

VOLCANISME ET FONCTIONNEMENT INTERNE DE LA TERRE : REPÈRES DIDACTIQUES POUR UN ENSEIGNEMENT DE L'ÉCOLE ÉLÉMENTAIRE AU LYCÉE

Christian Orange

Nous nous proposons, à partir de références historiques et épistémologiques, d'identifier de grandes ruptures dans les apprentissages sur le volcanisme et le fonctionnement interne de la Terre. Cela nous conduit à distinguer, à côté d'apprentissages de rupture pouvant se traduire en objectifs-obstacles, des apprentissages normaux qui s'opèrent à l'intérieur d'un paradigme scolaire choisi.

l'importance
théorique et
phénoménologique
des volcans

Le volcanisme présente deux caractéristiques scientifiques remarquables : il correspond à l'un des phénomènes les plus spectaculaires sur Terre et il est, d'après les modèles actuels, d'une importance considérable pour comprendre le fonctionnement de notre planète. Ceci explique certainement la place de ce domaine dans l'enseignement de la géologie en France : c'est pratiquement le seul, avec l'étude des séismes, à être au programme de l'école, du collège et du lycée.

Mais l'importance théorique des volcans n'est pas une évidence. Elle peut en particulier être masquée par leur richesse phénoménologique qui fonctionne comme un obstacle épistémologique.

C'est à la recherche des ruptures dans les conceptions, historiques et didactiques, du lien entre phénomènes volcaniques et fonctionnement de la planète Terre que nous voulons nous attacher ici, de façon à placer des repères pour l'enseignement de la volcanologie.

1. QUELQUES MODÈLES EXPLICATIFS DU FONCTIONNEMENT VOLCANIQUE DANS L'HISTOIRE DES SCIENCES

Sans prétendre retracer une histoire complète de la volcanologie dans tous ses aspects, nous voulons donner quelques indications sur différentes façons qu'ont eues les scientifiques de relier les phénomènes volcaniques, tels qu'ils pouvaient être observés et subis, au fonctionnement de la planète Terre.

Cette étude historique vise à se détacher des conceptions actuelles pour comprendre la cohérence d'autres modèles développés dans le passé. Par rapport à notre projet didactique, il s'agit donc de peupler le champ des possibles dans l'explication des volcans, de façon à se donner des repères pour l'analyse des conceptions des élèves.

Nous retiendrons ici trois types de modèles qui permettent de caractériser les grandes ruptures historiques, tant en ce qui concerne la signification du volcanisme que son fonctionnement.

1.1. Le modèle local

Dans son *Histoire naturelle*, Buffon explique les volcans par la présence, dans le sous-sol des régions volcaniques, de matières inflammables.

"Les montagnes ardentes qu'on appelle Volcans, renferment dans leur sein le soufre, le bitume et les matières qui servent d'aliment à un feu souterrain..." (1).

Il précise ensuite que, même si les effets impressionnants des volcans provoquent des superstitions,

"Tout cela n'est cependant que du bruit, du feu et de la fumée ; il se trouve dans une montagne des veines de soufre, de bitume et autres matières inflammables ; il s'y trouve en même temps des minéraux, des pyrites qui peuvent fermenter... Le feu s'y met et cause une explosion proportionnée à la quantité de matières enflammées, et dont les effets sont aussi plus ou moins grands dans les mêmes proportions : voilà ce que c'est qu'un volcan pour un Physicien..."

les feux
souterrains de
Buffon

Les phénomènes volcaniques, si impressionnants à l'échelle humaine, sont ici dévalorisés à l'échelle de la Terre. En aucun cas ils ne sont des signes de l'économie générale de la planète : il s'agit seulement de **phénomènes locaux**.

un modèle
cohérent

Il faut souligner la remarquable cohérence d'un tel modèle, dans le cadre des connaissances de l'époque. Il rend compte pratiquement de toute la panoplie des problèmes empiriques simples que posent les volcans : la production de matière, la chaleur, le mécanisme de l'éruption, la localisation (2). C'est certainement pour cette raison que cette explication des volcans est très généralement admise jusqu'à la fin du XVIII^e siècle (3).

Avant cette date, seuls quelques scientifiques, comme Descartes, voient dans les volcans les traces d'un "feu central".

-
- (1) BUFFON ; *Histoire naturelle*, tome 2, Preuves de la théorie de la Terre (article XVI) ; Paris, 1769 (1^{re} éd. 1749).
 - (2) Il explique facilement qu'il n'y a pas de volcans partout, mais uniquement là où des matières combustibles souterraines sont présentes.
 - (3) ELLENBEGER F. ; *Histoire de la géologie*, tome 1 ; Paris, Lavoisier, 1988, (voir pp. 13, 51-52, 268).

1.2. Le modèle central du XIX^{ème} siècle

La figure 1, extraite d'un livre de vulgarisation du siècle dernier (4), illustre simplement le modèle de la Terre qui est le plus répandu alors.

