

UFR Lettres et langages
Ecole doctorale Cognition, éducation, Interaction
Centre de recherches en éducation de Nantes – CREN

Université Saint-Joseph Faculté des sciences de l'éducation

Année 2011

THESE

Pour Obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE NANTES

&

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE SAINT-JOSEPH DE BEYROUTH

Discipline : Sciences de l'éducation
Spécialité : Didactique des disciplines

Présentée et soutenue publiquement par

Hanaà CHALAK

Le 30 janvier 2012

**Conditions didactiques et difficultés de construction de savoirs
problématisés en sciences de la Terre :**

étude de la mise en texte des savoirs et des pratiques enseignantes dans des séquences
ordinaires et forcées concernant le magmatisme (collège et lycée).

Directeur de thèse: Christian ORANGE
Co-directeur de thèse: Fadi EL-HAGE
Co-encadrant: Denise ORANGE RAVACHOL

JURY

Mme Patricia SCHNEEBERGER, Professeur, Université de Bordeaux IV, Rapporteur
M. Bernard REY, Professeur émérite, Université libre de Bruxelles, Rapporteur
M. Christian ORANGE, Professeur, Université de Nantes
M. Fadi El HAGE, Professeur, Université Saint-Joseph, Beyrouth
Mme Denise ORANGE RAVACHOL, Maître de conférences, HDR, Université de Nantes

*« On prend une meilleure vue d'un paysage en montant sur
une colline qu'en restant à son pied ».*

(Hallam, A. 1976)

Une révolution dans les
sciences de la Terre

Remerciements

Enfin! J'ai déposé ma thèse! Mais ce n'est que le début d'un long parcours et quel début ! Qui aurait dit qu'un jour je préparerais une thèse en didactique des sciences ? La didactique, il y a quelques années ce mot m'était étrange. J'ai débarqué dans ce domaine par hasard et j'en suis devenue une véritable passionnée. Que dire alors des sciences de la Terre, discipline que je n'ai fait que fuir pendant mon cursus scolaire et universitaire ! Et me voilà plongée dans son univers historique, épistémologique et scientifique si captivant. Au terme de cette aventure si enrichissante, j'aimerais remercier tous ceux et celles qui ont participé directement ou indirectement à son élaboration.

Je remercie profondément Denise et Christian Orange pour leur suivi, leur disponibilité, leur patience et leur soutien continu pendant les moments difficiles. Merci pour tout le temps que vous avez consacré pour la réflexion et la discussion de ce travail.

Je remercie Fadi El Hage, mon codirecteur de thèse, pour son encadrement et ses remarques.

Tous mes remerciements à Patricia Schneeberger et à Bernard Rey pour avoir accepté de lire ce travail.

J'adresse mes remerciements aux enseignantes Marie Jurvilliers et Isabelle Rest qui m'ont accueillie dans leurs classes et accepté de consacrer une partie de leur temps à cette étude. Je remercie également les enseignantes Valérie Royer et Véronique Trassard pour leur participation notable à la mise en place des séquences. Ce projet n'aurait pas vu le jour sans votre collaboration à vous toutes.

Je remercie infiniment l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) pour la bourse d'études qu'elle m'a accordée. Ce travail n'aurait pas pu exister sans leur soutien et leur programme de valorisation de la recherche francophone.

Je remercie énormément tous mes amis au Liban et en France qui ont toujours été à mes côtés et n'ont pas cessé de m'encourager.

Je termine en remerciant ma mère et ma tante qui ne pourront pas lire ce travail mais qui sont à l'origine de son aboutissement. Je n'oublie pas mon oncle et sa famille pour leur soutien incessant. A vous tous, je dois beaucoup et je ne serais pas arrivée jusque là sans votre présence à mes côtés.

A mon compagnon, qui a appris à vivre avec ce travail, j'apporte la réponse à sa question tant posée pendant les trois années précédentes : « Ça y est, j'ai fini ma thèse ! ». Merci d'avoir supporté mes tempéraments et mon stress. Je remercie également toute sa famille pour leur support, leurs encouragements, et leur préoccupation.

Ce travail n'aurait pas existé sans la contribution de chacun de vous, je vous remercie infiniment.

Résumé

Notre étude porte sur des textes de savoirs (oraux et écrits) produits lors d'une séquence ordinaire (en classe de 4^{ème}) et de deux séquences « forcées » (en classes de 4^{ème} et de Terminale S) dans le domaine du magmatisme, et sur leurs relations avec les pratiques enseignantes de mise en textes. Elle vise à repérer les difficultés et les conditions didactiques d'accès à des savoirs et à des textes problématisés. Nous nous appuyons à la fois sur des outils empruntés au cadre théorique de la problématisation, à la théorie anthropologique du didactique (TAD) et à la didactique professionnelle pour modéliser et mieux comprendre les pratiques de mise en texte enseignantes. Il apparaît que la mise en texte problématisé présente des difficultés en raison de techniques enseignantes centrées sur le repérage et le tri des solutions dans le but d'identifier la bonne solution au problème posé. Ces techniques semblent justifiées par des technologies marquées par les conceptions épistémologiques et didactiques des enseignants et la forme habituelle des savoirs scientifiques scolaires. Par opposition, la construction des savoirs et des textes problématisés nécessite des interventions enseignantes conduisant à des sauts abstraits permettant de faire passer les élèves des idées aux raisons qui sous-tendent les solutions. Dans une logique de problématisation, nous repérons quelques conditions pour que ces techniques de mise en texte puissent aboutir à la construction de textes problématisés et non propositionnels.

Mots-clés : Problématisation, mise en texte des savoirs, pratique enseignante, recherches collaboratives, magmatisme, didactique des sciences de la Terre.

Title

Didactic conditions and difficulties of construction of problematized knowledge in Earth Sciences: study of knowledge text-working and teaching practices in regular and forced sequences concerning magmatism (middle and high school).

Abstract

Our study focuses on knowledge texts (oral and written) produced in a regular sequence (in fourth grade class) and two “forced” sequences (in eighth and twelfth grade classes) in the magmatism area and their relationship with the text-working teaching practices. It aims to identify difficulties and didactic conditions of access to knowledge and problematized texts. We rely on both tools borrowed from the theoretical framework of problematization, the anthropological theory of didactics (ATD) and professional didactics to model and understand text-working teaching practices. It appears that problematized text-working presents technical difficulties due to teaching practices focused on identifying and sorting solutions in order to determine the right one for the problem. These techniques seem justified by technologies marked by the epistemological and didactic conceptions of teachers and the usual form of scientific knowledge at school. In contrast, the construction of knowledge and problematized texts requires of teaching actions leading to leaps of abstraction, allowing students to move from ideas to the reasons underlying the solutions. From a problematization logic, we identify some conditions for these text-working techniques to lead to the construction of problematized and non-propositional texts.

Keywords: Problematization, knowledge text-working, teaching practices, collaborative researches, magmatism, Earth Sciences didactics.

Table des matières

Liste des figures	12
Liste des tableaux	15
Introduction générale.....	17
Chapitre 1. Mise en texte des savoirs scientifiques, problématisation et activités langagières	
21	
Introduction	22
1. Pratiques des chercheurs en sciences et mise en texte des savoirs scientifiques	22
1.1 De la pratique scientifique à l'élaboration du savoir en sciences.....	23
1.2 Communication des résultats du travail des scientifiques	25
2. Transposition du travail des scientifiques en classe : mise en texte des savoirs scolaires	29
2.1 Les contraintes et les effets engendrés par la mise en texte des savoirs scolaires dans les programmes officiels	29
2.2 Conséquence : le propositionnalisme, une caractéristique des savoirs scolaires	31
2.3 L'oubli du problème comme explication des savoirs réifiés	33
2.4 Rôle du lien « problème-savoir » dans la construction des savoirs problématisés.....	35
2.4.1 La construction des problèmes pour accéder aux savoirs problématisés	36
2.4.2 Les débats scientifiques : des moments privilégiés pour problématiser.....	39
2.4.3 Problématisation scientifique, théorique/problématisation technique.....	42
2.5 Difficultés induites par la forme textuelle des savoirs scolaires	44
3. Activités langagières, apprentissages scientifiques et construction des savoirs scolaires problématisés.....	45
3.1 Revue des pratiques ordinaires orales et écrites en classe des sciences	46
3.2 L'accès aux savoirs problématisés par l'intermédiaire des activités langagières.....	50
Conclusion et première formulation des questions de recherche	52
Chapitre 2. Etude épistémologique et historique du magmatisme dans le cadre de la problématisation.....	55
Introduction	56

1. Positionnement du magmatisme par rapport aux pôles fonctionnaliste et historique de la géologie	56
2. La problématisation en sciences de la Terre : cadre théorique didactique pour les analyses historiques et épistémologiques du magmatisme	60
3. L'explication du magmatisme dans l'histoire des sciences de la Terre	61
3.1 De l'explication locale à l'explication centrale magmatique	62
3.1.1 Le modèle local du magmatisme au XVIII ^e siècle et l'œuvre de Buffon.....	62
3.1.2 Continuités et ruptures dans les explications de Buffon.....	68
3.1.3 Le neptunisme et l'origine aqueuse des roches crustales	70
3.1.4 Le vulcanisme, le plutonisme et l'origine ignée des roches crustales	71
3.1.5 La maturation du modèle central magmatique au XIX ^e siècle	77
3.2 Vers une explication globale du magmatisme au XX ^e siècle	84
3.2.1 Les différents modèles du XX ^e siècle concernant la structure et l'état physique de l'intérieur de la Terre.....	85
3.2.2 La Low Velocity Zone (LVZ) et l'origine du magma.....	89
3.2.3 Les conséquences de la découverte de la radioactivité et des expériences de fabrication des roches au laboratoire	90
3.2.4 Les caractéristiques de l'explication globale magmatique	92
Conclusion et deuxième formulation des questions de recherche.....	93
Chapitre 3. Méthodologie de recherche et domaine d'étude.....	95
Introduction	96
1. Explicitation des objectifs de recherche	96
2. Objets d'étude, niveaux de classes et situations de travail retenues	97
2.1 Objets d'étude retenus et choix des classes	97
2.2 Choix et intérêts d'une méthodologie basée sur des séquences ordinaires et des séquences forcées.....	100
2.3 Entretiens d'autoconfrontation avec les enseignants portant sur les situations de débats scientifiques	107
3. Méthodologie d'analyse des corpus ordinaires et forcés dans le cadre théorique de la problématisation	111
3.1 Principes d'analyse du scénario didactique des séquences étudiées	113
3.2 Principes d'analyse des différents textes produits lors des séquences	114

3.2.1 Les écrits initiaux individuels et de groupe	114
3.2.2 Les écrits intermédiaires et finaux	120
3.3 Principes d'analyse des pratiques enseignantes de mise en texte.....	121
3.3.1 Modélisation praxéologique des pratiques enseignantes de mise en texte et apports de la théorie anthropologique du didactique	121
3.3.2 Analyse de l'activité de mise en texte en situation dans une perspective de problématisation et de didactique professionnelle.....	123
4. Conclusion.....	125

Chapitre 4. Etude de la mise en texte et des pratiques enseignantes en jeu lors d'une séquence ordinaire traitant le problème de l'origine des matériaux volcaniques en classe de 4^{ème}

Introduction	128
1. Analyse globale du scénario didactique de la séquence.....	128
1.1 Contexte général de la séquence ordinaire de classe étudiée	128
1.2 Description et organisation détaillée du corpus d'étude.....	129
1.3 Caractéristiques générales de la séquence d'enseignement-apprentissage.....	132
2. Caractérisation des différents écrits produits lors de la séquence	135
2.1 Les écrits initiaux individuels et de groupe	136
2.2 Les écrits intermédiaires E1 et E2	139
2.3 Les écrits finaux E3 et E4.....	141
3. Modélisation praxéologique des pratiques ordinaires de mise en texte de l'enseignante	145
4. Etude de la mise en texte du problème de l'origine des matériaux volcaniques lors du débat et de l'exploitation de la documentation scientifique	150
4.1 Au cours du débat collectif et de l'explicitation des solutions possibles	150
4.1.1 Problèmes abordés pendant le débat scientifique	153
4.1.2 Analyse des questions posées par l'enseignante lors du débat.....	159
4.2 Au cours de la confrontation avec la documentation scientifique et de la critique des solutions possibles	161
4.2.1 Emergence de la relation de causalité simple entre l'activité sismique et volcanique ..	162
4.2.2 Construction de l'écrit intermédiaire E2	164
4.3 Conclusion	166
5. Etude de l'entretien d'autoconfrontation réalisé avec l'enseignante 1 concernée	167

5.1 Présentation des conditions de mise en œuvre de l'entretien	167
5.2 Analyse de l'entretien d'autoconfrontation portant sur un débat scientifique.....	168
5.2.1 Questions posées par les élèves lors du débat	168
5.2.2 Interventions ou questions de l'enseignante.....	170
5.2.3 Le temps laissé aux élèves pendant le débat.....	171
6. Conclusion et difficultés d'une mise en texte problématisé des savoirs lors de la séquence ordinaire analysée.....	174

Chapitre 5. Etude de la mise en texte et des pratiques enseignantes en œuvre lors d'une séquence forcée sur le fonctionnement des volcans et l'origine des matériaux volcaniques en classe de 4^{ème}..... 176

Introduction	177
1. Analyse globale du scénario didactique forcé.....	177
1.1 Conception de la séquence forcée d'enseignement-apprentissage	177
1.2 Description détaillée des réunions de travail du groupe de recherche et de l'organisation de la séquence forcée.....	180
1.3 Caractéristiques générales de la séquence construite par le groupe de recherche.....	190
2. Caractérisation des différents écrits produits lors de la séquence forcée.....	193
2.1 Les écrits initiaux individuels et de groupe	194
2.2 Les écrits intermédiaires E1 et E2	196
2.2.1 Etude des argumentations pour et contre le fonctionnement des modèles explicatifs (E1)	196
2.2.2 Classement des raisons de non fonctionnement en deux catégories (E2)	204
2.3 Les écrits finaux (E3a et E3b)	205
3. Modélisation praxéologique des pratiques enseignantes de mise en texte.....	206
4. Etude de la mise en texte du problème du fonctionnement des volcans au cours des moments de travail.....	213
4.1 Lors du débat collectif	214
4.1.1 Analyse globale et construction de la macrostructure du débat	215
4.1.2 Des moments d'exploration des possibles et de construction des nécessités	218
4.1.3 Des moments de fermeture des possibles	222
4.1.4 L'espace des contraintes en jeu pendant le débat	223
4.1.5 Conclusion.....	225

4.2 Lors de la catégorisation des raisons de non fonctionnement	225
4.3 Lors de l'exploitation de la documentation scientifique	228
5. Etude de l'entretien d'autoconfrontation réalisé avec l'enseignante 2 et portant sur le débat scientifique	230
5.1 Présentation des conditions de mise en place de l'entretien.....	230
5.2 Analyse de l'entretien d'autoconfrontation	231
5.2.1 Moments d'ouverture et de fermeture des possibles	232
5.2.2 Participation des élèves pendant le débat et fonctionnement idéal d'un débat	234
6. Conclusion.....	236
Chapitre 6. Etude de la mise en texte et des pratiques enseignantes en œuvre lors d'une séquence en partie forcée portant sur le magmatisme des zones de subduction en classe de Terminale S	238
Introduction	239
1. Analyse générale du scénario didactique forcé	239
1.1 Conception de la séquence forcée d'enseignement-apprentissage	239
1.2 Description détaillée des discussions du groupe de recherche et de l'organisation des séances forcées	242
1.3 Caractéristiques générales de la séquence forcée construite par le groupe de recherche..	248
2. Caractérisation des écrits élaborés lors de la séquence forcée	251
2.1 Les écrits initiaux individuels et de groupe	251
2.2 Les écrits intermédiaires (E1 et E2)	254
2.2.1 Etude quantitative des argumentations	254
2.2.2 Etude qualitative des argumentations	257
2.2.3 Bilan	266
3. Modélisation praxéologique des pratiques enseignantes de mise en texte.....	267
4. Etude de la mise en texte du problème du magmatisme des zones de subduction lors du débat scientifique	270
4.1 Analyse globale et construction de la macrostructure du débat	270
4.2 Construction de l'impossibilité de fonctionnement de l'explication A	273
4.3 Construction de la possibilité et de l'impossibilité de fonctionnement de l'explication B	276
4.4 Eléments de construction de la possibilité et de l'impossibilité de fonctionnement de l'explication C	278

4.5 L'espace des contraintes en jeu lors du débat de Terminale S	280
4.6 Bilan.....	281
5. Conclusion du chapitre 6.....	282
Chapitre 7. Discussion générale et mise en perspective des trois études des mises en textes scolaires	284
Introduction	285
1. Difficultés d'une mise en texte problématisé des savoirs dans le domaine du magmatisme..	285
1.1 Logique de repérage et de tri des solutions	286
1.2 Techniques de mise en texte mobilisées dans le repérage et le tri des solutions.....	288
1.2.1 Production d'un pluri-texte propositionnel et repérage des solutions possibles	289
1.2.2 Production d'un mono-texte argumentatif et tri des solutions	289
1.2.3 Production d'un mono-texte propositionnel intégrant la bonne solution	290
1.3 Technologies justifiant les techniques mobilisées dans la mise en texte propositionnelle des savoirs dans le domaine du magmatisme	291
1.4 Problématiser et mettre en texte le concept de magmatisme dans le cadre scolaire	293
2. Conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé des savoirs dans le domaine du magmatisme	295
2.1 Travail d'abstraction et de généralisation dans la construction des savoirs problématisés	295
2.1.1 Techniques de mise en texte problématisé : passer des idées aux raisons à travers l'introduction de sauts abstraits	296
2.1.2 Induire et accompagner le travail de problématisation.....	301
2.2 Rôle des activités langagières dans la mise en texte des savoirs.....	302
2.3 Apports des méthodes des séquences ordinaires et forcées dans la compréhension des difficultés et des conditions de possibilités de la mise en texte problématisé.....	303
3. Conclusion.....	304
Conclusion générale	305
1. Apports de notre recherche	305
2. Limites et perspectives de notre recherche	306
Bibliographie.....	308

Liste des figures

Figure 1. Changements dans le langage et dans le statut du savoir lorsque des idées et des affirmations se transforment en « faits » avérés (d'après Sutton, 1995, p. 42, modifié).	28
Figure 2. Les textes d'un manuel scolaire inspiré de la problématologie de Michel Meyer (d'après Fabre, 2007, p.77).	35
Figure 3. Relation entre le problème, sa solution et les raisons dans un savoir problématisé et dans un savoir propositionnel.....	37
Figure 4. Les deux types de problématisation technique et théorique (d'après Orange, 2005, p.81 et Orange, 2008)......	43
Figure 5. Les sciences de la Terre, entre un pôle fonctionnaliste et un pôle historique (d'après Orange Ravachol, 2003)......	58
Figure 6. Schéma de la modélisation de l'espace des contraintes (d'après Orange, 2000).	61
Figure 7. Espace des contraintes de Buffon (modèle local du magmatisme).	65
Figure 8. Les phénomènes volcaniques, la formation des roches et la structure de la Terre expliqués séparément dans le modèle central buffonien.	67
Figure 9. La chaleur interne explique la formation des roches tandis que les phénomènes volcaniques sont expliqués séparément par Buffon (1778).	69
Figure 10. Le modèle de Terre de Cordier avec une croûte mince et un intérieur en fusion (Deparis & Legros, 2000, p.280)......	79
Figure 11. L'explication des phénomènes volcaniques et de la formation des roches reliée à la structure de la Terre dans le modèle central magmatique.	80
Figure 12. Espace des contraintes des partisans du modèle central du magmatisme.....	81
Figure 13. Le modèle consensuel de la Terre des années 1870-1880 (Deparis & Legros, 2000, p.377)......	84
Figure 14. Espace des contraintes du modèle global magmatique.....	93
Figure 15. Les phases de la méthodologie d'ingénierie didactique (d'après Artigue, 1990).	101
Figure 16. Méthodologie générale d'analyse des séquences ordinaires et forcées de notre recherche.	112
Figure 17. Catégories d'explications des élèves de 4 ^{ème} concernant le fonctionnement des volcans.....	117

Figure 18. Catégories d'explications des élèves de Terminale S concernant le fonctionnement des zones de subduction.	119
Figure 19. Méthodologie mise en œuvre pour étudier la mise en texte et les pratiques de savoirs en sciences de la Terre.	126
Figure 20. Résultat du débat scientifique (E1).	130
Figure 21. Résultat de la confrontation avec la documentation scientifique (E2).	130
Figure 22. Écrit bilan final sur l'origine des manifestations de l'activité volcanique (E3).	131
Figure 23. Schéma bilan final de la coupe d'un volcan actif (E4).	131
Figure 24. Les écrits produits lors de la séquence ordinaire de 4 ^{ème}	135
Figure 25. Les productions de groupe élaborées par les élèves de 4 ^{ème} concernant l'origine des matériaux volcaniques selon leur ordre de passage dans le débat (séquence ordinaire).	138
Figure 26. Modélisation praxéologique des techniques enseignantes de mise en texte du problème de l'origine des matériaux volcaniques.	147
Figure 27. Le savoir-faire de mise en texte ordinaire de l'enseignante (bloc pratico-technique).	149
Figure 28. Les moments de travail repérés pendant la séquence ordinaire de 4 ^{ème} permettant le passage d'un écrit à l'autre.	150
Figure 29. Macrostructure du débat scientifique de la classe de 4 ^{ème} concernant l'origine des matériaux volcaniques.	152
Figure 30. Affiche du premier groupe (séquence ordinaire 4 ^{ème}).	155
Figure 31. Affiche du deuxième groupe (séquence ordinaire 4 ^{ème}).	157
Figure 32. Espace des contraintes envisageable pour le niveau 4 ^{ème} en rapport avec le magmatisme.	179
Figure 33. Déroulement de la séquence de 4 ^{ème} selon la méthodologie des séquences forcées..	180
Figure 34. Exemple de production de groupe avec les questions possibles envisagées.	183
Figure 35. Document préparé par le groupe de recherche et distribué aux élèves de 4 ^{ème} après le débat scientifique.	185
Figure 36. Exemple de production argumentative individuelle produite par un élève après le débat (Ecrit 1).	186
Figure 37. Les raisons du non fonctionnement des explications proposées au classement.	187

Figure 38. Exemple de catégorisation des raisons par un binôme d'élèves (Théo et Vincent)...	188
Figure 39. La répartition consensuelle des raisons de non fonctionnement en deux catégories avec les titres donnés (Ecrit 2).	189
Figure 40. Ebauche du texte de savoir final sur le fonctionnement des volcans (E3a).....	190
Figure 41. Le texte de savoir final produit par la classe sur le fonctionnement des volcans (Ecrit 3b).....	190
Figure 42. Les écrits produits par la classe et les documents introduits par le groupe de recherche lors de la séquence forcée de 4 ^{ème}	193
Figure 43. Techniques de mise en texte de l'enseignante pour la séquence forcée sur le fonctionnement des volcans.	209
Figure 44. Le savoir-faire de mise en texte forcée (bloc pratico-technique).	212
Figure 45. Les phases de travail repérées pendant la séquence forcée de 4 ^{ème} permettant le passage d'un écrit à l'autre.	214
Figure 46. Macrostructure du débat de la séquence forcée 4 ^{ème}	216
Figure 47. Espace des contraintes en jeu lors du débat de 4 ^{ème} en rapport avec le fonctionnement des volcans (séquence forcée).	224
Figure 48. Espace des contraintes envisageable pour le niveau Terminale scientifique (17-18 ans) (Orange Ravachol, 2010, p.49).	241
Figure 49. Déroulement de la séquence forcée de Terminale S.	242
Figure 50. Exemple de production de groupe et des questions possibles à poser construites par le groupe de recherche (séquence forcée Terminale S).	244
Figure 51. Document préparé par le groupe de recherche et distribué aux élèves de Terminale S à l'issue du débat scientifique.	245
Figure 52. Exemple de production argumentative individuelle produite par un élève de Terminale S à l'issue du débat et de l'étude de la documentation scientifique (Ecrit 1 et 2).....	246
Figure 53. Deuxième écrit intermédiaire (E2).	247
Figure 54. Ecrit bilan final distribué aux élèves de Terminale S (Ecrit 4).....	248
Figure 55. Les écrits produits par la classe et les documents introduits par le groupe de recherche lors de la séquence forcée de Terminale S.	251
Figure 56. Techniques enseignantes de mise en texte pour la séquence forcée de Terminale S en rapport avec le fonctionnement et le magmatisme des zones de subduction.	268

Figure 57. Macrostructure du débat (demi-classe 1) de la séquence forcée de Terminale S.	272
Figure 58. Espace des contraintes en jeu lors du débat de Terminale S en rapport avec le fonctionnement des zones de subduction (séquence forcée).....	281
Figure 59. Les techniques enseignantes de mise en texte mobilisées dans une logique de repérage et de tri des solutions.....	291
Figure 60. Les techniques enseignantes de mise en texte mobilisées dans une logique de problématisation.....	300

Liste des tableaux

Tableau 1. Objectifs d'apprentissage et principes de fonctionnement du « débat scientifique » dans la classe (Orange, 2000, p.14-15, modifié).....	41
Tableau 2. Formes langagières, fonctions didactiques et statut épistémologique des écrits de travail et d'exposition (d'après Orange & al. 2001).	49
Tableau 3. Comparaison entre les explications neptunistes, plutonistes et vulcanistes.	76
Tableau 4. Comparaison entre la méthodologie d'ingénierie didactique, des séquences ordinaires et celle des séquences forcées.	105
Tableau 5. Présentation comparative des trois études de cas étudiées.....	110
Tableau 6. Format de synopsis construit pour l'analyse de l'organisation des séquences et des activités langagières mises en œuvre.	113
Tableau 7. Synopsis de l'organisation de la séquence ordinaire de 4 ^{ème} et des activités langagières mises en œuvre.....	134
Tableau 8. Origine des matériaux volcaniques dans les productions individuelles et de groupe des élèves de 4 ^{ème} (séquence ordinaire).....	136
Tableau 9. Questions posées par les élèves et l'enseignante pendant le débat en classe de 4 ^{ème} (séquence ordinaire).	160
Tableau 10. Catégorisation des interventions de l'enseignante de 4 ^{ème} lors de l'entretien d'autoconfrontation selon les thématiques abordées (séquence ordinaire).....	168
Tableau 11. Synopsis de l'organisation de la séquence forcée de 4 ^{ème} et des activités langagières mises en œuvre.	192

Tableau 12. Fonctionnement des volcans et origine des matériaux volcaniques dans les productions individuelles et de groupe des élèves de 4 ^{ème} (séquence forcée).....	194
Tableau 13. Nombre d'argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement des trois caricatures d'explications proposées aux élèves de 4 ^{ème}	197
Tableau 14. Catégorisation des argumentations contre le fonctionnement de l'explication A avancées par les élèves de 4 ^{ème}	199
Tableau 15. Catégorisation des argumentations pour et contre le fonctionnement de l'explication B avancées par les élèves de 4 ^{ème}	201
Tableau 16. Catégorisation des argumentations pour et contre le fonctionnement de l'explication C par les élèves de 4 ^{ème}	203
Tableau 17. Catégorisation des interventions avancées lors de l'entretien d'autoconfrontation avec l'enseignante 2, selon les thèmes abordés (séquence forcée).	231
Tableau 18. Synopsis de l'organisation de la séquence forcée de Terminale S et des activités langagières mises en œuvre.....	250
Tableau 19. Fonctionnement des zones de subduction et origine du magmatisme et dans les productions individuelles et de groupe des élèves de Terminale S (séquence forcée).....	252
Tableau 20. Nombre d'argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement des trois explications avancées par les élèves de Terminale S à l'issue du débat et de l'étude des documents.....	255
Tableau 21. Tableau croisé des argumentations avancées par les élèves de Terminale S en lien avec l'explication A à l'issue du débat et de l'étude de la documentation scientifique.....	258
Tableau 22. Tableau croisé des argumentations des élèves de Terminale S en lien avec l'explication B à l'issue du débat et de l'étude de la documentation scientifique.	261
Tableau 23. Tableau croisé des argumentations des élèves de Terminale S en lien avec l'explication C à l'issue du débat et de l'étude de la documentation scientifique.	264

Introduction générale

La construction des savoirs problématisés en sciences fait actuellement l'objet de multiples recherches didactiques (Orange & Orange Ravachol, 2007 ; Beorchia, 2003 ; Lhoste, 2008). La préparation des jeunes à un « monde problématique » (Fabre, 2011) et la conception de l'éducation comme problématisation deviennent des nécessités de plus en plus mises en valeur par les chercheurs en sciences de l'éducation (ibid.). Il en est de même à l'école où les programmes scolaires invitent les enseignants « à *construire leurs cours autour de problèmes, mettre en place de situations d'apprentissage permettant aux élèves de résoudre des problèmes, voire de les poser et de les construire (situations-problèmes, débats scientifiques, philosophiques, littéraires...)* » (Fabre, 2009, p.11). Les problèmes et la problématisation s'installent progressivement dans le domaine de l'enseignement et de l'apprentissage scientifique. Cependant, certains travaux didactiques mettent en évidence la réduction des savoirs scolaires à une forme qualifiée de « propositionnelle » qui les présente comme des propositions dévoilant des énoncés scientifiques non logiquement connectés (Astolfi, 1992, 2005a). Même si les enseignants suivent apparemment les discours pédagogiques actuels qui les exhortent à engager les élèves dans des problèmes, ils réduisent les savoirs à de textes simples qui exposent les solutions de la science sans la moindre relation aux problèmes (Fabre, 2007). Cette situation s'oppose à une démarche problématisante qui mettrait en avant les raisons fondant les solutions scientifiques. Il semble donc que le processus de construction des problèmes à l'école rencontre des difficultés qui font que la « mise en texte des savoirs » ne s'oriente pas dans le sens d'une problématisation. D'où la nécessité, pour nous, d'étudier les pratiques enseignantes impliquées dans la construction des savoirs et des textes en classe dans le but d'identifier les difficultés et les conditions didactiques d'accès aux savoirs problématisés.

La mise en texte des savoirs à l'école peut alors être définie comme étant la production de textes oraux et écrits qui fondent les savoirs dans le but d'arriver à un texte commun. En effet, la transposition didactique permettant le passage du savoir savant au savoir scolaire suppose « *la production d'un texte du savoir* » (Chevallard, 1991, p. 65) qui rend ce dernier accessible aux élèves. Ainsi, « [...] *la pratique de recherche scientifique n'est pas présente comme telle à l'école ; elle y est représentée par un texte, qu'on appelle le savoir [...]* » (Rey, 2005, p.99). Le rôle des enseignants serait de présenter ces savoirs, déterminés par les programmes scolaires, aux élèves à travers un ensemble de techniques scolaires (énoncés-problèmes, construction

d'exercices, etc.) (Brossard, 1998). Ils vont les emmener, via ces techniques, à mettre en texte les savoirs scientifiques c'est-à-dire à produire des textes oraux et écrits dans l'objectif de parvenir à un texte de savoir commun. Nous notons que « *la notion de texte peut s'appliquer à toute production verbale située, qu'elle soit écrite ou orale* » (Bronckart, 1996, p.73). Au cours de cette recherche, nous désignons, par « textes de savoirs », les productions orales et écrites mais aussi les schémas, les tableaux, les dessins d'observation etc. qui reflètent l'état des savoirs exposés au sein de la classe par les élèves et les enseignants.

Nos recherches antérieures (Chalak, 2008 ; Chalak & El Hage, 2011) se sont intéressées aux obstacles en didactiques des sciences de la Terre au Liban. Elles nous ont permis de mettre en évidence des corrélations entre les conceptions des élèves et celles de leurs enseignants concernant certains concepts géologiques et d'identifier des obstacles idéologiques liés aux particularités de la société libanaise. Dans le but de poursuivre ces travaux, nous nous intéressons à ce qui se passe au sein de la classe, particulièrement aux pratiques de mise en texte des enseignants et aux conditions d'accès aux savoirs problématisés en sciences de la Terre. Notre étude rejoint les travaux de l'équipe du *Centre de Recherche en Education de Nantes* (CREN) et donne de l'importance aux débats et à l'acquisition des savoirs problématisés dans les enseignements et les apprentissages scientifiques. Elle mobilise le cadre théorique de la problématisation développé par l'équipe de ce laboratoire sous la direction de Michel Fabre et de Christian Orange. Ainsi, notre travail se situe dans un cadre socio-constructiviste de l'apprentissage. Nous nous intéressons parmi les multiples domaines des sciences de la Terre à celui du magmatisme vu qu'il est récurrent dans les programmes du collège et du lycée et que son apprentissage affronte des difficultés repérées par de nombreuses recherches (Orange, 1995 ; Orange Ravachol, 2003 ; Goix, 1995, 1996). Nous mettons l'étude de la mise en texte problématisé du concept de magmatisme au centre de notre travail. De plus, nous apportons un éclairage historique et épistémologique à ce concept en l'étudiant sous l'angle de la problématisation. Les sciences de la Terre sont conjointement des sciences fonctionnalistes qui s'intéressent au fonctionnement actuel du globe et historiques puisqu'elles ont pour objectif de reconstituer le passé et l'histoire du globe (Orange Ravachol, 2003). C'est principalement la dimension fonctionnaliste du concept de magmatisme abordant les problèmes comme la formation des magmas et leur déplacement, l'origine des éruptions etc., qui nous interpelle. Les situations analysées par les chercheurs du CREN se sont focalisées, pendant un certain temps, sur l'étude des débats scientifiques réalisés en classe sur des affiches produites par des

groupes d'élèves en réponse à un problème donné (Fabre & Orange, 1997 ; Orange, 2000, 2003). Les débats sont considérés comme des moments favorisant la construction des problèmes. Toutefois, il s'est révélé que, suite aux débats, la mise en texte problématisé se retrouve rompue et les textes de savoirs élaborés laissent dans l'oubli les raisons construites (Orange & Orange Ravachol, 2007). Pour cela, il est apparu important de suivre la mise en texte et la construction des savoirs problématisés à l'échelle des séquences d'enseignement-apprentissage¹. C'est ce que nous nous proposons de réaliser au sein de cette recherche qui s'appuie sur l'analyse de trois séquences abordant le magmatisme à différents niveaux scolaires : une séquence ordinaire en 4^{ème} préparée entièrement par l'enseignante et deux séquences forcées (Orange, 2010) en 4^{ème} et Terminale S conçues par une équipe de recherche formée d'enseignants et de didacticiens. Dans un premier temps, l'étude de la séquence ordinaire nous permettra de relever les difficultés qu'affronte la mise en texte problématisé. Puis, à travers l'analyse des séquences forcées nous aborderons la question des conditions d'accès aux savoirs problématisés. Etant donné que nous mettons le processus de problématisation au cœur de nos analyses, nous nous appuyons sur les traces langagières orales et écrites. Nous portons spécifiquement notre attention à tout ce qui est dit et écrit en classe pour analyser le processus de mise en texte. Afin de décrire et de modéliser les pratiques enseignantes de mises en texte nous faisons appel à des outils empruntés à la théorie anthropologique du didactique de Chevallard (1992, 1996, 1997, 1998) et à la didactique professionnelle (Pastré, Mayen & Vergnaud, 2006 ; Pastré, 2007). L'emploi de ces deux cadres théoriques, inhabituels en didactique des sciences de la Terre, représente une condition de possibilité d'une approche comparatiste en didactique des disciplines.

Notre travail comprend sept chapitres :

Les deux premiers présentent les fondements théoriques sur lesquels nous nous appuyons. Dans le premier chapitre, nous nous focalisons d'une part sur les pratiques des chercheurs dans le but de comprendre la mise en texte des savoirs scientifiques et d'autre part sur la transposition didactique de ces savoirs en classe pour étudier la mise en texte des savoirs scolaires ainsi que les contraintes et les conséquences pouvant l'accompagner. Puis, nous nous attardons sur le rôle des activités langagières dans les apprentissages en classe de sciences et dans la construction des

¹ Altet (1994) définit le processus enseignement-apprentissage comme « un processus interactif situé » où interagissent dans une situation singulière des acteurs, enseignant-apprenant, des champs différents, celui de la communication et celui des savoirs.

savoirs scolaires problématisés. Les particularités relatives aux sciences de la Terre, domaine de notre étude, seront désignées. Nous proposons, au terme de ce chapitre, une première formulation de nos questions de recherche.

Le deuxième chapitre permet, à partir d'une analyse historique et épistémologique du concept de magmatisme, d'identifier les savoirs en jeu dans le domaine du magmatisme et cherche à rendre compte des controverses et des problèmes discutés par la communauté scientifique actuelle et passée. Pour reconstituer les problématisations à la base des modèles historiques et actuels, notre étude s'appuie sur le concept d'« espaces des contraintes ». Les éléments construits serviront de repères pour analyser les modèles spontanés des élèves ainsi que les problématisations qu'ils mettent en œuvre. Une deuxième formulation de nos questions de recherche clôture ce chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les principes méthodologiques suivis pour le recueil et l'analyse des données de notre étude. Nous explicitons les objectifs à atteindre, le choix des données empiriques retenues par rapport à nos questionnements de recherche ainsi que les outils mobilisés dans l'analyse de ces données.

Les trois chapitres qui suivent présentent trois études de cas en rapport avec le domaine du magmatisme : une séquence ordinaire en 4^{ème} (chapitre 4), une séquence forcée en 4^{ème} (chapitre 5), une séquence forcée en Terminale S (scientifique) (chapitre 6). Nous décrivons chacune des séquences et prenons les textes de savoirs scientifiques produits comme point de départ des analyses. Ces textes seront caractérisés, comparés et leurs fonctions, au sein de la séquence, identifiées. Puis, nous cherchons à comprendre comment les textes ont été construits. Finalement, nous nous appuyons sur des entretiens d'autoconfrontation menés avec les enseignantes qui commentent et explicitent leurs pratiques lors des débats scientifiques.

La discussion générale du septième chapitre reprend les résultats obtenus aux différentes études de cas, les met en perspective et les compare. Nous indiquons également en quoi cette recherche nous a permis de progresser par rapport à la compréhension du processus de problématisation et de ses liens avec la mise en texte, les pratiques de savoirs et la construction des savoirs scientifiques en sciences de la Terre.

Notre mémoire se termine par une conclusion générale qui désigne les apports spécifiques des analyses menées en ce qui concerne la mise en texte des savoirs et la problématisation ainsi que les limites de cette recherche.

**Chapitre 1. Mise en texte des savoirs
scientifiques, problématisation et activités
langagières**

Introduction

Etudier les conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé du concept de magmatisme nous amène à porter notre attention sur la manière dont les savoirs scientifiques sont mis en texte par les chercheurs et dans le milieu scolaire. C'est ainsi que dans ce premier chapitre, nous nous intéressons tout d'abord à la pratique et à l'activité scientifique afin de comprendre comment les savoirs sont mis en texte par la sphère savante. Puis, nous nous focalisons sur la transposition didactique du savoir – qu'elle soit externe ou interne – et sur les contraintes et les conséquences pouvant accompagner la mise en texte scolaire. Finalement, nous nous attardons sur l'importance des activités langagières orales et écrites dans les apprentissages en classe de sciences, dans la construction des savoirs scolaires problématisés et leur mise en texte. Nos développements se rapportent aux sciences en général mais nous soulignons, là où il s'avère nécessaire, les spécificités relatives aux sciences de la Terre, domaine concerné par notre étude.

1. Pratiques des chercheurs en sciences et mise en texte des savoirs scientifiques

Etant donné que les savoirs scientifiques scolaires se réfèrent aux savoirs savants et donc à l'activité de la communauté scientifique, il est propice d'étudier les caractéristiques et les spécificités de cette activité dont dépendent les savoirs. Latour (1995, p.14) considère que « *si l'on étudie la recherche, on étudie donc la science, mais la réciproque n'est pas vraie : la science nous apprend très peu de choses sur le monde de la recherche* ». Par conséquent, nous nous intéressons au monde de la recherche et à la science telle qu'elle est pratiquée au sein des laboratoires en pointant notre attention sur les pratiques constitutives du travail des scientifiques ainsi que sur leurs fonctions et leurs rôles dans la construction du savoir et sa mise en texte. Cette étude nous permettra d'identifier les contraintes qui accompagnent le travail de mise en texte des savoirs scientifiques.

1.1 De la pratique scientifique à l'élaboration du savoir en sciences

Pour résoudre les problèmes explicatifs auxquels ils sont confrontés, les scientifiques mettent en œuvre des pratiques diverses : expérimentales, techniques, technologiques mais aussi discursives. Après avoir observé le fonctionnement des laboratoires scientifiques de pointe aux États-Unis, Latour & Woolgar (1988), sociologues² des sciences, retiennent du laboratoire la vision d'un lieu où travaille une étonnante tribu qui dédie la majeure partie de ses moments au codage, marquage, à la lecture et l'écriture et qui emploie tant les écrits produits au sein du laboratoire que ceux qui lui sont extérieurs. L'activité de recherche se base sur des données (enregistrements expérimentaux, graphes, courbes, diagrammes) fournies par les appareils ou « inscripteurs ». À l'aide de ces instruments, le travail de laboratoire « permet en effet d'accéder au monde observable pour enregistrer des données empiriques ou tester la pertinence de modèles explicatifs théoriques. » (Bisault, 2009, p.29). En parallèle, les chercheurs utilisent des dictionnaires, des articles, rédigent des schémas, des tableaux, des hypothèses explicatives, des textes qu'ils modifient, corrigent, réécrivent et produisent des comptes-rendus et des synthèses permettant le partage et la discussion de leurs résultats avec le reste de la communauté scientifique. Ainsi, il apparaît que divers types d'écriture accompagnent les différents moments de la recherche scientifique, du moment où le scientifique se pose le problème, expérimente et interprète jusqu'à ce qu'il arrive à une explication communiquée. Ces productions sont partie prenante de l'activité des chercheurs et outillent la production des savoirs. « *Le langage participe au travail de construction du savoir pour faire progresser la pensée par la reprise et le réajustement des énoncés produits durant les étapes d'investigation* » (Rebière, Schneeberger & Jaubert, 2009, p.286). Cependant, le laboratoire, qui constitue selon Latour & Woolgar (1988, p.43) un « système d'inscription littéraire », ne laisse à voir qu'une infime partie de son activité sous forme publiée. Les scientifiques qu'ils ont interrogés admettent que la production d'articles se retrouve à la tête des objectifs primordiaux de leur pratique. Une production derrière laquelle sont occultées des tas de pratiques d'écritures au sein du laboratoire.

Bien entendu, les chercheurs ne font pas qu'écrire au laboratoire, leur méthodologie heuristique se base également sur des échanges oraux, des controverses, des discussions et des débats. « *Entre l'observation ou l'expérimentation au départ, et la théorisation, l'abstraction à l'arrivée, c'est dans la langue orale que chemine et émerge la connaissance : du visible au lisible, via le dicible* » (Levy-Leblond, 1996, p.252). Après l'obtention de leurs premiers

² La sociologie des sciences s'intéresse à la « science qui se fait, c'est-à-dire à la pratique scientifique » et non pas à la science toute faite (Latour, 1995, p.11).

résultats, les scientifiques passent à une étape où ils se doivent de convaincre, persuader leurs collègues de la validité de leurs propositions et discuter en avançant des argumentations et des preuves basées sur des raisonnements cohérents. Ces activités langagières orales, qui demeurent indissociables de l'activité heuristique, sont moins contrôlées et figées que celles écrites. Elles laissent survenir les incorrections et les irrégularités qui accordent au discours une certaine liberté lui permettant d'échapper aux exigences de la textualité (Levy-Leblond, 1996). Ainsi, « *Le parler permet l'expression d'une créativité bien supérieure à l'écrit* » (ibid., p.255).

Si nous revenons aux sciences de la Terre, domaine de notre étude, nous notons que celles-ci possèdent une particularité par rapport aux autres sciences de la nature : « *le réel ne se limite pas aux expériences de laboratoire : il faut y ajouter le travail de terrain* » (Orange & al., 1999, p.110). Plus précisément, les géologues s'appuient sur des données de terrain (échantillons de roches avec leur localisation, lames minces dont il faut analyser la composition etc.) et des données expérimentales de laboratoire (datation absolue, expériences de synthèse des minéraux en fonction des conditions de pression et de température etc.). De plus, les géologues discutent le choix et l'identification des échantillons, l'analyse texturale des lames minces et notent leurs remarques, leurs inscriptions, leurs comparaisons concernant le travail de terrain et de laboratoire. Le rôle du langage dans le travail de ces chercheurs ne se limite pas uniquement à la diffusion des résultats et les productions langagières concernent aussi bien l'activité empirique du terrain et du laboratoire (observations, expériences, échantillons) que celles de l'activité intellectuelle (idées, explications, modèles).

Devant la diversité des pratiques langagières à différentes étapes du travail scientifique, leurs typologies se sont multipliées :

- Jaubert (2000), distingue les textes/discours à usage interne des textes/discours à usage externe au laboratoire. Les productions internes jouent un rôle marquant dans les moments heuristiques et la recherche d'explication. Elles sont toutes aussi primordiales que les productions externes qui participent à la diffusion des savoirs. Néanmoins, malgré la distinction entre les deux types de productions langagières – internes et externes – celles-ci restent indissociables car « *si le premier type de production apparaît constitutif du second, la réciproque est aussi vraie, de sorte que ces productions s'articulent à un ensemble de pratiques sociales qu'elles orientent concomitamment* » (Jaubert, 2007, p.53). En effet, les écrits à usage interne participent dans l'élaboration des savoirs qui seront communiqués via les écrits à usage externe et inversement, ces productions externes vont venir influencer les recherches futures et orienter les écrits internes.

- Levy-Leblond (1996, p.235) désigne trois registres de communications écrits et oraux : la communication informelle qui a lieu pendant l'activité de recherche à l'intérieur du laboratoire et concerne les cahiers de laboratoire, les discussions de travail, les échanges et le courrier accompagnant l'élaboration du savoir ; la communication institutionnelle qui concerne la collectivité et vise la discussion et la validation des résultats obtenus à travers des articles spécialisés, des colloques, des débats, des séminaires et des conférences de presse ; la communication publique qui vise la diffusion et la reconnaissance sociale du savoir à travers les manuels, l'enseignement et les médias. Ces différents registres de communication ont des fonctions distinctes et se caractérisent par une diversité des genres de textes produits par les scientifiques.

Les recherches, qui ont examiné de près les pratiques et le fonctionnement des scientifiques dans leur laboratoire, ont permis de constater que **les activités langagières orales et écrites sont toutes aussi fondamentales dans le travail des chercheurs et dans la construction des explications que les observations et les expérimentations**. Ces dernières sont certes primordiales dans le travail de recherche mais elles sont accompagnées d'activités langagières largement variées qui occupent une place inéluctablement essentielle dans l'élaboration des résultats et leur publication : « *les pratiques langagières [...] participent ainsi au façonnage des savoirs et les rendent dicibles* » (Jaubert, 2007, p.45). Par conséquent, nombreux sont les didacticiens qui considèrent que cette dimension langagière des savoirs scientifiques ne saurait pas être totalement dissimulées au sein de l'institution scolaire (Jaubert & Rebière, 2000, 2001). Suite à cette étude qui s'est penchée sur la pratique scientifique aboutissant à la construction des savoirs scientifiques, nous nous intéressons aux processus de production de textes destinés aux communications extérieures. Cette diffusion à l'extérieur du laboratoire s'avère nécessaire pour la valorisation et la reconnaissance par les pairs.

1.2 Communication des résultats du travail des scientifiques

Après avoir réfléchi, débattu sur les possibles et tenté de persuader les membres de leur communauté, les scientifiques cherchent à informer, à partager et à discuter les fruits de leurs travaux avec l'ensemble de la sphère scientifique et le public. Le travail d'écriture qu'entament les chercheurs les oblige à prendre en considération d'autres points de vue préexistants, ce qui influence leur pensée et prolonge leur réflexion. La communication des résultats du travail scientifique, leur reprise, leur admission et leur reconstruction par les autres membres de la

communauté confère du sens à ces résultats. « *Un savoir ne sera vraiment scientifique que s'il est partagé, discuté et s'il peut servir de base à d'autres développements communicables* » (Fabre & Orange, 1997, p.41). Toutefois, les discours scientifiques sont principalement fondés sur des textes (Grize, 1992). Les scientifiques se basent sur les problèmes posés et sur les résultats obtenus qu'ils confrontent à leurs hypothèses et à d'autres données pour produire des textes destinés à l'extérieur. Ce passage de la pratique au texte est régi par de nombreuses contraintes. Ainsi, lors de la mise en texte, « *les épisodes et les déterminants multiples* » de la pratique scientifique sont « *effacés, occultés dans son produit* » (Rey, 2002, p.51). L'écrit publié – oral ou écrit – représente la partie émergée du travail du chercheur derrière lequel se dissipent toutes les pratiques qui ont permis son élaboration (Jaubert & Rebière, 2001). Les productions langagières internes – constituant une partie essentielle de la pratique du chercheur – sont sacrifiées et les savoirs diffusés sont surtout ceux qui se plient à ce que Rey (2002) appelle « les contraintes textuelles ». « *On se réfère bien aux situations expérimentales, mais pour n'en garder que ce qui se laisse subsumer sous les concepts du texte* » (ibid., p.53). De ce fait, la forme textualisée des discours heuristiques libère la pratique scientifique de la personne du spécialiste et des multiples spécificités caractéristiques des situations dans lesquelles cette pratique a émergé (Rey, 2007). La mise en texte se fait souvent de façon à ne diffuser que des énoncés stabilisés³ et indiscutables qui seront protégés de la critique qu'ils risquent de confronter suite à leur publication (Latour & Woolgar, 1988). De cette façon, les énoncés seront disponibles pour être empruntés par d'autres cadres théoriques et utilisés par d'autres chercheurs. De plus, la partie technique du savoir technique⁴ reste difficile à transmettre, même si une partie reste incorporée au texte. C'est ainsi, qu'en sciences de la Terre, « *le type de rapports, souvent inconscient, entre travail de terrain et travail de laboratoire, constitue une part importante de l'expertise du géologue. Il intervient dans la construction des problèmes par un fourmillement d'idées, essentiel, mais qui disparaît à la publication* » (Orange & al., 1999, p. 112).

Les contraintes, que nous venons d'évoquer et qui accompagnent le travail de mise en texte du savoir scientifique, produisent un **texte autoréférentiel** dont le sens des énoncés émerge de leurs rapports mutuels au sein du texte⁵. Pour comprendre ce qui est écrit à un endroit donné, il faut se

³ « *Les énoncés stabilisés sont en fait le résultat final d'une construction complexe faisant intervenir de nombreuses reformulations et négociations au sein d'une communauté de chercheurs* » (Bisault, 2009, p.31).

⁴ Orange (2007a) note que le travail du scientifique met en jeu et articule des savoirs techniques et des savoirs théoriques.

⁵ Les énoncés et les termes qui constituent le texte ne peuvent pas tirer leur sens de leur référence aux choses et aux actions dont les acteurs de cette pratique sont familiers (Rey, 2005, p.99). Leur sens doit, selon Rey (2005), émerger de leurs rapports mutuels au sein du texte.

référer aux autres parties du même texte (Rey, 2002, 2005). Cela permet à ce texte d'être lu et compris par des personnes qui n'ont jamais vécu la situation. La transformation des énoncés lors du passage de la pratique au texte s'accompagne, d'après Latour (1989), d'une augmentation du degré de facticité et d'une diminution de la subjectivité. « *Le texte rend inutile l'expérience vécue des situations. Il donne à la recherche une allure d'universalité* » (Rey, 2002, p.53). Toutefois, il n'est pas difficile de détecter la voix de l'auteur, et « *même lorsque le locuteur veut s'effacer, il lui arrive de laisser pointer l'oreille* » (Grize, 1992, p.47). Mais il convient de souligner que même si le texte prend son indépendance des recherches qui ont contribué à sa naissance, il n'en demeure pas moins que l'une de ses caractéristiques réside dans sa référence au(x) problème(s) scientifique(s) au(x)quel(s) il répond (Lhoste, 2008). Le problème reste explicite dans les textes scientifiques qui renvoient, en dépit de leur autonomisation, aux paradigmes, aux courants et styles de pensées dont ils sont issus. Pour Fabre (2009, p.221), « *Le processus d'autonomisation ou de décontextualisation du savoir, qui le fait illusoirement apparaître sans rapport avec aucun type de questionnement, n'est pas un état stable, mais plutôt un mouvement qui permet de passer d'un contexte de questionnement à un autre* ».

Lors de ses travaux, le chercheur anglais Sutton (1995) se penche sur les différentes séries de publications et les contrôles méticuleux effectués avec l'entrée de nouvelles idées au sein de la sphère scientifique. Il note que les séquences de publications successives (articles de revue, traités, manuels etc.) sont marquées par une **dépersonnalisation** significative qui réside dans « *la représentation du nouveau savoir comme existant « en soi » plutôt que résultat d'un effort humain* » (ibid., p.43) (figure 1). Les publications scientifiques comme les revues présentent de nouvelles idées supportées par la logique et le travail de laboratoire des chercheurs. Ces idées sont ensuite attribuées, dans les synthèses de la littérature, aux auteurs qui en sont à l'origine et deviennent des faits acceptés et évidents dans les traités et les manuels. Ce cheminement conduit à des savoirs tacites, vrais et qui n'ont plus besoin de s'appuyer sur la logique (figure 1).

De plus, les modifications discursives accompagnant le changement des types de publications, sont d'autant plus marquées que leur destinataire est étranger à la sphère scientifique. Les propositions, critiquables et incertaines au départ, perdent progressivement ces caractéristiques pour parvenir à un point où elles ne sont plus accordées à un individu mettant de côté les immenses efforts humains d'interprétation et entraînant un aplatissement vers les seuls résultats de la science. « *A partir d'un certain niveau d'élaboration, les énoncés de savoirs doivent être universels, abstraits, falsifiables et objectifs ; les caractéristiques de ces énoncés reflètent donc la scientificité de la démarche des chercheurs* » (Bisault, 2009, p.29). Les caractéristiques des

savoirs stabilisés : autonomie, généralité, abstraction, dépersonnalisation dissimulent les pratiques langagières qui les ont produites.

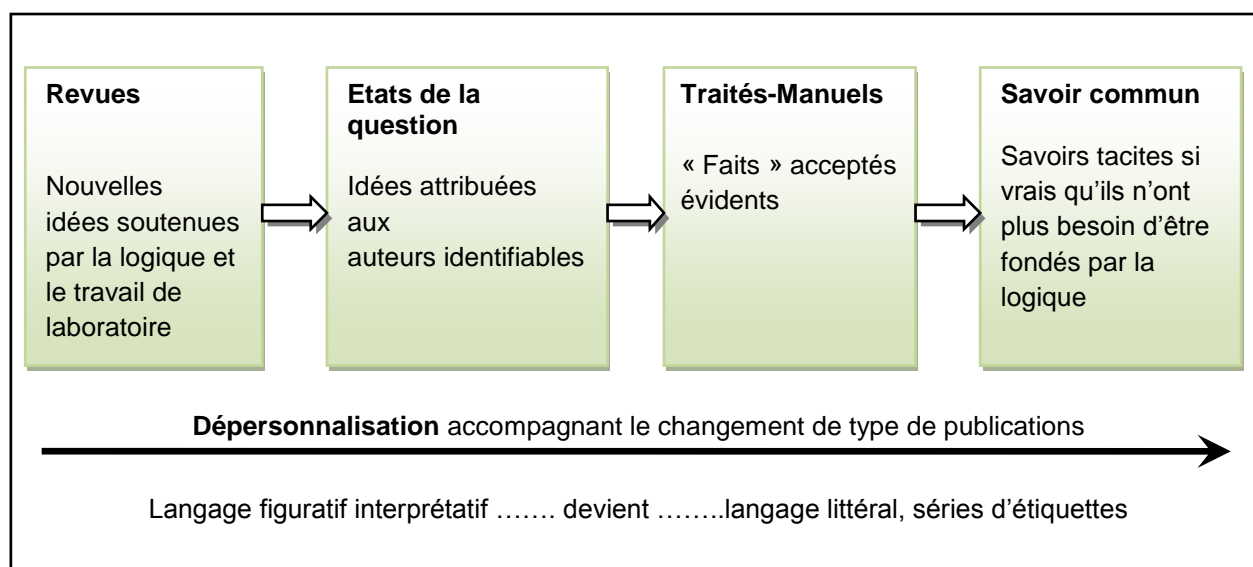


Figure 1. Changements dans le langage et dans le statut du savoir lorsque des idées et des affirmations se transforment en « faits » avérés (d'après Sutton, 1995, p. 42, modifié).

La diffusion des idées d'une manière impersonnelle est inévitable lorsque le nouveau savoir est accepté d'une manière consensuelle par le groupe de chercheurs, ce qui n'est pas sans conséquences sur la connaissance scientifique qui se dénature quand elle omet les conditions de sa propre production (Roqueplo, 1974). Sutton (1995, p.43) rapporte que « *le langage par lequel les produits de la science sont exprimés, donne facilement une impression très erronée de la façon dont les scientifiques travaillent ainsi que du statut du savoir qu'ils produisent* ». Il cite Lemke (1990, p.134) qui affirme que le langage universel développé fait que le savoir scientifique se tient « *en dehors du champ de l'expérience humaine au lieu d'en être une partie spécialisée* ».

Les savoirs, les pratiques et les textes sont étroitement liés et articulés dans le travail des chercheurs scientifiques qui est caractérisé par une dimension langagière qui ne peut pas être omise, particulièrement lorsqu'il s'agit de la transposer dans le cadre de la classe. Les pratiques discursives de la recherche constituent les pratiques sociales de référence des pratiques de production d'écrits en classe de sciences (Ducancel & al., 1995). Toutefois, les pratiques scientifiques sont régies par un ensemble de règles et d'exigences qui se traduisent par une utilisation spécifique de la langue. Après avoir évoqué le processus de mise en texte scientifique professionnelle et les contraintes qui l'accompagnent, il est fondamental d'aborder la mise en

texte des ces savoirs en milieu scolaire ainsi que les fonctions des pratiques langagières dans les apprentissages. Nous nous attardons, d'abord, sur les conditions et les transformations spécifiques permettant le passage du savoir scientifique au savoir scolaire.

2. Transposition du travail des scientifiques en classe : mise en texte des savoirs scolaires

Avec l'introduction du concept de la transposition didactique par Chevallard (1991) s'appuyant sur les idées du sociologue Verret (1975), il s'est avéré que les contenus des savoirs scientifiques subissent nécessairement des transformations qui les aident à devenir des objets aptes à être enseignés. Pour Chevallard (1991. p.65), « *la production d'un système didactique à partir d'un projet social d'enseignement préalable suppose la production d'un texte du savoir* » qui rend ce dernier disponible aux élèves. L'enseignement scientifique, tout comme la pratique scientifique, débouche sur des textes. Ce processus de sélection des éléments de la culture et de leur mise en texte, qui vise leur préparation à être transmis à l'école, ne peut pas être évité et n'est pas sans incidence sur les savoirs. Dans cette partie nous passons en revue les exigences que présuppose un travail de transformation et de sélection des savoirs scientifiques pour en faire des objets pouvant être enseignés ainsi que les conséquences de ce travail sur le savoir scientifique.

2.1 Les contraintes et les effets engendrés par la mise en texte des savoirs scolaires dans les programmes officiels

La mise en texte des savoirs scolaires est un processus d'« *apprêt* » didactique (Chevallard, 1991) qui serait à l'origine des contraintes, accompagnant le travail de transposition didactique, signalées par Verret (1975). En effet, Verret (ibid., p.146-147) établit que la « *transmission bureaucratique du savoir* » provoque sa dépersonnalisation, sa désyncrétisation, et une programmation de son acquisition. Elle requiert quant à la transmission « *la publicité du savoir* » c'est-à-dire sa définition explicite et « *le contrôle social des apprentissages* ». Nous nous intéressons particulièrement aux deux premières contraintes – la dépersonnalisation et la désyncrétisation – car elles semblent avoir des effets sur les savoirs scientifiques.

La **dépersonnalisation du savoir** ignore le contexte et les conditions de production du savoir lors de la mise en texte scolaire et n'est pas sans conséquences problématiques. Develay (2004, p.21) atteste que la relation de dogmatisation qu'entretient le savoir enseigné avec le savoir

savant a pour principale origine « *l'écart entre la logique d'exposition des résultats et les modalités de la découverte. L'école enseigne des savoirs dont elle ne montre jamais les conditions de l'émergence* ». Dans la même optique, Ducancel & al. (1995, p.59) précisent qu'« *il est bien vrai que les discours didactiques (cours, manuels,...) dogmatisent le plus souvent les savoirs scientifiques, les coupent de leur épistémologie, de leur histoire, de leur contexte social de production. Ils proposent une image unique, close et atemporelle du Savoir. Ils sont mystifiants* ». Cette dogmatisation du savoir scientifique, lorsqu'il est diffusé à l'école pour des fins d'enseignement, a été également signalée par d'autres auteurs comme Roqueplo (1974) et Rumelhard (1979). Or nous remarquons, à la suite de Rumelhard (1979) et à nos développements précédents, que ce mouvement de dogmatisation est aussi présent dans la production même des connaissances scientifiques. La dépersonnalisation du savoir scolaire entraîne sa dogmatisation et le texte de savoir – déterminé par les programmes et l'institution avant le début de l'apprentissage – présente aux élèves les produits finis de la science. Comme nous l'enseigne Canguilhem (1968/2002, p.205), « *La réorganisation de la connaissance abolit son historicité* ». La transmission du savoir sous cette forme aux élèves leur donne une vision très simpliste de la science comme étant un « *processus d'accumulation de faits qui ne soulèvent aucun problème* » (Sutton, 1995, p.43). Driver et al. (1996) confirment, suite à leurs travaux, que de nombreux élèves expriment parfaitement cette vision. Le savoir est alors considéré comme étant factuel et « déproblématisé ». D'où la nécessité, pour nous, d'étudier la manière dont se fait la construction des savoirs magmatiques en classe et les conditions de possibilités d'un dépassement, par l'enseignement scientifique, de la dogmatisation des savoirs induite par la mise en texte scolaire mais aussi scientifique.

Par ailleurs, la **désyncrétisation**, qui divise et structure la pratique théorique en champs de savoirs délimités, peut être source de difficultés didactiques importantes. En effet, Lhoste (2008, p.227) considère, après avoir insisté sur l'importance de l'organisation des concepts scientifiques en système dans la mobilisation des raisonnements par les élèves, que « *la perte des liens entre différents concepts pourrait être responsable des difficultés rencontrées par les élèves* ». En sciences de la Terre, par exemple, l'absence de liens entre les différents concepts géologiques pourrait empêcher les élèves de percevoir les relations entre les phénomènes étudiés et de parvenir à une compréhension globale du fonctionnement de la Terre. Les élèves pourraient avoir tendance – comme c'est parfois le cas – à concevoir le cours comme un ensemble de leçons compartimentées sans aucun lien entre elles, et ne percevraient pas l'enchaînement logique des séances. L'absence de liens entre les concepts a été également pointée par des travaux réalisés en

didactique des sciences de la vie qui montrent que les élèves ne saisissent pas tellement les relations entre les concepts physiologiques étudiés comme la respiration, la circulation, l'excrétion et la digestion (El Hage, 2005).

Les transformations que nous venons de citer concernent spécifiquement le processus de transposition didactique. L'école privilégie les faits et les énoncés, fait l'impasse sur les controverses au profit d'une programmation bien ordonnée et laisse dans l'oubli la pratique scientifique. Même si cette pratique est présente à l'école à travers les travaux pratiques, Johsua & Dupin (1989) indiquent que ces « monstrations expérimentales »⁶ n'ont généralement rien à voir avec la pratique scientifique. Ceci a, comme nous l'avons montré, des répercussions sur le savoir scolaire qui se retrouve ainsi désarmé de son histoire et des problématiques qui lui accordent tout sens pour se laisser présenter comme un savoir « déproblématisé ». La transposition didactique semble affecter la nature du savoir scientifique et véhiculer une image erronée de la science. Ce mouvement de détachement du contexte de production des savoirs est suivi, dans le cadre scolaire, d'une recontextualisation des savoirs (Brossard, 1998, p.41) qui désigne « *l'ensemble des techniques scolaires à l'aide desquelles les enseignants présentent les connaissances : fabrication des énoncés-problèmes en mathématiques, construction d'exercices de grammaire à l'aide de tableaux, de flèches, de soulignements [...]* ». Il s'agit, pour Brossard (1998), de « montage » ou d'« habillage pédagogique » assurant le travail de transposition interne au sens de Chevallard (1991). Mais cette recontextualisation des savoirs au sein de la classe ne proscrit pas pour autant les retombées du détachement de leur contexte de production. Ces derniers temps, la didactique des sciences s'est emparée de la question de la mise en texte scolaire et a mis en exergue une conséquence flagrante de celle-ci et une caractéristique marquante des savoirs scolaires : leur propositionnalisme.

2.2 Conséquence : le propositionnalisme, une caractéristique des savoirs scolaires

Les savoirs scolaires, tels qu'ils sont enseignés aux élèves, sont considérés par certains didacticiens des sciences comme n'étant ni théoriques ni pratiques mais plutôt de nature « propositionnelle » (Astlofi, 1992, 2005). Cette critique du propositionnalisme des

⁶ La démarche de monstration expérimentale, au sens de Johsua & Dupin (1989), prend appui sur une simple expérience prototypique, qui permettra à l'enseignant de mettre en évidence un phénomène particulier.

savoirs scolaires est issue des travaux d'anthropologues qui se sont intéressés à la transmission des savoirs (Delbos & Jorion, 1990). Ces auteurs expliquent : « *quand nous appellerons "propositionnel" le savoir scolaire, nous attirerons l'attention par cela sur l'une de ses caractéristiques marquantes, qu'à défaut de pouvoir être théorique, il résume le savoir sous forme de propositions non logiquement connectées et qui se contentent d'énoncer des contenus* » (ibid., p. 11). Le reproche, adressé à l'école d'assurer un enseignement très théorique, abstrait et pas assez pratique, se retrouve ainsi remis en question. Avec ses propos, Astolfi (1992, 2005) avance que les savoirs scolaires ne sont pas vraiment théoriques, ils masquent la problématisation dont ils sont issus et ne sont pas vraiment pratiques, ils ne peuvent s'engager que dans des problèmes propres à l'école. Ce sont plutôt des « **savoirs propositionnels** » plus proches du sens commun que du véritable savoir scientifique. Cela explique, selon Astolfi (1992), pourquoi les savoirs scolaires sont à peine réutilisables par les élèves en dehors de l'école et pourquoi ils portent peu de sens pour eux. En revanche, il apparaît que les enseignants – malgré leurs efforts pour mettre en place, en adéquation aux consignes officielles, des activités didactiques impliquant une problématisation et une participation active des élèves dans l'élaboration des savoirs – ne mobilisent pas une épistémologie adaptée à cette démarche constructiviste. Ils utilisent les problèmes pour des fins motivationnelles et « *restent prisonniers d'une image traditionnelle du savoir, comme un texte qui énonce des vérités, et se décline en propositions indépendantes, déconnectées de leur contexte problématique [...] le savoir reste alors un produit tout élaboré à transmettre, un message à faire passer* » (Astolfi, 2005a, p.74). L'épistémologie des enseignants reste accrochée à une **conception « propositionnelle » du savoir**, à un « savoir-texte », un « savoir-objet » qui valorise « *les composantes les plus factuelles au détriment de ses éléments conceptuels, théoriques* » (Fleury & Fabre, 2005, p.89). Les savoirs scolaires sont alors présentés sous forme de textes simples, qui se limitent à exposer les résultats de la science sans aucune corrélation aux problèmes dont ils constituent cependant les réponses et que les élèves se contentent de lire et apprendre. Pourtant, les didacticiens l'ont rappelé à plusieurs reprises : **l'enseignement scientifique ne peut se restreindre à une simple transmission des résultats de la science** (Astolfi & al., 1978) et **les savoirs scientifiques ne peuvent se réduire à des savoirs assertoriques et factuels. Ce sont des savoirs problématisés qui se focalisent sur la construction des problèmes et sur l'accès aux raisons qui soutiennent les solutions** (Fabre, 1999 ; Orange, 2000). L'association entre une conception constructiviste de l'apprentissage et une conception « propositionnelle » du savoir scolaire, semble bloquer le changement introduit par ces enseignants malgré l'inventivité des dispositifs mis en place (ibid.). Cette image du savoir les empêche d'atteindre le pouvoir de la théorie et

d'accéder au « savoir-outil » et les cantonne, de même que leurs élèves, dans un savoir ni pratique ni véritablement théorique. Fleury et Fabre (2005, p.89) avancent que cette idée du savoir-outil, « *dans lequel rien n'est plus utile qu'une bonne théorie, ne peut vraiment germer que lorsque les enseignants acceptent de revenir sur les apories fondamentales de leur discipline et leurs transpositions didactiques possibles* ».

Ainsi, nous pouvons noter que, en dépit des recommandations officielles à problématiser et à « mettre en activité » des élèves (Fabre, 2009), les problèmes et les savoirs problématisés peinent à pénétrer dans l'enseignement scientifique. Ces injonctions ne peuvent cohabiter avec un texte de savoir « *sans histoire et sans opérationnalité* » (Fabre, 2007, p.69) qui se suffit de dévoiler des faits scientifiques figés et attestés. Tout cela pose la question des difficultés et des conditions didactiques d'accès aux savoirs problématisés et des logiques qui font obstacle à une construction des savoirs qui gardent toute référence et tout lien avec les problèmes dont ils sont réponses. Les études qui se sont penchées sur les raisons sous-jacentes au caractère propositionnel des savoirs scolaires (Fabre, 2007, 2009), pointent essentiellement l'oubli des problèmes et une focalisation accentuée sur les solutions de ces problèmes. Cet oubli s'ajoute aux contraintes (dépersonnalisation, désyncrétisation) accompagnant la transposition et la mise en texte des savoirs scolaires. Mais les analyses menées par Michel Fabre dépassent la situation scolaire et remontent jusqu'à l'histoire de la pensée.

2.3 L'oubli du problème comme explication des savoirs réifiés

Pour comprendre l'origine et les raisons épistémologiques de la réification des savoirs scolaires, Fabre (2007) s'appuie sur la problématologie de Meyer (1986) qui semble, selon lui, apporter des éléments décisifs même si ce philosophe ne s'intéresse pas directement à l'éducation. C'est le « mécanisme du refoulement problématologique », provoqué par le dilemme du *Menon*⁷ et mis en place dès l'origine de la philosophie occidentale, qui affectera les théories de la connaissance entraînant d'immenses conséquences sur le savoir⁸. « *Tout savoir constitue bien une réponse, mais cette réponse, une fois obtenue, refoule la question à laquelle elle répond en occultant du*

⁷ « *Il n'est pas possible à l'homme de chercher ni ce qu'il sait, ni ce qu'il ne sait pas ? Il ne saurait chercher ce qu'il sait, puisqu'il le sait, et qu'en ce cas, il n'a pas besoin de le chercher, ni ce qu'il ne sait pas pour la raison qu'il ne sait même pas ce qu'il doit chercher* » (Ménon 80c-81a, cité par Fabre, 2008, p.25).

⁸ En remettant l'origine de la réification des savoirs dans l'histoire de la pensée, Fabre (2009, p. 216) ne décharge pas pour autant l'école de sa part de responsabilité. « *L'école a sans doute sa part de responsabilité dans le processus de fétichisation du savoir et il est effectivement possible et même fécond de faire le compte des obstacles didactiques à un enseignement vivant qui intégrerait véritablement l'idée de problème* ».

même coup son caractère de réponse. Elle paraît alors valoir en soi » (Fabre, 2007, p.72). **Le privilège des solutions sur les problèmes**, explique Fabre (2007), est d'une part positif puisque la décontextualisation des réponses leur octroie une validité au delà de leur contexte de naissance pour les rendre au service de nouvelles interrogations, et d'autre part illusoire car les réponses se présentent comme une suite d'énoncés qui exposent le réel tel qu'il se donne à voir, séparément de toute investigation. Au cours du processus de mise en texte du savoir scolaire, celui-ci se laisse capturer dans un état intermédiaire où « *il n'est déjà plus une réponse et il n'est pas encore la base d'un nouveau questionnement : il paraît subsister en soi* » (ibid., p.72). C'est parce qu'elle n'entretient aucun lien avec la production du savoir et sa réutilisation dans les problèmes heuristiques, que l'école est attirée par la valorisation de cet état « neutre » du savoir et déconnecté des problèmes. Fabre (2007) souligne que ce n'est pas la textualisation⁹ du savoir en tant que telle qui est en cause mais la mise en texte qui a pour conséquence de faire du savoir une réponse qui ne répond plus à aucun questionnement et qui n'en alimente aucun.

Suite à ces développements qui remettent en cause l'oubli du questionnement et des problèmes dans l'histoire de la philosophie et de la pensée, la question de savoir à quoi ressembleraient les textes non-propositionnels et problématisés s'impose. Fabre (2007) nous donne une clé de réponse en avançant que **les textes d'un manuel scolaire seraient simultanément décontextualisés, poppériens et bachelardiens** (figure 2) s'ils s'appuyaient, par exemple, sur la problématologie de Meyer (1986). Des textes décontextualisés mais qui renvoient aux diverses conditions dans lesquelles ils ont la possibilité de fonctionner et conséquemment prendre sens ; des textes poppériens qui parleraient des habitants du troisième monde¹⁰ de Popper (1991), des discussions, des problèmes ainsi que des systèmes théoriques ; des textes bachelardiens qui aborderaient les trois dimensions du savoir : historique, systématique et problématologique avec une primauté de cette dernière sur les deux autres dimensions (figure 2).

⁹ Pour les élèves, la textualité des savoirs induit certaines complications que nous exposons dans le paragraphe 2.5.

¹⁰ « [...] nous sommes en droit de distinguer les trois mondes ou univers suivants : premièrement, le monde des objets physiques ou des états physiques ; deuxièmement, le monde des états de conscience, ou des états mentaux, ou peut être des dispositions comportementales à l'action ; et troisièmement, le monde des contenus objectifs de la pensée, qui est surtout le monde de la pensée scientifique, de la pensée poétique et des œuvres d'art. [...] Parmi les habitants de mon « troisième monde », il y a, plus particulièrement, les systèmes théoriques ; mais il y a des habitants qui sont tout aussi importants, ce sont les problèmes et les situations de problème. Et je montrerai que les habitants les plus importants de ce monde, ce sont les arguments critiques, et ce qu'on peut appeler – par analogie avec un état physique ou un état de conscience – l'état d'une discussion ou l'état d'un échange d'arguments critiques [...] » (Popper, 1991. p. 181-182).

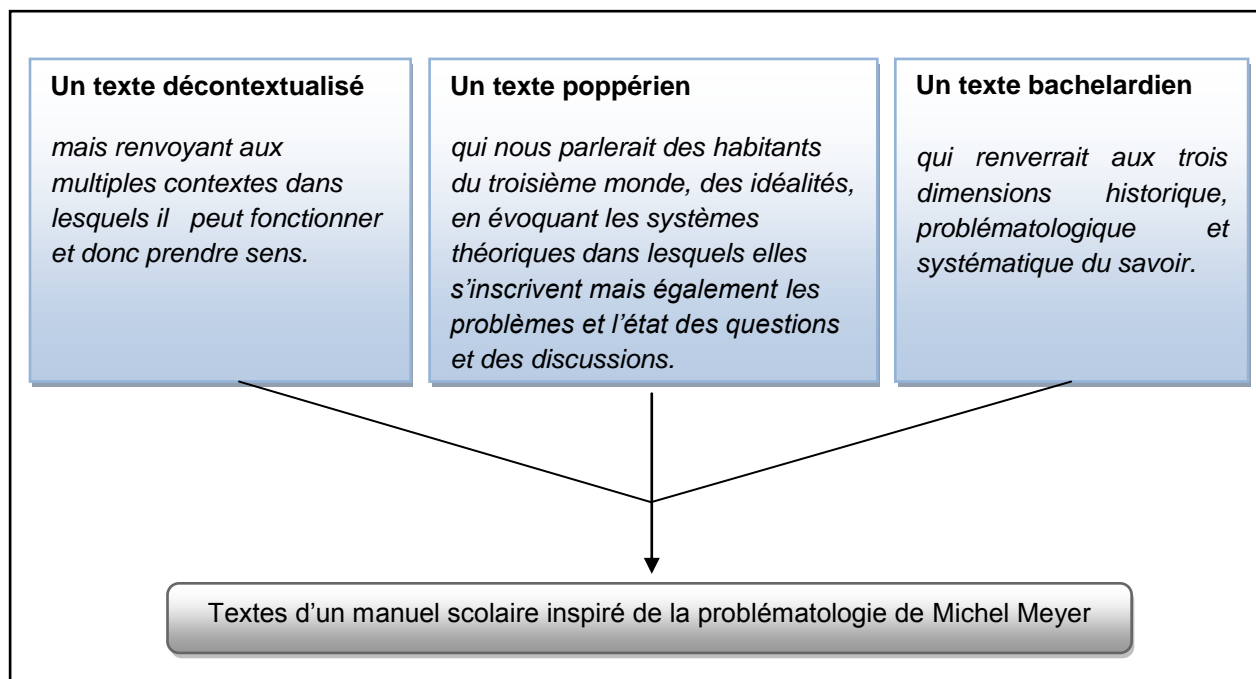


Figure 2. Les textes d'un manuel scolaire inspiré de la problématologie de Michel Meyer (d'après Fabre, 2007, p.77).

