hybride n'a plus le même sens, à moins d'admettre une grande polysémie. Disons plutôt qu'il s'agit de "niveaux de formulation" d'un même concept. L'idée commune, le fil directeur étant l'attitude productiviste : créer des plantes artificielles, qui éventuellement n'ont jamais existé dans la nature. La **représentation** de la plante étant celle d'une **mosaïque** dans laquelle les pièces sont interchangeable, dans laquelle on peut ajouter ou retrancher des pièces. Mais cette représentation "mécanique" reste durablement remise en question par la "viguer hybride" qui implique une interaction des gènes, et que seule la recherche empirique permet de découvrir.

la représentation
en mosaïque est
remise en cause

2. DU CÔTÉ DE L'ENSEIGNEMENT

2.1. Le savoir enseigné

Dans l'enseignement grec, le manuel joue un très grand rôle, tant par son utilisation en classe que par le fait qu'il est unique. En outre les manuels ne sont pas souvent renouvelés et, dans une discipline comme la biologie, les connaissances sont assez vite dépassées.

Un examen rapide des textes fait apparaître une présentation théorique du savoir. On explique d'abord les travaux de Mendel et de l'école américaine du début du siècle (Morgan), et l'hybridation est enseignée à la suite. On peut penser, sans que cela soit dit explicitement, que l'un dérive de l'autre. Le savoir théorique "doit précéder" ses applications, telle est la thèse positiviste. Mais ici le lien n'est pas réellement fait, et pour cause, compte tenu des explications précédentes. Par ailleurs les connaissances pratiques ne sont pas développées et le phénomène de l'hétérosis n'est pas évoqué. L'élève peut supposer que la science théorique est au service de l'agriculteur et a amélioré son travail. En fait il s'agit d'une autre science !

le savoir
théorique
précède ses
applications

2.2. Les représentations des élèves

• *Présentation de l'échantillon*

Nous avons réalisé une enquête par questionnaire auprès d'un échantillon d'élèves des lycées techniques grecs (filrière agricole).

L'échantillon choisi pour le questionnaire a les qualités suivantes :

- il représente 11,4 % des lycées (11 sur 94) ;
- il est réparti dans le pays : nord de la Grèce (Macédoine), centre (Thessalie), région d'Athènes (où il y a plusieurs TEL), sud (Péloponèse), grandes îles (Crète) ;
- les régions choisies (à part la région d'Athènes) ont des exploitations agricoles végétales ou animales qui présentent une gamme de production représentative de celle du pays entier ;
- l'échantillon a été choisi au hasard.

un échantillon
des élèves grecs

Nombres d'élèves interrogés	450
Classe de Seconde (Première en France)	235
Classe de Troisième (Terminale en France)	214
Garçons	277
Filles	233
Parents agriculteurs	144

• *Questionnaire*

1. Pourquoi avez-vous choisi la filière agricole ?
 - a. Pour vous occuper de l'agriculture.
 - b. Pour continuer vos études dans ce domaine.

- c. Car vous avez un intérêt général pour l'agriculture.
 - d. Car vous n'aviez pas d'autres choix dans votre école.
 - e. Autre raison : laquelle ? _____
2. Qu'est-ce que vous attendez de l'enseignement agricole ?
- a. Avoir une formation pratique utile en agriculture.
 - b. Avoir des connaissances scientifiques et agricoles indispensables pour continuer vos études.
 - c. Vous expérimenter aux nouvelles techniques agricoles.
 - d. Vous renseigner sur les nouvelles technologies agricoles.
 - e. Avoir une formation générale, comme au lycée, et une formation agricole pratique.
 - f. Obtenir un diplôme qui vous donnera la possibilité de travailler comme technicien dans le domaine de l'agriculture.
 - g. Vous n'attendez rien : pourquoi ? _____
 - h. Vous attendez autre chose : quoi ? _____
3. Que pensez-vous du métier de l'agriculteur ?
- a. C'est un métier traditionnel dans lequel l'expérience empirique joue le plus grand rôle.
 - b. C'est un métier où on a besoin de connaissances scientifiques (ex. physiologie de la plante) ainsi que de connaissances pratiques pour que l'agriculteur puisse prévoir un problème ou s'adapter à une situation imprévue.
 - c. C'est un métier dans lequel on n'a pas besoin de connaissances scientifiques, l'expérience suffit.
 - d. C'est un métier qui doit se moderniser, le futur agriculteur a donc besoin de suivre une formation agricole au lycée ou dans les centres de formation KEGE.
 - e. C'est un métier qui doit se moderniser mais l'agriculteur peut se former tout seul.
 - f. C'est un métier qui donne la possibilité à l'agriculteur d'appliquer de nouvelles idées.
 - g. Vous n'avez pas d'opinion.
 - h. Vous avez une autre opinion. Laquelle ? _____

HYBRIDATION

Répondez à la question 5 ou à la question 6.

- 5. Si vous connaissez déjà, le mot HYBRIDE : Qu'est-ce que c'est, selon vous, un hybride ?
Quelle est l'utilisation des hybrides en agriculture ?
- 6. Si vous ne connaissez pas le mot HYBRIDE : Lisez la feuille publicitaire (fig. 6) et essayez d'expliquer ce qu'est un hybride.

Figure 6. Fragments de publicités grecques pour les hybrides

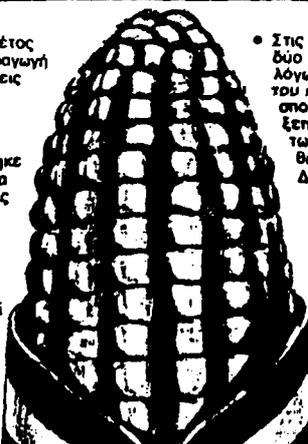
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΥΒΡΙΔΙΟ Και φέτος η παραγωγή καλαμποκιού σε όσες εκτάσεις σπάρθηκαν με το Ελληνικό υβρίδιο ήταν μεγαλύτερη από των άλλων ομοειδών ξένων υβριδίων, κι αυτό γιατί μελετήθηκε και δημιουργήθηκε ειδικά για τις Ελληνικές κλιματολογικές συνθήκες και συγκεκριμένα:

Η παραγωγή του συγκομιδήθηκε με πολύ χαμηλή υγρασία με αποτέλεσμα να μην περάσει ξηρατήριο και οι παραγωγοί να επωφεληθούν τις δαπάνες ξήρασης.

• Στις συνθήκες καύωνα των δύο τελευταίων χρόνων, λόγω του βιολογικού του κύκλου και της μεσοπρώιμης σποράς του ξεπέρασε την καταπόνηση των υπερβολικά μεγάλων θερμοκρασιών. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι ο έχει πλέον καθιερωθεί στη συνείδηση των Ελλήνων καλλιεργητών καλαμποκιού.

ΣΗΜΑΙΝΕΙ:

- Μεγάλη στρεμματική απόδοση
- Δέσιμο της ρόκας μέχρι επάνω
- Αντοχή στο πλάγισμα
- Γρήγορο χάσιμο υγρασίας
- Αντοχή στον καύωνα



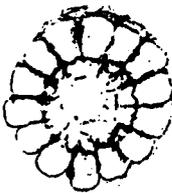


Αγγούρι Ντομάτα

- Μέσο βάρος καρπού 200-250 gr.
- Καρποί με ωραίο, ομοιόμορφο σχήμα και κόκκινο χρώμα, χωρίς πράσινες αποχρώσεις.
- Καρποί γεμάτοι, σφιχτοί, ανθεκτικοί στις μεταφορές.
- Ομοιόμορφο μέγεθος καρπών από σταυρό σε σταυρό και μεταξύ των καρπών του κάθε σταυρού.
- Ανθεκτικότητα σε ίωση (μωσαϊκό), κλαδοσπόριο, φουζάριο
- Φυτό παραγωγικό συνεχούς ανάπτυξης, αραιόφυλλο.

ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΜΕΝΑ ΥΒΡΙΔΙΑ ΚΑΛΑΜΠΟΚΙΟΥ

- ΠΟΛΥ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟ ΣΤΟ ΠΛΑΓΙΣΜΑ
- ΑΝΘΕΚΤΙΚΟ ΣΤΗΝ ΞΗΡΑΣΙΑ
- ΡΟΚΕΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΓΟΝΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΓΕΜΑΤΕΣ



• **Interprétation des réponses des élèves -
Seconde classe de lycée**

Il est intéressant de noter que la plupart des élèves lient le mot hybride à un résultat (meilleur, amélioré, etc.) ou à un individu descendant (plante, animal).

Ceci montre que les élèves cherchent et retiennent du savoir enseigné ce qui est plutôt lié à une utilité pratique et n'articulent pas les notions de génétique au phénomène de l'hybridation.

Nous devons rappeler ici que les élèves de Seconde classe du lycée connaissent l'hybridation par les cours de biologie du collège et par quelques références en Première classe du lycée. Bien que dans les manuels, le contexte soit plutôt théorique, les élèves lient l'hybridation à un résultat pratique.

La publicité, le milieu agricole, ainsi que quelques discussions avec les experts, influencent leurs représentations de l'hybridation mais ils cherchent à utiliser des termes rencontrés dans l'enseignement, par exemple *"hybride est une variété qui se produit par l'union des parents pour avoir un résultat amélioré"*.