On peut la compléter par les commentaires d'un autre vulgarisateur, Alexandre Bertrand, qui présente les volcans

"comme des vastes soupiraux par le moyen desquels quelques parties des matières en fusion qui forment la masse interne s'échappent avec violence pour venir se répandre sur la surface du globe. Cette manière d'envisager les éruptions volcaniques est, je crois, plus satisfaisante qu'aucune de celles qui ont été proposées jusqu'ici pour les expliquer. Toutes les autres hypothèses, en effet, rapportant les éruptions à des causes purement locales, ne peuvent rendre raison de la singulière ressemblance qui existe entre les produits volcaniques rejetés aux extrémités les plus éloignées du globe" (5).

au XIX^{ème} siècle,
les volcans
"soupiraux de
la Terre"

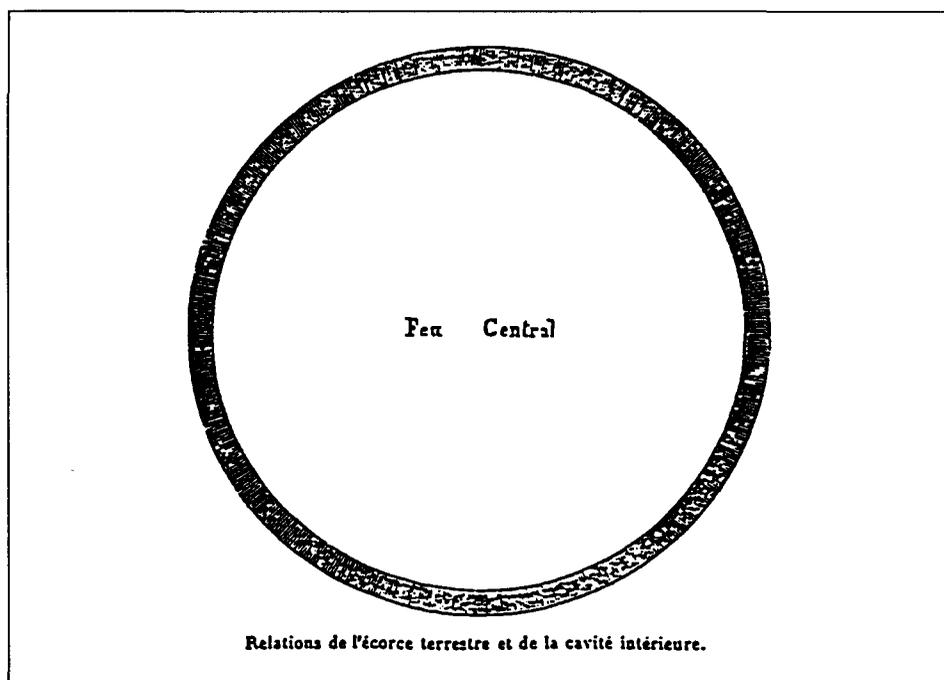


Figure 1. La structure de la Terre au XIX^{ème} siècle
(d'après CHEVALIER C. ; *Géologie contemporaine* ; Tours, Mame, 1875)

(4) CHEVALIER C. ; *Géologie contemporaine* ; Tours, Mame, 1875.

(5) BERTRAND A. ; *Lettres sur les révolutions du globe* ; Paris, J. Tessier, 1845. (p54)

La position paradigmatique de cette approche "centrale" des volcans au XIXème siècle tient, si l'on s'attarde aux arguments de Bertrand, aux progrès de la pétrographie mais surtout à la rupture que constitue la naissance de la chimie moderne et de la nouvelle connaissance des combustions qui en résulte :

"On a cru expliquer suffisamment la formation des volcans en supposant que les matières inflammables renfermées dans le sein de la terre prenaient feu spontanément ; mais on n'a pas réfléchi que, pour que la combustion eut lieu, il faudrait nécessairement le contact de l'air, et que le foyer des volcans est situé à des profondeurs trop considérables pour qu'on puisse supposer que l'air y pénètre." (6)

Les modèles locaux étaient peu compatibles avec les nouvelles conceptions des combustions.

Ces modèles centraux sont, contrairement aux modèles locaux, dans une problématique planétaire des phénomènes volcaniques.

Ils ont moins de cohérence que la conception "locale" puisqu'ils sont obligés de mobiliser un certain nombre de causes, en partie indépendantes : si le réservoir de magma explique laves et matières volcaniques, la localisation est renvoyée à des particularités de surface (faiblesse localisée de la croûte, par exemple) ; quant à l'origine de la chaleur, considérée au début comme une chaleur résiduelle, elle devient de plus en plus problématique au cours du XIXème siècle, au fur et à mesure que la Terre paraît, aux yeux des géologues, de plus en plus vieille.

C'est l'invention de la radioactivité, à l'aube du XXème siècle (7), qui apporte une réponse satisfaisante.

Des modèles de ce type, avec "réserve" planétaire de magma (8), ont perduré au XXème siècle, mais avec quelques modifications : au fur et à mesure que la structure de la Terre se complique, en particulier à partir des analyses des données sismiques, le "réservoir" magmatique se limite à tout ou partie du manteau.

1.3. Les modèles globaux

On peut considérer qu'un nouveau changement de problématique est apparu lorsque l'on a abandonné l'idée d'un réservoir planétaire de magma. Sans faire l'analyse des conditions de ce changement, on peut dire qu'on admet

et le problème
de la chaleur

(6) Ibidem.

(7) Becquerel, en 1896 (décrit l'émission spontanée et continue par des sels d'uranium d'un rayonnement qui traverse les solides opaques...) ; Pierre et Marie Curie en 1898 (radium et polonium). ROSMORDUC J. (dir.) ; *Histoire de la physique*, tome 1 ; Paris, Lavoisier, 1987.

(8) C'est l'existence de ces réserves qui, selon nous, caractérise les conceptions "centrales" (au sens large), même si ces réserves n'occupent pas toujours, à proprement parler, le centre de la Terre.

l'écorce ne
repose pas sur
une couche de
magma

actuellement, à partir en particulier des données sismiques, que le manteau est très généralement solide sur toute son épaisseur.

"Il faut dissiper tout de suite une croyance répandue et hélas propagée par une ignorance entretenue : le magma n'est pas un constituant banal des entrailles de la Terre". (9)

Ce n'est que régionalement, sous les dorsales, les zones de subduction et au niveau des points chauds, qu'une fusion partielle localisée du manteau existe.