L'oubli des problèmes pointé comme responsable de la réification des savoirs scolaires nous emmène à accorder de l'importance, comme le fait le cadre théorique de la problématisation (Fabre, 1999 ; Orange, 2000) dans lequel nous nous inscrivons, à la construction des problèmes dans l'enseignement et l'apprentissage scientifique.

2.4 Rôle du lien « problème-savoir » dans la construction des savoirs problématisés

L'école, comme nous l'avons déjà évoqué, a tendance à présenter aux élèves un savoir scolaire isolé de tout questionnement, destitué et vidé de tout sens épistémologique. C'est essentiellement « un savoir de résultat qui ne répond à aucune question, à aucun problème. Il sort de nulle part, sans genèse visible » (Fabre, 2009, p.215). Ceci rejoint la critique avancée par Deleuze (1968) qui souligne – tout en dénonçant l'image dogmatique de la pensée – qu'on « nous fait croire que les problèmes sont donnés tout faits, et qu'ils disparaissent dans les réponses ou la solution ; sous ce double aspect, déjà ils ne peuvent être que des fantômes » (ibid., p. 65). Or, les savoirs ne peuvent pas exister indépendamment des problèmes avec lesquels ils maintiennent un rapport dynamique (Bachelard, 1949) et même si la déconnexion entre savoir et problème existe, elle reste illusoire (Dewey, 1993). Le savoir demeure inextricablement lié au problème et c'est précisément cette liaison qui accorde au savoir son existence et son sens. Dit autrement, le

« savoir des réponses » ne peut prendre sens qu'en lien avec le « savoir des questions » (Fabre, 2009). Il est par conséquent **nécessaire que les liens entre savoirs et problèmes soient davantage travaillés à l'école** afin que les savoirs scolaires retrouvent le sens qu'ils ont égaré et se débarrassent ainsi de leur statut propositionnel et fétichisé. Rendre au savoir sa « saveur », selon la célèbre expression d'Astolfi (2008), impliquerait de mettre les problèmes au cœur des apprentissages et de faire de leur construction – et non seulement de leur résolution – l'enjeu essentiel de l'activité intellectuelle.

2.4.1 La construction des problèmes pour accéder aux savoirs problématisés

Le cadre théorique de la problématisation ou de la construction des problèmes issu des travaux sur les apprentissages scientifiques considère à la suite des philosophes de la science tels Bachelard (1938, 1949), Canguilhem (1955, 1988), Popper (1991), Laudan (1977) et Kuhn (1983) que le savoir scientifique se caractérise par la « *maîtrise de véritables problèmes scientifiques* » (Orange, 1997, p.9). Les problèmes sont au cœur de la construction des savoirs scientifiques chez les chercheurs comme chez les élèves. Les recherches réalisées privilégient une entrée purement épistémologique et postulent que les savoirs scientifiques sont des **savoirs apodictiques**¹¹, organisés autour de la **construction de nécessités** et que l'activité scientifique est nettement liée à des **problèmes explicatifs**. A partir de cette caractérisation des savoirs et de l'activité scientifique, les savoirs ne peuvent pas se limiter pas aux solutions des problèmes mais sont porteurs des conditions de possibilités de ces solutions c'est-à-dire des raisons qui les soutiennent. Apprendre par problématisation demande de renoncer à la considération des savoirs scientifiques comme de simples résultats terminaux, des propositions examinées, factuelles et « vraies ». Il s'agit de se placer dans le rang des recherches rationalistes¹² qui soulignent, à la suite de Bachelard (1949), que les résultats et les conclusions scientifiques ne peuvent être envisagés que comme des réponses à des questions bien posées. Les savoirs se spécifient par leur caractère apodictique, de nécessité et **les élèves doivent les construire et les comprendre en termes de possible/nécessaire plutôt qu'en termes de vrai/faux**. Cette valeur apodictique des savoirs scientifiques se rapproche de la définition du troisième monde de Popper (1991), celui

¹¹ Un savoir scientifique est apodictique puisqu'il possède une certaine part de nécessité (Bachelard, 1949).

¹² Les tenants d'une vision rationaliste postulent que le but essentiel de la science est de résoudre des problèmes explicatifs et que les savoirs scientifiques sont liés à ces problèmes comme le montrent les études des épistémologues comme Popper, Bachelard et Toulmin. Cette position diverge de celle partagée par la position empiriste qui met en avant l'observation et l'expérimentation.

des contenus objectifs de la pensée, dont les « habitants » sont les systèmes théoriques, les problèmes, les situations de problème et les arguments critiques.

Par l'adoption de ce positionnement épistémologique, nous nous situons au sein des recherches qui avancent que le savoir scientifique problématisé – à la différence du savoir propositionnel – ne peut se constituer que par une liaison entre le problème, sa solution, et leur engagement dans un réseau de raisons¹³ (figure 3). Nous considérons, comme le souligne Orange (2005, p.80), que « *la production essentielle d'un problème scientifique n'est pas tant le texte de sa solution que l'explicitation de sa problématisation* ». Par conséquent, nous pensons qu'il est nécessaire que la place de la problématisation, qui considère que les savoirs scientifiques sont raisonnés, soit davantage privilégiée dans les situations d'enseignement-apprentissage scolaires. C'est elle qui fera, d'après notre positionnement épistémologique, la différence entre le maintien des élèves dans un savoir dé-problématisé, propositionnel ou leur accès à un savoir scientifique problématisé. La recherche des raisons et leur explicitation apparaissent nécessaires puisque les savoirs construits ne peuvent aucunement se restreindre à la solution finale escomptée. Cependant, le refoulement des raisons entraîne le renoncement au caractère apodictique des savoirs et, dans ce cas là, c'est le caractère propositionnel qui prend le devant (figure 3).

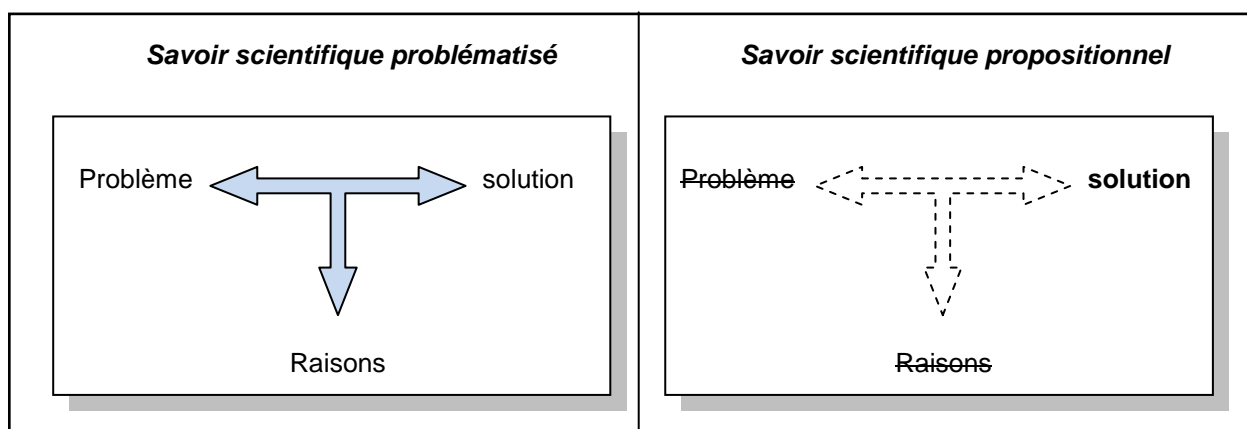


Figure 3. Relation entre le problème, sa solution et les raisons dans un savoir problématisé et dans un savoir propositionnel.

Prenons l'exemple du magmatisme pour illustrer notre positionnement épistémologique et pour bien distinguer une focalisation sur les solutions d'une focalisation sur les nécessités qui

¹³ « C'est la relation problème-solution qui leur donne tout leur sens en les impliquant dans un réseau de raisons. Ils échappent ainsi à la contingence des connaissances factuelles et prennent un certain caractère de nécessité. » (Orange, 2002, p. 30).

contraignent ces solutions. Accorder de l'importance à la solution du problème du magmatisme, dans sa globalité, consiste à expliquer la fabrication du magma par des fusions se déroulant sous des conditions particulières et dans des zones bien précises du globe (zone de subduction, dorsales océaniques, points chauds). C'est un savoir factuel et assertorique qui consiste à « savoir que c'est comme cela ». Il correspond parfaitement aux savoirs scientifiques admis actuellement puisqu'il a traversé toutes les étapes de mises à l'épreuve et qu'il est fondé sur des arguments de preuve irréfutables. De plus, c'est un savoir situé dans l'ordre épistémologique du vrai et du faux ne présentant aucun caractère de nécessité. Dans une démarche de problématisation, il ne suffit pas que les élèves accèdent à cette solution ni qu'on leur dise que le magma – comme ils pourraient le penser – ne provient pas d'une masse en fusion préexistante dans les profondeurs terrestres et que cette idée est fautive en les confrontant aux résultats scientifiques des études sismiques. Il est primordial de les emmener au bout de leur logique à travers des situations qui les aideront à passer d'une problématique de sortie d'un magma liquide préexistant à l'intérieur de la Terre à une problématique de fabrication de magma à des conditions précises (Orange & Orange Ravachol, 2004). De plus, il est important qu'ils intègrent les conditions de possibilités de cette problématique (nécessité d'une production locale du magma et nécessité d'un mécanisme entraînant la fusion) (Orange Ravachol, 2003) et qu'ils soient capables d'expliquer pourquoi cette formation est possible et nécessaire et pourquoi il ne peut pas en être autrement (Reboul, 1992). En effet, « *Problématiser consiste à explorer et délimiter le champ des possibles, en posant des questions du type : comment est-ce possible ? Peut-il en être autrement ? Cela se fait par un travail critique sur les possibles qui débouche sur l'établissement de nécessités* » (Orange, 2007c, p.92). La véritable entrée des élèves dans la science se fait lorsque ceux-ci accèdent à ces nécessités, à ces raisons (ibid.). Mais comment emmener les élèves à problématiser, à construire les problèmes de manière à éviter une focalisation sur les solutions et à privilégier les problèmes et les raisons ? L'accès aux raisons « *n'est possible que par l'argumentation, donc la mise en texte* » (Orange, 2005, p.82). Elles deviennent explicites lorsqu'elles sont mises en textes c'est-à-dire à partir du moment où il y a production de textes oraux et écrits qui fondent les savoirs. En effet, c'est à travers la mise en place de débats scientifiques portant sur des problèmes explicatifs que les élèves auront la possibilité d'argumenter, de produire des textes oraux et écrits et d'accéder aux raisons scientifiques qui fondent les solutions des problèmes.

2.4.2 Les débats scientifiques : des moments privilégiés pour problématiser

Depuis plus de vingt ans, l'exploitation didactique des conceptions des élèves et des obstacles correspondants dans l'enseignement scientifique dans une lignée de pensée bachelardienne, a fait l'objet de nombreuses recherches didactiques (Astolfi & Peterfalvi, 1993, 1997 ; Peterfalvi, 1997a, 1997b). On attribue à la pensée commune des élèves l'idée d'un obstacle, frein pour la connaissance. L'intérêt accordé au travail sur les obstacles, à leur déstabilisation et à leur dépassement entraîne la proposition de stratégies de travail autorisant le changement conceptuel visé. Parmi les stratégies proposées certaines se basent sur l'idée de conflits cognitifs ou socio-cognitifs en référence à la psychologie sociale (Perret-Clermont, 1979). Le but de ces dispositifs didactiques, dans une perspective de travail sur les conceptions, serait de favoriser le passage d'une conception C1 à une autre C2 plus conforme aux savoirs scientifiques admis actuellement (tableau 1). Les conceptions C1 et C2 sont de nature identique mais C2 est plus proche du savoir scientifique actuel. Cependant, les limites de ces dispositifs ont été relevées et discutées (Désautels & Larochelle, 1992). Au-delà des écueils repérés, les situations de débats peuvent s'étudier dans une autre perspective, celle de la construction de problème (tableau 1). Le cadre didactique de la problématisation en sciences développé par Michel Fabre et Christian Orange confère de l'importance aux débats scientifiques¹⁴, aux échanges et aux discussions entre les élèves en classe pour la construction des savoirs (Fabre & Orange, 1997 ; Fabre, 1999 ; Orange, 2000). Le but principal de ces moments d'activité intellectuelle intense et de développement des idées des élèves ne se limite pas à une simple confrontation entre les différentes conceptions et au passage de l'une à l'autre. L'importance est particulièrement attribuée, dans une perspective de construction de problèmes, à l'accès des élèves aux raisons qui sont derrière les solutions possibles (tableau 1). Spécifiquement, les explications, les controverses et les argumentations qui se développent pendant les débats sont vues comme des moyens permettant la construction des raisons scientifiques (Orange, 2003). La mise en place de tels débats scientifiques représente une condition nécessaire pour faire des sciences et c'est la pensée de l'élève qui aide la construction des raisons. De plus, cette mise en place accorde de l'importance à l'interaction sociale et à sa dimension épistémologique. Cela situe notre recherche et nos questionnements dans un cadre socio-constructiviste de l'apprentissage.

¹⁴ La notion de « débat scientifique », reprise par Michel Fabre et Christian Orange, a été introduite en didactique des sciences par Johsua & Dupin (1989) en référence à l'activité des chercheurs. Mais ces auteurs précisent une différence entre l'activité des chercheurs et celle des élèves. Les scientifiques produisent de nouveaux savoirs tandis que les élèves s'approprient des connaissances préalablement établies.

Reprenons l'exemple que nous avons présenté dans le paragraphe précédent concernant le magmatisme. Dans une optique de problématisation, l'enjeu essentiel des débats n'est pas de changer la conception des élèves d'une conception initiale (magma préexistant dans le globe) à une conception finale proche des savoirs actuels (le magma ne préexiste pas dans le globe puisque celui-ci est solide mais il se forme lorsque certaines conditions sont réunies sous des zones spécifiques) ni de dire que telle solution est exacte et que telle autre est erronée. Il s'agit de les faire passer d'une problématique à une autre et de les emmener à construire le problème, à repérer les nécessités, ou plus largement, les raisons qui sous-tendent les solutions (tableau 1). Précisément, le changement de conceptions, malgré les difficultés qu'il représente, ne constitue pas une condition suffisante d'accès aux savoirs scientifiques problématisés selon le point de vue de la problématisation : « *il s'agit de passer d'une connaissance commune, d'une opinion non questionnée, à un savoir scientifique, raisonné.* » (Orange, 2000, p.13). Le but essentiel de la mise en place des débats scientifiques en classe serait donc de faire accéder les élèves à un savoir raisonné et problématisé ce qui se distingue d'un travail sur les conceptions (tableau 1). Certes, ces situations basées sur une discussion des modèles des groupes d'élèves ne sont pas des moments exclusifs de problématisation mais elles sont les plus favorisées (Orange, 2000). Cependant, nous pensons que le travail sur les raisons ne devrait pas se limiter à ces phases de discussions. Il est nécessaire – pour une mise en texte problématisé des savoirs – que le travail et la focalisation sur les raisons soient prolongés et poursuivis avec les activités ultérieures (documentation scientifique, etc.). L'explicitation des raisons ne devrait pas se cantonner aux seuls débats qui ne correspondent qu'à des moments particuliers des situations d'enseignement-apprentissage.

	Point de vue du « Travail sur les conceptions »	Point de vue de la « Construction de problème »
Objectifs d'apprentissage	<p><i>Faire passer les élèves d'une conception C1 à une conception C2</i></p> <p>C1 et C2 sont de même nature C2 est plus proche des savoirs actuels que C1</p>	<p><i>Faire passer les élèves d'une opinion O à un savoir scientifique S</i></p> <p>O et S ne sont pas de même nature S est un savoir raisonné</p>
Principes de fonctionnement	<p><i>Faire prendre conscience à l'élève de ses conceptions et de leurs limites (qui a raison ?)</i></p> <p>Moyens : Conflits cognitifs et/ou socio-cognitifs</p>	<p><i>Faire construire le problème et, en particulier les raisons (quelles raisons se cachent derrière vos idées ?)</i></p> <p>Moyens : Justifications, confrontations, explicitation des contraintes repérées</p>

Tableau 1. Objectifs d'apprentissage et principes de fonctionnement du « débat scientifique » dans la classe (Orange, 2000, p.14-15, modifié).

Le point de vue de la construction de problèmes – dans lequel s'inscrit notre recherche – s'intéresse davantage à ce qui se joue dans le dépassement des conceptions initiales et n'est pas forcément en contradiction avec le premier mais il avance des éclairages particuliers qui le différencient. Ces éclairages concernent la question du dépassement des obstacles et des conditions de possibilités de ce dépassement (Orange, 2006). En effet, **le point de vue de la construction des problèmes donne de l'importance aux ruptures et aux obstacles épistémologiques mais se distingue des approches centrées sur le travail sur les conceptions par l'accent mis sur une spécificité épistémologique essentielle des savoirs scientifiques : leur apodicticité.** « Passer d'une conception à une autre sans comprendre pourquoi cela ne peut pas être autrement, donc sans raisons, relève de la conversion, non du travail scientifique » (ibid., p.89). La problématisation apparaît comme une condition indispensable pour tout dépassement d'obstacles et la construction des raisons caractérise la rupture essentielle entre opinion et science signalée par Bachelard (1938). Récemment, quelques travaux en didactique des sciences (Peterfalvi, 2006 ; Crépin, 2010a et b) se sont intéressés à ces deux courants de pensée didactique. Précisément, les recherches de Crépin (ibid.) mettent en tension deux courants didactiques : les enseignements centrés sur la problématisation et le travail sur les obstacles. Les

travaux réalisés attestent, suite à une étude comparative, didactique et historique, de problèmes paléontologiques, une convergence des relations entre problèmes et obstacles. L'étude de quelques débats scientifiques et controverses historiques liées à des problèmes paléontologiques révèlent que la problématisation pourrait être favorisée ou freinée par l'obstacle¹⁵. Par ailleurs, il semble que les problématisations mises en œuvre en classe des sciences ne relèvent pas d'une seule typologie et que l'on pourrait parler de problématisation scientifique/théorique et de problématisation technique (Orange, 2008).

2.4.3 Problématisation scientifique, théorique/problématisation technique¹⁶

Notre recherche se place dans une position qui voit les situations de débats scientifiques comme des moments privilégiés de problématisation permettant l'accès aux savoirs scientifiques. Néanmoins, il apparaît que la mise en texte orale des raisons se retrouve affectée et rompue par un basculement, à la fin des débats scientifiques menés en classe, d'une logique de problématisation vers une logique de réfutation qui explicite et met en avant les solutions laissant de côté les raisons (Orange Ravachol, 2010). Cette bascule correspond à une mise en œuvre par les enseignants et conduit à une **problématisation qui peut être qualifiée de technique** puisqu'elle se limite à un processus intermédiaire qui permet d'aller vers la solution du problème (Orange, 2005) (figure 4). Dans cette démarche, qui représente un exemple illustrant la dérive « technique » de la problématisation, la primauté est assignée à la solution dans le texte de savoir et c'est le caractère propositionnel qui prend le devant. Or, **dans une véritable problématisation scientifique (ou théorique)**, la construction du problème et la problématisation ne sont pas considérées comme des moyens pour accéder aux solutions. Il s'agit, pour construire des problèmes explicatifs, de parcourir et d'examiner le champ du possible, de l'impossible et du nécessaire afin de garder la concentration sur l'apodicticité des savoirs scientifiques (ibid.) (figure 4). Les nécessités construites sont toutes aussi cruciales que la solution trouvée et le problème scientifique construit ne disparaît pas ainsi avec la solution. Précisément, il s'agit de travailler les solutions envisagées pour construire les raisons. Cela pointe une caractéristique primordiale de la problématisation scientifique : « *par une sorte de*

¹⁵ L'obstacle artificialiste, par exemple, a été moteur d'argumentation, de questionnement et de construction des raisons dans un débat scientifique en classe de CM1. Ce même obstacle a participé, en histoire des sciences, dans le blocage du questionnement jusqu'au XVII^e siècle en France (Crépin, 2010 a et b).

¹⁶ D'autres typologies des problématisations existent : les problématisations historiques et fonctionnalistes (Orange Ravachol, 2003). Celles-ci sont liées aux caractéristiques épistémologiques et à l'objet d'étude des sciences de la vie et de la Terre.

renversement, la problématisation scientifique n'est pas au service des solutions, mais les solutions possibles sont au service des raisons qui sont travaillées » (Orange, 2008, p.43). Ainsi, les propositions de solution ne sont pas écartées mais travaillées et interrogées afin de savoir pourquoi elles peuvent être ou ne pas être des solutions dans le but de construire les raisons. Ce type de problématisation envisage idéalement la production d'un texte de savoir intégrant les solutions mais aussi les raisons. Ces développements nous interrogent, dans le cadre de notre recherche, sur la problématisation que favorise l'enseignement scientifique en sciences de la Terre particulièrement dans le domaine du magmatisme et sur les pratiques qui aboutissent à une problématisation théorique et une mise en texte problématisé des savoirs scientifiques.

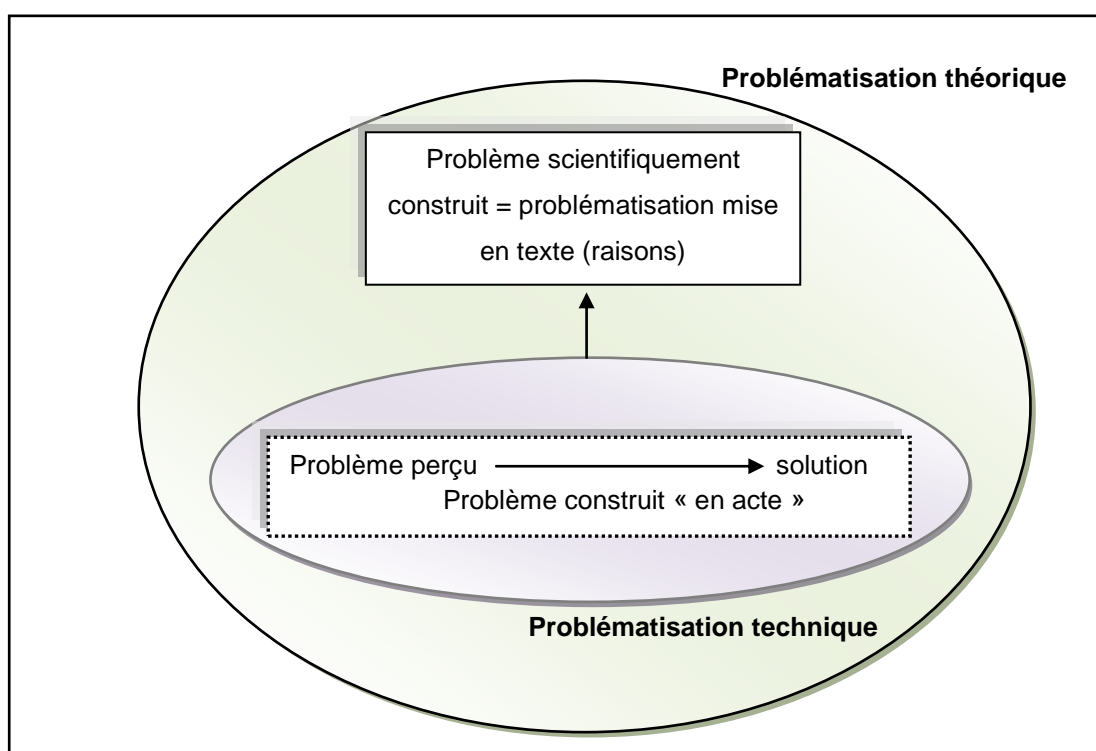


Figure 4. Les deux types de problématisation technique et théorique (d'après Orange, 2005, p.81 et Orange, 2008).

Il est important de noter que le travail de problématisation théorique est affaibli si le texte de savoir ne prend pas en compte les nécessités construites et se limite, suite aux discussions d'idées à des énoncés plus ou moins connectés, détachés de tout questionnement. A quoi servirait alors de problématiser si le texte produit au terme des activités renonce au processus de problématisation et se suffit d'une simple exposition des résultats scientifiques ? Lors de la mise en texte des savoirs, la décontextualisation risque de chosifier le savoir mais en même temps, si le texte garde une trace importante des processus qui ont conduit à son élaboration, il perd le caractère général et universel d'un texte scientifique et reste un texte singulier. Pour sortir de

cette impasse et dépasser cette tension problématique, « *les textes produits doivent, d'une part, être autoréférentiel et, d'autre part, garder la trace des problèmes auxquels ils sont une réponse* » (Lhoste, 2008, p. 279). En ce sens, les activités doivent aboutir à des textes de savoirs institutionnalisés ayant une formulation universalisable mais qui rendent clairement compte des nécessités discutées lors des situations de travail en classe. Notre travail de recherche se place dans cette directive et cherche à déterminer les pratiques de savoirs qui permettraient de parvenir à des textes décontextualisés, universels qui intègrent les raisons.

Après avoir insisté, dans cette partie, sur le rôle de la problématisation dans la construction des savoirs problématisés, nous nous penchons sur les difficultés induites par la textualité des savoirs.

2.5 Difficultés induites par la forme textuelle des savoirs scolaires

La problématisation en sciences représente une condition d'accès des élèves aux véritables savoirs scientifiques. Rey (2005, p.99) voit que la forme scolaire des apprentissages intervient dans le type de problématisation attendu des élèves par l'école : « *La textualité est un des principes régulateurs des problématisations scolaires.* ». Cet auteur considère que l'école valorise une certaine forme de problématisation régie par une exigence de textualité. Les caractères retenus et isolés d'une situation sont ceux qui s'accommodent à l'économie du texte. L'obligation de « textualité » des savoirs structure les pratiques enseignantes et induit certaines complications et difficultés chez les élèves. En effet, même si les enseignants suivent les discours pédagogiques actuels qui les exhortent à engager les élèves dans des tâches et des problèmes, le « savoir-texte » n'est pas pour autant éliminé (Rey, 2007). Au contraire, il reste omniprésent et cette mise en activité finit par aboutir au fameux « texte de savoir ». Cette manière de faire, au lieu de confronter les élèves d'une manière directe aux textes de savoirs, enrôle ceux-ci dans des activités, des problèmes, des tâches, des situations-problèmes mais n'élimine pas toute référence au savoir textuel et fait ainsi des activités un moyen d'accès à ce savoir qui constitue le but et l'intention ultime. « *La « tâche » scolaire, y compris quand elle consiste en une construction de problème, n'est donc pas là pour remplacer le savoir textuel, mais comme un moyen pour y accéder* » (Rey, 2007, p.177). Kahn & Rey (2008, p.22) établissent que certains élèves éprouvent des difficultés dès lors qu'il s'agit de « *tirer de la situation singulière de la classe, les outils de savoir reconstruits ou utilisés par les élèves dans l'activité et d'en extraire et consigner le caractère universel, autrement dit : mettre en texte le*

savoir ». Plus spécifiquement, le passage d'une parole, dont le sens s'éclaire par le renvoi aux réalités extérieures, à des énoncés particuliers d'un texte dont le sens est tiré du rapport réciproque entre ces énoncés au sein du texte et à des références existant dans d'autres textes non présents mais partagé par le groupe, semble engendrer ces difficultés. La focalisation des élèves reste attirée par les aspects réels de l'activité dont ils ne trouvent qu'un moyen pour en tirer les conséquences, la raconter. Ils restent prisonniers des particularités de l'activité qu'ils viennent de réaliser ce qui entrave leur saisie du savoir en jeu et leur perception du sens de l'activité au delà du contexte de travail. De même, Bernié (2002, p.79) note que le langage de l'école, et principalement l'écrit, induit certaines difficultés car « *il présente toujours des significations décontextualisées ou créées par des moyens linguistiques spécifiques, opposés à la communication quotidienne, fortement contextualisée, entraînant une compréhension prenant davantage appui sur la situation que sur les formes linguistiques* ». Ceci nous conforte dans le choix d'étudier la manière dont se fait cette mise en texte en sciences de la Terre et les difficultés qu'elle rencontre. Notre corpus d'analyse étant constitué de productions écrites et orales d'élèves et d'enseignants, nous interrogeons dans ce qui suit le lien entre les activités langagières, les apprentissages scientifiques et la construction des savoirs problématisés.

3. Activités langagières, apprentissages scientifiques et construction des savoirs scolaires problématisés

Vu le rôle des pratiques langagières dans le travail des chercheurs, déjà évoqué dans le premier paragraphe de ce chapitre, les recherches en didactique insistent sur la nécessité de la transposition de ces pratiques dans les enseignements (Jaubert & Rebière, 2000, 2001 ; Jaubert, 2007). En effet, « *Il semble peu pertinent de dissocier à l'école les savoirs enseignés des pratiques langagières qui les ont élaborés, même si les élèves n'ont pas à produire des savoirs savants mais à s'approprier des savoirs préexistants* » (Fillon & al., 2004, p.204). Les savoirs ne peuvent pas être détachés des conditions et des pratiques diverses (expérimentales, instrumentales, discursives etc.) développées par les chercheurs lors de leurs activités de recherche. Les savoirs générés par les sphères scientifiques sont, selon Jaubert (2007, p.18), « *tributaires de ces pratiques et les cristallisent* ». Ainsi, la notion de « communauté discursive »¹⁷ définie par Bernié (2002) cherche à permettre de transposer « *les conditions*

¹⁷ Une communauté discursive est « *une communauté constituée sur la base d'une pratique sociale quelconque (production de biens matériels ou de connaissances scientifiques, etc.)* » (Bernié, 2002. p.78).

sociales d'élaboration des savoirs et d'émergence des œuvres » (ibid., p. 78). Bakhtine (1984) spécifie que toute sphère d'activité humaine génère ses pratiques, ses valeurs, ses croyances et ses genres de discours. Par conséquent, l'enseignement des sciences ne peut pas se satisfaire de demander aux élèves d'apprendre, telles qu'elles, les mises en textes des explications scientifiques issues de la transposition didactique. Il ne peut pas, non plus, s'agir de les entraîner à la maîtrise des genres discursifs en vigueur dans la communauté scientifique de référence. Il est indispensable que les élèves s'approprient les pratiques scientifiques et particulièrement les pratiques langagières malgré les écarts introduits par la transposition didactique entre la science telle qu'elle se fait dans les laboratoires et la science telle qu'elle est enseignée dans la classe (Rebière & al., 2009). Avant d'examiner le rôle des activités langagières dans la construction des savoirs problématisés, nous nous intéressons aux pratiques ordinaires écrites et orales et classe de science.

3.1 Revue des pratiques ordinaires orales et écrites en classe des sciences

Les recherches actuelles en didactique des sciences¹⁸ considèrent que l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre ne privilégie que certains aspects des pratiques scientifiques en particulier l'expérimentation (Orange, Fourneau & Bourbigot, 2001 ; Vérin, 1988, 2003). « *On enseigne aux enfants beaucoup plus de choses sur ce que font les scientifiques dans leurs laboratoires que sur ce qu'ils font quand ils débattent et écrivent en tant que membres de sociétés savantes* » (Sutton, 1995, p.39). On oublie souvent que l'activité des chercheurs scientifiques s'organise, en plus de l'expérimentation, autour des productions langagières écrites et orales. Cette vision commune du travail scientifique reste prépondérante dans l'esprit des enseignants malgré les textes du Plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école (M.E.N., 2000) qui reprennent l'importance des activités langagières (développement des idées, discussions, etc.). Les activités proposées aux élèves sont souvent basées sur des validations expérimentales d'explications correspondant à celles admises par la sphère scientifique actuelle. Or, « *l'expérimentation doit [...] être privilégiée, non pas quand c'est possible, mais quand c'est pertinent par rapport aux apprentissages visés* » (Orange, 2009, p.202). Ainsi, la prédominance de l'épistémologie empiriste et positiviste des savoirs chez les enseignants fait de l'observation le fondement de toute démarche scientifique permettant

¹⁸ Ces recherches ont porté sur des séquences ordinaires et leurs résultats ont été obtenus à partir d'un petit nombre d'observations à l'ensemble des classes. Il ne s'agit pas de généraliser ces résultats mais de pointer les problèmes qu'ils permettent de relever.

d'aboutir à une vérité scientifique factuelle (Coquidé, 1998 ; Porlan Arizan & al., 1998). Malgré cela nous nous interrogeons sur la manière dont les pratiques orales et écrites sont utilisées en classe de sciences.

Généralement, les échanges en classe se font oralement dans le cadre de cours dialogués menés par l'enseignant qui retient les réponses pertinentes des élèves selon les objectifs qu'il a prédéfinis au préalable. Ceci donne l'impression que les élèves sont actifs et qu'ils « participent », mais en réalité, ces « cours dialogués » permettent à l'enseignant de détenir le fil conducteur des échanges alors que les élèves essaient de décoder les attentes espérées et de deviner la réponse exacte. La structure des échanges est « monologique (*et non pas dialogique*)¹⁹ dans la mesure où, derrière cette forme, n'existe qu'une progression thématique unique, et non deux discours qui se confrontent » (Astolfi & al. 2006, p.33). Ce qui est effectivement révélé par les élèves et l'enseignant pourrait bien l'être avec la seule voix de ce dernier. L'accent est plus mis sur la participation de la classe que sur l'instauration de véritables débats scientifiques et d'« oraux réflexifs » au sens de Jaubert et Rebière (2002). Des chercheurs anglais (Driver & al., 2000) ont également prouvé que les enseignants offrent peu d'opportunités aux élèves en classe de sciences pour discuter et développer leurs pratiques langagières : « [...] *very little opportunity is given by teachers for students to discuss ideas in groups, or for whole class discussions about the interpretation of events, experiments, or social issues. [...] The dominant form of interaction in the classrooms was teacher talk.* » (ibid., p. 307-308). Dans les rares cas où ces occasions sont données, les discussions portent généralement sur des aspects procéduraux et non explicatifs de la science. Toutes ces pratiques cantonnent les savoirs dans une épistémologie « du vrai et du faux » alors que c'est une épistémologie du « problématique » qu'il faudrait privilégier pour un véritable accès des élèves aux savoirs apodictiques.

Quant aux productions d'écrits, elles servent rarement d'appui au travail en classe des sciences et se limitent au recueil des représentations initiales des élèves qui demeurent inexploitées, au relevé d'observations suivi d'un compte rendu d'expériences, à des réponses aux questions et à l'élaboration d'un résumé à la fin du cours donné par l'enseignant et recopié par les élèves (Jaubert & Rebière, 2001 ; Schneeberger & Gouanelle, 2001 ; Vérin, 2003). Les écrits produits par les élèves sont le plus souvent des « **écrits d'exposition** » rédigés au terme d'un travail et obéissant à des exigences précises (Vérin, 1988 ; Astolfi & al., 1991). Ces écrits se situent dans

¹⁹ La structure des échanges de classe est monologique même si leur forme est *dialogale* puisque les interventions des élèves et de l'enseignant se succèdent et se croisent (Astolfi & al., 2006).

l'ordre épistémologique du « vrai et du faux » et sont corrigés par l'enseignant en fonction de leur écart à des normes de formes et de savoirs culturellement validées. L'importance est surtout accordée aux observations et aux expériences et « *l'écrit est ainsi rarement convoqué pour des interprétations personnelles, des débats d'idées et des confrontations* » (Jaubert, 2007, p.24). En réalité, les écrits d'exposition servent principalement à organiser la tâche et conduisent à « *la construction d'une connaissance contextualisée* » (Vérin, 2003, p. 8) qui empêche le passage à la conceptualisation, principale difficulté des élèves en sciences. Plus clairement, les élèves « *repèrent la tâche essentiellement à ses caractéristiques de surface (on a observé au microscope...), et sur le plan des connaissances, ils sont dans une position d'attente vis-à-vis de l'enseignant qui détient la vérité* » (ibid. p.8). Ceci les empêche, par manque de réelle activité de problématisation, de percevoir le sens et la portée de leur activité au-delà du contexte de travail. En cela, ces pratiques de classe mettent de côté un aspect essentiel du travail des chercheurs et utilisent le langage comme un simple « système d'étiquetage » servant à désigner, décrire, exposer les savoirs à apprendre et transmettre des informations établies plutôt qu'un « système interprétatif » permettant d'articuler les idées aux faits (Sutton, 1992, 1995). L'écriture est davantage « *envisagée comme la simple transcription sur le papier de ce qu'on avait déjà dans la tête* » (Astolfi, 2005b, p.9). Cependant, d'autres formes d'écritures comme les « **écrits d'investigation** » ou « **écrits de travail** », même si elles sont rares à l'école, permettent la mobilisation de la pensée des élèves (Vérin, 1995). Orange & al. (2001) font le même constat et considèrent, par conséquent, que l'enseignement scientifique ne laisse pas suffisamment de place à la construction des problèmes. Dans la communauté scientifique, qui constitue une référence aux pratiques scolaires, les écrits de travail sont élaborés dans le moment où le savoir se construit : notes, schémas provisoires, brouillons d'articles qui vont être relus, échangés, discutés au sein d'une équipe et soumis à la critique des pairs et de leurs auteurs. Ils se situent dans l'ordre épistémologique du « problématique » où la question du vrai et du faux est temporairement suspendue pour celle du possible et de l'impossible donc du contingent et du nécessaire. Ils constituent, selon notre positionnement théorique, une aide à la problématisation. La différence entre les écrits de travail et ceux expositifs tient à leurs formes langagières, à leurs fonctions didactiques mais c'est surtout leur statut épistémologique qui les oppose (ibid.) (tableau 2).

	Ecrits de travail (ou d'investigation)	Ecrits d'exposition
Formes langagières et fonctions didactiques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elaborés dans les moments où le savoir se construit : notes, schémas provisoires, brouillons d'articles... ✓ Aident à la problématisation 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Rédigés au terme d'un travail et répondant à des normes précises : comptes rendus d'expérience, résumés... ✓ Organisation de la tâche
Statut épistémologique	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ordre épistémologique du « problématique », du possible et de l'impossible donc du contingent et du nécessaire : accession aux raisons 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ordre épistémologique du « vrai » et du « faux »

Tableau 2. Formes langagières, fonctions didactiques et statut épistémologique des écrits de travail et d'exposition (d'après Orange & al. 2001).

Les pratiques ordinaires, que nous venons d'exposer, ont des conséquences sur les représentations des élèves quant aux savoirs et au langage (Jaubert, 2007). Le privilège donné à l'expérimentation au détriment de la pensée, « *laisse croire aux élèves que la science c'est faire quelque chose et regarder ce qui se passe. Ainsi perdure à l'école une représentation de la construction des savoirs diversement qualifié d'inductiviste/réaliste, de naïvement empirique, de positiviste et de scientiste* » (ibid., p.24). Le savoir scientifique est vu par les élèves comme existant en soi, plutôt que le fruit d'une activité humaine développée par un groupe de chercheurs résultant de débats, de controverses et d'efforts intenses d'interprétation au sein du laboratoire de recherche et de la communauté scientifique. Fabre (2009, p.207) souligne que l'état « neutre » des savoirs est justifié par la conservation de cette conception empiriste du savoir qui « *en misant tout sur l'expérience, [...] fait de celle-ci une réponse sans question* ». Par ailleurs, la réduction des productions d'écrits à des comptes rendus d'expériences, construit chez les élèves une représentation erronée des pratiques langagières efficaces en sciences et de la nature même du langage. « *Ils sont en effet incités à associer l'écriture scientifique à la transmission des faits plutôt qu'à la production et à la discussion d'idées sur les choses inhérente à la controverse, de sorte qu'ils sont amenés à considérer le langage comme un medium transparent, simple moyen d'encodage d'une signification ou d'une expérience de nature non linguistique, préalablement construite hors du langage et plus particulièrement lors de l'observation.* » (Jaubert, 2007, p.24).

Suite à ces développements, il apparaît que la part des activités langagières « problématisantes » reste limitée dans l'enseignement scientifique. Les pratiques scolaires qui mettent en jeu des productions langagières faisant véritablement référence aux sphères de production du savoir, évoluent peu. Toutefois, la part de ces pratiques dans la construction des savoirs est indéniable. Il convient alors de nous interroger sur le rôle des activités langagières dans la problématisation et les apprentissages scientifiques particulièrement dans la production d'explications.

3.2 L'accès aux savoirs problématisés par l'intermédiaire des activités langagières

Nombreux sont les travaux menés sur les apprentissages scolaires et sur le travail des chercheurs qui prouvent qu'il existe une relation étroite entre l'appropriation des savoirs scientifiques et les activités langagières écrites et orales (Vérin, 1995 ; Jaubert & Rebière, 2000, 2001 ; Jaubert, 2007 ; Astolfi & al., 1991, 2006). Ces études attestent que le langage n'est pas uniquement un moyen pour communiquer les connaissances mais qu'il joue un rôle fondamental dans la construction des savoirs scientifiques. En effet, « *apprendre, c'est s'instituer acteur dans chaque contexte disciplinaire ce qui suppose de s'approprier les pratiques socio-langagières qui fondent sa cohérence* » (Jaubert & Rebière, 2000, p.173) et qui favorisent les opérations nécessaires à la construction des savoirs. Les résultats de ces recherches n'impliquent pas la réduction des sciences au langage et « *il est évident que les pratiques langagières ne sont qu'une des facettes des pratiques scientifiques* » (ibid. p.175) qui se réfèrent également aux pratiques théoriques, aux expériences et aux données empiriques. « *Les sciences fonctionnent en construisant des modèles explicatifs et ces modèles, tout comme les données empiriques dont ils tentent de rendre compte, relèvent à la fois du langagier et du non langagier, du verbal et du non verbal* » (C. Orange, 2004, p.1). Par conséquent, l'apprentissage en sciences se base sur une appropriation des pratiques scientifiques – expérimentales, techniques, technologiques mais aussi discursives – transposées en classe. Les travaux réalisés s'inscrivent dans le cadre de l'approche socio-historique des activités langagières, soutenue par le psychologue soviétique Vygotski (1937) et reprise par de nombreux didacticiens, Bernié (2002), Brossard (1998), Jaubert & Rebière (2000, 2001). En inscrivant notre recherche dans cette filiation, nous nous démarquons d'une conception structuraliste du langage pour nous situer plutôt dans une conception qui reconnaît une fonction de reconfiguration au langage. La première conception met en avant une certaine dichotomie entre langage et pensée tandis que la seconde met en valeur une dimension constructive et un rôle cognitif du langage. Le langage n'est pas simplement un système de

codage du réel qui révèle une pensée et la divulgue, « *il est ce par quoi elle est rendue possible dans ses formes les plus élaborées* » (Chabanne & Bucheton, 2000, p.23). Il s'agit d'« *adopter une représentation du langage comme activité et non comme objet, coquille vide transparente qui véhiculerait une pensée 'déjà là'* » (Jaubert & Rebière, 2001, p.84). Prenant appui sur ces postulats, les didacticiens des sciences de la vie et de la Terre ont étudié les relations entre les activités langagières et le travail de problématisation lors des phases de débat scientifique (Orange, 2003 ; Lhoste, 2008 ; Schneeberger, 2008). L'activité argumentative qui se développe lors de ces moments d'échanges se caractérise par deux fonctions essentielles (Orange, 2003) :

- La construction de schématisations, au sens de Grize (1997), fait qu'une proposition de solution pourrait être reçue comme intéressante à examiner comme possible. Ces « *argumentations sur les possibles* », autorisent la compréhension et la prise en compte des idées qui seront examinées et débattues par le groupe classe.
- L'établissement du caractère nécessaire ou impossible d'un énoncé explicatif au moyen des « *argumentations de preuve* » présentées lors des débats. Ces arguments vont faciliter la construction des raisons.

Les débats scientifiques vont – à travers les controverses, les argumentations, les justifications et les contestations – permettre aux élèves de repérer les contraintes et ainsi de délimiter le champ des possibles. « *La prise en compte de différents points de vue, l'explicitation de leurs fondements et l'évaluation de leur recevabilité, les négociations qui en découlent sont sources de déplacements énonciatifs des élèves, qui, en s'inscrivant dans des pratiques de la communauté scientifique, construisent les savoirs en jeu* » (Jaubert et al. 2009, p. 130). A côté de ces activités langagières orales, les écrits de travail mobilisent la pensée des élèves et sont utilisés comme support pour les débats de classe. Par leur réalisation écrite, ils fixent les idées des élèves, les conservent et les soumettent à la critique (Goody, 1979). Cela permet, d'après Orange et al. (2001, p.129), de travailler sur le « *problématique* », de parcourir le champ des possibles et d'échapper à « *certaines dérives de la discussion et des jeux purement rhétoriques* ». L'écriture, pour Goody (2007), constitue une « *technologie de l'intellect* »²⁰ qui permet le stockage, l'accumulation, l'archivage des savoirs, leur comparaison et le retour critique sur ces savoirs. Cet auteur montre comment le passage des sociétés de tradition orale à des sociétés de tradition écrite a permis l'apparition et le développement des pratiques scientifiques et par conséquent celui du

²⁰ « *Pour désigner la manière dont l'écriture affecte les opérations cognitives et intellectuelles, termes qui pour moi recouvrent au sens large la compréhension du monde dans lequel nous vivons, et plus spécifiquement les méthodes que nous employons pour y parvenir.* » (Goody, 2007, p.208).

savoir scientifique. Alors que les sociétés orales se basent sur la mémoire²¹, « *L'une des caractéristiques d'un texte, par opposition à une énonciation, est que les gens peuvent y retourner pour valider certaines attitudes ou pratiques* » (Goody, 2007, p.2). De plus, l'écriture permet de rendre compte des activités orales, des réflexions personnelles ou collectives. Par conséquent, « *si la pratique est transcrite dans l'écrit, l'écrit va à son tour, par le recul qu'il procure, déterminer la pratique* » (Hatem, 2005, p.22).

Du point de vue de la construction des problèmes, nous nous situons dans une position qui rejoint ces travaux et qui voit dans les écrits de travail et les moments de débats scientifiques un moyen non pas de trouver des solutions mais d'explorer et d'organiser le champ des possibles. La problématisation scientifique semble inextricablement liée à la verbalisation et au travail langagier (Orange, 2005). Les échanges, les discussions, les écrits produits jouent un rôle dans la construction des savoirs et représentent une condition de possibilité des savoirs scientifiques problématisés (Orange & al., 2001). Il est ainsi difficile de concevoir l'élaboration des savoirs en dehors de l'activité langagière qui « *peut faciliter la construction et l'objectivation des contenus de pensée parce qu'elle permet de transposer l'observation directe dans un système de représentation symbolique oral ou écrit et de l'éloigner de la connaissance sensible* » (Rebière & al., 2009, p.284).

Conclusion et première formulation des questions de recherche

Nous avons vu, tout au long de ce chapitre, que la pratique de recherche scientifique est inéluctablement mise en texte, par les chercheurs et par le projet même d'enseigner, ce qui n'est pas sans provoquer certaines contraintes. La mise en texte scientifique dissimule les pratiques qui ont contribué à la naissance du texte de savoir. Dans l'enseignement, la mise en texte ordinaire des savoirs scolaires tend à limiter ces savoirs à des propositions plus ou moins connectées qui exposent les énoncés scientifiques sans aucune référence aux problèmes. De tels savoirs sont qualifiés comme étant de nature propositionnelle. Nous avons fait ressortir l'origine de cette chosification des savoirs dans l'histoire de la philosophie, dans le processus de transposition didactique ainsi qu'en rapport avec les conceptions épistémologiques des enseignants. Nous avons également insisté sur l'importance du cadre épistémologique et didactique de la problématisation pour construire des savoirs apodictiques et problématisés ne se

²¹ Il ne s'agit pas de négliger le rôle de la communication orale qui continue bien évidemment, selon Goody (2007) à jouer un rôle fondamental après l'avènement de l'écriture.

réduisant pas à de simples savoirs assertoriques et factuels comme c'est souvent le cas dans les situations ordinaires. Pour cela, les débats apparaissent comme des moments privilégiés de problématisation mais ne représentent que des moments particuliers des séquences d'enseignement. Nous avons finalement relevé le rôle des pratiques langagières (écrites et orales) dans la mise en texte des savoirs problématisés.

Même si la pratique scientifique et la transposition didactique supposent la production de textes de savoirs, nous considérons que les savoirs scientifiques ne peuvent pas être représentés uniquement par des textes et rester déconnectés des pratiques. Martinand (1986) a ainsi introduit la notion de pratiques sociales de référence, qui ne limite pas les disciplines scolaires à des « textes de savoir » mais les envisage plutôt avec les activités correspondantes. Dans ce sens, **toute analyse du savoir scolaire devrait prendre en compte l'articulation entre les textes scientifiques produits et les pratiques qui ont servi à leur élaboration** (Orange & Orange Ravachol, 2007). Notre recherche se place dans la continuité des travaux de l'équipe du CREN²² qui visent à déterminer les conditions de possibilité d'une problématisation scientifique et de l'accès aux nécessités (Fabre, 1999 ; Orange, 2000, 2005 ; Orange Ravachol, 2003). Nous abordons la question des conditions d'accès aux savoirs problématisés à travers l'étude de la mise en texte et des pratiques sous-jacentes puisqu'il est impossible de dissocier les textes produits des pratiques qui ont contribué à leur construction. Dans un premier temps, les situations étudiées par les chercheurs du CREN étaient centrées sur l'analyse de débats scientifiques portant sur des affiches (schémas et textes) présentées à la classe et réalisées par des groupes d'élèves en réponse à un problème posé (Orange, 2000). Mais la mise en texte est généralement non accomplie à la fin de ces séances et il est apparu intéressant de suivre cette mise en texte sur l'intégralité des séquences d'enseignement-apprentissage. De plus, il a été constaté qu'au-delà des situations de débats, les textes de savoirs construits ne prenaient pas en compte les nécessités construites (Orange & Orange Ravachol, 2007). D'où la volonté d'étudier le processus de problématisation, non plus à l'échelle du débat scientifique – qui reste bien évidemment un moment privilégié pour problématiser – mais d'étendre les recherches à l'échelle de la séquence toute entière. Ceci a commencé avec la recherche « *Mises en textes et pratiques des savoirs dans les disciplines scolaires* » qui a associé l'INRP, trois IUFM et trois

²² Centre de Recherche en Education de Nantes.

laboratoires²³. Dans le but de poursuivre et de développer cette thématique de recherche, nous nous intéressons aux sciences de la Terre et particulièrement du domaine du magmatisme.

A la lumière des connaissances didactiques, épistémologiques et des résultats des recherches évoqués précédemment, nous proposons une première formulation de nos questionnements de recherche :

- A travers ce travail, nous cherchons à **étudier les pratiques de mise en texte** des enseignants pendant les situations d'enseignement-apprentissages en Sciences de la Terre **afin de repérer les difficultés et les conditions didactiques de construction des savoirs problématisés relatifs au magmatisme**. L'approfondissement de cette question nous permettra d'avancer dans l'identification et l'analyse des difficultés que rencontre la construction des savoirs scientifiques en sciences de la Terre et qui entravent le passage à la conceptualisation.
- Nous étudions les pratiques effectives observées en situation pendant des **séquences dites « ordinaires » et « forcées » de classe** (Orange, 2010). Il s'agit d'abord d'étudier les pratiques de mise en texte d'une séquence ordinaire et de mesurer à quel point celles-ci construisent un texte de problématisé raisonné. Ensuite, une séquence forcée sera mise en place afin de repérer les conditions qui permettent d'aboutir à un texte de savoir problématisé et sous quelles conditions.
- Ces analyses nous aideront à mieux cerner le processus de mise en texte problématisé et le passage des idées communes aux raisons. Les résultats obtenus permettront, dans la continuité des recherches sur la construction des savoirs, **une meilleure compréhension des liens entre problématisation, mise en texte, pratique de savoirs et construction des savoirs scientifiques en sciences de la Terre**.

Vu que nous mettons le processus de problématisation au cœur de nos analyses, nous nous appuyons sur des traces langagières orales et écrites. Nous nous intéressons à tout ce qui est dit et écrit en classe pour analyser le processus de mise en texte et de problématisation. Cette étude porte sur des séquences d'enseignement liées au concept de magmatisme à différents niveaux scolaires (4^{ème} et Terminale S). Ceci nous emmène à étudier l'épistémologie et l'histoire de ce concept mais sous un regard particulier, celui de la problématisation.

²³ IUFM des Pays de la Loire (Université de Nantes), d'Aquitaine (Université de Bordeaux 4) et de Basse-Normandie (Université de Caen). Laboratoires : CREN (Nantes), LACES (Bordeaux 2), CERSE (Caen). Durée de la recherche : 2006-2009.

Chapitre 2. Etude épistémologique et historique du magmatisme dans le cadre de la problématisation

Introduction

Notre recherche concerne la mise en texte problématisé du concept de magmatisme. D'où la nécessité de retracer, dans ce deuxième chapitre, quelques éléments de l'histoire et de l'épistémologie de ce concept dans le but d'identifier les savoirs scientifiques en jeu en rendant compte des ruptures, des controverses, des problèmes discutés par la communauté scientifique actuelle et passée. Ces éléments constitueront pour nous des repères utiles pour analyser les modèles spontanés des élèves ainsi que les problématisations qu'ils mettent en œuvre. Cependant, même si des convergences et des similitudes pourraient être relevées entre certaines théories explicatives historiques et les conceptions des élèves, nous nous détachons de l'idée d'une véritable homologie « récapitulationniste » car les contextes matériels et culturels de l'histoire des concepts sont inéluctablement différents de ceux de leur enseignement (Demounem & Astolfi, 1996).

Notre étude s'appuie, pour analyser le savoir magmatique, sur le concept des « espaces des contraintes » emprunté au cadre théorique didactique et épistémologique de la problématisation. Nous tentons de reconstituer les problématisations à la base des différentes explications avancées dans l'histoire pour rendre compte du magmatisme jusqu'à sa compréhension par les géologues actuels. Nous commençons par positionner le magmatisme par rapport à la définition des sciences de la Terre comme des sciences historiques et fonctionnalistes. Puis, nous présentons, avant d'entamer en détail l'étude historique et épistémologique, les éléments du cadre théorique de la problématisation qui serviront notre étude.

1. Positionnement du magmatisme par rapport aux pôles fonctionnaliste et historique de la géologie

Les sciences de la Terre²⁴ possèdent une particularité, elles sont à la fois des sciences fonctionnalistes (ou fonctionnelles) et historiques²⁵ : *« l'objet de la géologie est défini par cette double préoccupation : connaître la partie de la terre accessible à l'observation et en*

²⁴ Nous utiliserons les termes « sciences de la Terre » et « géologie » comme des synonymes tout au long de cette recherche.

²⁵ Du point de vue des pratiques empiriques, une autre double dimension caractérise les sciences de la Terre. Elles sont à la fois des sciences de terrain et des sciences de laboratoire.

déterminer l'histoire » (Gohau, 1987, p.7). La géologie fonctionnaliste s'intéresse à l'étude du fonctionnement actuel de la Terre, aux phénomènes géologiques externes (érosion, sédimentation) et internes (volcanisme, séismes), tandis que la géologie historique vise la reconstruction du passé et l'histoire de la Terre (figure 5). Cette subdivision n'est pas spécifique des sciences de la Terre, elle caractérise aussi les sciences de la vie²⁶. Les deux pôles, fonctionnalistes et historiques, ne sont pas définitivement déconnectés étant donné que « *la Terre actuelle porte le fardeau de son histoire* » ainsi qu'une partie des vestiges de son passé (roches, fossiles, etc.) (Orange Ravachol, 2003, p.21). La dimension fonctionnaliste mais aussi historique des sciences de la Terre amène Orange Ravachol (ibid.) à distinguer entre des **problèmes fonctionnalistes** comme l'étude de la répartition actuelle des séismes et des volcans, et des **problèmes historiques**, par exemple l'explication de la formation des chaînes de montagnes. En dépit de cette typologie des problèmes, les sciences de la Terre ne prennent pas en charge des problèmes qui relèvent exclusivement d'un domaine ou d'un autre. De nombreux problèmes sont dits « mixtes » relevant simultanément des deux pôles et certains problèmes sont plus « mixtes » que d'autres comme ceux concernant l'évolution des êtres vivants et de l'origine de la vie (ibid., p.26).

Gohau (1997) précise que le principe méthodologique de l'actualisme²⁷ est un élément de liaison des deux dimensions fonctionnaliste et historique. Ce principe stipule que les phénomènes à l'origine des changements géologiques passés, ont existé et existent encore dans la nature actuelle (Gohau, 1990). Les géologues par la mise en fonctionnement de l'actualisme méthodologique transforment les problèmes de la géologie historique en problèmes fonctionnalistes (Orange Ravachol, 2005). Cependant, Gohau (1987) met en garde sur les problèmes de l'articulation entre la science dont les régularités se traduisent par des lois et l'histoire dont les événements sont recherchés dans les archives.

²⁶ La biologie est subdivisée en sciences physiologiques qui cherchent la compréhension du fonctionnement de l'organisme et de ses différentes parties (sciences fonctionnalistes) et en histoire naturelle qui tente de saisir l'organisme comme étant le produit d'une histoire évolutive (sciences historiques) (Mayr, 1989, p.78).

²⁷ Principe de l'actualisme appelé aussi principe des causes actuelles.

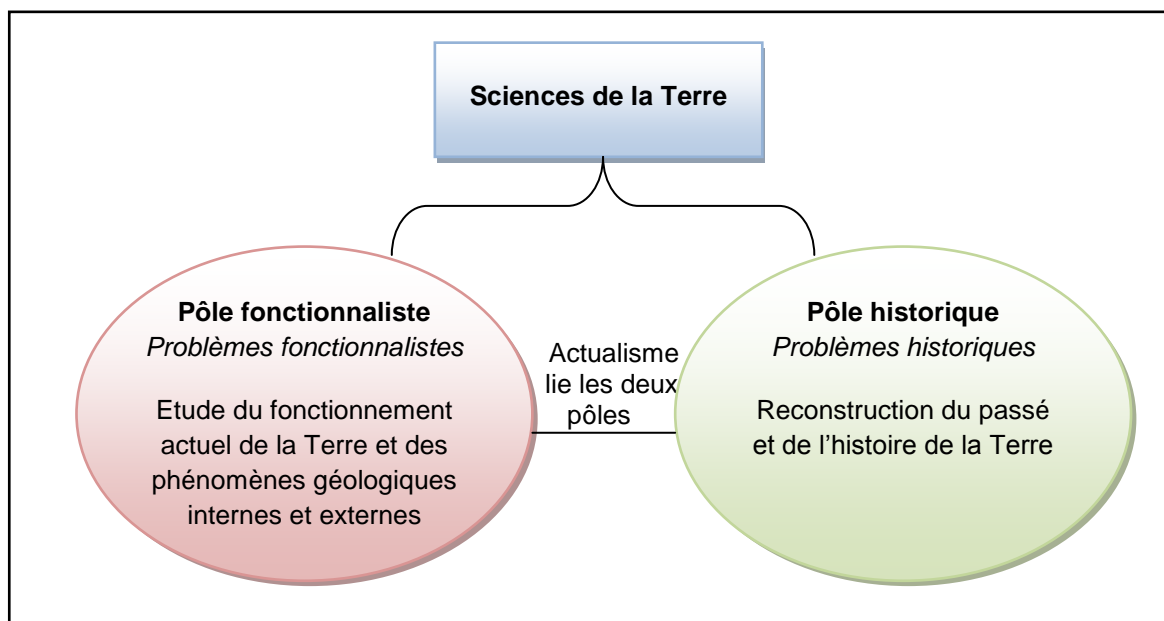


Figure 5. Les sciences de la Terre, entre un pôle fonctionnaliste et un pôle historique (d'après Orange Ravachol, 2003).

Qu'en est-il du magmatisme et comment situer ce concept par rapport à la double composante des sciences de la Terre? Le magmatisme se penche sur des problèmes qui se rapportent à l'étude des manifestations du fonctionnement actuel de la Terre (formation des magmas et leur déplacement, cause des irrptions etc.) et ne cherche pas explicitement à reconstituer l'histoire de la planète. Le dictionnaire de géologie (Foucault & Raoult, 2010, p.208) définit le magmatisme comme étant l' « *ensemble des phénomènes liés à la formation, à la cristallisation et aux déplacements des magmas* »²⁸. De ce fait, la recherche d'explications à ces problèmes s'avère du ressort de la géologie fonctionnaliste puisqu'ils sont axés sur l'étude des processus et des phénomènes actuels se déroulant à l'échelle humaine ou mobilisant un **actualisme méthodologique de premier niveau ou de simple analogie** (Orange Ravachol, 2003). Cet actualisme consiste à renvoyer une trace à un équivalent, une structure ou un processus actuel, que l'on exporte à n'importe quel point dans le passé. Il s'agit d'effectuer une analogie avec le présent. Ce type d'actualisme accorde peu d'importance au temps géologique et le considère uniquement comme un repère chronologique. Prenons l'exemple de l'explication de la genèse de roches présentant les mêmes caractéristiques minéralogiques que roches, provenant de nos jours, du refroidissement d'une lave. Celles-ci seraient interprétées, en s'appuyant sur le principe de

²⁸ Le volcanisme est défini comme l' « *ensemble des manifestations volcaniques et des phénomènes qui s'y rapportent* » (Foucault & Raoult, 2010, p.375). Le magmatisme englobe le volcanisme et le plutonisme. L'histoire de la géologie montre que les géologues ont commencé par travailler sur le volcanisme jusqu'à l'apparition du mot magma à la moitié du XIX^e siècle et la découverte des phénomènes plutoniques.

l'actualisme de premier niveau, comme le résultat du refroidissement du magma issu des profondeurs et comme une trace d'un ancien volcan. Une simple analogie est effectuée avec une structure actuelle dont l'origine est bien connue (les roches magmatiques proviennent du refroidissement du magma venant des profondeurs) et l'explication obtenue sera projetée dans le passé puisqu'on estime que les phénomènes géologiques anciens obéissent aux mêmes lois physico-chimiques actuelles. La roche magmatique sera expliquée par des processus qui se déroulent actuellement et dont le fonctionnement est connu. En revanche, les phénomènes magmatiques contribuent, dans leur ensemble et à l'échelle des temps géologiques, à fabriquer de la croûte continentale et de la croûte océanique. Cette fabrication se fait selon des échelles, que l'on ne peut pas percevoir de la même manière qu'une éruption volcanique. Le magmatisme envisagé dans une optique de formation des continents, par exemple, pourrait être considéré comme étant un problème de géologie historique car il entre dans une problématique de reconstitution de l'histoire et du passé de la Terre. Les problèmes historiques nécessitent la mise en jeu **d'un actualisme méthodologique de second niveau ou actualisme à temps long** qui « *consiste à référer la trace d'événements ou de phénomènes passés aux traces d'un phénomène actuel qui n'en est pas l'exact équivalent* » (Orange Ravachol, 2005, p.186). La trace est projetée dans le passé en envisageant un processus de transformation qui s'exerce sur de longues durées. Elle sera expliquée par des processus actuels mais ces processus ne suffisent pas à l'échelle du temps humain. Il est nécessaire d'imaginer un temps long permettant aux phénomènes de se produire. Autre exemple, l'explication de la naissance d'une chaîne de montagne sera basée sur des mouvements tectoniques comme ceux que l'on constate actuellement mais étant intervenus sur une durée très longue (Orange Ravachol, 2003).

Dans cette recherche, nous nous intéressons au magmatisme dans sa dimension fonctionnaliste. Les problèmes qui relèvent de ce concept comme la formation des magmas et leur déplacement, la cause des éruptions etc. se situent au sein de l'étude des manifestations du fonctionnement actuel de la Terre. Pour mener les analyses épistémologiques et historiques liées au magmatisme, nous avons fait appel à des outils empruntés au cadre théorique de la problématisation en sciences de la Terre.

2. La problématisation en sciences de la Terre : cadre théorique didactique pour les analyses historiques et épistémologiques du magmatisme

L'histoire du magmatisme peut être examinée selon le cadre théorique didactique de la problématisation (Fabre, 1999 ; Orange, 1997). Celle-ci se définit comme étant « *l'exploration des articulations possibles entre registre des modèles et registre empirique ; elle conduit à l'identification de contraintes et de conditions de possibilités des solutions (nécessités)* » Orange (2006, p.78). L'explication, qui représente la solution au problème posé, est construite à partir de la mise en relation du **registre empirique**, « *celui des faits et des phénomènes que l'on cherche à expliquer* » et du **registre des modèles**, « *celui des élaborations explicatives construites comme tentatives de solution* » (Orange, 2003, p.86). Cette description s'inspire de travaux effectués par Martinand (1986) sur la modélisation et Orange (1994) introduit un troisième registre qu'il nomme **le registre explicatif**. Ce dernier correspond aux « *références explicatives spontanées ou habituelles du modélisateur* » qui donnent le sens et le pouvoir explicatif au modèle (Orange, 2000, p.25). La tension entre registre empirique et registre des modèles, sous l'organisation du registre explicatif, amène à mettre en évidence les raisons (ou les nécessités) qui contraignent les modèles explicatifs ce qui octroie au savoir un caractère apodictique. Cette mise en tension des registres caractérise la problématisation et la distingue de la simple mise en relation de la modélisation : « *Dans l'approche tensionnelle entre les registres, le modèle n'est plus qu'une solution réalisant les nécessités* » (Orange Ravachol, 2003, p.73). La dynamique de la problématisation et de la construction des problèmes peut être représentée dans un « **espace des contraintes** » qui met en évidence les contraintes et les nécessités organisant les solutions possibles du problème (figure 6). Précisément, cette représentation a pour intérêt de caractériser, de décrire les produits de l'activité de problématisation et de mettre en valeur la construction d'un raisonnement – que ce soit par les scientifiques ou par les élèves – en le situant sur ses pôles empiriques et des modèles. Etant donné que les expériences et les modèles se complètent pour construire la connaissance, les liens entre les registres empiriques et celui des modèles ne sont pas orientés et sont ainsi représentés par des traits simples (figure 6).

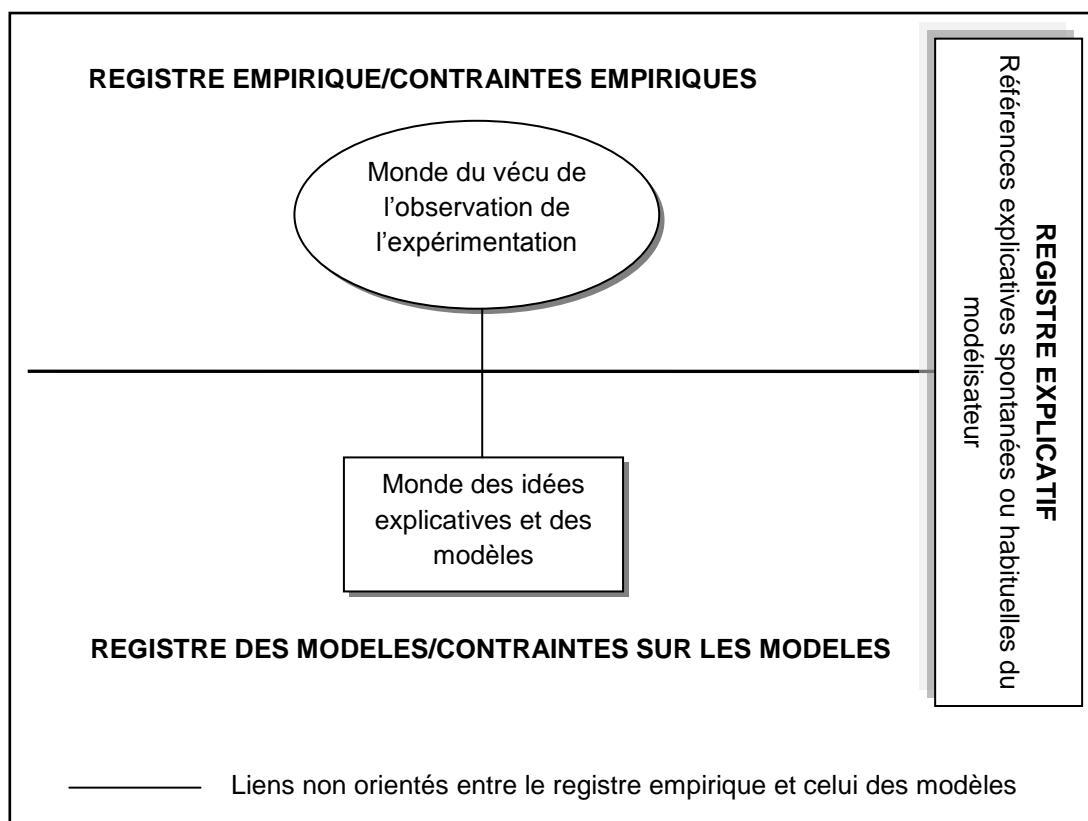


Figure 6. Schéma de la modélisation de l'espace des contraintes (d'après Orange, 2000).

L'espace de contraintes constitue, pour nous, un outil précieux de représentation des différentes problématisations du magmatisme par les scientifiques au cours de l'histoire. Il nous fournira des indications qui nous seront fortement utiles pour les analyses ultérieures des explications avancées par les élèves. En effet, la problématisation apparaît comme un moyen approprié pour comparer les savoirs des scientifiques à ceux des élèves. En géologie, Orange Ravachol (2003, 2005) a déjà comparé la problématisation des chercheurs actuels à celles des lycéens concernant quelques problèmes de géologie historique et fonctionnaliste. Ses études ont montré que la problématisation des élèves se démarque de celle des géologues tant du point de vue des espaces des contraintes construites que du point de vue des solutions proposées. Notre travail se propose de développer les modèles explicatifs historiques et actuels du magmatisme.

3. L'explication du magmatisme dans l'histoire des sciences de la Terre

Suite à une étude fondée sur des repères historiques et épistémologiques, Orange (1995) retient trois modèles explicatifs permettant de caractériser les grandes **ruptures historiques** liées à la signification et au fonctionnement du magmatisme. Une explication **locale** qui attribue l'origine

des volcans à un feu souterrain superficiel ; une explication **centrale** pour laquelle les volcans seraient associés à des réserves magmatiques planétaires situées sous l'écorce ou au centre de la Terre et enfin une explication **globale** prenant en compte une formation régionale du magma dans des zones particulières et sous des conditions bien précises puisqu'il ne préexiste pas dans les profondeurs terrestres. Ces différents modèles illustrent les multiples façons qu'ont eues les scientifiques de relier les phénomènes volcaniques au fonctionnement ou non de la Terre. Les différentes théories avancées ont cherché à expliquer les **caractères phénoménologiques des volcans** comme le mode de formation et l'origine de la lave, la cause des éruptions et la localisation des volcans (Fabre, 1999). Quels sont les questionnements et les problèmes construits par les scientifiques autour du concept de magmatisme ? Comment s'est déroulée l'évolution d'une explication locale à une explication centrale puis globale ? Quels sont les problèmes abordés et les ruptures qui ont déclenché de tels changements ? Comment la connaissance actuelle sur le magmatisme et les phénomènes magmatiques s'est-elle ébauchée ?

Dans cette partie, nous reprenons les trois modèles explicatifs magmatiques – local, global et central – en les enrichissant d'apports historiques et épistémologiques, afin d'illustrer l'évolution des théories du magmatisme et des problématiques qui y sont liées. Nous pointons les ruptures, les basculements d'idées, les changements de problématiques qui ont abouti à l'explication du magmatisme telle qu'elle se présente de nos jours. Nous représentons les dynamiques des problématiques mises en jeu, et qui ont servi chacune des modèles explicatifs, en nous appuyant sur le concept d'« espace des contraintes » et en identifiant les contraintes empiriques, les nécessités sur le modèle ainsi que les éléments du registre explicatif.

3.1 De l'explication locale à l'explication centrale magmatique

L'étude historique de l'explication locale et centrale magmatique nous emmène à examiner une période qui s'étend du début du XVIII^e siècle jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Cette période a connu le développement des deux explications magmatiques et le passage de l'une à l'autre. Commençons par développer le modèle local du magmatisme.

3.1.1 Le modèle local du magmatisme au XVIII^e siècle et l'œuvre de Buffon

En 1749, Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon (1707-1788) publie sa *Théorie de la terre* où il refuse de considérer – à la manière des superstitions de l'époque – les volcans comme des soupiraux permettant d'évacuer la chaleur centrale de la Terre ou des instruments de révélation

de la fureur divine²⁹. Pour lui, il est impossible que le feu volcanique puisse avoir pour origine un feu central profond : « *il ne faut pas croire que ces feux viennent d'un feu central, comme quelques auteurs l'ont écrit, ni même qu'ils viennent d'une grande profondeur, comme c'est l'opinion commune ; car l'air est absolument nécessaire à leur embrasement, au moins pour l'entretenir* » (Buffon, 1749, p.110). D'où la nécessité de penser et de concevoir une explication à échelle plus locale. Les volcans sont alors expliqués par l'existence de substances inflammables dans le sous-sol des zones volcaniques : « *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* » (ibid., p. 502). Pour un physicien avisé de l'époque tel que Buffon, il ne peut s'agir pour rendre compte des problèmes volcaniques, que de bruit, de feu et de fumée. A l'époque, pour obtenir du feu, il fallait disposer de combustibles et de déclencheurs (ibid.). L'analogie effectuée par Buffon entre la phénoménologie du volcanisme et les connaissances préchimiques de la combustion, permet de poser une problématique essentielle à la base des recherches et des investigations buffoniennes : « *le volcanisme peut-il être pensé en termes de feu ?* » (ibid. p.186). La solution apportée à ce problème stipule qu'il existe dans la montagne volcanique une quantité importante de soufre, de bitume et d'autres matières inflammables (des combustibles) mais aussi des minéraux, des pyrites capables de fermenter au contact de l'air et de l'eau (des déclencheurs). Et c'est précisément, la fermentation des pyrites qui provoquerait la mise à feu et la combustion des diverses substances capables de s'enflammer facilement (Buffon, 1749). Selon ce modèle, les volcans n'existeraient pas partout mais seulement là où il y a de la matière inflammable souterraine. Le feu serait toujours dans les montagnes³⁰ car c'est là qu'il existe une quantité abondante de minéraux, de pyrites et de soufre « [...] *plus à découvert [...] que dans les plaines, et que ces lieux élevez recevant plus aisément et en plus grande abondance les pluies et les autres impressions de l'air, ces matières minérales qui y sont exposées, se mettent en fermentation et s'échauffent jusqu'au point de s'enflammer* » (ibid., p.113).

En termes de problématisation, Buffon construit un espace des contraintes – que nous nous proposons de modéliser (figure 7) – en mobilisant et en mettant en tension plusieurs éléments qui débouchent sur des nécessités portant sur les modèles. L'air nécessaire pour entretenir le feu et la

²⁹ Buffon (1749) veut en finir avec les superstitions et les ancrages religieux qui font des volcans une ouverture de l'enfer sur le centre de la Terre : « [...] *je ne suis pas surpris que quelques auteurs aient pris ces montagnes pour les soupiraux d'un feu central, et le peuple pour les bouches de l'enfer. L'étonnement produit la crainte, et la crainte fait naître la superstition ; les habitans de l'isle d'Islande croient que les mugissemens de leur volcan sont les cris des damnez, et que leurs éruptions sont les effets de la fureur et du désespoir de ces malheureux* » (Buffon, 1749, p. 503).

³⁰ « *Le feu des volcans n'est pas éloigné du sommet de la montagne* » (Buffon, 1749, p. 111).

mise à feu conditionnée par la présence de déclencheurs et de combustibles amènent Buffon à considérer l'impossibilité d'un feu central et la nécessité d'une origine superficielle des matières volcaniques. L'existence des volcans à certains endroits et pas partout dans le globe conduit également à cette dernière nécessité (figure 7). La présence de matières inflammables dans le sous-sol des volcans ainsi que la discontinuité des éruptions conduisent à la nécessité d'une mise à feu des matières inflammables dans le volcan. Tout cela va dans le sens de l'élaboration de la nécessité d'un fonctionnement localisé des volcans.

