

Un modèle pour expliquer la genèse des magmas : exemple de la fusion partielle dans une classe du secondaire

Patricia Schneeberger
Marcelle Goix
Hervé Goix

Laboratoire LACES
Université Bordeaux 4
IUFM d'Aquitaine
F – 33 000 Bordeaux

E-mail:
schneepat@aol.com

Introduction

Cette étude a pour objectif de s'interroger sur les conditions permettant de favoriser l'acculturation scientifique des élèves du secondaire. Dans les magazines destinés à mettre la science à la portée du public (en particulier des jeunes), les journalistes sont confrontés à la question de la simplification des informations et des explications scientifiques. Comment maintenir les deux pôles habituellement en tension : rendre accessible des concepts parfois contradictoires avec les connaissances de la vie courante ? Dans sa classe, le professeur est également confronté à cette question. Il doit alors inventer des moyens pour s'appuyer sur cette tension et la rendre féconde.

Comme dans toutes les sciences, la modélisation est une pratique incontournable en géologie. Les didacticiens des sciences, s'appuyant sur les travaux de S. Bachelard (1979), ont montré l'intérêt de la modélisation dans la construction des savoirs scientifiques (Martinand, 1992, 1994). Certains auteurs (Legay, 1997 ; Desbeaux-Salviat & Rojat, 2006) proposent des pistes pour l'enseignement ou la formation des enseignants. Cependant les enseignants disposent de peu de repères pour construire et conduire des situations d'enseignement/apprentissage faisant appel à des modèles. Peu d'études en effet portent sur la fonction des pratiques de modélisation dans les apprentissages en géologie (Orange-Ravachol, 2006).

L'analyse présentée a été réalisée dans le cadre d'une recherche en didactique des sciences de la Terre avec des élèves de Première S (élèves de 16-17 ans, grade 11) qui a duré plusieurs années. Elle porte sur une séance de travaux pratiques réalisée dans une classe de Première Scientifique au cours de laquelle le professeur demande aux élèves d'essayer d'expliquer, en utilisant un modèle de fusion partielle, la formation d'un magma basaltique, sous la dorsale, dont la composition est différente de celle de la péridotite d'origine

Le modèle utilisé ici « *n'est pas une imitation de la réalité, c'est une projection dans un nouvel espace du phénomène étudié. Il repose sur un dimensionnement qui permet de vérifier que le phénomène observé à l'échelle du laboratoire, sur de courtes durées, est l'exacte représentation du phénomène géologique se déroulant sur des durées géologiques.* » (<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-model-processus-tectoniques.xml>, consulté le 13.01.2011). Il permet donc de reconstituer des phénomènes qui se sont produits dans le passé.

Nous avons observé plusieurs séances dans les classes de deux enseignants (Françoise et Claude) avec lesquels nous avons l'habitude de travailler dans le cadre de la recherche. Notre étude consiste à élucider les difficultés rencontrées par les élèves et à repérer des obstacles susceptibles de freiner l'apprentissage des concepts mis en jeu dans cette séquence d'enseignement-apprentissage.

Notre analyse repose sur les travaux de J.-P. Astolfi et B. Peterfalvi (Astolfi & Peterfalvi, 1993) qui montrent qu'il y a, chez les élèves, une difficulté liée à la conception de la matière et aux représentations qu'ils se font des transformations (changement d'état, réaction chimique). On retrouve cette difficulté lors de la com-

préhension du mécanisme de fusion partielle où il y a nécessité de passer du niveau « fusion de la roche » au niveau « fusion des minéraux constituant la roche ».

Présentation de l'activité proposée aux élèves

Le modèle proposé et son utilisation

Les élèves connaissent la structure du globe, les notions de lithosphère et d'asthénosphère sont supposées acquises, ainsi que la composition minéralogique du granite, du basalte et de la péridotite. En début de séance, le professeur introduit la problématique suivante : comment la fusion de la péridotite peut-elle aboutir à un liquide de composition différente alors que la fusion d'un solide, comme le chocolat, donne un liquide de même composition que le chocolat ? Comment s'effectue donc ce passage solide – liquide ? (Fig. 1)

Le document ci-dessous présente la composition de la péridotite asthénosphérique à l'origine du magma basaltique produit sous la dorsale ainsi que celle du basalte (donc du magma produit). On a ajouté la composition de la péridotite qui se trouve entre le gabbro (provenant du refroidissement du magma basaltique et la péridotite asthénosphérique).

Quel(s) problème(s) soulève l'étude de ce document ?

