

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 | | [] | [] | | | [] |
| | Sable | | [] | | | | |
| | Grès | | [] | [] | [] | | |
| | Calcaire | | | | | [] | |
| MÉTAMORPHIQUES | Micaschiste | [] | | [] | [] | | [] |
| | Gneiss | [] | | [] | [] | | |
| MAGMATIQUES | Granite | [] | | [] | [] | | [] |
| | Basalte | | | [] | [] | | |

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.

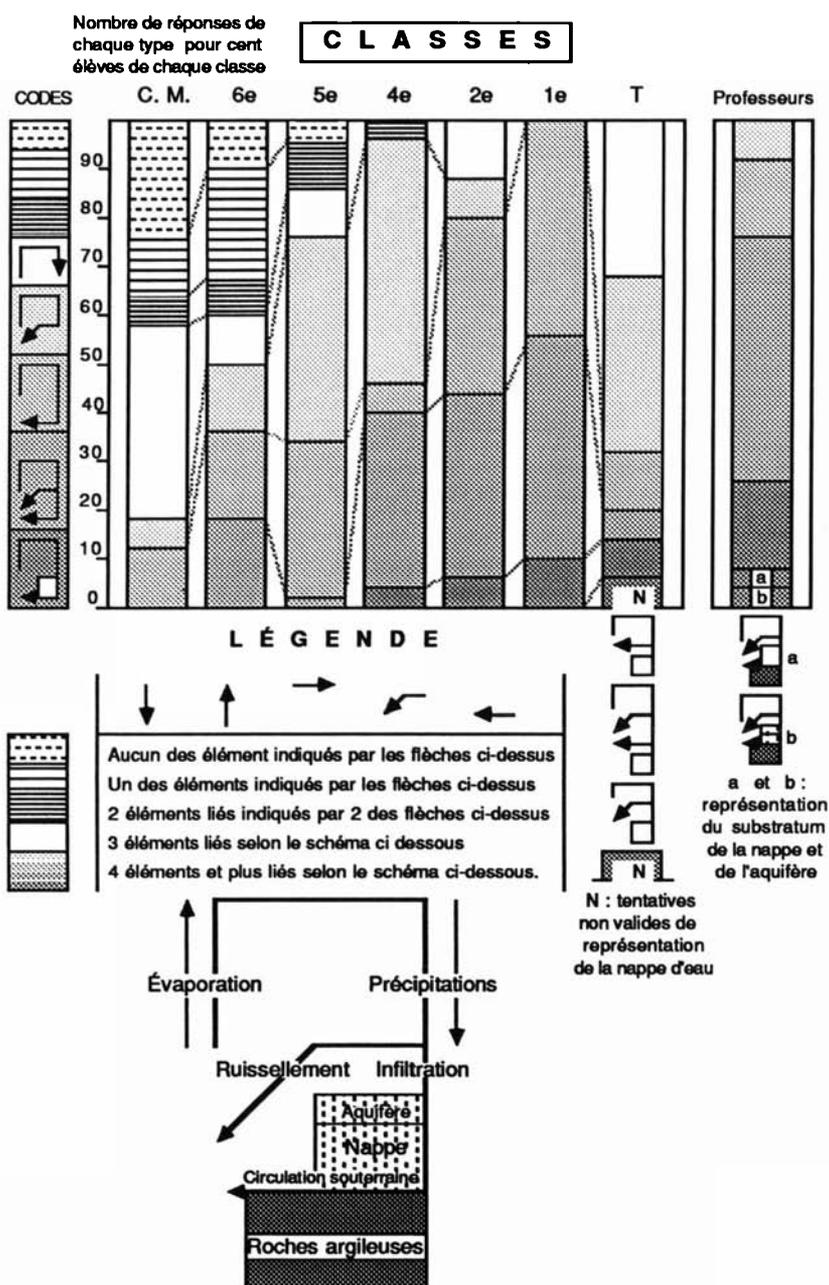


Figure 2. Évolution de l'expression des conceptions des élèves sur le cycle de l'eau et mise en évidence de la faible représentation des éléments géologiques significatifs du recyclage naturel de l'eau des nappes

• 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 décroissement 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.