Le modèle explicatif de Buffon représente une solution permettant de réaliser ces nécessités. Buffon (1749) problématise le volcanisme dans un cadre scientifique qui est celui d'une conception préchimique du feu puisque la chimie moderne n'avait pas encore émergé. La figure 7 ci-dessous donne une idée de l'espace des contraintes construit par Buffon pour son explication locale du magmatisme. Elle permet de résumer les mises en tension entre registres empiriques et registres des modèles en les situant dans un cadre explicatif.

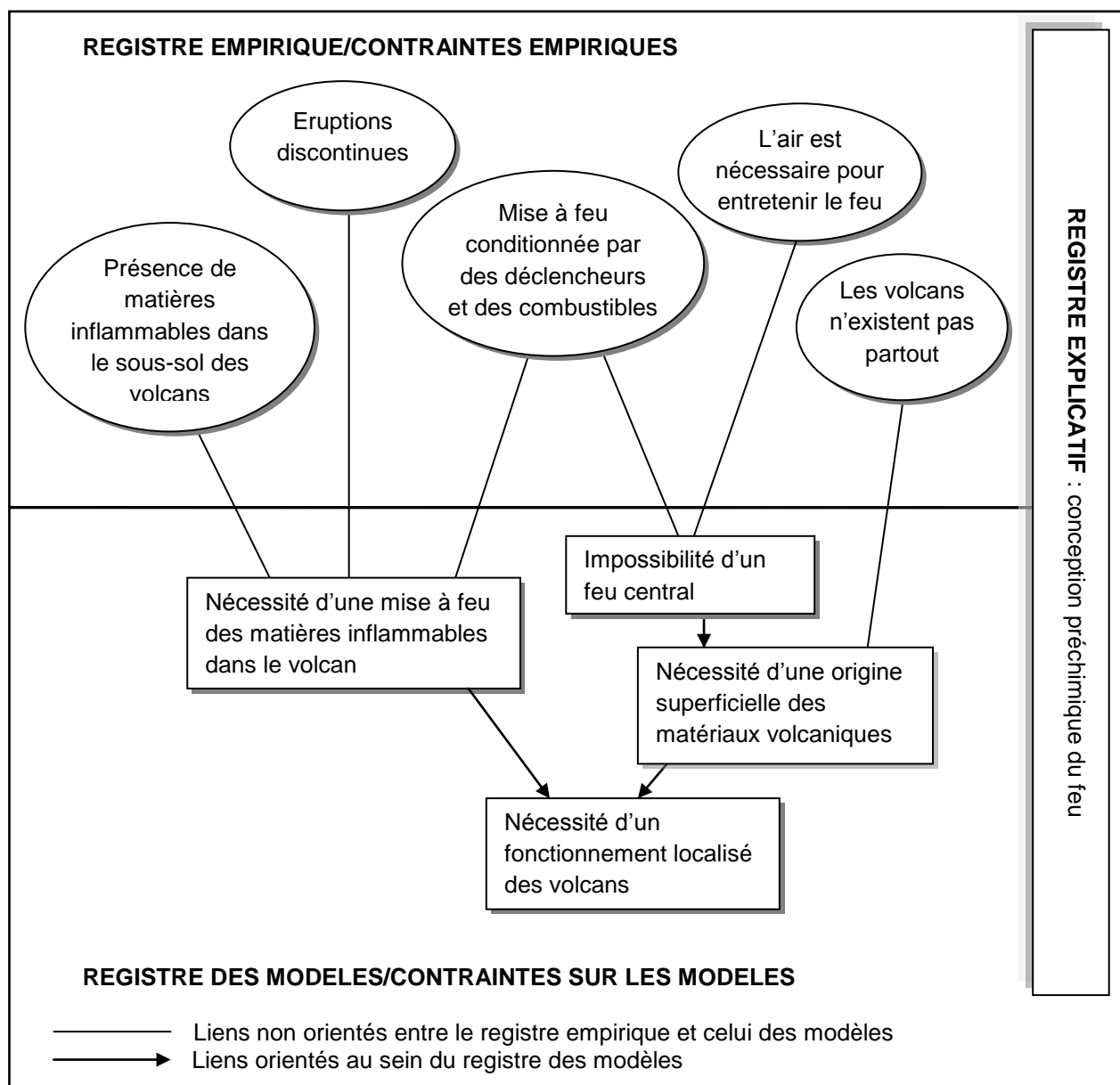


Figure 7. Espace des contraintes de Buffon (modèle local du magmatisme).

Caractéristiques de l'explication locale magmatique Buffonienne

Le modèle explicatif local buffonien, situé dans le contexte et les théories de l'époque, est d'une cohérence, d'une logique et d'une rationalité notable. Il apporte, selon Orange (1995), des explications à de nombreux problèmes empiriques tels que la production, l'origine de la lave et de la chaleur, le mécanisme de l'éruption et la localisation des volcans. C'est la raison pour laquelle il a été admis jusqu'à la fin du XVIII^e siècle (Ellenberger, 1988). De plus, ce modèle sollicite l'air, l'eau et le feu pour rendre compte des problèmes volcaniques et de l'intégralité des phénomènes qui y sont liés. Les volcans sont, pour Buffon (1749), des phénomènes **superficiels**, **localisés**, ayant pour origine l'inflammation des substances combustibles situées dans la partie superficielle terrestre sous-jacente. Ce faisant, il dévalorise les phénomènes volcaniques à

l'échelle de la Terre et réduit leur filiation avec la structure et le fonctionnement terrestre puisqu'ils ne sont produits que localement (Orange, 1995). La structure de la Terre n'était pas vraiment connue à cette période et la Terre était composée de matériaux disposés au hasard, sans aucune organisation particulière : « *Si nous pénétrons dans son intérieur (la Terre), nous y trouvons des métaux, des minéraux, des pierres, des bitumes, des sables, des terres, des eaux et des matières de toute espèce, placées comme au hasard et sans aucune règle apparente* » (Buffon, 1749, p.68). On est bien loin de la structure actuelle décomposant la Terre en différentes zones concentriques à caractéristiques singulières et spécifiques. L'approche de l'organisation terrestre de ces scientifiques est peut être l'une des raisons qui peuvent rendre compte des difficultés de Buffon et de ses contemporains à envisager des phénomènes affectant la structure interne et profonde du globe. Par ailleurs, Buffon (1749) explique séparément les phénomènes volcaniques et la formation des roches de la croûte. Les premiers sont l'ouvrage du feu souterrain, comme nous l'avons déjà pointé, alors que les secondes sont créées dans l'eau. « [...] *On doit cesser d'être étonné de trouver partout des productions marines, et une composition, dans l'intérieur, qui ne peut être que l'ouvrage des eaux* » (ibid. p.106). Il stipule que les pierres rejetées par les volcans proviennent de la couverture rocheuse qui existe à leur sommet³¹. Les volcans sont considérés comme des épiphénomènes. La figure 8 ci-dessous illustre bien l'absence de liens entre l'explication des phénomènes volcaniques, celle des roches et de la structure de la Terre et comment ces phénomènes ont été expliqués séparément.

³¹ Le volcan « *s'enflamme par la seule fermentation, il jette la terre et les pierres dont il est couvert, et il fait de la fumée, de la flamme et des explosions* » (Buffon, 1749, p.504).

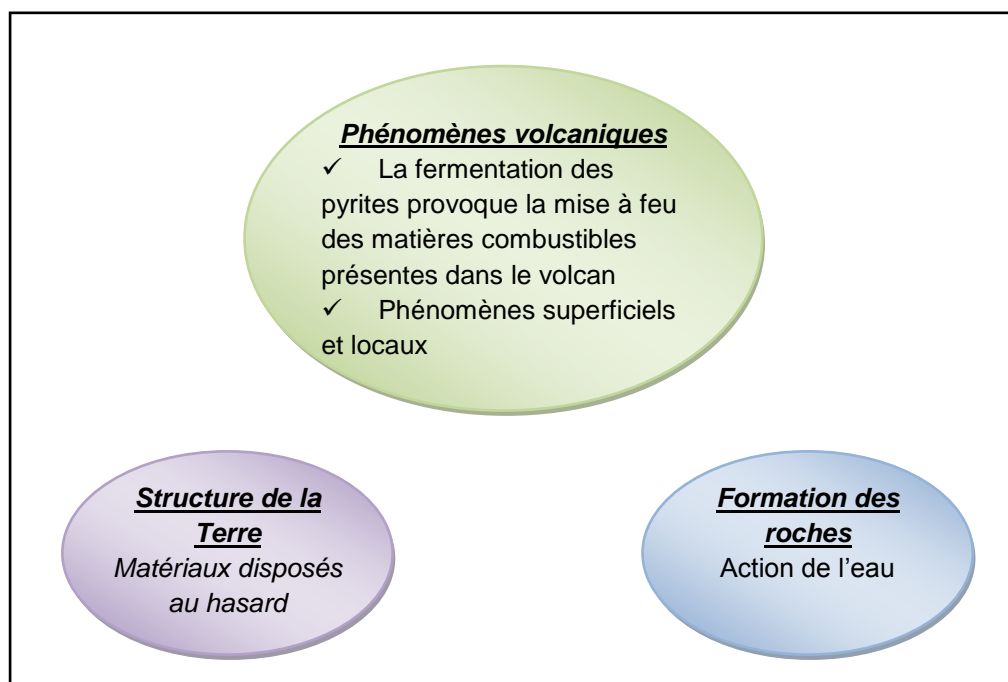


Figure 8. Les phénomènes volcaniques, la formation des roches et la structure de la Terre expliqués séparément dans le modèle central buffonien.

L'avènement de la chimie moderne et le développement de nouvelles connaissances sur la combustion, va remettre en question les idées proposées par Buffon et les rendre quasi impossibles³² (Bertrand, 1845). En effet, il apparaît que le contact avec l'air, spécifiquement en présence d'oxygène, est nécessaire pour la production d'une combustion. Or le modèle local convoque une origine souterraine des volcans, à des profondeurs qui ne supposent pas la pénétration de l'air. Les volcans ne peuvent plus être pensés en termes de « feu souterrain » si l'on tient compte des nouveaux apports chimiques. « *Et si la théorie de Buffon se donne alors comme erronée, c'est moins en fonction de son inadéquation aux faits que parce qu'elle répond à un ensemble de problèmes qui désormais apparaissent comme de faux problèmes* » (Fabre, 1999, p.190). Le registre explicatif, basé sur une conception préchimique du feu et qui donne le pouvoir explicatif au modèle local buffonien, est remis en cause. C'est ainsi que la problématique de Buffon a été réexaminée au vu des nouvelles connaissances scientifiques. Nous verrons également, dans les paragraphes suivants (3.1.3 et 3.1.4), comment l'opposition entre les théories neptunistes et plutonistes a préparé la constitution du modèle central et comment elle a joué un rôle important dans le passage d'une explication locale magmatique à une autre centrale.

³² En plus de cela, nous notons que Buffon change d'avis au cours de sa carrière scientifique (paragraphe 3.1.2 suivant).

Par ailleurs, Goix (1996) pointe un changement dans les idées de Buffon concernant l'origine des roches, vingt neuf ans plus tard, dans les *Epoques de la nature* (1778), où il avance qu'une partie de la Terre a été « l'ouvrage du feu ». En quoi ces nouvelles explications diffèrent-elles des précédentes? Qu'en gardent-elles ?

3.1.2 Continuités et ruptures dans les explications de Buffon

Buffon (1778) change de position et prétend que les « *montagnes n'ont pas été composées par les eaux, mais produites par le feu primitif, et qu'elles sont aussi anciennes que le temps de la consolidation du globe* » (ibid., p.535). Les montagnes ont ainsi une origine ignée : elles sont composées de matières comparables à celles de l'intérieur du globe et résultent du feu primitif. L'action de l'eau est cette fois-ci ultérieure à celle de feu : elle agit en surface en déposant des coquillages et des matières arrachées en couches d'argiles et matières calcaires qui composent les collines et enveloppent les montagnes. Les roches n'ont plus une origine aqueuse, elles proviennent du refroidissement de la matière fondue constituant le globe lors de la première époque de la formation de la Terre. En effet, la conception de l'histoire du globe terrestre de Buffon (1778)³³ stipule que celui-ci a été fluide au moment de sa formation comme en témoigne le renflement de son équateur et l'aplatissement de ses pôles. Cette fluidité est la conséquence du feu et le globe garde toujours le reste de l'état de fusion en disposant, dans ses profondeurs, d'une chaleur intérieure. Même si Buffon rend cet état de fusion à l'origine de la formation des roches, les phénomènes volcaniques gardent toujours une explication locale justifiée par la mise à feu des matières combustibles qui existent déjà dans le volcan (figure 9). Pour lui, les éruptions volcaniques commencent avec le retrait de l'eau de la surface lors de la 4^{ème} époque de la formation de la Terre, à une période qui connaît le refroidissement de la surface. Le retrait de l'eau est une étape nécessaire pour la production d'une quelconque éruption car l'eau éteindrait le feu qui s'allume « *par l'effervescence des matières pyriteuses et combustibles* » (Buffon, 1778, p.134). Il n'empêche que les matières combustibles ont besoin quand même d'une quantité déterminée d'eau pour entrer en effervescence, « [...] *et ce n'est ensuite que par le choc d'un*

³³ Buffon (1778) résume l'histoire de la Terre en sept époques. Après la fusion du globe terrestre (1^{ère} époque), la matière s'est consolidée suite au refroidissement et a formé les roches intérieures ainsi que les masses de la surface (2^{ème} époque). Par la suite, il a suffi que la température de la surface baisse pour que les eaux, jusque là, à l'état de vapeur se condensent et couvrent les continents (3^{ème} époque). Ces eaux se retirent à la 4^{ème} époque où les volcans commencent à agir. Au cours de la 5^{ème} époque, les éléphants et autres animaux vont habiter les terres du nord. La séparation des continents se fait pendant la 6^{ème} époque suivie d'une dernière époque (la 7^{ème}) où la puissance de l'homme a secondé celle de la nature.

grand volume de feu contre un grand volume d'eau que peuvent se produire leurs violentes éruptions » (ibid.). C'est pour cela que les volcans en action se situent près des côtes de la mer ou sur les îles et ceux qui sont éteints se situent dans les terres, loin de l'eau.

Buffon (1778) garde son explication des phénomènes volcaniques comme produits de la combustion des matières inflammables. Ce sont des phénomènes superficiels, distincts de la chaleur interne. Cependant, les roches qui étaient le produit de l'eau sont maintenant le résultat du refroidissement d'une matière fondue remontant de l'intérieur du globe à travers l'écorce terrestre. L'histoire du globe de Buffon est orientée de la fusion initiale vers le refroidissement complet. Il n'y a guère de liaison entre la chaleur intérieure et les phénomènes volcaniques (figure 9).

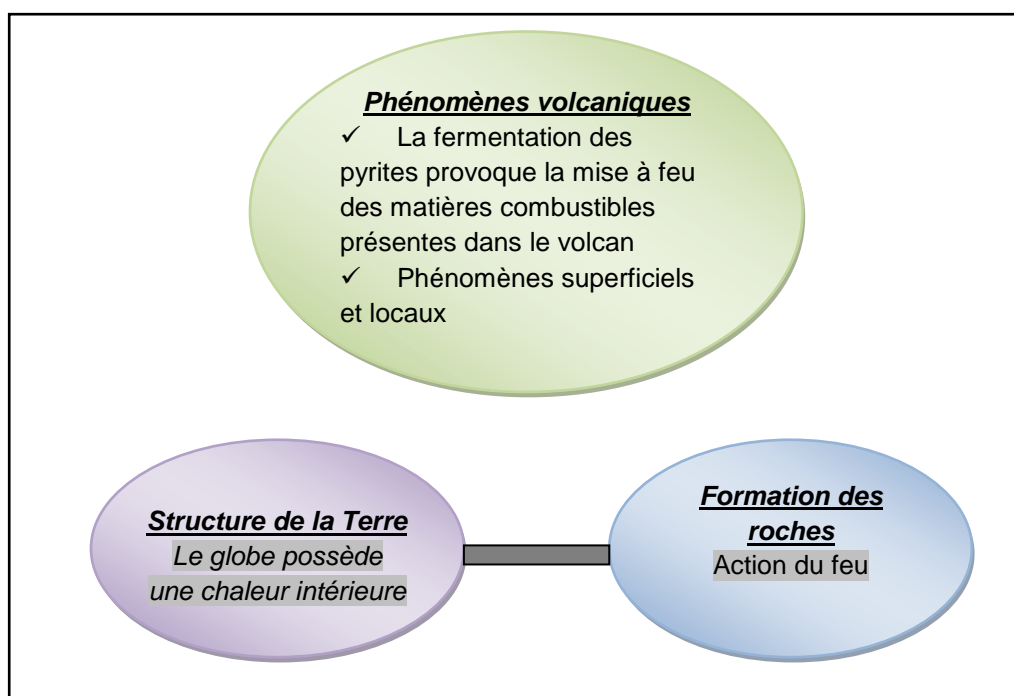


Figure 9. La chaleur interne explique la formation des roches tandis que les phénomènes volcaniques sont expliqués séparément par Buffon (1778).

Les premières explications buffoniennes, conférant aux roches une origine aqueuse, peuvent être qualifiées de neptunistes alors que les secondes, qui évoquent une origine ignée de plutonistes. Ces deux thèses neptunistes (ou vulcanistes³⁴) et plutonistes vont se confronter avec force au cours du XVIII^e siècle et du début XIX^e siècle et marquer les controverses, les débats et les querelles de l'époque. Avant de se pencher en détail sur les caractéristiques du modèle central du

³⁴ Lorsqu'il s'agit d'évoquer une origine volcanique des basaltes, on parle de vulcanisme. « *Le plutonisme est une conception différente, soutenue par Hutton [...] qui attribue une origine ignée au granite et non seulement au basalte* » (Gohau, 1990, p.104).

magmatisme, nous nous attardons, dans le paragraphe suivant, sur les querelles qui ont animé les débats liés au problème de la formation des roches crustales. Ces querelles ont préparé le chemin à l'édification du modèle central et ont joué un rôle capital dans le passage d'une explication locale du magmatisme à une autre centrale. L'émergence des thèses neptunistes et plutonistes témoigne de la préoccupation capitale des scientifiques de l'époque à expliquer la formation des roches de la croûte terrestre dont la diversité n'a pas cessé de surprendre³⁵. Comment ces roches se sont-elles formées ? Et quelle est leur véritable origine ? Des questions qui ont été, parmi tant d'autres, au cœur des controverses occupant les scientifiques de l'époque.

3.1.3 Le neptunisme et l'origine aqueuse des roches crustales

Un scientifique allemand, Abraham Gottlob Werner (1749-1817), a été l'un des plus marquants et célèbres défenseurs du neptunisme. Cette théorie fait référence au dieu de la mer Neptune et professe que les roches crustales, y compris le granite et le basalte, résultent de l'action de l'eau : elles se sont formées successivement, par des phénomènes de précipitations chimiques et mécaniques, au sein d'un immense océan primitif. Le paradigme neptunien est validé par différentes observations de terrain, de massifs européens (dont le Massif du Harz en Allemagne) et sur une étude précise de la disposition des roches dans le sous-sol et de leurs liaisons avec les autres roches. Ces observations s'accordent avec l'idée de Werner qui suppose que les formations rocheuses s'observent constamment suivant le même ordre de succession. Mais pour Werner, le volcanisme est toujours en lien avec la combustion des charbons : « [...] *Werner argued that eruption of lava took place where basalt and other rocks were melted by the combustion of underlying seams of coal* » (Hallam, 1989, p.7).

Ce paradigme avance une **origine exclusive des roches** puisqu'elles ont toutes été produites au fond de l'océan primitif. Et même si cette théorie explicative peut sembler nettement réductrice de nos jours, il est nécessaire de rappeler qu'elle a constitué un **paradigme unificateur et logique** pendant le XVIII^e siècle en dépit du fait qu'elle n'a pas su contourner l'obstacle de « *l'explication unicausale* »³⁶ (Ellenberger, 1994, p.272) où tout est relié à l'action de l'eau. Ceci dans une époque qui a connu le développement de la géognosie, science se consacrant à

³⁵ « *Les roches sont de nature, de couleur, de composition chimique variées, les minéraux qui les composent sont divers, les strates sédimentaires sont tantôt empilées de manière horizontale, tantôt plissées et faillées. Comment une telle variété a-t-elle pu prendre naissance ?* » (Allègre, 1985/1996, p.16-17).

³⁶ « *Le système était certes parfaitement logique, mais il pêchait entre autres par un abus (une fois de plus) du principe d'économie : on est tombé dans le piège éternel, si séduisant, de l'explication unicausale. Un seul agent, une seule variable, dans une seule direction* » (Ellenberger, 1994, p.272).

l'étude de la structure, du contenu du sous-sol, des roches qui constituent la surface terrestre et des gîtes métallifères. Par ailleurs, le « système » des neptuniens récuse, à la fois, le magmatisme et la tectonique (Gohau, 1990, p.118). Le granite comme le basalte n'ont pas une origine magmatique mais sont des dépôts primitifs, résultant de la précipitation dans l'eau et il n'existe pas de mouvements engendrant des montagnes, « *on moule les nouveaux dépôts sur les irrégularités du substratum* » (Ellenberger, 1994, p.270).

La théorie explicative neptunienne, qui fait de l'eau le principal agent de la production des matières du sous-sol terrestre, a été dominante pendant le dernier quart du XVIII^e siècle. Ellenberger (1994, p. 268) insiste sur son « *rôle irremplaçable d'éducatrice* » puisqu'elle poussait à mettre en pratique la géognosie et à différencier les diverses couches qui s'étaient successivement déposées. De plus, elle est considérée comme parfaitement scientifique parce qu'elle est de nature réfutable (ibid.). Cependant, cet auteur avertit sur la stérilité de cette théorie concernant les recherches sur l'intérieur du globe terrestre. En accordant à l'eau un rôle primordial, l'explication neptuniste de la formation des roches crustales élimine les possibles spéculations sur l'intérieur de la Terre. L'eau, élément de surface, apparaît comme l'unique agent à l'origine des roches : il n'y a donc pas besoin de s'occuper de l'intérieur du globe qui semble n'avoir aucune répercussion sur les phénomènes de surface.

3.1.4 Le vulcanisme, le plutonisme et l'origine ignée des roches crustales

Les idées neptuniennes ont été critiquées d'une part, par les vulcanistes qui confèrent au basalte une nature volcanique et d'autre part, par les plutonistes qui assignent une origine ignée non seulement au basalte mais aussi au granite. Gohau (1987, p.104) spécifie que les premières querelles portaient sur l'origine du basalte et opposaient neptuniens et vulcanistes. « *Ce fut la première grande dispute publique sur un problème étroitement géologique, témoin d'un état d'accroissement numérique suffisant de la communauté concernée* » (Ellenberger, 1994, p.265). C'est par la suite que le plutonisme a émergé pour se dresser rudement face au neptunisme et constituer l'une des controverses les plus farouches de la fin du XVIII^e siècle.

Les explications vulcanistes versus le neptunisme

Tout commence avec Jean-Étienne Guettard (1715-1786) qui annonce en 1752, après avoir traversé l'Auvergne, que les monts de cette région ne sont que d'authentiques volcans éteints. Néanmoins, il « *refuse de considérer le basalte comme un produit volcanique et affirme qu'il*

s'est formé en milieu aqueux » (Deparis & Legros, 2000, p.233). Pour lui, le basalte fréquent dans cette région et la lave volcanique ne maintiennent aucun rapport. C'est pour cette raison que Gohau (1990, p.222) préfère placer Guettard dans le rang des neptuniens malgré ses idées avancées sur la nature volcanique des monts d'Auvergne. Les explorations de ces monts sont poursuivies à partir de 1763 par Nicolas Desmarest (1725-1815) qui corrobore les idées de Guettard mais en allant plus loin jusqu'à attester que le **basalte est une roche volcanique**³⁷. Le basalte et la lave apparaissent comme étant les mêmes produits des éruptions volcaniques et Desmarest, d'après Gohau (1987), fut le premier à l'avoir compris. La question qui se pose alors est celle de l'origine de ces laves : **d'où provient la lave et quelle est son origine ?**³⁸

Les explications de Desmarest, que nous venons de mentionner, vont entamer les querelles entre les neptuniens qui voient le basalte comme une roche sédimentaire et les vulcanistes qui le rapproche des laves anciennes. Comme l'ensemble des auteurs du XVIII^e siècle, Desmarest continue à considérer que le volcanisme est un « feu » qui ne concerne que localement la partie superficielle du globe. Ceci explique, pour une part, sa thèse postulant que le « *basalte-lave provient [...] de fusion du granite sous-jacent* » (Ellenberger, 1994, p.239). Cette thèse a été posée suite à l'étude d'échantillons de granite plus ou moins détériorés par le feu. Mais simplement, le basalte et le granite sont deux roches de nature parfaitement différente. C'est Déodat de Dolomieu (1750-1801) qui alla à l'encontre de ce modèle de production des roches volcaniques. Celui-ci avait minutieusement étudié les laves basaltiques et il a découvert qu'elles ne peuvent pas résulter de la fusion du granite mais qu'elles émanent d'un « amas de matières » localisés en-dessous de la couche granitique. Il s'oppose aussi à la théorie de l'inflammation des matières combustibles et atteste que la matière composant les laves provient d'un produit pâteux et visqueux situé sous l'écorce consolidée du globe et plus dense que celle-ci (Gohau, 1990, p.223). Pour Goix (1996), ceci permet de résoudre le problème de la combustion en l'absence d'oxygène qui a remis en cause les explications de Buffon. Avec l'idée d'une écorce solide reposant sur un intérieur pâteux, Dolomieu propose une vision de la Terre complètement différente de celles de ses prédécesseurs et en rupture avec celles de son époque. Il présente le volcanisme comme un **phénomène endogène**, à l'opposé des thèses admises jusque là qui le qualifie de phénomène superficiel. Les laves rejetées par les volcans sont une conséquence de la

³⁷ Desmarest « *s'intéresse aux formations de basalte prismé et les identifie à des laves compactes qui ont pris leurs formes particulières au cours de leur refroidissement. Il confirme son interprétation en observant que les basaltes prismés appartiennent à des coulées qui proviennent des cratères des volcans* » (Deparis & Legros, 2000, p.233).

³⁸ « *Quels sont, se demande Desmarest, « les matériaux que le feu a fondus, pour produire [le basalte] ?* » (Gohau, 1990, p.223).

remontée de matières liquides constituant une partie de la Terre et le volcanisme entretient un lien direct avec l'intérieur du globe terrestre. Nous pouvons y voir les prémices d'une approche centrale et d'un intérêt de plus en plus accordé à l'investigation de l'intérieur du globe. A partir de là, le modèle central va commencer à se construire et nous verrons, dans le paragraphe suivant, comment Louis Cordier (1777-1861) avait présenté cette approche.

Le conflit s'aggrave et s'accroît, vers la fin des années 1780, entre les vulcanistes et les neptuniens jusqu'au moment où les élèves de Werner³⁹ en 1802-1804 se rendent en Auvergne et admettent la réalité d'un lien entre le basalte et la lave (Deparis & Legros, 2000). C'est ainsi que même « *si le problème de l'origine des laves reste controversé, la cause du volcanisme est définitivement gagnée quand les élèves de Werner eux-mêmes se rangent à l'évidence* » (Gohau, 1990, p.223-224). Cependant, les critiques adressées à la théorie neptunienne ne reposent pas seulement sur la reconnaissance de la nature volcanique du basalte : c'est tout l'état d'esprit du système qui a été combattu par James Hutton (1726-1797) avec la parution en 1795 de son œuvre intitulée « *Theory of the Earth* » (Théorie de la Terre). Cette œuvre, qui amène de véritables innovations, paraît alors que le courant explicatif du neptunisme gagne encore l'accord d'à peu près l'intégralité de la communauté scientifique. Elle instaure des controverses et introduit des ruptures qui engendreront la remise en question des thèses neptuniennes courantes à cette époque mais qui étaient déjà fragilisées. Les idées exposées par Hutton (1795) vont constituer le fondement de la théorie plutoniste qui se réfère à Pluton, le maître des enfers, et qui aura une importance remarquable dans l'essor de la géologie. Quelles sont exactement les innovations apportées par Hutton ?

Le plutonisme de Hutton face à la théorie neptuniste

Hutton (1795) attribue spécifiquement au feu ou à la chaleur souterraine (*subterranean fire or heat*) trois effets différents : la consolidation des sédiments (que nous qualifions de diagénèse)⁴⁰ ; le soulèvement des strates et la formation des montagnes (orogénèse) ; et l'injection du granite à l'état liquide dans les couches (plutonisme). Ces trois problèmes sont abordés différemment par Hutton :

³⁹ Il s'agit de Leopold von Buch (1774-1853), de Jean-François d'Aubuisson de Voisins (1769-1819) et de Humboldt.

⁴⁰ Ce phénomène consiste en la transformation des dépôts meubles du fond océanique ou lacustre en roches cohérentes (Gohau, 1990, p.129).

- La diagenèse, pour les neptuniens, est expliquée par la cimentation des grains par l'intermédiaire des substances dissoutes dans l'eau qui remplit les espaces entre les particules superposées. Le plutonisme de Hutton conçoit plutôt une explication qui met en jeu une fusion ou une transformation des grains sous l'effet de la chaleur souterraine et leur soudure en se solidifiant lors du refroidissement de la matière fondue. Gohau (1987) note que cette dernière thèse est incontestablement inadéquate et que les adversaires neptuniens étaient plus près du véritable mécanisme de la diagenèse. A l'époque, on balance encore entre les deux solutions et on estime un peu exagéré le recours à un procédé exclusif. Mais il apparaît une première rupture dans l'histoire des sciences de la Terre : le feu n'est plus seulement un élément destructeur de la matière, il est vu comme un élément créateur engendrant la formation de nouveaux matériaux rocheux, « *La montée des bains fondus incandescents provoque la transformation des roches qu'ils pénètrent* » (Goix, 1996, p.87).

- Les neptuniens ne prévoient pas de mouvements tectoniques. C'est ainsi que Werner considère que les strates ont conservé la position qu'elles avaient au moment de leur dépôt à l'inverse de Hutton qui envisage, sous l'action du feu souterrain, un mouvement des couches qui étaient, jusque là, horizontales. Celles-ci peuvent se soulever, se plisser, se déformer et prendre ainsi une certaine inclinaison. Ellenberger (1994, p.308) reconnaît l'énorme mérite de Hutton dans sa manière d'envisager l'orogénèse puisqu'il « *a osé affirmer tout seul, [...], que les terrains « Primitifs », loin d'être un ensemble de roches formées tout au début, dans des conditions entièrement différentes de celles du monde moderne, n'étaient rien d'autre que d'anciens sédiments ordinaires, les uns fondus, les autres transformés* ». Pour Hutton, le feu souterrain soulève graduellement les couches tandis que l'eau érode, transporte et dépose autre part. Ce faisant, il édifie les éléments d'un cycle maintenu par l'action opposée et antagoniste de deux éléments fondamentaux : le feu et l'eau⁴¹.

- A une époque où les neptuniens confèrent à l'eau de l'océan le rôle de créer la plupart des roches (granite et basalte) dans un océan primitif, Hutton, à travers sa théorie plutoniste, avance la thèse d'une origine ignée des roches. Il accorde à l'eau mais aussi à la chaleur souterraine une fonction dans la formation des roches. « *L'origine des matériaux de l'écorce terrestre est donc double. Si effectivement certaines roches (calcaire, schistes) se forment dans les mers, d'autres roches (le basalte mais aussi le granite) sont le résultat d'une fusion* » (Deparis & Legros, 2000,

⁴¹ « *Les cycles stoïciens en étaient une première version. Mais les stoïciens ont été oubliés. Et peut être l'époque qui commence avec Hutton est-elle d'une certaine façon un retour aux idées stoïciennes* ». On peut remarquer qu'il n'est pas le premier à le faire. Le cycle existe déjà chez les stoïciens (Gohau, 1990, pp. 139-140).

p.235). Le granite est alors le produit de la fusion des sédiments enfouis. Des montées intrusives de granite s'effectuent sous l'effet de la chaleur souterraine ayant un rôle tectonique parce qu'elles entraînent le mouvement et le soulèvement des couches. Ses idées ont été étayées par des investigations et des observations de terrain. Il annonce la découverte, au Glen Tilt en 1785, de veines granitiques introduites dans des schistes aux couches disloquées ce qui lui permet de confirmer que le granite a été injecté à l'état liquide dans ces couches (Ellenberger, 1994, p.309). Le granite est ainsi postérieur aux couches dans lesquelles il est injecté et ne peut plus être considéré comme ayant une origine d'une partie de la terre primitive. « *La genèse du granite est un phénomène de tous les temps qui se produit en profondeur, et non un événement ancien, unique, caractérisant une époque « primitive » de l'histoire de la terre* » (Gohau, 1987, p.139). Contrairement à Werner, Hutton raisonne de manière déductive et « *présente sa théorie comme une solution apportée a priori au problème de la causalité finale et non comme une induction formulée à partir de preuves recueillies sur le terrain* » (Gould, 1990, p.125). Nous avons déjà pointé le changement intervenu dans les idées de Buffon liées à l'origine des granites (d'une origine aqueuse à une origine ignée). Mais Buffon ne considère la formation des magmas granitiques que dans le passé, à la différence de Hutton pour qui les magmas se forment d'une manière périodique et continue (Gohau, 1987).

La thèse de l'origine ignée du granite constitue pour Gohau (1987, p.133) l'élément le plus audacieux de la théorie plutoniste huttonienne. Toutefois, malgré les innovations apportées par ces explications, Hutton mentionne toujours la combustion du charbon pour expliquer la cause de la chaleur souterraine, tout comme le fait Werner pour le volcanisme. Pour Hutton, « *les granites et les laves sont des produits de fusion locale sous une grande épaisseur de sédiments ; il n'évoque à aucun moment la possibilité d'une fusion interne* » (Deparis & Legros, 2000, p.237). Ainsi, le processus de fusion de Hutton est différent de celui évoqué par Werner. Le tableau 3 ci-dessous résume les principaux éléments de comparaison, que nous venons de présenter, entre les thèses neptunistes, vulcanistes et plutonistes.

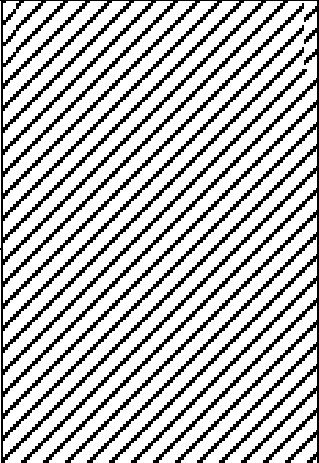
	Neptunisme	Plutonisme	Vulcanisme
Formation des roches crustales	Les roches crustales (granite et basalte), sont le produit de <i>l'eau</i> : elles se sont formées par précipitations chimiques et mécaniques, au sein d'un grand océan primordial.	Le <i>feu</i> ou la <i>chaleur souterraine</i> jouent un rôle dans l'injection de granite à l'état liquide dans les couches.	Le basalte et la lave sont liés et sont les mêmes produits des éruptions volcaniques. (nature volcanique du basalte).
Origine du volcanisme	La combustion du charbon à l'origine du volcanisme mais le processus de fusion des roches n'est pas le même pour les deux explications.		Les laves basaltiques proviennent d'un produit pâteux et visqueux situé sous l'écorce consolidée du globe et plus dense que celle-ci.
Consolidation des sédiments (diagénèse)	Cimentation des grains assurée par une matière dissoute dans l'eau qui circule entre eux.	Fusion périphérique des grains sous l'action de la chaleur souterraine et leur soudure lors du refroidissement de la matière fondue.	
Mouvements terrestres	Ecarte les mouvements : refuse la tectonique.	Sous l'action du feu souterrain, des couches jusque là horizontales peuvent se soulever et s'incliner.	

Tableau 3. Comparaison entre les explications neptunistes, plutonistes et vulcanistes.

Le XVIII^e et le début du XIX^e siècle sont marqués par l'affrontement entre le neptunisme d'une part, et le vulcanisme et le plutonisme d'autre part, faisant osciller l'origine des roches entre les résultats de l'action de l'eau et du feu. Ces débats montrent « *les errements auxquels un point de vue réductionniste expose la recherche scientifique. La géologie a mis longtemps à reconnaître qu'entre l'eau et le feu, la continuité et la catastrophe, la surrection et l'effondrement, il n'y avait pas à choisir mais à marier* » (Godin, 2002, p.402). Malgré les problèmes que les deux théories ont confrontés, leur opposition paraît féconde⁴² et constitue un pas décisif vers la

⁴² « *Mais la révolution huttonienne aurait-elle vu le jour si elle n'avait eu à se forger contre la doctrine régnante, à savoir le Neptunisme ? [...]. L'instauration d'un système nouveau se fait souvent en démantelant l'ancien, en mettant à nu ses failles, ses manques, ses erreurs. Les vainqueurs piétinent les gravats inconscients de tout ce qu'ils doivent au monument abattu* » (Ellenberger, 1994, p.273).

compréhension des phénomènes, non seulement magmatiques mais aussi diagénétiques. L'histoire de la Terre est présentée comme étant linéaire et sagittale par les neptunistes pour reprendre les termes de Gould (1987) alors que les plutonistes recourent pour un temps cyclique qui « *installe la Terre dans une succession de cycles identiques qui se perpétuent depuis la nuit des temps et pour toujours* » (Orange Ravachol, 2003, p.30). C'est à partir de la fin du XVIII^e siècle que la géologie va apparaître comme une véritable discipline scientifique (Gohau, 1987). Ceci va se traduire par la constitution d'une réelle communauté scientifique qui discute, échange et confronte les multiples travaux et points de vue. Au sein de ces conditions, le modèle central magmatique va pouvoir se constituer comme nous le verrons dans le paragraphe suivant.

3.1.5 La maturation du modèle central magmatique au XIX^e siècle

Louis Cordier (1777-1861), professeur de géologie du Muséum, confirme en 1827 que le globe possède une chaleur qui lui est spécifique, suite à de nombreuses observations faites sur la température du sous-sol régnant à différentes profondeurs. Il note que la température s'élève lorsqu'on s'enfonce dans la Terre suivant un certain gradient et propose un modèle terrestre qui correspond à une masse entièrement en fusion recouverte uniquement d'une mince écorce solide (figure 10). **La lave évacuée lors des éruptions volcaniques aura donc pour origine cette matière liquide sur laquelle repose l'écorce terrestre.** Les idées de Cordier se basent sur un nombre considérable de travaux antérieurs : elles ont pour origine les nouvelles thèses sur le volcanisme (particulièrement celles de Dolomieu) et sur le plutonisme, ainsi que les travaux de Joseph Fourier (1768-1830) sur la propagation de la chaleur et les mesures thermométriques dans les mines (Deparis & Legros, 2000, p.276). Fourier avait déjà montré depuis 1824 que le gradient de température correspond à un lent refroidissement du globe. La Terre est considérée comme étant en fusion au commencement de son histoire et la chaleur actuelle n'est que l'héritage de cette chaleur primitive.

Le travail de Cordier contribue à la mort définitive de la thèse neptunienne, comme l'affirme Gohau (1987, p.173)⁴³, et a rassemblé les géologues autour de la thèse du feu central. « *Le règne de l'eau est définitivement révolu, on entre pleinement dans celui de la chaleur, manifestant un changement irréversible dans la vision de la Terre* » (Deparis & Legros, 2000, p.272). Elie de Beaumont (1798-1874) va tirer des conclusions tectoniques très intéressantes à partir du modèle d'une Terre en fusion. Celui-ci considère que l'écorce solide, après avoir atteint sa température

⁴³ « *Le neptunisme est définitivement mort : la fluidité de la terre ancienne était ignée, non aqueuse* » (Gohau, 1987, p.173).

d'équilibre, ne se refroidit plus contrairement à l'intérieur de la planète qui continue de perdre de la chaleur. Par conséquent, l'intérieur de la Terre se contracte et rétrécit ce qui oblige l'écorce à s'ajuster car elle devient grande. Elle s'effondre en se plissant et en produisant des ruptures et des chevauchements. Le refroidissement du globe apparaît ainsi comme étant la cause principale des orogènes successives : c'est la théorie dite du refroidissement séculaire. L'idée d'un globe en refroidissement n'est pas nouvelle et elle a été avancée auparavant par Buffon qui en avait tiré des conséquences en bâtissant un schéma d'évolution terrestre pouvant être qualifié de « directionnaliste⁴⁴ » (Gohau, 1987). Néanmoins, la tectonique était absente du modèle de Buffon qui « *associait la formation des montagnes au passage de l'état liquide à l'état solide de la surface terrestre, tandis qu'Elie de Beaumont lie l'orogénèse au refroidissement, c'est-à-dire à la variation de température, laquelle est permanente, alors que le changement d'état est unique* » (ibid., p.174).

Le modèle d'une Terre en fusion présenté par Cordier et De Beaumont⁴⁵ recueilli, en 1830, l'approbation de la majeure partie des chercheurs (Deparis & Legros, 2000). Pour les deux scientifiques le globe possède une chaleur centrale, émanant de sa formation et de son histoire originelle, qui engendre la fluidité des masses internes à une certaine profondeur. La vision d'une planète presque totalement en fusion « *devient la figure paradigmatique de la Terre* » au XIX^e siècle (ibid., p. 286). L'apparition du mot magma dans le vocabulaire géologique va se faire à la moitié du XIX^e siècle en relation avec les travaux de Cordier sur la chaleur régnant à l'intérieur du globe. L'introduction de ce mot est attribuée à Fournet et Ducrocher (Goix, 1996).

⁴⁴ C'est admettre que la Terre évolue et change d'aspect depuis sa formation.

⁴⁵ « *Les éruptions volcaniques paraissent avoir elles-mêmes des rapports avec la haute température que présentent encore aujourd'hui les parties intérieures du globe* » (De Beaumont, 1833, cité par Deparis & Legros, 2000, p.280).

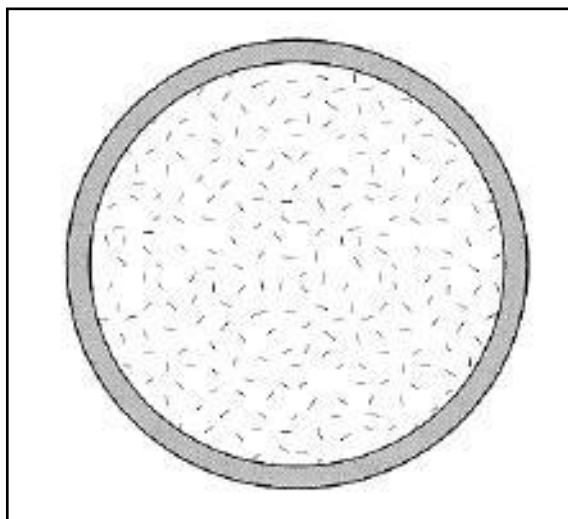


Figure 10. Le modèle de Terre de Cordier avec une croûte mince et un intérieur en fusion (Deparis & Legros, 2000, p.280).

En quoi ce modèle central diffère-t-il du modèle local précédent ? En quoi est-il novateur quant à l'explication du magmatisme ? Le modèle central se situe, inversement au modèle local, dans une « *problématique planétaire des phénomènes volcaniques* » (Orange, 1995, p.88). Le magma, qui constitue le reste de ce qui n'avait pas été solidifié lors du refroidissement du globe, est permanent et préexiste abondamment à l'intérieur de la Terre sous l'écorce. Le processus de combustion locale des matières inflammables, déjà évoqué par Buffon (1749), n'est plus crédible. Ici, la structure de la Terre permet d'expliquer les phénomènes volcaniques et la formation des roches (figure 11), ce qui n'a pas été le cas des explications avancées précédemment. Toutefois l'explication centrale mobilise un certain nombre de causes en partie distinctes. La masse interne de magma explique les laves et les matières volcaniques tandis que la localisation des volcans est liée à des caractéristiques de surface particulièrement à l'occasion d'accidents de la croûte terrestre permettant au magma de s'échapper (Orange, 1995) ou encore à l'augmentation de la pression interne sous l'action de la contraction de la Terre, conséquence de son refroidissement. Les phénomènes magmatiques sont liés à des « réserves planétaires » de magma (ibid.). Ce modèle semble pouvoir rendre compte de l'ensemble des phénomènes géologiques observés. Il permet effectivement d'expliquer les volcans (communications entre la surface et la masse fondue interne), les tremblements de terre (qui sont la conséquence des mouvements du fluide interne), mais aussi la formation des montagnes (résultat de la contraction des couches externes de la Terre, ce qui crée les reliefs) (Deparis & Legros, 2000, p.279).

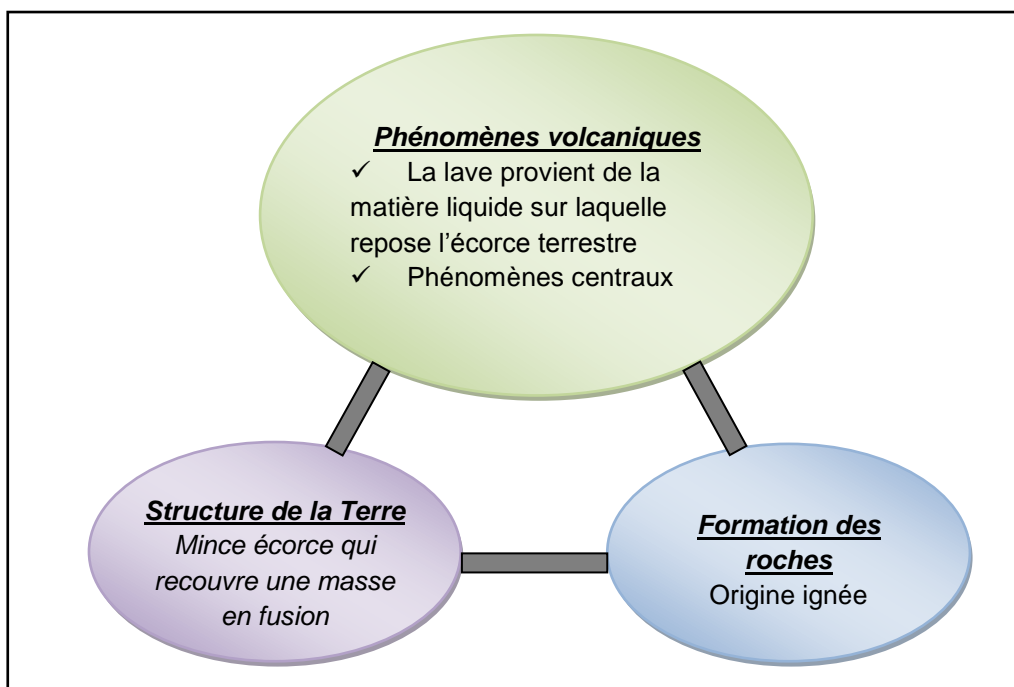


Figure 11. L'explication des phénomènes volcaniques et de la formation des roches reliée à la structure de la Terre dans le modèle central magmatique.

En termes de problématisation, le modèle explicatif central du magmatisme – que nous nous proposons de modéliser (figure 12) – consiste en une exploration et une mise en tension des registres empiriques et des modèles dont l'articulation permet d'établir les nécessités pesant sur les modèles. L'augmentation de la température avec la profondeur partout dans le globe, le lien entre la température et la fusion et les matériaux volcaniques liquides et chauds amènent à la nécessité d'une masse interne liquide et d'une chaleur interne. L'existence des volcans à certains endroits du globe conduit à la nécessité d'une zone de sortie du magma. Le registre explicatif contrôlant la mise en tension est mécaniste car il s'appuie sur les comportements de la matière (variation d'état et caractère de la fusion partielle). Cette problématisation, décrite par l'espace des contraintes ci-dessous (figure 12), s'inscrit dans le cadre d'un raisonnement linéaire causal où un seul paramètre comme la température entraîne la fusion.

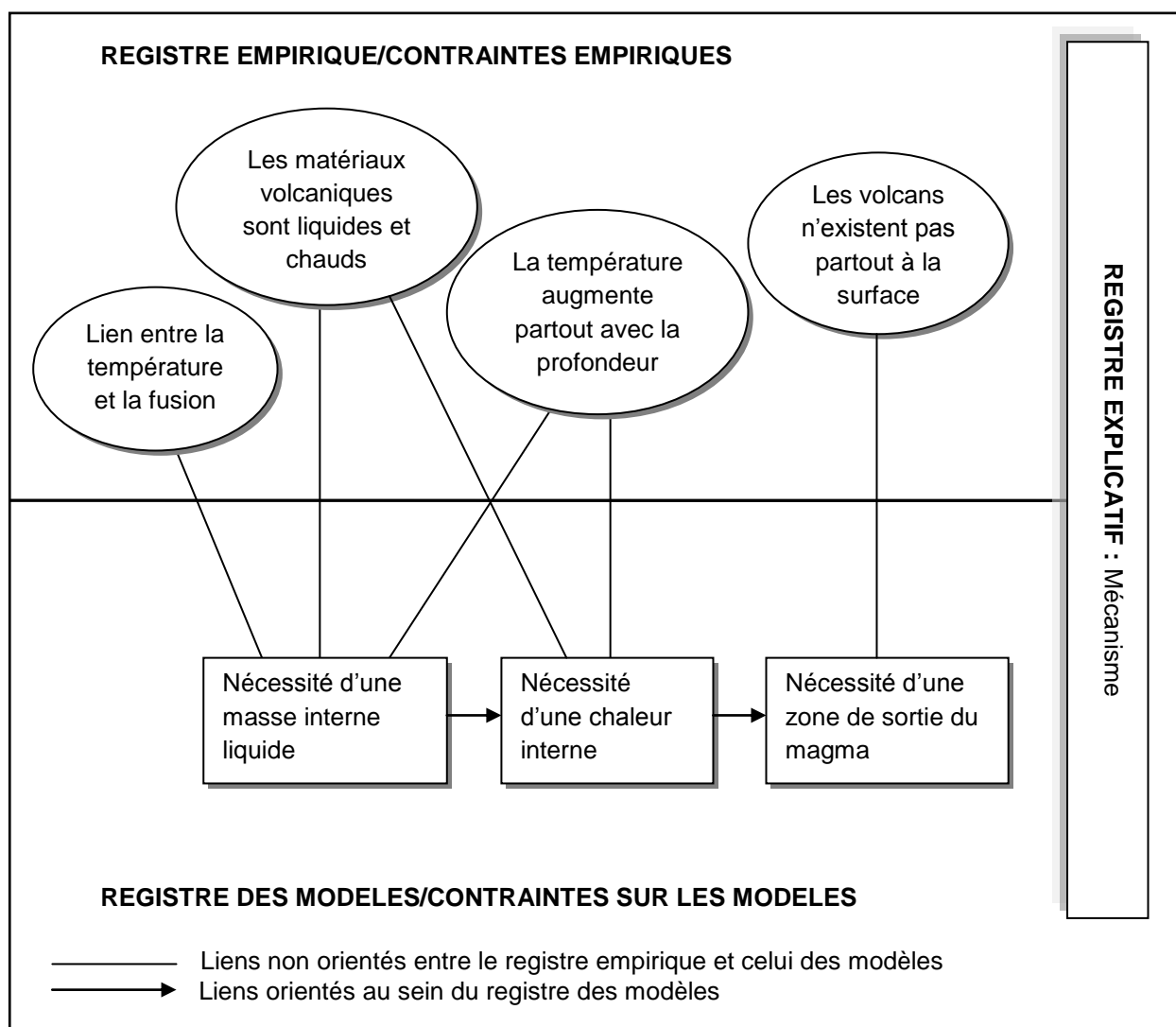


Figure 12. Espace des contraintes des partisans du modèle central du magmatisme.

La théorie d'une Terre en fusion explique donc la plupart des phénomènes géologiques internes et externes. D'une explication locale à une explication centrale, les **questionnements engendrés sont différents** : « *la localisation des volcans est devenu le problème fondamental : pourquoi le volcan se forme-t-il ici plutôt que là ? Par contre-coup, la question de l'origine du magma, capitale dans le modèle local, devient ici tout à fait accessoire* » (Fabre, 1999, p.190). Le magma préexiste sous forme liquide et en quantité abondante à l'intérieur du globe et la problématique du magmatisme se limite alors à la question de sa sortie. Mais nous verrons par la suite que l'origine de la chaleur, considérée par ce modèle comme étant primitive, deviendra de moins en moins acceptable au cours XIX^e siècle au fur et à mesure que la Terre apparaît de plus en plus vieille pour les géologues.

Les principales oppositions au modèle d'une Terre fluide

La théorie d'une Terre en fusion va rapidement affronter l'objection de nombreux scientifiques qui avancent que la Terre doit être entièrement solide ou au moins disposer d'une enveloppe solide ayant une grande épaisseur. La controverse fluidité/solidité de la Terre est entamée depuis cette époque. Nous résumons les principales objections – relevées par Deparis et Legros (2000) – concernant le modèle d'une Terre liquide entourée d'une croûte à faible épaisseur :

- Charles Lyell (1797-1875) fut l'un des plus importants opposants à la théorie de la chaleur centrale. La première édition de son ouvrage *Principes de géologie* paraît en 1830-1833. Son opposition se base sur une divergence concernant la conception du déroulement de l'histoire du globe terrestre. Il considère que la Terre ancienne ne pouvait pas être dans un état différent de celui qu'elle manifeste actuellement, elle a toujours eu un aspect similaire à celui qu'elle nous montre. Selon cette vision uniformitariste de la planète, des modifications se produisent dans le globe mais elles se compensent d'une région à une autre ce qui fait que la Terre ne paraît pas changer. En effet, les causes géologiques gardent le globe dans un équivalent constant et ne modifient pas ses structures. **Cette vision stationnariste s'oppose à l'idée d'un globe en fusion en refroidissement lent, à une vision évolutionniste.** Mais « *Lyell reconnaît l'augmentation de la température avec la profondeur et lie les phénomènes volcaniques et les tremblements de terre à la transmission de la chaleur interne vers la surface* » (Deparis & Legros, 2000, p.302). Il préconise que lorsque cette chaleur interne – qui résulte de processus chimiques se produisant dans l'écorce terrestre – se propage vers la surface et lorsqu'elle rencontre un obstacle, un tremblement de terre ou une éruption volcanique serait provoqué. Ce sont, pour lui, des accidents locaux sans conséquences directes sur le globe terrestre.

- William Hopkins (1793-1866) spécifie en 1839 que la température de fusion des roches est fortement liée à la pression. Ainsi, pour qu'une roche puisse fondre en profondeur, il lui faudrait une température plus élevée que celle à laquelle elle fond normalement. Cependant, devant le manque de données expérimentales qui permettent de déterminer lequel des deux paramètres – température ou pression – exerce la plus grande influence, Hopkins élabore trois modèles possibles : 1) si la température augmente d'une manière suffisante avec la profondeur et arrive à dépasser l'influence de la pression, le globe terrestre est totalement fluide sous une croûte dont l'épaisseur ne peut pas être vraiment connue ; 2) si la pression l'emporte sur la température, le globe est constitué d'un noyau solide (résultat de la solidification), d'une couche en fusion et

d'une croûte solide (créée par le refroidissement en surface); c) si le refroidissement est complet, le globe pourrait être totalement solide.

- En 1862, Lord Kelvin⁴⁶ (1824-1907) défend fermement le modèle d'un globe complètement solide et d'une croûte bien profonde. Ses argumentations déclarent que si la Terre était fluide, la masse interne devrait subir des marées importantes tout comme les océans en surface. Le sol se déformerait complètement sous l'influence des marées internes, ce qui n'est réellement pas le cas. Cependant, il observe que les marées sont faibles en comparaison avec les prévisions théoriques ce qui prouve que la Terre possède des propriétés clairement identiques à celles de l'acier et qu'elle se comporte comme un solide élastique. Pour Lord Kelvin, le globe est solide et les réservoirs de magmas situés sous les volcans seraient les seuls en fusion (Deparis & Legros, 2000). Tandis que Cordier admet l'existence possible des marées terrestres lorsqu'il présume une fusion interne et une croûte flexible mais souligne pourtant que ces marées doivent être faibles. Les argumentations de Lord Kelvin s'opposent vigoureusement au modèle fluide soutenu par les géologues.

- En 1881, Osmond Fisher dans son livre intitulé *Physics of the Earth's Crust* prétend que la Terre est entièrement solide et qu'elle comprend une couche intermédiaire fluide (figure 13). La croûte externe solide serait de faible épaisseur ainsi que la couche intermédiaire fluide sous-jacente. « *Si la croûte était rigide parce que froide et le noyau solide pour cause de pression, entre les deux il pouvait exister une couche fluide lui permettant dès lors de défendre son modèle de l'isostasie* » (Savaton, 2011, p.115). Ce modèle représente un compromis entre l'idée d'une Terre totalement en fusion et celle d'un globe totalement solide. Il conserve l'explication centrale des phénomènes géologiques et intègre l'hypothèse d'une Terre rigide mais le magma aura pour origine la couche fluide intermédiaire.

⁴⁶ William Thomson, plus connu sous le nom de Lord Kelvin.

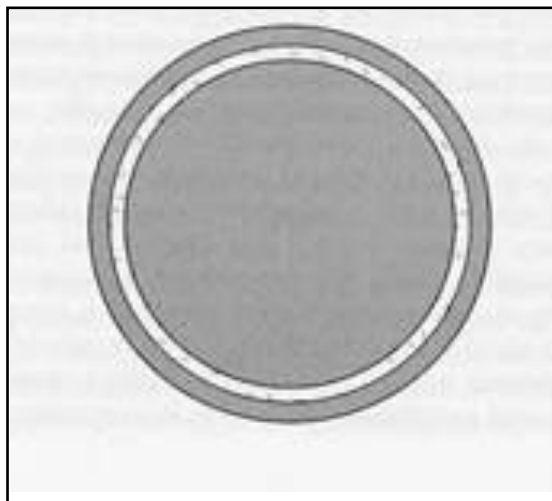


Figure 13. Le modèle consensuel de la Terre des années 1870-1880 (Deparis & Legros, 2000, p.377).

Malgré l'émergence d'objections à la fin du XIX^e siècle, l'idée d'une Terre liquide reste prégnante puisqu'elle permet de comprendre le magmatisme, les mouvements tectoniques, les phénomènes isostatiques (Deparis & Legros, 2000). L'explication de ces phénomènes géologiques « *semble nécessiter l'hypothèse d'une couche en fusion à une très faible profondeur sous la croûte* » (ibid., p.288). Le modèle d'une Terre en fusion surmonté d'une croûte mince autorise de penser la théorie du refroidissement séculaire. Les scientifiques retombent de nouveau – comme les neptuniens l'avaient déjà fait auparavant – dans l'obstacle de l'« *explication unicausale* » : ils relient tout au seul refroidissement du globe (Ellenberger, 1994). Cependant, les progrès réalisés au XX^e siècle, la découverte de la radioactivité comme nouvelle source d'énergie, la détermination de l'âge de la Terre, les connaissances pétrographiques, les données expérimentales sur la fusion des roches, l'introduction de la théorie de la tectonique des plaques etc., vont changer cette conception du globe terrestre et des phénomènes magmatiques liés. Nous reprenons, dans le paragraphe suivant, les principaux éléments qui ont autorisé la mise en place du modèle globale magmatique tel qu'il se présente de nos jours.

3.2 Vers une explication globale du magmatisme au XX^e siècle

Le XX^e siècle, est marqué par le développement remarquable de multiples domaines des sciences de la Terre. Des explications diverses vont coexister et se confronter pendant tout ce siècle, chacune se basant sur des observations, des argumentations et des données scientifiques différentes. Jusque-là, les observations se sont accordées avec l'idée d'une matière fluide sous

l'écorce, idée validée par le rejet de la lave, matière fondue, par les volcans et en accord avec l'augmentation de la température avec la profondeur. L'existence d'une immense masse de matière liquide semble constituer une nécessité qui permet d'expliquer divers phénomènes géologiques. Mais les scientifiques ne prenaient en compte que les phénomènes géologiques observables à la surface de la planète dans l'élaboration des modèles terrestres proposés. Le XX^e siècle va leur permettre d'étudier des parties du globe restées directement inaccessibles auparavant et de construire des modèles interdépendants de la structure de la Terre : sismologiques, minéralogiques, thermiques, dynamiques⁴⁷ (Poirier, 1996). Par ailleurs, la découverte de la radioactivité va occasionner des nouveaux questionnements et l'histoire de la géologie va être marquée, en ce XX^e siècle, par l'introduction de la théorie de la tectonique des plaques dans les années soixante. Comment ces développements, ces découvertes et ces controverses ont-ils participé à l'élaboration du modèle explicatif global du magmatisme ? Quelles sont les problématiques qui ont préoccupé les scientifiques tout au long de cette période ? Comment est-on passé d'une explication centrale du magmatisme à une explication plus globale ? Autant de questions auxquelles nous tentons de répondre dans les paragraphes suivants.

3.2.1 Les différents modèles du XX^e siècle concernant la structure et l'état physique de l'intérieur de la Terre

Différents modèles ont été avancés pour expliquer la structure et l'état physique de la Terre au XX^e siècle comme à la fin du XIX^e siècle. D'un côté l'idée d'une planète Terre plus ou moins liquide et de l'autre celle de la nature solide de la sphère terrestre établie grâce à l'étude de la propagation des ondes sismiques. Sans prétendre à l'exhaustivité, nous exposons quelques explications sur la structure et l'état physique de l'intérieur du globe.

⁴⁷ « [...] modèles sismologiques qui décrivent la répartition des densités et des propriétés élastiques à partir des temps d'arrivée des ondes sismiques ; modèles minéralogiques qui interprètent les profils de densité et de vitesses sismiques en termes de composition chimique et de structure minérale – ce qui nécessite l'apport des expériences de physique des minéraux à hautes pressions et températures ; modèles thermiques qui proposent des profils de température en fonction de la profondeur ; modèles dynamiques enfin qui intègrent les modèles précédents pour donner une image de la Terre active, qui analysent les mouvements du noyau et la génération du champ magnétique terrestre, ainsi que les échanges d'énergie entre les différentes régions terrestres... y compris la plus externe où nous vivons. » (Poirier, 1996, p.12).

L'isostasie et la distinction mécanique lithosphère/asthénosphère

La théorie de l'isostasie introduite par Clarence Dutton en 1889 à la suite des travaux de John Pratt et de George Airy, se base sur le comportement fluide, visqueux, du substrat sous-jacent à la croûte terrestre ce qui conforte les géologues dans leurs idées sur l'existence d'une zone fluide en profondeur. Cette zone – située sous les continents – est capable de se comprimer et de se détendre en fonction de la charge supportée suivant des mouvements verticaux. Pour interpréter les études isostatiques, Barrell (1915), introduit une **distinction entre la lithosphère, couche externe rigide de la Terre, et l'asthénosphère, couche sous-jacente ductile**. L'asthénosphère, située entre la lithosphère et le noyau central rigide, serait responsable pour Barrell (1915) des mouvements et des réajustements isostatiques. Deparis & Legros (2000, p.454) précisent que cette distinction ne correspond à aucune des autres reconnues à l'époque : « *ce n'est pas une distinction chimique et ne semble pas reliée à une discontinuité sismologique. Il s'agit d'une distinction de comportement mécanique : la lithosphère résiste aux contraintes alors que l'asthénosphère cède et s'écoule* ». La différenciation entre la lithosphère et l'asthénosphère était nécessaire pour penser les phénomènes isostatiques. « *Les défenseurs de l'isostasie, qu'ils soient géologues, géodésistes ou géophysiciens de formation, militaient par nécessité inductive pour un substratum crustal à comportement plastique sinon fluide* » (Savaton, 2011, p. 115). Alors que l'idée d'un intérieur terrestre fluide reste prépondérante chez certains scientifiques, majoritairement géologues, car elle explique non seulement les phénomènes de surface liés à l'isostasie mais également l'origine des laves, les géophysiciens⁴⁸ établissent, quant à eux, un discours tout à fait divergent qui permet de concevoir un modèle sismique/rigide de la Terre.

Le modèle sismique/rigide du globe terrestre

Les géophysiciens s'appuient sur les données apportées par l'étude de la propagation des ondes sismiques et qui avancent que **la Terre est solide** puisqu'elle est traversée⁴⁹ par les ondes de cisaillement S⁵⁰. Celles-ci ne pouvant pas se propager dans les matériaux liquides. Les travaux de Harold Jeffreys (1891-1989) montrent que la partie externe du globe terrestre est de nature

⁴⁸ Savaton (2011) signale que la communauté géophysique de l'époque était partagée entre la nécessité d'une zone fluide pour rendre compte des phénomènes de l'isostasie et les résultats révélés par les études des ondes sismiques. Ainsi, nos développements suivants ne concernent pas toute la communauté géophysique mais bien une partie.

⁴⁹ A l'exception du noyau externe situé entre 2900 et 5100km.

⁵⁰ La sismologie se base sur deux types d'ondes. Il existe deux types d'ondes : les ondes P qui correspondent à des mouvements de compression et de dilatation se caractérisant par leur rapidité et les ondes S qui vont vibrer la matière perpendiculairement à leur direction de propagation, elles cisailent et se propagent plus lentement que les ondes P.

solide jusqu'à 2900km de profondeur avec l'admission d'une certaine fluidité pour le noyau métallique de la Terre (Deparis & Legros, p. 421). Pour Jeffreys, il n'existe pas de zone fluide dans le manteau contrairement aux géologues qui ont tenus un discours différents et sont restés insensibles aux apports des données sismiques. En dépit de ces travaux en géophysique, Goix (1996) montre, en s'appuyant sur les écrits de certains géologues⁵¹ de l'époque, comment ces derniers tentent de tenir compte des renseignements apportés par l'étude des ondes sismiques pour localiser le magma mais restent insensibles à travers leurs discours au fait que les ondes S se propagent en profondeur. Ils préfèrent opter pour un globe liquide malgré les arguments géophysiques qui le considère de nature solide. Contester l'idée d'une Terre solide était nécessaire pour penser l'isostasie et les phénomènes magmatiques.

La sismologie, qui a connu un développement considérable au cours de cette époque, permet d'étudier l'intérieur du globe, son comportement ainsi que sa structure. Elle conduit à de nouveaux modèles sur la structure de la Terre et constitue un outil considérable pour une véritable auscultation et investigation de la structure interne de la planète. « *La manière dont les ondes sismiques se propagent, se réfléchissent, s'atténuent permet de déterminer la structure interne de notre planète, d'en faire une image en volume* » (Allègre, 1987, p.65). Grâce aux progrès de la sismologie, la structure de la Terre jusque là inaccessible, s'élucide au fur et à mesure de l'avancée des travaux scientifiques et le globe terrestre apparaît comme étant non homogène parce qu'il existe des discontinuités dans la transmission des ondes sismiques (Allègre, 1983) :

- En 1906, Richard Oldham identifie la présence du noyau liquide terrestre ne transmettant pas les ondes S. La même année, Mohorovicic décèle une discontinuité dans le manteau : la **discontinuité de Moho** qui sépare la croûte et le manteau supérieur.
- En 1914, Beno Gutenberg met en évidence une discontinuité dans la transmission des ondes sismiques entre le manteau et le noyau située à 2900km. Celle-ci sera appelée : la **discontinuité de Gutenberg**.
- En 1926, Harold Jeffreys montre la fluidité du noyau et en 1936, la sismologue danoise, Inge Lehman, met en évidence que le noyau est formé de deux parties : la graine centrale et la couronne externe séparé par une discontinuité qui sera appelée **discontinuité de Lehman**. Gutenberg et Jeffreys préciseront la nature de ces deux parties en montrant que l'extérieur est liquide et l'intérieur solide.

⁵¹ Il s'agit par exemple de Meunier (1909) et de Moret (1947).

Toutefois, « *la découverte la plus importante est celle faite en 1926 par Gutenberg au cours de l'étude d'un tremblement de terre au Chili : celle d'une couche « molle » dans le manteau. Cette couche appelée asthénosphère est située à une centaine de Km de profondeur* » (Allègre, 1983, p.48). Les propriétés de cette couche seront étudiées par Don L. Anderson (1962). La structure de la Terre ainsi élucidée diffère de celle avancée par l'autrichien Eduard Suess (1831-1914), en 1909 dans le troisième tome de son traité *La Face de la terre* où il propose une description détaillée de la structure et de l'évolution de la Terre. Il s'intéresse à la composition chimique des profondeurs du globe et admet que les continents terrestres sont faits d'une couche superficielle légère composée de roches granitiques légères, riches en silicium et aluminium appelée SIAL. Cette couche surmonte une enveloppe de matériaux basaltiques sous-jacents, riches en silicium et magnésium nommée SIMA. La sismologie ébauche, par une autre approche, la structure concentrique de la Terre.

La dérive des continents face aux conceptions « solidistes »

Les géophysiciens solidistes du début du XX^e siècle, qui récusent l'existence d'une zone fluide dans le manteau terrestre (jusqu'à 2900km de profondeur) en s'appuyant sur les données sismiques, vont s'affronter aux tenants de la théorie de la dérive des continents qui envisage une zone fluide, capable de déformations, et donc facilitant les mouvements horizontaux et verticaux. Les conceptions du modèle contractionniste ou du refroidissement séculaire (paragraphe 3.1.5) ont été fragilisées grâce à des données qui ont conduit Wegener (1929) à proposer son hypothèse d'une dérive possible des continents. Cette théorie se base sur des arguments géophysiques (sismologie, gravimétrie, radioactivité), géologiques (tectonique, pétrologie, sédimentologie), géodésiques, paléontologiques, biologiques, et paléoclimatiques (Wegener, 1929). Mais Alfred Wegener pointe une confusion « *concernant les propriétés physiques de la planète* » (Hallam, 1976, p.29) entre l'état et le comportement de la matière. Voici ce qu'il écrit au sujet de l'isostasie et de l'état de la couche responsable de ce phénomène : « *L'introduction d'un terme nouveau pour cet état (isostasie) dans le cas de l'écorce terrestre est toutefois nécessaire parce que le fluide dans lequel plonge l'écorce est d'une très forte viscosité, presque inimaginable, [...]. Du point de vue expérimental, ce « fluide » différerait à peine d'un corps « solide ». On doit d'ailleurs se rappeler que l'acier, que nous considérons bien comme un corps solide, présente un peu avant sa rupture certaines propriétés fluides caractéristiques* » (Wegener, 1929, p.13). A partir de ce moment, le problème de l'état (solide)/comportement (solide) se pose. Cette confusion va jouer un rôle dans les débats scientifiques (Goix, 1996).

Nous avons passé en revue quelques explications liées à la structure et à l'état physique de l'intérieur de la Terre. En 1962, Don L. Anderson rappelle dans un article les deux thèses contradictoires (existence d'une zone fluide/Terre rigide) et donne une réponse à cette contradiction : « *The answer to this apparent contradiction is suggested by the properties of noncrystalline materials such as glass and pitch, which behave like solids in the short run and like fluids over longer periods. They transmit shear waves and can support loads for a short time, but under a steady, long-lasting force they are plastic; that is, they flow and change their shape permanently* » (Don L. Anderson, 1962, p.202-203). Ainsi, la planète est rigide comme l'acier et elle se comporte comme un corps élastique lorsqu'elle est soumise à des forces de courte durée comme les ondes sismiques. En revanche, elle réagit comme un fluide vis-à-vis des longues durées à l'échelle des temps géologiques. Cet auteur s'intéresse également à une couche appelée la Low Velocity Zone (LVZ). Elle pourrait expliquer, selon lui, l'origine du magma.

3.2.2 La Low Velocity Zone (LVZ) et l'origine du magma

Le géophysicien Don L. Anderson (1962) revient sur la présence d'une zone appelée la Low Velocity Zone (LVZ)⁵² où les ondes P et S sont transmises mais ralenties. Pour expliquer le volcanisme, il considère que ces phénomènes pourraient être reliés au taux de fusion existant au niveau de la LVZ : « *Therefore the distribution of volcanoes constitutes direct evidence for the temperature-melting point relation inferred from laboratory measurements and suggests that the low-velocity layer may be the source of primary basaltic magma* » (ibid. p.209). On pense qu'il s'agit d'une zone où il existe un début de fusion partielle très faible, inférieur à 1%, suffisant pour faire de cette LVZ la source de magma et pour expliquer le magmatisme. Le réservoir planétaire de magma était ici limité à cette LVZ puisque la Terre est solide et on est resté dans une problématique de préexistence de magma. « *Néanmoins ce liquide constitue un film autour des minéraux, et son extraction est très difficile. Il faut se représenter cette LVZ comme constituée de péridotite solide, c'est-à-dire d'une roche constituée d'olivine, de pyroxènes et d'un minéral alumineux variable selon la profondeur, et, entre les grains, d'un film liquide qui permet aux grains de bouger les uns par rapport aux autres. Cette zone pourrait donc être animée de mouvements, les courants de convection, [...]* » (Meunier, 1995, p.9). Ainsi, la bascule dans une problématique globale où le magmatisme est pensé en termes de conditions de formation du magma, s'est faite à partir du moment où on a pris conscience, entre autres, de

⁵² La profondeur de cette zone est comprise entre 11 km (au droit des océans) et 670km environ (Meunier, 1995).

l'insuffisance du taux de fusion de la LVZ pour fabriquer du magma. Il semble que la découverte de la zone à faible vitesse a retardé cette bascule qui s'est déroulée après l'introduction de la théorie de la tectonique des plaques. L'introduction de cette théorie vers les années 1960-1970, qui pense la surface de la Terre comme étant formée d'une lithosphère rigide découpée en plaques mobiles glissant sur un substrat peu pâteux, incite à étudier les limites des plaques puisque ce sont les lieux où se déroule l'activité géologique (Allègre, 1983). La géologie va donc être d'abord une géologie des frontières des plaques. Au fur et à mesure, les géologues comprennent que le volcanisme se produit dans des zones bien précises du globe et commencent à s'intéresser à chacune de ces zones (dorsales océaniques, zones de subduction, îles volcaniques). L'introduction de la tectonique des plaques n'a pas directement stimulé le basculement dans une explication globale du magmatisme et dans une problématique qui pense ce phénomène en termes de conditions de possibilité de naissance de magma. D'autres découvertes comme celle de la radiochronologie ainsi que les expériences de fabrication des roches au laboratoire ont joué un rôle important dans le basculement dans une problématique globale magmatique.

3.2.3 Les conséquences de la découverte de la radioactivité et des expériences de fabrication des roches au laboratoire

La découverte de la radioactivité, par Henri Becquerel⁵³ en 1896, va fournir un moyen efficace et fiable pour la datation absolue des roches et de la Terre. Elle va permettre de déterminer l'âge des roches et l'âge minimal de la Terre ce qui allongera d'une manière inattendue les estimations des temps géologiques. Cette découverte détruit la méthode de mesure du temps par « calcul de refroidissement » et conduit à l'invalidation des estimations de Lord Kelvin qui donnaient à la Terre un âge de 100 millions d'années. La Terre possède en son intérieur une source de chaleur et ne se refroidit pas comme le postule la théorie centrale (Allègre, 1985/1996). De plus, en prenant en considération l'âge de 4,55 milliards d'années qui lui est attribué, elle serait déjà entièrement refroidie si on en revenait aux postulats de la théorie centrale. Par conséquent, les fondements de cette théorie s'effondrent : la Terre est plus vieille que ce qu'on le pensait et elle possède une source de chaleur interne. Cette source constitue le moteur du déplacement des plaques : *« la production par la radioactivité naturelle de la Terre, [...] entraîne des mouvements de convection au sein de ces 2900 kilomètres de roches assez plastiques, tout*

⁵³ En 1896, Becquerel découvre que l'uranium émet des rayonnements qui traversent les corps solides opaques.

comme une plaque chauffante fait bouger l'eau dans une casserole, mais beaucoup plus lentement (puisque la Terre est solide) » (Thomas, 2002, p.88-89).