Document : composition des roches de la lithosphère et de l'asthénosphère						
Roche \ Eléments	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na
Basalte ou gabbro	23,3	7,3	8,8	2,5	7,2	1,9
Péridotite de la lithosphère	20,2	0,3	4,7	30,3	0,1	0,1
Péridotite de l'asthénosphère	20,8	1,9	5,6	25,8	2,2	0,5

Fig. 1 : Extrait de la fiche de préparation du professeur.

Le modèle proposé est composé d'un tube à essais contenant quatre corps formant un solide complexe et possédant chacun une température de fusion différente : de bas en haut, de la cire, de la paraffine, de la végétaline et de la graisse (Fig. 2).

Les élèves doivent étudier la variation, en pourcentage, de la composition du liquide obtenu lors de la fusion du solide complexe en suivant la consigne donnée par le professeur (Fig. 3).

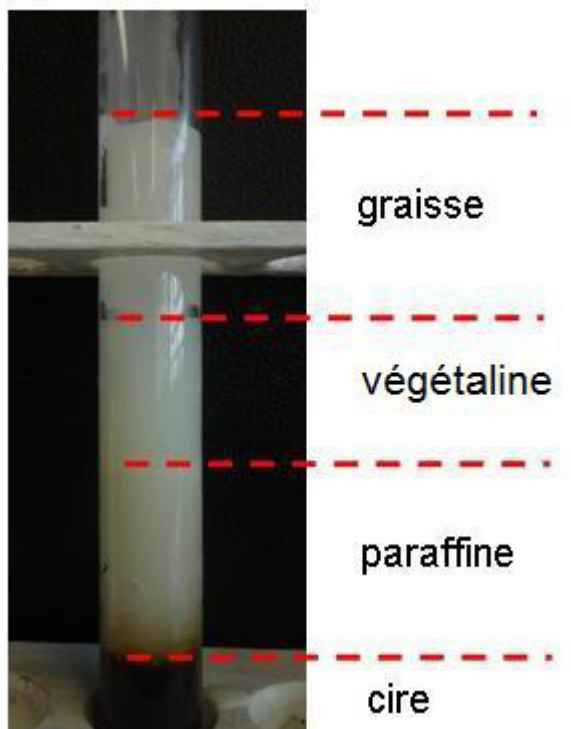


Fig. 2 : Modèle utilisé : un solide composé de quatre constituants différents (cire, paraffine, végétaline et graisse de canard) et soumis à différentes températures.

Un modèle pour expliquer

Le modèle utilisé sera le suivant : un solide (actuellement au congélateur à -15°C) dans un tube à essai est composé de quatre constituants différents (cire, paraffine, végétaline et graisse de canard). On le soumet à une expérience de fusion :

Placer le tube dans le bain-marie et ajouter un thermomètre. Allumer le bain-marie.

Chaque binôme réglera la température du bain-marie à une des valeurs suivantes : 15°C , 25°C , 40°C et 60°C . Veiller à ce que le bain-marie soit suffisamment rempli d'eau pour que le solide (dans le tube à essais) soit immergé.

Placer le tube à essai quelques minutes et surveiller l'état de fusion du solide. ATTENTION ! LA FUSION PEUT ÊTRE TRÈS RAPIDE ! IL FAUT ÊTRE ATTENTIF !

Repérer l'état des différents constituants et indiquer, sur le tableau joint :

- la composition de la phase liquide et le pourcentage de chacun des constituants ;
- la composition de la phase solide et le pourcentage de chacun des constituants.

Voir les résultats des autres binômes pour compléter le tableau.

- *résumer* les résultats de cette expérience en se concentrant sur l'évolution de la composition du liquide par rapport à celle du solide.

Fig. 3 : Document distribué aux élèves.

Document 3				
Conditions thermodynamiques • Température • Pression	Composition de la phase liquide	% de chaque matériau dans la phase liquide	Composition de la phase solide	% de chaque matériau dans la phase solide
0°C P atmosphérique = 101,3 kPa			G V P C	25% 25% 25% 25%
25°C P atmosphérique = 101,3 kPa	G	100%	G V P C	14% 26% 25% 34%
40°C P atmosphérique = 101,3 kPa	G V	50% 50%	P C	50% 50%
60°C P atmosphérique = 101,3 kPa	G V P	45% 45% 10%	P C	42% 58%
V : végétaline G : grasse de canard P : paraffine C : cire				

Tabl. 1 : Résultats obtenus lors du refroidissement du solide de départ.

Productions des élèves

A l'issue de cette activité, les élèves présentent les résultats obtenus sous la forme d'un tableau (Tabl. 1).