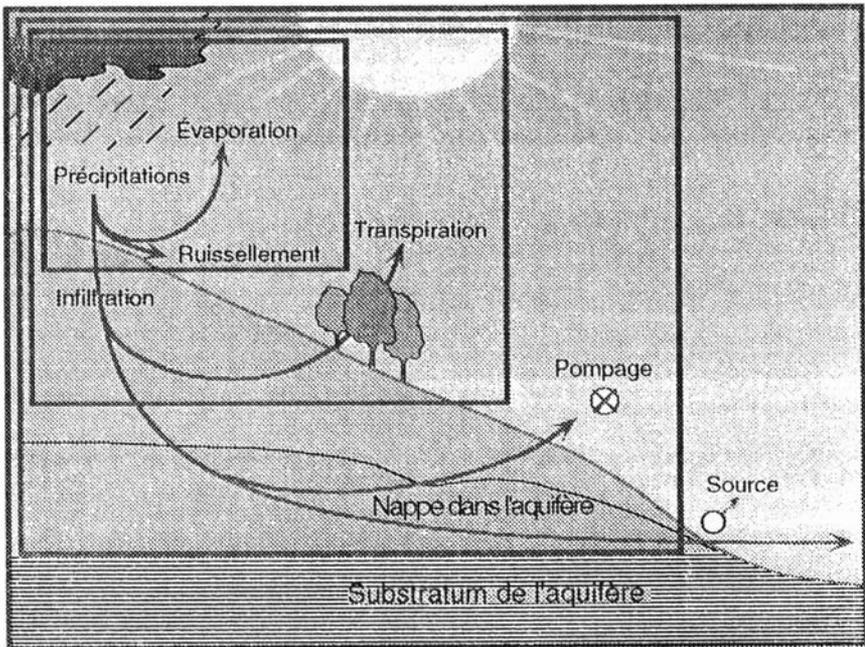


Figure 3. Cadres de référence locaux du devenir de l'eau de pluie

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.

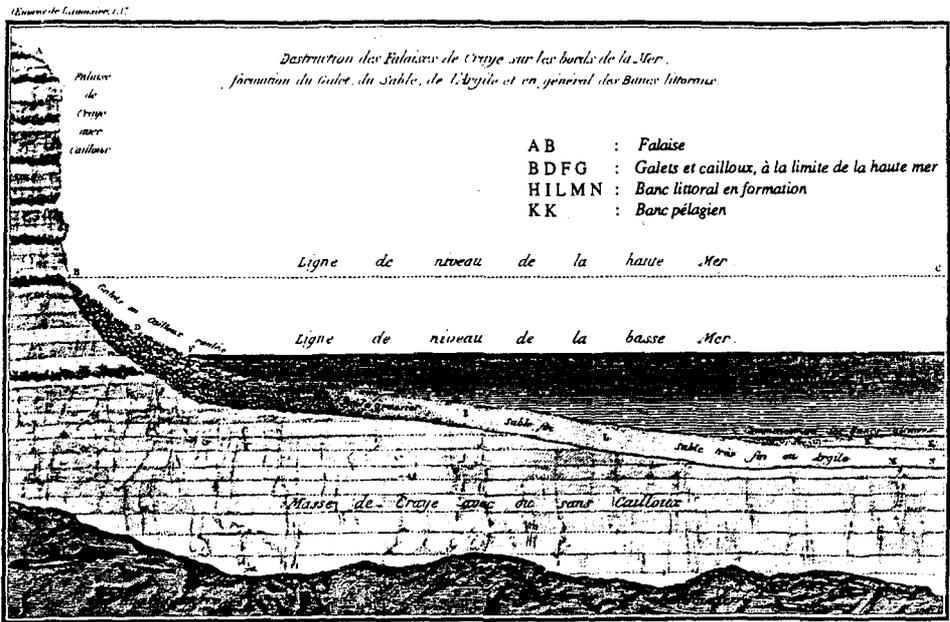
2. RECYCLAGE DE LA MATIÈRE

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 quartzes, 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).