Le développement de la pétrologie expérimentale ainsi que les progrès techniques vont permettre de fabriquer des magmas au laboratoire et de réaliser des expériences donnant naissance à des liquides silicatés à partir des roches (Allègre, 1987). Les chercheurs ont d'abord constaté que la température et la pression jouent en sens inverse en profondeur, avec un avantage à la pression. L'augmentation de la température avec la profondeur censée faire fondre la roche est contrée par les effets de la pression qui maintient l'état solide en profondeur. Mais comment expliquer la formation des magmas sachant qu'ils proviennent du manteau et que celui-ci est solide ? Les simulations des conditions de fusion des roches à haute température et à grande pression ont permis de vérifier le rôle respectif de la pression et de la température. Elles ont permis de constater (ibid. p.107) :

- ✓ *« qu'un solide très chaud brutalement décomprimé fond spontanément, de même qu'un liquide se solidifie si l'on augmente suffisamment la pression. »*
- ✓ *« l'influence de la composition chimique du produit de départ sur la température de fusion. Une péridotite, morceau de manteau « normal », ne fond qu'à 1200° (à pression ordinaire), un basalte fond dès 1000°. »*
- ✓ *« l'influence de l'eau. Une roche mouillée fond à une température de plus basse qu'une roche sèche. Si bien qu'entre la température de fusion d'une péridotite sèche et d'un basalte mouillé il existe près de 40 ° de différence ! »*

La fusion des roches en profondeur peut être ainsi occasionnée par des chutes de pression ou des apports d'eau et elle est fonction de la composition chimique de la roche de départ. Ces données seront confrontées aux études entreprises aux frontières des plaques pour comprendre les particularités de chacune des zones concernées par le magmatisme. Il apparaît que les chutes brusques de pression que subissent les matériaux ascendants avec les mouvements de convection, au niveau des dorsales océaniques, déclenchent la fusion partielle des roches. On parle de décompression adiabatique. Au niveau des zones de subduction les conditions sont totalement différentes *« puisque les matériaux qui fondent ne remontent pas vers la surface mais au contraire s'enfoncent vers l'intérieur, vers les hautes pressions »* (Allègre, 1987, p.110). Le réchauffement de la plaque froide qui s'enfonce, libère l'eau gorgée dans la croûte océanique par des réactions métamorphiques ce qui entraîne la fusion des péridotites de la plaque chevauchante.

3.2.4 Les caractéristiques de l'explication globale magmatique

D'une conception centrale à une conception globale, la problématique du magmatisme change. **On passe d'une problématique de sortie du magma qui préexiste à l'état liquide en profondeur à une problématique de naissance du magma dans des endroits précis du globe et pas à d'autres sous l'intervention de paramètres bien déterminés** : Quelles sont les conditions nécessaires pour la formation du magma au niveau des dorsales océaniques, des zones de subduction et îles volcaniques ? Ce changement de problématique est apparu avec l'abandon de l'idée d'un réservoir planétaire de magma et d'un intérieur terrestre liquide pour adopter la vision d'une Terre solide. La découverte de la radioactivité et les expériences réalisées au laboratoire ont participé dans la constitution du modèle global magmatique et dans le passage d'une problématique à une autre. Le basculement dans une explication globale ne s'est pas fait directement avec l'adoption de la théorie de la tectonique des plaques même si cette explication s'inscrit dans le cadre de cette théorie. Il a fallu quelques années pour que les idées murissent, que les expériences aboutissent et que le modèle se construise. Par ailleurs, certains problèmes vus comme un simple détail dans les explications locales et centrales deviennent fondamentaux dans l'explication globale. Pensons au problème de la répartition des volcans qui était expliqué par le hasard des éléments combustibles ou la fragilité des zones de la croûte (Orange, 1995) et qui est devenu fondamental dans un cadre global.

Nous avons reconstitué l'espace de contraintes du modèle global magmatique (figure 14). Les données empiriques telles que la solidité du manteau conduisent à l'impossibilité d'une masse interne liquide. Cette impossibilité combinée à l'existence des volcans au niveau des zones de subduction, des dorsales océaniques et intraplaques aboutit à la nécessité d'une production locale du magma au niveau des zones concernées. De plus, le fait que la fusion soit conditionnée par plusieurs paramètres mène à la nécessité d'un mécanisme entraînant la fusion. La problématisation s'effectue dans un cadre mécaniste large puisqu'elle se base sur les comportements de la matière (variation d'état et caractère de la fusion partielle).

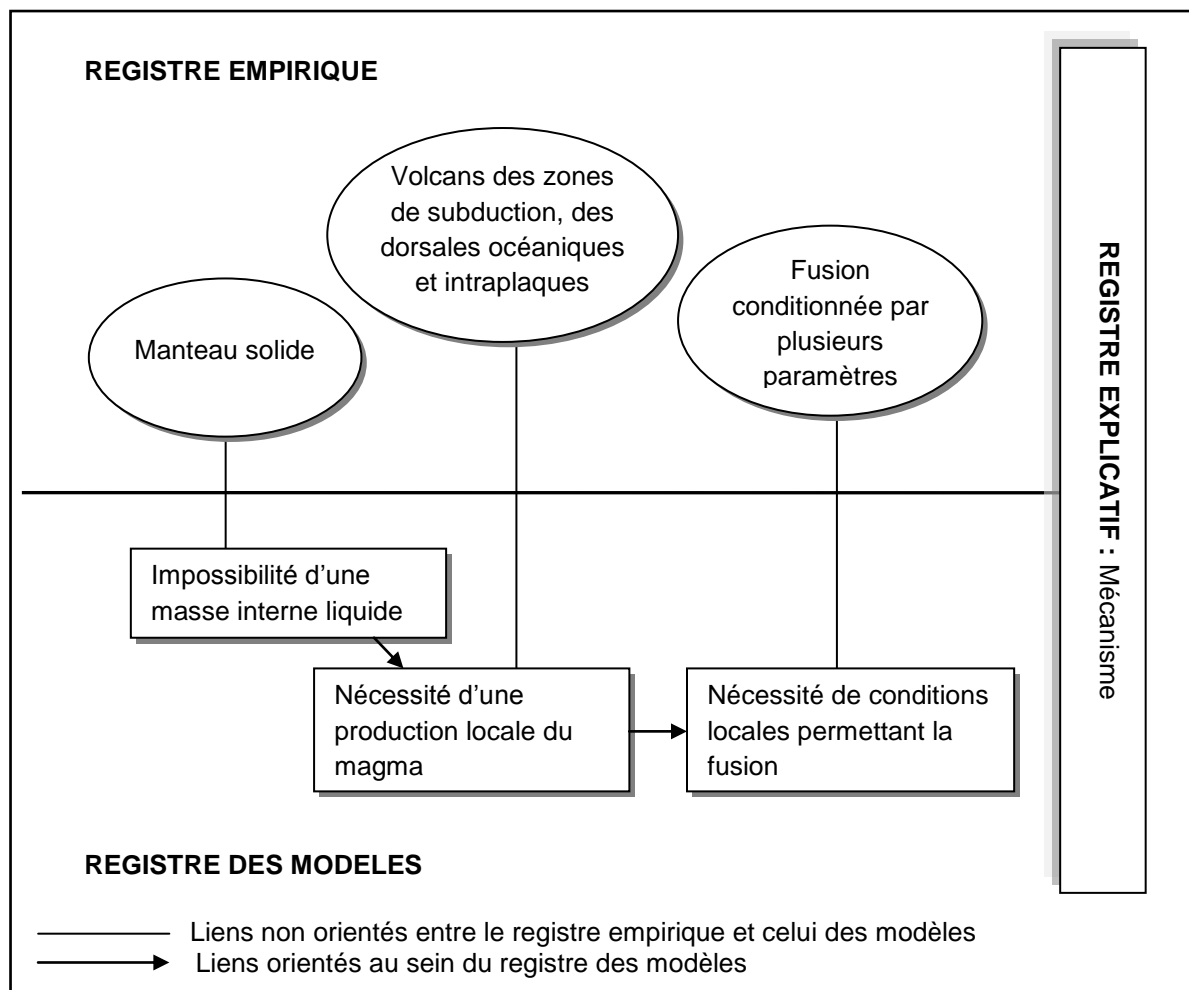


Figure 14. Espace des contraintes du modèle global magmatique.

Conclusion et deuxième formulation des questions de recherche

Nous avons tenté, dans ce deuxième chapitre, de reconstituer les différentes problématiques des modèles explicatifs local, central et global du magmatisme. Nous avons utilisé l' « espace des contraintes » pour décrire les produits de l'activité de problématisation et pour mettre en valeur la construction des raisonnements par les scientifiques. Notre focalisation a porté, dans une optique de problématisation, sur les raisons présentes derrière les solutions proposées et non pas sur les solutions en tant que telles. Pour chacune des explications, les contraintes et les nécessités qui organisent les solutions et les sous-tendent ont été identifiées. Nous avons vu comment d'un modèle à l'autre, les problématiques changent de même que le statut des problèmes empiriques. Derrière des modèles explicatifs différents la problématisation, les nécessités construites et les questionnements sont différents. Les théories évoluent puisqu'on est passé d'une théorie à une autre (locale, centrale, globale). « *Mais ces théories ne sont finalement*

que des réponses qui n'ont de sens que par rapport aux problématiques qui les ont engendrées » (Fabre, 1999, p.191). Comprendre la genèse des modèles du fonctionnement des volcans nous fournit des indications et des renseignements pour l'analyse des explications spontanées des élèves. En effet, la diversité des explications magmatiques se retrouve chez les élèves (Orange, 1995) mais le modèle global reste difficilement accessible avant le lycée car il nécessite la prise en compte de « *l'intervention de plusieurs paramètres continus dans la transition solide/liquide et donc une certaine maîtrise des diagrammes P, T voire P, T, P_{H_2O}* » (ibid., p. 98).

Notre recherche se place dans le cadre théorique de la problématisation et met en avant l'accès aux raisons derrière les modèles scientifiques. Elle se propose d'étudier la mise en texte du concept de magmatisme dans deux niveaux de classe, la 4^{ème} et la Terminale S. En continuité avec nos questions de recherche présentées à la fin du premier chapitre, nous nous interrogeons sur la mise en texte des raisons qui sous-tendent les solutions aux problèmes magmatiques : Ces raisons sont-elles mises en texte dans l'enseignement scientifique ? Sous quelles conditions ? Avec quelles pratiques ? Et quelles difficultés ?

Nous exposons dans le troisième chapitre de cette recherche notre méthodologie de recueil et d'analyse des données qui nous permettra d'apporter des éléments de réponse à tous ces questionnements.

Chapitre 3. Méthodologie de recherche et domaine d'étude

Introduction

Conformément à notre problématique dont le but principal est d'étudier **les difficultés et les conditions de construction de savoirs et de textes problématisés en sciences de la Terre**, nous présentons dans ce chapitre les principes méthodologiques suivis pour le recueil et l'analyse des données de cette recherche. Nous posons, dans un premier temps, les objectifs à atteindre. Ensuite, nous explicitons d'une manière spécifique le choix des données empiriques – situations, objets d'étude et niveaux de classe – retenues par rapport à nos questions de recherche ainsi que les outils d'analyse correspondants. Nous précisons en quoi la méthodologie mise en œuvre nous aidera à progresser dans l'étude des relations entre problématisation, pratiques de savoirs, mise en texte et construction des savoirs problématisés. En fin de ce chapitre, nous représentons par un schéma synthétique des deux moments de recueil et d'analyse des données.

1. Explicitation des objectifs de recherche

Nous rappelons que notre recherche se situe dans la continuité des travaux entrepris par l'équipe du CREN et qu'elle vise d'aborder le processus de problématisation à l'échelle de la séquence entière d'enseignement-apprentissage afin de le suivre au-delà des seules phases de débats scientifiques. Nous étudions les textes et les pratiques effectives de mise en texte des enseignants observées en situation pendant des séquences dites « ordinaires »⁵⁴ et « forcées »⁵⁵ de classe. Nous cherchons à travers ceci à avoir des renseignements sur les difficultés et les conditions de construction de savoirs non-propositionnels dans le domaine du magmatisme. L'approche méthodologique mise en place pour répondre à notre problématique, devrait permettre d'atteindre les objectifs fixés suivants :

1. Analyser les textes de savoirs produits lors des séquences (ordinaires et forcées) d'enseignement-apprentissage portant sur le magmatisme.
2. Identifier les pratiques de savoirs mises en œuvre par l'enseignant permettant d'aboutir à la construction des textes de savoir le long d'une **séquence ordinaire** abordant le concept de magmatisme.

⁵⁴ La préparation des séquences « ordinaires » se fait sans l'aide des chercheurs qui sont de simples observateurs de ce qui se passe en classe (voir paragraphe 2.2 suivant).

⁵⁵ Les séquences « forcées » sont élaborées par un groupe de recherche constitué de chercheurs en didactiques et d'enseignants (voir paragraphe 2.2 suivant).

3. Identifier les pratiques de savoirs mises en place par l'enseignant dans une mise en texte qui prend en compte le caractère apodictique⁵⁶ des savoirs magmatiques lors d'une **séquence forcée** en sciences de la Terre.
4. Déterminer **les difficultés** et **les conditions de possibilités** d'une mise en texte des savoirs magmatiques qui soit de nature problématisée et non propositionnelle.

Après avoir rappelé la problématique de recherche et posé les objectifs permettant d'y répondre, il s'agit de spécifier et d'exposer les objets d'étude, les niveaux de classe et les situations de travail retenues.

2. Objets d'étude, niveaux de classes et situations de travail retenues

2.1 Objets d'étude retenus et choix des classes

Le concept de magmatisme dont nous n'abordons que les aspects fonctionnalistes est au cœur de cette recherche. Les phénomènes qui y sont liés demeurent parmi les plus spectaculaires sur Terre et sont d'une importance primordiale pour la compréhension du fonctionnement de notre globe terrestre. C'est ce qui explique, selon Orange (1995), sa place dans l'enseignement de la géologie en France : il figure effectivement avec l'étude des séismes dans les programmes de l'école (M.E.N., 2008a), du collège et du lycée (M.E.N., 2008b, 2002, 2001/2006). Le concept de magmatisme représente également un intérêt théorique et une richesse épistémologique remarquable pointés lors de nos développements théoriques (chapitre 2). De plus, les phénomènes étudiés sont pour la plupart bien connus des élèves et accessibles à l'observation directement ou indirectement à travers les médias. Laperrière-Tacussel (1995, p.64) définit trois « pôles d'approche » pour étudier le magmatisme, chacun correspondant à des domaines notionnels déterminés :

- **Le pôle humain** « où l'on trouve tout ce qui correspond aux rapports entre l'homme et les volcans : conséquences positives ou négatives, avec leurs aspects catastrophistes, affectifs ou sensoriels ; méthodes d'étude du phénomène et travail des volcanologues ; géologie appliquée ».
- **Le pôle descriptif** « dans lequel sont étudiés tous les objets géologiques liés au volcanisme, par exemple les produits de l'éruption ».

⁵⁶ Un savoir scientifique est un savoir apodictique qui possède une certaine part de nécessité (Bachelard, 1949).

- **Le pôle explicatif** « où sont étudiés la liaison du phénomène avec la structure du globe, les mécanismes en jeu, les transformations de matière ».

Vu que notre recherche s'inscrit dans le cadre théorique de la problématisation qui accorde de l'importance aux problèmes explicatifs, **nous portons notamment notre attention au pôle d'approche explicatif dans l'étude du magmatisme**. Nous étudions aussi ce concept parce qu'il est récurrent dans les programmes des classes scientifiques du collège et du lycée : classe de 4^{ème} (M.E.N., 2008b), classe de Première S (M.E.N., 2002) et de Terminale S (2001/2006). Dans cette recherche, nous nous intéressons particulièrement à des séquences menées dans **deux classes de 4^{ème}** (20 et 25 élèves) **et une classe Terminale S** (33 élèves). **Les trois enseignantes de ces classes sont expérimentées, appartiennent au groupe de travail du laboratoire CREN** et participent, depuis un certain temps, à ses recherches didactiques. De plus, elles sont engagées dans les ateliers didactiques des sciences de la vie et de la Terre qui regroupent des formateurs, des conseillers pédagogiques etc. Deux d'entre elles ont été impliquées dans la recherche intitulée : « *Mises en textes et pratiques des savoirs dans les disciplines scolaires* » menée en collaboration avec l'INRP⁵⁷ et dont cette étude se propose de prolonger. Nous nous plaçons, à travers ce choix, dans les meilleures conditions pour répondre à notre problématique ce qui évitera l'intervention de facteurs divers tels le manque d'expérience de l'enseignant, sa méconnaissance du cadre théorique de la problématisation, etc.

Pour les classes de 4^{ème} et de Terminale S, nous avons retenus deux problèmes géologiques différents en rapport avec le concept de magmatisme. Il s'agit des problèmes suivants :

- le fonctionnement des volcans et l'origine des matériaux volcaniques en 4^{ème} ;
- le magmatisme des zones de subduction en Terminale S.

Le problème du fonctionnement des volcans et de l'origine des matériaux volcaniques est pris en compte par le programme de la classe de 4^{ème} et s'intègre dans la partie consacrée à l'étude de l'« *activité interne du globe* » terrestre (M.E.N., 2008b, p.47). Les programmes officiels indiquent les objectifs d'apprentissage suivants : « *Les magmas sont contenus dans des réservoirs magmatiques localisés, à plusieurs kilomètres de profondeur* » (ibid., p.48). Les élèves ont déjà été confrontés à ce problème dans les classes antérieures de l'école primaire. Il est nécessaire de rappeler que cette partie du programme a subi, depuis quelques années, d'importants allègements. En effet, le programme de l'année précédente (M.E.N., 2007, p.42)

⁵⁷ Institut National de Recherche Pédagogique appelée récemment Institut Français de l'Éducation (IFÉ).

mentionne des objectifs d'apprentissage beaucoup plus élaborés : « *Le magma contenu dans un réservoir magmatique localisé, à plusieurs kilomètres de profondeur est de la matière minérale en fusion véhiculant des éléments solides et des gaz* ». La notion de fusion de la roche ainsi que les mécanismes de formation des roches volcaniques ont été totalement omis⁵⁸. De plus, les phénomènes magmatiques ne sont pas reliés, dans les programmes officiels actuels de la classe de 4^{ème}, à la dynamique du globe terrestre et à la tectonique des plaques. Cette dernière est envisagée bien après l'étude des phénomènes dynamiques (séismes et volcanisme). Le volcanisme est étudié d'une manière générale et globale sans faire référence à de zones particulières ni à la tectonique des plaques. Toutefois, il est important de noter à la suite de Goix (1996, p.142) que « *les concepts de magmatisme [...] intègrent des notions difficiles à comprendre en 4^{ème} qui font appel à des domaines physico-chimiques à peine abordés à ce niveau scolaire ainsi qu'à des concepts difficilement perceptibles à cet âge comme le concept de temps* ». Même si les manifestations du volcanisme sont accessibles à l'observation d'une manière directe ou à la télévision, ces manifestations de courte durée ne représentent que des indices temporaires de phénomènes qui se produisent sur de très longues durées (Allègre, 1987). Pour toutes ces raisons, il apparaît nécessaire d'étudier ce problème afin de rendre compte des conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé qui soit accessible à ce niveau de scolarité.

L'explication du magmatisme des zones de subduction est prise en compte par les programmes de la classe de Terminale S consacrés à l'étude de « *la convergence lithosphérique et ses effets* » (M.E.N., 2001, p.29). Les élèves ont déjà acquis, en classe de Première S, des notions sur la structure du globe et la convection du manteau ainsi que des connaissances sur les plaques lithosphériques, leurs mouvements et les processus magmatiques. Ces connaissances, concernant les principales caractéristiques de la convergence des plaques, sont réinvesties pour traiter les phénomènes liés à celle-ci. Les objectifs du programme indiqués pour ce problème sont les suivants : « *Les zones de subduction sont le siège d'une importante activité magmatique caractéristique : volcanisme, mise en place de granitoïdes. [...]. Le magma provient de la fusion partielle des péridotites au-dessus du plan de Bénioff ; cette fusion est due à l'hydratation du manteau. L'eau provient de la déshydratation des roches de la plaque plongeante. Le long du plan de Bénioff, les roches de la lithosphère océanique sont soumises à des conditions de*

⁵⁸ « *Les roches volcaniques proviennent du refroidissement du magma. Le refroidissement par étapes du magma, sa solidification sous forme de cristaux et de verre, donnent naissance aux roches volcaniques. La structure de la roche conserve la trace de ses conditions de refroidissement* » (M.E.N. 2007, p.42).

pression et de température différentes de celles de leur formation. Elles se transforment et se déshydratent. Des minéraux caractéristiques des zones de subduction apparaissent » (ibid., p.30). C'est un problème qui est plus ou moins familier des élèves de Terminale S, étant donné que ces derniers ont déjà travaillé la théorie de la tectonique des plaques dans les classes précédentes (programme du collège et du lycée). A ce niveau d'étude, les domaines physico-chimiques sont mieux maîtrisés qu'en 4^{ème}. Ceci serait effectivement nécessaire pour construire le problème du volcanisme des zones de subduction qui demande d'« *établir la nécessité d'une fusion partielle du manteau où n'interviennent pas seulement la pression (P) et la température (T) mais où on prend en compte l'état ordinairement solide du manteau (les données sismiques l'attestent) dans ces conditions P, T* » (Orange Ravachol, 2003, p.74).

Les problèmes retenus organisent les corpus de nos études de cas et appartiennent au pôle de la géologie fonctionnaliste. Le tableau 5 (p.110) récapitule les niveaux de classes et les problèmes géologiques retenus. L'explication du magmatisme des zones de subduction en classe de Terminale S s'inscrit nettement, au niveau des programmes scolaires correspondants, dans le cadre paradigmatique de la tectonique des plaques, ce qui n'est pas le cas du problème du fonctionnement des volcans et de l'origine des matériaux volcaniques. Pour ce dernier, deux séquences ont été étudiées en 4^{ème} : une ordinaire et une forcée alors qu'en Terminale S, il s'agit d'une séquence en partie forcée. Quelle est la différence entre ces deux typologies de séquences et comment s'organisent-elles ? Quelle est leur véritable utilité vis-à-vis de nos questions de recherche ?

2.2 Choix et intérêts d'une méthodologie basée sur des séquences ordinaires et des séquences forcées

Nous présentons d'abord la méthode de l'ingénierie didactique puis celles dont il est question dans cette recherche (les situations ordinaires et forcées) afin de comparer les différentes méthodologies utilisées dans l'étude de l'enseignement et l'apprentissage, de justifier nos choix et d'évoquer les apports des situations choisies par rapport à nos questionnements et nos objectifs de recherche.

A partir des années 1980, un certain nombre de travaux didactiques se sont basés sur la méthode de l'**ingénierie didactique** pour étudier les situations et le processus d'enseignement-apprentissage en classe. Cette méthode « *se caractérise en premier lieu par un schéma expérimental basé sur des "réalisations didactiques" en classe, c'est-à-dire sur la conception, la*

réalisation, l'observation et l'analyse de séquences d'enseignement » (Artigue, 1990, p. 285). L'ingénierie didactique a été privilégiée par les didacticiens des mathématiques « *pour organiser la confrontation de leurs constructions théoriques à la contingence de la classe* » (Artigue, 2002, p.62). Elle se situe dans le registre des études de cas dont le mode de validation est interne et déterminé par une confrontation entre les analyses réalisées *a priori* et celles établies *a posteriori* (ibid.) (figure 15). Les chercheurs se centrent davantage, lors de la construction de la séquence de classe, sur les savoirs et les apprentissages et l'enseignant ne participe aucunement au choix des situations (tableau 4, p. 105). Selon les didacticiens utilisant cette méthode, l'introduction de cette ingénierie était nécessaire dans les années quatre vingt pour contrer certaines méthodes « externes » qui passent à côté de la complexité des interactions didactiques comme les questionnaires, les entretiens, les tests et qui n'abordent pas la réalité de la classe (Artigue, 1990).

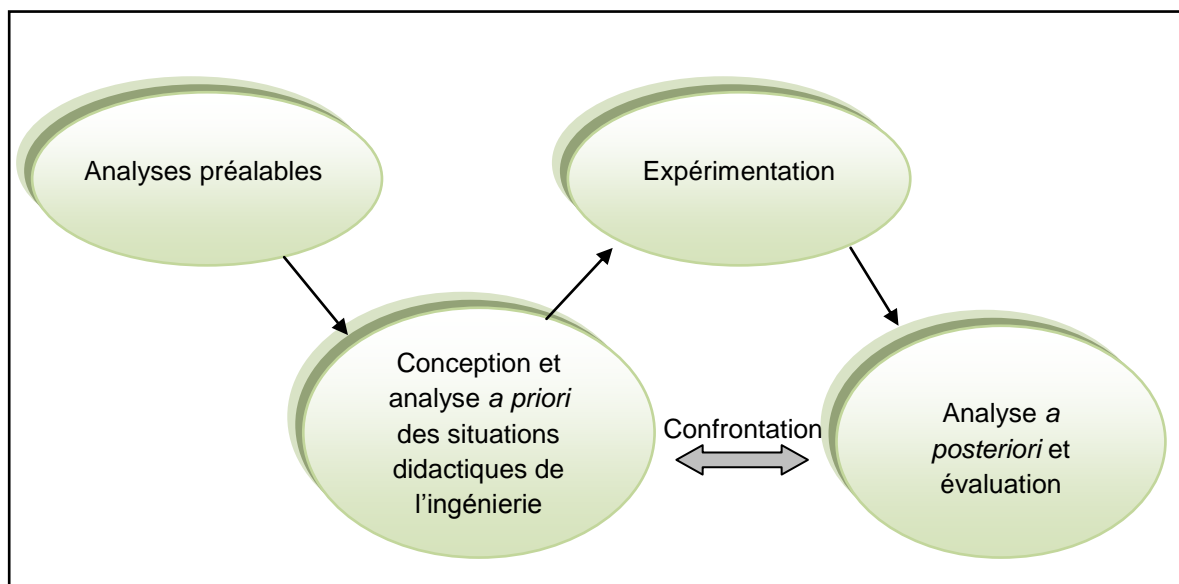


Figure 15. Les phases de la méthodologie d'ingénierie didactique (d'après Artigue, 1990).

Cependant, la méthodologie de l'ingénierie didactique – qui a connu un développement important spécifiquement en didactique des mathématiques – pose plusieurs problèmes liés à la difficulté de la transmission et de la reproduction des ingénieries dans les classes ordinaires. Suite à ces difficultés et devant la nécessité de la prise en considération du rôle de l'enseignant dans les situations didactiques, les recherches se sont orientées vers l'étude des pratiques d'enseignement dans des séquences dites ordinaires. Les **situations ordinaires** sont dispensées en classe sous l'intégrale responsabilité de l'enseignant. Elles se font sans aucune intervention ni aide dans le choix des enseignements de la part des chercheurs qui sont de simples observateurs

de ce qui se passe habituellement en classe (figure 16). Les didacticiens s'abstiennent d'influencer ce qu'ils observent et ne cherchent, en aucun cas, à modifier les effets attendus. L'étude de ces situations s'avère essentielle pour « *rendre compte du travail des élèves et des professeurs, dans les classes ordinaires* » (Mercier, 2008). C'est pour cela que ces dernières années, les recherches en didactique des disciplines portant sur l'analyse de ces situations, se sont multipliées (Altet, 2002 ; Venturini & al., 2007 ; Calmettes, 2011). Nous nous intéressons à ce type de séquence parce que c'est le travail ordinaire de mise en texte des élèves et de leurs enseignants tel qu'il se fait en classe que nous voulons étudier en premier.

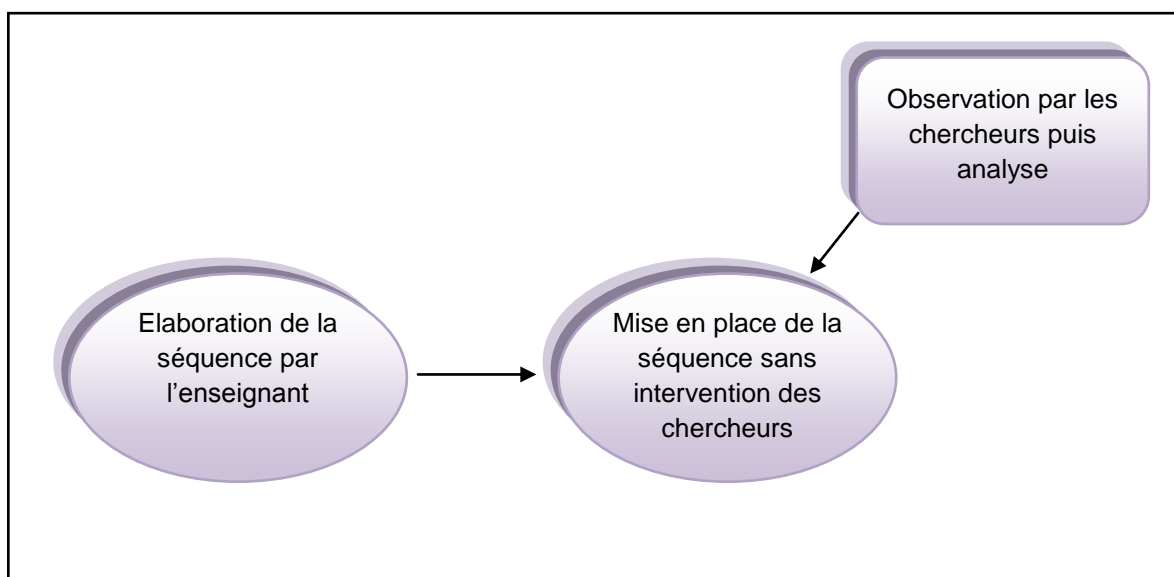


Figure 16. Les phases de la méthodologie des séquences ordinaires.

Cependant, l'étude des situations ordinaires à elle seules ne permet pas d'articuler le champ théorique au champ empirique dans le domaine didactique : pour cela « *l'observation ne peut suffire, il faut construire de nouveaux phénomènes* » (Orange, 2010, p. 76). Ainsi, devant l'insuffisance des situations ordinaires à construire des phénoménologies savantes, Orange (2010) introduit le concept de **situations et de séquences forcées**. Celles-ci sont élaborées par un groupe de recherche constitué de chercheurs en didactique et d'enseignants expérimentés dans le but de créer des phénomènes, des apprentissages et d'explorer de nouveaux territoires de l'espace didactique (ibid.). L'implication des enseignants – qui connaissent très bien les caractéristiques de leur classe et de leurs élèves – dans le choix des situations constitue une particularité et une nécessité de ces séquences. Elles ne cherchent pas à construire des séquences « reproductibles » et « exemplaires » puisqu'elles dépendent d'un cadre théorique bien défini qu'elles cherchent à faire évoluer. A travers la création de phénomènes didactiques et de phénoménotechniques qu'elles engagent, leur principale intention est de mieux comprendre le

fonctionnement des apprentissages scolaires et d'envisager une évolution éventuelle du cadre théorique de recherche. C'est pour ces raisons que nous avons fait appel à ce type de séquences qui se définit par deux catégories d'objectifs (Orange, 2010) :

- ✓ **Les objectifs de recherche** (*quels phénomènes veut-on observer et/ou construire ?*) : ils sont fixés par le groupe en référence au cadre théorique de la recherche qu'ils visent à développer. Les chercheurs didacticiens contrôlent ces objectifs.
- ✓ **Les objectifs pédagogiques ou d'apprentissages** (*quels sont les apprentissages que l'on vise ?*) : ils intègrent les objectifs que l'enseignant se fixe normalement pour ses élèves en référence aux recommandations officielles. Toutefois, ils peuvent être dépassés, selon les besoins qu'exige la prise en compte du cadre théorique et des objectifs de la recherche. Ces objectifs sont définis par le groupe de recherche et contrôlés par les enseignants. Ils prennent en considération le cadre théorique et les objectifs de recherche.

Le groupe de recherche, formé de didacticiens et d'enseignants, se réunit avant chaque séance pour préparer conjointement les séances de classe en fonction des doubles objectifs (d'apprentissages et de recherche) (figure 17). La première réunion de l'équipe vise la préparation de la première séance (ou des premières séances). Après la mise en place de la première séance, le groupe se rencontre de nouveau pour discuter le déroulement de celle-ci et préparer les séances suivantes en fonction des objectifs définis et des productions de la classe élaborées jusque là (figure 17). Le groupe de recherche fonctionne selon ce mode jusqu'à la fin de la séquence.

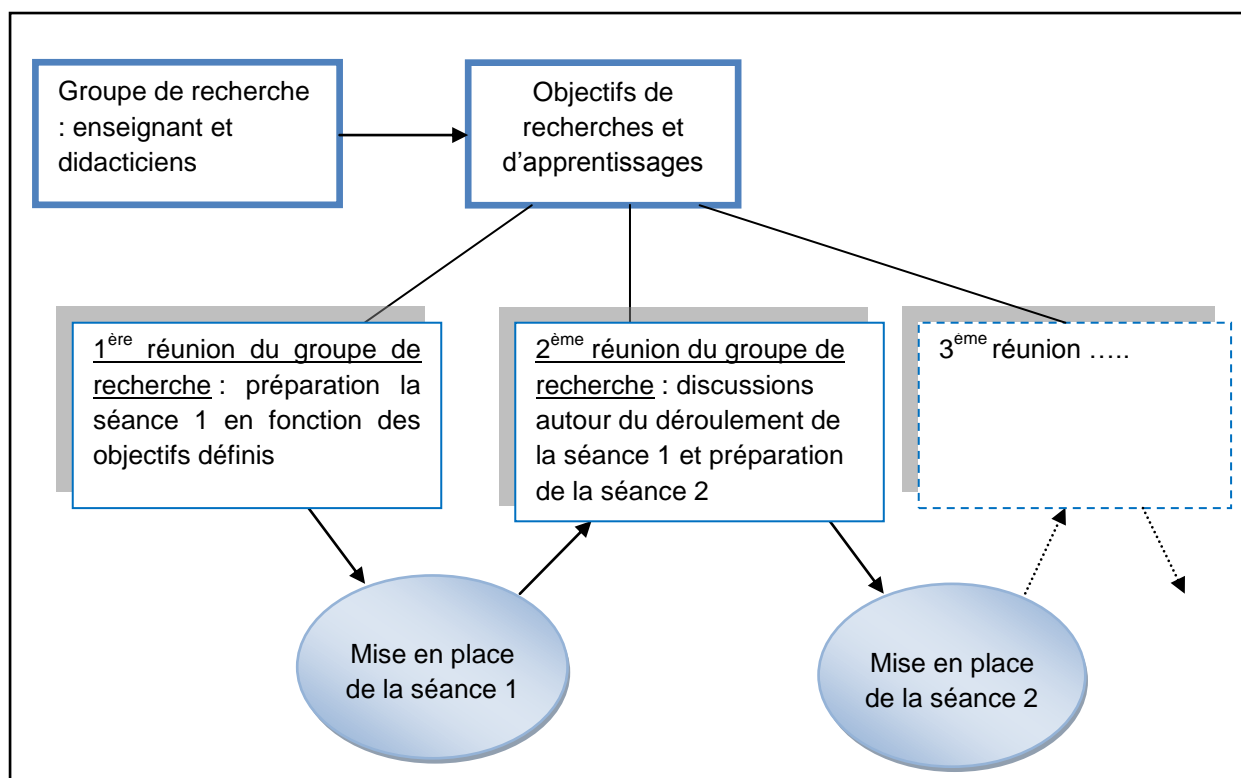


Figure 17 : Les phases de la méthodologie des séquences forcées (d'après Orange, 2010).

Les séquences forcées s'inscrivent dans le cadre des **recherches collaboratives**⁵⁹ **entre les chercheurs et les enseignants** visant le rapprochement entre le monde de la recherche et celui de la pratique (Desgagné, 1997 ; Desgagné & al., 2001). La méthode des situations forcées essaye effectivement de concilier le développement des recherches et celui du métier enseignant (Orange, 2010) et d'articuler les savoirs issus du monde heuristique avec ceux issus de l'expérience.

Le tableau 4 ci-dessous résume les différences entre la méthodologie de l'ingénierie didactique, celle des séquences ordinaires et des séquences forcées. Il montre en quoi chacune de ces méthodologies se démarque l'une de l'autre en ce qui concerne le rôle des acteurs (enseignant et chercheur) et les objectifs de recherche.

⁵⁹ Une recherche collaborative « suppose la contribution des praticiens enseignants à la démarche d'investigation d'un objet de recherche, démarche le plus souvent encadrée par un ou plus d'un chercheur universitaire. » (Desgagné, 1997, p. 371).

	Méthodologie de l'ingénierie didactique	Méthodologie des séquences ordinaires	Méthodologie des séquences forcées
Rôle de l'enseignant	L'enseignant ne participe pas au choix des situations.	La situation est effectuée selon le choix de l'enseignant.	L'enseignant de la classe, qui fait partie de l'équipe de recherche, participe à l'analyse <i>a priori</i> et au choix des situations. Il contrôle les objectifs d'apprentissage.
Rôle des chercheurs didacticiens	Ce sont les chercheurs qui construisent la séquence d'enseignement-apprentissage.	Les chercheurs sont de simples observateurs.	Les chercheurs collaborent avec les enseignants et contrôlent les objectifs de recherche.
Objectifs	Focalisation sur les savoirs et les apprentissages. La séquence a pour vocation d'être reproduite ⁶⁰ .	Etudier les pratiques ordinaires d'enseignement et l'activité des élèves.	Produire des phénomènes (recherche) et des apprentissages (enseignement). La séquence n'a pas pour vocation d'être reproduite.

Tableau 4. Comparaison entre la méthodologie d'ingénierie didactique, des séquences ordinaires et celle des séquences forcées.

(Les encadrés grisés pointent les méthodologies en question dans cette recherche).

Notre travail concerne l'étude de séquences ordinaires et forcées d'enseignement-apprentissage en sciences de la Terre. Tout d'abord, l'analyse des séquences ordinaires permet de déterminer les pratiques ordinaires de mise en texte des savoirs et les difficultés affrontées. Les chercheurs sont, lors du recueil de ces données ordinaires, de simples observateurs. Par la suite, nous cherchons – à travers la conception de séquences forcées en collaboration avec les enseignantes – à identifier les pratiques possibles et les conditions de possibilités d'une mise en texte qui prend en compte le caractère apodictique des savoirs scientifiques. Notre corpus d'étude est constitué comme suit (tableau 5, p.110) :

⁶⁰ Nous notons que l'élaboration de séquences ayant pour vocation d'être reproduite dépend des ingénieries puisque le terme « ingénierie didactique » a pris plusieurs sens en didactique des mathématiques.

- **En classe de 4^{ème}, il s'agit d'une séquence ordinaire (4 séances) dans une classe et d'une séquence forcée (5 séances) d'enseignement-apprentissage dans une autre classe** portant sur le fonctionnement des volcans et l'origine des matériaux volcaniques. La mise en regard des situations ordinaires et forcées permet de comparer les pratiques ordinaires de mise en texte à celles qui tiennent en compte la problématisation en sciences de la Terre. La séquence ordinaire a été enregistrée en octobre 2009 au Collège Albert Camus au Mans et celle forcée en février 2011 au Collège le Haut Gesvres à Treillières près de Nantes. Les deux enseignantes respectivement 1 et 2 sont expérimentées. L'enseignante 1 participe depuis un bon moment aux recherches entreprises par les chercheurs du CREN. Le cadre théorique de la problématisation lui est bien familier. L'enseignante 2 est encore peu intégrée à ces recherches. Il aurait été intéressant de réaliser la séquence forcée avec la même enseignante 1 mais certaines contraintes logistiques – telle la distance entre le Mans et Nantes combinée avec le besoin de réunions régulières du groupe de recherche et l'indisponibilité des chercheurs didacticiens au moment du déroulement de la séquence au Mans – ont entravé cette mise en œuvre. Ceci ne remet pas pour autant en cause nos résultats puisque ce sont les conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé qui nous interpellent et non pas l'effet et l'impact de l'introduction de la séquence forcée sur la pratique de l'enseignante ou sur l'évolution de ses stratégies didactiques et pédagogiques (Schneeberger & Gouanelle, 2001).
- **En classe de Terminale S, une séquence en partie forcée (4 séances)** portant sur la formation du magmatisme des zones de subduction. Elle s'est déroulée en mai 2010 au lycée Montesquieu au Mans. L'enseignante 3 est expérimentée et participe activement aux recherches du CREN. Elle connaît le cadre théorique de la problématisation qui met en avant à la construction des raisons dans les apprentissages scientifiques.

Les séances de classe ordinaires et forcées ont été filmées intégralement et des enregistrements audio ont été réalisés. Les discussions, qui constituent les supports de nos études de cas, ont été transcrites. Nous avons récupérés toutes les traces langagières : les écrits individuels et de groupe des élèves (affiches, productions initiales...) et ceux construits pendant la séquence (tableau 5, p.110). De plus, nous avons pris des photos du tableau. Le passage par l'équipe du CREN⁶¹ nous a nettement facilité le contact avec les enseignants ainsi que l'accès aux établissements scolaires. Ceci nous a épargné les difficultés liées à la recherche d'enseignants qui voudraient bien

⁶¹ Il s'agit de Christian Orange et de Denise Orange Ravachol. De plus, la réalisation des séquences s'est déroulée en collaboration avec Denise Orange Ravachol.

consacrer un peu de temps à la recherche et d'établissements qui accepteraient volontiers de filmer au sein de leurs classes. Par ailleurs, des autorisations individuelles ont été demandées aux parents d'élèves avant le début des enregistrements pour des raisons éthiques, juridiques et déontologiques de recherche. Les élèves qui n'avaient pas d'autorisations ont été placés en dehors du champ de la caméra tandis que d'autres, filmés par erreur lors de leur passage au tableau, ont été floutés.

En plus de ces recueils de données, nous avons réalisé ou repris des entretiens d'autoconfrontation avec les enseignantes concernées.

2.3 Entretiens d'autoconfrontation avec les enseignants portant sur les situations de débats scientifiques

Vu le rôle joué par les enseignants dans l'apprentissage des élèves à travers les situations mises en place et l'action qu'ils mènent en classe, nous avons cherché à analyser le travail des enseignants et l'organisation de leur activité de mise en texte. Méthodologiquement, l'observation externe de l'activité n'est pas suffisante à elle seule pour étudier complètement cette activité. Pour comprendre, expliciter et rendre compte de celle-ci, il est nécessaire d'emmener l'acteur à verbaliser son action pour saisir les connaissances sous-jacentes. En effet, la conduite est un objet qui comprend deux dimensions, « *l'une publique comportementale observable et l'autre privée non observable* » (Vermersch, 2004, p36). De plus, la pertinence de la description de l'activité ne doit pas reposer sur l'unique observation scientifique mais prendre en considération la dynamique interne du sujet (Theureau, 2000). Ainsi, l'analyse de l'activité s'appuie non seulement sur l'observation mais sur ce que dit l'acteur de son activité (Pastré, Mayen & Vergnaud, 2006)

Notre choix a porté – parmi différentes méthodologies⁶² d'investigation de l'activité humaine – sur l'entretien d'autoconfrontation qui favorise et guide l'acteur à verbaliser *a posteriori* son action. Cette technique consiste spécifiquement à proposer à l'acteur, « *après son action un enregistrement vidéo de son comportement et à lui demander de commenter* » (Theureau, 1992, p.45). Dans le domaine de l'éducation, le chercheur sélectionne à l'avance des « épisodes », dans la séance ou dans la séquence enregistrée, à propos desquels il souhaite que l'enseignant

⁶² Il s'agit de l'entretien d'explicitation développé par Vermersch (1994) ; l'entretien de co-explicitation (Vinatier, 2010) ; l'entretien d'autoconfrontation croisée (Clot, 1999). Pour une mise en perspective des différents modes d'investigation de l'activité humaine voir Rix & Lièvre (2005).

s'exprime. Il revient à ce dernier de choisir les extraits, d'interrompre au choix la vidéo et d'avancer des commentaires sur ce qui est significatif pour lui. Il verbalise les éléments de la situation qui lui apparaissent marquants. L'enseignant dispose également de la transcription de la situation sélectionnée auparavant par le chercheur. Il est ainsi confronté à sa pratique à travers les traces vidéographiques qui donnent à voir l'activité telle qu'elle a été réalisée. Ceci diffère des notes et des grilles d'observations du chercheur qui opèrent, à l'avance, une sélection et un filtrage guidé par la réflexion heuristique. De plus, le support visuel constitue un moyen d'aide et d'incitation pour l'acteur à verbaliser son action en le confrontant à son comportement. Au cours de l'entretien, le chercheur ne définit pas « *la nature des problèmes à élucider ou les aspects de l'activité à commenter* » (Goigoux, 2007). Toutefois, il s'autorise à poser des questions afin d'accompagner la réflexion de l'enseignant et l'aider à expliciter sa pensée.

Les conditions et les dispositifs mis en œuvre, lors de la technique de l'autoconfrontation, ont pour ambition d'orienter le professionnel vers une posture réflexive par rapport à son action (Rix & Lièvre, 2005). « *Si la confrontation de l'enseignant à son propre discours et à son image lui permet d'enrichir ses connaissances sur sa propre activité, elle donne également l'occasion au chercheur de mieux comprendre les raisons qui le poussent à agir comme il le fait* » (Goigoux, 2007). Ce sont effectivement les raisons derrière le travail de mise en texte des enseignants que nous cherchons à étudier. Dans cette recherche, nous nous sommes intéressés à deux entretiens d'autoconfrontations réalisés avec les deux enseignantes (1 et 2) sur des situations de débats scientifiques. Nous n'avons pas pu mener un entretien avec l'enseignante 3 en raison de problèmes techniques ayant affectés les enregistrements vidéos du débat de la séquence. Les phases de débat nous sont apparues intéressantes à exploiter puisqu'elles sont révélatrices de la position que prend l'enseignante par rapport à la mise en texte et à la problématisation. Les entretiens d'autoconfrontation étudiés sont les suivants :

- Pour la séquence ordinaire de 4^{ème}, nous avons fait appel à un entretien d'autoconfrontation réalisé par les chercheurs de l'équipe du CREN quelques années auparavant (en mars 2008) avec la même enseignante concernée par nos corpus de recherche (enseignante 1). Nous avons estimé qu'il était intéressant d'analyser cet entretien puisqu'il porte sur un moment de débat durant lequel l'activité de l'enseignante en question a été similaire à celle que révèlent les analyses du débat de notre recueil de données.
- Pour la séquence forcée de 4^{ème}, nous avons réalisé en juin 2011 un entretien d'autoconfrontation avec l'enseignante 2 portant sur le débat scientifique de cette séquence.

Les commentaires des enseignantes et les dialogues avec le chercheur ont été enregistrés via un dictaphone puis transcrits entièrement. L'analyse de ces entretiens et leur confrontation avec l'étude en situation sera porteuse d'éléments importants qui nous aideront à mieux comprendre l'activité de mise en texte de ces enseignantes et ce qui l'organise. Cependant, nous notons que ces entretiens se sont produits, au vu de certaines contraintes liées à la logistique et à l'indisponibilité des enseignants, quelques mois après le déroulement des situations et non pas juste après la séance de classe comme c'est généralement le cas pour ce type d'entretiens. De plus, notre choix de leur donner la transcription de leur séance, lors de l'entretien, amène une contrainte supplémentaire. Les enseignantes auxquelles nous avons eu affaire sont chevronnées. De ce fait, leurs pratiques peuvent être considérées comme étant stabilisées ce qui permet de dépasser cette limite.

Le tableau 5 ci-dessous résume notre méthodologie de recueil des données et présente une vue globale et comparative de nos trois études de cas.

	Classe de 4 ^{ème}		Classe de Terminale S
Champ de géologie	Géologie fonctionnaliste		
Problème géologique	Le fonctionnement des volcans et l'origine des matériaux volcaniques		Le magmatisme des zones de subduction
Niveau de classe où ce problème a déjà été abordé par les élèves	-		Première S
Séquences étudiées (trois séquences au total)	Une séquence ordinaire dans une classe de 4 ^{ème} (4 séances)	Une séquence forcée dans une autre classe de 4 ^{ème} (5 séances)	Une séquence forcée dans une classe de Terminale S (4 séances)
Nombre d'élèves par classe	20 élèves	25 élèves	33 élèves
Date du recueil du corpus de données	Octobre 2009	Février 2011	Mai 2010
Etablissement scolaire	Collège Albert Camus - Le Mans	Collège le Haut Gesvres - Treillières près de Nantes	Lycée Montesquieu - Le Mans
Entretiens d'autoconfrontation avec les enseignantes concernées	Entretien réalisé le 25 mars 2008 sur un débat du 9 mars 2007	6 juillet 2011	-
Productions analysées	<ul style="list-style-type: none"> - Transcriptions des séquences ordinaires et forcées et des entretiens d'autoconfrontation - Productions écrites individuelles et de groupe - Les textes produits lors de la séquence 		

Tableau 5. Présentation comparative des trois études de cas étudiées.

Notre approche est **qualitative** et s'appuie sur **trois études de cas**. C'est ainsi que les résultats obtenus ne seront pas généralisables mais les conclusions tirées pointeront, avec plus de précision, les difficultés rencontrées par les élèves et les enseignants concernant les problèmes

géologiques traités. Notre étude est à la fois une **recherche de signification**⁶³ et de **faisabilité**⁶⁴ (Astolfi, 1993). D'un côté, elle a pour objectif d'analyser des séquences didactiques en sciences de la Terre pour en déterminer le sens et la cohérence et « *s'efforcer de comprendre ce qui s'y joue, tant pour le maître que pour les élèves* » (ibid., p.10). Elle vise la compréhension des liens entre la construction des problèmes et des savoirs à l'école, la mise en texte et les pratiques de savoirs. D'un autre côté, par la mise en place de séquences forcées, notre recherche constitue un corpus sur la base d'innovations contrôlées, de construction de phénoménotechniques et vise la détermination du possible didactique. Ainsi, elle s'inscrit au sein d'une collaboration entre didacticiens et enseignants. C'est également **une recherche interprétative** qui tente de « *rendre compte de la complexité de situations didactiques singulières* » (ibid. p.11).

Nous présentons, dans le paragraphe suivant, les outils mobilisés et les principes généraux de la méthodologie d'analyse conçue pour répondre à notre problématique et nos objectifs d'étude.

3. Méthodologie d'analyse des corpus ordinaires et forcés dans le cadre théorique de la problématisation

Analyser des corpus intenses tels les séquences complètes d'enseignement-apprentissage demande de fixer des repères et une optique d'étude correspondant aux questions de recherche pour éviter de se perdre dans les multiples dimensions que donnent à voir les séquences de classe. La préoccupation de ce travail est d'étudier le processus de mise en texte ainsi que les pratiques enseignantes en jeu. Afin d'examiner ces deux dimensions dans les séquences étudiées, nous avons mis en place une méthodologie d'analyse nous permettant d'atteindre les objectifs préalablement fixés (figure 16). Rappelons que les « textes de savoirs » désignent – en référence à Bronckart (1996) – les productions orales et écrites ainsi que les schémas, les tableaux, les dessins d'observations etc. qui reflètent l'état des savoirs exposés au sein de la classe par les élèves et les enseignants.

1- La première étape comporte une description détaillée de la séquence concernée et de ses séances pour comprendre son déroulement et repérer les textes produits. Lorsqu'il s'agit de séquences forcées, les discussions du groupe de recherche seront présentées pour rendre

⁶³ « *Les recherches de signification visent [...], à analyser des situations didactiques enregistrées et décryptées, dans la singularité complexe de chacune, et dans la variété de leurs niveaux interprétatifs* » (Astolfi, 1993, p.13).

⁶⁴ « *Les recherches de faisabilité sont d'abord praxéologiques. Elles visent à établir un corpus sur la base d'innovations contrôlées* » (Astolfi, 1993, p.8).

compte des problèmes ayant préoccupés l'équipe de recherche pendant cette phase de préparation.

2- *La deuxième étape* consiste à prendre comme point de départ l'ensemble des textes de savoir scientifiques construits lors des séquences et de les caractériser, les comparer et les étudier du point de vue de leur relation au problème posé et à la problématisation.

Ces deux phases nous permettent de repérer les textes, de les analyser et de répondre à la question : « *Quels textes sont construits ?* ».

3- *La troisième étape* remonte aux pratiques ayant conduit à la production de ces textes. Il s'agit de reprendre et d'étudier les discussions et les activités ayant participé à l'élaboration de ces textes : « *Comment ces textes ont-ils été construits ? Qui des élèves ou de l'enseignant les construisent ? Quelles pratiques ont-elles servi leur construction ?* ». Nous portons notre attention à l'activité des enseignants en interaction avec celle des élèves au sein des situations d'enseignement-apprentissage.

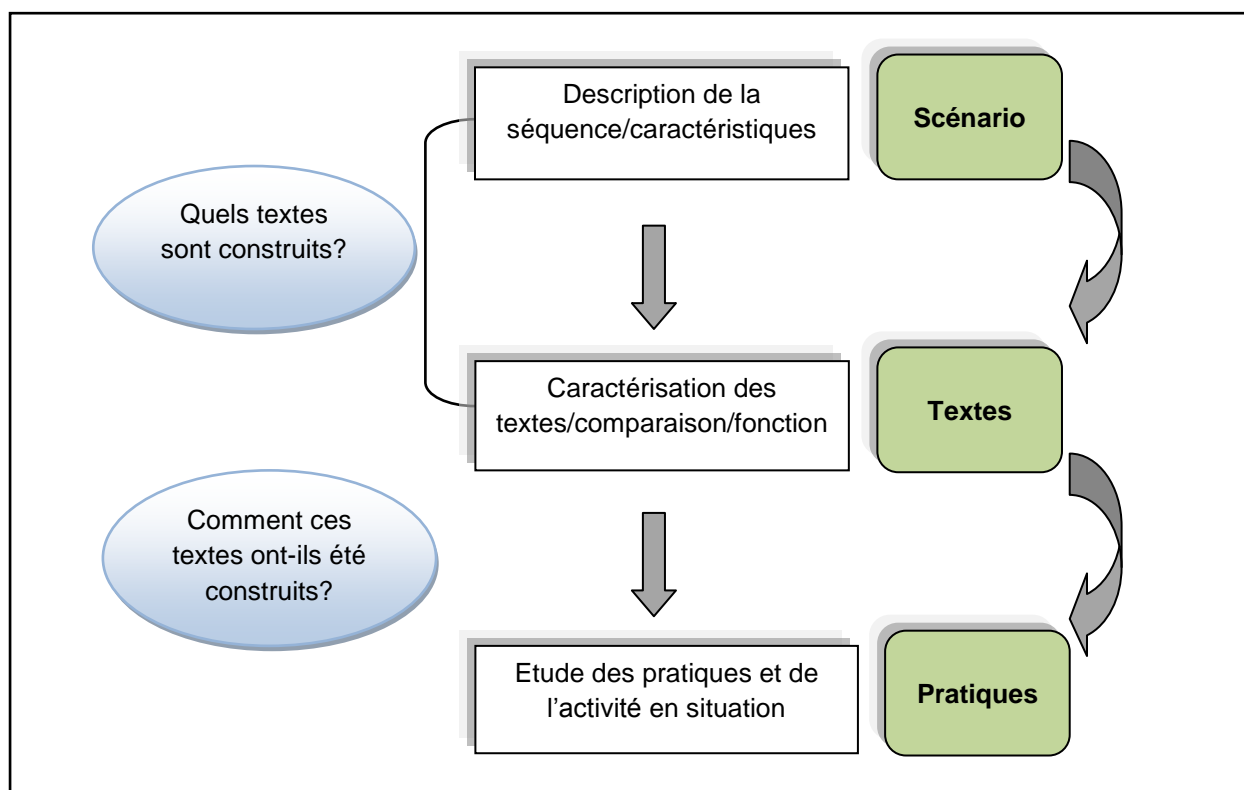


Figure 16. Méthodologie générale d'analyse des séquences ordinaires et forcées de notre recherche.

Globalement, il s'agit de partir du scénario didactique, d'étudier les textes et de remonter aux pratiques conduisant à leur production. Les activités langagières, écrites et orales, constituent le support des analyses puisqu'elles sont « *des traces de l'activité intellectuelle des différents acteurs et des marques de leur pratique des savoirs* » (Orange Ravachol, 2010, p.50). Suite à cette présentation générale de notre méthodologie d'analyse, nous détaillons, dans ce qui suit, les outils qui nous serviront pour chacune des phases décrites précédemment.

3.1 Principes d'analyse du scénario didactique des séquences étudiées

Dans le but de pointer les caractéristiques globales de chacune des séquences et d'analyser le scénario didactique après l'avoir décrit en détail, nous avons fait appel à la notion de synopsis. Ce dernier « *correspond à la première analyse que fait le chercheur quand il travaille avec les données correspondant à une séance [...]. Dans cette première analyse, le chercheur se situe en observateur extérieur ; il prend le point de vue global de la classe [...]* » (Tiberghien & al., 2007, p.105). Le synopsis adopté pour nos corpus inclut des dimensions que nous avons aménagées, à l'échelle de la séquence⁶⁵, pour correspondre à nos objectifs de recherche. Il représente un tableau (tableau 6) regroupant les différentes dimensions suivantes :

- étapes de la séquence : séance 1, 2, etc. ;
- organisation de la classe : individuelle, collective, en groupe ;
- tâches réalisées par la classe : produire une explication individuelle, de groupe, débattre, exploiter de la documentation scientifique, etc. ;
- productions langagières : échanges oraux, écrits individuels, écrits de groupe, etc. ;
- forme des écrits produits : schéma, texte, etc. ;
- nature des écrits : écrits initiaux, intermédiaires, finaux ;
- auteur des écrits : élève, groupe d'élèves, enseignant.

Etapes de la séquence	Organisation de la classe	Tâches de la classe	Productions langagières	Forme des écrits produits	Nature des écrits	Auteur des écrits

Tableau 6. Format de synopsis construit pour l'analyse de l'organisation des séquences et des activités langagières mises en œuvre.

⁶⁵ Nous utilisons cette notion pour un travail à l'échelle de la séquence et non pas la séance comme le précise son usage originel (Tiberghien & al., 2007).

La construction du synopsis offre un point de vue global de la séquence d'enseignement-apprentissage et pointe les productions langagières, leur forme, leur nature et leurs auteurs. Après avoir repéré les textes produits, il s'agit de les analyser, les comparer et les caractériser.

3.2 Principes d'analyse des différents textes produits lors des séquences

Les séquences étudiées relèvent – du fait de l'engagement des enseignants dans l'équipe de recherche du CREN – d'une méthodologie bien travaillée par les chercheurs de ce laboratoire et qui accorde de l'importance à la discussion des idées « spontanées » des élèves. Ces séquences s'appuient sur des débats effectués en classe à partir d'écrits initiaux réalisés individuellement puis en groupe par les élèves. Des écrits intermédiaires⁶⁶ suivent cette phase (écrits réalisés après le débat et l'exploitation de la documentation scientifique) pour terminer avec des écrits finaux. Nous exposons la manière suivant laquelle ces différents écrits seront analysés.

3.2.1 Les écrits initiaux individuels et de groupe

Les élèves explicitent, à travers les écrits initiaux individuels et de groupe, leurs idées « spontanées » concernant le ou les problèmes posés. Ces productions (schéma accompagné ou non de textes) sont catégorisés en fonction des explications qu'elles révèlent pour le problème du fonctionnement des volcans et de l'origine des matériaux volcaniques en classe de 4^{ème} et pour celui du magmatisme des zones de subduction en classe de Terminale S. Concernant les écrits de groupe, nous avons pris en considération les explications présentées pendant le débat scientifique pour confirmer la catégorisation réalisée. Ce travail nous permet de construire des repères pour mieux comprendre les explications des élèves.

En classe de 4^{ème}

Pour mettre en catégorie les explications « spontanées » du fonctionnement et de l'origine des matériaux volcaniques des élèves de 4^{ème}, nous avons fait appel à une méthodologie déjà utilisée dans nos travaux antérieurs (Chalak, 2008 ; Chalak & El Hage, 2011). Nous avons défini chez les élèves de 4^{ème}, six catégories d'explications (figure 17) en se basant sur le contenu des productions schématiques sur le fonctionnement des volcans. Nous notons que ces typologies

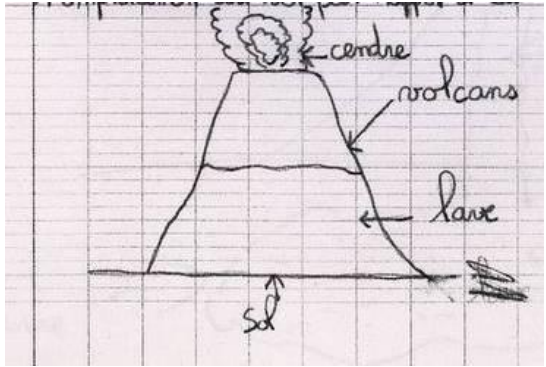
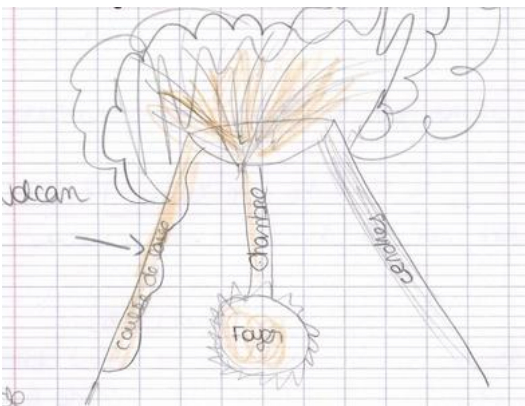
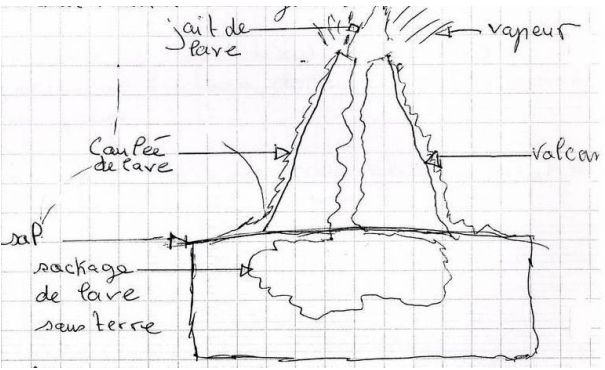
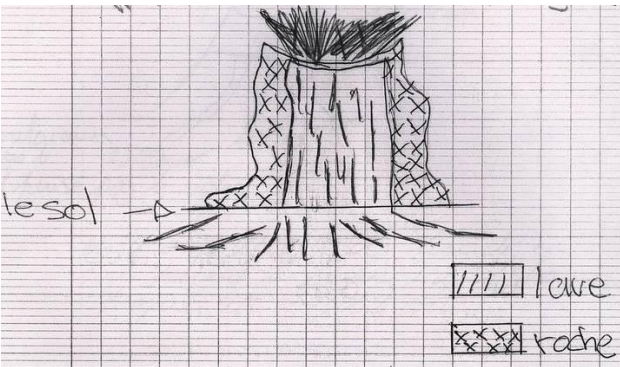
⁶⁶ Des écrits intermédiaires qui « *restent étroitement associés à des situations d'élaboration transitoires, soit de travail personnel, soit de travail collectif* » (Chabanne & Bucheton, 2002, p.26).

s'inspirent des travaux de Laperrière-Tacussel (1995). La mise en catégorie repose sur les critères suivants :

- origine de la lave : origine profonde ou superficielle ;
- présence ou absence de conduit permettant d'évacuer la lave ;
- réservoir magmatique : présent, absent, fermé, ouvert.

Les catégories d'explications ont été reliées aux repères historiques déjà identifiés dans le cadre théorique (chapitre 2) : explications magmatiques locales et centrales (figure 17). Les deux catégories 1 et 2 situent l'origine du magma dans un environnement local situé au niveau du volcan. Elles font référence à un modèle local magmatique. Les catégories 4 et 5 évoquent le volcan avec son entourage profond (chambre magmatique située en dessous du volcan sous la terre ou magma préexistant sous le volcan) sans que lien fait avec la structure et le fonctionnement du globe ne puisse être mesuré. Nous avons regroupé ces modèles sous le nom d'« explication intermédiaire » puisque leur relation avec la planète reste difficile à estimer. La catégorie 5 se rapproche d'une conception centrale qui concerne un magma qui émanerait des profondeurs de la Terre. La dernière catégorie 0 concerne des productions que nous n'avons pas pu classer en raison du manque d'éléments que nous y trouvons.

Cette référence aux modèles historiques n'implique pas forcément la même problématisation de la part des élèves. D'emblée, les registres empiriques à la portée des élèves peuvent être différents de ceux dont disposaient les scientifiques. Une explication pourrait bien être locale, mais dans certains cas et à la différence du modèle buffonien (voir chapitre 2) le magma n'est pas le produit de la combustion des matières inflammables : il préexiste dans le volcan. Nos analyses ultérieures se préoccupent d'étudier les problématisations des élèves développées lors des débats scientifiques.

Explication locale magmatique	
<p>Catégorie 1 : Nous avons regroupé sous cette catégorie, les schémas qui représentent un volcan sans structure interne plus ou moins rempli de lave (couche de lave dans le volcan), ou de roches : origine superficielle de la lave en lien avec le volcan.</p>	
<p>Catégorie 2 : Cette catégorie rassemble les productions qui indiquent la présence d'un réservoir superficiel fermé situé dans le volcan avec un conduit permettant d'évacuer la lave : origine superficielle de la lave.</p>	
Explication « intermédiaire » magmatique	
<p>Catégorie 3 : Il s'agit de schémas qui indiquent un réservoir peu profond (sous le volcan), fermé (chambre magmatique) à l'origine du magma avec un conduit lui permettant de communiquer avec l'édifice volcanique : origine peu profonde du magma à réservoir fermé avec un début de référence à la Terre difficile à élucider.</p>	
<p>Catégorie 4 : Cette catégorie regroupe les schémas qui montrent un volcan rempli de lave mais dont l'origine est profonde (sous le volcan) : origine plus ou moins profonde du magma (réserves de magmas). La référence à la Terre reste difficile à clarifier.</p>	

Explication centrale magmatique	
<p>Catégorie 5 : Dans ces productions, le noyau apparaît à l'origine du magma. Les productions concernées sont avec ou sans conduits, avec ou sans réservoir magmatique : origine profonde du magma.</p>	
Explication « floue » du magmatisme	
<p>Catégorie 0 : Le cône volcanique est représenté sans détail de structure ce qui signifie que l'origine du magma reste floue, non identifiée ou difficile à identifier : origine floue du magma.</p>	

Figure 17. Catégories d'explications des élèves de 4^{ème} concernant le fonctionnement des volcans.

En classe de Terminale S

Pour catégoriser les explications « spontanées » des élèves de Terminale S sur le fonctionnement des zones de subduction et l'origine du volcanisme de ces zones, nous avons procédé à une analyse de contenu des productions schématiques individuelles et de groupe. Nous nous sommes intéressées aux explications qu'ils attribuent à l'origine du magma au niveau de cette zone. Nous avons identifié quatre catégories d'explications A, B, C et D (figure 18) dont la catégorisation repose sur les critères suivants :

- naissance du magma : magma préexiste ou se forme suite à une fusion ;
- conditions de fusion du magma : pression, température (augmentation/diminution) etc.
- endroit où préexiste le magma/se produit la fusion : manteau/noyau, fusion du manteau ou de la lithosphère océanique plongeante.

L'explication A avance que le magmatisme des zones de subduction a pour origine une réserve de magma située dans le manteau ou le noyau. Cependant, il reste difficile de savoir à ce stade si, pour les productions initiales, le magma préexiste dans la poche ou s'il y est fabriqué. Concernant les productions de groupe, les propos avancés pendant le débat scientifique nous permettront de trancher par rapport à cette question. L'explication B révèle une formation locale du magma qui provient d'une fusion (du manteau ou de la lithosphère océanique plongeante) provoquée par une augmentation de la température et de la pression due aux frottements entre les des deux plaques. Parfois, c'est la température seule qui est mise en cause. D'après l'explication C, le magma est issu de la fusion de la roche par une diminution de la pression qui constitue le paramètre déterminant dans la fusion des roches. Pour l'explication D, le magma provient de la fusion des roches qui se fait avec la remontée de l'intérieur de la Terre (ou du manteau). La dernière explication O concerne des productions que nous n'avons pas pu classer à cause du manque d'éléments expliquant l'origine du magmatisme des zones de subduction.

<p>Explication A : Le magma provient d'une réserve située dans le manteau ou le noyau. Il remonte par des fractures dues à la subduction.</p>	
<p>Explication B : Le magma provient d'une fusion (du manteau ou de la lithosphère océanique plongeante) par augmentation de température (et de la pression) qui peut être due aux frottements des deux plaques.</p>	

Surface « rugueuse ». Frottement = chaleur + fonte des roches = formation de magma

<p>Explication C : Le magma est issu de la fusion de la roche par une diminution de la pression.</p>	<p>Les séismes s'expliquent principalement par le mouvement des plaques qui entrent en collision, la pression entre les plaques s'accroissant jusqu'à ce que les roches cèdent créant un séisme. Le mouvement de la roche de la plaque chevauchante entraîne la fusion de roche par une baisse de la pression. Pour une température tx, selon que la pression soit faible → magma ou selon que la pression soit forte → roche solide</p>
<p>Explication D : Le magma provient de la fusion des roches qui se fait avec la remontée de l'intérieur de la Terre (ou du manteau).</p>	<p>Origine des volcans : Le magma proviendrait de la fusion des roches qui proviendrait de la dynamique interne de la terre. Ainsi, cela expliquerait que tous les volcans sont alignés. En effet, le magma va après remonter à la surface et y refroidir, ce qui va donner le volcan.</p>
<p>Explication 0 : Explications floues avec un fonctionnement difficile à déterminer/absence de réponse.</p>	

Figure 18. Catégories d'explications des élèves de Terminale S concernant le fonctionnement des zones de subduction.

3.2.2 Les écrits intermédiaires et finaux

Les écrits intermédiaires succèdent généralement à la phase de débat et de documentation scientifique et les écrits finaux clôturent la séquence d'enseignement-apprentissage. Les deux types d'écrits se présentent sous forme de textes, de tableaux et dans certains cas un schéma bilan final est construit.

Pour ces raisons, nous procédons à une analyse de contenu de ces productions. En référence à notre problématique, à nos objectifs et au cadre théorique de la problématisation plusieurs critères guident cette analyse. Ces critères se traduisent par les questions suivantes :

- les textes portent-ils des traces de la problématisation ? des arguments ? des raisons ? ;
- sont-ils propositionnels ? se contentent-ils d'exposer simplement les solutions ? ;
- dans les deux cas précédents, les éléments (raison, argument, solution) sont-ils contradictoires ou compatibles ?
- quelles sont les fonctions possibles de ces textes au sein de la séquence du point de vue de problématisation et de la construction des savoirs ? ;
- quels liens les textes entretiennent-ils les uns avec les autres et avec les écrits initiaux ?

De manière à caractériser les écrits, nous avons défini trois catégories :

Catégorie 1. Lorsque les textes mettent en avant une solution ou des solutions non contradictoires, nous les nommons **mono-textes propositionnels**. Dans le cas où plusieurs solutions contradictoires sont présentées, nous parlons de **pluri-textes propositionnels**.

Catégorie 2. Lorsque les textes donnent à voir un(e) (ou des) argument(s), nécessité(s), raison(s) non contradictoires, il sera question de **mono-textes argumentés ou raisonnés**. Si les arguments, nécessités ou raisons sont contradictoires, il s'agit de **pluri-textes argumentés ou raisonnés**.

Catégorie 3. Lorsque les textes mêlent une (ou des) solution(s) et une (ou des) raison(s) non contradictoires, nous les nommons **mono-textes problématisés**. Dans le cas où les solutions et les raisons sont contradictoires, nous parlons de **pluri-textes problématisés**.

Les écrits seront catégorisés suite à une analyse fine de leur contenu épistémologique en relation avec le problème traité. Leur fonction du point de vue de la problématisation sera déterminée et une comparaison des différents écrits sera effectuée.

Après cette étude de contenu des écrits produits lors des séquences, l'étape suivante consiste à examiner de près les pratiques de mise en texte enseignantes conduisant à ces textes.

3.3 Principes d'analyse des pratiques enseignantes de mise en texte

La description des séquences et l'analyse des écrits produits vont nous permettre, dans un premier temps, de modéliser les pratiques enseignantes en jeu dans la mise en texte du savoir dans le domaine du magmatisme. Cette modélisation vise à mieux comprendre le mode de fonctionnement de l'enseignante révélé à travers l'étude des écrits. Elle sera possible grâce à des outils empruntés à la théorie à des outils empruntés à la théorie anthropologique du didactique de Chevallard (1992, 1996, 1997, 1998). Toutefois, la description des techniques enseignantes de mise en texte ne suffit pas à elle seule car les savoirs ne peuvent se réduire aux seuls textes écrits. Il est donc nécessaire, dans un deuxième temps, d'étudier les activités « en situation » de mise en texte de l'enseignante en interaction avec les élèves ayant conduit à l'élaboration des écrits. Nous cherchons à étudier ce qui se joue dans l'activité du point de vue des savoirs, de la problématisation et des pratiques de mise en texte. Cette analyse se fera selon une perspective de problématisation (Fabre 1999 ; Orange, 2000) combinée à une perspective de didactique professionnelle (Pastré, Mayen & Vergnaud, 2006). En effet, « *l'analyse des apprentissages ne peut pas être séparée de l'analyse de l'activité des acteurs* » (ibid., p.145). Ce deuxième niveau d'analyse apportera des éléments qui confirment ou infirment les hypothèses sur les pratiques de mise en texte des enseignants déduites à partir de l'analyse des textes. De plus, il apportera des informations complémentaires sur l'organisation de l'activité de ces enseignants. Ces informations seront étayées par l'analyse des entretiens d'autoconfrontation menés avec les enseignants.

3.3.1 Modélisation praxéologique des pratiques enseignantes de mise en texte et apports de la théorie anthropologique du didactique

Nous nous intéressons particulièrement à la notion de praxéologie ou d'organisation praxéologique telle qu'elle est définie dans la théorie anthropologique du didactique de Chevallard (1996, 1998). Cette notion, introduite en didactique des mathématiques, s'intéresse à la façon dont un être humain, au sein d'une institution, résout une tâche donnée. Elle vise à analyser toute action humaine en termes de bloc pratico-technique (savoir-faire), et de bloc technologico-théorique (savoir). « *En toute institution, l'activité des personnes occupant une*

*position donnée se décline en différents types de tâches T, accomplis au moyen d'une certaine manière de faire, ou technique, t. Le couple [T/t] constitue, par définition, un savoir-faire. Mais un tel savoir-faire ne saurait vivre à l'état isolé : il appelle un environnement technologico-théorique [q/Q], ou savoir (au sens restreint), formé d'une technologie, q, « discours » rationnel (logos) censé justifier et rendre intelligible la technique (tekhnê), et à son tour justifié et éclairé par une théorie, Q, généralement évanouissante » (Chevallard, 1997, p.37). De plus, une théorie peut justifier un ensemble de technologies dont chacune à son tour justifie et rend intelligibles plusieurs techniques correspondant à autant de types de tâches (Chevallard, 1996). A partir de ces définitions, Bosch et Chevallard (1999) considèrent qu'une organisation praxéologique ou praxéologie est formée du complexe de techniques, de technologies et de théories qui permettent d'accomplir un type de tâches. Le schéma technique/technologie/théorie vaut pour toutes les activités humaines (Chevallard, 1996). Par ailleurs, « ce qui à un moment donné ou dans une institution donnée, apparaît comme la justification d'une certaine technique, peut aussi être considéré, ailleurs ou à un autre moment, comme une tâche en elle-même (la tâche consistant à justifier une technique), qui suppose la mise en œuvre d'une technique particulière et l'élaboration d'un environnement technologico-théorique adéquat » (Bosch & Chevallard, 1999, p.84). De plus, une technique « a toujours une **portée limitée**- elle ne réussit que sur **certaines des tâches t d'un type T donné** » Chevallard (1996, p.5). Ainsi, le couple technique/technologie/théorie doit toujours être référé au type de tâches que l'on prend en considération.*

Bosch et Chevallard (1999, p.92) notent également que « la mise en œuvre d'une technique se traduit par une manipulation d'ostensifs réglée par des non-ostensifs ». Les ostensifs représentent la partie « matérielle » de l'activité qui se donne à voir lors de la réalisation de la tâche comme les mots, discours, écritures, symboles, graphismes et gestes. Quant aux objets non ostensifs, ils constituent les concepts, les idées, les notions, etc. Les ostensifs constituent les ingrédients des tâches, techniques, technologies et théories.

Mais quel est le véritable intérêt de cette théorie pour notre recherche ? Elle nous aide à comprendre comment les textes ont été construits, à décrire la mise en texte et à modéliser les pratiques en jeu. Nous utilisons certains éléments de ce cadre théorique, en dehors de leur champ d'origine, comme principaux instruments pour analyser nos recueils de données. **La mise en texte relève d'un type de tâche enseignant dont l'accomplissement appelle des techniques particulières que notre étude se propose de décrire pour chacun des cas étudiés.** Les données dont nous disposons à partir des analyses des textes et de notre recueil de données

permettent de décrire l'environnement pratico-technique, c'est-à-dire le savoir-faire de mise en texte mis en place par les enseignants et d'avoir accès aux technologies faisant partie de l'environnement technologico-théorique. Le savoir-faire de mise en texte sera caractérisé puis comparé pour les situations ordinaires et forcées. Pour identifier les techniques de mise en texte enseignantes, il s'agit précisément de repérer les tâches de la classe, les ostensifs produits par ces tâches ou utilisés par d'autres tâches. Cela nous fera accéder aux technologies justifiant ces techniques.