Ils doivent ensuite fournir une interprétation sous la forme d'un court texte de ce type : *Lors de la fusion d'un mélange hétérogène, la composition du liquide obtenu varie tout au long de cette fusion. Le premier liquide formé a la composition du solide le plus fusible. A terme, on obtient un liquide composé des matériaux qui ont fondu (ici G, V P) et le solide résiduel est composé des matériaux qui n'ont pas fondu (ici P et C).*

Document 2 : étude expérimentale de la fusion d'une péridotite

Bowen, en 1915, réalise une fusion à sec d'une péridotite semblable à la péridotite asthénosphérique dont la composition était la suivante :

- Olivine (Fe,Mg)SiO₄
- Pyroxènes ferro-magnésiens (Mg,Fe)₂Si₂O₆
- Pyroxènes calciques (Mg,Fe)CaSi₂O₆
- Feldspaths plagioclases (Ca, Na)Al₂Si₃O₈

Il s'aperçoit que, lors de la fusion, la phase résiduelle solide et la phase liquide évoluent, leurs compositions varient :

1^{ère} étape : les plagioclases (de la phase solide) disparaissent ;
 2^{ème} étape : les pyroxènes calciques disparaissent, la phase liquide augmente ;
 3^{ème} étape : les pyroxènes ferro-magnésiens disparaissent ; il ne reste plus que de l'olivine dans la phase solide.

D'après Geowiki
http://www.geowiki.fr/index.php?title=Evolution_chimique_des_magmas

Fig. 4 : Document sur les expériences de Bowen distribué aux élèves

Pour aider les élèves à appliquer le modèle proposé à la fusion de la péridotite, le professeur met à leur disposition une présentation très succincte des résultats des expériences de Bowen sur la fusion différentielle de minéraux composant une péridotite (Fig. 4). En repérant des similarités entre le modèle utilisé en classe et les expériences de Bowen, les élèves peuvent déduire que la composition du liquide obtenu par fusion partielle de la péridotite a la composition des minéraux les plus fusibles.

Les difficultés rencontrées par les élèves

La question du point de vue

Nous avons remarqué, les années précédentes, que les élèves avaient des difficultés à comprendre la nécessité de se placer au niveau particulière. En effet, si on se place au niveau du minéral, on comprend que la fusion va libérer dans le milieu des molécules qui composaient le solide. Sachant que ces particules varient en fonction des minéraux, si les minéraux fondent de manière différentielle, le liquide sera composé des molécules provenant des seuls minéraux fondus. Sa composition évolue donc tout au long du refroidissement. Alors que les scientifiques considèrent que le passage à l'état liquide est une modification des interactions entre particules composant les minéraux, les élèves de 1^{ère} Scientifique en restent souvent au niveau du continu. En d'autres termes, ils ne « voient » pas les assemblages moléculaires qui constituent la roche. Pour eux, la roche est un tout et, quand elle fond, elle fond comme le beurre, en donnant un liquide de même composition que le solide. L'introduction du modèle élaboré par le professeur a donc pour objectif principal de faire prendre conscience aux élèves de la nécessité de changer de mode de raisonnement, c'est-à-dire de leur faire effectuer une rupture épistémologique.

Deux ruptures successives mal négociées par certains élèves

La manière dont les élèves notent les résultats et les explications produites signale des difficultés récurrentes. Il y aurait, selon nous, une première rupture à effectuer pour entrer dans le problème : se détacher de la situation expérimentale pour s'intéresser à la composition. En appliquant le modèle, les élèves devaient comprendre que la composition du liquide obtenu par fusion partielle de la péridotite correspond à la composition des minéraux les plus fusibles. Cependant, certains élèves semblent n'avoir retenu que l'expression « on fait fondre ». Ils s'intéressent uniquement à l'ensemble qui fond et ne citent que le pourcentage de matière fondue. En revanche, d'autres élèves semblent avoir dépassé le niveau de l'explication considérant que c'est la roche qui fond globalement. Toutefois, pour eux, les minéraux persistent d'une manière ou d'une autre à l'état fondu. C'est le cas de Yoann qui dit que « *les minéraux liquides se regroupent et forment le magma basaltique* » ou encore de Benjamin qui représente le phénomène par le schéma de la figure 5.

Enfin d'autres élèves ont bien mobilisé un niveau d'explication faisant appel au niveau particulière, même si leurs énoncés gardent quelques ambiguïtés : « La fusion

provoque la séparation des éléments juxtaposés dans le solide », « la roche a partiellement fondu, certains éléments s'éparpillent et se mélangent ».