En outre, il est intéressant de noter que les mots-clés repérés nous permettent de supposer que la notion d'hybride est très vague dans la pensée des élèves et elle représente en général *"quelque chose de meilleur"*.

Nous pouvons donc confirmer notre idée et dire que l'hybride est conçu comme un produit amélioré qui est "fabriqué" par l'Homme pour ses qualités de résistance, d'adaptation et de productivité. C'est un produit **utile**. Les connaissances les plus développées sont liées à l'agriculture et surtout à la production végétale, car en Grèce la production animale est moins fréquente.

Dans toutes les interprétations qui ont été faites, nous devons prendre en compte que les élèves ont des difficultés d'expression et la réponse "**graine**" ou "**croisement**" ne correspond pas forcément à leur représentation.

Ajoutons quelques remarques concernant la réponse entière.

- La plupart des élèves lient la notion d'hybride à une plante ou une graine. Finalement le résultat est plutôt une plante.

- Ce produit (hybride) est utile, meilleur et sélectionné. Il n'y a qu'un élève qui considère que l'hybride est une erreur.

- L'idée utilitariste ressort toujours de leur réponse.

- Aucun élève n'a fait allusion à la génétique pendant la description de l'hybride.

- La notion d'hybride est liée à l'action de l'Homme et elle n'est pas liée à un phénomène naturel qui existe sans l'intervention de l'Homme.

- L'utilité du produit ressort de chaque réponse.

Les difficultés que nous avons repérées pour la Seconde classe sont liées à des connaissances qui proviennent plutôt

l'hybride a
une utilité

il est le résultat
de l'action
de l'Homme

du milieu et des médias et très peu de l'enseignement. L'enseignement n'a pas agi sur ces difficultés, au contraire il révèle des problèmes secondaires du moment où les élèves essaient tout seuls d'articuler leurs connaissances préalables (fausses ou correctes) avec le savoir fragmenté qui est présenté en classe.

- **Fausse représentation** : l'hybride est un médicament, l'hybride est une espèce, l'hybride est une espèce évoluée, deux graines donnent une troisième, celle de l'hybride, l'hybride est un fait du hasard.

- **Pensée magique** : l'hybride est une insulte, l'hybride est un produit qui résout tous les problèmes, l'hybride est connu en politique.

- **Obstacles liés à l'utilité** : l'hybride sert à l'amélioration.

- **Problèmes d'expression - langage** : hybride (Hybridio) confondu avec aquatique (Hydrovio).

• **Interprétation des réponses des élèves -
Troisième classe de lycée**

Les réponses sont plus complètes qu'en Seconde, c'est-à-dire que les élèves parlent plus explicitement de toute la démarche suivie pour avoir un hybride ainsi que des qualités de ce dernier. Nous remarquons une tendance à lier l'hybride avec le monde végétal.

Nous constatons, pourtant, que bien que les élèves introduisent la génétique dans leur texte, ils introduisent aussi l'utilité pratique du croisement dont le produit est un hybride. Or les connaissances "théoriques" ne facilitent pas cette démarche et cette articulation, et nous arrivons ainsi à avoir des réponses où une partie est bien théorique et explicative, et ensuite nous avons un exemple qui paraît "enfantin" à force de lier tout ceci avec la pratique.

Si nous revenons de nouveau aux textes étudiés dans les manuels scolaires, nous constatons qu'un problème semblable se produit. La pratique n'est pas articulée avec la théorie.

Il est intéressant de noter que quelques élèves arrivent à bien exprimer leur problématique et à articuler les connaissances "théoriques" avec une pratique à exercer. La plupart de ces élèves (60 %) ont des parents agriculteurs ou proviennent d'un milieu où la production agricole est l'occupation principale des habitants, par exemple : TEL de Trikala (Thessalie).

- **Fausse représentation** : l'hybride est le maïs, l'hybride est une variété.

- **Obstacles de l'utilité** : l'hybride est une meilleure plante, l'hybride est utile à l'amélioration des plantes.

- **Problèmes d'expression** : l'hybride est l'union de deux plantes.

Les difficultés qu'on constate chez les élèves de Troisième sont dues surtout à l'enseignement. Nous avons remarqué que les réponses étaient plus "correctes" et plus "globales"

les hybrides
connus sont
surtout des
plantes

en ce qui concerne le contenu. **L'influence de l'enseignement est évidente car le langage utilisé est plus spécialisé que celui des élèves de Seconde.**

CONCLUSION

Le concept d'hybride est au début un concept essentiellement empirique, lié à une pratique guidée par une intention humaine. La sélection-élection d'un produit ayant des qualités avantageuses obéit à une vision globale de l'organisme et marque une confiance dans la possibilité de transmettre ces qualités de manière stable, ou progressivement croissante.

Le savoir mendélien transforme ce concept en apportant une vision en mosaïque de l'organisme, et la nécessité de définir l'hybride au niveau de chaque gène : les allèles sont différents = hétérozygotes. Mais la génétique mendélienne au sens large n'explique pas la vigueur hybride et la dépression consanguine, ou du moins ne propose que des explications très partielles et insuffisantes. Par ailleurs, elle ne permet pas de guider de nouvelles pratiques d'hybridation pour les caractères qualitatifs, et encore moins pour les caractères quantitatifs. C'est pourtant le seul savoir qui est proposé dans les manuels scolaires en raison du fait que Mendel et Morgan pratiquent eux aussi des hybridations. Mais l'intention est très différente.

Cet enseignement théorique n'étant pas susceptible de proposer une véritable explication et encore moins des applications, les représentations initiales des élèves - et en particulier ceux vivant en milieu agricole - risquent de persister. D'autant que, du côté des agriculteurs, les résistances légitimes ou non sont de plusieurs ordres. Le détour théorique ne s'avère pas nécessaire si la production semble satisfaisante. La sélection empirique continue de porter ses fruits, et chacun connaît la prudence avec laquelle une amélioration doit être acceptée, tant les facteurs inconnus sont nombreux, imprévisibles, et la représentation mécanique des vivants inappropriée.

Les apports scientifiques qui concernent les mutations, les polyploïdies (multiplications du nombre de chromosomes), les sélections statistiques de caractères qualitatifs sont réservés aux laboratoires. Seuls les produits finaux peuvent être diffusés auprès des agriculteurs, mais pas les pratiques qui leur ont donné naissance. L'irruption de la génétique moléculaire augmente encore la distance entre la science et l'agriculteur. Peut-être faut-il trouver là une raison de plus à la nécessité de diffuser un savoir scientifique approprié au savoir pratique, et non pas simplement un savoir "plaqué" et inapproprié. Mais, réciproquement, l'amélioration des

plantes et des animaux est un domaine dans lequel l'agriculteur sait bien que la représentation mécaniste de l'organisme, renforcée par les plantes-chimères de la biologie moléculaire, est souvent insuffisante dans la pratique.

Peny PAPADOGEORGI
Lycée Agricole
Athènes (Grèce)

BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G. *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin, 1938.
- CANGUILHEM G. *Études d'histoire et de philosophie des sciences*. Paris, Vrin, 1968.
- COQUIDE E. *Amélioration des plantes cultivées et du bétail*. Paris, Baillière, 1920.
- DAGOGNET F. *Des révolutions vertes*. Paris, Hermann, 1973.
- DAGOGNET F. *La maîtrise du vivant*. Paris, Hachette, 1988.
- DE VRIES H. "Sur la relation entre les caractères des hybrides et ceux de leurs parents" in *Revue Générale de Botanique*, Tome 15. Paris, 1903.
- DROUIN J.-M. "Mendel : côté jardin", in *Éléments d'Histoire des Sciences*. Paris, Bordas, 1990.
- EDWARDS, W.F. *Des caractères physiologiques des races humaines considérés dans leur rapport avec l'histoire*. Paris, 1829.
- GALAIS A. *Théorie de la sélection en amélioration des plantes*. Paris, Masson, 1990.
- GUILLEMIN et DUMAS, *Observations sur l'hybridité des plantes en général*, lu dans la séance du 3 Août 1821, Comptes rendus de l'Académie des Sciences.
- JACOB F. *La logique du vivant*. Paris, Gallimard, 1970.
- LECOQ H. *De la fécondation naturelle et artificielle des végétaux et de l'hybridation*. Paris, Audot, 1845.
- MENDEL G. "Recherches sur les hybrides végétaux traduction" in Armogathe-Blanc et al., *Le cas de Mendel. La traduction des Mémoires sur l'Hybridation*. Centre Interdisciplinaire d'Études de l'Évolution des Idées, des Sciences et Techniques, Orsay, 1984.
- O'NEIL W.M., *Faits et Théories*. Paris, Colin, 1972.

PAPADOGEORGI P. *Problèmes posés par l'articulation entre savoir technique et savoir pratique dans l'enseignement agricole*. Thèse de didactique de la biologie, Université Paris 7, septembre 1993.

PIQUEMAL J. *Aspects de la pensée de Mendel*. Paris, Palais de la Découverte, 1965.

RIVES M. "L'amélioration des plantes" in *La Recherche sur la génétique et l'hérédité*. Paris, Editions du Seuil, La Recherche, 1985.

ROSSIGNOL J.-L. *Génétique*. Paris, Masson, 1985, 3ème édition.