Cependant, pour analyser les pratiques de mise en texte des savoirs, les outils empruntés de la théorie anthropologique du didactique de Chevallard (1996) ne suffisent pas à eux seuls et il est nécessaire de ne pas se limiter aux modélisations praxéologiques. C'est ainsi que nous passons à l'étude de l'activité en situation dans une perspective de problématisation et de didactique professionnelle.

3.3.2 Analyse de l'activité de mise en texte en situation dans une perspective de problématisation et de didactique professionnelle

L'étape suivant la modélisation praxéologique des pratiques de mise en texte consiste à étudier l'activité en situation. Nous repérons, pour chaque séquence, les phases de travail à analyser (débat scientifique, documentation scientifique, etc.) au vu de leur rôle dans la mise en texte et le passage d'un texte à l'autre. A ce stade, ce sont les discussions disponibles via les enregistrements et les transcriptions effectuées qui constituent les supports des analyses. Nous cherchons à travers cette étude à avoir des éléments de réponses aux questions suivantes :

- qui des élèves ou de l'enseignant construit les différents textes et comment ? ;
- quel lien existe-t-il entre l'activité en situation et les textes produits ? en quoi cette activité participe-t-elle dans la construction des textes ? ;
- retrouve-t-on des traces de la problématisation lors de la mise en texte orale ? et comment cette problématisation évolue-t-elle avec l'avancée de la séquence ?

Après avoir déterminé les phases d'échanges à exploiter, nous reprenons les séances dans leur ordre de déroulement afin de mieux de comprendre comment les textes ont été construits. Cette analyse se fait selon une perspective de problématisation combinée à une perspective de didactique professionnelle.

- Dans une optique de problématisation, nous nous centrons sur les savoirs discutés et construits lors des phases étudiées. Pour les débats scientifiques, **nous construisons les macrostructures** qui donnent à voir un résumé général de ces moments et de leur dynamique (Fabre & Orange, 1997 ; Fabre, 1999). La macrostructure d'un débat représente « *un espace qui n'est ni strictement chronologique, ni strictement logique, mais qui s'efforce de rendre compte du développement de l'argumentation* » (Fabre, 1999, p. 201). C'est une construction avec des propositions de type question/réponse qui permet de repérer les problèmes et les controverses abordées. Ceci nous fournira des repères pour étudier l'activité de problématisation. Puis, nous analysons les interactions entre l'enseignant et les élèves, les argumentations et les raisonnements mobilisés par les élèves en activité pour identifier d'éventuelles traces de construction des nécessités.

Le rôle de l'enseignant dans l'avancée des débats et dans la gestion du processus de problématisation en interaction avec les élèves le long des phases d'échanges sera abordé ainsi que les difficultés rencontrées. L'analyse des productions langagières des élèves et des enseignants permet de caractériser les savoirs construits dans la classe ainsi que leur mode de construction. Ceci nous permet de voir si la problématisation se fait et de suivre ses traces dans la séquence en relation avec les écrits produits.

- Dans une optique de didactique professionnelle, l'activité de l'enseignante en interaction avec les élèves sera étudiée à partir de l'analyse de son observation et de ce que cet acteur dit de son activité. « *La didactique professionnelle a pour but d'analyser le travail en vue de la formation des compétences professionnelles. [...]. Son hypothèse : l'activité humaine est organisée sous forme de schèmes, dont le noyau central est constitué de concepts pragmatiques* » (Pastré, Mayen & Vergnaud, 2006, p.145). Elle s'appuie ainsi sur la théorie de conceptualisation dans l'action d'inspiration piagétienne et développée par Vergnaud (1990, 1995). Par définition, un schème est une totalité dynamique fonctionnelle et une organisation invariante de l'activité pour une classe donnée de situations (Vergnaud, 1996). C'est la dimension conceptuelle présente au cœur de l'activité qui rend cette dernière analysable. Nous considérons, à la suite de la didactique professionnelle, que même si l'activité enseignante donne à voir une grande variabilité des pratiques, « *il y a néanmoins une part d'invariance dans cette activité* » et c'est ce qui est désigné par le terme « d'organisateur » (Pastré, 2007, p.82). Analyser l'activité de mise en texte des enseignants en interaction avec les élèves consiste à « *repérer des concepts pragmatiques qui sont de véritables organisateurs de l'action, en ce sens qu'ils permettent aux acteurs de faire un diagnostic de la situation dans laquelle ils se trouvent* » (Pastré, 2002, p.9). Dans cette

recherche, nous cherchons à mettre à jour les concepts pragmatiques mobilisés par les enseignants pour agir en situation de mise en texte. Rendre compte de ces concepts sera utile pour comprendre ce qui organise l'activité et le choix de mise en texte des enseignants.

Ces analyses seront étayées par l'étude de la transcription des entretiens d'autoconfrontation auxquels se sont livrées les enseignantes pour commenter et expliciter leurs pratiques lors des débats portant sur les modèles explicatifs des élèves. Les entretiens d'autoconfrontation seront catégorisés en fonction des thématiques abordées par l'enseignante. Les commentaires des enseignantes, leurs justifications, leurs explications sur le déroulement des situations de débat serviront pour identifier les concepts organisateurs de leur activité. En effet, les enseignants « *exposés à l'image de leur propre travail, mettent d'abord en mots, à l'usage du partenaire-spectateur, ce qu'ils pensent en être les constantes* » (Clot & Faïta, 2000, p.26). Ainsi, notre analyse s'appuie sur des données issues des analyses externes et des entretiens d'autoconfrontation.

4. Conclusion

La figure 19 ci-dessous résume la méthodologie que nous mettons en œuvre pour les trois études de cas de cette recherche. Elle présente brièvement la méthodologie de recueil et d'analyse des données.

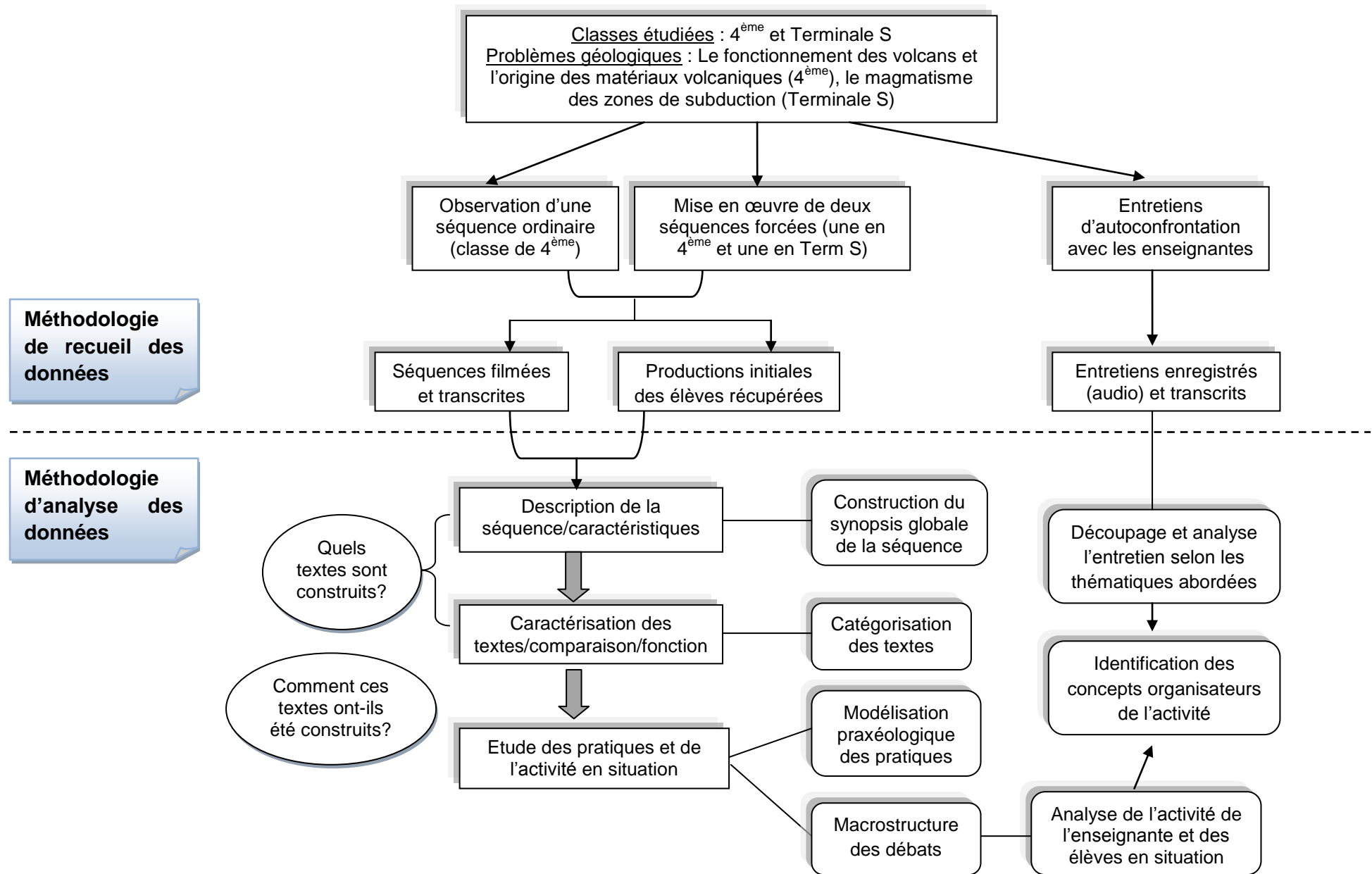


Figure 19. Méthodologie mise en œuvre pour étudier la mise en texte et les pratiques de savoirs en sciences de la Terre.

Chapitre 4. Etude de la mise en texte et des pratiques enseignantes en jeu lors d'une séquence ordinaire traitant le problème de l'origine des matériaux volcaniques en classe de 4^{ème}

Introduction

Ce chapitre concerne notre première étude de cas qui se rapporte à une séquence ordinaire en classe de 4^{ème} portant sur le problème de l'origine des matériaux volcaniques. Nous recherchons à décrire et analyser les textes de savoirs produits lors de cette séquence (objectif 1) et à identifier les pratiques de savoirs mis en œuvre par l'enseignant et aboutissant à ces textes (objectif 2) dans le but de préciser les difficultés et les conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé des savoirs magmatiques (objectif 4). L'analyse de la séquence se fait selon la méthodologie que nous avons préalablement décrite (chapitre 3). Nous décrivons la séquence et prenons les textes de savoirs scientifiques construits comme point de départ des analyses. Ces écrits seront décrits, caractérisés, comparés et leur fonction déterminée. Par la suite, nous reprenons les séances dans leur ordre de déroulement, tout en s'intéressant aux moments de travail afin de mieux de comprendre comment les textes ont été construits. L'analyse des productions langagières des élèves et de l'enseignante permet de caractériser les savoirs construits dans la classe ainsi que leur mode de construction. Finalement, nous nous appuyons sur un entretien d'autoconfrontation auquel s'est livrée l'enseignante pour commenter et expliciter sa pratique lors d'un débat scientifique portant sur les modèles explicatifs des élèves.

1. Analyse globale du scénario didactique de la séquence

1.1 Contexte général de la séquence ordinaire de classe étudiée

La séquence ordinaire de classe que nous étudions porte sur le problème de l'origine des matériaux volcaniques. Les données ont été recueillies en octobre 2009 au collège Albert Camus au Mans en situation ordinaire sans intervention de notre part. La séquence, constituée de quatre séances, se déroule dans une classe de 4^{ème} de vingt élèves âgés de 12 à 14 ans et s'intègre dans la partie du programme consacrée à l'étude de l'« *activité interne du globe* » (M.E.N., 2008b, p.47). Cette activité se traduit généralement par des phénomènes dynamiques tels que les séismes et le volcanisme. Le corpus d'étude porte sur le problème de l'origine de l'activité volcanique sachant que les élèves avaient déjà étudiés les manifestations de l'activité sismique et son origine. Nous disposons des enregistrements vidéo et audio de l'ensemble des séances (1-4), de

leur transcription, du recueil des productions écrites individuelles et de groupe élaborées par les élèves tout au long de la séquence. Rappelons que les phénomènes magmatiques, si l'on s'appuie sur les recommandations du programme officiel, sont envisagés sans lien avec la dynamique du globe et la tectonique des plaques. Celle-ci est traitée ultérieurement selon la progression de cette partie du programme de 4^{ème} consacrée à l'« activité interne du globe ».

L'enseignante 1 de cette classe est expérimentée. De plus, elle participe, depuis quelques années, aux recherches didactiques d'un groupe de travail au sein du laboratoire CREN⁶⁷ qui s'intéresse à la problématisation, la construction des savoirs problématisés en sciences et les conditions de cette construction. De ce fait, elle connaît le cadre théorique de l'apprentissage par problématisation qui met en avant les problèmes explicatifs et cherche à ce que les élèves construisent les raisons qui sous-tendent les solutions de ces problèmes. De plus, elle a été vivement impliquée dans une recherche, menée en collaboration avec l'INRP⁶⁸, abordant la question des mises en texte et des pratiques de savoirs en jeu dans les disciplines scientifiques. Elle participe également aux ateliers didactiques des sciences de la vie et de la Terre (SVT) organisés à l'IUFM des pays de la Loire⁶⁹. Du fait de son statut, il nous apparaît intéressant d'étudier les pratiques qu'elle mobilise dans la construction des savoirs géologiques au sein de sa classe et la place de la problématisation qu'elle y accorde.

1.2 Description et organisation détaillée du corpus d'étude

La séquence ordinaire de notre recherche est organisée en quatre séances que nous décrivons ci-dessous en précisant les écrits produits :

Séance 1 et 2

Après l'introduction de la séance par l'enseignante, les élèves répondent individuellement à la question suivante : « *Propose un dessin très simple d'un volcan en coupe où tu places le lieu d'où viennent les matériaux, avec des hauteurs possibles, avec l'emplacement du sol par rapport à ces matériaux etc. A légènder* ». Puis, par groupes de trois ou cinq, choisis en fonction de leur emplacement dans la classe, ils confrontent leurs écrits individuels pour proposer un modèle commun sur un transparent sous forme de schéma légènder : « *En groupe, après avoir discuté en comparant les propriétés de chacun, proposez un modèle commun au groupe* ». Ce travail est

⁶⁷ Centre de Recherche en Education de Nantes.

⁶⁸ Institut National de Recherche Pédagogique appelée récemment Institut Français de l'Education (IFÉ).

⁶⁹ Les ateliers didactiques sont dirigés par Denise Orange Ravachol et Christian Orange.

suivi d'un débat⁷⁰ portant sur les modèles élaborés par les groupes. Les modèles sont présentés en rétroprojection, par un seul membre du groupe, afin que la classe puisse les visualiser correctement. Le débat aboutit à l'identification de trois propositions concernant l'origine des matériaux volcaniques et conduit à la production d'un premier écrit « intermédiaire »⁷¹ E1 (figure 20) si nous reprenons les termes de Chabanne et Bucheton (2002):

- Propositions pour l'origine des matériaux :

 - la lave vient du noyau de la terre
 - la lave est dans une poche en profondeur sous le volcan
 - la lave est dans le volcan qui est fermé à la base.

Figure 20. Résultat du débat scientifique (E1).

Séance 3

Après avoir rappelé les trois propositions déjà identifiées lors de la séance précédente, le groupe classe exploite collectivement un document scientifique (annexe 2) ce qui conduit à la validation de la deuxième proposition : « *La lave est dans une poche en profondeur sous le volcan* ». Les deux autres propositions sont invalidées oralement. Cette séance se termine par l'élaboration d'un deuxième écrit intermédiaire E2 (figure 21) et d'un écrit bilan final E3 (figure 22) :

- Résultat : documentation scientifique.

On observe des séismes alignés sous le volcan mais en deux groupes séparés par une zone sans séismes. Cette zone est une zone liquide (où il n'y a pas de ruptures, donc pas de foyers sismiques). Elle correspond, probablement, à un réservoir de magma.

Peut-il être alimenté par le noyau de la terre ?

Plus on descend en profondeur dans la terre, plus la température augmente, ce qui pourrait permettre de rendre liquide la roche, mais en même temps, la pression augmente, et rend le noyau complètement solide.

Figure 21. Résultat de la confrontation avec la documentation scientifique (E2).

⁷⁰ Nous appelons « débat » cette phase mais il faudrait déterminer, lors de nos analyses suivantes, s'il s'agit d'un véritable débat scientifique au sens de Fabre & Orange (1997).

⁷¹ Les écrits intermédiaires « *restent étroitement associés à des situations d'élaboration transitoires, soit de travail personnel, soit de travail collectif* » (Chabanne & Bucheton, 2002, p.26). Nous symbolisons ces écrits par les encadrés à traits pointillés tandis que les écrits finaux sont symbolisés par des traits pleins.

Bilan :

2- Origine de ces manifestations

Activité 2 : D'où viennent les matériaux ?

- La lave provient d'un magma contenu dans un réservoir (qui peut être situé jusqu'à 70km de profondeur)
- Le magma est de la roche fondue contenant des gaz, et des morceaux de roches solides. La lave ne contient plus les gaz.

Figure 22. Écrit bilan final sur l'origine des manifestations de l'activité volcanique (E3).

Séance 4

Un schéma bilan final E4 (figure 23)⁷² représentant une coupe simplifiée d'un volcan actif est construit au tableau et recopié par les élèves. La construction de ce schéma est accompagnée d'une réflexion collective sur le moteur qui emmène les matériaux à la surface. Le texte concernant la remontée des matériaux est noté sous le schéma bilan.

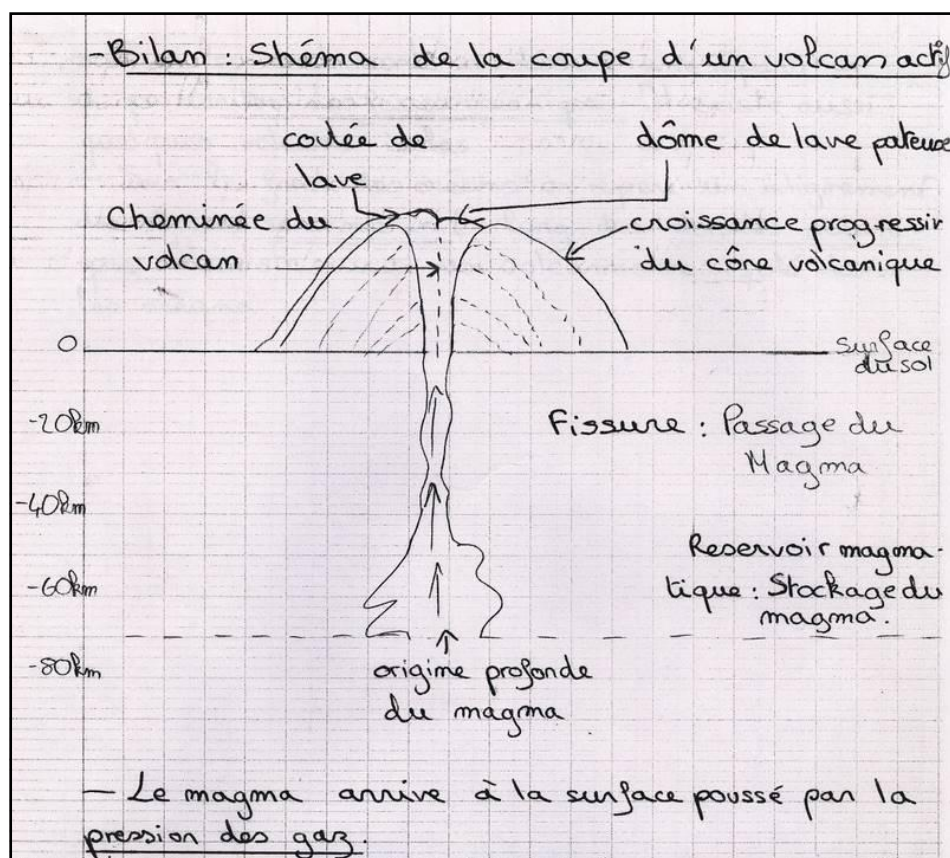


Figure 23. Schéma bilan final de la coupe d'un volcan actif⁷³ (E4).

⁷² Ce document est repris d'un cahier d'élève.

⁷³ La « croissance progressive du cône volcanique » figurant sur le schéma bilan a fait l'objet d'une mise en texte séparée de celle de l'origine des matériaux volcaniques que nous n'aborderons pas dans cette étude.

Suite à cette description du déroulement de la séquence ordinaire et de chacune de ses séances, nous en effectuons une analyse globale en repérant ses caractéristiques générales.

1.3 Caractéristiques générales de la séquence d'enseignement-apprentissage

Afin de déterminer les principales caractéristiques de cette séquence et d'en réaliser une analyse globale, nous avons construit un synopsis (tableau 7) qui donne à voir des dimensions aménagées en correspondance avec nos questions de recherche. Son analyse fait nettement apparaître une variété dans les écrits portant à la fois sur leur mode de production (individuel, groupe, classe) et sur leur forme (texte, schéma). Les écrits initiaux (explications individuelles et de groupe) autorisent l'expression des idées explicatives des élèves. Nous pouvons les considérer comme étant des « écrits d'investigation » qui mobilisent – à la différence des écrits expositifs – la pensée des élèves et les aident à problématiser. Le rôle précis des écrits intermédiaires et finaux (E1, E2, E3, et E4) sera élucidé dans la partie suivante. A ces différents écrits sont associées des productions langagières orales (discussions, débat). Les fonctions de ces activités langagières qui jalonnent la séquence étudiée sont primordiales. En effet, « [...] *les écrits servent à décrire, à expliquer, à prévoir ; les échanges oraux permettent la critique, mais aussi la négociation, l'ajustement du travail en commun* » (Orange, 2009, p.245).

Quant à l'organisation de la classe, elle passe de l'individuel au collectif avec l'avancée de la séquence. De plus, les textes sont réalisés au début par les élèves individuellement puis en groupe tandis que les quatre écrits suivants (E1, E2, E3, E4) sont l'œuvre de l'enseignante. Ainsi, nous remarquons d'emblée une présence importante de l'enseignante dans la construction des écrits de la séquence.

A première vue, la procédure suivie exprime une volonté de l'enseignante de s'inscrire dans une démarche de problématisation. La mise en œuvre d'un débat scientifique basé sur l'expression des explications initiales des élèves et de leurs idées puis la confrontation avec la documentation scientifique laissent penser que cette séquence a été conçue dans le but que les élèves accèdent à des savoirs problématisés. Ceci s'explique par la réflexion théorique que mène l'enseignante en question avec le groupe de recherche du laboratoire CREN. Ce dernier se penche sur le processus de problématisation et sur l'importance des pratiques langagières dans les apprentissages. Bien évidemment, l'expression de cette volonté ne conditionne pas forcément l'implication des élèves dans la construction des savoirs problématisés. C'est ainsi que nous nous

proposons d'analyser cette construction en commençant par les écrits produits lors de la séquence et en remontant par la suite aux pratiques ayant permis leur mise en place.

Etapes de la séquence	Organisation de la classe	Tâches de la classe	Productions langagières	Forme des écrits produits	Nature des écrits	Auteur des écrits
Première et deuxième séance	Individuelle	Produire un dessin simple d'un volcan en coupe où sera placé le lieu d'où viennent les matériaux volcaniques	Ecrits individuels - Productions explicatives	Schéma légendé	Ecrits initiaux	Elève
	En groupe	Produire une explication commune en groupe et un écrit de groupe	Echanges oraux, discussions de groupe Ecrits de groupe – Productions explicatives	Schéma légendé		Groupe d'élèves
	Collective	Débattre sur les productions de groupe	Echanges oraux, débat collectif Ecrit 1 : Résultat du débat scientifique	Texte	Ecrits intermédiaires	Ecrits de l'enseignante synthétisant les échanges oraux
Troisième séance	Collective	Exploiter collectivement de la documentation scientifique	Echanges oraux, discussion collective	-		
		Produire un écrit suite à l'exploitation de la documentation Produire un écrit bilan final	Ecrit 2 : Résultat de la confrontation avec la documentation scientifique Ecrit 3 : Écrit bilan final sur l'origine des manifestations de l'activité volcanique	Texte Texte		
Quatrième séance	Collective	Discuter collectivement le mécanisme de remontée des matériaux Produire un schéma bilan final	Echanges oraux collectifs Ecrit 4 : Schéma bilan final de la coupe d'un volcan actif	Schéma légendé accompagné d'un texte	Ecrits finaux	

Tableau 7. Synopsis de l'organisation de la séquence ordinaire de 4^{ème} et des activités langagières mises en œuvre.

2. Caractérisation des différents écrits produits lors de la séquence

Nos questions et nos objectifs de recherche nous emmènent à porter notre attention sur les différents écrits élaborés pendant la séquence. Ainsi, après avoir identifié leur forme, leur nature et leur place dans la situation étudiée (tableau 8), il s'agit d'analyser leur contenu en nous focalisant sur ce qu'ils évoquent à propos de l'origine des matériaux volcaniques et le fonctionnement des volcans. Chacun de ces écrits sera catégorisé selon la méthode préalablement précisée (chapitre 3). La figure 24 ci-dessous met en avant les écrits produits pendant la séquence que nous reprenons en détail. Les écrits initiaux ainsi que les E1, E2, E3, E4 se rapportent à l'origine des matériaux volcaniques.

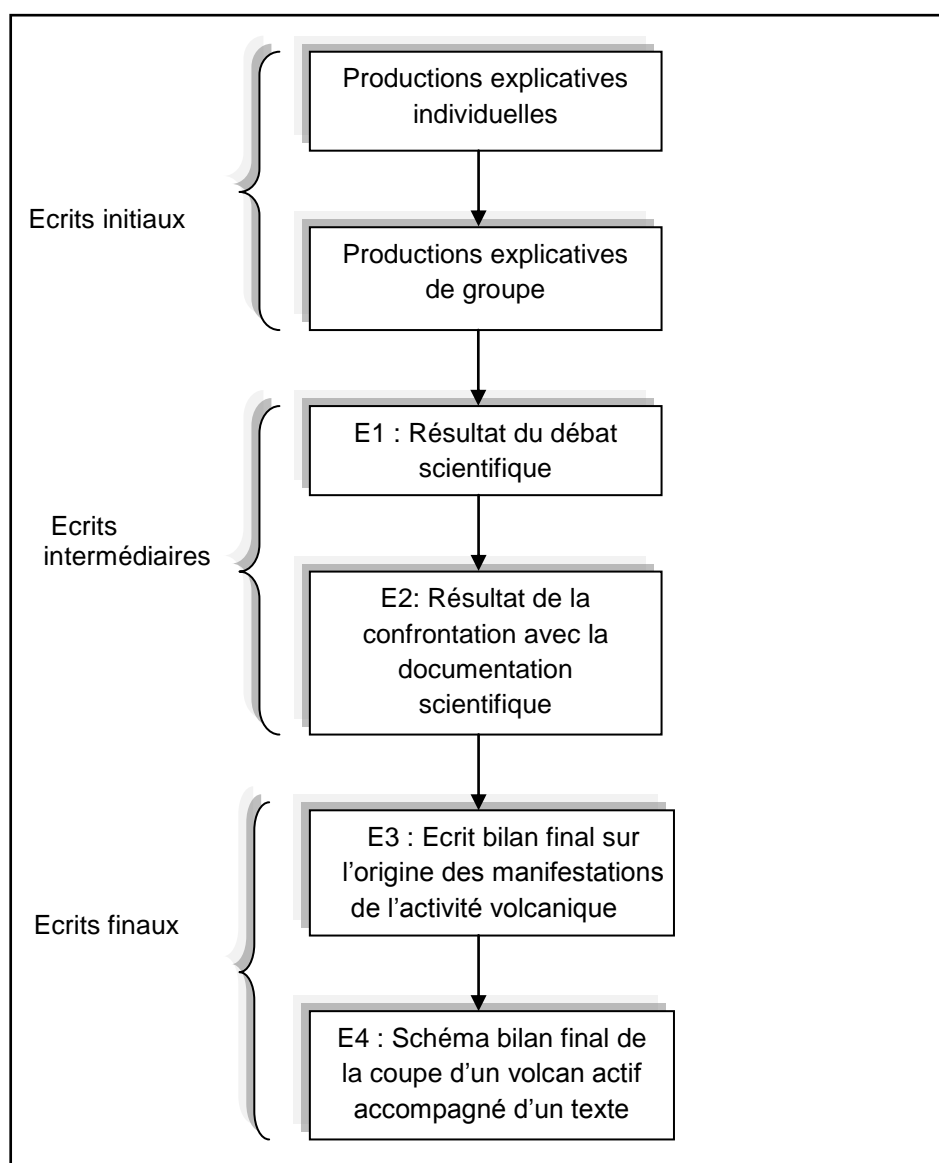


Figure 24. Les écrits produits lors de la séquence ordinaire de 4^{ème}.

2.1 Les écrits initiaux individuels et de groupe

Les productions explicatives initiales constituées d'un schéma légendé et réalisées individuellement (annexe 1) puis en groupe (figure 25, p. 138) par les élèves de la classe de 4^{ème}, révèlent comment ceux-ci expliquent spontanément l'origine des matériaux volcaniques. Nous avons réparti ces écrits selon six catégories d'explications (tableau 8) définies suite au dépouillement des productions individuelles et de groupe. Rappelons que la définition de ces catégories repose sur les critères suivants :

- origine de la lave : origine profonde ou superficielle ;
- présence ou absence de conduit permettant d'évacuer la lave ;
- réservoir magmatique : présent, absent, fermé, ouvert.

	Productions individuelles (PI)	Productions de groupe (PG)
Explication locale magmatique		
Catégorie 1 : Volcan sans structure interne plus ou moins rempli de lave ou de roches : origine superficielle de la lave en lien avec le volcan.	7	1
Catégorie 2 : Présence d'un réservoir superficiel fermé situé dans le volcan avec un conduit permettant d'évacuer la lave : origine superficielle de la lave.	1	1
Explication « intermédiaire » magmatique		
Catégorie 3 : Réservoir sous le volcan, fermé à l'origine du magma avec un conduit lui permettant de communiquer avec l'édifice volcanique : origine peu profonde du magma à réservoir fermé avec un début de référence à la Terre.	6	1
Catégorie 4 : Volcan rempli de lave mais dont l'origine est profonde (sous le volcan) : origine plus ou moins profonde du magma avec une référence à la Terre difficile à clarifier.	2	-
Explication centrale magmatique		
Catégorie 5 : Le noyau apparaît comme à l'origine du magma. Les productions concernées sont avec ou sans conduits, avec ou sans réservoir : origine profonde du magma.	1	1
Explication « floue » du magmatisme		
Catégorie 0 : Le cône volcanique est représenté sans détail de structure ce qui signifie que l'origine du magma reste floue, non identifiée ou difficile à identifier : origine floue du magma.	3	1
Total	20	5

Tableau 8. Origine des matériaux volcaniques dans les productions individuelles et de groupe des élèves de 4^{ème} (séquence ordinaire).

Les modèles spontanés des élèves sur l'origine des matériaux volcaniques traduisent une certaine hétérogénéité d'un point de vue fonctionnel et révèlent plusieurs types d'explications :

- Certains systèmes situent l'origine de ces matériaux au niveau d'un environnement local, se limitant au volcan lui-même (8 productions individuelles (PI) sur 20 et 2 productions de groupe (PG) sur 5). L'origine de la lave est superficielle : soit elle remplit le volcan (7 PI sur 20 et 1 PG sur 5), soit elle est contenue dans un réservoir fermé situé dans le volcan (1 PI sur 20 et 1 PG sur 5). Ainsi, le volcanisme est expliqué sans avoir besoin de le situer dans un environnement large en référence à la planète Terre. C'est une forme d'explication simple. Toutefois, il reste difficile de savoir à ce stade si, pour les élèves, cette lave préexiste dans le volcan ou si elle y est fabriquée tel que l'avance le modèle local historique de Buffon (chapitre 2). De plus, les propos avancés pendant le débat scientifique sur les affiches de groupe concernées ne nous ont pas tellement aidés pour accéder à cette information.
- Plusieurs productions dévoilent un réservoir situé dans le « sous-sol », sous terre (6 PI sur 20 et 1 PG sur 5) ou un magma qui remplit ce sous-sol (2 PI sur 20). Ces écrits indiquent un début de référence à la Terre. Pour ceux réalisés individuellement, il s'avère compliqué d'évaluer le degré de cette référence à la Terre. Quant à la production du groupe 2, les élèves indiquent que la poche n'est pas très en profondeur.
- D'autres voient le volcanisme comme un phénomène se produisant dans un environnement large relié aux caractéristiques de la Terre qui renfermerait à l'intérieur – spécifiquement dans le noyau – le magma sous forme liquide (1 PI sur 20 et 1 PG sur 5). L'explication du groupe concerné indique que le noyau représente un endroit où se trouve la lave : « 2. *Amandine. Hum on a représenté donc le volcan et puis ben dans la Terre y a un noyau où y a des phénomènes comme euh la lave etc. (rire) et euh ben c'est là où euh, où la lave elle vient, elle vient au volcan* ».

Ces analyses montrent que les explications des élèves sur le fonctionnement des volcans sont hétérogènes. Certaines productions révèlent un fonctionnement local limité à l'environnement du volcan, d'autres se rapportent à une explication centrale reliant le volcanisme à l'activité du globe terrestre. Toutefois, il nous a été difficile d'évaluer pour quelques productions le degré de référence à la Terre. Par ailleurs, nous notons l'absence de référence aux plaques tectoniques et à une production de magma reliée à des endroits précis de la planète comme le suggère l'explication actuelle globale du magmatisme.

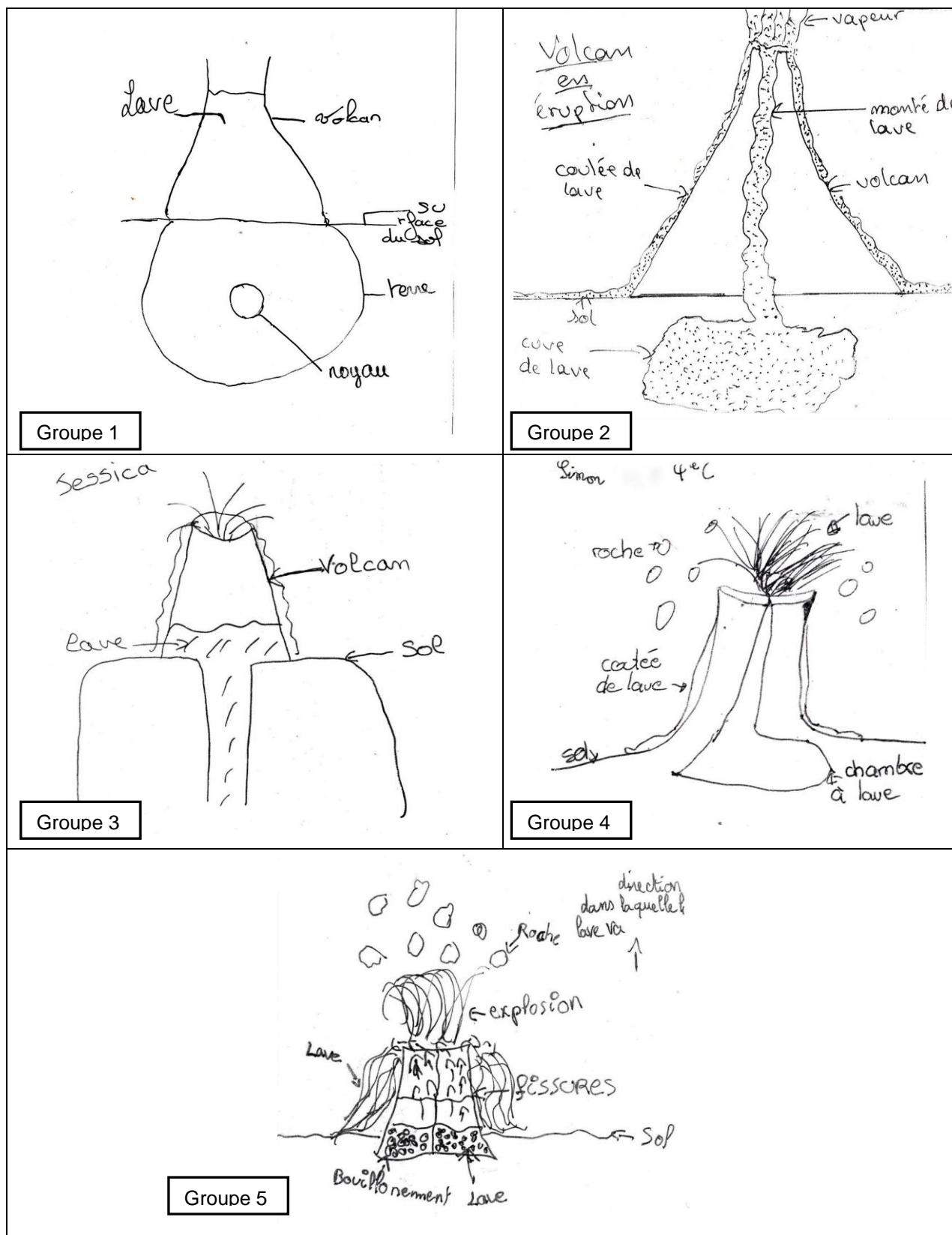


Figure 25. Les productions de groupe élaborées par les élèves de 4^{ème} concernant l'origine des matériaux volcaniques selon leur ordre de passage dans le débat (séquence ordinaire).

2.2 Les écrits intermédiaires E1 et E2

Les écrits initiaux individuels et de groupe ont été suivis de la production des deux écrits intermédiaires E1 et E2. Le premier clôture le débat et le deuxième la phase d'exploitation de la documentation scientifique. Nous examinons de plus près le contenu et les caractéristiques de ces deux textes afin de savoir s'ils portent les traces de la problématisation ou s'ils se contentent d'exposer uniquement les solutions sous une forme propositionnelle. Leur fonction sera déterminée et les liens qu'ils entretiennent les uns avec les autres et avec les écrits initiaux seront élucidés.

▪ **Ecrit 1**

Le débat collectif portant sur les productions explicatives de groupe des élèves conduit à la production de l'écrit intermédiaire E1 (figure 20, p.130). Celui-ci représente **une liste de trois propositions différentes qui explicite les solutions possibles** au problème de l'origine des matériaux volcaniques : la lave⁷⁴ existe soit au niveau du noyau, soit au niveau d'une poche pas très profonde ou alors dans le volcan lui-même. Ce texte résume les principales solutions proposées par les élèves au problème traité. Celles-ci mettent en avant une lave, toute prête, qui préexiste déjà dans les endroits mentionnés – dans le noyau, dans une poche non profonde située sous le volcan ou dans le volcan – à l'état liquide. La question de son mode de formation n'est pas posée alors que les géologues actuels se penchent plutôt sur le problème de la formation du magma à certains endroits et pas à d'autres en lien avec certains phénomènes tectoniques (Orange, 1995 ; Orange Ravachol, 2003). La focalisation se centre sur le lieu d'existence de la lave. De plus, nous retrouvons, dans cet écrit, les idées du tableau précédent (tableau 8, p.136) qui analyse les explications spontanées figurant dans les productions individuelles et de groupe.

Ce texte met en avant les principales explications apportées par les élèves au problème traité. Il a pour **fonction d'identifier et de synthétiser les différentes solutions proposées**. De plus, la problématique du magmatisme se limite à celle du lieu de préexistence du magma. Au regard de notre cadre théorique didactique de la problématisation, cet écrit propose plusieurs possibles et contribue donc à leur exploration. Toutefois il se focalise uniquement sur les solutions et n'explicite en aucun cas les raisons qui fondent celles-ci. Quelles sont les raisons qui font que ces modèles peuvent ou non fonctionner ? Comment expliquer la formation (ou la préexistence)

⁷⁴ Nous gardons le terme de « lave » utilisé dans l'écrit intermédiaire (E1) alors qu'à ce stade on parle plutôt de « magma ».

de la lave au niveau du noyau, de la poche et du volcan ? Pourquoi cette lave se forme-t-elle (ou préexiste-t-elle) à ces endroits et pas ailleurs ? Qu'est-ce qui rend possible et nécessaire sa formation au niveau des zones citées ? Des questions qui font éloigner ce texte des caractéristiques fondamentales d'un texte problématisé. Cependant, il serait intéressant de voir si ces raisons ont été évoquées pendant la mise en texte orale et le débat de classe. Nous nous penchons sur cette question dans la suite de nos analyses (paragraphe 4.1 de ce chapitre). Le débat a permis de passer des idées de groupe à un écrit qui les résume. L'écrit E1 reflète des points de vue différents et divergents en présentant plusieurs thèses pour l'explication de l'origine des matériaux volcaniques. Il s'agit donc d'un **pluri-texte propositionnel** puisqu'il explicite trois solutions différentes au problème posé sans évoquer les raisons sous-jacentes.

Après avoir repéré et identifié les propositions des élèves au problème posé, il s'agit de les confronter avec de la documentation scientifique ce qui a permis d'élaborer l'écrit E2.

▪ **Ecrit 2**

L'exploitation collective d'un document scientifique montrant l'enregistrement de l'activité sismique sous un volcan (annexe 2), conduit à un deuxième écrit intermédiaire E2 (figure 21, p.130) qui présente plusieurs niveaux :

- D'abord, il s'agit de décrire le document en se basant sur un constat empirique : « *On observe des séismes alignés sous le volcan mais en deux groupes séparés par une zone sans séismes* ». Puis d'emmener une explication argumentée à l'état liquide de la zone sans séismes observée sous le volcan : « *Cette zone est une zone liquide (où il n'y a pas de ruptures, donc pas de foyers sismiques). Elle correspond, probablement, à un réservoir de magma* ». Ainsi, l'absence de foyers sismiques au niveau d'une zone particulière sous le volcan, suggère la présence d'une zone fluide qui correspond à un réservoir de magma. Ceci apporte des argumentations en faveur de la deuxième proposition de l'écrit E1 qui signale que la lave provient d'une poche non profonde. Cette proposition a été validée parce que les données sismiques révèlent l'existence d'un réservoir magmatique sous le volcan.

- La seconde partie de l'écrit E2 argumente l'impossibilité d'une origine de la lave située au centre de la Terre puisque celui-ci est solide contrairement à ce que les élèves ont pu penser. « *Peut-il être alimenté par le noyau de la terre ? Plus on descend en profondeur dans la terre, plus la température augmente, ce qui pourrait permettre de rendre liquide la roche, mais en même temps, la pression augmente, et rend le noyau complètement solide* ». En effet,

l'augmentation de la pression et de la température avec la profondeur rend le noyau intégralement solide. Donc, il est impossible que la lave puisse avoir pour origine le noyau terrestre parce que celui-ci n'est pas liquide. Ces arguments sont avancés contre la première thèse de l'écrit E1 qui présuppose que les matériaux volcaniques remontent du noyau de la Terre.

Par ailleurs, ce texte appelle plusieurs remarques qu'il nous semble important d'évoquer :

- Les argumentations concernent deux propositions du texte précédent E1 oubliant la troisième qui propose que la lave existe dans le volcan fermé à la base. Nous verrons par la suite, dans le paragraphe 4.1, que les arguments réfutant cette thèse, ont été évoqués par les élèves à deux reprises mais n'ont pas été repris par l'écrit intermédiaire E2.
- L'augmentation de la pression et de la température avec la profondeur avancée pour argumenter la solidité du noyau s'applique aussi pour le manteau terrestre. Les élèves ne risquent-ils pas de penser que la solidité concerne uniquement le noyau, oubliant le manteau terrestre qui est également solide ?

La principale fonction de l'écrit E2 est de **valider et d'invalider deux propositions repérées précédemment dans l'écrit E1**. Il permet de **trier les solutions** déjà relevées et **d'apporter des argumentations qui favorisent ou défavorisent l'une ou l'autre**. Les informations tirées du document scientifique ont servi pour la validation de la deuxième proposition : « *la lave est dans une poche en profondeur sous le volcan* ». Mais cette proposition ne répond à aucune nécessité. Elle est vraie tout simplement parce que les données sismiques révèlent l'existence d'un réservoir magmatique à une certaine profondeur sous le volcan. L'écrit E2 est un **mono-texte argumentatif** car il présente plusieurs argumentations non contradictoires participant au tri des solutions.

L'écrit intermédiaire E2 a été suivi de deux écrits finaux (E3, E4). Nous les analysons dans le paragraphe suivant.

2.3 Les écrits finaux E3 et E4

L'écrit E3 représente un texte et l'écrit E4 un schéma bilan accompagné d'un texte. Quelles sont les caractéristiques de ces deux écrits ?

▪ **Ecrit 3**

L'écrit bilan final E3 (figure 22, p.131) succède directement à l'écrit E2 et comprend deux parties :

- La première expose la bonne solution, la bonne explication du problème de l'origine des matériaux volcaniques : « La lave provient d'un magma contenu dans un réservoir (qui peut être situé jusqu'à 70km de profondeur) ».
- La seconde précise la différence entre le magma et la lave. « Le magma est de la roche fondue contenant des gaz, et des morceaux de roches solides. La lave ne contient plus les gaz ».

Pour expliquer l'origine des matériaux volcaniques, ce texte final se focalise sur une lave provenant d'un magma contenu dans un réservoir situé jusqu'à -70Km de profondeur et explicite la différence entre le magma et la lave. Ce bilan final convoque quelques remarques :

- La solution présentée et qui consiste à dire que « *la lave provient d'un magma contenu dans un réservoir* » est ambiguë. Elle pourrait laisser penser que le magma se trouve déjà, préexiste dans le réservoir et ne demande qu'à sortir pour arriver à la surface au niveau du volcan ce qui ne serait pas en accord avec les explications actuelles. Ainsi, on pourrait croire que c'est le réservoir qui est à l'origine du magma et qu'il est fermé à la base alors qu'il ne sert que pour son stockage. Cette fonction de stockage du réservoir figure dans le schéma bilan E4 suivant où le réservoir magmatique est ouvert et où une « origine profonde » du magma est signalée. Rien n'est évoqué, dans cet écrit E3, sur le mode de formation de ce magma ni sur l'endroit de sa formation. Comment et où se forme-t-il ? Est-ce au niveau du manteau ? Du noyau ? Sous quelles conditions se forme-t-il ? On se contente de le localiser dans un réservoir situé à -70km de profondeur. Ainsi, la focalisation sur un « magma préexistant » fait que les problèmes de la production et du renouvellement ne se posent pas au contraire de celui de son lieu d'existence. Le magma est présent dans le réservoir et il suffit d'avoir un conduit pour qu'il puisse sortir et jaillir à la surface. Ceci s'accorde avec les objectifs signalés dans le bulletin officiel que nous rappelons : « *Les magmas sont contenus dans des réservoirs magmatiques localisés à plusieurs kilomètres de profondeur* » (M.E.N., 2008b, p.48).
- Le texte signale une différence entre la lave et le magma. Le magma étant de la roche fondue contenant des gaz et des morceaux de roches solides tandis que la lave ne contient plus les gaz. Ceci sous-entend que le magma s'est formé suite à la fusion de la roche solide située en

profondeur sachant qu'il n'a jamais été question de fusion dans l'explication proposée pour l'origine de la lave.

- Cette solution « vraie » se rapproche d'une explication figurant dans les productions initiales de groupe des élèves et dans l'écrit E1 succédant au débat scientifique : « *la lave est dans une poche en profondeur sous le volcan* ».

- Du point de vue de la problématisation, cadre théorique dans lequel s'inscrit notre recherche, ce texte ne fait que présenter la solution retenue au problème géologique de l'origine des matériaux volcaniques. Les raisons qui fondent ces solutions ne sont pas explicitées. De plus, la solution proposée relève plusieurs ambiguïtés par rapport aux explications scientifiques actuelles que nous avons pointées. Ainsi, ce texte donne à voir des caractéristiques qui l'éloignent d'un texte problématisé pour le rapprocher plutôt d'un texte propositionnel. Si nous le comparons avec le texte intermédiaire précédent E2, nous constatons que ce dernier porte des argumentations permettant de valider la solution finale et d'invalider les autres mais qui ont disparu avec l'écrit final E3.

Par rapport au problème de l'origine des matériaux volcaniques, c'est un **mono-texte propositionnel** qui présente la solution finale au problème tout en rajoutant des précisions concernant la différence entre le magma et la lave.

▪ **Ecrit 4**

L'écrit E4 (figure 23, p.131) correspond à un schéma bilan final légendé de la coupe d'un volcan actif, accompagné d'un texte. Ce schéma explicatif mentionne le stockage du magma, à origine profonde, au niveau d'un réservoir magmatique situé à -70km de profondeur et révèle l'existence d'une fissure permettant le passage du magma de ce réservoir vers la surface terrestre. De plus, il précise que l'arrivée du magma à la surface se fait sous la pression des gaz. Les remarques soulevées par rapport à cet écrit sont les suivantes :

- Le schéma bilan révèle une « origine profonde du magma » stocké dans le réservoir à -70km de profondeur ce qui n'apparaissait pas dans l'écrit E3 précédent où le magma provient de ce réservoir. Toutefois, rien n'est précisé sur cette profondeur : est-ce une origine très profonde ou peu profonde, est-ce au niveau du manteau, du noyau ? En effet, le magma se forme « quelque part » ou plutôt il existe sous forme liquide quelque part en profondeur et remonte pour s'accumuler dans un réservoir magmatique qui alimente des éruptions volcaniques. De plus, par rapport à l'écrit E3, ce schéma bilan rajoute la fonction de stockage du réservoir magmatique.

- Le problème de la formation du magma n'est pas posé ici non plus. Celui-ci est stocké dans le réservoir et ne demande qu'à remonter. Par ailleurs, les recherches qui se sont intéressées aux conceptions des élèves en rapport avec le volcanisme (Orange, 1995 ; Goix, 1995) indiquent que les élèves de la classe de 4^{ème} ont souvent tendance à penser que le magma existe sous forme liquide et qu'il provient des profondeurs terrestres. Le schéma bilan produit risque d'appuyer ces idées même si l'écrit intermédiaire E2 avance des argumentations qui soutiennent l'impossibilité d'un magma provenant du noyau car celui-ci est solide.
- Le texte accompagnant le schéma indique que le magma arrive à la surface poussé par la pression des gaz. Cependant, rien ne rend cette remontée nécessaire pour le fonctionnement du volcan.
- Le schéma montre un volcan à fonctionnement relié à celui de la Terre mais indépendant de la tectonique des plaques, paradigme actuel dans lequel s'inscrit le magmatisme. Or le magmatisme, d'après la tectonique des plaques, est intimement lié aux mouvements des plaques car c'est en général, à la frontière entre deux plaques que les conditions sont réunies pour la formation du magma (à l'exception du cas du volcanisme des points chauds). Ces remarques sont à mettre en relation avec le programme officiel qui rappelle, indique des objectifs de connaissances en rapport avec le magmatisme déconnectés de la tectonique des plaques. Ces objectifs placent les élèves dans une problématique différente de celle posée par les chercheurs actuels et l'explication du magmatisme se fait dans un cadre non tectonique. La tectonique des plaques est étudiée ultérieurement dans la partie consacrée à l'« activité interne du globe ».
- Le phénomène de fusion, sous-entendu dans la définition du « magma » de l'écrit E3, reste implicite et n'est pas évoqué dans le schéma bilan final E4.

Par rapport aux explications magmatiques (locales, centrales et globales), ce schéma se situe au niveau d'une explication centrale. Il évoque une origine profonde du magma qui remonte et s'accumule dans réservoir magmatique placé à -70km de profondeur.

Suite à cette étude approfondie des écrits de la séquence ordinaire, nous pouvons formuler des hypothèses concernant la logique de mise en texte de l'enseignante qui apparaît centrée sur **la sélection et le tri de la bonne solution** parmi les propositions avancées par les élèves (Orange Ravachol, 2010). En effet, le premier écrit produit est un pluri-texte propositionnel qui présente les différentes solutions possibles. Le deuxième écrit est mono-texte argumentatif qui expose plusieurs arguments dont le but est de participer au tri en favorisant ou défavorisant l'une ou

l'autre proposition. Le troisième écrit est un mono-texte propositionnel qui désigne la bonne solution au problème de l'origine des matériaux volcaniques. Pour mieux comprendre les pratiques de mise en texte de l'enseignante et ce mode de fonctionnement qui semble basé sur le tri des solutions, nous nous proposons d'effectuer une modélisation praxéologique des pratiques ordinaires en jeu dans cette séquence.

3. Modélisation praxéologique des pratiques ordinaires de mise en texte de l'enseignante

La description de la séquence et l'analyse des écrits élaborés nous permettent, à ce stade, de modéliser les pratiques enseignantes en jeu dans la mise en texte du problème de l'origine des matériaux volcaniques. Nous nous appuyons sur l'analyse praxéologique de la pratique enseignante telle qu'elle est définie dans la théorie anthropologique du didactique (TAD) développée par Chevallard (1998). Rappelons que ce cadre théorique analyse toute action humaine en termes de bloc pratico-technique (savoir-faire), et de bloc technologico-théorique (savoir). Les données dont nous disposons pour cette séquence vont nous permettre d'étudier le premier bloc, c'est-à-dire les techniques et les tâches et d'accéder à la technologie faisant partie du deuxième bloc. Précisément, la mise en texte relève d'un type de tâche enseignant dont l'accomplissement appelle des techniques enseignantes particulières (ou manières de faire). Pour identifier ces techniques, il s'agit tout d'abord de repérer les tâches effectuées par la classe. Nous avons effectivement repéré neuf tâches de la classe, par ordre chronologique, qui figurent déjà dans le synopsis de la séquence (tableau 8) :

- produire un dessin simple d'un volcan en coupe où sera placé le lieu d'où viennent les matériaux volcaniques ;
- produire une explication commune en groupe et un écrit de groupe ;
- débattre sur les productions de groupe ;
- produire un écrit à la fin du débat ;
- exploiter collectivement la documentation scientifique ;
- produire un écrit suite à l'exploitation de la documentation ;
- produire un écrit bilan final ;
- construire un schéma bilan final ;
- discuter collectivement le mécanisme de remontée des matériaux volcaniques.

La réalisation de chacune de ces tâches conduit à l'élaboration d'ostensifs par la classe : oraux et écrits, de natures (initiaux, individuels ou finaux) et de formes variées (schéma, texte). Certains ostensifs sont utilisés pour réaliser les tâches suivantes (figure 26). La modélisation praxéologique des pratiques enseignantes de mise en texte est ainsi obtenue (figure 26) :

- En effectuant la tâche qui consiste à produire un dessin simple d'un volcan où le lieu de provenance des matériaux volcaniques est placé, les élèves élaborent individuellement un schéma qu'ils utilisent lors du travail de groupe pour construire des modèles explicatifs communs à chaque groupe. Ces derniers serviront d'appui lors du débat scientifique ce qui conduira à l'élaboration du premier écrit intermédiaire E1 résumant les solutions possibles apparues pour le problème de départ. L'ensemble de cette première phase a pour but, pour l'enseignante, **d'identifier et de repérer les solutions possibles envisagées par les élèves au problème de l'origine des matériaux volcaniques** (figure 26). L'écrit E1 produit à la fin de cette phase est – comme nos analyses précédentes le montrent – un pluri-texte propositionnel qui présente les différentes solutions proposées par les élèves.
- La tâche d'exploitation de la documentation scientifique n'utilise pas directement l'écrit E1 mais un document du manuel scolaire (annexe 2). Sa réalisation permet de concevoir un deuxième écrit intermédiaire E2, considéré comme un mono-texte argumentatif, qui valide et invalide les solutions déjà évoquées dans l'écrit E1 à travers des argumentations. Par conséquent, cette phase vise principalement, pour l'enseignante, **la discussion et la critique des solutions possibles** avancées lors du débat de classe.
- L'écrit intermédiaire E2 est utilisé pour la production d'un écrit bilan final lui-même servant à la production d'un schéma bilan final. Ces tâches donnent naissance à des écrits finaux qui ne font que **présenter la bonne solution au problème** de l'origine des matériaux volcaniques posé au départ au sein d'un mono-texte propositionnel (E3).

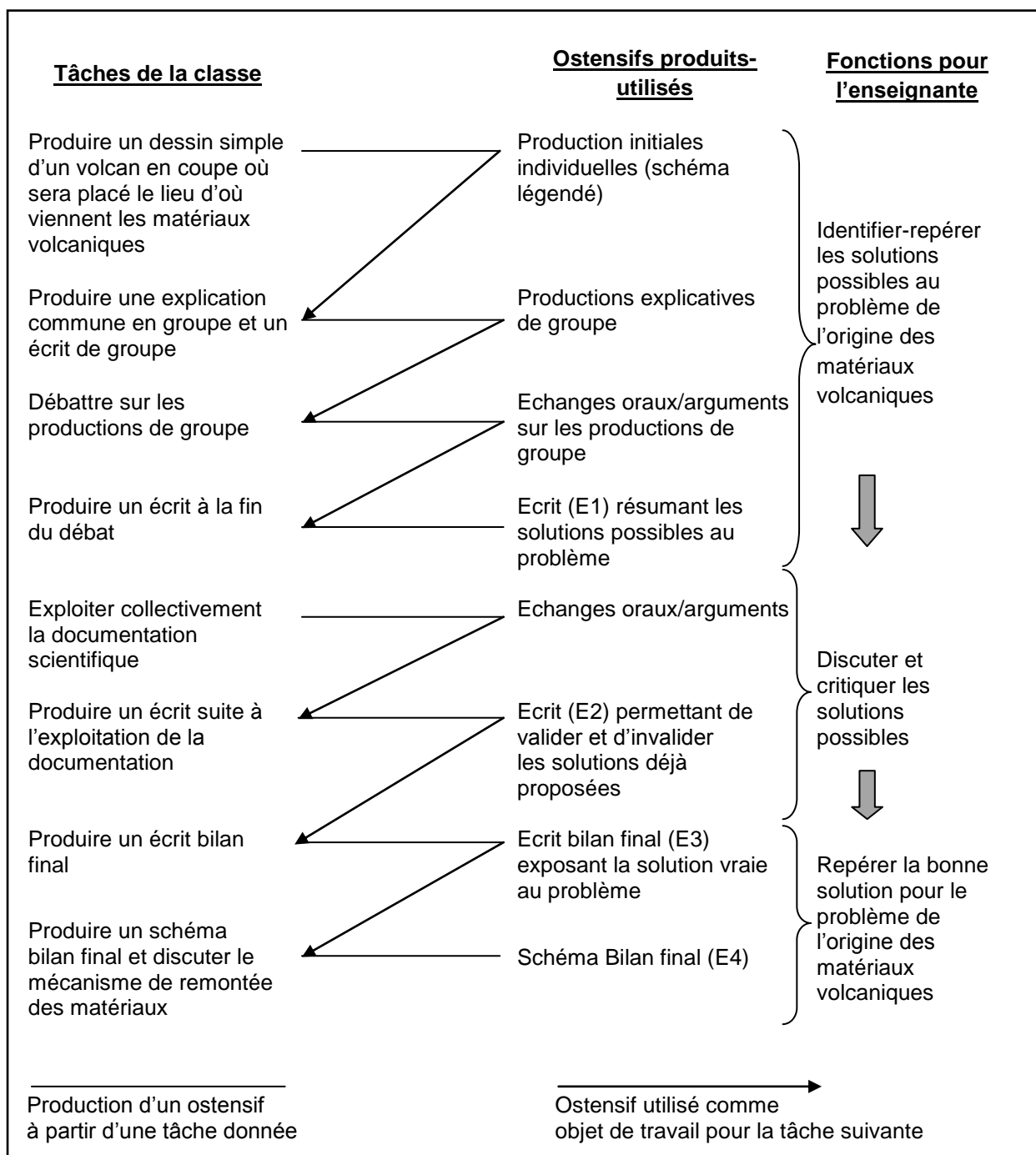


Figure 26. Modélisation praxéologique des techniques enseignantes de mise en texte du problème de l'origine des matériaux volcaniques.

La modélisation praxéologique construite (figure 26) nous permet de relever plusieurs points importants dans les techniques de mise en texte de l'enseignante. Celles-ci consistent en la réalisation d'une série de tâches par la classe qui entraînent la production d'ostensifs (oraux, schémas, écrits). Ces derniers seront utilisés pour réaliser les tâches suivantes jusqu'à l'accès aux textes finaux et à la bonne solution. Le travail de mise en texte est décomposé en plusieurs étapes. Pour le problème de l'origine des matériaux volcaniques, la classe passe des explications individuelles, aux explications de groupe, à une liste de solutions possibles, à des argumentations

et des explications qui marquent la possibilité d'une solution et l'impossibilité d'une autre pour finir avec un texte et un schéma final mettant en avant la bonne solution au problème posé. La mise en place de ces techniques de mise en texte suppose la manipulation d'ostensifs schématiques et écrits. A partir de cette modélisation et des analyses précédentes des écrits, nous pouvons émettre des hypothèses concernant la technologie, discours rationnel permettant de justifier ces techniques de mise en texte. L'enseignante 1 en question semble visiblement considérer les savoirs scientifiques comme des solutions vraies et factuelles aux problèmes. C'est ce qui justifie l'importance qu'elle accorde, dans la construction des savoirs et des textes, aux solutions au détriment des raisons. Cette conception des savoirs scientifiques conduit à privilégier le caractère propositionnel des savoirs.

Du point de vue de la problématisation, par ce cheminement et cette manière de faire, nous pouvons pointer une logique centrée sur **le repérage et le tri des solutions**. Cette logique a déjà été identifiée par d'autres recherches (Orange Ravachol, 2010). **Le tri des solutions semble se faire, au fur et à mesure de l'avancée de la séquence, à travers les différentes tâches réalisées par la classe et les divers niveaux d'écrits successifs produits**. Ainsi, les techniques de mise en texte ont permis d'abord, de repérer et d'explicitier les solutions possibles que les élèves proposent et envisagent au problème, puis de critiquer et justifier ces solutions afin de retenir une seule solution figurant dans un texte final de nature propositionnelle. La solution est explicitée sans accès aux raisons qui sont derrière les idées avancées alors que mettre l'accent sur la problématisation demanderait de mettre en avant les raisons en plus des solutions. Les tâches d'écritures qui jalonnent la séquence ont joué des fonctions différentes dans cette démarche. De plus, l'ensemble des écrits produits centrés sur les solutions préparent la formulation de l'énoncé final du savoir construit par la classe dans cette séquence et rendent possible son assimilation. Ces pratiques sont portées par une **logique de réfutation** « *caractérisée par la proposition et la filtration des solutions possibles aux problèmes explicatifs* » (ibid., p.48).

La mise en texte à partir de productions d'élèves divergentes est un type de tâche enseignant qui met en jeu un ensemble de techniques que nous venons de décrire. Les techniques enseignantes consistent à demander aux élèves de réaliser des tâches produisant des ostensifs successifs dont le but serait d'identifier les solutions possibles, de discuter ces solutions et d'en retenir la bonne. Ces tâches sont conçues par l'enseignante et constituent un moyen pour conduire la classe à la bonne solution. Nous résumons le savoir-faire de mise en texte de l'enseignante par la figure 27 ci-dessous.

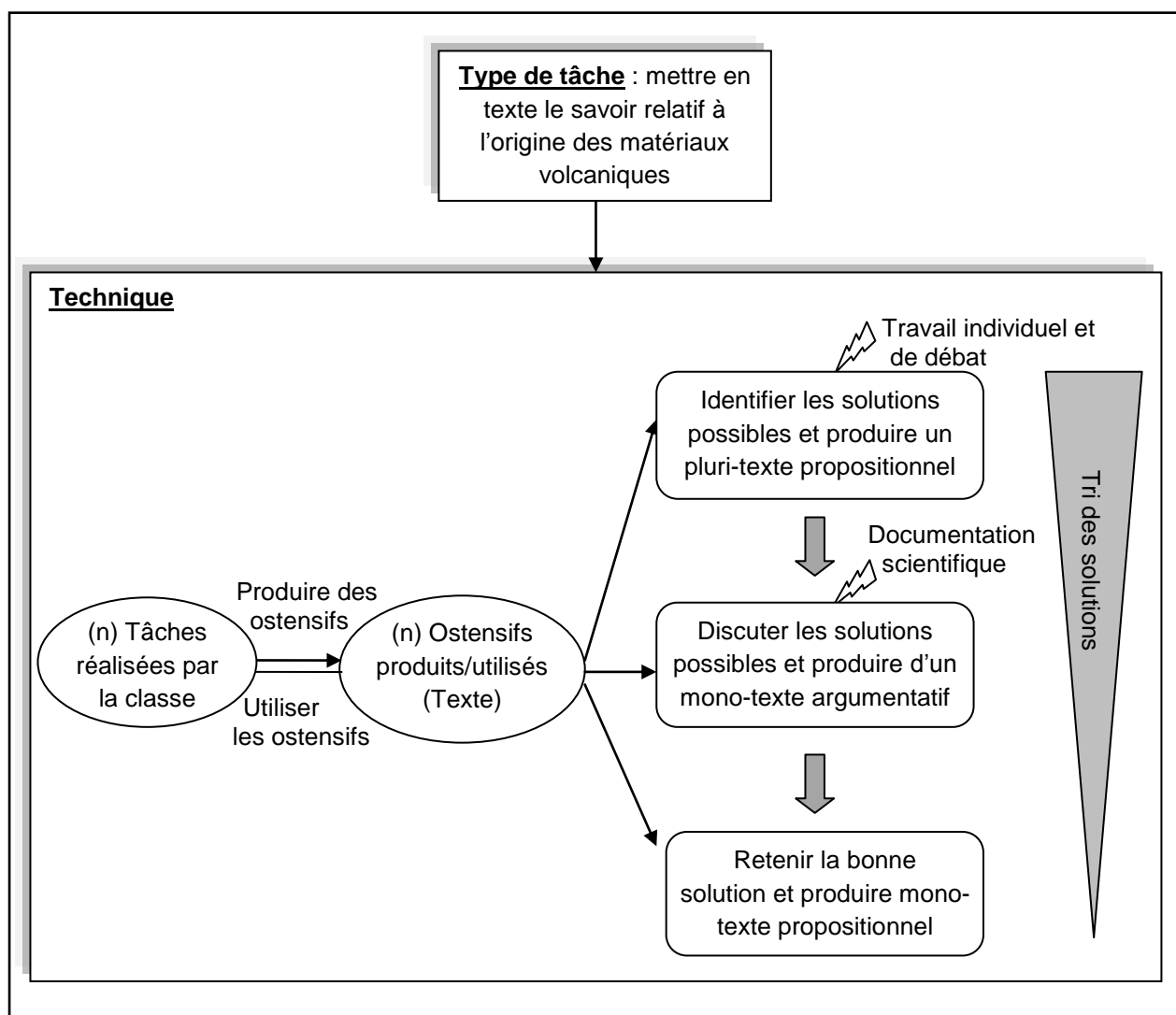


Figure 27. Le savoir-faire de mise en texte ordinaire de l'enseignante (bloc pratico-technique).

Cette première analyse, qui porte sur les textes produits au cours de la séquence et les pratiques de mise en texte, nous a permis de décrire les techniques enseignantes pour une activité de mise en texte qui visiblement ne garde pas de traces de la problématisation. Elle montre que les écrits élaborés sont loin de porter les caractéristiques des textes problématisés. Cependant, nous ne pouvons pas nous arrêter au niveau de cette analyse car les savoirs ne peuvent se réduire aux seuls textes écrits. D'où la nécessité de se pencher sur les moments de travail de la classe ayant conduit à la production de ces textes. Ainsi, après avoir déterminé les niveaux de conceptualisation présents dans les écrits, il s'agit de repérer ceux présents dans l'activité. Comment ces textes ont-ils été construits en situation ? Comment s'est déroulée leur mise en texte ? Retrouve-t-on les traces de la problématisation et de la construction des raisons lors de la mise en texte orale ? Quelles sont les logiques sous-jacentes aux pratiques de mise en texte de ces écrits ? Des questions auxquelles nous tenterons d'apporter des éléments de réponse dans la

partie suivante. C'est ainsi que nous partons à la recherche des pratiques de l'enseignante qui ont abouti à la construction des écrits terminaux lors du débat collectif et de la documentation scientifique.

4. Etude de la mise en texte du problème de l'origine des matériaux volcaniques lors du débat et de l'exploitation de la documentation scientifique

Nous suivons les traces de la mise en texte en pointant notre attention sur deux phases de travail de notre séquence : celle du débat et celle de l'exploitation de la documentation scientifique. Le débat a permis le passage des écrits explicatifs de groupe à l'écrit intermédiaire E1 tandis que l'exploitation du document scientifique, de l'E1 à l'E2 (figure 28). Les écrits finaux E3 et E4 ont suivi directement ces deux phases. Ainsi, nous repérons deux passages : le passage P1 lors du débat et le passage P2 de la documentation scientifique. Il s'agit d'étudier l'activité de l'enseignante en interaction avec celle des élèves lors de ces moments qui ont permis le passage d'un écrit à l'autre.

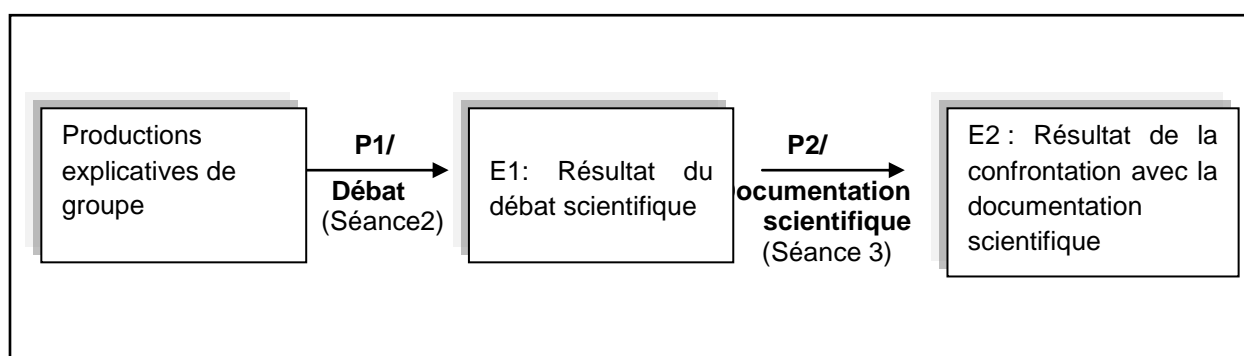
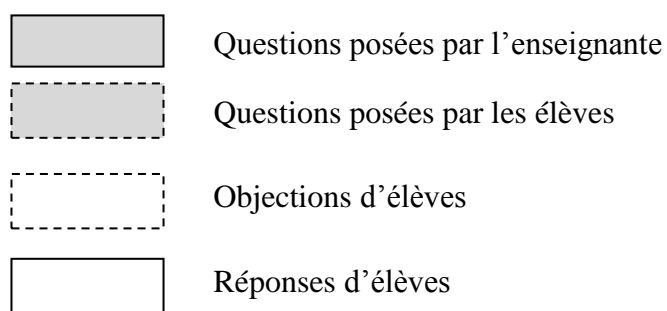


Figure 28. Les moments de travail repérés pendant la séquence ordinaire de 4^{ème} permettant le passage d'un écrit à l'autre.

4.1 Au cours du débat collectif et de l'explicitation des solutions possibles

L'écrit intermédiaire E1 élaboré après le débat scientifique correspond à une liste de trois propositions différentes au problème de l'origine des matériaux volcaniques. Il évoque une lave qui existe au niveau du noyau, d'une poche pas très profonde ou dans le volcan lui-même. Nous nous intéressons à l'étude de l'activité de mise en texte de l'enseignante en interaction avec les élèves pendant la situation de débat. Cette dernière a été pensée dans le but de mettre en jeu les conceptions des élèves sur l'origine du volcanisme. Pour suivre les pratiques enseignante de

mise en texte au cours de cette phase, nous avons construit la macrostructure de ce débat (figure 29) qui représente un résumé global du débat avec des propositions de type question/réponse et qui donne à voir la dynamique de cette phase (Fabre & Orange, 1997 ; Fabre, 1999). Nous avons indiqué les questions traitées (Q), les réponses évoquées (R) et les objections formulées (O). Ensuite, nous avons regroupé les propositions qui traitent du même problème. Les traits expriment les liens entre les différentes propositions et les chiffres correspondent aux numéros des interventions dans la transcription du débat (figure 29). Nous nous sommes basés sur la transcription du débat qui a duré 11 minutes environ pour effectuer ce travail (annexe 3). Certaines propositions ont été reformulées ou simplifiées tout en prenant le soin de garder leur sens initial dans le débat.



Légende de la figure 29. Légende de la macrostructure du débat de la séquence ordinaire de 4^{ème}

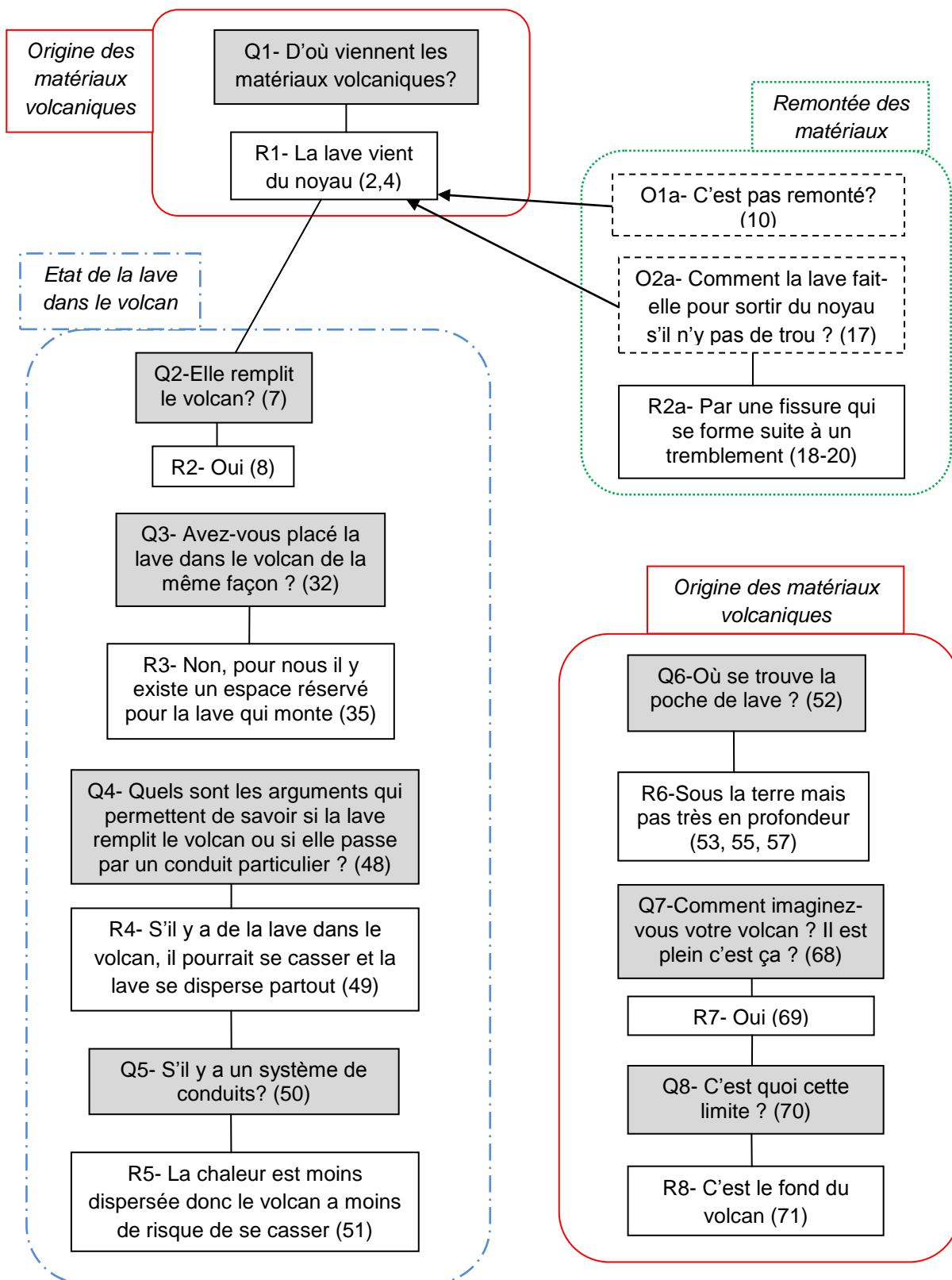


Figure 29. Macrostructure du débat scientifique de la classe de 4^{ème} concernant l'origine des matériaux volcaniques.