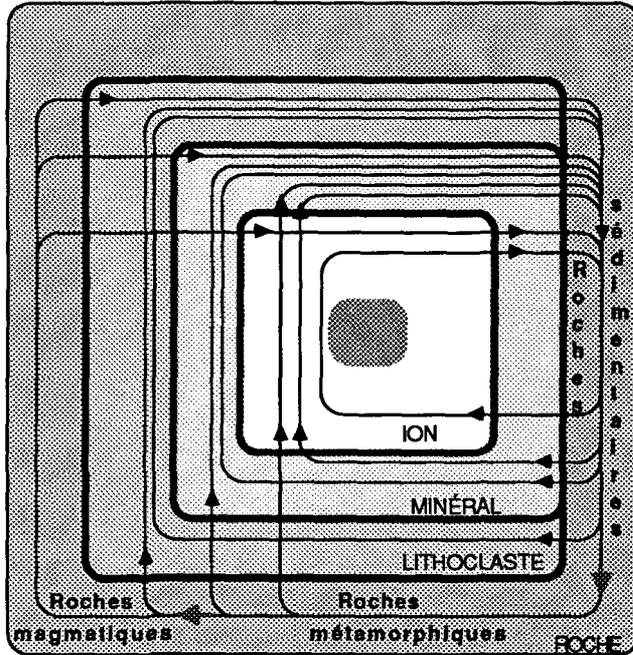


Figure 5. Matériaux issus de l'érosion des roches – sédimentaires, magmatiques et métamorphiques – et susceptibles d'être recyclés dans des roches nouvelles, sédimentaires

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).

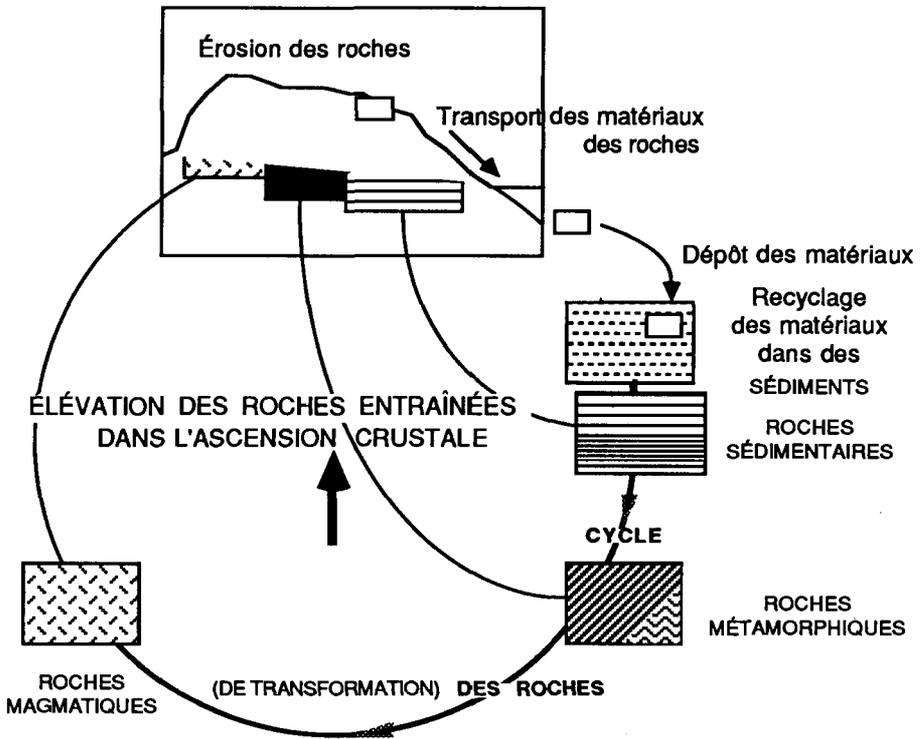


Figure 6. "Cycle des roches", purement conceptuel, exprimant un enchaînement de phénomènes appartenant aux cadres de référence différents des matériaux des roches, des roches elles-mêmes et d'un ensemble lithologique et structural

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...