ROUPAKIAS. Notes et interventions à l'Université de Salonique (Grèce), 1979-1980.

SAGERET M. *Mémoire sur les Cucurbitacées, principalement sur le melon, avec des considérations sur la production des hybrides, des variétés, etc.* Paris, 1826.

SAGERET M. *Des fécondations étrangères, spontanées et artificielles et de la production des hybrides, considérées dans leurs rapports avec l'amélioration des fruits*. Journées de Croissances Usuelles et Pratiques, 1840.

TATON R. (direction). *Histoire des Sciences*. Paris, PUF, 1961. 5 tomes.

VILMORIN L. *Notices sur l'amélioration des plantes par le semis et considérations sur l'hérédité des végétaux*. Paris, Librairie Agricole, 1859.

L'ÉLÈVE, UN INTERPRÈTE PROFESSIONNEL

Marc Weisser

Comment la théorie des obstacles épistémologiques de Bachelard se traduit-elle quand on s'intéresse non pas à la création du savoir par le chercheur, mais à sa (re-)découverte par chaque élève ? Nous proposons une lecture des apprentissages en sciences expérimentales à la lumière de la notion d'interprétant, due au sémiologue américain Ch. S. Peirce.

Du décodage des consignes de travail au décodage des phénomènes expérimentaux eux-mêmes, l'apprenant se livre à un intense travail d'interprétation de tous les signes, de tous les messages qu'il perçoit.

L'explicitation des systèmes sous-jacents dans lesquels s'originent ces processus sémiotiques conduit à une approche unifiée s'agissant du traitement de l'erreur et, de façon plus générale, à une réflexion d'ensemble sur la modélisation.

1. DES OBSTACLES ÉPISTÉMOLOGIQUES AUX CHAÎNES D'INTERPRÉTANTS

"Avant tout, il faut prendre conscience du fait que l'expérience nouvelle dit non à l'expérience ancienne, sans cela, de toute évidence, il ne s'agit pas d'une expérience nouvelle."
(Bachelard, 1940, p. 9).

du chercheur
à l'élève

De cette affirmation de la rupture entre savoir présent et savoir à concevoir naît la notion d'obstacle épistémologique qui nous occupe ici. Il nous appartient cependant d'examiner en quelle mesure la réflexion de Bachelard traitant de la constitution du savoir scientifique se transpose dans le cadre scolaire. En effet, Bachelard s'attache à l'évolution de la connaissance d'un paradigme à l'autre, alors que ce qui nous intéresse, c'est sa (re-)découverte par chaque sujet singulier. Deux différences marquantes sont à signaler :

- les élèves disposent de capacités cognitives moins sophistiquées que les chercheurs (leurs savoir-faire méthodologiques sont eux aussi en cours de constitution) ;
- on leur enseigne un corpus préexistant (l'aspect découverte n'existe qu'aux seuls yeux de l'apprenant).

C'est ce dont nous essaierons de tenir compte après un rappel des idées de Bachelard, en essayant de les adapter aux situations d'apprentissage et de les relire à la lumière de la sémiotique de Charles Sanders Peirce.

1.1. Origine et devenir des obstacles épistémologiques

En didactique des sciences moins qu'ailleurs, l'élève ne peut être considéré comme une table rase ; et lors des premières leçons d'électricité au Cycle 3 (voir ci-après), il n'est pas un néophyte en la matière : il n'a pas 8 ou 9 ans, il a l'âge de sa "culture scientifique", qu'elle soit d'origine familiale ou qu'elle résulte d'expériences ou d'observations, de lectures personnelles.

on n'apprend pas qu'à l'école...

Ce premier ensemble de connaissances s'acquiert hors de toute tentative de systématisation, de mise en ordre. Construites à l'occasion d'expériences fortuites, traces de "ce qui a réussi" en réponse à telle ou telle situation de la vie quotidienne, ces connaissances restent transparentes aux yeux du sujet qui les possède. Elles ne présentent aucun caractère conscient, explicite ; elles n'ont pas été abstraites des circonstances de leur émergence, elles **sont** la situation qui les a engendrées. Les relations entre ces informations éparses demeurent fluctuantes.

De par leur aspect évident, les connaissances non-scolaires de l'élève ne sont pas conçues en tant que **représentant** des faits, en tant que signes, mais en tant que la réalité elle-même. C'est le règne de l'univocité et en un sens de l'exhaustivité, de l'adhérence de ce que l'on dit à ce dont on parle.

Ce savoir non-questionné parce que non-questionnable constitue une source première et durable d'obstacles épistémologiques de toutes sortes.

Seule une nouvelle expérience dont la solution n'appartient pas au répertoire usuel entraîne la modification de la structure cognitive initiale. Deux formes se distinguent nettement :

mais seule l'école apprend à apprendre

- soit cette expérience est du type habituel, c'est-à-dire laissée à l'initiative du hasard, individuelle ou du moins concernant des sujets tous immergés dans la situation ;
- soit elle relève d'une décision didactique et alors
 - . ses caractéristiques résultent d'un choix intentionnel,
 - . et ses effets font l'objet d'une évaluation par un sujet, en un certain sens, hors de la situation et disposant d'un savoir d'un niveau supérieur dans ce domaine.

Ce n'est qu'à cette condition que, sous le regard exigeant d'autrui, l'individu se fera apprenant, en d'autres termes construira un savoir explicite et par la suite susceptible d'être décontextualisé, transféré de façon consciente et contrôlable.

Le dépassement de l'obstacle épistémologique résultant d'une connaissance non-questionnée consiste donc en un repentir intellectuel selon Bachelard. Un savoir nouveau prend la place de l'ancien, au bénéfice d'un champ de vali-

dité plus large et en général d'une explicitation accrue de son contenu informatif et de ses modes d'application.

1.2. La question du sens

Les idées de Bachelard sont cependant trop souvent conçues de façon manichéenne : *"il convient de bannir les représentations initiales pour les remplacer par des définitions strictement scientifiques."*

apprendre
"à partir de"

En didactique des sciences, on préfère s'appuyer sur ces préreprésentations : c'est le mode d'apprentissage allostérique préconisé par Giordan et De Vecchi (1987, p. 170). Elles deviennent des points d'ancrage dont il va falloir tenir compte en visant leurs modifications. En effet, l'acquisition de savoirs nouveaux n'est autorisée que par l'existence de possibilités de relations à établir entre ce qui est à apprendre et les idées déjà présentes dans la structure cognitive de l'élève.

Il s'agit donc de savoir comment l'apprenant attribue un sens à ce qu'il perçoit (informations en provenance de la situation expérimentale, du maître, de sources documentaires) en fonction de ce qu'il sait déjà.

Nous proposons pour cela une lecture des actes d'enseignement à travers la sémiotique de Peirce (1978). Pour lui, il existe dans l'esprit du récepteur d'un message une action qui implique la coopération de trois constituants : un signe, son objet, son interprétant (p. 121), action qu'il nomme sémosis. L'interprétant est le signe ou l'ensemble de signes créé chez le destinataire par la perception du signe ou de l'ensemble de signes émis par le locuteur. Cet interprétant représente son objet selon le point de vue, la pertinence au sein de laquelle se situe l'échange en cours.

les chaînes
d'interprétants

Ce qui nous semble éclairant dans cette théorie, c'est qu'elle prévoit que tout interprétant est lui-même un signe, donc interprétable à son tour et ainsi de suite (p. 126). Le discours va de la sorte s'élargissant, se précisant, en déployant l'implicite contenu dans le message-signé initial ; et sa limitation dépend alors des injonctions de l'émetteur perçues dans la situation vécue (consignes magistrales par exemple), mais aussi des possibilités, de la richesse cognitive du récepteur.

Tout interprétant nous apprend ainsi quelque chose de plus que le signe qu'il interprète, à propos de l'objet dont il est question, par un processus de sémosis illimité : *"La communication - à travers un système de commutations continues et en renvoyant d'un signe à l'autre - délimite d'une manière asymptotique - sans jamais y "toucher" - ces unités culturelles qui sont continuellement posées en tant qu'objet de la communication."* (Eco, 1972, p. 67).

Nous assistons par l'expansion de ces chaînes interprétatives à la mise en place de nouvelles relations, à l'interconnexion d'éléments épars contenus dans le champ du savoir

le signe
m'en apprend
toujours un peu
plus que ce que
je savais déjà !

étudié lors d'une séquence didactique. Nous pouvons en particulier avancer l'hypothèse qu'il n'existe plus dans cette optique d'équivalence entre la définition - considérée comme la classe des interprétants "scientifiques" ou rationnels - et le défini et que par conséquent les signes en général ne présentent aucun caractère d'univocité mais correspondent plutôt à un fil directeur **autour** duquel se produit l'échange.

On ne s'étonnera donc pas que nous ne considérons pas les comportements des apprenants selon le paradigme behavioriste en stimulus-réponse, comme résultant de processus de régulation **automatique** (Peirce, 1978, p. 128), mais plutôt en tant que traces observables d'actes mentaux **intelligents** relevant de chaînes sémiotiques plus ou moins étendues selon le sujet.