Cette macrostructure nous permet de faire plusieurs remarques :

1- Trois problèmes ont été travaillés pendant le débat scientifique : celui de l'origine des matériaux volcaniques, de l'état de la lave dans le volcan (remplissage ou non du volcan par la lave) et de la remontée des matériaux. Les deux premiers ont été introduits par l'enseignante alors que le troisième l'a été par les élèves prenant appui sur le schéma et la présentation du premier groupe. Nous remarquons aussi que le problème de l'origine des matériaux volcaniques est traité au début et à la fin du débat.

2- Les questions sont souvent posées par l'enseignante. Elles demandent de simples explicitations (Q2, Q3, Q4, Q6, Q7, Q8) ou des argumentations (Q4) qui donnent lieu à une seule réponse (R2-R8). Les élèves interviennent à travers deux objections (O1a, O2a) qui remettent en cause certaines informations qui figurent sur le schéma du premier groupe. Ainsi, cette situation porte des particularités qui l'éloignent des véritables caractéristiques des débats scientifiques qui sont des moments privilégiés d'échanges entre les élèves. Mais nous continuerons à parler de débat, dans ce qui suit, afin de préserver la continuité dans notre exposé.

Pour étudier ce qui se joue au cours de la phase de débat du point de vue des savoirs, de la problématisation et des pratiques de mise en texte, cette macrostructure que nous venons de décrire ne suffit pas à elle seule. Il est alors nécessaire de reprendre en détail la transcription des échanges et un certain nombre d'interventions et d'interactions d'enseignants et d'élèves.

4.1.1 Problèmes abordés pendant le débat scientifique

Nous rappelons que deux problèmes ont été traités en plus du problème principal de l'origine des matériaux volcaniques : le problème de remontée des matériaux volcaniques et celui du remplissage ou non du volcan par la lave. Regardons de plus près, comment le groupe classe introduit ces problèmes, les traite et passe de l'un à l'autre.

La remontée des matériaux volcaniques

Prenons le détail des interventions qui ont introduit ce problème suite à la présentation du schéma du premier groupe (figure 30) qui évoque une lave arrivant au volcan du noyau terrestre :

10a	Alexandre. Euh c'est c'est pas remonté ?
11a	P. Demande à Amandine.
12a	Amandine. Comment ça ?

13a	Alexandre. Le trait au milieu, c'est la sortie ?
14a	Amandine. C'est la surface du sol.
15a	Alexandre. Ah oui, c'est donc, c'est un dessin ?
16a	Amadine. Hum.
17a	Franck. Comment la lave qui sort du noyau déjà je comprends pas, comment elle fait pour passer dans le volcan s'il n'y a pas de trou pour qu'elle passe ? parce ce que là le sol, il y a...
18a	Emmanuel. Il y a la fissure.
19a	Franck. Ah ben non, je ne vois pas de fissure.
20a	P. Chut Chut. Emmanuel ! Emmanuel peut proposer une solution à Amandine après elle pourra euh alors vas-y.
21a	Emmanuel. Ben quand il y a le tremblement, quand la fissure elle se forme et puis euh la lave elle monte.
22a	Franck. Non mais là...
23a	P. Donc tais-toi pour l'instant, la fissure où ? est-ce que tu pourrais aller au tableau et essayer d'expliquer avec le dessin d'Amandine où est-ce que tu mettrais ta fissure ? Vas-y, tu restes là quand même Amandine. Après, tu laisses Emmanuel parler après je t'écoute.
24a	Franck. J'ai même pas fini ma question !
25a	Emmanuel. Ben là, enfin... (Emmanuel montre au niveau de la surface du sol sous le volcan).
26a	P. D'accord. Donc il y aurait une fissure qui permet de laisser passer. Jason ?

Le modèle présenté par un membre du premier groupe attribue l'origine de la lave au noyau de la Terre (2a) et se rapporte ainsi à une explication centrale situant cette origine en référence à la Terre. Les interventions d'Alexandre (10a) puis de Franck (17a) montrent que la remontée du magma pose problème pour les élèves. L'objection de Franck (17a) sous forme d'une question prend en compte les informations du schéma et remet en cause la possibilité d'une remontée de la lave du noyau vers le volcan sans qu'il y ait un « trou » facilitant ce passage. Ce n'est pas tant l'origine de la lave telle que proposée au niveau du noyau qu'il conteste mais la représentation schématique qui ne suggère pas son évacuation du noyau et qui la place pourtant au niveau du volcan. Cette remontée semble nécessaire du point de vue des élèves pour le fonctionnement du volcan et pour que la proposition du premier groupe puisse fonctionner. Derrière ces interventions figure un lien qu'effectuent les élèves entre l'origine des matériaux et leur arrivée remontée à la surface et la nécessité d'un système (ou d' « un trou ») qui puisse permettre au magma de passer du noyau vers le volcan. C'est le problème de la remontée du magma qui a préoccupé les élèves et non pas celui de sa formation puisqu'il préexiste à l'endroit mentionné par le premier groupe, au niveau du noyau.

Emmanuel (18a, 21a) précise qu'un tremblement de terre provoquerait une fissure qui permettrait la mise en activité du volcan et la remontée du magma. Son intervention sous-entend

un lien de causalité simple entre les séismes et le déclenchement des éruptions qui attire assez souvent la focalisation des élèves. Ceci est lié à un raisonnement linéaire simple : tremblement → fissure → montée de la lave. Suite à la demande de l'enseignante, Emmanuel localise sa fissure sur le schéma au niveau de la surface du sol sous le volcan ce qui semble susciter l'accord de l'enseignante qui conclut sur ce problème et met fin à la discussion par les interventions suivantes : « 26a. P. **D'accord. Donc il y aurait une fissure qui permet de laisser passer.** [...] » et plus loin « 32a. P. **Oui, alors, est-ce que vous aviez réfléchi à ça ? Une fissure éventuelle qui pourrait emmener euh la matière depuis le noyau jusqu'à la surface ? Bon maintenant que ça c'est un petit peu euh évoqué** [...] ». Mais nous nous demandons pourquoi l'enseignante n'est-elle pas allée plus loin avec les élèves en leur posant des questions qui auraient pu les engager dans une activité de réflexion et de problématisation plus poussée : Quelles sont les raisons qui fondent l'idée d'Emmanuel et qui font que la fissure se forme là où il l'a placée et pas ailleurs ? Comment ferait le magma pour passer du noyau pour être évacué au niveau de la fissure placée au niveau de la surface du sol ? Concernant l'origine de la lave, quelles sont les raisons derrière l'idée d'une origine située au niveau du noyau ? Pourquoi la lave viendrait-elle du noyau terrestre et pas d'un autre endroit ?

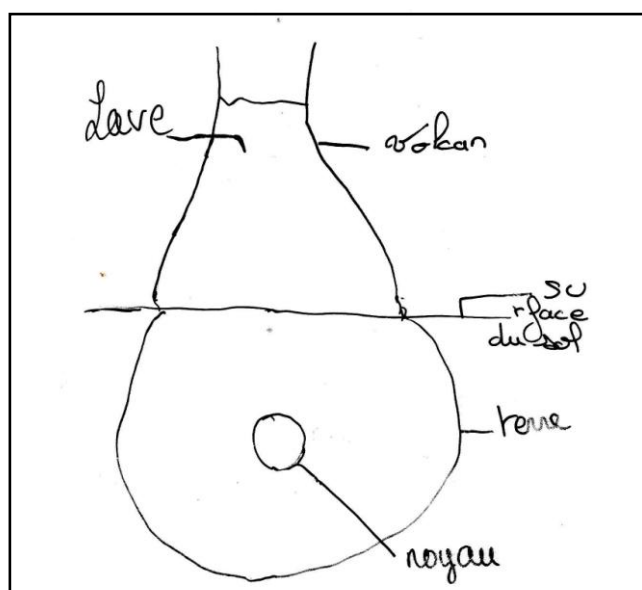


Figure 30. Affiche du premier groupe (séquence ordinaire 4^{ème}).

Du point de vue de la problématisation, dès la première phase du débat, les interventions des élèves portent les germes d'une nécessité fonctionnelle : celle de la remontée du magma. Mais les échanges s'arrêtent à partir du moment où l'un des élèves évoque une fissure provoquée par un tremblement de terre qui autoriserait la remontée du magma. Quant aux interventions enseignantes, nous remarquons qu'elles ne poussent pas les élèves au-delà des solutions

éventuelles introduites pour repérer les raisons qui sous-tendent ces solutions. Ainsi, l'activité de l'enseignante n'est pas orientée vers la problématisation. Par ailleurs, l'écrit E1 ne garde de cette discussion que la solution proposée par le premier groupe : « la lave vient du noyau de la terre ».

Le remplissage du volcan par la lave

C'est l'enseignante qui introduit, à deux reprises, le problème du remplissage ou non du volcan par la lave qui semble la préoccuper. D'abord, par une question adressée à Amandine (7a) lors de la présentation des idées de son groupe en référence aux données de l'affiche :

7a	P. Au milieu de la terre, au centre de la terre et donc ensuite la lave remonte dans le volcan et euh donc euh là ici vous l'avez mise, elle remplit le volcan c'est ça ?
8a	Amadine. Hum.

Puis, elle y revient au cours du débat – après l'introduction du problème de la remontée du magma – à travers l'intervention 32a qui ouvre la voie à la discussion de ce problème. La classe est ainsi orientée vers un autre problème en rapport avec le schéma du premier groupe mais cette fois-ci pointé par l'enseignante.

32a	P : Oui, alors, est-ce que vous aviez réfléchi à ça ? Une fissure éventuelle qui pourrait emmener euh la matière depuis le noyau jusqu'à la surface ? Bon maintenant que ça c'est un petit peu euh évoqué, est-ce que vous avez tous représenté le volcan comme l'ont fait euh, les élèves du groupe d'Amandine ? Vous avez placé la lave de la même façon ?
-----	---

Corentin (35a) évoque la présence d'un « espace réservé », dans le schéma de son groupe, pour la lave dans le volcan. Suite à l'explication de Thomas (45a) qui précise que la lave monte à travers l'espace qui lui est réservé lorsque le volcan est en éruption, l'enseignante effectue une comparaison (48a) entre le schéma du premier groupe (figure 31) et celui du deuxième groupe (figure 30). Puis, elle demande aux élèves d'apporter des argumentations qui permettraient d'appuyer l'un ou l'autre modèle. Corentin (49-51) indique alors que si la lave remplissait le volcan, ce dernier pourrait s'effondrer, idée que l'enseignante valorise en la reprenant et la reformulant. Alors qu'avec le système de conduit de son groupe, le volcan court moins ce risque car la chaleur de la lave sera moins dispersée.

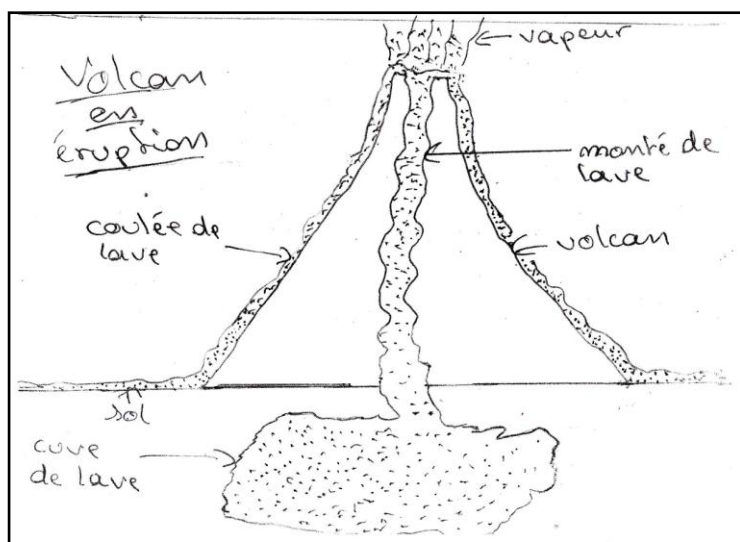


Figure 31. Affiche du deuxième groupe (séquence ordinaire 4^{ème}).

Par la suite, l'enseignante fait le tour des schémas des autres groupes pour faire le point et les comparer du point de vue de leur représentation de la lave au niveau du volcan (52a). Puis, elle revient sur le problème de l'origine des matériaux volcaniques (52a).

52a	<p>P. D'accord. Est-ce qu'il y a d'autres euh propositions, par rapport à ce que vous avez mis vous hein. Le groupe de, le groupe de Simon a aussi proposé un, il me semble un passage avec un conduit, le groupe par contre de Jessica comme le groupe de euh qui est-ce, de Raphaël, vous avez proposé un peu plus ce modèle là avec un volcan qui est rempli de euh, d'éléments bouillonnants ou de lave. C'est ça ? Vous vous y retrouvez dans un des deux schémas tout le monde ? Bon, eh bien on va déjà on va garder l'argument éventuellement de la discussion, de savoir est-ce que le volcan est rempli de lave ou bien est-ce que la lave passe par des endroits précis. Maintenant on continue, le groupe premier groupe pour lequel on travaille, nous propose que l'origine de la lave, elle vient du centre de la terre, le deuxième groupe, il se trouve où cet ensemble, cette espèce de poche que vous avez représenté, Corentin, Thomas et puis euh Kevin ?</p>
-----	---

Nous pouvons ainsi constater que le problème du remplissage du volcan, en lien avec l'affiche du premier groupe, préoccupe l'enseignante. Elle l'introduit à deux reprises et demande des argumentations pour trier les deux modèles opposés : un volcan plein de lave vs présence d'un conduit qui permet l'ascension de la lave dans le volcan. L'enseignante semble chercher des alternatives d'idées ou de solutions pour préparer son écrit intermédiaire qu'elle prévoit être sous forme de solutions à partager (écrit E1). Les argumentations avancées par les élèves ne figurent pas dans le texte intermédiaire E1 mais la proposition qui postule que la lave serait dans le volcan fermé à la base est inspirée du modèle du groupe 5 (figure 25, p.138) dont le volcan est rempli de lave. C'est à la fin du débat que l'enseignante réintroduit ce problème (68a). Voilà

comment elle prend en charge l'introduction de l'idée d'un magma remplissant le volcan sachant qu'elle avait déjà introduit ce problème au cours du débat et demandé des argumentations :

68a	P. [...] bon alors les questions qui vont arriver, ça va être est-ce que la lave vient du noyau, est-ce qu'elle vient d'une poche qui est pas trop profonde, ou bien point d'interrogation on revient hein puisque Clodevi euh, le groupe de Clodevi là vous avez pas trouvé de réponse ou est-ce qu'elle est déjà dans le volcan, ce qui peut être ce modèle là finalement, où on a la lave, c'est votre groupe, qui propose il me semble Raphaël, comment est-ce que vous imaginez donc euh votre volcan, il est plein c'est ça ?
69a	Raphaël. Ouai.
70a	P. Ok et c'est quoi alors euh donc le sol est là et c'est quoi cette limite là ?
71a	Emmanuel. Ben c'est le fond du volcan.

L'enseignante semble donc chercher à mettre en texte, oralement puis par écrit, des idées concurrentes.

Le retour à l'origine des matériaux volcaniques à la fin du débat

La fin du débat, qui marque le retour au problème de l'origine des matériaux volcaniques, se caractérise par une phase où une série de questions est posée par l'enseignante. Ces derniers ont pour but d'aider les élèves à mieux expliciter leurs idées concernant l'origine du magma qui figure sur leur production de groupe. Ces questions demandent de simples explicitations et c'est l'enseignante qui prend en charge la sélection des schémas en adressant directement les questions aux membres du groupe concerné. Les interventions ci-dessous illustrent les propos que nous venons d'avancer.

52a	P. [...] le deuxième groupe, il se trouve où cet ensemble, cette espèce de poche que vous avez représenté, Corentin, Thomas et puis euh Kevin ?
53a	Thomas. Ben il est en dessous de la terre.
54a	P. En dessous de la terre, est ce qu'il est euh aussi profond que la représentation d'Amandine ?
55a	Thomas. Ben, pas trop.
56a	P. Pas trop, ça c'est pas une réponse.
57a	Thomas. Pas trop loin mais euh.
58a	P. D'accord. Il est moins profond, il est quand même en profondeur, moins profond. Qu'est-ce que vous avez pensé, vous les autres groupes ? Sur l'origine de la lave. J'ai un dessin comme ça par exemple. Vous allez me dire d'où ça vient ? Je retiens pour l'instant ceux-là, celui là, le groupe du fond, Jessica, mais c'est pas Jessica qui répond forcément. Où ça va, ça ? Allez-y hein parce que, racontez-nous votre idée. Alors qui est-ce qui parle, Clodevi ?

Le texte intermédiaire E1, élaboré par l'enseignante à la fin du débat et recopié par les élèves, ne garde que les solutions proposées au problème de l'origine des matériaux volcaniques et ne

reprend rien de certains arguments et problèmes ayant émergés lors du débat. Cette phase, prépare la suivante qui consiste en la mise à l'épreuve des modèles proposés à travers la documentation scientifique. Une mise à l'épreuve permettant de choisir entre les propositions de solutions celle qui est vraie : « 68a. P. [...] *bon alors les questions qui vont arriver, ça va être est-ce que la lave vient du noyau, est-ce qu'elle vient d'une poche qui est pas trop profonde, ou bien point d'interrogation on revient hein [...]* ». A côté d'un souci de donner la parole aux élèves, l'enseignante contrôle le débat et joue, comme l'étude de la transcription des échanges le montre, un rôle dans l'orientation vers certains problèmes dans le débat. Nous avons peu de traces de problématisation dans les échanges entre l'enseignante et les élèves. D'ailleurs, cette situation est bien loin des véritables caractéristiques d'un débat scientifique comme nous l'avons déjà mentionné suite à l'analyse de la macrostructure (figure 29, p.152). Les intentions de l'enseignante semblent orientées prioritairement vers l'identification des solutions possibles et non pas vers un travail de problématisation et de construction des nécessités. Ainsi, nous notons une difficulté à problématiser et à mener une mise en texte orale de nature problématisée du problème posé dans la classe. Ceci s'accorde avec l'analyse déjà réalisée de l'écrit E1 clôturant le débat que nous avons qualifié de pluri-texte propositionnel. De plus, peu de temps a été consacré à ce débat et les cinq groupes ne sont pas passés exposer et débattre leur modèle comme le préconise la méthodologie du débat. On se limite à la présentation du modèle d'un premier groupe et les autres sont présentés rapidement en comparaison avec celui-ci et sous le contrôle de l'enseignante.

Par ailleurs, nous remarquons une forte présence de l'enseignante au sein du débat. En témoigne la différence entre le nombre de questions qu'elle a posé par rapport à ceux des élèves. Nous étudions ces questions formulées lors du débat dans le paragraphe suivant.

4.1.2 Analyse des questions posées par l'enseignante lors du débat

Nous avons porté notre attention aux questions formulées par l'enseignante au cours du débat et spécifiquement à celles qui se rapportent aux demandes d'explications concernant les productions de groupe (tableau 9). Nous cherchons à comprendre le but de ces questions.

Questions de l'enseignante
<ul style="list-style-type: none"> - 3. P. Donc elle vient d'où exactement ? si tu montres sur ton dessin. - 5. P. C'est-à-dire qui se trouve où par rapport à la terre. Félix complète si tu veux, vas-y - 7. P. [...] donc euh là vous l'avez mise, elle remplit le volcan c'est ça ? - 9. P. Où est la surface sur ce que vous avez fait ? [...] - 23. P. [...] la fissure où ? est-ce que tu pourrais aller au tableau et essayer d'expliquer avec le dessin d'Amandine où est-ce que tu mettrais ta fissure ? [...] - 32. P. [...] Est-ce que vous avez tous représenté le volcan comme l'ont fait euh, les élèves du groupe d'Amandine ? Vous avez placé la lave de la même façon ? - 36. P. Dans le volcan ? - 48. P. [...] Qu'est-ce que vous en pensez les autres par rapport aux schémas de ces deux modèles ? [...] <u>Est-ce qu'on a des arguments</u> déjà pour dire le volcan est plein de lave ou bien il y a des passages, des conduits pour la lave ? A votre avis, <u>quels sont les arguments</u> qui pourraient dire, j'ai une marmite ici pleine de lave ou bien j'ai un conduit plein de lave dans le volcan, <u>comment est-ce qu'on pourrait argumenter ça</u> ? - 50. P. [...] Si on est ici dans un système de conduit ? - 52. P. [...] le deuxième groupe, il se trouve où cet ensemble, cette espèce de poche que vous avez représenté, [...] ? - 54. P. [...] est-ce qu'il est aussi profond que la représentation d'Amandine ? - 58. P. [...] Qu'est-ce que vous avez pensé, vous les autres groupes ? Sur l'origine de la lave. J'ai un dessin comme ça par exemple. Vous allez me dire d'où ça vient ? [...] Où ça va, ça ? [...] - 60. P. [...] Vous vous me faites un conduit, mais qu'est-ce qu'il y a là ? en dessous. - 64. P. Et qu'est-ce que donc, le groupe a mis un grand vide en dessous là ? Jessica ? Qu'est-ce que vous avez à la suite, là, rien ? Alors quelle était votre idée ? Clodevi a dit qu'il y a une poche, quelle était ton idée à toi Maxime ? - 68. P. [...] comment est-ce que vous imaginez donc euh votre volcan, il est plein c'est ça ? - 70. P. Ok et c'est quoi alors euh donc le sol est là et c'est quoi cette limite là ?

Tableau 9. Questions posées par les élèves et l'enseignante pendant le débat en classe de 4^{ème} (séquence ordinaire).

En examinant de près les questions de l'enseignante posées lors du débat (tableau 9), nous remarquons qu'elles demandent majoritairement des précisions sur les explications des élèves et leur schéma de groupe. Seule, l'intervention 48 demande aux élèves d'argumenter dans le but de trancher entre deux idées. Il paraît que l'enseignante pose des questions pour clarifier les idées des élèves de façon à repérer les solutions et préparer le tri qui suivra. Le débat a permis la réalisation d'un état des possibles ce qui renvoie à un aspect de la problématisation mais les argumentations ne sont pas retenues. Il se place plus au niveau des solutions du problème, comme le révèle l'analyse de l'écrit intermédiaire E1, qu'au niveau des raisons. Cette manière de faire se comprend si, comme nous l'admettons, la pratique de l'enseignante est basée sur l'identification des idées des élèves et leur tri par l'étude de documents ou d'expériences. L'entretien d'autoconfrontation réalisé avec l'enseignante, que nous analysons dans le

paragraphe 5 de ce chapitre, nous permettra de vérifier les hypothèses émises. Il semble alors que cette façon de faire peut renvoyer à un aspect de la problématisation qui est l'exploration des possibles mais l'argumentation autour de l'impossibilité des possibles n'est pas retenue. Pendant cette phase, les intentions de l'enseignante dont la présence est bien marquée sont de révéler les idées proposées par les élèves au problème de l'origine des matériaux volcaniques.

Le travail se poursuit dans les séances qui suivent le débat, notamment avec l'étude de documents où les solutions proposées par les élèves sont discutées.

4.2 Au cours de la confrontation avec la documentation scientifique et de la critique des solutions possibles

La phase d'exploitation collective du document scientifique (séance 3) qui montre l'enregistrement de l'activité sismique sous un volcan (annexe 2), conduit à un deuxième écrit intermédiaire E2. Cet écrit – comme nous l'avons déjà évoqué – décrit le document, emmène une explication argumentée de l'état liquide de la zone sans séismes observée sous le volcan et avance finalement des argumentations en faveur de l'impossibilité d'une lave provenant du centre de la Terre puisque ce dernier est solide, contrairement à ce que les élèves peuvent penser. La transcription de la phase d'exploitation de la documentation scientifique est accessible en annexe 5. Dès le début de la séance, l'enseignante oriente les élèves vers une problématique de choix, de tri des propositions déjà repérées lors de la séance de débat précédente afin de retenir celle répondant réellement au problème posé (2b).

2b	P : Donc on a noté en dernier, propositions donc euh de ces 3, ces 3 groupes, il y en avait d'autres groupes mais elles se retrouvent hein vos idées avec les trois qui étaient proposées, on les a noté en dernier. Alors maintenant eh bien pour essayer de savoir, si euh y a une idée dans ces 3 groupes qui devait émergé comme étant réellement l'origine de la matière, il faudrait donc qu'on puisse vérifier, est-ce qu'on a un moyen de vérifier où se trouve le, la lave en fait par rapport au volcan. Quel est l'état de la lave par rapport au volcan et par rapport à la Terre ?
----	--

Nous commençons cette analyse par un incident que nous relevons et qui marque le début de cette phase d'exploitation de la documentation scientifique.

4.2.1 Emergence de la relation de causalité simple entre l'activité sismique et volcanique

L'étude de la transcription des échanges (annexe 4) montre que les élèves, au début de l'exploitation collective du document scientifique, évoquent une relation de causalité simple entre les séismes et le volcanisme non attendue par l'enseignante : « 24. *Alexandre. L'activité sismique euh, elle entraîne l'activité volcanique* ». Cette thèse a été soutenue et argumentée par Alexandre (26b) suivi d'Emmanuel (32b) et de Maxime (36b).

25b	P. L'activité sismique entraînerait l'activité volcanique est-ce que tout le monde est d'accord ? Pourquoi l'activité sismique entraînerait l'activité volcanique ?
26b	Alexandre. Ben quand le sol il tremble, ça pourrait faire euh, ça entraînerait des euh, des bouillonnements.

31b	P. Une rupture. D'accord. Donc par rapport à ce que dit Alexandre. Est-ce que ce sont les séismes, qui vont entraîner le volcanisme ? Christian ? Euh Emmanuel ?
32b	Emmanuel. Oui, parce que quand la terre tremble ça peut faire une rupture euh dans le volcan et euh la lave euh.

36b	Maxime. Ben, ça peut ouai, ça peut faire une rupture et ça peut monter la lave.
-----	---

Rappelons qu'Emmanuel avait déjà évoqué cette idée lors du débat :

21a	Emmanuel : Ben quand il y a le tremblement, quand la fissure elle se forme et puis euh la lave elle monte.
-----	--

L'émergence de ce problème, évoqué en premier par Alexandre (24b), pousse l'enseignante à solliciter une justification de cette proposition (25b), puis à demander aux élèves de rappeler la définition et l'origine d'un foyer sismique (27b), enfin à attirer l'attention des élèves sur le fait que les foyers sismiques ne sont pas enregistrés dans le volcan mais bien en-dessous (45b, 47b). L'enseignante essaye de régler ce dilemme mais, face aux argumentations des élèves, de plus en plus accrochés à cette idée, elle poursuit et reformule la question mais cette fois-ci en inversant le lien de causalité évoqué par les élèves afin de les déstabiliser « 41b. *P. [...] est-ce que ce sont les séismes qui vont entraîner le volcanisme ou est-ce que c'est le volcanisme qui va entraîner les séismes ?* ». Alexandre n'exclut pas alors la possibilité que ce soit le volcanisme qui puisse entraîner les séismes (42b), les pierres rejetées du volcan pouvant créer des séismes (44b). Après les multiples tentatives pour régler le problème, l'enseignante ferme la situation et décide de mettre le problème de côté pour y revenir plus tard (47b).

41b	P. Sous la terre, d'accord. Alors là vous êtes partis hein complètement à l'envers des choses hein. Donc euh, est-ce que ce sont les séismes qui vont entraîner le volcanisme ou est-ce que c'est le volcanisme qui va entraîner les séismes ? Ah ! Alexandre, on reprend.
42b	Alexandre. Ben ça peut, ça peut être le volcan qu'entraîne les séismes.
43b	P. On essayera de vérifier les deux hein, si c'est l'envers, pourquoi est-ce que ce serait le volcanisme qui entraînerait les séismes ?
44b	Alexandre. Ben s'il y a des pierres qui, qui sont jetés du séisme, du volcan ça pourrait euh
45b	P. Oui mais là, on, toujours pour Emmanuel, les foyers sismiques ils sont où là ? ils sont au niveau du volcan ? Regardez là ce qui est donné à gauche, c'est un axe de quoi ? Vas-y Alexandre.
46b	Alexandre. De profondeur.
47b	P. Donc la surface du sol, elle est au niveau 0. Là où est le volcan et plus je vais sous le volcan plus je m'enfoncé dans la terre. Donc là où j'ai un foyer sismique d'indiqué, et je vous rappelle que tous les foyers sismiques sont en profondeur, je n'ai rien à voir avec euh le niveau du volcan. A priori, le volcan est bien au-dessus. En quoi est-ce que le volcanisme pourrait entraîner des séismes ? On laisse de côté, on y reviendra plus tard, sinon on va y rester plus longtemps. Je regarde d'abord ici, j'ai donc une localisation des foyers sismiques, c'est-à-dire des ruptures, on va revenir après hein est-ce que c'est le volcanisme qui entraîne les séismes ou est-ce que c'est les séismes qui entraînent le volcanisme. Pour l'instant, je regarde la localisation de ces foyers sismiques, très simplement. Qu'est ce que vous observez ? Sur leur situation. Oui, Félix ?

Mais nous remarquons que cette situation perturbe l'enseignante et la met dans un embarras. Elle rappelle constamment au cours de la séance que le problème de la relation entre l'activité sismique et volcanique sera traité ultérieurement (61b). Pour elle, le recours au document doit permettre de trancher entre les solutions possibles déjà identifiées. Ce document convoque les séismes comme méthode d'étude des volcans (annexe 2) mais les élèves partent sur une relation de causalité entre les deux phénomènes. Ainsi, lorsqu'elle demande au début de la phase d'exploitation « 23b P. [...] *Quel lien peut-il y avoir entre les foyers des séismes et une activité volcanique ?* [...] », l'enseignante s'attend à ce que les élèves s'appuient sur les données sismiques du document pour localiser la poche de magma. Mais la focalisation des élèves sur des éléments de leurs conceptions détourne les apports du document et sa participation dans le tri des solutions.

61b	P : Oui, ils sont verticalement, si on suit euh leur position par rapport au volcan, a priori on a bien un lien entre ces séismes et le volcan puisque ils sont alignés verticalement sous le volcan. Alors on note déjà ça. Première chose, on observe des séismes alignés sous le volcan mais en deux groupes séparés par une zone sans séismes. Alors maintenant faut trouver une explication à la zone sans séismes, a priori, il y a un lien entre le volcanisme et les séismes, on ira tout à l'heure chercher si ce sont les séismes qui déclenchent le volcanisme ou si c'est le volcanisme qui déclenche les séismes pour l'instant on cherche le lien et expliquer cette zone où il y a pas de séismes, a priori on a un bel alignement vertical, sauf sur cette zone là. [...].
-----	--

Nous pointons ici la difficulté de l'enseignante à soustraire les élèves de la causalité simple prédominant dans leurs modes de raisonnements dans une classe qui ne semble pas travailler sur la tâche qu'elle a prévue. Ce problème a émergé contre l'attente de l'enseignante qui a essayé de le régler à plusieurs reprises pour finir par le suspendre. Par la suite, l'étude du document scientifique reprend et nous verrons, dans ce qui suit, comment l'écrit intermédiaire E2 a été construit.

4.2.2 Construction de l'écrit intermédiaire E2

L'enseignante pousse les élèves, dans un premier temps, à décrire le document montrant la position des foyers sismiques situés sous le volcan, puis reformule leurs idées pour finir par un texte qui décrit le document « *on observe des séismes alignés sous le volcan mais en deux groupes séparés par une zone sans séismes* ». Ensuite, l'explication de la zone sans séismes présente sous le volcan a été introduite par l'enseignante (65b) après la lecture du texte qui accompagne le document par Lou Anne (61b-63b). Ceci a permis de valider la deuxième proposition de l'écrit E1 précédent : « la lave est dans une poche ».

65b	<p>P. Alors qu'est ce que l'on vous dit à ce niveau là dans cette explication. On vous dit, lorsqu'il y a séismes les ondes sismiques ne se propagent jamais dans les liquides. D'autre part, pour qu'il puisse y avoir rupture, il faut qu'on soit dans du matériau solide. D'accord. Donc on suggère que la zone qui se trouve entre les deux répartitions de foyers sismiques, est une zone où il ne peut pas y avoir de rupture. D'accord, si cette zone on peut pas avoir de ruptures, c'est que probablement on est dans une zone liquide. D'accord. Par rapport aux propositions qu'on a faites, on est quand même sous un volcan dans une activité volcanique. Eh bien on va dire, cette zone où il n'y a pas de possibilités de rupture, cette zone liquide est une zone où est stocké le magma. D'accord. A quoi ça ressemble dans les propositions que vous aviez faites. Est-ce que c'est la première proposition qui disait eh bien euh la lave vient du magma, non, du centre du noyau de la terre, est-ce que c'est la lave est dans une poche en profondeur, est-ce que c'est la lave est dans le volcan bien fermé, rempli. Euh, Corentin ?</p>
66b	Corentin : La lave est dans une poche.

Devant les efforts faits pour déconnecter les phénomènes volcaniques et sismiques et pour faire des séismes un moyen d'étude du volcan, l'enseignante prend en charge l'explication de la zone sans séismes observée sous le volcan. L'écrit intermédiaire E2 reprend ce que cette dernière venait d'évoquer : « *Cette zone est une zone liquide (où il n'y a pas de ruptures, donc pas de foyers sismiques). Elle correspond, probablement, à un réservoir de magma* ».

Après avoir validé la bonne solution au problème de l'origine des matériaux volcaniques, il s'agit d'infirmer les deux propositions restantes. Le document scientifique apporte uniquement

des informations qui permettent de valider la bonne solution (deuxième proposition). Les deux propositions restantes ont été réfutées oralement. D'abord, l'enseignante demande aux élèves de rappeler les arguments qu'ils avaient déjà évoqués pendant le débat par rapport à la possibilité d'avoir un volcan rempli ou non de lave. Ces arguments avaient déjà été évoqués par Corentin lors de la présentation/discussion des différents schémas produits par les groupes (séance 2). Leur rappel a permis d'infirmer la proposition : « la lave est dans le volcan qui est fermé à la base ». Cependant, nous ne retrouvons pas la trace de ces argumentations dans le texte écrit E2 à la fin de cette phase ni auparavant dans l'écrit E1. Ensuite, la troisième proposition de l'écrit E1 qui évoque une lave provenant du noyau pour alimenter le volcan a été rejetée par l'enseignante (81b). En effet, l'augmentation de la température avec la profondeur laisse penser que le noyau est liquide mais la pression qui augmente en même temps rend celui-ci solide. Ces argumentations figurent dans l'écrit (E2). *« Peut-il être alimenté par le noyau de la terre ? Plus on descend en profondeur dans la terre, plus la température augmente, ce qui pourrait permettre de rendre liquide la roche, mais en même temps, la pression augmente, et rend le noyau complètement solide ».*

81b	<p>P. [...] Maintenant est-ce que il y a un lien avec le noyau de la terre comme le reprend ce dessin là. Il y avait un petit peu plus sur leurs dessins personnels hein qui était l'idée qu'il y avait un lien entre le noyau et le remplissage de lave. Il faudrait donc savoir si le noyau de la terre il est parfaitement, se, liquide. D'accord. Est-ce qu'il contient une grosse masse de magma et finalement, il alimente les réservoirs, de tous les volcans du monde. Alors comment le savoir ? Là c'est plus difficile, on peut aussi se baser sur le passage des ondes sismiques, pour aller vérifier comment est le noyau mais on peut aussi se baser sur des données physiques. Quand on va à l'intérieur de la terre, plus on s'enfonce dans la terre plus la température augmente. Et la température au niveau du noyé, noyau pardon elle est extrêmement importante, par rapport au fait de rendre liquide quelque chose, c'est intéressant d'avoir une température importante. On l'a dit tout à l'heure que c'était la chaleur qui faisait fondre. Vous vous rappelez de ça ? Le problème est que plus on s'enfonce dans la terre, plus il y a un autre facteur qui augmente et qui est la pression. Et quand on arrive au cœur de la terre, la pression elle est colossale et du coup, la pression est tellement forte au centre de la terre qu'elle va rassembler les molécules, et empêcher qu'elles ne forment un liquide. Et le noyau de la terre, pour le groupe d'Amandine, il est parfaitement solide. D'accord. Donc il ne peut pas alimenter en magma les réservoirs magmatiques. D'accord. Donc en réalité, d'où vient le magma dans le réservoir, il vient de beaucoup plus haut. Il va venir de zones qui sont situées jusqu'à 200km de profondeur, où la roche peut fondre par endroit et où elle ira remplir les magmas qui se trouvent un petit peu au-dessus, aux alentours de 70km de profondeur. Nous on est très loin du noyau. D'accord.</p>
-----	---

L'enseignante termine cette partie en précisant aux élèves le lieu d'où vient le magma. Il viendrait de zones situées jusqu'à 200km de profondeur où la roche a la possibilité de fondre pour remplir les réservoirs de magmas situés aux alentours de 70km. Cette précision n'a pas été

prise en compte dans le texte (E3) ni dans le schéma bilan (E4) où simplement « une origine profonde » est évoquée.

La phase de documentation scientifique est marquée par une logique de tri du bon modèle à partir des documents et des arguments sous une importante présence de l'enseignante comme le montre l'analyse effectuée ainsi que la longueur de ses interventions. Ce fonctionnement ordinaire de mise en texte diffère d'un fonctionnement qui privilégierait la problématisation où la recherche des conditions de possibilités des solutions est primordiale. Ce cadre théorique a pour but de faire passer les élèves de leurs idées spontanées aux raisons et non pas des solutions possibles à la bonne solution comme c'est visiblement le cas dans cette séquence ordinaire. De plus, la logique de tri repérée présente des difficultés pour la classe car les documents font appel, semble-t-il, à des arguments difficiles pour les élèves. La bonne solution est d'abord identifiée puis les autres infirmées. L'écrit E2 reprend les argumentations évoquées lors de ce moment mais ce sont celles de l'enseignante. Cependant, les arguments qui infirment la deuxième proposition de l'écrit E1 et qui ont été évoqués pendant cette phase n'ont pas été repris par l'E2.

4.3 Conclusion

L'étude et l'analyse que nous venons d'entreprendre nous ont fourni des éléments fondamentaux concernant l'activité de mise en texte de l'enseignante. La phase de débat, où les questions de l'enseignante visent à demander des précisions sur les explications des élèves et à clarifier leurs idées, est orientée vers l'identification des solutions possibles avancées. Ce moment, ayant servi à la réalisation d'un état des possibles, prépare le tri des solutions qui se poursuit avec l'exploitation du document scientifique où la bonne solution est identifiée et les deux autres rejetées à l'aide des arguments. Nous notons que d'autres séquences similaires de cette enseignante attestent du même fonctionnement. Pour valider les hypothèses que nous émettons sur une centration sur les solutions, leur repérage et leur tri et pour mieux comprendre les connaissances sous-jacentes à ces pratiques de mise en texte qui font que l'enseignante agit de telle sorte, il est important d'emmener celle-ci à verbaliser son action. Pour cela, nous nous appuyons sur un entretien d'autoconfrontation auquel elle s'est livrée pour commenter sa pratique lors d'un débat scientifique.

5. Etude de l'entretien d'autoconfrontation réalisé avec l'enseignante 1 concernée

5.1 Présentation des conditions de mise en œuvre de l'entretien

Le dispositif d'autoconfrontation a réuni l'enseignante 1 et un chercheur en didactique des sciences (Christian Orange). Un deuxième chercheur (Denise Orange) et deux enseignantes de l'équipe de recherche ont assisté à la séance et participé aux réflexions menées. L'entretien réalisé en mars 2008 porte sur un débat scientifique filmé en mars 2007. Nous avons estimé qu'il était propice de l'analyser puisque les pratiques que l'enseignante commente sont similaires à celles que nous venons d'étudier. Entre l'année 2007 (date du débat sur lequel porte l'entretien) et 2009 (date de notre recueil de données), la pratique de mise en texte orale lors du débat apparaît comme étant invariable et organisée. Sans avoir à exploiter ce débat scientifique, les commentaires de l'enseignante fournis lors de l'autoconfrontation décrivent et donnent à voir ce qui s'y passe. De plus, nous nous sommes intéressées particulièrement aux moments de débats car ils sont assez révélateurs de l'activité et de la position que prend l'enseignante par rapport à la problématisation et à la mise en texte à partir de productions divergentes.

La séance de débat d'une durée de 20 minutes environ est d'abord visionnée et des arrêts sont réalisés par l'enseignante qui commente, décrit et justifie. Celle-ci dispose de la transcription du débat comme support supplémentaire. La séance d'autoconfrontation a été enregistrée en audio et transcrite (annexe 6). Le débat étudié s'inscrit dans une séquence sur la transformation des paysages par le volcanisme menée dans une classe de 4^{ème} en février-mars 2007 par l'enseignante 1 au collège Albert Camus au Mans en situation ordinaire. La description de la séquence dans laquelle s'inscrit le débat scientifique est disponible en annexe 5. Nous remarquons à travers cette description que la technique de mise en texte est la même que celle que nous avons précédemment décrit. Pour les deux problèmes traités et suite au débat, un écrit intermédiaire résume les différentes propositions de solutions. Afin de valider ou d'invalider ces propositions, la classe exploite de la documentation scientifique pour ne retenir qu'une solution figurant dans un texte final.

L'objectif de l'entretien d'autoconfrontation est de mettre à jour les procédures utilisées par l'enseignante au cours de son activité. A travers les verbalisations, il permet d'appréhender les connaissances mises en œuvre lors de l'activité et qui organisent celle-ci.

5.2 Analyse de l'entretien d'autoconfrontation portant sur un débat scientifique

Pour analyser le contenu de l'entretien (annexe 6), nous avons choisi de le découper en fonction des thématiques ayant suscité la réaction de l'enseignante. Le tableau 10 ci-dessous montre la catégorisation réalisée.

	Déroulement du débat			Actions réalisées après le débat
	Questions des élèves	Interventions ou questions de l'enseignante	Contraintes temporelles	
N° des interventions	[1'-9'] ; [16'-28'] ; [46'-50'] ; [109'-135']	[10'] ; [14'] ; [29'-34'] ; [57'] ; [76'-79'] ; [81'-104']	[10'] ; [35'-37'] ; [40'] [43'-45'] ; [80'] ; [107']	[64'] ; [66'-76'] ; [105']
Contenu des interventions	Il s'agit d'interventions abordant le manque de questions posées par les élèves pendant le débat (constat, justification, etc.).	Ces interventions se rapportent aux questions posées par l'enseignante pendant le débat scientifique.	Le problème du temps laissé aux élèves pour poser des questions est discuté.	Ces interventions concernent les intentions de l'enseignante après le débat scientifique
Interventions non catégorisées	[11'-13'] ; [38'-39'] ; [41'] ; [42'] ; [51'-56'] ; [58'-60'] ; [61'-63'] ; [65']			

Tableau 10. Catégorisation des interventions de l'enseignante de 4^{ème} lors de l'entretien d'autoconfrontation selon les thématiques abordées (séquence ordinaire).

Nous reprenons, dans ce qui suit, chacune de ces thématiques et analysons les verbalisations avancées par l'enseignante.

5.2.1 Questions posées par les élèves lors du débat

Au début de l'entretien, l'enseignante constate, suite à la présentation du premier groupe, le manque de véritable débat scientifique dans la classe sauf pour le dernier groupe. Ceci étant dû, d'après elle, à l'absence de questions de la part des élèves (1') :

1'	<p>1'. P. [...] il y a pas vraiment de débat le problème il est... à partir du moment où il y a pas d'interventions d'élèves [...], enfin ça va être un petit peu ça tout le temps hein. Il y a pas de débat sauf peut être sur le groupe de Walid qui va être le tout dernier, qui lui va être un petit peu controversé par les autres. [...], il y a pas de questions d'élèves ou il y a des questions de ma part mais il y a pas particulièrement d'interrogations des élèves.</p>
----	---

Pour justifier ce manque de questionnement de la part des élèves plusieurs causes possibles sont évoquées [5'-9'] :

- Le modèle proposé par le groupe qui présente convient aux élèves de la classe même s'il diffère de ce qu'ils ont eux-mêmes préparé : « 9' P. [...] *ils ne demandent pas de justifications supplémentaires et ils argumentent pas rapport à ce que eux-mêmes ont pu présenter* ».
- Les élèves restent en retrait tant qu'ils n'ont pas présenté leur modèle.
- Les élèves manquent d'idées par rapport au problème ce qui les coince au niveau de l'explication scientifique et ne les assure pas pour poser des questions. Ils font un constat de ce que leurs camarades ont préparé et ne se sentent pas aptes à poser des questions parce qu'ils n'ont pas la réponse. « 46' P. [...], *ils savent pas vraiment euh, ils se font euh des images fixes mais pas euh des images réellement de fonctionnement quoi* ». Ainsi, l'enseignante signale que les élèves n'ont pas une conception du fonctionnement mais disposent uniquement de quelques images dans leur tête. Au contraire des années précédentes où ils avaient des connaissances différentes et construisaient des schémas plus élaborés – en réponse aux mêmes questions – qu'elle ne retrouve plus depuis un certain temps. « 114' P. [...] *je ne sais pas pourquoi hein mais j'avais l'impression qu'ils avaient plus déjà de notions qu'ils s'étaient appropriés et qu'ils pouvaient redonner. Tandis que là j'ai vraiment l'impression de brasser un peu des images un petit peu dans le livre on a vaguement le volcan. On sait vaguement qu'il y a une cheminée, ça ils me la replacent tous et puis voilà. Donc après la lave, il y en quand même la plupart qui la met dans un espace ...* ». Nous notons que la difficulté d'une telle situation est attribuée aux élèves et non pas à la situation elle-même et à sa conduite par l'enseignante.

Par conséquent, devant le manque de questionnement de la part des élèves, l'enseignante se retrouve amenée à poser des questions :

10'	<p>P. Alors pareil hein silence dans la salle donc euh moi je, je continue. Bon j'ai toujours le problème du temps aussi hein, on passe euh et voilà comment les faire réagir plus s'ils ne veulent pas parler ! comment je fais ! Alors moi je vais poser après, des, quelques questions mais automatiquement euh ce sont mes questions.</p>
-----	---

Mais à quels moments et comment le fait-elle ? Nous abordons, dans le paragraphe suivant, la thématique des interventions enseignantes.

5.2.2 Interventions ou questions de l'enseignante

Après la présentation du deuxième groupe, l'enseignante signale qu'elle a arrêté une intervention d'élève se focalisant sur le fonctionnement : « 14' P. [...] *Le premier c'est juste sur de la construction je crois, euh le deuxième c'est en effet, plus sur le fonctionnement. Mais je l'arrête. Donc euh, je reprends l'idée du groupe d'avant. Oui mais finalement ça ne va pas très très loin non plus. Mais je reprends le terme pression parce qu'il m'intéresse* ». En effet, elle intervient suite à une question d'élève sur le fonctionnement pour reprendre une idée qui l'intéresse ce qui interrompt les échanges entre les élèves. La priorité semble être accordée non pas aux échanges entre les élèves, mais aux questions de l'enseignante dans le but de préciser les idées de ceux-ci. Suite aux différents commentaires de l'enseignante insistant sur l'absence de véritable débat en classe pendant la présentation des affiches, le chercheur lui fait remarquer qu'elle intervient davantage après la présentation du deuxième groupe et que les élèves posent quand même une ou deux questions, ce qui n'était pas le cas auparavant [29'-33']. Voici comment elle justifie ceci :

34'	P. Oui du coup je demande des choses parce que je me suis rendue compte que sur le premier groupe ça marchait pas , les autres, j'ai rien demandé sur le premier dessin, et en fait si moi je ne pose pas les questions euh les autres sont quand même dans l'attente [...].
-----	--

Plus loin dans l'entretien elle reconnaît, suite à la présentation du troisième groupe, que ses interventions sont plus abondantes que celles des élèves « 57' P. [...] *Donc euh bon c'est vrai c'est surtout moi encore qui intervient* [...] ». Elle note que certaines ont pour but de couper les conversations en cours parce que l'idée discutée l'intéresse. Elle intervient effectivement pour que cette idée ne soit pas modifiée et que les élèves ne changent pas d'avis sous l'influence des autres. Donc c'est bien la recension des idées des élèves qui l'intéresse plus que les arguments qu'ils peuvent échanger : « 76' P. [...] *et puis en fait je découpe assez vite parce que je ne veux pas qu'ils soient influencés qu'ils me laissent bien leur dessin à plat. Tu sais sur le dernier il y en a un qui dit mais pourquoi t'as rien fait, y a pas de relief quelque chose pour montrer la différence entre le premier...* ». L'une de ses collègues (Vér.) s'interroge sur les raisons qui l'ont poussé à empêcher la classe d'influencer le dernier groupe et emmener celui-ci à travers l'argumentation à voir s'il était judicieux de mettre ou non un relief plat. L'idée de vouloir protéger le dernier groupe composé d'élèves en difficulté émerge. Mais le chercheur reprend le

fait que l'enseignant reste souvent intéressé par l'existence d'une idée différente des autres disponible dans la classe (92') ce qui est confirmé par l'enseignante (93'). Ces propos confirment les hypothèses émises sur le fonctionnement de l'enseignante basé sur le repérage des solutions pendant le débat pour les trier ensuite avec les activités suivantes.

92'	C.O. Le choix il est peut être pas lié qu'à ça parce que ça intéresse aussi l'enseignant que, qu'on ait une idée avec euh avec pas de relief au début du...
93'	P. Oui ça m'intéresse qu'ils aient cette idée là. Il y a aussi l'idée que je ne veux pas qu'ils se laissent trop influencé parce que ça m'intéresse que eux ils aient fait quelque chose de différent. Tous les autres ont fait une petite bute bon même s'il y a le troisième groupe peut être même qui fait un relief beaucoup moins marqué mais il y a un pré-volcan. Il y en a un qui parle de pré-volcan. Les premiers font un volcan, les deuxièmes font un pré-volcan, les troisièmes dessinent une colline mais ils ne savent pas trop pourquoi, en tout cas ils n'argumentent pas et le dernier il fait un plat.
94'	Vér. Peut être qu'il aurait été intéressant de là, devant les élèves, d'argumenter. Pourquoi ils veulent absolument qu'il y ait un relief, ça aurait peut être pu rentrer finalement dans l'explication d'un fonctionnement et pas uniquement dans un constat parce que finalement un constat, c'est comme ça.
95'	P. Non parce que le groupe 3 dit enfin ça poussait, qu'il va déformer, je ne sais plus comment ils emmènent ça mais ils emmènent ça comme quelque chose de mécanique qui va déformer la surface du sol. Oui c'est peut être aussi un moment où on aurait pu rebondir.
96'	Vér. Effectivement sur ce fonctionnement, l'explication ce qui pousse finalement ce sol.
97'	P. Oui oui.

Nous voyons à travers ce passage comment la collègue de l'enseignante rebondit sur la nécessité de pousser les élèves à argumenter leurs idées pour les orienter davantage vers le fonctionnement et les éloigner du constat sur lequel ils ont tendance à se focaliser. Il apparaît que l'enseignante bloque certaines discussions dans le but de garder des idées différentes afin de les trier par la suite à l'aide de la documentation scientifique. Cette manière de faire montre que la problématisation n'est pas, consciemment ou, plus certainement, inconsciemment, ce que vise l'enseignante.

Devant le manque de questionnement de la part des élèves et son abondance de la part de l'enseignante, le problème du temps a été évoqué.

5.2.3 Le temps laissé aux élèves pendant le débat

Lors de l'entretien, l'une des collègues de l'enseignante (Vér.) fait remarquer qu'il n'y avait pas suffisamment de temps laissé aux élèves pour poser des questions [35'-37'] et que l'on passait très rapidement d'un schéma à l'autre alors qu'il faudrait laisser un temps pour que les élèves puissent réfléchir et poser des questions.

35'	Vér. Peut-être aussi euh, y a peut-être pas suffisamment de temps.
36'	P. Oui.
37'	Vér. De notion de temps euh, on passe peut être trop rapidement d'un schéma à l'autre alors qu'il faudrait laisser des temps blancs, enfin être capable de laisser des temps blancs sinon c'est difficile pour que l'élève ben peut être se pose des questions, réfléchisse, et puis ne serait-ce que oser prendre la parole, peut être que c'est un exercice difficile peut être pour les élèves de prendre la parole et d'aller contre le modèle du camarade.

L'enseignante affirme que cette notion de temps l'inquiète. C'est le temps d'ailleurs qui la pousse – si les élèves n'interviennent pas – soit à passer à un autre groupe sans que des questions soient posées sur le modèle présenté soit à poser des questions à la place des élèves : « 40' P. [...] puis moi je suis un peu inquiète si tu veux du blanc qui se construit, pas de réponse, hop on passe mais euh en plus euh, oui je pense qu'il y a aussi ça derrière hein. [...] ». Ainsi, le choix du tri, plus ou moins conscient, par rapport à une problématisation plus poussée serait lié à des contraintes dont celle liée au temps. S'ajoute à cela le manque d'intervention des élèves évoqué au début de l'entretien et qui peut être dû à la façon dont la situation est construite.

Bien après dans l'entretien, une autre collègue (Val.), évoque les contraintes liées au temps vu qu'elle avait fait le même constat sur sa pratique [107']. Elle pense qu'il aurait fallu, vu leurs faibles connaissances, laisser aux élèves le temps de réfléchir à d'éventuelles interventions :

107'	Val. C'était sur le temps justement. Je me disais, parce que j'ai, pareil dans ce que j'ai fait, j'ai fait le même constat. On veut absolument qu'ils répondent tout de suite, alors il y a des contraintes de temps aussi si on les laisse un peu trop dans le silence, il y en a qui vont plus écouter qui vont faire autre chose mais finalement enfin peut être étant donné qu'ils ont si peu de connaissances finalement si peu de choses peut être il leur faut le temps pour digérer la formation.
------	---

Les contraintes temporelles semblent jouer un rôle dans la gestion du débat par l'enseignante. D'une part le temps laissé par le manque de questionnements d'élèves pousse l'enseignante à poser des questions ou à passer à autre chose et d'autre part, les élèves ont justement besoin de ce temps pour réfléchir et pouvoir intervenir.

Après le débat, l'enseignante effectue une synthèse des modèles pour partir sur une « confrontation des propositions » : « 76' P. [...] je fais simplement un rapprochement entre certains et puis ça s'arrêtera là puisque on cherchera à savoir s'il y a un relief avant ou s'il y a pas de relief [...] ». Le but étant par la suite de savoir laquelle des deux propositions est vraie en s'appuyant sur la documentation scientifique. « 105' P. [...] j'ai même pas le temps d'aller poser

les questions de savoir ce qu'on va utiliser pour essayer de voir comment trancher par rapport à ce qu'ils ont proposé etc. [...] ». Nous comprenons pourquoi la présence d'idées différentes intéresse l'enseignante. Elle est bien dans une logique de repérage et de tri des idées.

Pour conclure, nous remarquons que l'enseignante agit dans une situation de mise en texte orale selon une certaine stratégie dépendant, entre autres, de son niveau de conceptualisation de la situation. En effet, devant le manque de questionnement des élèves combiné aux contraintes de temps, elle prend en charge d'intervenir et de poser des questions pendant le débat. Cependant, elle le fait quelquefois d'une manière qui interrompt certaines discussions et qui n'insiste pas sur les raisons derrière les idées des élèves. Elle gère le débat de façon à ce que les élèves explicitent leurs idées sans qu'ils soient forcément influencés par les idées des autres au détriment de la production d'arguments. L'existence d'idées contradictoires l'intéresse fortement puisque la documentation scientifique servira pour les trier.

Nous pouvons ainsi mettre à jour les concepts organisateurs mobilisés par l'enseignante pour agir en situation de mise en texte orale. Ces concepts permettent d'établir un diagnostic de situation pour une action ajustée. L'action de l'enseignante apparaît comme étant organisée autour de **quatre concepts pragmatiques** : le **concept de questionnement des élèves** (si les élèves ne posent pas de questions, l'enseignante prendra ceci en charge), le **concept de temps imparti** pour l'étude d'une question (si les élèves mettent du temps à réagir ou à poser des questions, l'enseignante intervient), le **concept de trace d'une séance** avec l'idée qu'il faut terminer une séance avec une trace du travail qui s'y fait et le **concept d'idées variées** des élèves concernant un problème posé (si les élèves évoquent une idée différente de leurs camarades, l'enseignante ne laisse pas ces dernières les influencer). Ces concepts pragmatiques sont liés à une certaine idée de l'enseignement et de la nature des savoirs en sciences. La progression suivie correspondrait, pour l'enseignante, à une démarche scientifique idéale pour l'acquisition des savoirs dans le domaine du magmatisme. Ces savoirs sont considérés comme étant des solutions factuelles et vraies aux problèmes scientifiques.

L'identification de ces concepts nous permet de comprendre ce qui organise l'activité de l'enseignante et son choix de mise en texte. Cette activité ne va pas dans le bon sens d'une mise en texte problématisé des savoirs magmatiques et favorise celui d'une mise en texte propositionnelle qui se satisfait des solutions. Tandis qu'une activité qui mettrait en avant la problématisation demanderait d'explicitier les raisons en plus des solutions.

6. Conclusion et difficultés d'une mise en texte problématisé des savoirs lors de la séquence ordinaire analysée

L'étude de la mise en texte et des pratiques en jeu lors de cette séquence ordinaire nous a permis de relever plusieurs éléments de réponse à notre problématique et nos objectifs de départ. Les textes construits pendant la séquence ordinaire analysée portent les spécificités des textes propositionnels et ne sont donc pas des textes problématisés et raisonnés. Quant aux pratiques de mise en texte enseignantes, elles se caractérisent par un tri des solutions basé sur une logique de réfutation qui se manifeste par la recension des solutions, leurs discussions pour retenir la bonne et vraie solution. Ce tri se fait par l'intermédiaire des différents niveaux d'écrits construits lors de la séquence. Cette démarche est plus orientée par la résolution des problèmes que par la problématisation. Or le cadre didactique de la problématisation, sur lequel travaille le groupe de recherche auquel appartient l'enseignante, met l'accent sur la construction des problèmes dans les apprentissages scientifiques et l'identification des raisons qui sous-tendent les solutions (Fabre, 1999 ; Orange, 2000). En remontant vers l'étude de l'activité de mise en texte de l'enseignante en interaction avec les élèves, nous avons relevé des difficultés qui font que la mise en texte ordinaire ne va pas dans le sens d'une construction problématisée. Pendant la phase de débat censée favoriser la problématisation et l'identification des nécessités, la focalisation de l'enseignante était centrée sur les solutions et leur repérage. La phase de documentation scientifique est marquée par le tri, à l'aide de l'argumentation, du bon modèle parmi deux déjà recensés lors du débat. L'ensemble des écrits a été élaboré par l'enseignante à l'exception des écrits initiaux. Le principal objectif de l'enseignante est de faire passer les élèves de leurs solutions possibles à la bonne solution.

L'analyse d'un entretien d'autoconfrontation portant sur un débat scientifique nous a permis de repérer les concepts pragmatiques (le concept de questionnement des élèves, le concept de temps imparti pour l'étude, le concept de traces d'une séance, le concept d'idées variées des élèves) qui organisent l'activité de mise en texte orale de l'enseignante. Les concepts pragmatiques favorisent plutôt une mise en texte propositionnelle des savoirs se limitant à révéler les solutions des problèmes. C'est ce qui apparaît à travers l'analyse des textes construits pendant la séquence.

Ces résultats indiquent que l'enseignante 1 en question effectue des choix au vu des difficultés rencontrées pour mettre en texte le savoir d'une manière problématisée malgré son expertise et la réflexion théorique et pratique qu'elle mène sur la problématisation au sein du groupe de recherche du CREN. Il existe apparemment un écart entre sa réflexion théorique, les pratiques

qu'elle met en œuvre pour construire les savoirs scientifiques et la nature des savoirs qu'elle fait construire. Il semble, d'après nos analyses, que ces difficultés sont liées à une logique de repérage et de tri des solutions qui guide manifestement son activité et fait qu'elle ne va pas dans le sens d'un travail de problématisation et à une certaine conception des savoirs scientifiques et comment ils sont construits avec les élèves. D'où l'intérêt, pour explorer davantage ces difficultés, de recourir aux situations forcées dont l'analyse est à suivre pour étudier les conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé des savoirs en lien avec le magmatisme.

**Chapitre 5. Etude de la mise en texte et des pratiques
enseignantes en œuvre lors d'une séquence forcée sur le
fonctionnement des volcans et l'origine des matériaux
volcaniques en classe de 4^{ème}**

Introduction

Notre première étude de cas nous a permis d'appréhender les pratiques enseignantes de mise en texte lors d'une séquence ordinaire d'enseignement-apprentissage ainsi que les difficultés que semble rencontrer la mise en texte problématisé des savoirs. Dans le but d'étudier les conditions de construction d'un texte de savoir associant les raisons aux solutions, nous avons mis en place, au sein d'une équipe de recherche, une séquence forcée en classe de 4^{ème}. Ce travail permet d'apporter des réponses aux objectifs 1, 3 et 4 de notre recherche à savoir l'identification des pratiques de savoirs autorisant une mise en texte problématisé en sciences de la Terre, des difficultés et des conditions relatives à cette construction. Nous commençons par décrire la séquence telle qu'elle s'est déroulée ainsi que les réunions du groupe de recherche en identifiant les techniques mises en place. Les textes de savoirs scientifiques produits par la classe seront analysés et leurs fonctions identifiées. Cette première phase nous permettra d'effectuer une modélisation praxéologique des pratiques enseignantes dans des situations forcées de mise en texte et d'étudier les techniques mobilisées dans ces séquences. Ensuite, nous reprenons les séances de classe dans l'ordre pour étudier l'activité de mise en texte de l'enseignante et des élèves et comprendre le mode de construction des textes. Finalement, nous analysons un entretien d'autoconfrontation réalisé avec l'enseignante 2 au cours duquel elle commente sa pratique et justifie ses choix pendant le débat scientifique de la séquence forcée.

1. Analyse globale du scénario didactique forcé

1.1 Conception de la séquence forcée d'enseignement-apprentissage

La séquence, composée de cinq séances, a été menée par l'enseignante 2 dans sa classe de 4^{ème} de vingt cinq élèves âgés de douze à quatorze ans au collège le Haut Gesvres à Treillières (commune située à 10 Km de Nantes). La séquence s'intègre, comme celle que nous avons précédemment étudiée, dans la partie du programme consacrée à l'étude de l'« *activité interne du globe* » (M.E.N., 2008b, p.24). Le recueil de données s'est déroulé au mois de février 2011 et le corpus d'étude a été consacré à un travail sur le fonctionnement des volcans et l'origine des matériaux volcaniques. La séquence a été co-construite par un groupe de recherche qui comprend, outre l'enseignante, deux didacticiens des sciences de la vie et de la Terre (SVT),

Denise Ravachol Orange et Hanaà Chalak. L'enseignante 2 est expérimentée mais elle est moins impliquée que l'enseignante 1 dans les recherches du laboratoire CREN accordant de l'importance à la problématisation dans les apprentissages scientifiques. Par ailleurs, elle participe activement aux ateliers didactiques des sciences de la vie et de la Terre (SVT) qui regroupent des formateurs, des didacticiens, des conseillers pédagogiques, etc.

L'ensemble des séances de classe a donné lieu à un enregistrement vidéo et audio. Toutes les productions écrites qu'elles soient individuelles, de groupe ou collectives, ont été collectées. La construction de la séquence s'est déroulée selon la méthodologie de la « séquence forcée » (Orange, 2010). Il s'agit d'un travail réalisé par un groupe de recherche composé d'enseignants expérimentés et de chercheurs en didactique des sciences. Deux types d'objectifs ont guidé sa réalisation :

- **Les objectifs de recherche**, déterminés préalablement par le groupe, visent l'identification des conditions de possibilités d'une construction problématisée des savoirs magmatiques et d'une mise en texte de ces savoirs ne se limitant pas au caractère propositionnel usuel des savoirs scolaires (Delbos & Jorion, 1990 ; Astolfi, 1992). C'est le caractère apodictique des savoirs scientifiques qui est mis en avant ainsi que la nécessité de sa prise en compte dans un texte de savoir gardant les traces de la problématisation. Il s'agit d'abord d'étudier à quel point cette mise en texte est possible puis d'identifier les pratiques de savoirs en jeu. Ces objectifs – même s'ils sont définis par le groupe de recherche selon la méthodologie des séquences forcées – restent sous le contrôle des chercheurs didacticiens qui connaissent les multiples aspects (didactiques, théoriques, empiriques) de la construction des savoirs problématisés et les difficultés de leur mise en texte.

- **Les objectifs pédagogiques (ou d'apprentissages)** prennent appui sur une étude épistémologique réalisée *a priori*. Le problème explicatif du fonctionnement des volcans en classe de 4^{ème}, étudié dans le cadre théorique de la problématisation, articule des registres empiriques (la fusion contrôlée par la température et la pression, la solidité de l'intérieur du globe solide et l'évacuation des matériaux volcaniques lors des éruptions) et des modèles pour établir la nécessité d'une formation du magma ainsi que celle de sa remontée (figure 32). Ces nécessités fonctionnelles (ou raisons), que les élèves doivent construire, sous-tendent les solutions au problème du fonctionnement des volcans dans un cadre mécaniste. Le réseau de ces deux nécessités et des contraintes empiriques liées peut définir le concept du magmatisme à ce niveau d'enseignement et leur construction peut être parfaitement envisageable pour la classe de

4^{ème}. Ces objectifs d'apprentissages définis par le groupe sont contrôlés par l'enseignante. Par ailleurs, l'espace des contraintes (figure 32) ne rend pas compte de la nécessité de formation du magma dans des endroits précis du globe ce qui est en adéquation avec la progression scolaire officielle qui n'envisage pas l'explication du fonctionnement des phénomènes volcaniques en relation avec la théorie de la tectonique des plaques. Cette articulation aurait été intéressante à mettre en place mais nous n'avons pas pu le faire au vu de quelques contraintes liées à la progression définie par l'enseignante, aux limites des programmes scolaires et au temps accordé à la réalisation de cette recherche. Précisément, les principes de la tectonique des plaques auraient pu être abordés avant l'étude de la tectonique des plaques – contrairement à la progression scolaire officielle – dans le but de situer, par la suite, l'activité volcanique dans un cadre tectonique. Ceci constituera pour nous un travail à réaliser lors de nos recherches ultérieures.

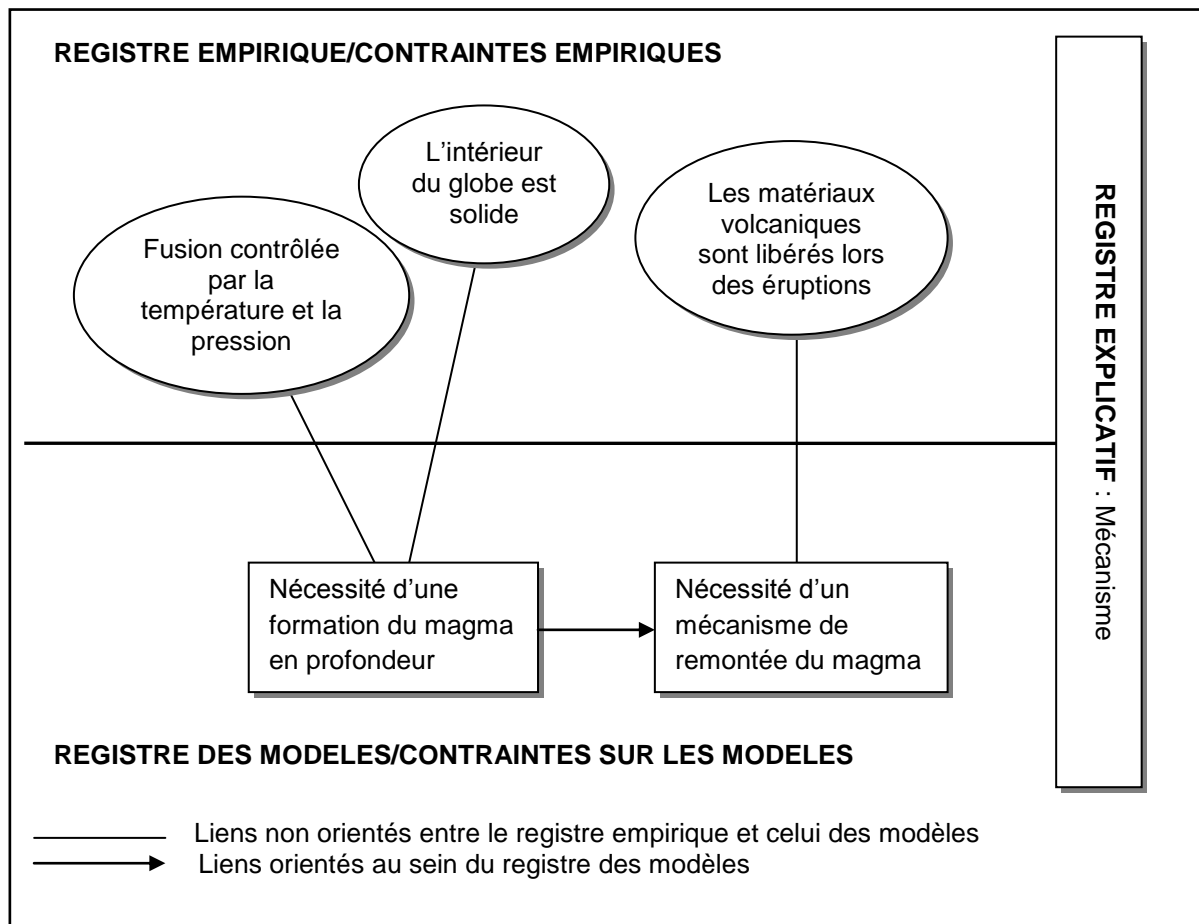


Figure 32. Espace des contraintes envisageable pour le niveau 4^{ème} en rapport avec le magmatisme.

Après avoir établi les objectifs de recherche et d'apprentissage, le groupe tient des réunions avant et après chacune des séances. La séquence est construite au fur et à mesure en fonction de ces objectifs. Son déroulement ne peut pas être entièrement programmé *a priori* puisque chaque

séance est construite à partir des productions précédentes de la classe. Nous présentons, dans ce qui suit, une description exhaustive de la séquence forcée construite par le groupe de recherche.

1.2 Description détaillée des réunions de travail du groupe de recherche et de l'organisation de la séquence forcée

La mise en place d'une séquence forcée nécessite la tenue d'une réunion de recherche avant chaque séance pour évaluer l'avancée des savoirs et des textes et pour préparer la séance suivante. Lors de ces réunions, les chercheurs didacticiens proposent des suites possibles en accord avec les objectifs de recherche et les objectifs pédagogiques déjà définis (Orange, 2010). Ces propositions sont discutées par les membres du groupe et des choix sont pris en fonction des renseignements apportés par l'enseignant sur leur possibilité et leur pertinence quant au fonctionnement de la classe (ibid.). Finalement, le groupe aborde la présentation et la préparation matérielle de la séance. Notre séquence forcée de 4^{ème} se divise en 3 grands blocs : la séance 1 ; les séances 2 et 3 ; les séances 4 et 5. C'est ainsi que trois réunions de recherche ont eu lieu. La figure 33 ci-dessous résume le déroulement de la séquence forcée préparée par le groupe de travail.

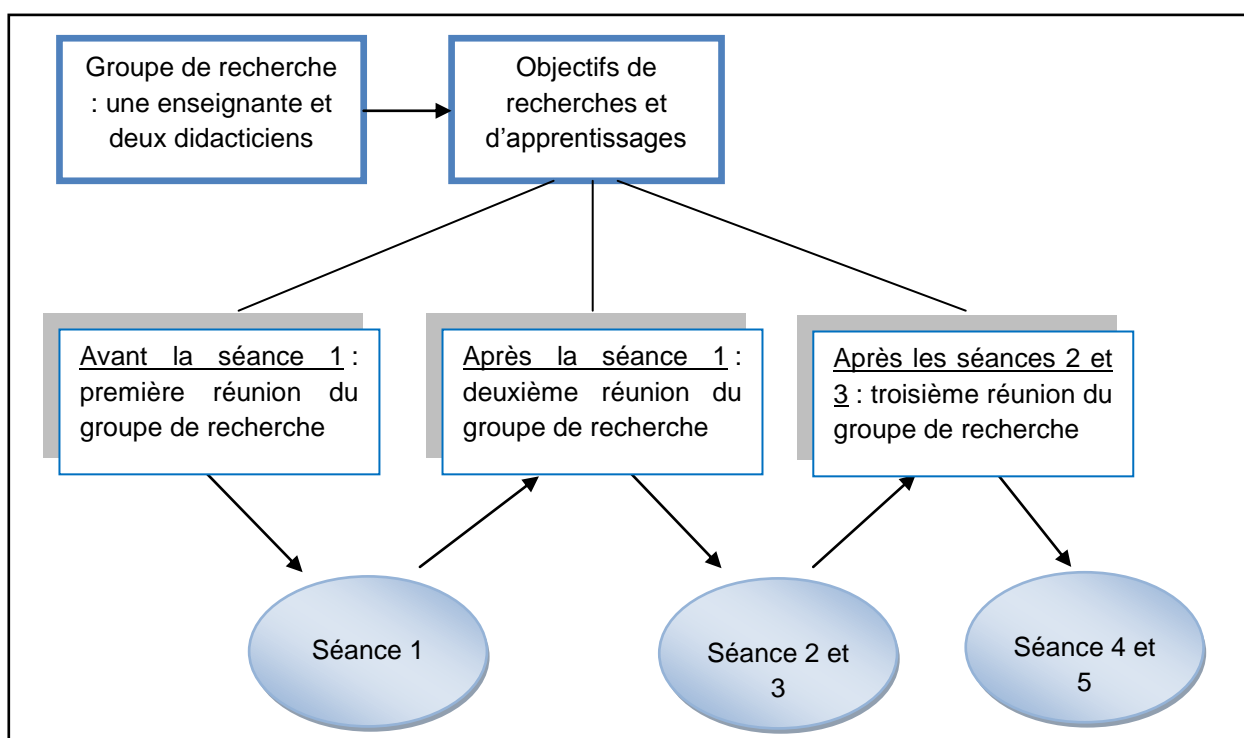


Figure 33. Déroulement de la séquence de 4^{ème} selon la méthodologie des séquences forcées.

Nous exposons une description minutieuse des réunions de travail du groupe de recherche et des séances de classe telles qu'elles se sont réellement réalisées.

Avant la séance 1 : première réunion du groupe de recherche

Pendant cette réunion, le groupe de recherche détermine le déroulement et l'organisation de la première séance après avoir fixé les objectifs de recherche et d'apprentissage de la séquence forcée. La préparation de cette phase prend appui sur une méthodologie déjà travaillée par l'équipe du laboratoire CREN ainsi que par d'autres équipes de recherche. Elle se base sur un diagnostic des systèmes explicatifs spontanés des élèves en rapport avec le fonctionnement des volcans en vue de mettre en œuvre, par la suite, un débat collectif autour de cette problématique. Le but du débat n'étant pas d'aboutir à un accord, à une solution vraie mais de développer des raisons. Les principaux points discutés par le groupe, pendant cette réunion, sont les suivants :

- La formulation de la question de départ : Quelle formulation engagerait les élèves de 4^{ème} dans une réflexion sur le fonctionnement des volcans ? Le groupe choisit de demander aux élèves de produire un schéma et un texte qui expliquent comment fonctionne un volcan et l'origine des matériaux volcaniques.
- L'organisation générale de la séance qui a été planifiée comme suit :
 1. Demander aux élèves de répondre individuellement à la consigne de départ précisée par le groupe de recherche.
 2. Ramasser les productions initiales individuelles afin d'éviter que le choix des élèves, lors du travail de groupe, ne tombe directement sur telle ou telle production sans aucune discussion ou débat préalable.
 3. Répartir les élèves en groupes homogènes par rapport aux conceptions (6 groupes) et leur demander de produire des affiches communes après discussion.
 4. Prévoir la présentation, au cours de la première séance, de deux affiches (deux groupes) choisies par l'enseignante et les didacticiens et ayant des explications contrastées. Les quatre autres affiches seront présentées lors de la deuxième séance.

Le groupe de recherche s'occupe à la fin de cette réunion de la préparation matérielle de la première séance (affiches nécessaires, crayons, etc.).

Séance 1

Les élèves répondent individuellement et par écrit à la consigne suivante : « *Par un schéma et un texte, expliquez comment fonctionne un volcan et d'où viennent les matériaux volcaniques ?* ».