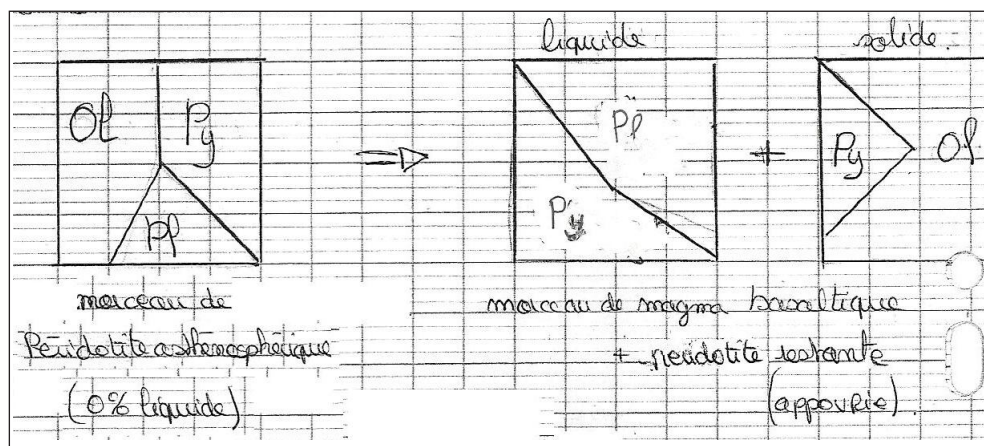


Fig. 5 : Schémas de Benjamin.

Progrès des élèves et limites du modèle

L'analyse des interactions et des écrits des élèves montre qu'ils se saisissent (ou non) du modèle proposé avec des orientations différentes. Cette situation de classe présente toutefois des limites dans l'aide apportée aux élèves. En effet, si les élèves ont progressé en plaçant leur explication au niveau particulière, le modèle reste pour la plupart d'entre eux une imitation de la réalité. Ainsi, pour Arthur : « Notre expérience n'est qu'une imitation de tout cela (il n'y a pas de graisse, ... sous Terre). Ce n'est donc pas la réalité elle-même représentée ».

Une autre limite qui est apparue est la comparaison partie par partie que les élèves font entre modèle et réel. En effet, si cette comparaison permet de prendre en compte le modèle et de s'intéresser à la composition du liquide, elle risque de bloquer le raisonnement qui resterait ancré dans la situation concrète proposée aux élèves. L'élève utilise la première situation comme un étayage fourni par le professeur mais il ne parvient pas à se passer de cette aide dans une situation nouvelle. C'est le cas de Lauriane : « On a donc un ordre de fusion exactement comme les minéraux. On peut donc dire que la végétaline représente les plagioclases, la graisse d'olive représente le pyroxène et le reste, l'olivine. L'expérience représente donc la fusion de la péridotite à différentes températures ».

Les aides à prévoir

Les déplacements évoqués ci-dessus ne se font pas spontanément. Il faut souvent forcer le passage pour que les élèves s'arrachent à leurs modes de conception de la matière, ancrés sur du continu, pour accéder à des modes de raisonnement mobilisant l'idée de discontinu. Deux modalités ont été utilisées :

- la schématisation. En obligeant les élèves à représenter la matière au niveau particulière, on les force à utiliser les connaissances de chimie sur la matière dans un contexte différent. Les élèves savent, depuis la classe antérieure, que la matière est composée de particules (atomes, molécules, etc.) en agitation constante et que l'état liquide est caractérisé par une agitation plus intense de ces particules. Ils peuvent alors mobiliser leurs connaissances comme le montre le schéma réalisé par Yann (Fig. 6).
- le passage au texte. Le texte de Noémie est un exemple de texte où l'élève explicite son raisonnement au niveau particulière : « D'après le doc.3 [expérience de Bowen], on s'aperçoit que la fusion se fait sous plusieurs étapes et que tous les minéraux ne se liquéfient pas. Dans la 1ère étape seulement les plagioclases « disparaissent » de l'état solide comme à 30°C lors de l'expérience faite en classe où seulement la graisse se liquéfie. La péridotite est composée de minéraux olivine, pyroxène calcique et ferromagnésien et de feldspaths plagioclases qui sont eux-mêmes composés de composants chimiques comme le Ca, l'O qui forment la composition chimique de la péridotite. Lors de la fusion de la péridotite certains des minéraux disparaissent et forment le liquide obtenu qui est le magma. [...] Donc le magma ne possède pas les mêmes minéraux que la péridotite, donc ne possède pas les mêmes composants chimiques : la composition chimique du magma et de la péridotite sont différentes. »