Comment selon cette pertinence prendre en compte les obstacles épistémologiques ? Quelle que soit leur origine et même s'ils ne sont pas tous équivalents d'un point de vue scientifique, ils vont à chaque fois être traduits en signes (au sens très large : oral, écrit, dessin, ...) par l'apprenant à travers la production d'un interprétant qui les représente.

Cet interprétant pourra alors être considéré et traité par des outils issus de la sémiologie (notions de sous-entendus, de codes, etc.), dans le but toujours de favoriser son chaînage, sa mise en relation avec d'autres informations aussi bien sur le plan intra-personnel qu'inter-personnel dans les moments de débat.

le rhizome :
richesse et
disponibilité
du champ
interprétatif

L'approche sémiologique nous amène par là-même à ne plus concevoir l'acte d'apprendre comme un perpétuel repentir intellectuel, et à préférer à l'image de la rupture et de la ligne brisée celle de la restructuration cognitive et du rhizome : les représentations initiales des élèves et le savoir acquis à la suite d'une séance d'apprentissage ont le même statut aux yeux des apprenants, même si l'on effectue un saut qualitatif ; il n'y a pas de différence de nature entre ces deux types de contenus cognitifs. Du point de vue du sujet parlant engagé dans une démarche d'acquisition, de (co-) production du savoir, le passage d'un état de connaissance à un autre se traduit par l'apparition de nouvelles chaînes signifiantes, d'interprétants inédits pour lui qui en remplacent de plus anciens, de moins sophistiqués. Mais qui appartiennent tous à ce même plan de la communication verbale.

L'apprenant sera par contre entraîné au plan des métaconduites (cf. ci-dessous) à s'habituer à réarranger temporairement un domaine cognitif selon le mode d'approche d'un phénomène, selon la discipline scolaire à laquelle s'intègre la leçon du moment, c'est-à-dire qu'on le mènera à accepter d'avoir présents à l'esprit successivement ou simultanément différents modèles interprétatifs à propos d'un même donné perçu.

Les paliers d'apprentissage préconisés par Giordan et De Vecchi (1987, p. 178) se retrouvent dans l'idée d'interprétants successifs se complexifiant. Ajoutons qu'ils ne sont pas forcément hiérarchisés s'ils appartiennent à des domaines différents du savoir.

1.3. Perception première et codes de reconnaissance

Muni de l'outil sémiologique, nous nous proposons de revenir à l'une des espèces d'obstacles épistémologiques distinguée par Bachelard (1938), à savoir celle représentée par les dangers de la perception première.

L'auteur nous enjoint de lutter contre *"le pittoresque de l'observation première [qui] remplace la connaissance par l'admiration, les idées par les images"* (p. 29), qui *"entraîne l'adhésion à une hypothèse non vérifiée"* (p. 36) du fait de la prégnance perceptive de quelques traits saillants : *"L'esprit doit se former contre la Nature."* (p. 23).

primauté
du perçu ?
primauté de
la signification ?

Interrogeons-nous pour savoir quelle est cette Nature : ce qui s'offre spontanément à nos sens ? Mais qu'est-ce qui est premier : la signification que nous attribuons à un phénomène ou la perception de ce phénomène ? Gardons-nous d'opter trop vite pour le second terme de l'alternative.

Dans son chapitre sur la sémiotique des codes visuels, Eco (1972, pp. 178-179) relève que seuls les aspects pertinents de ce que l'on a sous les yeux sont communiqués et que le dessin d'un cheval par exemple n'aura que très peu de points communs avec l'animal : *"Il existe donc un code iconique qui établit l'équivalence entre un certain signe graphique et un élément pertinent du code de reconnaissance."* C'est ce code de reconnaissance qui constitue la base de toute perception : un système socialisé d'attentes, d'hypothèses de lecture du perceptible. Le pluriel conviendrait mieux encore si l'on souligne que les codes de reconnaissance ne retiennent que les éléments différenciateurs : faire signe, c'est entrer dans un système d'oppositions, système qui varie selon les intentions, les besoins des interlocuteurs, plus encore que selon l'objet décrit.

la perception
comme lecture
orientée

Bachelard insiste sur la distinction entre variété et variation (1938, p. 30), la science ne se préoccupant que de cette dernière. Il nous est possible de compléter cette affirmation en disant que ce qui est variation à une échelle donnée devient variété aux yeux de celui qui recherche une précision plus fine et que par conséquent la perception puis le prélèvement d'informations au sein du perçu découlent d'hypothèses préexistantes, d'un modèle du réel qu'on s'est déjà donné, plus ou moins consciemment. L'homme du Moyen-Âge, influencé par son système d'attentes et sous l'emprise de circonstances favorables, aurait facilement pu "voir" une licorne, *"même si nous, nous pensons qu'il aurait seulement appliqué d'une façon erronée un de ses schémas conceptuels"*

à ce type de champ stimulant qui nous permettrait, à nous, de voir un cerf" (Eco, 1979, p. 170), et au chasseur un dorcors, et au naturaliste un individu mâle de l'espèce *Cervus Elaphus* (ou autre...) : à chacun son angle propre.

Nous ne cherchons pas à dire que l'approche scientifique et celle de la vie quotidienne sont semblables, mais que du point de vue de l'élève elles se valent et sont plus ou moins indifférenciées : la tâche de l'enseignant est de l'aider à mener cette réflexion de catégorisation des domaines de la connaissance, et des méthodes qui leur appartiennent en propre.

La perception n'est donc pas forcément "première", au sens où elle est sous-tendue par une conception du monde préalable. Elle n'est pas, en particulier, achevée quand commence l'interprétation, c'est-à-dire l'attribution d'une signification au perceptible ; nous avançons plutôt l'hypothèse d'un va-et-vient, certains événements étant promus au rang de signes à la suite d'une lecture antérieure et comme recherche de sa confirmation.

Il n'existe à cet égard aux yeux du récepteur (l'élève pour nous) aucune différence entre les messages d'origine sociale, qui sont d'emblée des signes, et les phénomènes naturels, ces derniers ne pouvant être pris en compte par l'esprit humain que si on les considère comme des signes. Toute perception est donc culturelle et s'inscrit étroitement dans un processus sémiotique. À ce titre, si la perception **peut** être chronologiquement première, elle n'est ni naïve, ni spontanée, elle n'est en aucune façon contact direct entre un sujet et la Nature : entre les deux s'insère toujours la médiation de codes socialisés.

Mettre à jour le modèle implicite qui est à l'œuvre chez un élève constitue l'étape initiale, pour le subvertir, le dépasser ensuite, c'est-à-dire pour franchir un obstacle épistémologique ; ce n'est pas qu'un code soit plus "naturel" qu'un autre, mais qu'on se trompe de code pour lire le phénomène. Il est vrai que certains d'entre eux sont plus familiers aux élèves et se présentent alors à eux comme les seuls possibles. À nous de tendre vers une plus grande diversité de ces codes, vers une prise de conscience de leur existence et enfin vers leur analyse plus précise : si l'attitude scientifique pousse l'élève à dégager la structure profonde commune à une classe de phénomènes par induction, le même élève a tout autant le droit, et même le devoir..., en séance d'expression écrite ou d'arts plastiques, d'être sensible au pittoresque, à l'exceptionnel.

Nous aimerions en résumé retenir que la construction du sens attribué à un phénomène ne s'opère pas seulement à partir du perçu mais aussi à partir de la structure cognitive du récepteur et ce à double titre :

les signes :
événements
sociaux ou
phénomènes
naturels

à chaque
intention
son code

- apport de contenus supplémentaires mémorisés qui confirment ou infirment les informations perçues ;
- apport d'un cadre intellectuel, d'un bornage de l'espace perceptible, d'une méthode d'organisation du perçu et des inférences qu'on en tire à partir d'un système d'attentes.

Le travail de l'enseignant consiste dès lors à repérer les codes implicites à l'œuvre chez l'élève, qui engendrent une interprétation erronée du phénomène, c'est-à-dire une interprétation qui n'est pas celle attendue par la pertinence dans laquelle on se place :

productions
absurdes,
productions
incomplètes

- soit parce que le code utilisé n'est pas le bon et débouche sur une production absurde, hors-sujet ;
- soit parce que, tout en ayant été choisi à bon escient, le code est imparfait, trop peu performant et mène alors à un résultat incomplet, d'un niveau conceptuel trop faible.

2. ILLUSTRATION : L'INTRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ AU CM1

Les analyses de séquences didactiques traitant de cette partie du programme de l'école élémentaire sont parmi les plus nombreuses (voir par exemple Sarrasin et Genzling, 1988, pp. 103-119 ; Astolfi, 1992, p. 78 et suite ; Johsua et Dupin, 1993, pp. 230-234 et pp. 316-320) ; nous aimerions juste en donner une interprétation dans le cadre défini ci-dessus.