Puis, les productions élaborées sont ramassées et les élèves sont répartis – dans la mesure du possible par l'enseignante et les chercheurs assistants à la séance⁷⁵ – en groupes proches et homogènes du point de vue des conceptions et du fonctionnement. Six groupes ont été constitués : 5 groupes de 4 élèves et 1 groupe de 5 élèves. Pendant ce travail de groupe, les élèves sont chargés de proposer une production commune (schéma et texte) sur une affiche en se basant sur ce qu'ils avaient déjà réalisé de manière individuelle. Cette séance s'achève ainsi sans que le temps ne permette la présentation prévue des affiches de deux groupes. L'enseignante récupère les productions de groupe (annexe 8) produites par la classe. Celles-ci seront étudiées, en plus des productions individuelles (annexe 7), par le groupe de recherche et serviront à la préparation des séances suivantes. La présentation prévue, lors de cette séance, de deux affiches de groupe n'a pas pu avoir lieu à cause des contraintes de temps.

Après la séance 1 : deuxième réunion du groupe de recherche

Cette réunion consiste à préparer le débat scientifique prévu en classe à partir des affiches de groupe. L'équipe de recherche pense cette situation dans l'objectif de mettre en jeu les conceptions des élèves sur le fonctionnement du volcanisme et de les engager dans un travail de problématisation et de construction des raisons. Il s'agit de faire produire aux élèves des argumentations concernant leurs explications. Ainsi, les modèles explicatifs de groupe sont étudiés, interprétés et analysés puis **un ordre de passage des six productions** est établi (annexe 8). Habituellement, l'ordre de passage des groupes est choisi de la conception la moins élaborée à celle qui se rapproche le plus des savoirs actuels. L'équipe de recherche a choisi de commencer une explication moins fournie puis d'alterner les modèles explicatifs de manière à éviter l'ennui des élèves et à varier les discussions lors du débat.

De plus, une **série de questions possibles à poser aux élèves** de chaque groupe a été construite (figure 34 pour un exemple et annexe 8 pour l'intégralité des questions relatives aux six affiches). Ces questions ont pour objectif principal de mieux armer l'enseignante afin qu'elle puisse emmener les élèves à problématiser au cours du débat scientifique. Elles poussent les élèves à montrer pourquoi ils sont parvenus à leur explication et pas à une autre ce qui les aidera à exprimer les raisons sous-jacentes à ces explications. En effet, l'accès aux savoirs problématisés demande d'interroger les idées explicatives présentées lors des débats scientifiques en termes du possible, de l'impossible, du nécessaire et du contingent. « Les

⁷⁵ Deux didacticiens, Denise Orange et Hanaà Chalak, ont assisté aux séances réalisées en classe.

questions pertinentes ne sont pas : “est-ce exact ?” Mais : “comment est-ce possible ?”, “peut-il en être autrement ?” » (Orange, 2007c, p.87). Ces formes de questionnement incitent les élèves à aller au bout de leurs explications et les confrontent à des nécessités ou à des impossibilités de fonctionnement. De plus, elles les emmènent à douter de leur explication et d'être demandeurs d'autres choses.

<p>→ → = Remontée de lave. • • = roches en fusion</p> <p>Fonctionnement du volcan, il grandit et s'apprête à exploser</p> <p>VERDURE →</p> <p>chambre magmatique</p> <p>TERRE</p> <p>de fonctionnement du volcan est du à la Remontée du magma. Quand le magma arrive en haut du volcan détruit le cratère et provoque une explosion de lave liquide ou de panache de cendres. Au fur et à mesure que le magma monte, le volcan s'agrandit et se prépare à une explosion. Les matériaux volcanique viennent d'infusion (ex : la panache avec l'eau donne de la boue et la lave avec de l'eau donne des roches.</p>	<p><u>Groupe 2</u> : Amélie, Léo, Johanna, Maxime</p> <p>« Le fonctionnement du volcan est du à la remontée du magma. Quand le magma arrive en haut du volcan détruit le cratère et provoque une explosion de lave liquide ou de panache de cendres. Au fur et à mesure que le magma monte, le volcan s'agrandit et se prépare à une explosion. Les matériaux volcanique viennent d'infusion (ex : la panache avec l'eau donne de la boue et la lave avec de l'eau donne des roches). »</p> <p>Questions possibles à poser :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pourquoi est-il possible qu'il y ait une chambre magmatique ici et pas ailleurs ? - Comment expliquez-vous la remontée du magma ? - Pourquoi le volcan « s'agrandit-il » avec la remontée du magma ? - Que se passe-t-il lorsque la chambre magmatique se vide ? - Qu'est-ce qu'il y avait avant le volcan ?
--	--

Figure 34. Exemple de production de groupe avec les questions possibles envisagées.

Après avoir étudié les modèles explicatifs, déterminé l'ordre de passage des groupes et élaboré les questions possibles à poser pour chaque production, le groupe de recherche réfléchit à la manière avec laquelle il faudrait clôturer la phase de débat scientifique pour garder une trace écrite des argumentations évoquées. Il décide – en s'inspirant des recherches précédentes réalisées par certains de ses membres sur le fonctionnement des mouvements du bras (Orange & Orange Ravachol, 2007) – de construire trois « caricatures » à partir des six affiches de groupe puis de demander aux élèves si ces explications peuvent ou non fonctionner et pourquoi. Le document conçu (figure 35, p.185) sera introduit à la fin du débat. Les caricatures représentent

précisément trois prototypes d'explications (A, B, C) retrouvées dans les productions de groupe (figure 35) :

- L'explication A fait référence à un fonctionnement local du magmatisme sans lien avec la structure de la Terre. Le magma se retrouve stocké ou se forme dans une poche dans le volcan. Lors des éruptions volcaniques il remonte par la cheminée.
- L'explication B se rapporte à une production centrale qui se fait au niveau du noyau terrestre. Le magma remonte des profondeurs de la Terre par un conduit et peut être stocké dans une poche dans le volcan.
- L'explication C représente une production magmatique plus ou moins profonde. Ce n'est pas dans le volcan ni dans le noyau que se forme ou se stocke le magma mais à une certaine profondeur située entre les deux.

Un tableau à remplir individuellement accompagne ces caricatures et propose aux élèves de préciser si les trois explications peuvent ou non fonctionner et pourquoi. L'introduction de ce document (figure 35) suite au débat, représente une façon de sortir de ce dernier en recentrant sur les principaux modèles explicatifs apparus dans la classe et qui auront été présentés et discutés du point de vue de leur fonctionnement ou non. C'est une abstraction du débat proposée par le groupe de recherche et l'objectif serait de voir si les élèves s'y retrouvent et suivent l'enseignante dans cette abstraction. De plus, cet écrit permet de garder une trace du débat et de voir ce que les élèves en ont retenu du point de vue des nécessités discutées. Il génère des arguments écrits et constitue un moyen de conserver une trace écrite en adéquation avec les objectifs de recherche de la séquence. Il fera le pont entre le débat et le travail sur les documents des séances suivantes.

Par ailleurs, l'équipe de recherche envisage que certaines explications fournies par les élèves pendant le débat soient différentes de l'interprétation qui en ait été faite à partir des productions de groupe. Pour cela, il a été prévu que le didacticien assistant à la séance dispose d'un support transparent sur lequel il reproduira les éventuelles explications qui diffèrent de celles figurant dans le document préparé (figure 35).

Préciser pour chacune des explications si elle peut ou non fonctionner et pourquoi.

	Peut-elle fonctionner ? (oui/non)	Pourquoi ?
Explication A		
Explication B		
Explication C		

Figure 35. Document préparé par le groupe de recherche et distribué aux élèves de 4^{ème} après le débat scientifique.

Séance 2 et 3

En début de séance, un rappel du problème de départ est réalisé puis chaque groupe présente son affiche selon l'ordre de passage choisi par l'équipe de recherche. Les élèves lisent leur texte, expliquent leur schéma et l'enseignante ainsi que le groupe classe posent des questions, demandent des explications et un débat s'instaure dans la classe. A la fin de ce débat, le document préparé par le groupe de recherche (figure 35) est distribué aux élèves qui indiquent individuellement et par écrit si chacune des explications proposées peut ou non fonctionner en argumentant leur choix. L'enseignante récolte les productions argumentatives individuelles des élèves afin que le groupe de recherche puisse les étudier lors de la réunion *a posteriori*. Ces productions (exemple en figure 36) représentent le premier écrit intermédiaire (E1) produit par les élèves lors de la séquence forcée.

Thèse 101

Préciser pour chacune des explications si elle peut ou non fonctionner et pourquoi.		
	Peut-elle fonctionner ? (oui/non)	Pourquoi ?
Explication A	NON	Car la chambre magmatique se situe plus haut que la surface de la Terre. Donc la température n'est pas assez élevée pour ronger la roche et la faire fondre.
Explication B	NON	Car moi je pense que le noyau de la terre est constitué d'un matériau qui fait qui attire toutes choses vivantes au moment à la surface de la Terre. Il ne peut donc pas avoir de magma au Noyau de la Terre.
Explication C	OUI	Car la chambre magmatique se trouve en profondeur dans le sous-sol et donc la température est assez élevée pour ronger la roche et la faire fondre.

Figure 36. Exemple de production argumentative individuelle produite par un élève après le débat (Ecrit 1).

Après les séances 2 et 3 : troisième réunion de recherche

Cette réunion est destinée à la préparation de la dernière phase de la séquence. Le groupe de recherche exploite les productions individuelles de la fin de la séance 3 et effectue une synthèse des raisons (ou arguments) avancées par les élèves « pour » et « contre » le fonctionnement des trois explications (annexe 9). Les raisons révèlent une grande variété et il apparaît pour l'équipe

que celles avancées « contre » le fonctionnement des caricatures sont plus nombreuses que celles « pour » leur fonctionnement. Pour arriver à un texte commun à la classe à partir des diverses argumentations, le groupe de recherche sélectionne, dans les écrits individuels E1 (annexe 9), neuf raisons qui font que les explications ne peuvent pas fonctionner et prévoit de faire travailler les élèves sur un classement de ces raisons en deux catégories. Le tableau de la figure 37 est ainsi préparé. Les neuf raisons sont principalement liées à des impossibilités de fonctionnement selon le modèle de formulation : « *ça ne fonctionne pas parce que...* ». Ces raisons seront proposées aux élèves sans faire référence aux modèles auxquels elles s'appliquent. Elles portent, en négatifs, les deux nécessités retenues dans les objectifs pédagogiques de la séquence : nécessité de la formation et de la remontée du magma. Par exemple : « *Ça ne peut pas fonctionner parce que le magma ne peut pas remonter* » s'inverse en « *Pour que cela fonctionne, il est nécessaire que le magma remonte* ». De plus, la désignation du nombre de catégories, dans la consigne, semble indispensable pour imposer un classement aux élèves. Ces choix, faits par le groupe de recherche, reprennent des procédures déjà utilisées dans une autre séquence forcée concernant le fonctionnement des mouvements du bras (Orange & Orange Ravachol, 2007).

Répartir les neuf raisons avancées par la classe qui expliquent pourquoi ça ne fonctionne pas en deux catégories.

A- Ça ne fonctionne pas parce que la chambre n'est pas assez profonde	B- Ça ne fonctionne pas parce que la température n'est pas assez élevée pour que ça fonde	C- Ça ne fonctionne pas car la chambre n'est pas approvisionnée en magma
D- Ça ne fonctionne pas parce que la poche est trop profonde	E- Ça ne fonctionne pas car le magma ne peut pas remonter.	F- Ça ne fonctionne pas car il n'y a aucune production de magma
G- Ça ne fonctionne pas car il ne fait pas assez chaud pour former du magma	H- Ça ne fonctionne pas car il n'y a pas de cheminée pour que le magma puisse remonter	I- Ça ne fonctionne pas car c'est très éloigné de la surface de la Terre

Figure 37. Les raisons du non fonctionnement des explications proposées au classement.

Un plan des séances suivantes est établi par l'équipe de recherche (annexe 11) et des choix sont faits pour une meilleure gestion du temps consacré à cette dernière partie de la séquence. Ainsi, l'équipe prévoit que le travail de classement en deux catégories soit réalisé d'abord en binôme puis collectivement et que les titres des catégories soient proposés par la classe pendant la phase collective. Par la suite, il s'agit de garder ces deux titres au tableau (les titres correspondent aux

raisons de non fonctionnement) et de construire par une certaine inversion, l'ébauche du texte de savoir final selon le modèle : « *Comment c'est dans la Terre pour que ...* ».

Le groupe construit ensuite la documentation scientifique (annexe 10) qui sera utilisée par les élèves pour finaliser le texte de savoir et repérer les solutions qui réalisent les nécessités identifiées. La réunion de travail se termine en dressant une liste de matériel nécessaire au déroulement des deux dernières séances (étiquettes de raisons, feuilles A3, etc.).

Séances 4 et 5

L'enseignante commence la séance en indiquant aux élèves que leurs écrits de la séance précédente (E1) ont été étudiés et que les raisons « contre » le fonctionnement des explications se sont avérées plus nombreuses que celles « pour » leur fonctionnement. Pour cela, leur travail portera sur une sélection de neuf raisons de non fonctionnement des modèles. Par binôme, elle leur demande de répartir ces neuf raisons dont ils disposent, dans une pochette d'étiquettes, en deux catégories sur une feuille A3⁷⁶. La figure 38 ci-dessous donne à voir un exemple de catégorisation réalisée par un binôme d'élèves.

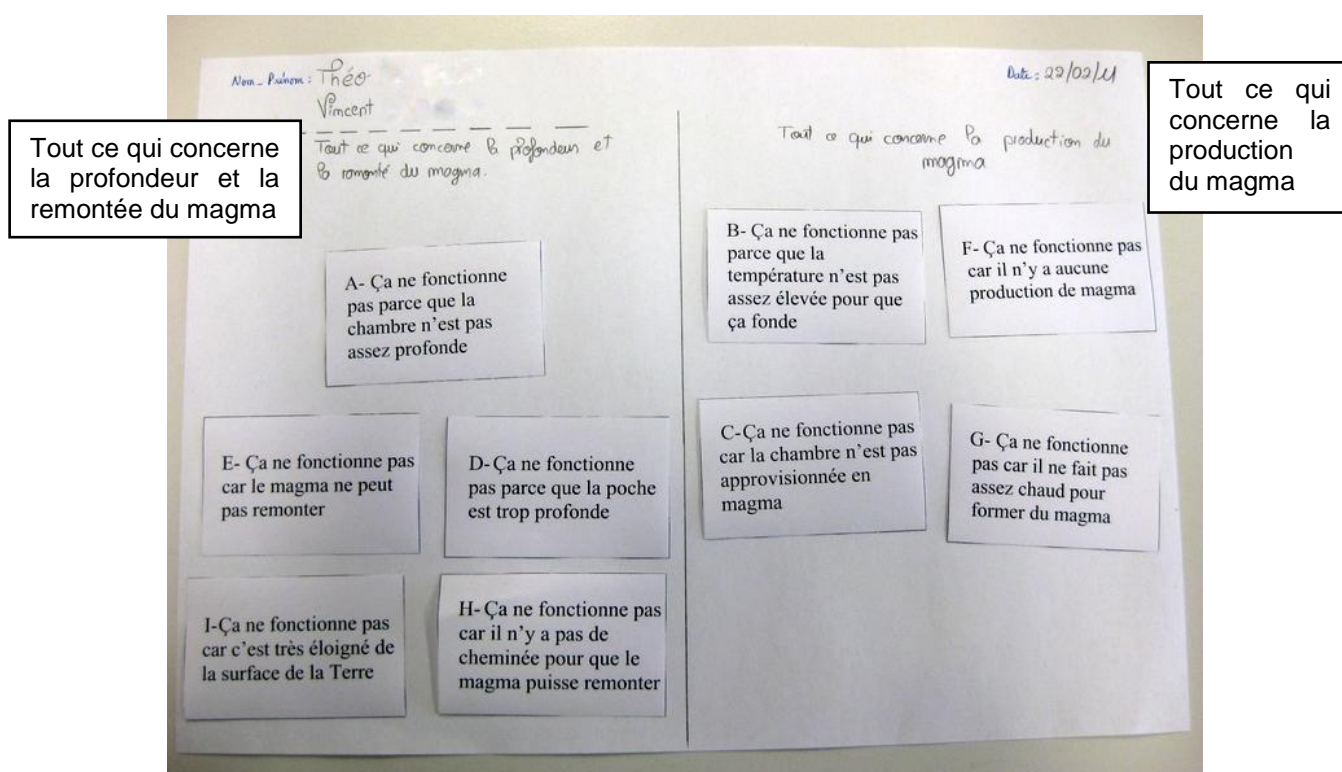


Figure 38. Exemple de catégorisation des raisons par un binôme d'élèves (Théo et Vincent).

⁷⁶ Les élèves disposaient du tableau de la figure 37 et des neuf raisons sous forme d'étiquettes pour qu'ils puissent les répartir et les déplacer sur la feuille A3 (voir plan des séances 4 et 5 en annexe 11).

La mise en commun de ce travail se fait collectivement au tableau. L'enseignante demande à un binôme de donner sa répartition qu'elle reproduit au tableau en plaçant avec des aimants les étiquettes correspondantes (figure 39). Le groupe classe se met d'accord sur un classement et un titre est donné à chacune des deux catégories : la production du magma ; la profondeur et la remontée du magma (figure 39). Ces titres sont liés aux raisons de non fonctionnement : « ça ne fonctionne pas parce qu'il n'y a pas production de magma et parce que le magma ne peut pas remonter ». Cet écrit, produit en binôme puis collectivement, représente le deuxième écrit intermédiaire (E2) de la séquence.

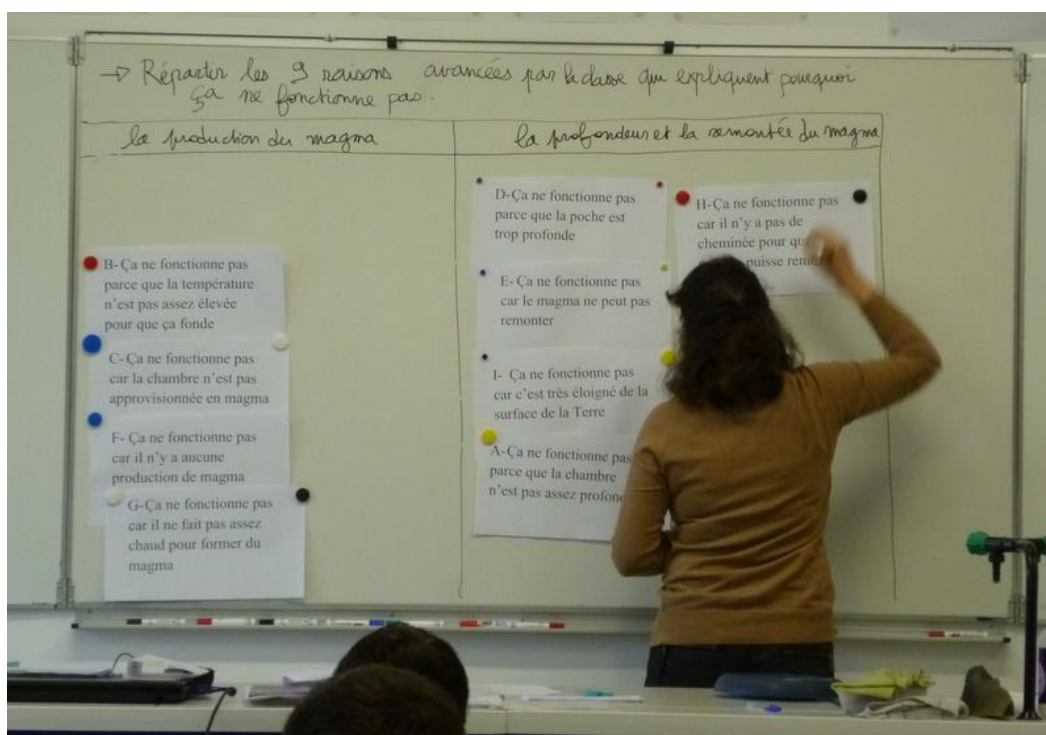


Figure 39. La répartition consensuelle des raisons de non fonctionnement en deux catégories avec les titres donnés (Ecrit 2).

(A gauche : la production du magma : étiquette B, C, F, G. A droite : la profondeur et la remontée du magma : étiquette D, E, I, A, H).

Après avoir catégorisé les raisons et donné des titres aux deux catégories obtenues, l'enseignante enlève les étiquettes avec les raisons en gardant les deux titres et introduit le tableau ci-dessous en effectuant une certaine inversion (figure 40). En effet, puisque cela ne fonctionne pas pour les raisons citées, il s'agit de voir comment c'est dans la Terre pour que le magma puisse se former et remonter. Ce texte constitue l'ébauche du texte de savoir final sur le fonctionnement des volcans (E3a).

Comment c'est dans la Terre pour que ça marche ?	
Il faut que le magma remonte	Il faut que le magma se forme

Figure 40. Ebauche du texte de savoir final sur le fonctionnement des volcans (E3a).

Par la suite, le document scientifique préparé par le groupe de recherche (annexe 10) est distribué aux élèves qui l'exploitent afin de voir « comment c'est dans la Terre pour que le magma se forme et remonte ». Ce travail s'effectue collectivement au vu des contraintes temporelles et aboutit à un texte de savoir final écrit au tableau (E3b) et construit par le groupe classe.

Comment c'est dans la Terre pour que ça marche ?	
Il faut que le magma remonte	Il faut que le magma se forme
Le magma est poussé par la pression des gaz. Cela crée des failles et des cheminées pour que le magma remonte. Son lieu de fabrication peu profond par rapport à l'échelle de la Terre permet sa remontée vers la surface.	La roche fond à des profondeurs de la Terre (100 à 200km) à des températures d'environ 1000° à 2000° et sous une certaine pression. Cela se forme à environ -70 à -200 km de profondeur. La roche fond et produit du magma : un mélange de gaz et de roche fondue.

Figure 41. Le texte de savoir final produit par la classe sur le fonctionnement des volcans (Ecrit 3b).

Après cette description de la séquence forcée construite par le groupe de recherche, nous exposons ses caractéristiques générales.

1.3 Caractéristiques générales de la séquence construite par le groupe de recherche

Nous reprenons la notion de synopsis pour identifier les caractéristiques de la séquence d'enseignement. Le tableau synoptique construit (tableau 11) permet d'effectuer une première analyse globale de la séquence étudiée (Tiberghien & al., 2007). Il regroupe plusieurs dimensions de la séquence que nous avons déterminées de manière à les mettre en relation avec nos questionnements de recherche (étapes de la séquence, organisation de la classe, tâches réalisées par la classe, productions langagières, forme, nature et auteur des écrits produits).

Pour cette séquence, les productions langagières orales et écrites (discussions et écrits) sont nombreuses et diverses (tableau 11). Les échanges oraux se font en groupe, en binôme et collectivement. Les écrits initiaux révèlent les idées explicatives des élèves et leurs conceptions, les écrits intermédiaires (E1 et E2) concernent les raisons sous-jacentes à ces idées explicatives et l'écrit final (E3a et E3b) présente le produit terminal de ces deux phases. Les écrits ont des formes variées : schéma, tableau et texte. Ces productions ont chacune une fonction déterminée au sein de la séquence et sont importantes dans la démarche de problématisation suivie.

La présence marquée des productions langagières provient de l'importance qui leur est accordée dans la problématisation et dans les apprentissages par l'équipe didactique du CREN. Cependant, nous soulignons que les multiples écrits sont construits par les élèves ou collectivement par le groupe classe sauf l'ébauche du texte de savoir final (figure 40) introduite par l'enseignante. En effet, les écrits ne sont pas exclusivement l'œuvre de cette dernière comme c'était le cas lors de la séquence ordinaire étudiée précédemment. Quant à l'organisation de la classe, elle alterne entre une organisation individuelle, en binôme, en groupe et collective.

Cette séquence a été construite selon le cadre théorique de la problématisation dans une volonté d'impliquer les élèves dans la construction de savoirs dans le domaine du magmatisme et de textes qui soient problématisés et non propositionnels. Dans quelle mesure le groupe de recherche a-t-il réussi à atteindre ces objectifs ? Avec quelles pratiques, quelles difficultés et sous quelles conditions ? Nous commençons par apporter des éléments de réponse à ces questions en analysant les écrits produits lors de cette séquence forcée.

Etapes de la séquence	Organisation de la classe	Tâches réalisées par la classe	Productions langagières	Forme des écrits produits	Nature des écrits	Auteur des écrits
Première séance	Individuelle	Produire un schéma et un texte pour expliquer comment fonctionne un volcan et d'où viennent les matériaux volcaniques	Ecrits individuels	Schéma légendé et texte	Ecrits initiaux	Elève
	En groupe	Produire une explication commune en groupe et un écrit de groupe	Echanges oraux - discussions de groupe Ecrits de groupe	Schéma légendé et texte		Groupe d'élèves
Deuxième et troisième séance	Collective	Débattre sur les productions de groupe	Echanges oraux - débat collectif (arguments oraux)	-	Ecrits intermédiaires	Elève
	Individuelle	Produire des raisons « pour » et « contre » le fonctionnement des caricatures explicatives	Productions individuelles écrites de raisons (E1)	Texte (tableau)		
Quatrième et cinquième séance	Par binôme puis collective	Répartir les raisons de non fonctionnement proposées en deux catégories	Echanges oraux - discussion par binôme puis collective et classement des raisons en deux catégories (E2)	Tableau	Ecrits finaux	Binôme d'élèves puis groupe classe
	Collective	Introduire par une sorte d'inversion l'ébauche du texte de savoir final Exploiter collectivement la documentation scientifique Compléter l'ébauche du texte final suite à l'exploitation de la documentation	Ebauche du texte de savoir final sur le fonctionnement des volcans (E3a) Echanges oraux collectifs Texte de savoir final (E3b)	Texte (tableau) - Texte (tableau)		Enseignante Groupe classe

Tableau 11. Synopsis de l'organisation de la séquence forcée de 4^{ème} et des activités langagières mises en œuvre.

2. Caractérisation des différents écrits produits lors de la séquence forcée

Nous nous intéressons aux différents écrits élaborés pendant la séquence forcée. Après avoir déterminé leur forme, leur nature et leur place dans la situation forcée étudiée (tableau 11), nous étudions leur contenu en nous focalisant sur ce qu'ils révèlent concernant le fonctionnement des volcans et l'origine des matériaux volcaniques. La figure 42 ci-dessous indique les écrits construits pendant la séquence forcée que nous analysons d'une manière détaillée et pointe les documents introduits par le groupe de recherche pour arriver à certains de ces écrits.

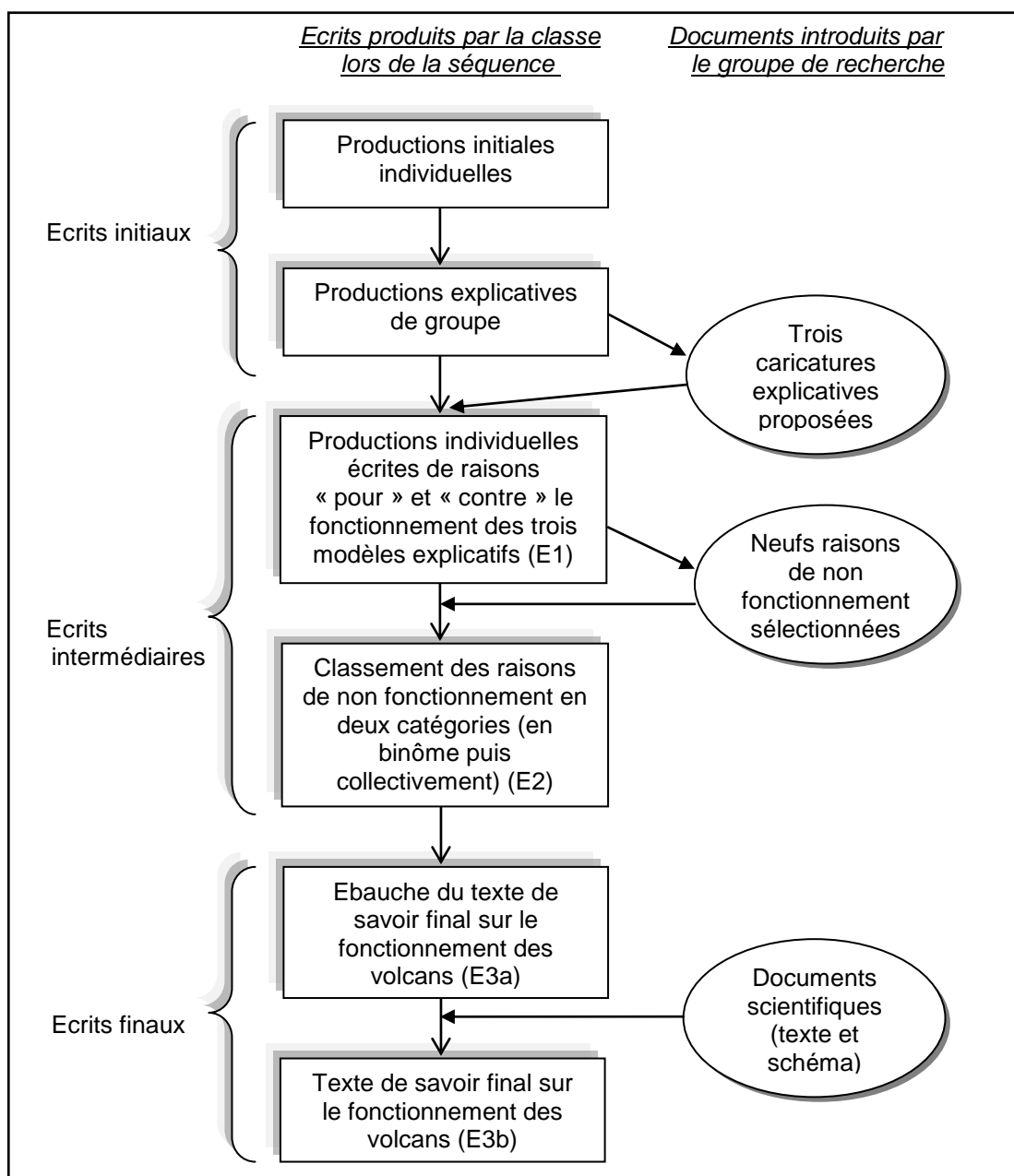


Figure 42. Les écrits produits par la classe et les documents introduits par le groupe de recherche lors de la séquence forcée de 4^{ème}.

2.1 Les écrits initiaux individuels et de groupe

Les productions initiales sont constituées d'un schéma légendé accompagné d'un texte. Elles ont été produites individuellement (annexe 7) puis en groupe (annexe 8) par les élèves de la classe de 4^{ème} concernée. Ces productions mettent en avant les modèles spontanés des élèves et leurs conceptions concernant le fonctionnement des volcans et l'origine des matériaux volcaniques. Le tableau 12 ci-dessous montre la mise en catégorie de ces productions en fonction de l'explication qu'elles donnent à voir et des six catégories d'explication définies *a posteriori*.

	Productions individuelles (PI)	Productions de groupe (PG)
Explication locale magmatique		
Catégorie 1 : Volcan sans structure interne plus ou moins rempli de lave ou de roches : origine superficielle de la lave en lien avec le volcan.	4	-
Catégorie 2 : Présence d'un réservoir superficiel fermé situé dans le volcan avec un conduit permettant d'évacuer la lave : origine superficielle de la lave.	11	2
Explication « intermédiaire » magmatique		
Catégorie 3 : Réservoir sous le volcan, fermé à l'origine du magma avec un conduit lui permettant de communiquer avec l'édifice volcanique : origine peu profonde du magma à réservoir fermé avec un début de référence à la Terre.	3	2
Catégorie 4 : Volcan rempli de lave mais dont l'origine est profonde (sous le volcan) : origine plus ou moins profonde du magma avec une référence à la Terre difficile à clarifier.	1	-
Explication centrale magmatique		
Catégorie 5 : Le noyau apparaît comme à l'origine du magma. Les productions concernées sont avec ou sans conduits, avec ou sans réservoir : origine profonde du magma.	1	1
Explication « floue » du magmatisme		
Catégorie 0 : Le cône volcanique est représenté sans détail de structure ce qui signifie que l'origine du magma reste floue, non identifiée ou difficile à identifier : origine floue du magma.	5	1
Total	25	6

Tableau 12. Fonctionnement des volcans et origine des matériaux volcaniques dans les productions individuelles et de groupe des élèves de 4^{ème} (séquence forcée).

Les explications spontanées des élèves concernant le fonctionnement du volcan et l'origine des matériaux volcaniques sont variées :

- 15 productions individuelles (PI) sur 25 et 2 productions de groupe (PG) sur 6 situent l'origine des matériaux au niveau de l'environnement local du volcan. La lave a une origine superficielle : soit elle remplit le volcan (4 PI sur 25), soit elle est contenue dans un réservoir fermé situé dans le volcan (11 PI sur 25 et 2 PG sur 6). Ainsi, l'explication du volcanisme se fait sans situer le volcan dans un fonctionnement lié à celui du globe terrestre. L'étude des textes accompagnant ces schémas montre, au premier abord, que certains élèves se situent dans une problématique de formation du magma dans le volcan : « *Quand le volcan dort, il fabrique ces matériaux (la lave, le magma...)* » ; « *Il se forme grâce à la formation du magma* », d'autres dans une problématique de préexistence de ce magma : « *Quand le volcan est en repos, la lave à l'intérieur bouillonne avec la chaleur et quand il y a une éruption la lave est éjectée avec la pression de la chaleur, et les matériaux viennent de la lave* ».
- 4 PI sur 25 et 2 PG sur 6 révèlent un réservoir situé sous le volcan ou un magma remplissant le « sous-sol ». Ces productions présentent un début de référence à la Terre mais qui reste difficile à évaluer concrètement. Certains de ces écrits évoquent une formation du magma sous le volcan grâce à une fusion de la roche : « *La lave est formée dans la chambre-magmatique, quand elle est en fusion avec la roche* ». Par ailleurs, l'écrit du troisième groupe avance que les matériaux volcaniques proviennent du sous-sol mais s'interroge quant à leur formation : « *Comment sont fabriqués le panache et la lave ?* ».
- 1 PI sur 25 et 1 PG sur 6 voient le volcanisme comme un phénomène ayant pour origine le noyau de la terre. La production individuelle concernée souligne que « *le magma vient du noyau terrestre qui est très chaud. Lors de séismes le magma remonte à la surface* ». Alors que pour celle réalisée en groupe, « *la remontée du magma qui vient du globe, engendre la création d'une chambre magmatique* ».

Les explications initiales des élèves de 4^{ème} sur le fonctionnement des volcans sont manifestement hétérogènes. Un nombre important de productions met en évidence un fonctionnement local du volcan tandis que peu d'écrits se rapportent à une explication centrale faisant référence au globe terrestre. Cependant, l'évaluation du degré de cette référence était difficile à identifier pour certaines productions. De plus, nous soulignons l'absence de mention des plaques tectoniques et d'une production de magma à des endroits spécifiques du globe comme c'est le cas de l'explication actuelle globale du magmatisme.

2.2 Les écrits intermédiaires E1 et E2

Deux écrits intermédiaires E1 et E2 ont suivi les productions explicatives individuelles et de groupe des élèves. Le premier clôture la phase de débat scientifique et concerne la production d'arguments « pour » et/ou « contre » le fonctionnement des caricatures proposées aux élèves. Le deuxième représente le classement en deux catégories des neuf raisons de non fonctionnement des modèles. Nous étudions de plus près le contenu et les caractéristiques de ces deux textes en vue de déceler s'ils portent d'éventuelles traces de problématisation ou bien s'ils se limitent à l'exposition des solutions sous une forme propositionnelle. Nous identifions leur fonction au sein de la séquence ainsi que les liens qu'ils entretiennent les uns avec les autres et avec les écrits initiaux.

2.2.1 Etude des argumentations pour et contre le fonctionnement des modèles explicatifs (E1)

Suite au débat scientifique portant sur les affiches de groupe, le document préparé par le groupe de recherche (figure 35, p.185) est distribué aux élèves. Il représente trois explications différentes construites à partir des affiches de groupe et les élèves indiquent si chacune des explications pourrait ou non fonctionner en argumentant. L'annexe 9 met en avant un tableau résumant les argumentations individuelles produites par les élèves. Nous procédons, dans un premier temps, à une étude quantitative de ces argumentations. Ensuite, nous examinons d'une manière qualitative celles avancées pour chacune des explications.

Etude quantitative des argumentations

Notre étude quantitative consiste à mettre en évidence le nombre d'argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement des trois explications (ou caricatures) proposées aux élèves. Le tableau 13 ci-dessous explicite les résultats de cette étude.

Nombre d'argumentations	Explication A	Explication B	Explication C	Total
Argumentations « pour » le fonctionnement	0	18	15	33
Argumentations « contre » le fonctionnement	24	6	9	39
Absence de réponse	1	1	1	3
Total	25	25	25	75

Tableau 13. Nombre d'argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement des trois caricatures d'explications proposées aux élèves de 4^{ème}.

Nous remarquons que, suite au débat, aucun argument n'a été avancé en faveur de la possibilité de fonctionnement de l'explication locale A. Effectivement, cette dernière ne peut plus fonctionner pour l'ensemble des élèves (24 argumentations « contre ») sachant qu'un nombre important de productions initiales (15 individuelles et 2 de groupe) se positionne dans un cadre local magmatique (tableau 12, p.194). Nous pouvons ainsi constater que la construction de l'impossibilité de fonctionnement de l'explication A a été développée pendant le débat scientifique. Les argumentations des élèves semblent être exclusivement en faveur des explications B et C avec une légère préférence pour l'explication B (18 pour la B et 15 pour la C).

Par ailleurs, le tableau 13 montre que, pour l'ensemble des explications, les arguments « contre » le fonctionnement sont plus nombreux que ceux « pour » même si le nombre de ces derniers reste quand même assez important (39 « contre » et 33 « pour »).

Suite à cette étude quantitative des argumentations produites par les élèves à l'issue du débat, nous effectuons une analyse qualitative de leur contenu.

Etude qualitative des argumentations

Afin de réaliser l'analyse de contenu des argumentations spécifiques à chacune des explications, nous avons catégorisé les arguments produits selon les idées majeures qu'ils reflètent (voir

tableau 14, 15 et 16). Nous reprenons, dans ce qui suit, les trois explications A, B et C en étudiant les raisons correspondantes :

- L'explication A représente un fonctionnement local du magmatisme sans lien avec la structure de la Terre. Le magma est stocké ou fabriqué dans une poche dans le volcan. L'étude des raisons produites suite au débat montre que cette explication ne peut plus fonctionner pour l'ensemble des élèves. Le tableau 14 ci-dessous met en avant la catégorisation des arguments « contre » le fonctionnement de l'explication A. Celle-ci ne fonctionne plus pour des raisons liées majoritairement aux conditions de formation du magma et à la position de la chambre qui, pour les élèves, devrait être plus en profondeur ou dans le sous-sol puisque c'est en profondeur que la température est assez élevée pour former du magma. De plus, quelques arguments relient le non fonctionnement de l'explication A à l'impossibilité de la remontée du magma, au manque d'approvisionnement de la chambre magmatique et de production de laves. Les élèves ont ainsi abandonné les explications locales retrouvées en nombre important dans leurs productions initiales. Il semble, d'après les arguments avancés, que la formation du magma nécessiterait une chambre située en profondeur et/ou une température suffisamment élevée pour fondre la roche.

Ça ne fonctionne pas car :	Argumentations contre le fonctionnement de l'explication A
il ne fait pas assez chaud pour former du magma	<ul style="list-style-type: none"> - Car la chambre se situe plus haut que la surface de la Terre. Donc la température n'est pas assez élevée pour ronger la roche et faire fondre. - Car le lieu n'est pas assez chaud pour former du magma. - Elle ne peut pas fonctionner car la chambre n'est pas assez près du noyau donc pas assez chaude. - Non, car le magma ne vient pas du noyau donc la roche ne fond pas avec la chaleur terrestre et il n'y a pas de lave.
la chambre n'est pas assez profonde ou n'est pas dans le sous-sol	<ul style="list-style-type: none"> - La chambre magmatique n'est pas assez profonde pour avoir une éruption. - La chambre magmatique n'est pas assez profonde. - Ça ne peut pas fonctionner car la chambre magmatique ne se situe pas en profondeur dans le globe terrestre donc tout le magma qui vient du globe terrestre ne peut pas remonter dans la cheminée pour ensuite causer une éruption(*). - L'explication A ne fonctionne pas car le foyer est à l'extérieur du globe terrestre. - Ça ne fonctionne pas car la chambre magmatique est trop haute. - Car la chambre magmatique est pas dans le sous-sol. - Car la chambre magmatique n'est pas dans le sous-sol mais dans le sol. Donc ça ne marche pas. - Car la chambre magmatique est formée dans le sous-sol, pas à la surface. - Car elle ne rentre pas dans le globe terrestre donc il n'y a pas de sous-sol. Et sans sous-sol, il ne peut y avoir de lave. - Je pense que la chambre magmatique dans le sous-sol. - Car la chambre magmatique est à l'extérieur et non dans le sous-sol, donc ça ne marchera pas.
ce n'est pas assez profond et il ne fait pas assez chaud	<ul style="list-style-type: none"> - Car la chambre magmatique n'est pas assez profonde et il ne fait pas assez chaud. - Ça ne peut pas marcher car le magma doit se former dans le sous-sol où il fait plus chaud et à l'endroit du sol, il ne fait pas assez chaud.
le magma ne peut pas remonter	<ul style="list-style-type: none"> - On ne peut pas avoir une éruption car il n'y a pas de cheminée pour que le magma puisse remonter vers le sol. - Ça ne peut pas fonctionner car la chambre magmatique ne se situe pas en profondeur dans le globe terrestre donc tout le magma qui vient du globe terrestre ne peut pas remonter dans la cheminée pour ensuite causer une éruption(*).
il n'y a aucune production de lave ni d'approvisionnement de la chambre en lave	<ul style="list-style-type: none"> - Car il n'y a aucune production de lave, aucune explication d'éjection de la lave. - Car la chambre n'est pas approvisionnée en lave.
la poche n'est pas en éruption	<ul style="list-style-type: none"> - Parce que la poche n'est pas en éruption (en haut du volcan) donc il ne peut pas fonctionner. - Parce que la poche n'est pas en éruption.
il n'y a pas de nappe phréatique	<ul style="list-style-type: none"> - Car il n'y a pas de nappe d'eau phréatique. - Car il manque la nappe phréatique.

Tableau 14. Catégorisation des argumentations contre le fonctionnement de l'explication A avancées par les élèves de 4^{ème}.

- L'explication B se rapporte à une production centrale magmatique qui se fait au niveau du noyau terrestre. Le magma remonte des profondeurs terrestres par un conduit et peut être stocké dans une chambre située dans le volcan. Les arguments des élèves sont favorables au fonctionnement de cette explication. En effet, pour un nombre important d'entre eux (tableau 15 ci-dessous), elle pourrait fonctionner parce que le magma est produit (ou se situe) en profondeur, au niveau du noyau, et qu'à cet endroit la température est suffisamment élevée pour qu'il se forme. Certaines formulations d'élèves font référence à une formation du magma, d'autres à une préexistence de ce magma en profondeur.

Cependant, l'explication B ne pourrait pas fonctionner, pour quelques élèves, parce que le noyau est très profond et très éloigné du volcan pour pouvoir l'alimenter. Le magma aurait effectivement du mal à remonter et à traverser toute cette distance. De plus, il est impossible qu'il y ait de la lave dans le noyau qui ne joue aucun rôle dans les éruptions volcaniques.

Les arguments formulés indiquent majoritairement la possibilité de fonctionnement de l'explication B. Après avoir abandonné les explications locales (exp. A), il apparaît que les élèves favorisent celles où la chambre magmatique se situe en profondeur et où la température est suffisamment élevée pour créer du magma.

Ça fonctionne car :	Argumentations pour le fonctionnement de l'explication B
<p>le magma se situe au niveau du noyau (ou provient, ou est produit dans le noyau)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Oui car le magma est dans le noyau et elle monte vers la chambre magmatique avec la propre pression quand il y a un trop plein. Le magma monte ensuite au-dessus comme elle l'a fait avant. - Elle fonctionne car l'explication B est reliée au noyau, centre du globe terrestre pour s'évacuer après. - Car le noyau approvisionne le volcan en lave (magma). - Parce que le magma du noyau est naturel et déjà fondu et la chaleur qui s'y dégage remonte au fur et à mesure, faisant fondre la roche et formant du magma. - Car je pense que grâce au noyau, le magma ou les roches viennent monter dans la chambre magmatique pour après que l'éruption a lieu. - Oui, car la provient du noyau du globe et va juste à la nappe d'eau il a rempli jusqu'au bout et explose. La lave est liquide car un volcan effusif. - La chambre magmatique est dans le sous-sol et est même dans le noyau de la Terre donc ça marche. Il y a même une plus petite chambre dans le volcan. - La lave se produit au noyau et monte dans la cheminée et sort par le trou du volcan. - Car elle touche le noyau du globe terrestre, et donc il y a un sous-sol et qui dit sous-sol dit volcan. - Parce que la poche de lave est reliée au noyau. - Il peut y avoir une éruption volcanique car le noyau est relié au volcan par la cheminée et la pression du gaz fait remonter le magma jusqu'au niveau du sol. - Car la chambre magmatique est reliée au noyau et je pense que le noyau est une énorme réserve de magma.
<p>il fait assez chaud pour que le magma se forme</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Parce que le magma se forme dans le sous-sol car il fait très chaud car il touche le noyau terrestre. - Le lieu est assez chaud pour former du magma. - Elle peut fonctionner car elle est reliée au noyau qui chauffe le magma.
<p>Arguments incompréhensibles</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Parce que la poche de lave est en haut (en éruption) donc il peut se mettre en éruption et fonctionner. - Car le noyau se compresse dans la cheminée jusqu'à la chambre puis forme une explosion et s'écoule. - Grâce à une expulsion des gaz car la chambre est plus loin dans le sous-sol donc sinon va en hauteur cela se refroidit.
Ça ne fonctionne pas car :	Argumentations contre le fonctionnement de l'explication B
<p>c'est très profond</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Le magma ne se trouve pas jusqu'au noyau du globe terrestre, ce n'est pas possible que le magma est formé au noyau c'est trop profond. - Car le noyau est trop éloigné de la surface de la terre à l'inverse de la chambre qui est encore dans le volcan.
<p>il n'y a pas de lave dans le noyau</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Car le noyau de la Terre n'a rien avoir avec une éruption, car dans le noyau il n'y a pas de lave. - Car moi je pense que le noyau de la terre est constitué d'un matériau qui attire toutes choses vivantes ou non à la surface de la Terre. Il ne peut donc pas avoir de magma au noyau de la Terre. - Ça ne peut pas fonctionner car ils mettent une cheminée au noyau, et dans le noyau, c'est l'énergie de la terre qu'il y a et non du magma ou de la lave.
<p>Arguments incompréhensibles</p>	<ul style="list-style-type: none"> - C'est pas possible car la chambre magmatique est trop prêt du bouchon.

Tableau 15. Catégorisation des argumentations pour et contre le fonctionnement de l'explication B avancées par les élèves de 4^{ème}.

- L'explication C se rapproche d'une production magmatique plus ou moins profonde et le magma est produit (ou préexiste) à une certaine profondeur située entre le noyau et le volcan. L'étude de la catégorisation (tableau 16 ci-dessous) montre que, pour les élèves, cette explication serait possible car la température est assez élevée, à l'endroit profond où se trouve la poche, pour que la roche fonde et forme du magma. Certains arguments utilisent uniquement, dans leurs justifications, la position de la chambre magmatique au niveau du « sous-sol », d'autres relient cette position avec l'augmentation de la température. Toutefois, pour d'autres élèves, l'explication C ne pourrait pas fonctionner parce que la poche est loin du noyau ce qui fait que la température n'est pas suffisamment élevée pour engendrer la formation du magma. De plus, le magma, dans ce modèle, ne pourrait pas remonter.

Nous soulignons que l'explication C est acceptée par un nombre important d'élèves pour les mêmes raisons que celles proposées pour la précédente (exp. B). Les élèves semblent lier la création du magma à l'augmentation de la température régnant dans les profondeurs terrestres.

Les écrits individuels E1 gardent une trace écrite des arguments ayant émergés pendant le débat scientifique ce qui est en parfaite adéquation avec les objectifs de recherche de la séquence forcée. Les élèves ont travaillé sur des caricatures résumant les modèles possibles et non pas sur leurs propres explications. L'étude des argumentations avancées révèle leur richesse et nous permet de constater un abandon du modèle local A car il apparaît nécessaire, pour les élèves, que la température soit suffisamment élevée pour créer du magma et que la chambre magmatique soit en profondeur. Les avis semblent partagés entre les deux explications B et C qui se rapprochent d'une explication centrale. Quoiqu'il en soit, **ces écrits individuels de travail se situent dans l'ordre épistémologique du « problématique »** où la question du vrai et du faux est temporairement suspendue pour celle du possible et de l'impossible donc du contingent et du nécessaire (Orange & al., 2001). De plus, les argumentations sont, pour une partie remarquable, de nature fonctionnelle et non descriptive ce qui traduit une véritable avancée vers les nécessités. Suite à ces développements, nous pouvons considérer chacun des écrits individuels E1 (figure 36, p.186) comme un **mono-texte raisonné** puisqu'il comporte plusieurs argumentations (ou raisons) non contradictoires. Son but est **d'identifier, suite au débat, les raisons « pour » et « contre » le fonctionnement de trois caricatures construites à partir des modèles initiaux des élèves**. Il permet ainsi de révéler les raisons qui marquent la possibilité et l'impossibilité du fonctionnement de ces trois modèles. A partir de ces écrits E1, neuf raisons de non fonctionnement ont été sélectionnées par le groupe de recherche et proposées aux élèves qui devaient les répartir en deux catégories. L'écrit intermédiaire E2, que nous étudions dans le paragraphe suivant, est ainsi produit.

Ça fonctionne car :	Argumentations pour le fonctionnement de l'explication C
il fait assez chaud pour fondre la roche	<ul style="list-style-type: none"> - Parce que le magma se forme dans le sous-sol et il fait assez chaud. - Parce que le magma du noyau est naturel et déjà fondu et la chaleur qui s'y dégage remonte au fur et à mesure, faisant fondre la roche et formant du magma. - Car la chambre magmatique se trouve en profondeur dans le sous-sol et donc la température est assez élevée pour ronger la roche et la faire fondre (*).
la chambre est assez profonde ou est dans le sous-sol	<ul style="list-style-type: none"> - La chambre magmatique est assez profonde. - Car la chambre magmatique est bien placée à quelques kilomètres de la surface du sol. - Oui car la chambre est à plusieurs Km sous terre. - Ça peut fonctionner car la chambre magmatique se situe en profondeur dans le sol donc toute l'eau sous forme gazeuse et la compression du magma peut entrer dans la chambre magmatique et ensuite pouvoir monter dans la cheminée pour causer une éruption. - L'explication C fonctionne car le foyer est à l'intérieur du globe terrestre. - Car la chambre magmatique se trouve en profondeur dans le sous-sol et donc la température est assez élevée pour ronger la roche et la faire fondre (*). - Car la chambre magmatique est dans le sous-sol, donc le fonctionnement peut avoir lieu. - La chambre magmatique est dans le sous-sol donc ça marche. - Car elle touche le globe terrestre et donc il y a un sous-sol. Et donc un volcan en fusion peut avoir lieu. - Car elle vient du sous-sol. - La chambre magmatique correspond à son emplacement. - Car la chambre magmatique est bien placée.
Ça ne fonctionne pas car :	Argumentations contre le fonctionnement de l'explication C
il ne fait pas assez chaud	<ul style="list-style-type: none"> - Elle ne peut pas fonctionner car elle n'est pas assez près du noyau du coup elle n'est pas assez chaude. - Non, car le magma ne vient pas du noyau donc la roche ne fond pas avec la chaleur terrestre et il n'y a donc pas de lave.
le magma ne peut pas remonter	<ul style="list-style-type: none"> - Car la pesanteur y est trop forte et le magma ne peut pas monter. - Il ne peut y avoir une éruption car il n'y a pas de cheminée même si le foyer est placé au sous-sol, il n'y a pas de conduit entre le noyau et le volcan. Donc, pas d'éruption. - Parce que la poche n'est pas reliée au noyau. - Car la chambre n'est pas approvisionnée en lave.
la poche est profonde	<ul style="list-style-type: none"> - Parce que la poche n'est pas un haut du volcan donc il ne peut pas se mettre en éruption et ne fonctionne pas.
Raisons non catégorisées	<ul style="list-style-type: none"> - Car il y a une production au noyau, éjection grâce au gaz (voir ci-dessus) et à des remonté du magma grâce au vide d'air d'aspiration. - Car il n'y a qu'une seule réserve. - Car on ne sait pas d'où vient les éléments du magma ceux qui vont dans la chambre magmatique.

Tableau 16. Catégorisation des argumentations pour et contre le fonctionnement de l'explication C par les élèves de 4^{ème}.

2.2.2 Classement des raisons de non fonctionnement en deux catégories (E2)

Les neuf raisons de non fonctionnement des modèles ont été proposées aux élèves sans la moindre référence aux explications concernées (A, B, C) (figure 37, p.187). Le travail de répartition de ces raisons en deux catégories est d'abord effectué en binôme puis une mise en commun collective est réalisée au tableau et un titre est donné aux deux catégories définies (figure 39, p.189). Certains élèves ont proposé des titres pour les catégories, lors du travail en binôme, ce qui n'a pas été demandé au départ par l'enseignante. L'écrit E2 consensuel répartit les raisons de non fonctionnement en deux catégories :

- Les quatre raisons B, C, F, G ont été regroupées dans une catégorie qui concerne **la production du magma** :

B- ça ne fonctionne pas parce que la température n'est pas assez élevée pour que ça fonde ;

C- ça ne fonctionne pas car la chambre n'est pas approvisionnée en magma ;

F- ça ne fonctionne pas car il n'y a aucune production de magma ;

G- ça ne fonctionne pas car il ne fait pas assez chaud pour former du magma.

- Les cinq raisons A, D, E, H, I ont été classées dans une catégorie liée à la **profondeur et la remontée du magma** :

A- ça ne fonctionne pas parce que la chambre n'est pas assez profonde ;

D- ça ne fonctionne pas parce que la poche est trop profonde ;

E- ça ne fonctionne pas car le magma ne peut pas remonter ;

H- ça ne fonctionne pas car il n'y a pas de cheminée pour que le magma puisse remonter ;

I- ça ne fonctionne pas car c'est très éloigné de la surface de la Terre.

Ces deux catégories mettent en évidence les deux principales raisons de non fonctionnement qui seraient en rapport avec la production et la remontée du magma : « ça ne fonctionne pas parce que le magma ne peut pas se former et ne peut pas remonter ». **Elles représentent les nécessités (de formation et de remontée du magma) auxquelles les élèves doivent accéder pour construire un savoir magmatique problématisé.** La construction de ces deux nécessités correspond aux objectifs d'apprentissage définis au préalable par le groupe de recherche et figure dans l'espace des contraintes envisageables pour le niveau de 4^{ème} concernant le magmatisme (figure 32, p.179). L'écrit de travail E2 se situe, comme le précédent, dans **l'ordre épistémologique du « problématique »**. Le travail des élèves ne se focalise plus sur les modèles explicatifs initiaux de groupe, ni sur les caricatures mais sur les raisons et les arguments portant sur ces modèles. Le but de cet écrit intermédiaire E2 est de catégoriser les raisons de non fonctionnement qui pourraient par la suite, en s'inversant, faire accéder les élèves aux conditions

et aux nécessités de fonctionnement. C'est un **mono-texte raisonné** car il comprend plusieurs argumentations (ou raisons) non contradictoires classées en deux catégories dans un tableau. Suite à la catégorisation réalisée, les écrits finaux E3a et E3b sont construits.

2.3 Les écrits finaux (E3a et E3b)

Après avoir donné des titres aux deux catégories, l'enseignante introduit, par une sorte d'inversion, le tableau E3a qui constitue l'ébauche du texte de savoir final sur le fonctionnement des volcans (figure 40, p.190). Puisque cela ne fonctionne pas pour des raisons liées à l'absence de production et de remontée du magma, il s'agit de voir comment c'est dans la Terre pour que le magma puisse se former et remonter. Ainsi, l'écrit E3a s'interroge « *Comment c'est dans la Terre pour que ça marche ?* » et met en avant deux nécessités « *Il faut que le magma remonte* » et « *Il faut que le magma se forme* ». La formation et la remontée du magma représentent les conditions de fonctionnement des volcans. Cet écrit (E3a) a été introduit par l'enseignante en prenant appui sur l'écrit intermédiaire E2 précédent. Pour le compléter, les élèves exploitent collectivement la documentation scientifique pour renseigner les deux colonnes du tableau des raisons. Ils passent ainsi à la recherche des solutions permettant de réaliser les nécessités identifiées. L'écrit E3b final obtenu met en avant ces nécessités (remontée et formation du magma) et intègre les solutions correspondantes :

- **Pour que le volcan fonctionne, il faut que le magma puisse remonter.** Cette remontée est possible grâce à la pression des gaz qui crée des failles et des cheminées qui faciliteront le passage du magma. De plus, le lieu de fabrication peu profond par rapport à l'échelle de la Terre permet la remontée du magma vers la surface.

- **Pour que le volcan fonctionne, il faut que le magma puisse se former.** Cette formation est possible grâce à la fusion de la roche à certaines profondeurs (100 à 200km), à des températures d'environ 1000° à 2000° et sous une certaine pression. La fusion de la roche produit du magma, un mélange de gaz et de roche fondue.

Cette partie de l'écrit E3b appelle une remarque importante. Elle évoque une fusion se produisant à une certaine profondeur et sous des conditions précises de pression et de température. Cependant, la solidité de l'intérieur du globe et la formation du magma à des endroits précis, n'est pas bien explicitée. Considérer que l'intérieur du globe est solide est une contrainte empirique importante derrière la nécessité de la formation du magma. D'ailleurs, les contraintes empiriques de l'espace des contraintes définis *a priori* (figure 32, p.179) ne sont pas bien explicitées dans l'écrit final construit E3b.

L'écrit E3b final est un **mono-texte problématisé** parce qu'il intègre deux nécessités ainsi que les solutions qui répondent à celles-ci. Il porte ainsi des caractéristiques qui l'éloignent d'un texte « propositionnel » car il ne se contente pas d'exposer les solutions mais y inclut les nécessités. C'est un texte qui marque, au moins en partie, l'apodicticité des savoirs malgré le fait qu'il n'explique pas nettement la solidité de l'intérieur du globe. Il a été construit en deux étapes. L'enseignante a d'abord introduit un tableau incluant les nécessités à partir de l'écrit E2 puis collectivement le groupe classe s'est servi de la documentation scientifique pour repérer les solutions. Il garde un lien avec la problématisation développée pendant la séance et révélée par les écrits précédents.

L'analyse du contenu des écrits produits lors de la séquence forcée montre que ceux-ci portent des traces de problématisation. Les écrits intermédiaires E1 (individuels) et E2 (collectif) sont des mono-textes raisonnés qui mettent en avant plusieurs argumentations (ou raisons) non contradictoires et l'écrit final E3b est un mono-texte problématisé qui donne à voir deux raisons combinées aux solutions permettant de les réaliser. Ainsi, l'écrit final ne présente pas « LA » solution au problème posé ce qui diffère de la démarche de repérage et de tri des solutions identifiée dans le cas étudié précédemment (séquence ordinaire en 4^{ème}, chapitre 4).

Après cette étude détaillée des écrits de la séquence forcée, nous notons que le processus de mise en texte de l'enseignante, mise en œuvre avec la collaboration du groupe de recherche, apparaît centré sur la recherche des raisons et des solutions dans une **logique de problématisation** (Orange Ravachol, 2010). Cette logique se centre sur la construction d'un savoir scientifique qui comporte non seulement les solutions mais aussi les conditions de possibilité de ces solutions (ibid.). Afin de mieux comprendre les pratiques de mise en texte de l'enseignante et ce mode de fonctionnement guidé par une logique de problématisation, nous nous proposons de réaliser une modélisation praxéologique des pratiques enseignantes de mise en texte en jeu dans la séquence étudiée.

3. Modélisation praxéologique des pratiques enseignantes de mise en texte

La description de la séquence forcée ainsi que l'analyse des écrits produits nous permettent de modéliser les pratiques enseignantes en œuvre dans la mise en texte forcée du problème du fonctionnement des volcans et de l'origine des matériaux volcaniques. L'analyse praxéologique

de la pratique enseignante telle qu'elle est définie dans la théorie anthropologique du didactique (TAD) (Chevallard, 1998) nous sert de repère pour effectuer cette modélisation. Les données à notre disposition concernant la séquence forcée vont nous permettre d'étudier le bloc pratico-technique (savoir-faire), c'est-à-dire les techniques et les tâches et d'avoir accès à la technologie faisant partie du bloc technologico-théorique (savoir). La mise en texte relève d'un type de tâche enseignant dont l'accomplissement appelle des techniques enseignantes spécifiques. Afin d'identifier ces techniques, nous avons repéré les tâches de la classe et nous en avons décelé dix figurant, pour la plupart, dans le synopsis de la séquence (tableau 11, p.192) :

- produire un schéma et un texte pour expliquer comment fonctionne un volcan et d'où viennent les matériaux volcaniques ;
- produire une explication commune en groupe ;
- débattre sur les productions de groupe ;
- produire des arguments « pour » ou « contre » le fonctionnement des caricatures proposées ;
- répartir, en binôme, les raisons de non fonctionnement en deux catégories ;
- répartir collectivement les raisons en deux catégories ;
- mettre un titre aux deux catégories ;
- introduire par une sorte d'inversion l'ébauche du texte de savoir final ;
- exploiter collectivement la documentation scientifique ;
- compléter l'ébauche du texte final suite à l'exploitation de la documentation.

Pour chacune de ces tâches, nous avons repéré les ostensifs produits et utilisés. La modélisation praxéologique obtenue (figure 43) présente les caractéristiques des techniques enseignantes de mise en texte de la séquence forcée :

- Les élèves produisent individuellement, en réponse à la consigne de départ, un schéma accompagné d'un texte dont ils se servent lors du travail de groupe pour produire des explications communes à chaque groupe⁷⁷. Celles-ci sont exploitées et commentées lors du débat scientifique où des arguments oraux sont produits. Cette première phase a pour rôle, pour l'enseignante, **d'identifier les idées explicatives des élèves, les solutions possibles qu'ils envisagent pour le problème du fonctionnement des volcans ainsi que les raisons fondant ces solutions.**

⁷⁷ Même si les productions initiales ont été ramassées avant la mise en groupe des élèves pour éviter le choix de telle ou telle production, nous considérons qu'elles ont servi et préparé le travail de groupe.

- Les productions explicatives de groupe et les arguments oraux produits pendant le débat ont permis au groupe de recherche de construire trois caricatures explicatives. Ces dernières constituent un ostensif de travail utilisé afin que les élèves produisent des arguments écrits « pour » et « contre » leur possibilité de fonctionnement (E1). L'étude des arguments élaborés conduit l'équipe de recherche à aménager neuf raisons de non fonctionnement des caricatures et à proposer aux élèves de les répartir en deux catégories. Cette catégorisation se fait d'abord en binôme puis collectivement ce qui produit un classement individuel puis collectif (E2). Il s'agit par la suite de mettre un titre aux deux catégories établies d'une manière consensuelle par le groupe classe. Ces titres représentent les raisons de non fonctionnement des caricatures explicatives.

La première étape conduisant aux écrits E1 a pour fonction de faire produire aux élèves **des raisons « pour » et « contre » le fonctionnement de trois caricatures construites à partir des modèles initiaux**. Tandis que la seconde consiste à **faire travailler les élèves sur les raisons qui font que certaines explications ne peuvent pas fonctionner** pour arriver, par la suite, à formuler les conditions de fonctionnement.

- En se basant sur les titres des classes d'arguments de non fonctionnement l'enseignante introduit, par une sorte d'inversion, un tableau sur les raisons de fonctionnement. Ce tableau constitue l'ébauche du texte de savoir final (E3a) qui sera complété suite à l'exploitation de la documentation scientifique. Cela permet de produire un texte de savoir final combinant les raisons et les solutions. L'objectif de cette dernière phase étant de **repérer les raisons qui font que les volcans fonctionnent et de construire un texte de savoir final associant les raisons aux solutions**.

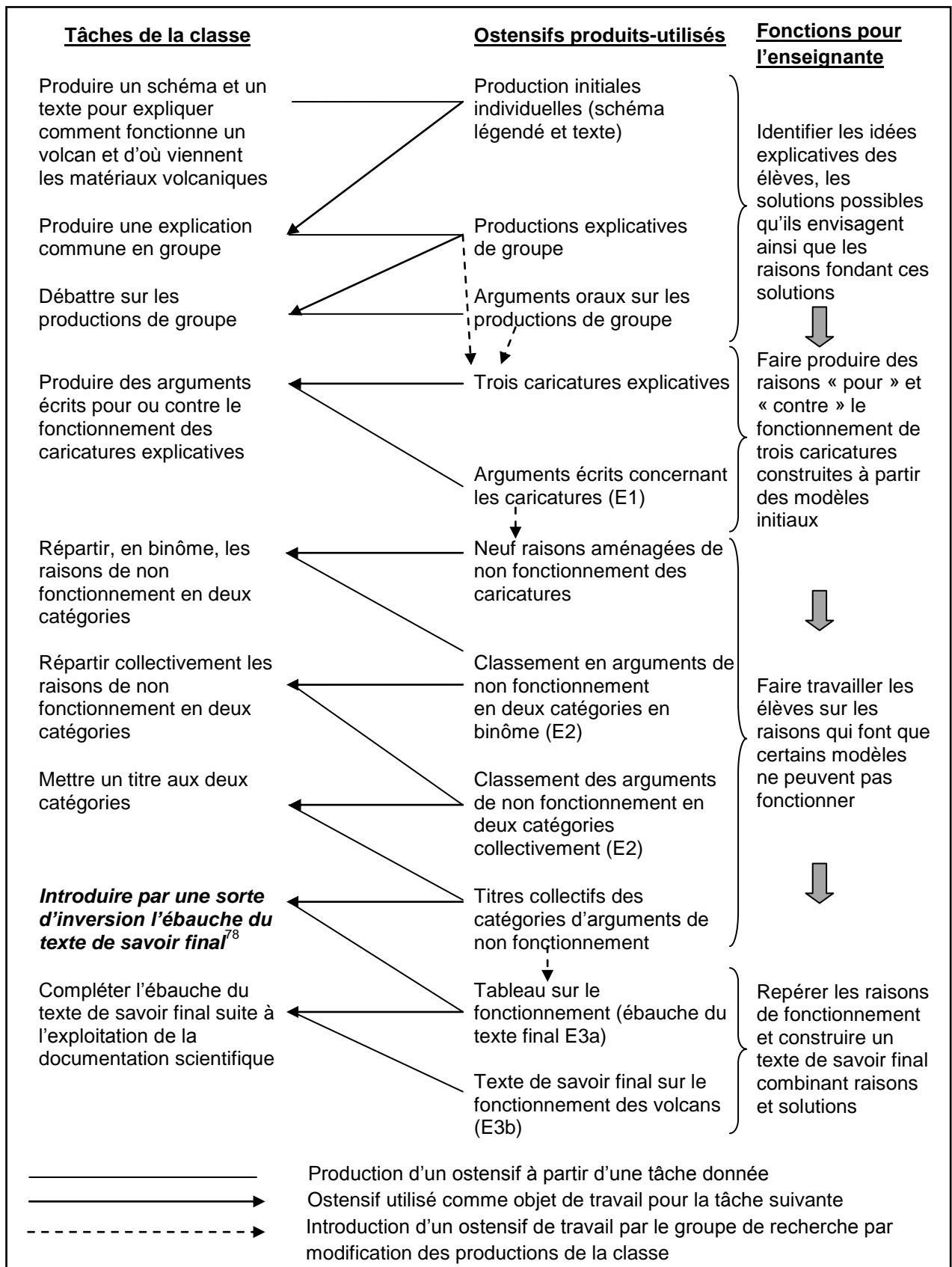


Figure 43. Techniques de mise en texte de l'enseignante pour la séquence forcée sur le fonctionnement des volcans.

⁷⁸ Cette tâche correspond à une tâche enseignante tandis que les autres sont des tâches élèves.

La modélisation praxéologique construite (figure 43), en s'appuyant sur la théorie anthropologique du didactique de Chevallard (1998), permet de souligner plusieurs éléments fondamentaux dans les techniques de mise en texte de l'enseignante. Ces techniques, construites par le groupe de recherche, se basent sur la production d'ostensifs par les élèves à partir de la réalisation de tâches et sur l'utilisation de certains ostensifs produits comme objet de travail pour les tâches suivantes. De plus, l'équipe s'est servie de quelques ostensifs élaborés par les élèves et les a aménagés pour en introduire de nouveaux qui seront employés comme objets de travail pour les tâches suivantes. Trois interventions capitales sur trois ostensifs produits par les élèves ont été décidées par le groupe de recherche. Elles ont été considérées comme étant nécessaires pour répondre aux objectifs de recherche et conduire la classe vers la construction d'un texte problématisé et non propositionnel :

- La première intervention consiste à **simplifier, schématiser et dépersonnaliser** (ne pas attribuer à un auteur) les explications possibles révélées par les productions de groupe des élèves. L'introduction des caricatures d'explications a permis de produire, suite au débat, des argumentations individuelles écrites d'élèves. Ce travail de simplification, de schématisation et de dépersonnalisation constitue un **premier palier abstraitif** introduit par le groupe de recherche.
- La deuxième intervention s'appuie aussi sur une **dépersonnalisation** relative, cette fois, aux raisons de non fonctionnement puisque le groupe de recherche en a sélectionné neuf et les a dissociées de leurs auteurs. De plus, les neuf raisons de non fonctionnement proposées aux élèves pour classement ont été **décontextualisées** et séparées de la caricature à laquelle elles font référence. Par cette décontextualisation et par le passage d'une production explicative à un discours sur les explications, cette intervention représente un **deuxième palier abstraitif**.
- La troisième intervention s'appuie sur le classement des raisons contre le fonctionnement effectué précédemment par les élèves. Elle consiste à les faire passer des raisons de non fonctionnement aux conditions qui font que cela pourrait fonctionner suite à l'introduction, par l'enseignante, d'un tableau désignant ces conditions. Cela correspond à un **troisième palier abstraitif** permettant de produire un tableau décontextualisé, général, intégrant les raisons et capable d'être compris indépendamment des activités antérieures.

Ces procédés didactiques ont été déjà mis en œuvre lors d'une séquence forcée concernant les mouvements du bras à l'école élémentaire (Orange & Orange Ravachol, 2007). A la différence des techniques identifiées lors de la séquence ordinaire (chapitre 4), nous pointons pour cette situation une **logique de problématisation** qui se centre davantage sur les conditions de

possibilités des solutions que sur les solutions elles-mêmes. Les techniques de mise en texte ont permis de produire un texte final intégrant les nécessités et ne se réduisant pas aux seules solutions. La classe passe des idées explicatives (individuelles et de groupe), à des argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement des trois caricatures, à une identification des raisons de fonctionnement, pour finir avec un texte final qui combine solutions et raisons. La mise en œuvre de ces techniques suppose la manipulation et la création d'ostensifs schématiques et écrits. De plus, les tâches d'écritures, qui jalonnent la séquence, ont préparé la formulation du texte final de savoir construit par la classe dans cette séquence. La modélisation construite nous permet de pointer que la technologie, discours rationnel justifiant les techniques de mise en texte, considère les savoirs scientifiques comme des savoirs raisonnés ne se limitant pas aux solutions vraies et factuelles aux problèmes. Cela justifie l'importance accordée aux raisons dans la construction des savoirs et des textes. Cette conception des savoirs scientifiques conduit à privilégier le caractère problématisé des savoirs.

La mise en texte des savoirs scientifiques est un type de tâche enseignant mettant en œuvre un ensemble de techniques que nous venons de désigner (figure 43). Ces techniques ont visiblement emmené la classe vers la construction de savoirs et de textes problématisés. A partir de cette analyse, nous résumons le savoir-faire de mise en texte de la séquence forcée par la figure 44 ci-dessous.

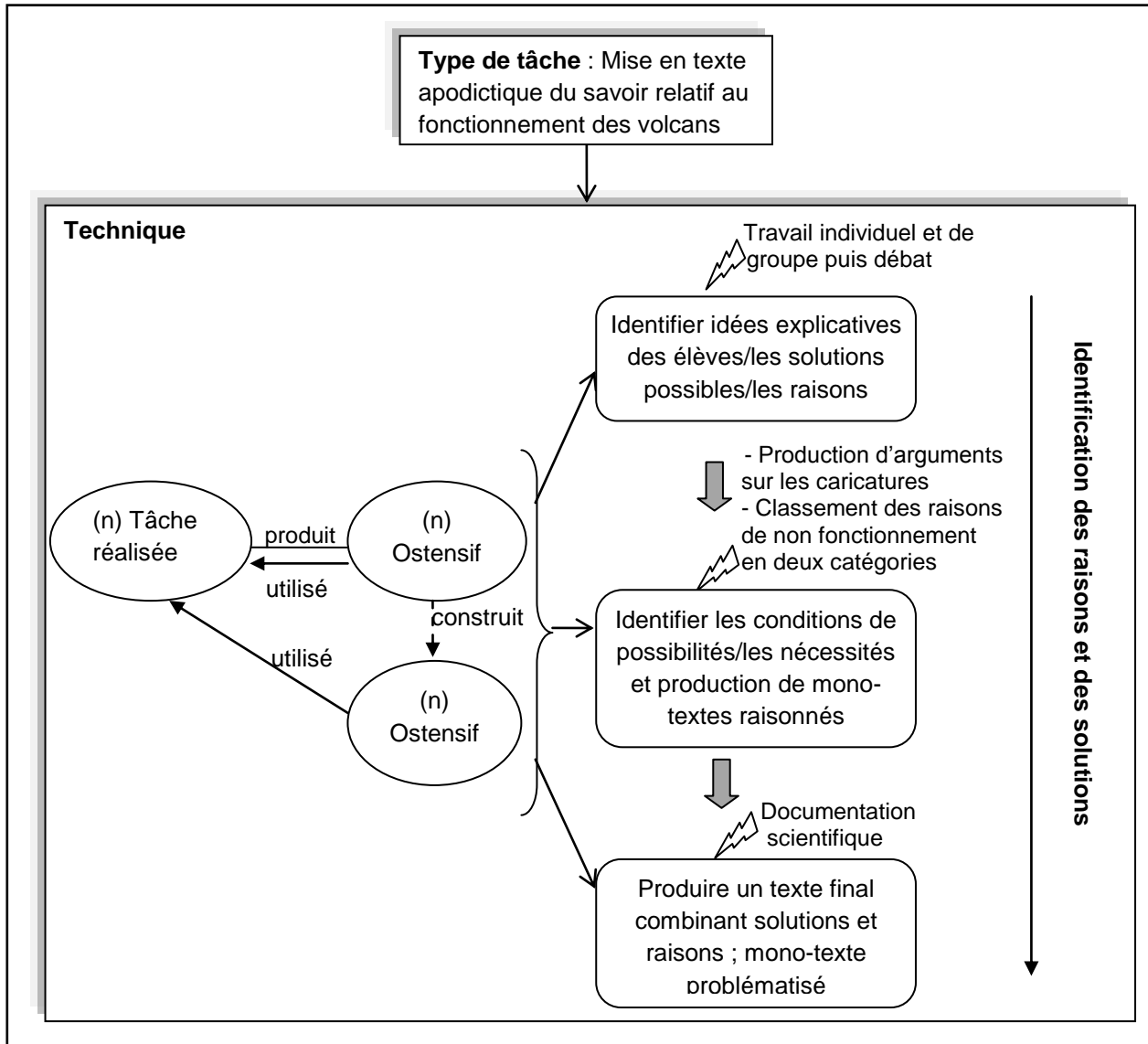


Figure 44. Le savoir-faire de mise en texte forcée (bloc pratico-technique).

La description de la séquence forcée et l'analyse des textes produits nous ont permis de modéliser les techniques enseignantes mises en œuvre pour une activité de mise en texte qui est apparue problématisée selon notre cadre didactique de la problématisation. Les écrits construits portent les caractéristiques des textes problématisés puisqu'ils ne se limitent pas aux solutions des problèmes mais intègrent les conditions de possibilités de ces solutions. Toutefois, il est nécessaire de poursuivre les analyses en se penchant sur l'activité de mise en texte orale des élèves et de l'enseignante vu que les savoirs ne peuvent aucunement se réduire aux seuls textes écrits. Comment les textes ont-ils été construits ? Quelle activité réelle des élèves ? Retrouve-t-on les traces de la problématisation dans l'activité des élèves et comment cette problématisation s'est-elle développée ? Comment les élèves ont-ils pris en charge l'introduction de nouveaux ostensifs abstraits par le groupe de recherche ? Et quels sont les liens entre les écrits et la mise en

texte orale ? Nous cherchons, dans ce qui suit, à fournir des éléments de réponses à toutes ces questions.