Dans ce nouveau cadre problématique, il ne s'agit pas simplement d'expliquer pourquoi le magma sort ici et pas ailleurs, comme dans les conceptions "centrales", mais il est avant tout nécessaire de rendre compte de la formation de magma à certains endroits et pas à d'autres.

Ces problèmes sont construits et résolus en lien étroit avec la tectonique globale et les mouvements de la lithosphère. Cela nécessite de prendre en compte une fusion (partielle) qui ne dépend pas seulement des conditions de température mais fait également intervenir la pression lithostatique totale ainsi que la pression partielle de certains constituants du manteau, l'eau en particulier (10).

Mais il faut noter que si la tectonique des plaques est une condition nécessaire pour accéder à ces modèles globaux, elle ne les caractérise pas spécifiquement : elle est parfaitement compatible avec un manteau liquide, comme le montrent de nombreuses simplifications didactiques ou vulgarisantes.

1.4. Conclusions

Ces trois types de modèles explicatifs des phénomènes volcaniques, étudiés dans leurs relations avec le fonctionnement de la Terre, relèvent de problématiques bien différentes. Malgré cela, il leur faut tous rendre compte des problèmes empiriques suivants :

les problèmes
empiriques
auxquels doit
répondre
chaque
explication des
volcans

- quelle est l'origine de la chaleur (pourquoi c'est chaud) ?
- qu'est-ce qui provoque les éruptions ?
- d'où vient la lave et qu'est-ce que c'est ?
- pourquoi n'y a-t-il pas des volcans partout ?

Mais, dans les différents modèles, ces problèmes empiriques communs n'ont pas la même importance. La chaleur, par exemple, dont l'explication est quasi immédiate dans le modèle de Buffon, est devenue une vraie énigme, voire une anomalie (11), au XIX^{ème} siècle. La répartition des volcans,

(9) ALLÈGRE Cl. ; *Les fureurs de la Terre* ; Paris, Odile Jacob, 1987, (p. 103).

(10) Ibidem.

(11) Pour Kuhn, une anomalie correspond à *l'impression que la nature, d'une manière ou d'une autre, contredit les résultats attendus dans le cadre du paradigme.*
KUHN Th. ; *La structure des révolutions scientifiques* ; Paris, Flammarion, 1983 (1962), (p. 83).

vue comme un simple détail dans certains modèles et expliquée par le hasard des éléments combustibles ou des zones fragiles de la croûte, devient fondamentale dans le modèle que nous avons appelé "global".

Les différents problèmes empiriques que soulèvent les phénomènes volcaniques, quoique faciles à délimiter, peuvent donc conduire à des explications fort différentes. Cette diversité se retrouve dans les conceptions des élèves.

2. ANALYSE DES CONCEPTIONS DES ÉLÈVES SUR LA SIGNIFICATION GÉOLOGIQUE DES VOLCANS ET LEUR FONCTIONNEMENT

Dans l'histoire de la volcanologie, nous nous sommes intéressés à la signification géologique des phénomènes volcaniques au cours des siècles : sont-ils des phénomènes anecdotiques ou ont-ils une signification planétaire ? C'est sous ce même angle que nous voulons maintenant analyser les conceptions des élèves sur les volcans, de l'école élémentaire au lycée.

Nous nous permettons d'insister sur l'importance méthodologique de cette précision. Il n'existe pas en effet, selon nous, d'analyse générale de conceptions dans un domaine. Une conception est un système trop complexe pour pouvoir être décrit dans sa totalité (12) : le projet de celui qui décrit est donc fondamental et doit être explicité. Il conditionne les questions posées aux élèves et les grilles d'analyse.

Pour cette étude, nous nous appuierons dans un premier temps sur deux niveaux : le cours moyen d'une part (élèves de 10/11 ans) et la classe de première scientifique (16/17 ans).

2.1. Modèles spontanés d'élèves de cours moyen sur le fonctionnement d'un volcan (13)

Les productions d'élèves que nous analysons ici proviennent d'un travail effectué dans la classe de CM de Jean Rouxel (14). Il a donné lieu à un enregistrement vidéo ce qui a permis de retranscrire des éléments de discussion au sein de groupes et entre groupes et maître. Les données provenant

notre projet
d'analyse des
conceptions des
élèves sur les
volcans

-
- (12) ORANGE C. ; Les obstacles en didactique des sciences : nécessité d'une approche plurielle in FABRE M., ORANGE C., RIDAO C., *Le problème et l'obstacle en didactique des sciences*, Documents du Cerse, 1993, n°60.
- (13) "Séismes et éruptions volcaniques" sont au programme du cycle 3 (CE2, CM1, CM2) de l'école primaire. B.O. de l'éducation nationale, n° 5, mars 1995.
- (14) Équipe de Didactique des Sciences, École normale de la Manche. Recueil de données effectué en avril 1991, avant enseignement, à l'école Calmette et Guérin de St Lô.

de plusieurs autres classes dans lesquels un travail analogue a été mené, mais avec un recueil de données moins complet, confirment les analyses que nous allons faire.

• **Description de la situation**

Les enfants travaillent par groupes de trois sur les questions suivantes :

- Qu'est-ce qu'un volcan ?
- Comment se forme-t-il ?
- Que produit-il et comment ?
- Où trouve-t-on des volcans ?

Pour ces questions, les groupes doivent noter sur une affiche (sous forme de schémas et de texte) :

- ce qu'ils savent déjà ;
- ce qu'ils croient savoir ;
- les questions qu'ils se posent.

Le maître passe d'un groupe à l'autre pour demander des explications et stimuler les discussions.

• **Productions des groupes**

Nous reproduisons à la figure 2 les affiches de trois groupes. Elles correspondent à des conceptions différentes.

Si l'on se sert des références historiques, il apparaît que, pour le dernier groupe (groupe 3), les volcans sont expliqués par la structure générale de la Terre et par son fonctionnement en tant que planète.