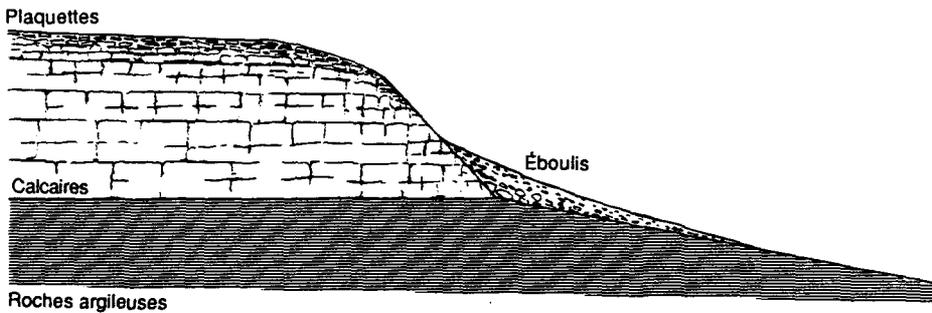


Figure 7. Formations superficielles autochtones résultant du recyclage actuel, sur place, de matériel géologique par des agents d'érosion sur des calcaires et des roches argileuses dont le pendage et la lithologie déterminent la vulnérabilité

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.

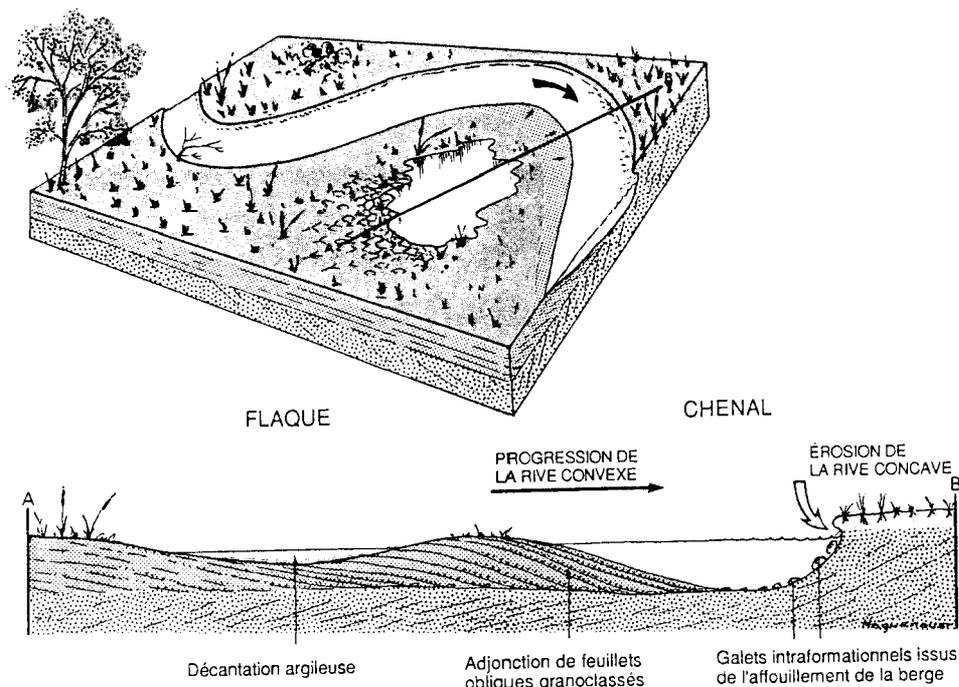


Figure 8. Formations superficielles allochtones résultant du recyclage, à distance du lieu de provenance, de matériel géologique par l'eau, agent d'érosion, de transport et de dépôt

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 (fluviatiles 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.