2.1. Dépouillement des travaux

Nous avons mené la succession d'activités suivante dans un CM1 de 28 élèves (trois leçons : phases 1 et 2 ; phases 3 et 4 ; phase 5).

les consignes
initiales

1. Avant toute manipulation :
"Vous allez disposer d'une pile, de fils et d'une ampoule : dessinez le montage permettant d'allumer l'ampoule. Expliquez en quelques phrases."
2. Après réalisation de ce premier montage :
"Dessinez le montage que vous avez effectivement construit. Expliquez les ressemblances et les différences avec le premier dessin."
3. Avant réalisation du second montage :
"Que se passe-t-il dans les deux fils entre la pile et l'ampoule pour que l'ampoule s'allume ? Décrivez-le en quelques phrases puis représentez-le sur un dessin."
4. Après réalisation du second montage faisant appel successivement à un moteur, un buzzer et une DEL, trois composants mettant en évidence que le courant a un sens : mêmes consignes que ci-dessus en 3.
5. Troisième séquence, consacrée exclusivement à la production écrite / dessinée et au débat :

"Tu dois expliquer à un élève du CP ce qui se passe dans les fils électriques. Imagine une description facile à comprendre : l'électricité entre la pile et l'ampoule, c'est comme..."

(Cette dernière séquence sera analysée en conclusion de l'article.)

• Travaux 1 et 2

- Treize élèves proposent un montage exact dès leur première production, donc avant toute manipulation et s'en rendent compte puisque par la suite ils déclarent n'avoir rien à modifier pour le deuxième dessin.

- Les quinze autres se rallient à la solution exacte lors de la deuxième phase.

Voyons leurs erreurs initiales.

- Deux élèves : *"il faut absolument coincer les fils sous chaque languette"* : amélioration technique ou nécessité scientifique ?
- Quatre élèves : *"les deux fils doivent entrer en contact"* : des adeptes du court-circuit...
- Deux élèves : *"un seul fil sur une seule des languettes de la pile suffit"*.
- Un élève : *"les deux fils touchent la même languette"*.
- Trois élèves : *"les fils sont en contact avec le corps, voire avec l'intérieur de la pile, pas avec les languettes"*.
- Un élève : *"les languettes sont des leviers, les abaisser pour "tirer" du courant, les relever pour l'arrêter"*.
- Un élève : *"la pile s'insère dans le boîtier de la lampe ("celle qui est suspendue au plafond de ma cuisine" !) et permet le passage du courant domestique"*.
- Un élève : *"ça ne marche que si l'on dispose d'une lampe de poche"*.

• Travaux 3 et 4

- Deux élèves proposent l'idée d'un circuit orienté, dès la production n°3.

- Trois élèves ne se prononcent pas sur ce qui se passe dans les fils, ni en 3, ni même en 4.

- Vingt-trois élèves commencent par privilégier l'hypothèse des courants antagonistes ; dix d'entre eux se rallient ensuite à l'idée d'une circulation continue d'un courant unique, quatre autres campent sur leurs positions, six autres ne proposent plus d'explication lors du travail n°4, ils ont été rendus perplexes par leurs expériences..., et les trois derniers pensent qu'il s'agit d'un problème de couleur de fils exclusivement.

2.2. Analyse de quelques cas

Quelle est, dans le cadre de la didactique des sciences expérimentales, l'utilité de la notion d'interprétant au sens de Peirce ? Nous dirons qu'elle a une vertu unificatrice, en ce

les productions
écrites : piles et
ampoules

les productions
écrites : le circuit

l'interprétant :
une notion
unificatrice

qu'elle permet de prévoir et de lire à la fois des erreurs résultant d'une mauvaise prise en compte de la coutume didactique propre à la classe, et des erreurs qui s'originent au contraire dans une compréhension du concept étudié marquée par un niveau inférieur à celui qu'exige la situation expérimentale.

Quelles que soient les causes de l'erreur, le comportement de l'apprenant reste inchangé : à l'aide d'un code qu'il se donne, il organise sa perception des phénomènes. Dans la première optique, le problème se situe au plan de la consigne ; dans la seconde, à celui des supports à proprement parler. Le code à travers lequel le perceptible est pris en compte contient déjà en germe la structuration future du savoir produit par l'apprenant. Ainsi, dans une perspective de remédiation, il convient d'agir autant sur ces facteurs préexistants de bornage et de mise en forme de l'espace-problème, que sur le donné lui-même.

• *Interprétations erronées des consignes*

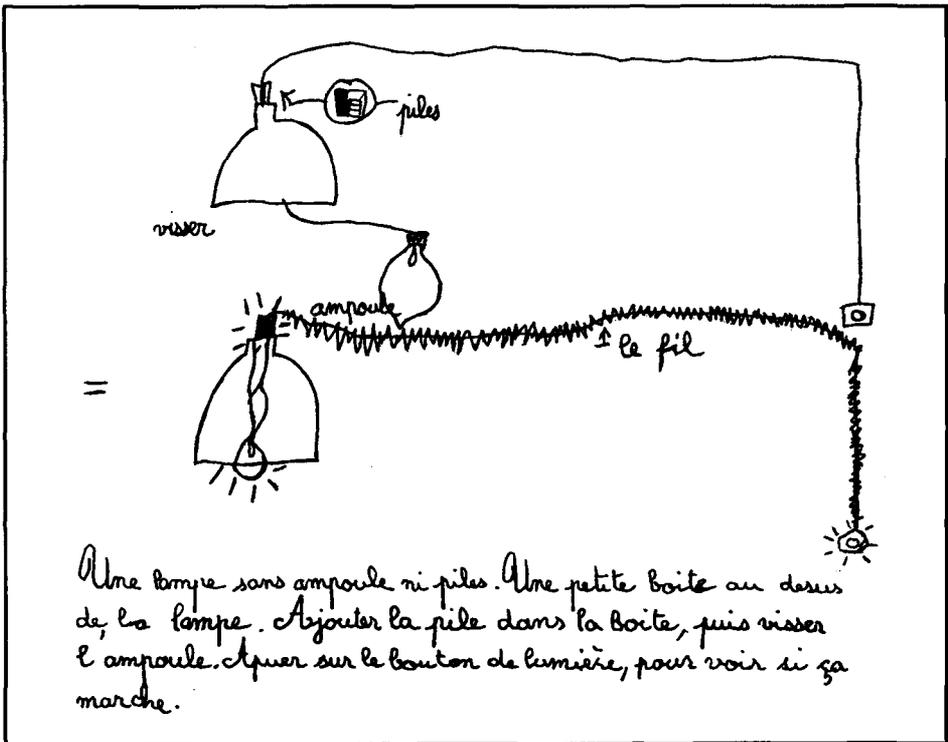
détournement
des consignes
initiales

Revenons sur les deux élèves qui faisaient intervenir des objets domestiques lors du travail n°1 (dessin préalable du circuit pile-ampoule) : l'un parlait d'une lampe de poche, l'autre de la lampe de sa cuisine, ustensiles indispensables selon eux pour justifier l'utilisation de la pile et de l'ampoule (cf. documents 1 et 2). Ce sont les seuls qui ont "importé" des éléments supplémentaires, soupçonnant l'enseignant de leur tendre quelque piège en ne leur fournissant pas tout le matériel nécessaire. C'est une interprétation inappropriée du contrat didactique qui les a induits en erreur. On pourrait y retrouver l'une des maximes conversationnelles de Grice (1979, p. 61) - "*Que votre contribution contienne autant d'informations qu'il est requis, ni plus, ni moins.*" - qui aurait été enfreinte par le maître et rétablie implicitement au niveau des sous-entendus par ces deux élèves. Car il s'agit bel et bien d'une modification de la consigne initiale : le matériel décrit dans les instructions (cf. phase 1) est jugé insuffisant, l'énoncé magistral est considéré comme sciemment incomplet. Tout se passe au niveau de l'échange verbal, le message à visée didactique étant décodé puis critiqué : l'apprenant pense devoir remédier aux lacunes qu'il a cru constater par un apport d'informations puisées dans un registre extra-scolaire.

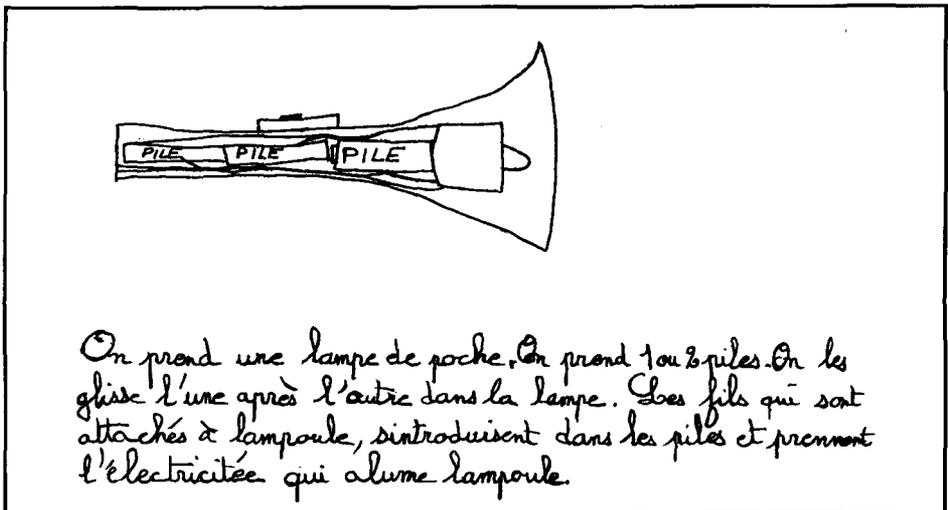
les rôles de
l'apprenant

Nous observons là une interprétation déplacée de la situation d'apprentissage par le biais des us et coutumes de la classe. Un élève lit un phénomène (scientifique) qu'on lui demande d'imaginer (travail n°1) ou qui s'est produit devant lui (travail n°2)

- soit comme un phénomène naturel, familier s'il se voit plutôt dans son rôle d'enfant, d'individu, et alors il fait appel à un **code** que nous pourrions baptiser "vie quotidienne" (cas décrits ci-dessus) ;



Document 1



Document 2

- soit comme un phénomène scientifique s'il joue son rôle d'élève, et alors il structurera sa réflexion selon d'autres **règles**, propres à l'institution scolaire puis de façon plus précise aux sciences expérimentales (schémas annotés, enchaînements logiques et / ou chronologiques) (cas "normaux").