Mais ce n'est pas le cas des groupes 1 et 2 qui font appel à des phénomènes essentiellement locaux. Ceci est confirmé par les discussions relevées dans ces groupes.

Ainsi une élève du groupe 1 (Béatrice) indique-t-elle, en réponse à une demande d'explication du maître :

"Le magma c'est peut-être des pierres qui se forment... et puis ça devient de plus en plus des plus grosses pierres... Avec la température du Soleil, ça commence à fondre et plus ça chauffe, plus ça monte."

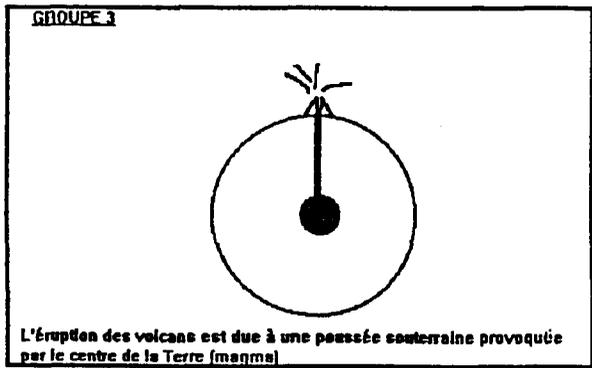
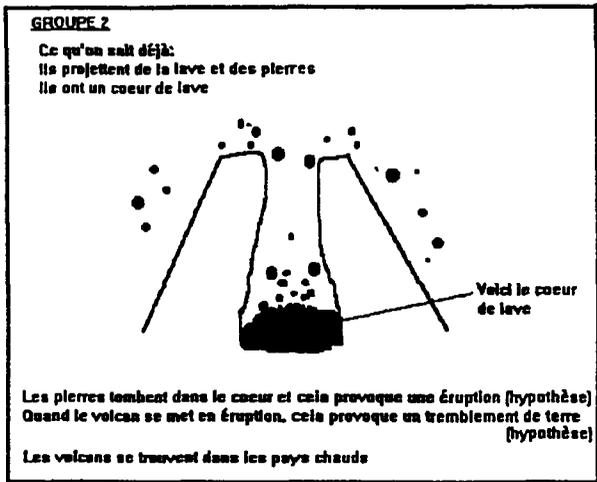
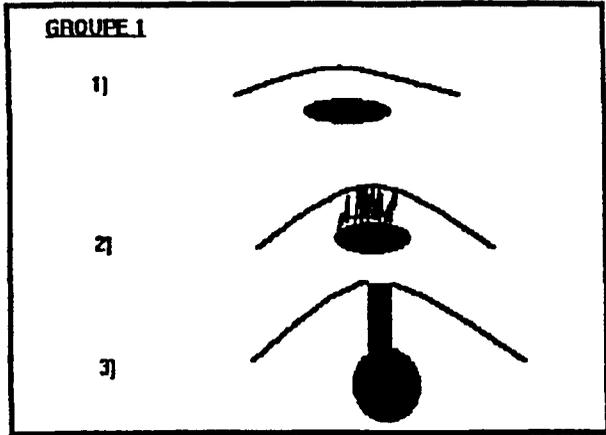
Cette référence au Soleil, comme cause externe de la chaleur, est relativement fréquente à cet âge.

Les discussions enregistrées du groupe 2 précisent leur affiche (voir figure 2) : la terre brûle dans le coeur du volcan et est ainsi responsable de la chaleur et de l'éruption.

On peut ainsi classer les productions des élèves sur le fonctionnement des volcans en explications "**locales**" et en explications "**centrales**". Il faut cependant noter que quelques élèves qui s'inscrivent dans une conception "locale" peuvent avoir un début de référence à la Terre. Cela se traduit, par exemple, par l'invocation de l'histoire de la planète. Voici ce qu'explique un élève du groupe 1 au maître : *"Quand la Terre s'est formée, sous la terre il s'est passé des transformations. Quand il y a eu des hommes pré-historiques, le magma existait. Il s'est formé avec des pierres... La lave, c'est grâce au soleil... C'est comme une boîte qui recouvre la lave ; après ça débouche..."*.

à l'école
élémentaire : des
conceptions
"locales" ou
"centrales"

Figure 2. Affiches de trois groupes, CM1-CM2 (avant enseignement)



2.2. Classe de première S (15)

Nous étudierons ici les productions d'élèves de première S dans deux situations d'explication de phénomènes volcaniques.

• *Explication générale du volcanisme*

Les productions que nous analysons ici proviennent d'un questionnaire passé avant tout enseignement de géologie dans la classe (prétest) (16).

Voici ce questionnaire.

- 1) Par un ou plusieurs schémas légendés et des commentaires, expliquez comment fonctionne un volcan et d'où vient la lave.
- 2) Qu'est-ce qu'un tremblement de terre ? Comment l'expliquez-vous ?
- 3) Comment expliquez-vous l'existence des montagnes ?
- 4) Y a-t-il un rapport entre ces trois phénomènes ? Justifiez votre réponse.

Nous ne prendrons en compte que les réponses à la première question, à laquelle les élèves ont, très généralement, répondu en premier et sans retour. Les résultats de cette analyse sont donnés à la figure 3.

La figure 4 reproduit deux réponses caractéristiques.

au lycée : des
conceptions
"centrales"

Il apparaît que la quasi totalité des élèves a recours à un modèle de magma préexistant, que ce magma occupe tout l'intérieur de la Terre ou qu'il soit cantonné au manteau ou au centre proprement dit (noyau).

Derrière ce mode d'explication fortement majoritaire se cache une idée que l'on peut illustrer par la réponse suivante :

"La lave est une masse rocheuse en fusion. Cette fusion est provoquée par la température... Plus on se rapproche du centre de la Terre, plus la température est importante."