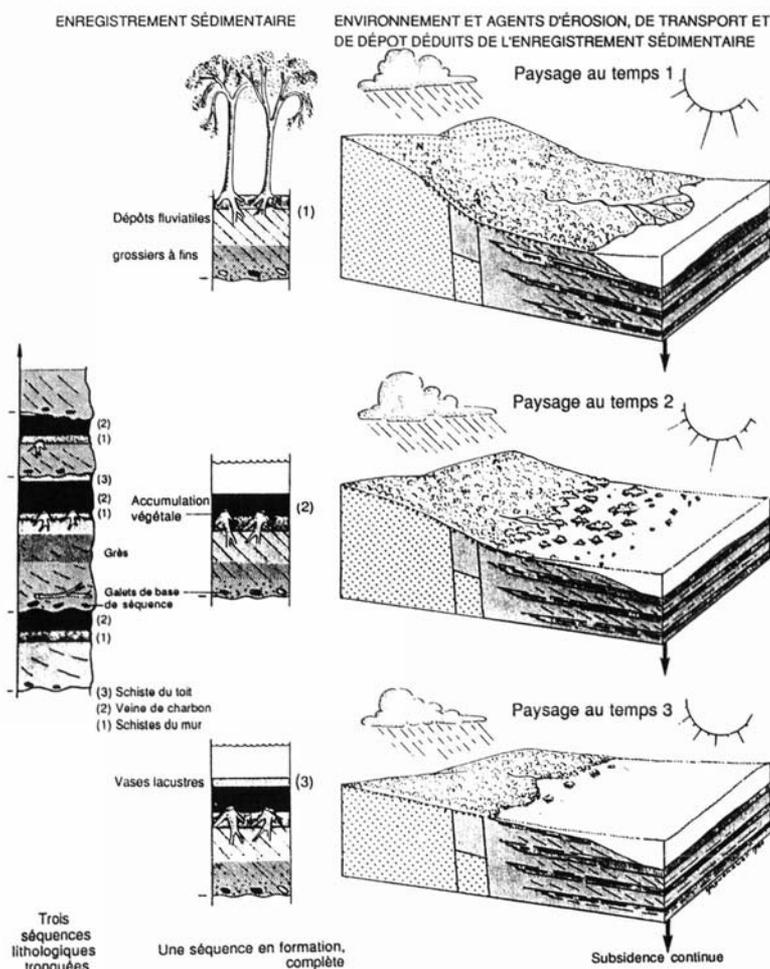


Figure 9. Explication régionale de l'action de facteurs interne et externe du recyclage dans des formations molassiques à charbon : facteur tectonique de la subsidence intervenant sur le relief et appelant la sédimentation et facteur d'érosion, de transport et de dépôt : l'eau

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).

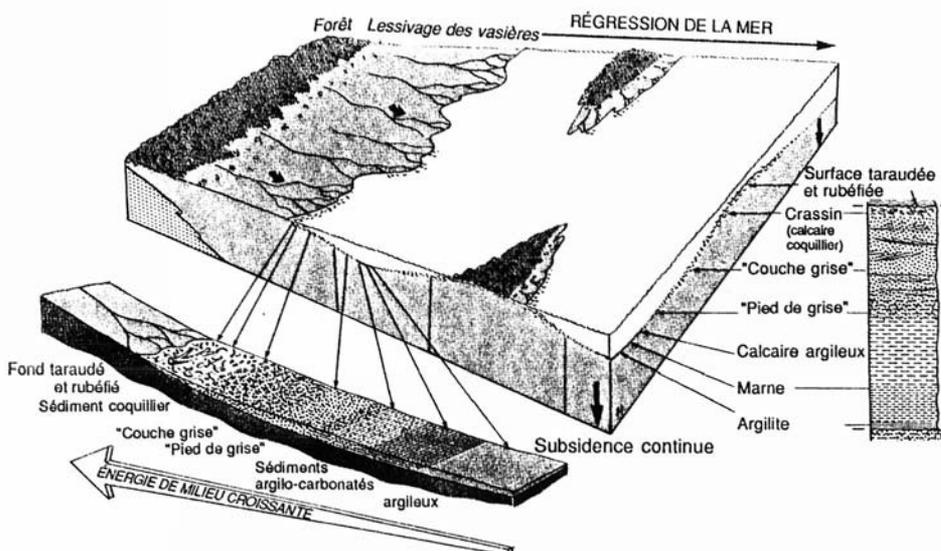


Figure 10. Explication de l'action de facteurs interne et externe du recyclage du fer dans un bassin sédimentaire : facteur tectonique de la subsidence qui appelle la sédimentation et facteur d'érosion, de transport et de dépôt : l'eau

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.