Selon l'optique retenue, il interprétera son observation à partir de ses habitudes familiales, sociales, ou bien en s'appuyant sur ses savoirs déclaratifs et procéduraux antérieurs.

Aux yeux de la personne qu'est chaque écolier, ces différents codes d'interprétation puis les différents interprétants qui y sont prélevés ont même valeur d'adéquation (par rapport à la situation) et d'exactitude (par rapport au savoir).

• *Interprétations erronées des contenus*

Venons-en maintenant au groupe le plus important numériquement, celui des élèves qui se sont contentés du matériel imposé par l'enseignant et qui y ont réfléchi individuellement.

Les problèmes que posent leurs comptes-rendus se scindent en deux familles : les problèmes "techniques" et les problèmes "scientifiques".

Nous appelons techniques les problèmes rencontrés par les élèves qui ont choisi de retenir et de traduire sur leurs schémas des éléments qui n'ont pas d'"importance", le savoir à construire interférant dès lors avec des aspects négligeables des dispositifs expérimentaux. On pensera bien sûr tout de suite au pittoresque contre lequel Bachelard nous a mis en garde. À quoi ces élèves ont-ils été attentifs, avec quelles préoccupations ont-ils lu les montages ?

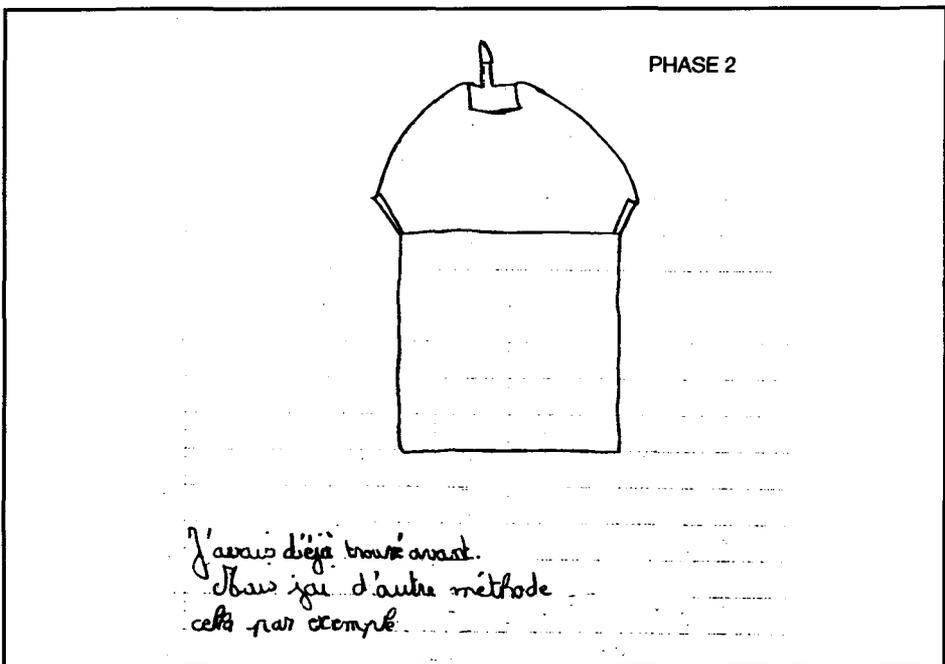
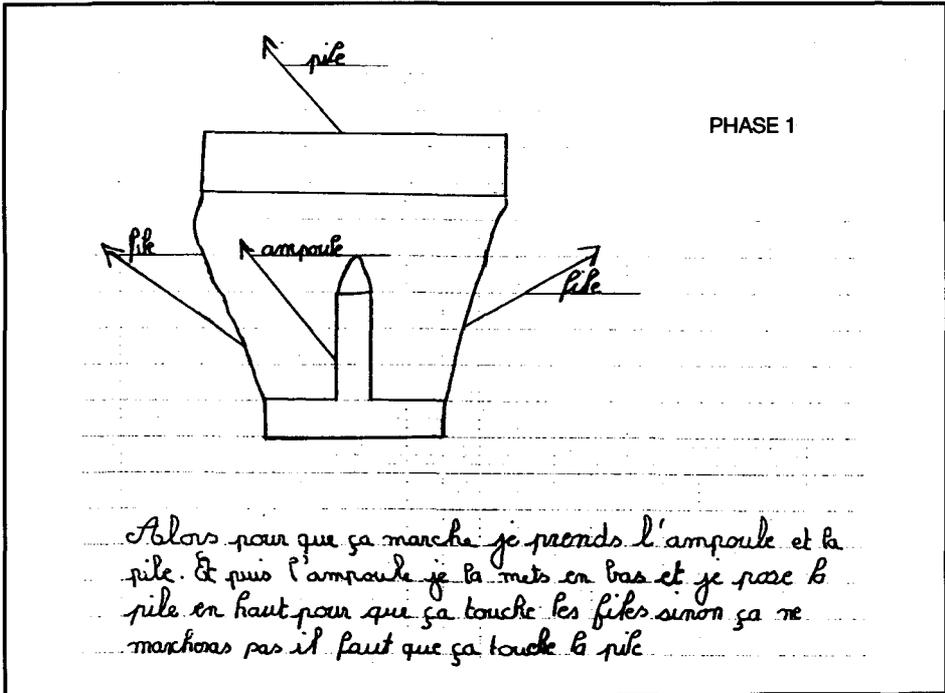
Certains ont représenté la couleur et la marque de la pile, d'autres ont précisé qu'il convenait de détacher tout d'abord le papier qui protégeait les languettes. Un autre a souligné qu'en entortillant les fils autour des languettes, le montage était plus solide. Un autre a trouvé (travail n°2) deux solutions pour allumer l'ampoule : avec la pile placée au-dessus d'elle, avec la pile placée en-dessous d'elle (cf. document 3)...

Ce qui empêche ici l'abstraction et qui, dans le dernier cas, introduit une distinction qui n'a pas lieu d'être, ressemble fort à un obstacle épistémologique dû à une explication par l'utilité (Bachelard, 1938, pp. 19 et suite) : tout ce que je perçois (couleur et marque de la pile, protection de papier, malléabilité des fils) doit forcément être utile, je dois obligatoirement l'inclure à mon compte-rendu. Quelques expérimentations complémentaires (piles de marques différentes...), quelques comparaisons inter-individuelles (les différentes façons de fixer les fils aux languettes) permettront de surmonter ces difficultés et de pousser plus avant la schématisation.

Par contre, la question des fils reliant la pile à l'ampoule nous semble plus intéressante : n'importe quelle mise en

tout le perçu
ne doit pas
faire sens

quantité des
exemples et
abstraction



situation de recherche apporte des informations aux élèves, informations confirmées dans leur valeur en ce que c'est le maître lui-même qui a organisé la séquence. S'il donne deux fils, c'est qu'il en faut deux, s'il donne un fil bleu et un fil rouge, c'est que les couleurs sont importantes ! Même les faits surnuméraires ont voix au chapitre.

Ce dernier problème va nous permettre d'aborder la partie "scientifique" par un retour à la notion de code : *"Le code représente un système de probabilité qui se superpose à l'équiprobabilité du système au départ pour le maîtriser (sous l'angle de la communication)." (Eco, 1972, p. 48).* Autrement dit : la couleur des fils me communique-t-elle quelque chose ? Ce phénomène perceptible visuellement est-il un signe régi par un code ou ne relève-t-il que d'une distribution aléatoire opérée par l'enseignant ?

Lors de la première séquence (travaux n°1 et n°2), aucune question de ce genre n'a été posée, les fils, récupérés sur un gros câble téléphonique, ayant toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Mais après l'utilisation du buzzer (fils noir et rouge à relier impérativement au bon pôle de la pile), les interprétants fantaisistes ont fleuri *a posteriori*, les élèves soupçonnant désormais tous les isolants de correspondre à un code chromatique : l'obstacle épistémologique s'est cristallisé sur une connaissance neuve par généralisation abusive (explication par l'unité, non pas ici de la Nature, mais des codes sociaux).

Quelques exemples :

- chaque couleur correspond à une "puissance" déterminée (interprétation qu'il faudra d'abord combattre à propos des fils, puis rebâtir à propos des résistors) ;
- selon sa couleur, le fil ne peut qu'envoyer l'électricité vers l'ampoule, ou ne peut que l'absorber.