• *Explication particulière d'un type de volcanisme*

Analysons maintenant les modèles produits par des élèves sur des problèmes plus précis, avec des contraintes plus fortes.

(15) Les programmes de première S envisagent les phénomènes volcaniques dans le cadre des relations entre "Mouvements de la lithosphère et énergie interne" donc, en particulier, en relation avec la tectonique des plaques. B.O. de l'Éducation nationale, numéro hors-série du 24/9/92.

(16) Ce test a été passé dans plusieurs classes de première S. Les résultats étudiés ici sont ceux d'une classe du lycée Le Verrier de St Lô (Classe de Paulette Ducrocq, le 12/9/91).

Figure 3. Analyse des conceptions (avant enseignement) des élèves d'une classe de première S sur le fonctionnement des volcans (Comment fonctionne un volcan ? D'où vient la lave ?)

a) Sur les 36 productions:

- 1 ne donne aucune réponse ("Je ne sais pas").
- Aucune ne peut être interprétée comme une explication locale du volcanisme;
- mais 6 se limitent à une description centrée sur le volcan et son voisinage profond immédiat (chambre magmatique), ce qui ne permet pas d'évaluer le lien fait avec la structure et le fonctionnement de la planète.
- 29 relie le fonctionnement du volcan à la structure et au fonctionnement de la planète Terre (signification planétaire explicite du volcanisme).

b) L'analyse des 29 productions donnant une signification planétaire au volcanisme peut se faire selon deux axes: d'une part la mention ou non de plaques lithosphériques dans les explications; d'autre part, la référence soit à un réservoir de magma soit à une production régionale (par fusion ou frottements, par exemple). Cela se traduit par le tableau suivant.

Origine de la lave		Plaques mentionnées	Plaques non mentionnées	
Réservoir planétaire de lave	Sous l'écorce ¹	5	10	15
	Manteau	2	5	7
	Noyau	2	2	4
Production régionale de lave (fusion, frottement).		2 (NB ²)	1	3
		11	18	29

1 Nous regroupons là les productions qui semblent faire référence à une masse magmatique occupant tout l'intérieur de la Terre ("au centre de la Terre", sans autre précision ; "sous la croûte"...).

2 Nous avons placé dans cette catégorie une production qui mentionnait pour certains volcans une production régionale et, pour d'autres, un réservoir mantellique de magma.

Figure 4. Production de deux élèves de première S (avant enseignement)

①

Le magma en fusion sous l'écorce terrestre applique une pression. À certains endroits, l'écorce terrestre étant plus fragile fend. Le magma monte alors dans la cheminée du volcan et sort par le cratère.

coupe d'un volcan

La Terre est composée d'un noyau central, de magma d'une écorce terrestre. Celle-ci n'étant pas toujours de la même épaisseur, parfois elle fend sous la pression du magma qui s'échappe alors et forme un volcan.

coupe de la terre

②

La lave vient de la couche "liquide" de magma située sous l'écorce terrestre mais à l'extérieur du noyau (celui-ci est solide).

Collision: Quand deux plaques s'affrontent l'une de l'autre, la lave peut s'échapper par ce trou. Ensuite la lave "construit" les côtes du volcan et la cheminée.

Ce phénomène se produit également à l'échelle inférieure sous l'eau entre deux plaques.

Contrairement aux productions précédentes, celles-ci ont été réalisées dans la progression du cours de géologie, après avoir travaillé d'une part sur les grands principes de la tectonique des plaques et d'autre part sur la structure de la Terre. En particulier, l'état solide du manteau a été repéré à partir des données sismiques (17).

On demande aux élèves, par groupes de deux, d'expliquer le volcanisme des zones de subduction. La question est la suivante :

"A partir de quoi et comment se forme le magma qui alimente les volcans des zones de subduction ?".

La tâche est ainsi précisée :

- produire un schéma simple accompagné d'un petit texte explicatif ;
- la durée de préparation est de 15 mn environ au bout desquelles les binômes iront noter au tableau leur schéma explicatif et le présenteront à tour de rôle à l'assemblée.

des explications
qui s'appuient sur
l'augmentation
de température

La mise en commun des productions de groupes permet de dégager un accord général sur une explication : **le haut de la plaque plongeante fond**. Pour les élèves, la température est déterminante dans la fusion : "C'est l'augmentation de température qui fait fondre". Et cette augmentation est due au gradient géothermique ou aux frottements, ou encore à la pression.

Ces explications ont deux caractéristiques remarquables :

- si on excepte l'intervention envisagée des frottements, elles font intervenir essentiellement des facteurs généraux, non spécifiques de la zone de subduction ;
- c'est la température qui est le seul paramètre directement évoqué pour la fusion (si la pression ou les frottements agissent, c'est en faisant augmenter la température).

On est donc dans un cas où une simple explication "centrale", avec magma pré-existant n'est pas possible directement, puisque l'état solide du manteau est une donnée (voir plus haut), mais où les raisonnements et les explications mobilisés par les élèves restent très généralement ceux qui accompagnent une approche "centrale". Et on voit bien en quoi ces raisonnements peuvent être un obstacle à l'adoption d'un modèle "global" où plusieurs paramètres entrent en jeu dans la détermination de la fusion.

(17) Pour une description plus complète de cette situation, voir : ORANGE D. et C. ; La mise en œuvre d'une situation-problème en géologie ; *Biologie-Géologie (Bulletin APBG)*, 1993, 3, 547-555.

2.3. D'une grille des conceptions historiques à une grille didactique

Les exemples présentés ici pourraient être complétés par des entretiens et des productions d'autres classes de même niveau ou de niveau différent (collège, enseignants en formation) : les mêmes grandes catégories de conceptions se dégageraient.