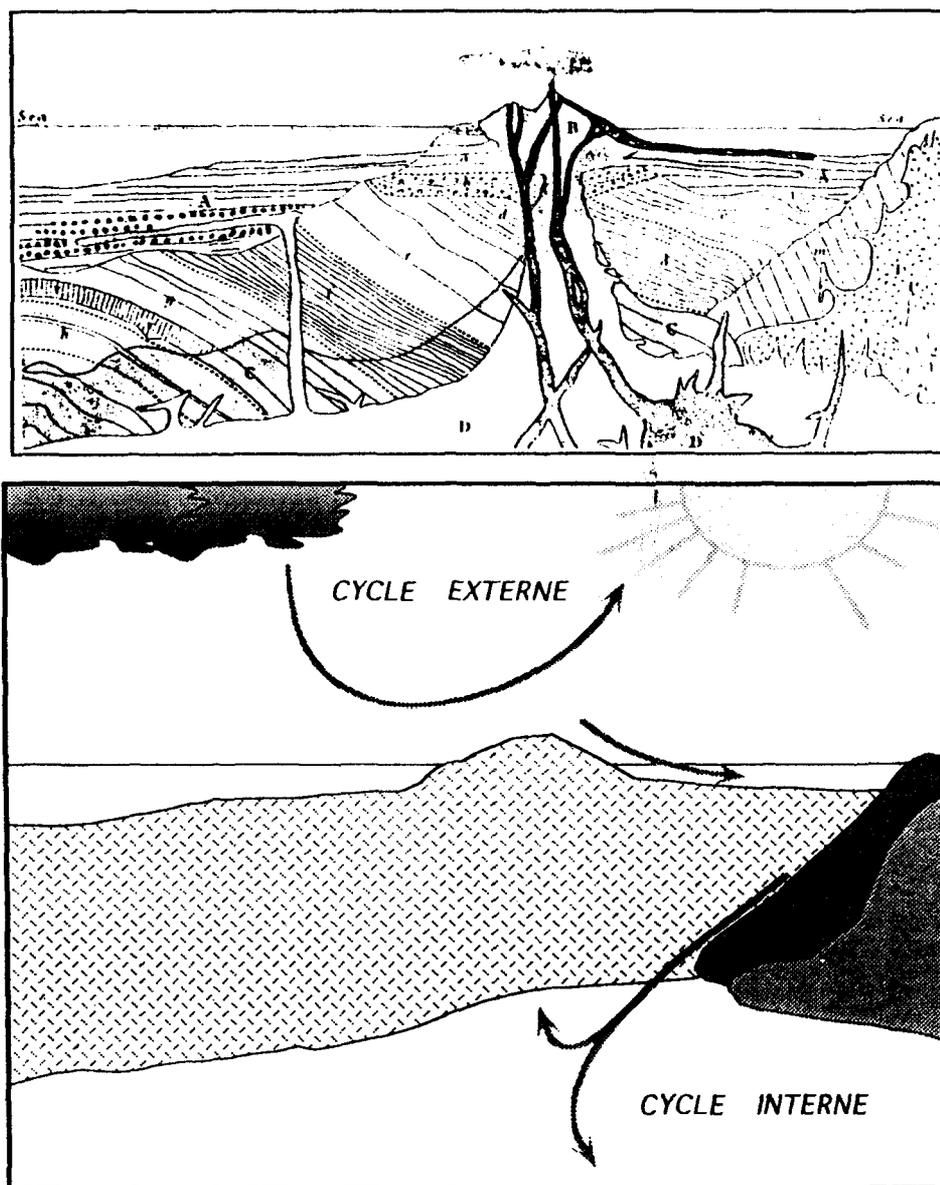


Figure 11. Explication de l'action des facteurs externes et internes du recyclage de la matière à une échelle inspirée d'une représentation synthétique de Lyell

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.