Une confusion s'établit entre les propriétés du fil lui-même (en fait, un conducteur de résistance négligeable) et celles dont son revêtement isolant n'est que l'indice (car relié à telle ou telle borne de la DEL ou du buzzer qui, elle, possède en propre une caractéristique dépendant du sens du courant). Lors d'un passage à la schématisation électrique normalisée, il conviendra dès lors de s'abstraire non seulement de la couleur des fils, mais qui plus est, des fils eux-mêmes : de la prise en compte des artifices techniques (couleur, longueur, malléabilité, jonction au moyen de dominos,...) à la théorisation scientifique d'un circuit électrique ; ou encore, du codage technique (le rouge sur le pôle positif, le bicolore à la terre,...) au codage scientifique (tous les nœuds du circuit sont à angle droit, etc.).

Nous avons ainsi vu sur quelques exemples comment les élèves traduisent les obstacles épistémologiques bloquant leur apprentissage en dessins, en textes, à travers les interprétations variées qu'ils donnent d'un même phénomène. Ces freins à l'acquisition de connaissances scientifiques

une expérience
génératrice
d'obstacles

à chaque
intention
son type de
représentation

les dangers de
la catachrèse

trouvent leur origine dans l'expérience quotidienne mais également dans des savoirs précédemment construits à l'école. Cette dernière remarque nous conduit à relativiser les acquis scolaires : ils ne sont vrais que temporairement et localement et doivent rester susceptibles de modifications ; ce n'est pas la parole du maître mais l'esprit critique de l'élève qui devrait être gage de leur adéquation à décrire une situation nouvelle. Ce trait se retrouve dans la démarche du chercheur : toute connaissance ancienne non questionnée se mue en obstacle potentiel. Eco signale, par exemple, le cas du **rayon** lumineux, dénomination tout à fait acceptable dans le cadre de la géométrie euclidienne mais qui ne saurait rendre compte des propriétés de la lumière en tant que phénomène quantique ou ondulatoire (1972, p. 180) ; le travail scolaire, de par sa visée de systématisation, consiste alors en une modification patiente du profil épistémologique d'un tel phénomène pour y inclure progressivement (pas à l'école primaire...) les traits les plus caractéristiques de la science contemporaine, par une réorganisation progressive, par paliers, de la définition même de ce qu'est la lumière (ou l'électricité, ou la vie, etc.).

Une fois encore, ce n'est pas l'image de ruptures radicales que nous rencontrons, mais celle d'une modification pas à pas d'un savoir que l'on accepte de remettre en cause, du niveau le plus bas (préreprésentations issues de l'expérience quotidienne) à celui atteint actuellement par la recherche, tout en sachant que ces strates coexistent et que selon les circonstances, l'individu aura recours à un palier différent pour résoudre le problème qui se pose à lui.

3. DIDACTIQUE DE L'INTERPRÉTATION

La tâche de l'enseignant est dans ce cadre d'aider l'élève à conférer un sens acceptable, le plus exact possible scientifiquement parlant, aux messages qu'il perçoit en situation d'apprentissage, que ces messages soient verbaux (consignes, informations documentaires : des ensembles de signes socialisés) ou qu'ils résultent de phénomènes traduits en observations ou en mesures (lecture d'expériences, description de faits fortuits : les événements considérés comme signes).

3.1. Le métier d'élève

la coutume

De nombreuses études ont contribué à rendre les enseignants attentifs au contrat didactique fabriqué implicitement par le cursus scolaire ; nous lui avons quant à nous préféré le terme de coutume (cf. Balacheff, 1988).

Cet ensemble de connaissances qu'acquiert petit à petit l'élève lui sont des aides qui interviennent dans l'interprétation des consignes magistrales : qu'est-ce qu'on attend exac-

tement de moi ? Qu'est-ce que j'ai le droit d'écrire : ce qui est vrai et prouvé ? mes hypothèses et les questions que je me pose ? (cf. Astolfi, 1991, p. 180)

Les réponses à ces interrogations sont même susceptibles de varier selon la matière enseignée : nous avons vu plus haut que l'attention donnée au pittoresque, au superficiel est parfois légitime, parfois à bannir.

à quel moment
passer à la
production
de signes ?

C'est au premier chef le statut de l'erreur qui est en cause, à travers celui de l'écrit : les textes ne sont-ils que prétextes à évaluation ? Ou peuvent-ils au contraire servir de support, de trace à une réflexion en marche ? Essais de codage/décodage, ou témoins d'une perfection finale ?

Le remède à ces hésitations est à trouver tout d'abord dans une explicitation du contrat didactique : selon le moment de la séquence, selon la phase de la situation-problème, déterminer clairement les critères de recevabilité des traces écrites des élèves.

l'expérience
entre rhétorique
et preuve

Il convient ensuite d'indiquer à l'apprenant, ou encore de lister avec lui les endroits où il peut et doit prélever des informations : ressources documentaires, montages expérimentaux, etc., et non dans les intentions supposées de son maître ou dans les attentes de ses proches. Si non, en cas de désaccord entre l'opinion de l'élève et les résultats de l'expérience, cette dernière va être jugée mauvaise, fautive, au lieu de conduire à une remise en question des savoirs anciens. L'expérience ne figurerait plus alors qu'un argument rhétorique parmi d'autres et ferait basculer la leçon de science dans un débat où l'adhésion de la majorité tiendrait lieu d'administration de la preuve.

3.2. Le statut du savoir produit

Les notions d'interprétation et de chaînes d'interprétants nous permettent de postuler l'existence de connaissances diverses aussi bien par leur niveau de formulation que par leur orientation à propos d'une même situation au sein d'une même classe. C'est d'ailleurs ce que confirme l'expérience courante des enseignants : ce n'est pas parce qu'ils sont soumis à un flux identique d'informations que les élèves réagissent de la même façon. Il convient dès lors de faire émerger ces différents contenus en les amenant à la conscience de chaque sujet et en les transformant en signes communicables, par le dessin ou par les mots, à l'écrit de préférence pour pouvoir y revenir plus tard.

La confrontation qui s'ensuit a pour but essentiel d'affiner le questionnement pour déboucher sur cette "intention de mesurer" chère à Bachelard.

la validité de
l'expérience

La conduite de l'expérimentation scientifique avec de jeunes enfants pose des problèmes certains : leur seul esprit critique ne suffit pas toujours à valider les résultats. L'enseignant peut alors en cas de nécessité se porter garant de l'exactitude de l'expérience, et de cela seul, tant au plan de la méthode que des résultats, en sachant que dans ce

science ou
pédagogie ?

cas on passe d'une attitude strictement scientifique à une attitude pédagogique, une partie du travail (la phase de contrôle ici) étant prise en charge par l'adulte.

C'est peut-être à ce prix épistémologique que l'élève pourra renoncer à remettre en cause le dispositif expérimental plutôt que son savoir initial. Mais le danger subsiste de ralliements peu convaincus à la conception majoritaire lors de la phase d'institutionnalisation : c'est le lot de la pédagogie du conflit socio-cognitif dont l'efficacité n'est pas pour autant niée. Seul un travail métacognitif portant sur un ensemble de séquences complètes permettra *a posteriori* de dégager les différentes phases d'une démarche scientifique et de préciser les critères de validité du savoir qui y circule.

On passera ainsi progressivement du réalisme naïf au positivisme puis au rationalisme. Ce cheminement nous semble obligatoire pour deux raisons :

- à leur entrée en classe, les élèves sont déjà des "savants" à leur manière, dont on ne peut pas se permettre d'ignorer purement et simplement les connaissances ;
- aller directement au palier du rationalisme reviendrait à se priver d'appuis, à se couper des questions à poser : on n'enseignerait plus que des réponses.

Tant que l'on concevait l'apprentissage du savoir scientifique comme l'acquisition de la définition unique et univoque correspondant à chaque concept, la situation didactique semblait simple.

Mais si désormais la définition est remplacée par la notion d'interprétant, lui-même interprétable à son tour, tout se complique. Le savoir construit se relativise, sa durée de vie et son espace de validité doivent être précisés, ce qui légitime l'existence d'acquis de différents niveaux (possibilités de l'élève) et participant de différents domaines disciplinaires (intentions de l'élève), et qui rapproche le savoir scolaire du savoir savant : il n'est plus absolu, il n'est plus figé. On évite ainsi la constitution d'obstacles épistémologiques d'origine didactique à partir de savoirs non-questionnables. Mais au prix d'une insécurisation de l'élève par perte de repères fixes : plus rien n'est absolument sûr... L'atmosphère de la classe, par le truchement de l'explicitation du contrat didactique, atténuera cette anxiété.

la relativité
du savoir est
anxiogène

Chaque apprenant bâtit de la sorte son propre système d'intercompréhension, modulé par l'épistémè de son époque et de son groupe social, en le réorganisant et en l'enrichissant sans cesse, au niveau tant des connexions que des contenus à proprement parler, en d'autres termes en développant des chaînes d'interprétants toujours plus nombreuses et plus fournies à propos d'un même objet.

Le caractère individuel de la structure cognitive n'empêche pas que ce savoir et ces relations constituent la base de la communication, à visée scientifique dans le cas qui nous

les langages
comme outils
de médiation

occupe, mais de façon plus large aussi, à travers la médiation par le (les) langage(s).

Voyons, à titre d'illustration et pour conclure, le travail n°5 mené par notre classe à propos des analogies qui peuvent être conçues à partir d'un circuit électrique élémentaire.