Il apparaît ainsi que les modèles historiques présentés au paragraphe 1 peuvent servir de repères pour l'analyse des modèles spontanés des élèves, dans le cas où celle-ci porte sur l'articulation signification géologique/fonctionnement général des volcans.

Nous donnons en annexe une grille d'analyse des conceptions (grille didactique) construite sur ce principe lors de différentes actions de formation d'enseignants (18).

l'intérêt de cette classification des conceptions des élèves

Ce n'est pas la place ici de discuter dans le détail de la signification de cette correspondance entre analyse historique et analyse didactique. En aucun cas il ne s'agit de trouver tout naturel un quelconque parallélisme. Disons simplement que, étant donné l'axe d'étude choisi, il y a peu de grands types d'explication possibles, et que l'on peut trouver là des raisons à ces similitudes.

C'est plutôt l'intérêt de cette classification des conceptions, fondée sur le fonctionnement général et la signification des volcans, qu'il faut questionner.

Cette grille nous semble justifiée épistémologiquement au regard de la place que jouent actuellement les volcans dans notre vision du fonctionnement interne de la Terre. Elle paraît également pertinente didactiquement dans la mesure où elle permet de dégager des ruptures et des obstacles en nombre réduit qui peuvent servir de guide pour la gestion des apprentissages.

3. REPÈRES POUR LA DÉFINITION D'OBJECTIFS ET DE CONTENUS DE L'ÉCOLE ÉLÉMENTAIRE AU LYCÉE

On peut ainsi définir, avec les intentions annoncées ci-dessus, **trois grands types de conceptions** du volcanisme chez les élèves, de l'école élémentaire au lycée.

D'une de ces conceptions à l'autre la problématique du volcanisme est différente, même si, globalement, les mêmes types de problèmes empiriques, que nous avons signalés à la fin du paragraphe 1, doivent être maîtrisés. Ces conceptions repèrent donc des obstacles que les élèves doivent dépasser à certains moments de leur scolarité ; elles présen-

(18) Christian Orange, Christian Ridao, Équipe de didactique des sciences IUFM de l'Académie de Caen, centre de St Lô.

tent aussi des cadres possibles pour développer, à un moment ou à un autre de leur apprentissage, un savoir théorique sur le volcanisme.

3.1. Objectifs-obstacles pour l'enseignement du volcanisme

Aux trois grands types de conceptions sur la signification des volcans que nous avons caractérisés, peuvent correspondre *a priori* deux grandes ruptures pouvant être traduites en deux objectifs-obstacles (19) : l'un concerne le passage d'une conception "locale" à une conception "centrale" ou magmatique ; l'autre vise une conception "globale".

Parmi les conditions de possibilité d'une conception "globale", il faut noter la compréhension de l'intervention de plusieurs paramètres continus dans la transition solide/liquide et donc une certaine maîtrise des diagrammes (20) P,T, voire P,T,PH₂O.

Tout ceci indique que le second objectif-obstacle n'est guère envisageable avant le lycée.

Quant au premier, il peut faire l'objet d'un travail à l'école élémentaire et au collège.

Il apparaît donc que, dans le cadre choisi ici, la densité des objectifs-obstacles sur l'ensemble de la scolarité est très faible.

les
apprentissages
ne sont pas que
ruptures :

Cela présente l'intérêt de ne pas dénaturer le concept d'obstacle épistémologique (21). D'autre part les deux ruptures pointées sont faciles à situer et peuvent ainsi servir de repères pour la mise en place de situations problèmes.

Mais il devient alors clair que les apprentissages sur le volcanisme ne peuvent se limiter à ces objectifs-obstacles. D'où la nécessité de définir complémentaiement des objectifs d'apprentissage qui ne correspondent pas à des sauts conceptuels importants : ce sont ces apprentissages-là sur lesquels nous avons déjà mis l'accent et que nous avons appelés, en nous référant à la science normale de Kuhn (22), des apprentissages normaux (23).

il faut penser aux
apprentissages
"normaux"

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

(20) Il s'agit des diagrammes à deux (P, T) ou trois dimensions (P, T, PH₂O) qui décrivent les conditions de fusion des roches en fonction des différents paramètres qui interviennent dans cette fusion : pression totale (P), température (T) et pression partielle d'eau (PH₂O).

(21) ORANGE, 1993, op. cit.

(22) KUHN Th., 1983, op. cit.

KUHN oppose la science normale aux périodes présocratiques et aux périodes de révolution scientifique : il s'agit de moments, relativement longs dans l'histoire des sciences, où une communauté scientifique partage un certain nombre de certitudes et de croyances (paradigme) sur le domaine étudié.

(23) ORANGE C. et D. ; Problèmes de rupture, problèmes normaux et apprentissage en biologie-géologie ; *Les Sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*, 1993, 4-5, 51-70.

3.2. Paradigmes scolaires et apprentissages normaux

L'analyse épistémologique et psychologique du volcanisme et de sa signification, conduit donc à une nécessaire hiérarchisation des apprentissages.

Mais qu'il s'agisse d'apprentissages de rupture (correspondant aux objectifs-obstacles) ou d'apprentissages normaux, ils ne peuvent se définir que par rapport à une typologie des grandes conceptions. Les premiers parce qu'ils correspondent au passage d'une conception à une autre ; les seconds parce que, comme leur nom l'indique, ils n'ont de sens qu'à l'intérieur d'une grande conception, choisie par l'enseignant comme paradigme de référence pour la classe.

Cela appelle deux remarques.