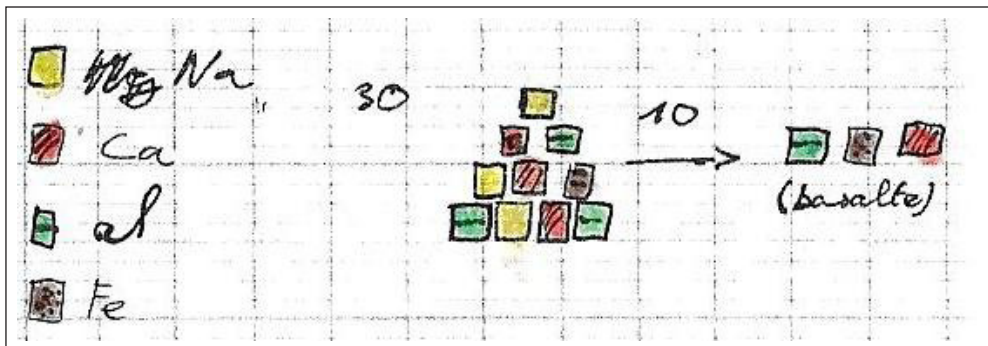


Fig. 6 : Production de Yann.

Conclusion

L'expérience proposée indique qu'il est possible de faire progresser les élèves dans l'utilisation d'un modèle adapté pour l'explication de la fusion partielle. En effet, cette dernière nécessite la mobilisation de connaissances de chimie que les élèves possèdent mais qu'ils n'utilisent pas de manière spontanée. L'utilisation de mêmes connaissances dans un contexte différent représente une source de difficulté. Pourtant, la compréhension de la modification de la composition chimique lors de la fusion partielle suppose bien une rupture : passer de l'observé, du sensible, à la matière modélisée. Cette rupture n'est pas facile à réaliser ; le discours du scientifique est sur les deux niveaux différents : le réel observé et le réel interprété. Ainsi lorsqu'Auguste Michel-Lévy, au XIX^e siècle, décrit le granite de Flamanville, il décrit

des morceaux de roches englobés dans le magma (Michel-Lévy, 1893). Cela signifie qu'il jongle avec les deux niveaux : l'observé, représenté par le granite, et ce qu'il représente, le magma intrusif. Souvent, l'enseignant, comme le vulgarisateur, est sur ce double niveau de formulation. D'où la difficulté pour l'élève de changer de niveau : il interprète le discours de l'enseignant à l'aide de ses représentations. L'enseignant a beau savoir que l'élève n'est pas sur le même registre que lui, il interprète les réponses des élèves en fonction de ses connaissances. Si, par malheur ou par bonheur, l'élève prononce des mots qui lui conviennent, il continue le plus souvent le même discours sans se rendre compte des malentendus. Nous pensons toutefois que l'enseignant a pour rôle de faire prendre conscience à l'élève du niveau où il est afin de lui fournir les aides nécessaires à ses progrès.

Bibliographie

- Allemand P. *Pourquoi et comment modéliser les processus tectoniques ?* Disponible sur <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-model-processus-tectoniques.xml> (consulté le 13 janvier 2011).
- Astolfi J.-P., Peterfalvi B. (1993). Obstacles et constructions de situations didactiques en sciences expérimentales. *Aster*, 16, 103-141.
- Bachelard S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justifications des modèles. In Delattre P., Thellier M. (eds). *Elaboration et justifications des modèles*, Paris, Maloine, 3-18.
- Desbiaux-Salviat R., Rojat D. (2006). Réalité et virtualité dans l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre. *Aster*, 43, 109-132.
- Legay J.-M. (1997). *L'expérience et le modèle. Un discours sur ma méthode*. Paris, INRA éditions.
- Martinand J.-L. (Coord.) (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP
- Martinand J.-L. (Coord.) (1994). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP.
- Michel-Lévy A. (1893). Contribution à l'étude du granite de Flamanville et des granites français en général. *Bulletin des services de la carte géologique de la France et des topographiques souterraines*, 5(36), 1-41.
- Orange Ravachol D. (2007). Modèles et modélisation : les travaux menés par le séminaire de recherche en didactique des sciences de la Terre. In *Actes du 3e colloque sur l'« Enseignement et Vulgarisation des Sciences de la Terre de l'école à l'Université »*. Nice, mai 2007. Cédérom, 3 pages.