3.3. Métacognition et modélisation

la ronde
(modèle 1)

Sarrasin et Genzling (1988, p. 109) proposent la méthode du mime analogique : le déplacement du courant électrique est représenté par une chaîne constituée par les élèves et le maître, placés en cercle, se tenant, bras tendus, par les épaules. Le maître est la pile, qui imprime le mouvement ; la DEL serait un élève placé tantôt dans le même sens, tantôt en opposition, etc.

Nous avons quant à nous demandé tout d'abord un travail écrit individuel aux élèves, puis nous en avons critiqué et enrichi quelques-uns collectivement.

Il s'agissait donc de présenter une analogie dans le but d'expliquer le circuit électrique à un élève plus jeune.

• *Premier cas retenu*

- Modèle individuel : la pile donne de l'énergie à l'ampoule comme la station service à la voiture.

- Résumé du débat collectif

. L'électricité est représentée par la voiture : toutes deux circulent ; la route remplace les fils électriques.

. Une voie à sens interdit figure la DEL, d'autant plus qu'on peut y circuler dans l'autre sens !

. Une ampoule pourrait s'allumer au bord de la route à chaque passage de la voiture.

. Mais dans le circuit électrique, l'ampoule reste toujours allumée ; il faudrait donc que la voiture passe sans cesse devant le "compte-tours". Deux solutions sont proposées : soit on a recours à de très nombreux véhicules, "*un embouteillage qui avance*", soit on imagine que la voiture tourne tellement vite que l'ampoule du compte-tours n'a pas le temps de s'éteindre.

l'embouteillage
(modèle 2)

• *Second cas retenu*

- Modèle individuel : l'ampoule, c'est comme un ballon de football ; la pile est remplacée par une pompe et par la personne qui l'actionne ; le tuyau de la pompe représente le fil et l'électricité correspond à l'air qui circule de la pompe au ballon.

"À un moment, tu es essoufflé ; c'est ce qui arrive avec la pile : tu ne peux plus gonfler et elle, elle ne peut plus donner de force à l'ampoule."

- Résumé du débat collectif

. Il ne s'agit pas d'un circuit !

. Si l'on ajoute un second tuyau, l'air ne gonfle plus la balle.

. Sauf si on imagine une balle avec deux trous : alors, ça gonfle deux fois plus vite.

. C'est un piège : l'air ne revient pas. (On retombe dans les courants antagonistes.)

. L'air s'accumule dans la balle ; mais l'électricité ne fait pas briller l'ampoule de plus en plus fort. Au contraire, son éclat diminue quand la pile s'use.

le joueur de flûte
(modèle 3)

- Modèle final proposé par la classe : un flûtiste (la pile) souffle à l'aide d'un tuyau (le fil) dans une flûte (le buzzer car la flûte ne joue que dans un sens, par opposition à l'harmonica, qui pourrait tenir le rôle de l'ampoule) ; l'air (l'électricité) qui sort par les orifices sous les clés est récupéré par un autre tuyau et rejeté dans la pièce où se tient le flûtiste. Quand la pile est usée, on la jette. Quand le flûtiste est fatigué, il reprend de l'énergie en dormant et en mangeant (*sic !*).

Ces deux modèles analogiques sont du seul cru des élèves, on l'aura remarqué. Ils ont été progressivement construits à travers la confrontation des points de vue, le travail écrit initial (n°5) servant de prétexte et apportant un thème, un décor général précisé par la suite.

Ce qu'il convient à notre avis de souligner, c'est leur évolution : très proches de la réalité (des voitures réelles et des balles réelles) au départ, ils deviennent de plus en plus surréalistes à chaque fois que l'on tente d'intégrer de façon rigoureuse l'une des caractéristiques des circuits électriques trouvées lors des deux manipulations précédentes (ampoule, puis buzzer, DEL et moteur).

le train sans fin
(modèle 4)

C'est d'ailleurs ce qu'il advient également au modèle de Johsua et Dupin (1993, p. 375), qui imaginent un train, circulaire, formé de wagons uniquement, poussés en un point du circuit par quelques ouvriers... et c'est très bien ainsi ! Les modèles avouent de la sorte leur nature de modèle : l'électricité ne "fonctionne" ni comme une voiture douée d'une vitesse infinie sur un circuit, ni comme une flûte bardée de tuyaux, ni comme un train dont on ne sait quel est le wagon de tête...

les limites des
modèles
analogiques

Le modèle n'est analogique à l'objet étudié que selon un certain point de vue et selon un niveau de formalisation à l'intérieur de ce point de vue : ce n'est qu'un interprétant qui reste interprétable à son tour.

mieux connaître
le terrain que
la carte

Il peut certes arriver qu'un trait particulier du modèle provoque une intuition et ouvre la voie à de nouvelles recherches sur l'objet par un cheminement inverse. Mais il ne s'agit là que d'un aspect heuristique et non pas à proprement parler prédictif. Le danger réside justement dans la tentation de se satisfaire de la connaissance du modèle, pour plaquer ses caractéristiques sur ce que l'on étudie, en se passant des moyens scientifiques d'administration de la preuve que sont la réflexion logique et l'expérimentation. La relation entre modèle et référent est analogique, mais jus-

qu'à un certain point seulement ; il n'est pas question d'isomorphisme strict.

"Le modèle se propose, en tant que procédé opératoire, comme le seul moyen de réduire l'expérience vivante d'objets différents en un discours homogène. Il s'agit donc d'une élaboration métalinguistique permettant de parler des autres ordres de phénomènes comme d'un système de signes." (Eco, 1972, p. 335) : c'est par le biais de la réflexion métacognitive que l'élève en prend conscience, à travers le codage socialement recevable des interprétants grâce auxquels chaque individu verbalise, structure ce qu'il a perçu, ce qu'il a pu percevoir.

Cette attitude est absolument nécessaire chez l'apprenant si on veut à la fois :

- éviter l'apparition d'obstacles épistémologiques par sclérose du savoir antérieur. La plasticité cognitive ne constitue nullement une compétence innée qui irait s'amointrissant avec l'âge : par le regard métacognitif, elle s'acquiert et se travaille, pour éviter l'apparition de *"crampes de la perception"* (Eco, 1972, p. 183), pour empêcher que *"des habitudes intellectuelles qui furent utiles et saines"* n'entravent la recherche (Bachelard, 1938, p. 14). La didactique des sciences débouche sur ce plan sur un éloge du doute ;
- amener l'élève à apprendre des savoirs utilisables, c'est-à-dire stables bien que relatifs, sur lesquels il va s'appuyer pour progresser, tout en acceptant le cas échéant de les remettre en question.

Le lieu central du problème des obstacles épistémologiques est ainsi pour nous ce débat entre d'une part automatisation des procédures, dans un souci d'efficacité, à travers des chaînes d'interprétants interrompues et figées, et d'autre part regard métacognitif, en tant qu'artifice didactique permettant le retour à la conscience des savoirs antérieurement acquis, pour en construire de nouvelles interprétations, sous la pression de l'expérience scientifique, ou du débat avec autrui, ou encore du raisonnement intériorisé. Les processus sémiotiques ne font que marquer des temps d'arrêts, des pauses momentanées : l'élève ne devient un professionnel de l'apprentissage que s'il accepte à chaque fois de se remettre en situation de recherche, de ré-organisation et de ré-interprétation du perceptible.

Marc WEISSER
École Cour de Lorraine
Mulhouse

dialectique de
l'automatisation
et de la critique
consciente

l'élève,
un professionnel
de l'apprentissage

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSON, Richard C., AUSUBEL, David P., (1965). *Readings in the psychology of cognition*. New York, Holt, Rinehard and Winston.

ASTOLFI, Jean-Pierre, (1992). *L'école pour apprendre*. Paris, ESF.

ASTOLFI, Jean-Pierre et all., (1991). *Compétences méthodologiques en sciences expérimentales*. Paris, INRP.

AUSUBEL, David P., (1965). "A cognitive structure view of word and concept meaning", in ANDERSON & AUSUBEL, *Readings in the psychology of cognition*. New York, Holt, Rinehard and Winston, pp. 58-75.

BACHELARD, Gaston, (1^e édition 1938, réédition 1980). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.

BACHELARD, Gaston, (1940). *La philosophie du non*. Paris, PUF.

BALACHEFF, Nicolas, (1988). "Le contrat didactique et la coutume : deux registres des interactions didactiques", *Actes du premier colloque franco-allemand de didactique des mathématiques*. Grenoble, La Pensée Sauvage, pp. 15-27.

ECO, Umberto, (1972). *La structure absente*. Paris, Mercure de France.

ECO, Umberto, (1979). *Lector in fabula*. Paris, Livre de Poche.

GIORDAN, André, DE VECCHI, Gérard, (1987). *Les origines du savoir*. Neuchâtel, Delachaux et Niestlé.

GRICE, Paul H., (1979). "Logique et conversation", *Communications* n°30. Paris, Seuil, pp. 57-72.

JOHSUA, Samuel, DUPIN, Jean-Jacques, (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.

PEIRCE, Charles S., (1978). *Écrits sur le signe*. Paris, Seuil.

SARRASIN, Liliane, GENZLING, Jean-Claude, (1988). "Circuits et modélisation", *Aster* n°7, *Modèles et modélisations*. Paris, INRP, pp. 103-120.