1) Cette utilisation d'une "cartographie" des représentations ne doit pas être vue comme une tentative de les chosifier : nous avons insisté sur l'importance du projet didactique dans leur analyse ; nous avons d'autre part davantage mis en avant, pour les caractériser, les problématiques volcaniques que les détails des modèles construits par les élèves ; il est enfin nécessaire de relier ces conceptions à des schèmes ou des types de raisonnement des élèves (24).

2) Le fait de mettre l'accent sur les apprentissages normaux ne nie pas l'importance des conceptions, au contraire : ces apprentissages sont effectués dans une conception bien identifiée et explicitée au sein de la classe.

Ainsi le problème de la répartition des volcans et des séismes, par exemple, n'a d'intérêt géologique que dans une explication "centrale" ou "globale". Sa construction avec les élèves ne peut déboucher sur un modèle de plaques que si la classe, dans son ensemble, est dans l'une ou l'autre de ces conceptions.

D'autre part un modèle de plaques développé dans une conception "centrale" ne sera pas identique à un autre construit dans une problématique "globale" : ils différeront en particulier quant à leurs liens avec le volcanisme et l'origine des magmas.

Ces grandes conceptions jouent donc pleinement le rôle de **paradigme scolaire** à l'intérieur duquel on peut développer des problèmes (des problèmes normaux, selon Kuhn) et des modèles spécifiques.

On voit aussi que, au regard de la science actuelle et des représentations des élèves, deux paradigmes scolaires peu-

il est important de définir des paradigmes scolaires...

ORANGE C. ; *Intérêt de la modélisation pour la définition de savoirs opérants en biologie-géologie* ; Thèse Université Paris 7, 1994.

(24) Ainsi la conception "centrale" est nettement liée à un raisonnement linéaire sur la fusion où un seul paramètre intervient. Pour les raisonnements linéaires en physique, voir, entre autres : VIENNOT L. ; *Raisonnement à plusieurs variables : tendances de la pensée commune* ; *ASTER* N° 14, 1992, 127-141.

vent avoir une certaine pertinence : la conception "globale", et la conception "centrale" avec manteau liquide.

servant de cadre
aux
apprentissages
"normaux

D'une certaine façon, ce concept de **paradigme scolaire** nous semble généraliser celui de **niveau de formulation** introduit par l'équipe Aster il y a une vingtaine d'années. Celui-ci correspond à un énoncé fournissant un pouvoir prévisionnel (25), celui-là donne un cadre de référence pour maîtriser des problèmes normaux ; ils insistent donc l'un et l'autre sur l'aspect opérant (26) du savoir. Mais là où un niveau de formulation renvoie plutôt à un ou quelques concepts et aux énoncés correspondants, le paradigme est un cadre théorique plus général de construction de modèles et d'apprentissages normaux.

3.3. Repères pour un curriculum

On a ainsi, avec la grille didactique, un outil servant à la fois à définir les obstacles possibles et à choisir les paradigmes scolaires envisageables dans une classe.

quel paradigme
scolaire pour le
volcanisme...

Voici ce que peut donner une telle analyse *a priori* - c'est-à-dire avant prise en compte des caractéristiques d'une classe particulière - dans le domaine du volcanisme selon le niveau choisi :

à l'école,

- À l'école (cycle 3), le paradigme scolaire possible est "central" (avec manteau liquide).

On peut s'attendre à ce que certains élèves soient dans une conception "locale", ce qui conduira à définir pour eux un objectif-obstacle (passage local → central) et à développer des situations d'apprentissage de rupture (une situation-problème, par exemple) pour amener toute la classe au paradigme visé. Ce paradigme pourra alors servir de cadre pour des apprentissages normaux, sur le concept de plaques, les caractéristiques des éruptions.

au collège,

- En quatrième, le paradigme scolaire possible est également la paradigme "central". Mais la nécessité de ruptures pour certains élèves (objectif-obstacle) est beaucoup moins probable, tous ayant déjà vraisemblablement un tel point de vue. Tout au plus sera-t-il nécessaire de travailler sur des éléments de ce paradigme (d'où vient précisément la lave, par exemple). Ce paradigme pourra alors servir de référence pour des apprentissages normaux.

au lycée ?

- En première, l'enjeu est l'accès au paradigme "global". Cela correspond à un objectif-obstacle pour l'ensemble des élèves et peut donner lieu à des situations-problèmes que nous avons analysées par ailleurs (27). Nous ne détaillerons pas ici les apprentissages normaux correspondant à

(25) Équipe ASTER ; *Procédures d'apprentissage en sciences expérimentales* ; Paris, INRP, 1985, (p. 33).

(26) ORANGE C., 1994, op. cit.

(27) ORANGE D. et C., 1993, op. cit.

ce paradigme : ils font actuellement l'objet d'une recherche au sein de l'équipe de didactique du CERSE (Université de Caen) et de l'IUFM de l'Académie de Caen.

CONCLUSION

Aux caractéristiques scientifiques et didactiques du volcanisme que nous indiquions en introduction il faut en ajouter une autre : on peut dresser de ce domaine une carte des conceptions (une grille didactique) relativement simple, si on s'en tient à la signification et au fonctionnement général des volcans. Il est donc plus facile de s'y repérer que dans d'autres domaines et cela peut servir ainsi de "laboratoire" pour explorer les liens entre les conceptions des élèves et l'organisation pédagogique de leurs apprentissages. Il est en effet urgent de construire des aides pour permettre aux enseignants de mettre en place un enseignement relevant d'un "modèle didactique", tel que le définit Jean-Pierre Astolfi (28).

En nous appuyant sur l'épistémologie de Kuhn, transposée à la classe, il nous semble ainsi qu'une catégorisation des conceptions qui ne multiplie pas les ruptures et les obstacles, permet d'aboutir à une grille didactique qui soit un outil pour organiser l'enseignement. Il ne s'agit pas de ramener tout apprentissage visé à un changement de grande conception, comme cela a été parfois fait, mais de distinguer les temps didactiques où il s'agit de provoquer des ruptures et ceux où il s'agit d'approfondir l'efficacité et la pertinence de ce que nous avons appelé un paradigme scolaire.

Ces paradigmes, même s'ils ne correspondent pas à celui de la science actuelle, seront effectivement des savoirs scientifiques, théoriques (29) et donc opérants (30), s'ils permettent de développer de véritables compétences de modélisation pour la maîtrise de problèmes normaux.

Christian ORANGE
 Institut Universitaire de Formation
 des Maîtres, Caen
 C.E.R.S.E, Université de Caen

(28) ASTOLFI J.-P. ; *L'école pour apprendre* ; Paris, ESF, 1992, (p. 129).

(29) ASTOLFI J.-P., 1992, op. cit., (p. 36).

(30) ORANGE C., 1994, op. cit.

ANNEXE

RÉFÉRENTIEL POUR L'ANALYSE DES CONCEPTIONS DES ÉLÈVES SUR LE VOLCANISME

Les conceptions des élèves sur le volcanisme peuvent être analysées selon deux référentiels :

- une analyse en termes de grandes conceptions ; une telle analyse permet plus particulièrement de faire une évaluation diagnostique et de définir des objectifs ;
- une analyse selon des questions auxquelles doit répondre toute conception sur le fonctionnement des volcans ; cette analyse permet plus particulièrement de préparer la situation-problème et la phase de problématisation.

1. RÉFÉRENTIEL PAR QUESTIONS FONDAMENTALES

Toute explication sur le fonctionnement d'un volcan peut être interrogée de la façon suivante :

- Comment est expliquée la chaleur du volcan ? Chaleur du centre de la terre ? Chaleur du soleil ? Feu ou réaction chimique ?
- Comment sont expliquées la formation et l'origine de la lave (et des produits volcaniques) ?
- Comment est expliqué le déclenchement de l'éruption ?
- Comment est expliqué le fait qu'il n'y a pas des volcans partout ?

Cela ne veut pas dire que les productions des élèves sur le fonctionnement d'un volcan donneront nécessairement une réponse à toutes ces questions (en particulier aux deux dernières) : cela dépend de la situation-problème choisie et des références des élèves.

2. RÉFÉRENTIEL EN TERMES DE GRANDES CONCEPTIONS

Cette typologie des représentations repose sur une analyse épistémologique prenant en compte l'étude historique des conceptions sur les volcans.

2.1. Conceptions locales

a) Principe fondamental de cette catégorie de conceptions : le volcan est expliqué par un fonctionnement local, indépendant de la structure et du fonctionnement du globe terrestre.

b) Deux variantes principales

- le volcan est lié à un feu, une réaction locale...
- le volcan est lié à un réchauffement local dû au soleil.

NB : dans ces conceptions, la lave est quelquefois considérée comme de la boue chaude (problème de la fusion non maîtrisé).

c) Efficacité et caractéristiques psychologiques de ces conceptions

Ces conceptions permettent d'expliquer le volcan sans avoir à le resituer dans un environnement large : c'est donc une forme d'explication plus simple que les conceptions centrales.

La conception locale liée à un feu est très cohérente : une seule cause (le feu) permet d'expliquer les principaux phénomènes volcaniques (chaleur, lave, "feu" et explosions...). Elle semble cependant peu utilisée par les enfants.

Problème empirique possible : existence de volcans sous-marins.

La conception locale liée au soleil est fréquente : l'enfant trouve dans ses connaissances empiriques la cause la plus évidente d'un réchauffement. Cela est certainement dû également au côté exotique des volcans ce qui les fait lier volontiers aux pays chauds.

Problème empirique possible : existence de volcans dans des pays froids (Islande...).

2.2. Conceptions centrales

a) **Principe fondamental** de cette catégorie de conceptions : le volcanisme est vu comme un phénomène lié aux caractéristiques d'une Terre faite d'une croûte solide (plus ou moins épaisse) surmontant une masse de magma ; ce magma ne demande qu'à sortir si un passage lui est fourni.

b) **Deux variantes** :

a) le magma est vraiment central, avec une "croûte" relativement épaisse,

b) le magma se situe entre une "croûte" assez mince et un noyau.

c) **Pertinence et caractéristiques psychologiques de ces conceptions**

Une condition de possibilité de ces conceptions est la capacité de l'élève à replacer le volcan dans un environnement large.

La cohérence de cette conception repose sur le lien entre température et état de la matière. Si le centre de la Terre est chaud, plus on s'enfonce, plus il fait chaud et plus la roche est fondue.

Problème possible pour la variante très centrale (lorsque la croûte est très épaisse) : l'explication de la remontée du magma.

La plupart des problèmes construits à partir d'une conception centrale ne sont pas du niveau de l'école élémentaire.

2.3. Conception globale

Principe fondamental de cette conception : le magma n'est pas présent partout sous nos pieds mais n'existe qu'à certains endroits particuliers (dorsales, zones de subduction, points chauds) ; il faut donc expliquer la formation de ce magma. Il s'agit là de la conception actuelle du volcanisme (voir Allègre, *Les fureurs de la Terre*)

Cette conception ne concerne pas les élèves de l'école élémentaire.

3. REMARQUE : TECTONIQUE DES PLAQUES ET CONCEPTIONS DU VOLCANISME

Une tectonique des plaques est compatible aussi bien avec une conception centrale, variante b) qu'avec une conception globale. À l'école élémentaire, on peut donc envisager un apprentissage sur la tectonique des plaques après qu'un travail sur les représentations ait permis de faire passer tous les élèves à une conception centrale : il s'agira alors d'une science et d'un apprentissage de type normal (au sens de Kuhn).