4. Etude de la mise en texte du problème du fonctionnement des volcans au cours des moments de travail

Il s'agit de suivre les traces de la mise en texte en accordant de l'attention à trois phases de la séquence : celle du débat scientifique, de la catégorisation des raisons de non fonctionnement et de l'exploitation de la documentation scientifique (figure 45).

- Le débat (séance 2 et 3) a permis le passage des écrits explicatifs initiaux de groupe aux écrits intermédiaires individuels E1 qui comportent des argumentations « pour » et « contre » les modèles proposés. L'obtention des écrits E1 a été possible suite à l'introduction, par l'équipe de recherche, de trois caricatures explicatives construites à partir des productions explicatives de groupe.
- La phase de catégorisation des raisons de non fonctionnement (séance 4 et 5) a permis de passer des écrits E1 à l'écrit E2 qui représente un classement des raisons de non fonctionnement en deux catégories. Cela s'est réalisé après la sélection par le groupe de recherche de neuf raisons de non fonctionnement à partir de l'écrit E1.
- Suite à l'introduction par l'enseignante de l'ébauche du texte de savoir final (E3a), les élèves exploitent la documentation scientifique (séance 4 et 5) préparée par l'équipe pour compléter ce texte et arriver à un texte final E3b.

Nous pointons ainsi trois passages qui se basent sur ce que propose l'enseignante à partir des écrits précédents et sur ce que la classe produit à partir du travail effectué : le passage P1 qui se produit lors du débat, le passage P2 au cours de la catégorisation des raisons de non fonctionnement et le passage P3 lors de la phase de documentation scientifique. Nous étudions, dans la partie suivante, l'activité de l'enseignante et des élèves lors de ces moments permettant le passage d'un écrit à l'autre.

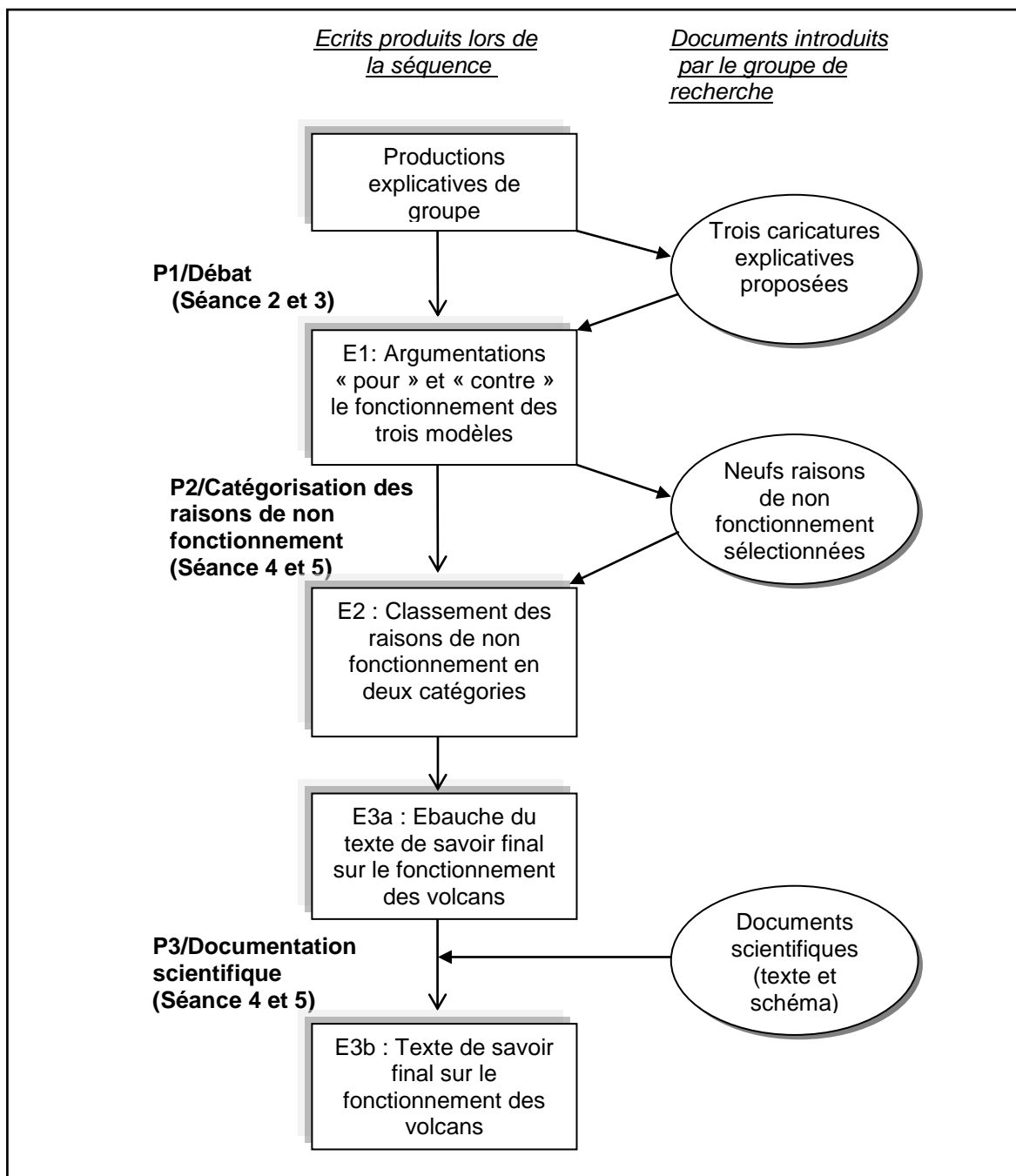


Figure 45. Les phases de travail repérées pendant la séquence forcée de 4^{ème} permettant le passage d'un écrit à l'autre.





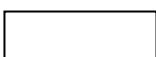

4.1 Lors du débat collectif

L'écrit intermédiaire E1, élaboré suite au débat scientifique, comporte des argumentations d'élèves « pour » et « contre » le fonctionnement des trois caricatures construites par le groupe de recherche à partir des modèles explicatifs initiaux de groupe. Son étude nous avait permis de constater que les élèves ont construit l'impossibilité de fonctionnement de l'explication locale A

– pourtant majoritaire dans leurs productions initiales – et la possibilité de celles B et C avec une légère préférence pour la B. Les arguments formulés montrent que la formation du magma nécessite que la température soit suffisamment élevée pour provoquer la fusion de la roche et que la chambre magmatique soit en profondeur et non pas dans le volcan. En effet, c'est dans les profondeurs terrestres que la température est importante. Cette construction semble avoir eu lieu au cours du débat scientifique. Par conséquent, nous analysons l'activité de mise en texte orale pendant cette phase afin de comprendre comment les argumentations, figurant dans l'écrit intermédiaire E1, se sont développées. Qui des élèves ou de l'enseignante les a introduites ? Comment s'est déroulée la mise en texte orale lors du débat et avec quelles pratiques ? Cette analyse commence avec la construction de la macrostructure du débat de classe. Elle sera poursuivie par une étude approfondie des interventions de l'enseignante et des élèves lors des discussions.

4.1.1 Analyse globale et construction de la macrostructure du débat

Dans le but de suivre les pratiques de mise en texte au cours du débat, nous avons construit sa macrostructure selon la méthodologie déterminée par Michel Fabre (Fabre & Orange, 1997 ; Fabre, 1999) (figure 46). Il s'agit d'un résumé global de ce moment avec des propositions de type question (Q), de type réponse (R) et de type objection (O). Pour réaliser ce travail, nous nous sommes basés sur la transcription du débat qui a duré une heure et vingt minutes environ (annexe 12). Les lignes (figure 46) montrent les liens entre les propositions qui ont été reformulées et simplifiées d'une manière à respecter leur sens initial dans le débat. Les chiffres correspondent aux numéros des interventions dans la transcription du débat.

	Questions posées par l'enseignante
	Questions posées par les élèves
	Questions posées par l'enseignante et les élèves
	Questions posées par un chercheur assistant à la séance
	Réponses d'élèves
	Objections d'élèves

Légende de la figure 46. Légende de la macrostructure du débat de la séquence forcée de

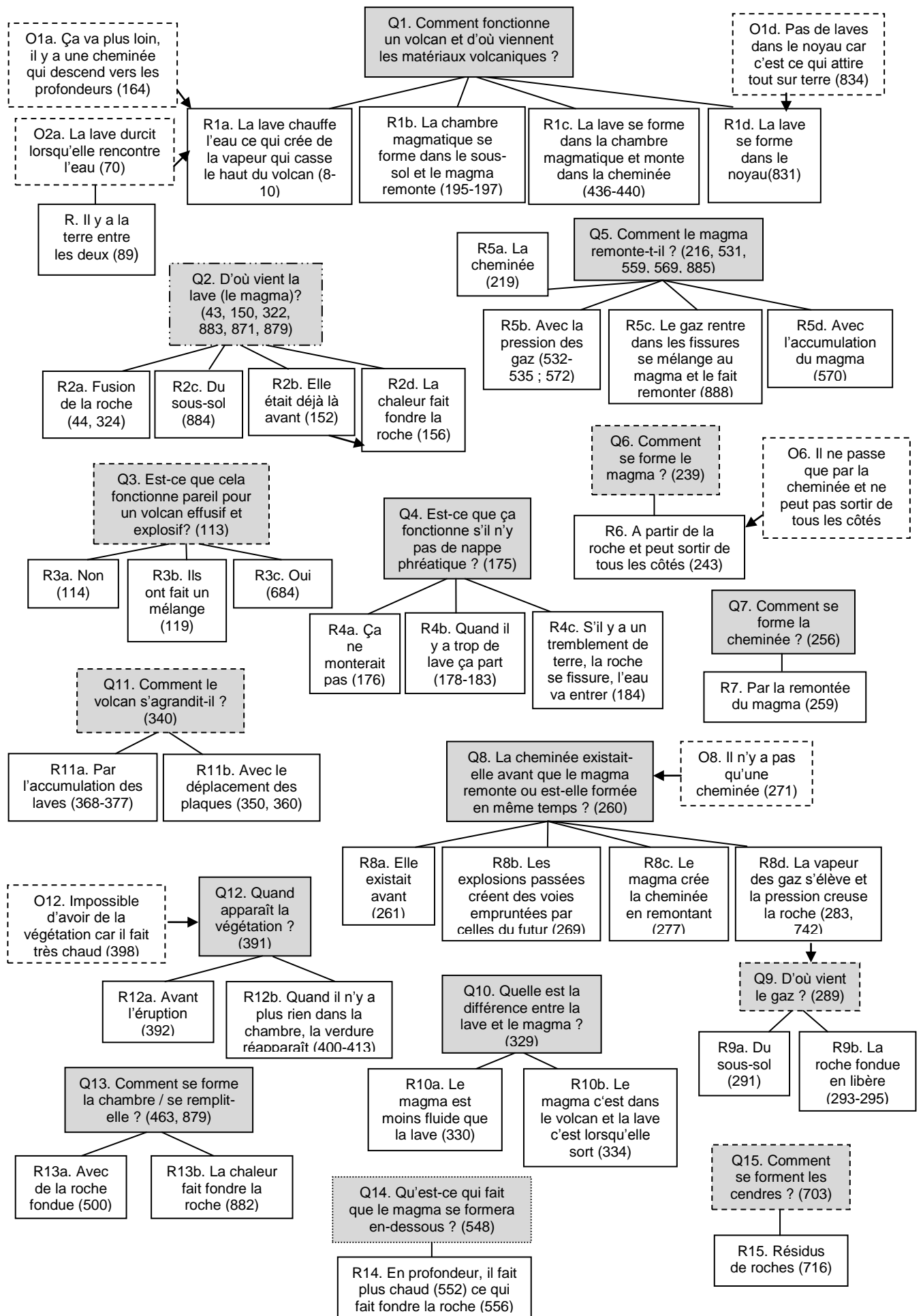


Figure 46. Macrostructure du débat de la séquence forcée 4^{ème}.

Plusieurs remarques peuvent être faites à propos de cette macrostructure :

1- Les questions abordées sont nombreuses et certaines ont été traitées à plusieurs reprises tout au long du débat. Par exemple la question « *Q2. D'où vient la lave (le magma)?* » était reprise en 43, 150, 322, 883, 871, 879 et « *Q5. Comment le magma remonte-t-il ?* » en 216, 531, 559, 569, 885. De plus, plusieurs objections ont été formulées par les élèves. Elles se rapportent à des réponses d'autres élèves (O1a, O2a, O1d, O6) ou à des questions posées par l'enseignante (O8, O12).

2- Certaines questions donnent lieu à une seule réponse « *Q15. Comment se forment les cendres ?* », d'autres à plusieurs réponses « *Q2. D'où vient la lave (le magma) ?* » qui ne sont pas toujours contradictoires.

3- Les questions sont tantôt posées par les élèves, tantôt par l'enseignante. De plus, elles sont de nature variées : Où ? Comment ? Quand ? Qu'est-ce qui ? Est-ce que cela fonctionne si ? et abordent tant l'origine, la formation que la remontée du magma. Par ailleurs, nous notons que les questions liées à l'origine et la formation du magma préoccupent conjointement les élèves et l'enseignante alors que celles en lien avec le moteur de la remontée sont posées à plusieurs reprises uniquement par l'enseignante.

L'étude de cette macrostructure nous a permis de constater la richesse des échanges et des questions posées lors du débat de la séquence forcée. Toutefois, nous ne pouvons pas nous contenter de l'analyse de la macrostructure pour étudier ce qui se joue au cours de ce débat du point de vue des savoirs, de la problématisation et des pratiques de mise en texte. Par conséquent, nous nous intéressons à la transcription des échanges (annexe 12) et à certaines interventions et interactions de l'enseignante et des élèves. Rappelons que le débat a été conçu dans une logique de problématisation et a été mené par une enseignante considérée comme novice dans la mise en œuvre et la gestion de ces moments de discussions. Nous estimons que l'analyse d'un tel débat nous informe sur le positionnement de cette enseignante par rapport aux logiques de construction des savoirs scientifiques : logique de problématisation (possible/nécessaire) et de réfutation (vrai/faux). L'étude du débat révèle qu'il se caractérise par deux types de moments : des moments d'ouverture vers les possibles et de construction des nécessités et des moments de fermeture des possibles.

4.1.2 Des moments d'exploration des possibles et de construction des nécessités

Le contenu des écrits intermédiaires E1 (figure 36, p. 186) font majoritairement référence à des raisons liées à la possibilité ou l'impossibilité de la formation du magma. Celle-ci nécessite que la température soit assez élevée et que la chambre soit suffisamment profonde. Par ailleurs, certaines argumentations lient le non fonctionnement des explications à l'impossibilité de remontée du magma. La macrostructure construite (figure 46) montre que les problèmes de la formation et de la remontée du magma ont préoccupé les élèves ainsi que l'enseignante le long du débat. Regardons de plus près comment se déroule la mise en texte orale de ces deux problèmes et qui des élèves ou de l'enseignante développe les argumentations. Nous recherchons dans le débat (annexe 12) des arguments proches de ceux que l'on retrouve dans les écrits E1. C'est pour cela que nous nous limitons, dans l'analyse suivante, à des passages que nous avons choisis parmi les multiples interventions du débat.

Le problème de la formation du magma

L'explication du premier groupe postule qu'une éruption volcanique se produit lorsque la lave chauffe l'eau d'une nappe phréatique ce qui crée de la vapeur d'eau qui fait monter la lave (4-21). Lorsque l'enseignante interroge les élèves de ce groupe sur l'origine de cette lave, l'un des membres évoque une fusion de la roche qui se situe dans le volcan (43-46). La fusion implique le passage d'une roche solide à un magma liquide (63-68).

43	P. [...] Alors on a tout dit, c'est-à-dire ? qu'il faut donc qu'il y ait de l'eau qui rencontre la lave. Mais elle vient d'où cette lave ? Selon vous ? Tous les quatre hein, y a pas un...
44	Gulian. Ben c'est la roche qui fond.
45	P. C'est la roche qui fond. Bien. Et elle est en-dessous ? C'est où la surface du sol là pour vous ? Elle est où la lave ? La roche qui fond comme tu dis.
46	Gulian. Dans le volcan.

Plus loin dans les échanges, la question de l'origine de la lave est réintroduite par Vincent (150). L'explication du premier groupe se développe et des nouveaux éléments apparaissent comme l'implication de la chaleur dans la fusion de la roche (156). De plus, cette fusion se produit en profondeur et non plus dans le volcan comme l'expliquait ce groupe au départ (159-160 ; 165-166).

150	Vincent. Mais la lave elle vient d'où parce que euh ?
151	P. La lave elle vient d'où ?

152	Emma. Elle était déjà là avant.
153	P. Comment?
154	Emma. Elle était déjà là avant.
155	P. Elle était déjà là avant mais avant qu'elle soit là avant, elle était où ?
156	Gulian. C'est la chaleur du sol qui fait fondre la roche.
157	P. C'est la chaleur du sol qui fait ? Chut, on écoute.
158	Gulian. Qui fait fondre la roche.
159	P. Qui fait fondre la roche. Qu'en pensez-vous les autres ? C'est possible la chaleur du sol ! Est-ce que tu es sûr ?
160	Gulian. Du sous-sol.
161	P. Du sous-sol, on a fait la distinction sol et sous-sol hein. D'accord. La chaleur du sous-sol qui fait fondre la roche et qui donne quoi ?
162	Gulian. De la lave.
163	P. De la lave, oui ?
164	Théo. Mais ça va encore plus loin normalement, parce que là c'est juste l'histoire du magma, il y a une grande cheminée, qui va, qui descend pas euh vers les profondeurs de la Terre.
165	P. Oui, tu vas nous expliquer sur votre schéma mais là on n'a pas la notion d'échelle. Je ne sais pas où on est, c'est vrai. Avez-vous une idée de la profondeur de ce que vous avez représenté ? ça va où ? elle était où la lave ?
166	Emma. En profondeur.
167	P. Comme tu dis en profondeur. A quel endroit?
168	Emma. Ça dépend des volcans.

Le deuxième groupe ajuste son explication en fonction des échanges menés auparavant. Son schéma montre une chambre magmatique située dans le volcan alors que, lors de la présentation, l'un des membres du groupe évoque plutôt une formation se produisant à plusieurs kilomètres du sous-sol : « 195. Léo. Ben pour la chambre magmatique, elle se forme à plusieurs Km au sous-sol euh ». Ce changement se manifeste également lorsque l'enseignante demande aux élèves de ce groupe de préciser la surface du sol sur le schéma et que l'un d'eux la positionne un peu plus haut de manière à ce que la chambre magmatique soit en profondeur (313-321). Nous relevons le même comportement chez le sixième groupe (874). La formation du magma à partir de la fusion de la roche solide est reprise pour le deuxième groupe. Les élèves semblent chercher à comprendre d'une manière précise cette formation : « 239. Vincent. **Mais il se forme à partir de quoi ? Parce qu'ils ne montrent pas d'où est-ce qu'il vient déjà et il se forme à partir de quoi ?** ». On est bien loin de l'idée d'un magma préexistant dans les profondeurs.

Lors du passage du troisième groupe, l'un des élèves de la classe propose qu'il y ait une grande chambre en-dessous de celle figurant sur le schéma présenté. Le magma se formerait au niveau de celle-ci. Lorsque les raisons derrière ce choix sont demandées, voici comment cela est justifié :

552	Théo. C'est que plus profond, il fait plus chaud.
553	P. Ah ! plus profond, il fait plus chaud. Beaucoup plus profond il fait plus chaud et Romain qu'est-ce qui se passe à ce moment là ?
554	Romain. Ben ça chauffe la roche et ça commence à monter euh.
555	P. Ça chauffe et qu'est-ce qui se passe quand ça chauffe ? Ça?
556	Romain. Fond la roche.
557	P. Ça fond la roche. Capucine.

La chaleur qui règne en profondeur serait responsable, pour les élèves, de la fusion de la roche ce qui crée du magma liquide. Ainsi, pour que le magma se forme, il est nécessaire que la température soit élevée et que la chambre soit située en profondeur. **Ce sont ces deux nécessités que l'on retrouve majoritairement dans les arguments de l'écrit E1 produit suite au débat.** Toutefois, une question se pose : si les élèves évoquent la fusion de la roche solide, considèrent-ils que l'intérieur du globe est solide et que la fusion se déroule dans des conditions physiques particulières (température et pression) et en des lieux précis? Nous n'avons pas pu repérer des passages qui nous permettent d'avoir des éléments de réponse à cette question.

Le problème de la remontée du magma

Ce problème a émergé avec le passage du deuxième groupe dont le schéma montre deux volcans : un premier pointant la remontée du magma et la préparation de l'explosion et un second s'intéressant au déroulement de cette dernière avec l'éjection des roches en fusion. La nécessité de la remontée du magma est alors mise en avant :

214	P. C'est le démarrage donc pendant l'explosion. Et du coup pour arriver à cette explosion, il faut que le magma, tu disais, Léo ?
215	Léo. Remonte.
216	P. Remonte. Est-ce que vous avez une idée de ce qui fait remonter le magma. Est-ce que ce sont les flèches bleues que je vois là ?

Les discussions suivantes révèlent un désaccord entre les élèves concernant la sortie du magma. Lorsque Vincent évoque la possibilité d'une sortie de tous les côtés et non pas juste en haut du volcan (243), Léo exprime son désaccord et considère que le magma ne passe que par la cheminée (247) qui préexistait (261). Amélie avance alors que la formation de la cheminée est due à la remontée du magma (259) tandis que Théo (265-269) relie cette formation à une histoire ancienne du volcan : les explosions passées créent des cheminées qui pourront être utilisées par celles futures. Ces dernières pourraient créer des cheminées pour les utiliser par la suite.

258	P. Du cratère, mais ça veut dire qu'il y a toujours un trou ? Il y a toujours un espace ?
259	Amélie. C'est la remontée du magma qui forme ben, ben la cheminée.
260	P. C'est la remontée du magma qui forme la cheminée. Ecoutez les autres et alors ? Mais qui est avant alors ? La cheminée elle existait avant que le magma remonte ou elle est là, elle est formée au même moment. Dites-nous!
261	Léo. Non mais moi je pensais qu'elle existait là avant.
262	P. Tu penses qu'elle existe avant. Les autres?
263	Léo. Le volcan il fait comme ça.
264	P. Le volcan il fait comme ça, il a une cheminée.
265	Théo. Par exemple euh, les explosions du passé.
266	P. Ah. C'est une histoire ancienne de volcan.
267	Théo. Oui ben ça a produit euh des, des voies.
268	P. Oui.
269	Théo. Des voies et puis euh ben les explosions après du futur et ben elles sont essayer d'emprunter les mêmes voies. Peut être en créant d'autres pour euh encore après les utiliser.

Le groupe classe semble adopter l'idée que la cheminée est formée avec la remontée du magma. « 277. Vincent. *Mais ça peut venir au départ, y a pas de cheminée, lorsque la lave pousse la roche, ben ça crée un...* » « 279. Vincent. *Ça va crée la cheminée peut être en haut.* ». Mais comment le magma remonte-t-il ? Et comment les cheminées sont-elles créées ? C'est effectivement la pression des gaz libérés lors de la fusion de la roche qui va creuser la roche (281-297) et créer des espaces qui permettront la remontée du magma. Ce problème de remontée du magma a été également posé par les élèves lors du débat de la séquence ordinaire de 4^{ème} (chapitre 4).

281	Théo. C'est euh, au début il y a la chambre magmatique sans cheminée.
282	P. Oui.
283	Théo. La vapeur avec toujours s'élever vers le haut, du coup à force avec la pression ça va creuser la roche mais euh...
284	P. Qu'est-ce qui creuse la roche pour toi dans ces cas là ? La vapeur ?
285	Théo. La vapeur d'eau, la vapeur des gaz.
286	P. Les vapeurs de gaz creusent la roche ? Qu'en pensez-vous ? Réagissez ! Hein ?
287	Léo. Intéressant.
288	P. Intéressant donc il y a quelque chose qui creuse la roche, qui crée un espace. On est là dessus ? Et Puis ? Oui ?
289	Vincent. Dans ces cas là mais il vient d'où cet air ?
290	P. Il vient d'où ce gaz ! Cet air, oui, comme tu dis.
291	Eva. Du sous-sol.
292	P. Du sous-sol mais il y a du gaz dans le sous-sol ?
293	Théo. C'est la roche qui contient du gaz.
294	P. C'est la roche qui contient du gaz.
295	Théo. Quand elle fond elle libère le gaz qu'elle a.
296	P. Ah quand elle fond elle libère du gaz. Et ça s'appelle comment ? La roche fondue mélangée avec des gaz ? De ?
297	Théo. Du magma.

Nous venons de voir comment les problèmes de la formation et de la remontée du magma ont été mis en texte lors du débat scientifique. Cette phase se caractérise manifestement par des moments d'ouverture vers les possibles et des moments où les nécessités ont été abordées dans les arguments. Les interventions de l'enseignante avaient pour but principal de pousser les élèves à aller au bout de leurs pensées. Son principal rôle était de poser des questions aux élèves, de gérer des prises de paroles et de susciter la réaction du groupe classe lorsqu'une controverse est pointée ou qu'une proposition est avancée : « 137. P. [...] *Qu'en pensez vous les autres ?* », « 375. P. [...]. *C'est possible ça les autres ?* », « 573. P. [...]. *C'est possible ?* », « 575. P. *Ça peut fonctionner pour vous peut être ?* ». Elle s'abstient de donner les solutions même pour des questions concernant le vocabulaire scientifique comme la différence entre la lave et le magma (329-337). On reste dans l'ordre du possible et de l'impossible. **Les argumentations, que révèle l'écrit E1, correspondent à celles évoquées par les élèves pendant le débat.**

A côté de ces moments intenses d'ouverture vers les possibles, nous repérons quelques moments de fermeture – beaucoup moins nombreux – et qui se rapportent à certaines interventions d'élèves.

4.1.3 Des moments de fermeture des possibles

Lorsqu'un élève de la classe évoque le déplacement des plaques pour expliquer la construction du volcan (ou son « agrandissement »), l'enseignante essaye de comprendre l'idée proposée mais finit par bloquer les discussions qui s'y rapportent (350-365).

350	Antoine. Ben c'est avec le déplacement des plaques enfin ça augmente.
351	P. Le déplacement des plaques. C'est quoi une plaque?
352	Antoine. Ben je ne sais pas le... une plaque sismique.
353	P. Une plaque sismique !
354	Antoine. Non mais avec le tremblement de terre.
355	P. Oui. Quel lien entre plaque et volcanisme ?
356	Antoine. Ben ça monte.
357	P. Ça monte!
358	Antoine. Ben oui.
359	P. Oui?
360	Vincent. Ben en fait, lorsque c'est un peu comme, c'est lorsque les deux plaques se rencontrent, y en a une qui va se superposer sous l'autre, du coup ben la roche, le sous-sol et tout ce qui est du sol, eh ben vont s'élever.
361	P. Oui mais pour s'élever elles se rentrent dedans ? Comment on peut faire euh, tu me parles de plaques mais comment on va arriver à partir des plaques qui bougent, hein Léo ? Et, à du volcanisme ?
362	Vincent. Ça c'est xxxx, après, après suffit par exemple que la lave vienne du noyau ou je ne sais pas moi qu'il y est...

363	P. La lave qui prene... Ouh lala.
364	Léo. Simplement, le volcan par rapport à la surface de la Terre il est...
365	P. Bon difficile Antoine, faut que tu me réfléchisses à ton idée. Faut que tu nous l'expliques. Hein, j'ai pas assez d'éléments là pour comprendre ce que tu veux dire. Théo?

L'émergence de l'idée du déplacement des plaques et de la subduction met l'enseignante dans l'embarras. Comment gérer ces idées intéressantes qui émergent et qui ne sont pas reliées au volcanisme selon la progression et les objectifs des programmes officiels ? Ces derniers abordent le volcanisme d'une manière locale alors que la référence aux plaques emmène les élèves vers une explication plus globale reliée au fonctionnement du globe. L'approfondissement des idées évoquées par les élèves, dans un cadre tectonique, aurait pu enrichir les réflexions menées au cours du débat mais l'engagement sur ce terrain inconnu n'est pas chose aisée. L'enseignante a préféré interrompre ces discussions. Cette fermeture des possibles s'accorde avec les objectifs d'apprentissages de la séquence qui n'envisagent pas, à la suite de la progression scolaire officielle et au vu de certaines contraintes, le fonctionnement des volcans en relation avec la tectonique des plaques.

L'analyse des interventions et interactions langagières de l'enseignante et des élèves, que nous venons de mener, permet d'évaluer la problématisation en jeu pendant le débat. Celle-ci peut être décrite et représentée sous forme d'espace de contraintes.

4.1.4 L'espace des contraintes en jeu pendant le débat

Nous représentons la problématisation développée par l'espace des contraintes ci-dessous (figure 47) dans le but d'avoir une vue d'ensemble des savoirs travaillés au cours du débat et d'effectuer une comparaison avec l'espace des contraintes possible établi *a priori* par le groupe de recherche (figure 32, p.179). Pour les élèves, l'augmentation de la température partout avec la profondeur et le lien entre cette température et la fusion conduisent à la nécessité d'une chaleur interne créant le magma par fusion de la roche et à celle de la présence de la chambre magmatique en profondeur. La libération des matériaux volcaniques lors des éruptions mène à la nécessité de la remontée du magma (figure 47). Les élèves mettent en jeu un seul paramètre, la température, dans la formation du magma.

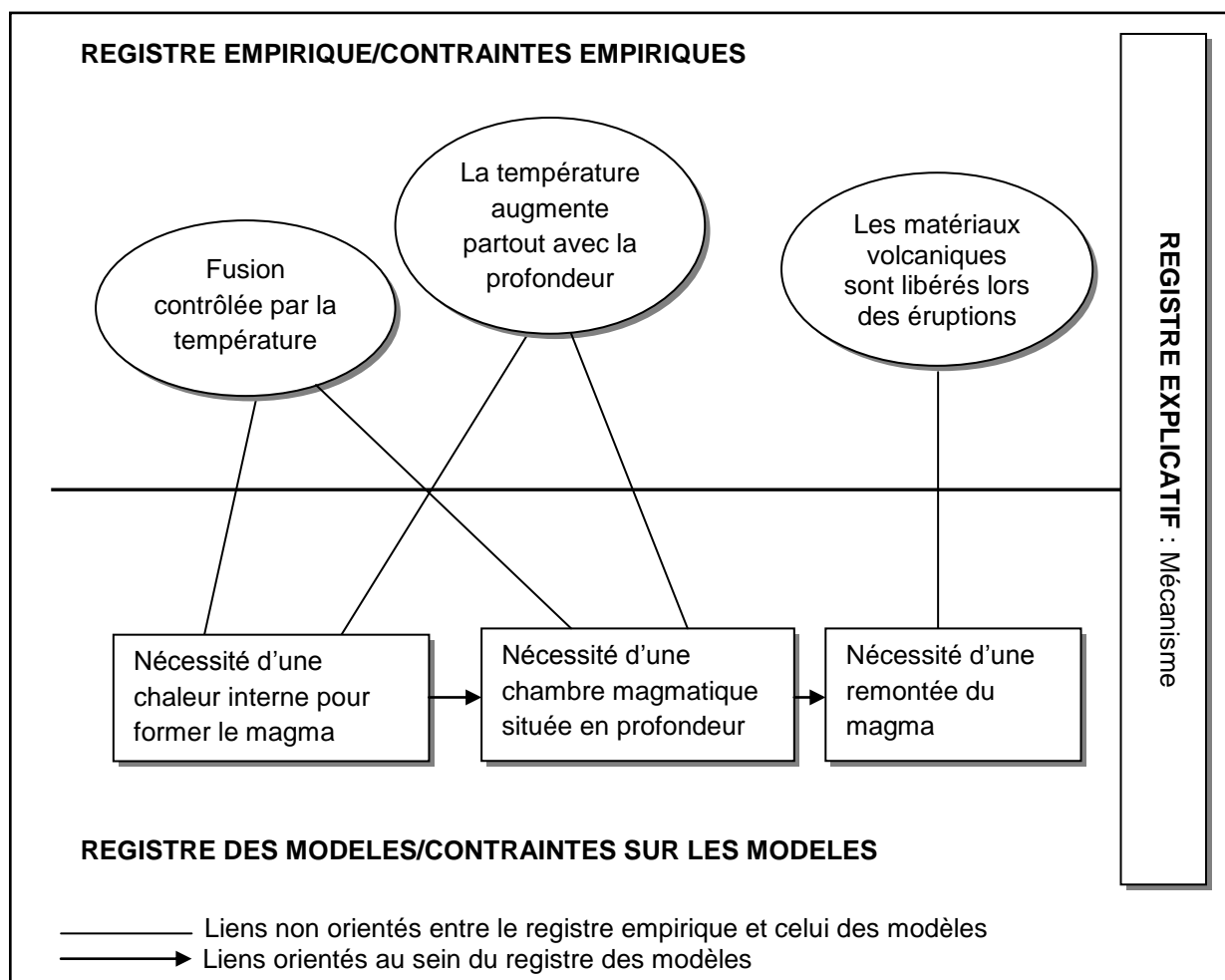


Figure 47. Espace des contraintes en jeu lors du débat de 4^{ème} en rapport avec le fonctionnement des volcans (séquence forcée).

En comparant cet espace des contraintes (figure 47) avec celui fixé par l'équipe de recherche au départ de la séquence (figure 32, p.179), nous constatons que la nécessité de la remontée du magma a été abordée par les élèves au cours du débat. Cependant, les contraintes empiriques qu'ils ont mobilisées (fusion contrôlée par la température, la température augmente partout avec la profondeur) diffèrent de celles établies par l'espace de contraintes possible (solidité de l'intérieur du globe et fusion contrôlée par la pression et la température). La mobilisation de ces contraintes – qui rappellent ceux mobilisés par les tenants de l'explication centrale magmatique historique (chapitre 2, figure 12, p.81) – conduit les élèves vers la nécessité d'une chaleur interne et d'une présence de la chambre magmatique en profondeur pour former le magma. Et non vers la nécessité d'une formation du magma. La formation du magma est évoquée lors du débat mais elle n'est pas rendue nécessaire puisque la solidité de l'intérieur du globe n'a pas été prise en compte. Les étapes suivantes de la séquence auront pour but d'explicitier les nécessités discutées pendant le débat et d'emmener les élèves vers celles déterminées par l'espace des contraintes possible définissant les objectifs d'apprentissage de la séquence forcée mise en place.

4.1.5 Conclusion

L'étude des interactions langagières et du débat montre que ce moment se positionne davantage sur la construction de possibilités ou d'impossibilités de fonctionnement que sur la recherche des solutions. Le débat se révèle riche en arguments, en objections et en ouvertures vers les possibles. L'enseignante pousse les élèves à exprimer leurs idées, à échanger et se retient de donner les solutions aux questions posées. Elle exprimait, par ses interventions, une volonté d'emmener les élèves au bout de leur pensée et de les faire réagir par rapport aux explications de leurs camarades. C'est dans ce but que le groupe de recherche avait construit le débat dans une logique de problématisation et loin d'une logique centrée sur la recherche de la solution vraie. **Les arguments des écrits E1 se retrouvent donc pour l'essentiel déjà présents dans le débat et dans la mise en texte orale des élèves du problème du fonctionnement des volcans et de l'origine des matériaux volcaniques.** Ce sont bien ceux développés par les élèves avec l'aide de l'enseignante. Cependant, lorsque cela était nécessaire, des moments de fermeture des possibles ont été opérés. Le travail se poursuit avec la production de l'écrit E2 au cours de la phase de catégorisation des raisons de non fonctionnement.

4.2 Lors de la catégorisation des raisons de non fonctionnement

Le groupe de recherche avait sélectionné, à partir de l'écrit E1, neuf raisons de non fonctionnement des modèles et a proposé aux élèves de les classer. Le travail de catégorisation s'est déroulé en deux temps : en binôme puis collectivement. C'est la phase collective que nous étudions. L'écrit E2 partage les raisons de non fonctionnement en deux catégories. La première concerne la production du magma et la deuxième la remontée et la profondeur du magma. Comment les élèves ont-ils pris en charge ce travail de classement introduit par le groupe de recherche et quel a été le rôle de l'enseignante ? Nous nous basons, dans cette analyse, sur la transcription de cette phase disponible en annexe 13.

L'enseignante commence le travail collectif en demandant à un binôme d'élèves de proposer sa catégorisation qu'elle dispose au tableau puis elle sollicite la réaction de la classe. Cette première disposition regroupe d'un côté les raisons A, B, C, F, G et H et de l'autre les raisons D, E et I :

A- ça ne fonctionne pas parce que la chambre n'est pas assez profonde ;	D- ça ne fonctionne pas parce que la poche est trop profonde ;
B- ça ne fonctionne pas parce que la température n'est pas assez élevée pour que ça fonde ;	E- ça ne fonctionne pas car le magma ne peut pas remonter ;
C- ça ne fonctionne pas car la chambre n'est pas approvisionnée en magma ;	I- ça ne fonctionne pas car c'est très éloigné de la surface de la Terre.
F- ça ne fonctionne pas car il n'y a aucune production de magma ;	
G- ça ne fonctionne pas car il ne fait pas assez chaud pour former du magma.	
H- ça ne fonctionne pas car il n'y a pas de cheminée pour que le magma puisse remonter ;	

Une discussion s'engage autour de cette disposition et certains déplacements sont proposés par les élèves (déplacer la raison H, inverser la A et la E) qui justifient leurs propositions d'aménagement (30-31 ; 34-39). Ces justifications se rapportent à la logique de classement suivie.

30	P. Le H vous l'auriez mis à droite. Les autres ? Qui a mis le H de l'autre côté ? Oui. Pourquoi Antoine ?
31	Antoine. Ben parce que c'est trop profond.

34	P. Et de ce côté là qu'est-ce qu'il y a ? Comme idée alors ? Est-ce que déjà de ce côté là, est-ce que vous êtes d'accord de mettre ces trois affiches ensemble ?
35	E. Non.
36	P. Ah ! Romain ?
37	Romain. Nous on a inversé le E et le A.
38	P. Le E et le A. Pourquoi ? Ça ne fonctionne pas parce que la chambre n'est pas assez profonde. Ne peut pas remonter.
39	Romain. La partie de gauche ça parle de la production et la remontée du magma et la partie de droite de la profondeur de la chambre.

Suite à la proposition de Romain (39), Vincent propose de déplacer les étiquettes A et H ce qui ne suscite pas l'accord d'un autre élève de la classe. Les discussions se poursuivent et la classe essaye d'arriver à un compromis et de comprendre la nature des liens entre les raisons classées dans chacune des catégories. Le groupe se met finalement d'accord sur un classement commun en déplaçant les deux étiquettes A et H. La première colonne comporte les raisons de non fonctionnement concernant la production du magma et la deuxième celles liées à la remontée (57-60). Ainsi, les catégories proposées au départ par Romain (39) ont été maintenues. Les discussions de la classe ont surtout porté sur le classement des raisons au sein de ces deux catégories.

55	P. Alors du coup après qu'est-ce qu'on ajoute alors ?
56	Vincent. Ben la A et la H.
57	P. La A, ça ne fonctionne pas parce qu'elle n'est pas assez profonde. Bon et puis ? La H, ça ne fonctionne pas parce qu'il n'y a pas de cheminée pour que ça remonte. D'accord.
58	Théo. C'est la remontée du magma.
59	P. Et ici alors qu'est-ce qui reste ?
60	Théo. Ben c'est la production.

Cependant, un élève apparaît gêné par la position de la raison A (70-74). Il considère qu'elle concernerait plutôt la production du magma parce que la roche ne pourrait pas fondre si la chambre n'est pas assez profonde (73). La classe ne modifie pas pourtant la catégorisation réalisée puisqu'elle semble liée à la profondeur et la remontée du magma.

70	P. Non. Qui n'est pas d'accord ? Antoine.
71	Antoine. Ben la A.
72	P. Ben la A, qu'est-ce qu'elle a la A ?
73	Antoine. Ben si c'est pas trop profond, ça ne peut pas fondre.
74	P. Qu'est-ce qui se passe dans la chambre magmatique ? Rappelle-moi.

Le travail de classement précédent a facilité la désignation des titres pour les deux catégories (94-102). Les élèves saisissent bien l'intérêt de ce travail de catégorisation.

98	P. Alors qu'est-ce que vous pouvez mettre un titre ici pour les deux colonnes, est-ce que vous avez trouvé en titre ? Eva ?
99	Eva. Eh ben, on n'a pas trouvé de titre.
100	P. Non mais ça ne t'empêche pas de discuter apparemment. Oui Vincent ?
101	Vincent. Tout ce qui concerne la production du magma.
102	P. Alors je le mets où ? Là ou là ?
103	Vincent. A gauche.
104	P. A gauche. La production du magma. Production, fabrication du magma. Et de l'autre côté ? Oui ?
105	Vincent. Tout ce qui concerne la profondeur et la remontée du magma.
106	P. La profondeur et la remontée du magma. Alors qu'est-ce que vous en pensez les autres élèves ? du magma pardon. Est-ce que vous êtes d'accord ou pas avec ce titre ? Est-ce que chacune des étiquettes ici parlent de production, de fabrication ? Antoine ? Est-ce qu'on parle bien de fabrication ici ? A chaque fois ? Bien et ici est-ce qu'on parle bien de notion de remontée hein, et de profondeur, puisque c'est lié hein remontée en parallèle avec la notion de profondeur du magma, est-ce que ça marche ?

L'écrit E2 qui représente un classement des raisons de non fonctionnement en deux catégories liées à la production et à la remontée du magma a donc été construit par les élèves. Le travail de catégorisation a induit l'accès aux deux raisons de non fonctionnement des volcans : le magma ne peut pas se former et ne peut pas remonter. Le changement de niveau introduit par le groupe

de recherche – qui consiste à faire travailler les élèves sur les raisons portant sur les caricatures d'explications et non plus sur les explications elles-mêmes – a été réalisé et pris en charge par les élèves. En prenant appui sur l'écrit E2, l'enseignante introduit l'ébauche du texte de savoir final E3a (104-106) que les élèves complètent en exploitant la documentation scientifique préparée par l'équipe de recherche. Ce procédé, œuvre de l'enseignante, a permis de faire passer les élèves de la recherche des raisons de non fonctionnement vers celle des solutions tout en gardant les traces de la problématisation et les liens avec les activités précédentes.

108	P. [...] Donc on va essayer de comprendre maintenant comment c'est dans la Terre pour que ça marche ? On a vu tout à l'heure que ça ne fonctionnait pas et maintenant on va voir comment c'est dans la Terre pour que ça marche.
109	Théo. On recopie ?
110	P. Non, ne prenez pas la peine puisque vous allez avoir un tableau préparé correctement. Alors. Pour qu'il, pour que ça marche, il faut que, il faut que le magma remonte, première raison et puis autre raison, il faut que le magma se forme. Voilà. Bien. On va lire ensemble donc les documents.

Après l'introduction de l'écrit E3a, ébauche du texte de savoir final, l'activité de mise en texte continue avec l'exploitation de la documentation scientifique.

4.3 Lors de l'exploitation de la documentation scientifique

L'exploitation de la documentation scientifique se fait collectivement au vu du peu de temps accordé à cette dernière phase. L'enseignante lit, au fur et à mesure, le document scientifique (annexe 10) et demande aux élèves de désigner les informations qui permettraient de compléter les cases de l'écrit E3a. Puis, elle écrit au tableau les solutions reformulées par les élèves (106-121, voir aussi un autre exemple 169-181). Avec l'avancée de la lecture, elle sollicite les élèves à enrichir ce qui est déjà noté dans les deux cases.

106	P. [...] Est-ce que déjà dans ce paragraphe là, vous avez des arguments qui permettent de compléter les deux cases, à la lecture. Je vous laisse réfléchir. Alors est-ce que vous trouvez des informations qui vous permettent de compléter le tableau. Oui ?
107	Théo. La température augmente avec la profondeur ce qui pourrait faire fondre la roche, 1000 degrés à 2000 degrés pour des profondeurs de 100 à 200 Km.
108	P. Oui alors qu'est-ce qu'on écrit concrètement dans notre tableau. Va-y.
109	Théo. Ben que la roche euh.
110	P. Dans quelle case ? A droite ou à gauche ?
111	Théo. Euh à droite.
112	P. Il faut que le magma se forme. Alors, argument qui peut donc identifier, vas-y.
113	Théo. Que la roche fond.
114	P. La roche va-y.
115	Théo. Dans les profondeurs de la Terre à 1000 à 2000 degrés.

116	P. Oui. Vous pouvez écrire en même temps dans votre tableau que vous avez sous les yeux. Oui ? La roche fond dans les profondeurs de la Terre, quelles profondeurs tu as dis ?
117	Théo. 100 à 200 Km.
118	P. 100 à 200 Km. Et puis ?
119	Théo. A 1000, 2000 degrés.
120	P. A des températures de, environ, d'environ 1000 à ...
121	Théo. 2000 degrés.

Les élèves retiennent que le magma se forme suite à une fusion de la roche à certaines profondeurs (-70 et -200km) et sous des conditions précises de pression et de température. Toutefois, la solidité de l'intérieur du globe et la formation du magma à des endroits précis n'ont pas été vraiment prises en compte malgré le fait que le document scientifique les prend en considération. Quant à la remontée du magma, elle est rendue possible grâce à la pression des gaz qui permet la création de failles et de cheminées. De plus, le lieu de fabrication peu profond du magma faciliterait cette remontée. Lorsque l'enseignante demande aux élèves d'expliquer le lien entre le lieu de formation peu profond du magma et la facilitée de sa remontée, des argumentations sont développées (182-194).

186	P. [...] « Son lieu de fabrication peu profond par rapport à l'échelle de la Terre permet sa remontée vers la surface. » Alors comment vous comprenez cette dernière phrase ? Vous m'aviez proposé la dernière fois qu'il y avait une origine très profonde du magma. Alors qu'est-ce que vous en pensez ? Basile.
187	Basile. Vu qu'il est peu profond, il peut remonter.
188	P. Pourquoi tu dis vu qu'il est peu profond, il peut remonter ?
189	Basile. Euh ben si c'est trop profond, il ne pourrait pas remonter.
190	P. Oui mais pourquoi il ne pourrait pas remonter ? Oui ? Mathieu ?
191	Mathieu. Mais il faut dire euh pourquoi il ne peut pas monter et pourquoi il peut monter.
192	P. Alors pourquoi il peut monter effectivement ?
193	Mathieu. Parce que la roche elle fond, ben ça s'accumule, l'air remonte.
194	P. La roche fond, ça c'est vu, on est à cette profondeur là. Il peut remonter grâce aux gaz. Maintenant pourquoi le fait qu'il soit à une origine peu profonde lui permet donc de remonter ? Oui.
195	Vincent. Vu qu'il est à une origine peu profonde, il va mettre moins longtemps à remonter pour pouvoir s'expulser.
196	P. Oui il va mettre moins longtemps à remonter puisqu'il ne vient pas de si profond que ça. Hein vous comprenez ? Et puis ? du coup ?
197	Vincent. Plus il va être profond, plus ça va mettre longtemps à...
198	P. Plus ça va être profond, plus ça sera long à remonter effectivement. Du coup on aura des temps aussi différents entre les moments des éruptions. On aura des moments où c'est en éruption, des moments où ça n'est pas en éruption puisqu'il faut bien attendre que le magma remonte. D'accord. Et plus ces chambres magmatiques seront profondes, plus il sera formé en profondeur eh bien plus ce sera long lors de sa remontée. Mais dans tous les cas, il ne vient pas du noyau. Est-ce que ça va, ça ? C'est vérifié ? Oui ?

Alors on écrit cette dernière phrase. Hein. Donc son lieu de fabrication peu profond.

La phase d'exploitation de la documentation scientifique se base sur la recherche des solutions qui réalisent les nécessités déjà identifiées par l'écrit E3a. Ce travail de mise en texte se fait en collaboration entre l'enseignante et les élèves qui repèrent les solutions, les reformulent et emmènent certaines explications et argumentations supplémentaires.

L'étude que nous venons de réaliser nous a permis d'analyser l'activité de l'enseignante et des élèves pendant les phases de travail repérées. Lors du débat, l'enseignante pose des questions d'explicitation, pousse les élèves à exprimer leurs idées et se retient de donner les solutions alors que les élèves développent des argumentations et construisent des possibilités et des impossibilités de fonctionnement. Les écrits E1, suivant le débat, gardent des traces de cette activité de mise en texte orale. La catégorisation des raisons de non fonctionnement a été bien réalisée par les élèves qui ont accédé aux deux raisons principales contre le fonctionnement des volcans. La phase d'exploitation de la documentation scientifique s'est caractérisée par la recherche des solutions réalisant les nécessités repérées. Ainsi, nous retrouvons, lors de l'activité de mise en texte orale des élèves, des traces du processus de la problématisation déjà repérées dans les textes construits pendant la séquence. L'analyse de l'activité en situation de l'enseignante montre qu'elle s'est calée par rapport aux attentes du groupe de recherche. Pour mieux comprendre ses choix opérés, il est nécessaire de l'emmener à verbaliser son action. Pour cela, nous avons réalisé un entretien d'autoconfrontation avec cette enseignante pendant lequel elle commente et explicite sa pratique lors d'un moment de travail particulier de la séquence, celui du débat.

5. Etude de l'entretien d'autoconfrontation réalisé avec l'enseignante 2 et portant sur le débat scientifique

5.1 Présentation des conditions de mise en place de l'entretien

L'entretien d'autoconfrontation avec l'enseignante 2 s'est déroulé en juillet 2011. Nous l'avons mené en présence d'un chercheur en didactique des sciences (Denise Orange Ravachol) qui a participé aux réflexions entamées. L'entretien porte sur une partie du débat scientifique de la séquence forcée et concerne spécifiquement le passage des deux premiers groupes. Nous nous sommes limités à ceux-ci étant donné la durée importante du débat (1h20) et nous avons retenus le moment de débat – parmi d'autres de la séquence – parce qu'il est assez révélateurs de

l'activité et du positionnement de l'enseignante quant à la problématisation et à la mise en texte à partir de productions divergentes. La partie de la séquence en question est visionnée et des arrêts sont réalisés par l'enseignante qui apporte des commentaires sur ce qui s'y passe. Lorsque nous l'avons jugé opportun, nous nous sommes autorisés à intervenir pour effectuer des arrêts afin de solliciter la réaction de l'enseignante sur certains moments. L'objectif essentiel de l'entretien d'autoconfrontation enregistré en audio et transcrit (annexe 14) est d'éclaircir les choix effectués et les procédures mises en place par l'enseignante au cours de son activité pendant le débat. En effet, les verbalisations avancées permettent de révéler les connaissances qui organisent les choix en situation de l'enseignante.

Après cette présentation des conditions de mise en place de l'entretien d'autoconfrontation avec l'enseignante 2, nous analysons les propos avancés concernant le passage des deux premiers groupes.

5.2 Analyse de l'entretien d'autoconfrontation

Afin d'analyser le contenu de l'entretien d'autoconfrontation (annexe 14) mené avec l'enseignante 2, un découpage est opéré en fonction des thématiques discutées. Le tableau 17 ci-dessous révèle la catégorisation réalisée.

Thématiques	N° des interventions
1- Présentation de l'entretien	[1-20]
2- Spécificités des élèves	[21-32]
3- But des questions posées par l'enseignante	[33-43]
4- A quels moments favoriser les ouvertures vers les possibles et à quels moments réaliser des fermetures ?	[44-50] ; [121-163] ; [164-186] ; [353-364] ; [365-372] ; [374-424] ; [427-475]
5- Participation des élèves pendant le débat	[51-117] ; [200-212] ; [213-226] ; [263-268] ; [284-318] ; [319-352]
6- Fonctionnement idéal d'un débat (conditions)	[187-198]
7- Discussion entre l'enseignante et les didacticiens concernant la poursuite ou non de l'entretien	[276-283]

Tableau 17. Catégorisation des interventions avancées lors de l'entretien d'autoconfrontation avec l'enseignante 2, selon les thèmes abordés (séquence forcée).

Dans le cadre de cette recherche, ce sont les thématiques 4, 5 et 6 qui nous intéressent. Nous analysons, dans les paragraphes suivants, les verbalisations de l'enseignante en rapport avec chacune des thématiques.

5.2.1 Moments d'ouverture et de fermeture des possibles

Lors de l'entretien, l'enseignante note, à plusieurs reprises, que les problèmes ou les controverses émergents pendant le débat n'ont pas été résolus : « 47. P. On n'a pas résolu le problème et puis Vincent a apporté une contradiction donc euh qu'on n'a pas résolu ». Elle semble gênée par la façon demandée par le groupe de recherche pour gérer le débat qui, de son point de vue, n'apporte rien aux élèves (121-131) puisqu'elle ne donne pas de solution et ne prend pas partie lorsqu'une controverse se manifeste dans la classe. Ce constat est accompagné de questionnements sur les moments où l'enseignant devrait fournir la solution aux élèves.

121	P. J'ai l'impression que je ne leur apporte pas grand-chose quand même hein dans la façon de répondre.
122	H.C. Pas grand-chose dans quel sens ?
123	P. Ben je ne prends pas partie, je ne tranche pas du tout , d'ailleurs est-ce que j'avais besoin de trancher, je ne sais pas . Que je les laisse avec leurs idées les uns et les autres euh de chaque côté. Parce que Léo je ne lui ai pas répondu là, on n'a pas tranché, Léo dit une chose et puis Théo lui dit l'inverse. Et on n'a pas, on n'a pas tranché. Alors je ne sais pas est-ce qu'il faut trancher à ce moment là ?
124	D.O. Comment, oui comment après coup comment tu vois l'affaire toi ?
125	P. Je me dis que je les laisse avec leurs euh questions et que je leur donne pas de réponse . Et que Léo qui s'est réveillé au milieu de tout, au fond de classe là, il surgit d'une question parce que lui aussi il est intelligent et il fonctionne bien mais il faut aller le chercher, faut qu'il ait envie. Ben lui euh, je ne lui ai pas répondu .
126	H.C. Par rapport à la différence entre euh l'explosif et l'effusif.
127	P. Oui.
128	H.C. Si le fonctionnement était le même ou pas.
129	P. Oui voilà. Tu vois, ça ça me gêne ça .
130	D.O. Ça te gêne donc tu irais plutôt vers euh qu'est-ce qu'on peut leur répondre ici pour euh.
131	P. Ben je sais pas, est-ce que techniquement est-ce que c'est le moment où le prof tranche pour donner une réponse ? pour donner en fait la solution . Je ne sais pas, je vous demande, hein. Parce que mener des questions d'accord, hein, donc c'était mon rôle, c'était de mener des questions et de les faire euh, leur faire émerger ce qu'ils pensaient. Mais après à quel moment ou alors c'est venu dans un temps suivant où on avait réécrit au tableau tu sais euh ce qui ne fonctionnait pas et comment on fait pour que ça fonctionne, est-ce que c'est uniquement à ce moment là qu'ils vont récupérer la réponse à leur question ? Est-ce que c'est pas un peu loin ? Moi ça me paraît un peu loin.

Cette manière de faire change visiblement de l'ordinaire : « 138. P. *Ah oui. Parce que quand il a une question à poser qu'il la pose si c'est dans le milieu du sujet et qu'on a les moyens de, d'éclaircir tout de suite l'affaire **ben je réponds moi je ne le laisse pas dans le doute ni dans l'incertitude tu vois.** [...] ».*

L'enseignante justifie sa façon d'agir pendant le débat par le fait qu'elle n'a pas osé donner les réponses – suite à un calage par rapport aux attentes de l'équipe de recherche – même pour des questions de vocabulaire scientifique. Cette volonté s'exprime par le fait qu'elle demandait aux élèves sans arrêt : « Qu'est-ce que vous en pensez ? » (170) au lieu de leur amener directement les réponses aux problèmes qu'ils se posent. Elle affirme qu'elle ne voulait pas interrompre la réflexion des élèves mais se rend compte finalement qu'il était nécessaire de construire à certains moments (153).

152	D.O. Et voilà et puis en acte aussi hein, on n'avait peut être pas envie de tuer la réflexion euh...
153	P. Non ça non, ça j'avais bien en tête qu'il ne fallait pas que je, que je, comme tu dis que je tue la réflexion. Il fallait que je les laisse. Maintenant je me rends bien compte que, ben il faut quand même, il faut quand même arriver à, à construire à un moment donné quoi. Hein?

169	H.C. Mais c'est, tu le prends comment, le fait de leur demander euh...
170	P. Ben de justement, d'avoir peur de donner moi des réponses [...]

L'enseignante signale sa satisfaction de pouvoir arriver à un bilan lorsqu'à un instant, elle reformule les idées du deuxième groupe : « 355. P. [...] *j'étais contente d'arriver à un bilan.* ». Cette reformulation lui donnait effectivement l'impression d'apporter quelque chose aux élèves. « 359. P. *Le fait de reformuler et de redire en fait ce qui a été, ce qui est sorti, là je pense que j'apporte quelque chose. D'ailleurs ça se voit dans l'intonation de la voix.* ». Elle considère qu'il aurait été nécessaire d'être catégorique lors de certains moments comme celui portant sur la différence entre la lave et le magma (410-416). Toutefois, une nouvelle tension s'introduit puisque d'un côté il semble indispensable de fermer lorsqu'il est question de vocabulaire géologique, d'un autre la confusion entre les deux notions montre qu'elles ne sont pas tellement acquises d'où une tendance à vouloir laisser une ouverture (419).

410	D.O. Oui et par rapport au déroulement du débat est-ce que tu vois toi des moments où finalement ça devient nécessaire d'être catégorique ?
411	P. Oui sûrement oui, après étude oui. Certainement.
412	D.O. Oui.
413	P. Ce serait sans doute à refaire euh ce serait mené différemment justement avec des moments plus, plus d'ouverture et des moments où c'est plus fermé quoi.
414	D.O. Plus fermé oui.
415	P. Je pense oui.

416	D.O. Et un des moments peut être de fermeture, t'avais l'air de dire que c'était par exemple, par rapport à ce moment là, avec magma.
417	P. Par exemple oui. C'est inutile de...
418	H.C. Une histoire de vocabulaire.
419	P. Oui. Ben oui, en même temps ça montre que ce n'est pas acquis non plus les deux mots là. Ils prennent encore l'un pour l'autre mais...
420	D.O. On trouve une nouvelle tension c'est ça ?
421	P. Oui.
422	D.O. On veut fermer et garder parce que ça nous dit quelque chose.

Concernant les plaques, leur mention pendant le débat était un peu gênante pour l'enseignante. Elle indique que les programmes scolaires ne vont pas dans le bon sens et envisage, l'année suivante, de commencer par l'étude de la tectonique des plaques puis d'aborder les phénomènes volcaniques et sismiques en lien avec cette théorie. C'est en se plaçant dans cette situation qu'elle aurait pu laisser l'élève en question développer ses idées.

448	P. Oui. Ben oui. C'est pour ça je pense que pour ça que je vais revoir l'ordre euh et puis ben peut être qu'à ce moment là, j'aurais à mieux répondre, ou de l'aider à formuler, parce que là euh j'étais bien embêtée hein.
449	H.C. Ça allait t'emmener sur autre chose euh.
450	Isabelle. Ben oui.
451	H.C. Tout à fait différent.
452	Isabelle. Qui n'est pas vu, ben oui, éloigné quoi. Parce qu'on était sur du volcanisme local alors que l'explication en fait elle est globale quoi.

5.2.2 Participation des élèves pendant le débat et fonctionnement idéal d'un débat

L'enseignante fait remarquer que les élèves s'engagent bien dans les échanges lors du débat. Les membres du deuxième groupe tiennent compte de ce qui a été dit avec le groupe précédent et apportent des explications qui font bien avancer la construction des savoirs (341). De plus, elle indique qu'elle a été plus à l'aise avec ce groupe qu'avec le premier parce que leur schéma était plus facile à comprendre (343 ; 523).

523	P. Moi je pense que j'étais plus à l'aise avec le deuxième groupe qu'avec le premier. Ça vient du fait de, de ce qu'ils proposent hein. C'est pas que les élèves parce que euh à la limite les élèves euh j'aurais pas fait de différence euh pour les faire parler. Mais ça vient de ce qu'ils proposent qui me déstabilise moins sur ce schéma là que sur celui de tout à l'heure. Bon le fait que peut être aussi que c'est le premier quand même aussi ça peut jouer. Mais bon peut être. Et puis j'ai envie d'aller peut être un peu plus vite moi aussi.
-----	--

A côté de ces moments de participation d'élèves, l'absence de réaction de quelques élèves du fond de la classe est remarquée au cours du visionnement de l'enregistrement. L'enseignante considère que la durée du débat a été longue (1h20) et que c'était toujours les mêmes élèves qui réagissaient. Elle signale que le fonctionnement d'un débat nécessite d'avoir des élèves qui participent et qui ont une aisance orale à exprimer leurs idées. Elle note qu'elle n'aurait pas réalisé ce type d'activité avec une autre classe où il n'y avait pas moyen d'avoir une discussion et où les élèves n'osent pas tellement participer (190). La variété et la diversité des interventions rendent le débat plus riche : « 192. P. *Après euh plus le répondant est divers et varié, plus c'est riche évidemment. Et plus c'est intéressant pour l'enseignant aussi à mon avis parce que du coup il peut confronter, enfin. [...]* ».

Nous constatons que l'enseignante a agit pendant la situation de débat scientifique et de mise en texte orale de la séquence forcée en se calant par rapport aux attentes du groupe de recherche. Pendant cette phase, les moments d'ouverture des possibles ont été plus importants que ceux de fermeture et l'enseignante n'apportait pas directement des réponses aux questions des élèves. Elle gérait le débat de façon à ce que ceux-ci explicitent leurs propres idées et échangent entre eux. Cette manière de faire a probablement permis aux élèves d'argumenter « pour » et surtout « contre » les idées explicatives proposées et donc de repérer des possibles et des impossibles dont les traces se retrouvent dans l'écrit E1. Au cours de l'entretien d'autoconfrontation, les propos de l'enseignante révèlent une tension entre cette manière d'agir pendant le débat et sa pratique habituelle qui ne laisse pas les élèves dans l'incertitude mais leur procure directement des réponses à leurs questions. Elle considère, *a posteriori*, que certains moments nécessitaient quand même une fermeture des possibles. Son action a été guidée par des concepts organisateurs qu'il est possible d'identifier. Ainsi, suite aux analyses précédentes, un concept pragmatique peut être repéré. Il s'agit de la « réticence didactique »⁷⁹ (Sensevy & Quilio, 2002) de donner les solutions aux problèmes soulevés pendant le débat (si les élèves posent des questions au groupe qui présente ou si une controverse émerge, l'enseignante ne donne pas la bonne réponse mais sollicite la réaction de la classe). Ce concept n'est pas habituellement un concept pragmatique pour cette enseignante mais marque la façon dont elle a compris la commande du groupe de recherche. L'identification de ce concept nous permet de comprendre ce qui a organisé l'activité de l'enseignante. Cette activité semble favoriser le développement d'une mise en texte

⁷⁹ « Le professeur est [...] contraint à se taire là où il aurait la (fausse) possibilité de parler, il est donc contraint à tenir par-devers lui certaines des choses qu'il veut enseigner, et à engager les élèves dans des rapports aux milieux qui leur permettraient de passer outre ce silence. Ce phénomène, nous le nommons réticence didactique. » (Sensevy & Quilio, 2002, p.50).

problématisé des savoirs et s'éloigner de celle d'une mise en texte propositionnelle qui se limiterait aux solutions sans accès aux raisons.

6. Conclusion

La séquence forcée que nous avons mise en œuvre au sein d'une équipe de recherche ainsi que l'étude de la mise en texte et des pratiques enseignantes en jeu, apportent des éléments de réponse à nos questionnements de départ. Les textes construits lors de cette séquence forcée – qu'ils soient intermédiaires ou finaux – portent des caractéristiques qui les rapprochent des textes problématisés et raisonnés. Cela a été possible grâce à l'aménagement et l'introduction, par le groupe de recherche, de nouveaux d'ostensifs employés pour faire passer les élèves d'un travail sur leurs propres modèles explicatifs, à un travail sur les raisons puis les solutions. La séquence a été effectivement construite dans une logique de problématisation visant la « construction » des problèmes par les élèves. Les interventions de l'équipe de recherche ont été variées : schématisation des explications, dépersonnalisation et décontextualisation des écrits, introduction d'activités de classement des raisons, etc. Ces interventions ont permis de faire passer les élèves de leurs idées spontanées aux raisons à travers l'introduction de plusieurs sauts abstraits.

Des traces de l'activité de problématisation ont été décelées suite à l'analyse des interventions et interactions langagières de l'enseignante et des élèves. D'abord, le débat scientifique se montre riche en argumentation et en construction de raisons. La focalisation était loin d'être centrée sur les solutions avec une enseignante qui favorise l'expression des idées des élèves et s'abstient de donner les solutions. Les écrits produits, au terme de cette phase, gardent les traces des arguments développés lors des échanges oraux. Ensuite, le classement des raisons de non fonctionnement a été pris en charge par les élèves qui ont saisi l'intérêt du travail qui leur a été proposé. Finalement, l'exploitation de la documentation scientifique s'est déroulée en collaboration entre l'enseignante et les élèves qui repèrent les solutions réalisant les nécessités, les reformulent et emmènent certaines explications supplémentaires. De plus, les écrits de cette séquence ont été élaborés par les élèves, loin des textes préparés et fournis habituellement par les enseignants.

L'analyse de l'entretien d'autoconfrontation portant sur le débat de la séquence forcée permet d'identifier le concept pragmatique de « réticence didactique » qui a organisé l'activité de l'enseignante pendant ce moment. Ce concept semble favoriser la mise en texte problématisé des

savoirs chez les élèves. Ces résultats montrent que l'enseignante 2 – novice dans la mise en œuvre et la gestion des débats – s'est positionnée dans une logique de problématisation (possible/nécessaire) lors de la mise en place de la séquence malgré une pratique habituelle qui semble focalisée sur la « résolution » des problèmes. Ce positionnement ajouté aux activités introduites par l'équipe de recherche pour identifier et faire travailler les élèves sur les raisons, a permis de construire des textes problématisés.

Dans l'objectif de prolonger l'étude des conditions de construction de textes problématisés, nous poursuivons cette recherche en examinant un autre problème, celui du magmatisme des zones de zones de subduction en Terminale S. Par conséquent, nous nous intéressons, dans le chapitre suivant, à une séquence en partie forcée mise en place en classe de Terminale S.

**Chapitre 6. Etude de la mise en texte et des
pratiques enseignantes en œuvre lors d'une
séquence en partie forcée portant sur le
magmatisme des zones de subduction en classe de
Terminale S**

Introduction

Dans le but de poursuivre notre étude des conditions de construction d'un texte de savoir associant les raisons aux solutions et prenant en considération le caractère apodictique des savoirs, nous nous intéressons à une troisième étude de cas. Cette dernière concerne une séquence en partie forcée portant sur le problème du magmatisme des zones de subduction menée dans une classe de Terminale S. L'étude de cette séquence amène des réponses aux objectifs 1, 3 et 4 de notre recherche qui visent à identifier les pratiques enseignantes en jeu pour une mise en texte problématisé ainsi que les difficultés et les conditions relatives à cette construction. L'analyse de la séquence forcée de Terminale S commence avec une description détaillée de son déroulement et des textes construits. Ensuite, les écrits sont étudiés pour déterminer s'ils portent des traces éventuelles de problématisation. Finalement, c'est l'activité en situation conduisant à ces textes qui est examinée.

1. Analyse générale du scénario didactique forcé

1.1 Conception de la séquence forcée d'enseignement-apprentissage

La séquence forcée, composée de 4 séances, a eu lieu dans une classe de Terminale S de 33 élèves, âgés entre 17 et 18 ans, au Lycée Montesquieu au Mans. L'enseignante 3 est expérimentée et connaît le cadre théorique de la problématisation du fait de sa participation aux recherches entreprises par l'équipe du CREN. Elle participe notamment aux ateliers de didactiques des SVT pilotés par Christian Orange et Denise Orange Ravachol. La séquence, qui s'est déroulée en mai 2010, concerne l'explication du magmatisme des zones de subduction prise en compte par la partie du programme dédiée à l'étude de la « *convergence lithosphérique et ses effets* » (M.E.N., 2001, p.29). Les élèves disposent de connaissances concernant la structure du globe, la convection du manteau, le mouvement des plaques lithosphériques et les processus magmatiques. Ces connaissances seront réinvesties pour aborder le problème posé. Le groupe de recherche ayant participé à la construction de cette séquence comprend, en plus de l'enseignante 3, une autre enseignante (enseignante 4) engagée dans un Master recherche en sciences de l'éducation et un didacticien des sciences de la vie et de la Terre (SVT), Denise Orange

Ravachol⁸⁰. Les séances de classe ont été enregistrées (vidéo et audio) et l'intégralité des productions écrites récoltées. Deux types d'objectifs (de recherche et d'apprentissage) ont guidé la construction de cette séquence forcée (Orange, 2010) :

- **Les objectifs de recherche** sont identiques à ceux que nous nous sommes fixés pour la séquence forcée précédente de 4^{ème}. Il s'agit d'identifier les difficultés et les conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé et non propositionnelle des savoirs dans le domaine du magmatisme. L'apodicticité des savoirs scientifiques est mise en avant ainsi que sa prise en compte dans les textes de savoirs construits. Ces objectifs sont déterminés par le groupe de recherche mais demeurent sous le contrôle des chercheurs didacticiens qui maîtrisent les multiples aspects (didactiques, théoriques, empiriques) de la construction des savoirs problématisés (ibid.).

- **Les objectifs pédagogiques (ou d'apprentissages)** consistent à construire, dans une logique de problématisation, le problème explicatif de l'origine du magmatisme des zones de subduction. Une telle construction « *convoque et articule des contraintes empiriques (le manteau solide, des données expérimentales sur la fusion des roches, etc.) et des contraintes théoriques inhérentes au cadre de la tectonique des plaques (le concept de plaques, de zone de subduction, etc.) jusqu'au point d'établir la **nécessité d'une production locale du magma à une certaine profondeur**⁸¹ à l'aplomb des volcans des zones de subduction, et celle d'un mécanisme capable d'abaisser la température de fusion des roches mantelliques*⁸² » (Orange Ravachol, 2010, p.49). Le but de la séquence forcée serait de faire accéder les élèves à ces deux nécessités qui sous-tendent les solutions au problème du magmatisme des zones de subduction et qui permettent de définir le concept de magmatisme pour ce niveau d'enseignement. L'espace des contraintes possible (figure 48) montre les relations entre les différents registres mentionnés. Les objectifs d'apprentissages, qui se situent dans le cadre d'une explication globale magmatique⁸³, sont fixés par le groupe mais restent sous le contrôle de l'enseignant. Le problème étudié est plus ou moins familier des élèves de Terminale S puisqu'ils ont déjà abordé la théorie de la tectonique des plaques dans les classes précédentes. De plus, les domaines physico-chimiques nécessaires pour construire ce problème sont mieux maîtrisés qu'en classe de 4^{ème}.

⁸⁰ Nous n'avons pas pu participer à la mise en place de cette séquence compte tenu de notre indisponibilité au moment de sa préparation et de son déroulement.

⁸¹ Surligné par nous.

⁸² Surligné par nous.

⁸³ Voir chapitre 2.

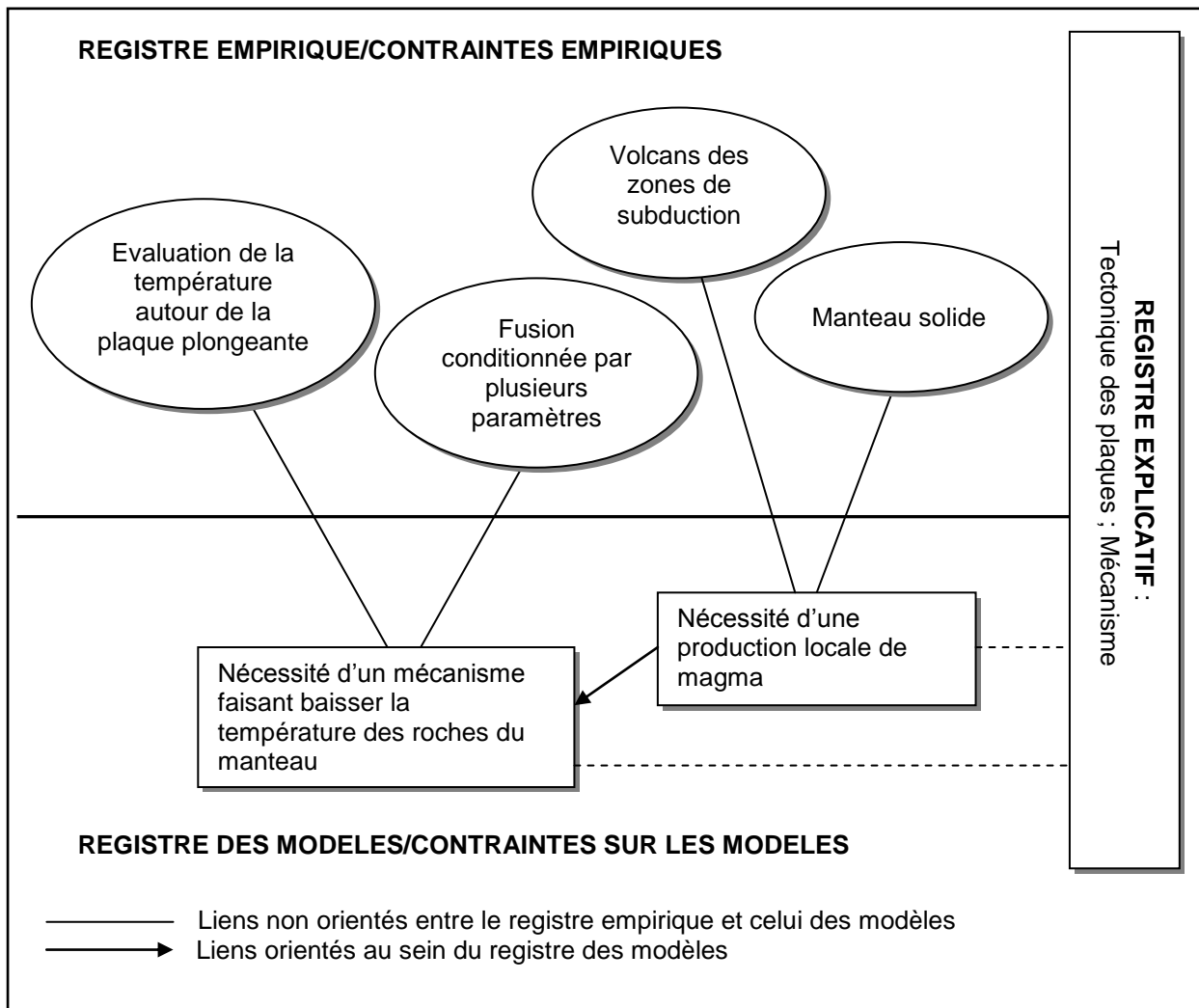


Figure 48. Espace des contraintes envisageable pour le niveau Terminale scientifique (17-18 ans) (Orange Ravachol, 2010, p.49).

La construction de la séquence forcée s'est déroulée, au fur et à mesure, par le groupe qui effectue des échanges avant et après chacune des séances. Pour ce travail, une partie importante des discussions entre le didacticien et les enseignantes a eu lieu par courrier électronique étant donné la distance qui sépare la ville de Nantes (lieu de travail du didacticien) de celle du Mans (lieu de travail des enseignantes 3 et 4) et l'impossibilité de la mise en place de réunions régulières. Nous rappelons que les enseignantes 3 et 4 participent depuis un certain nombre d'années aux recherches didactiques du CREN ce qui simplifie et facilite les échanges menés à distance. De plus, l'étude est menée en classe de Terminale où les contraintes relatives au baccalauréat sont prégnantes ce qui rend difficile le fonctionnement complet en séquence forcée.

Après avoir présenté les conditions de mise en place de la séquence forcée, nous en exposons une description complète dans le paragraphe suivant.

1.2 Description détaillée des discussions du groupe de recherche et de l'organisation des séances forcées

La méthodologie des séquences forcées se caractérise par la mise en place de réunions de recherche avant chaque séance de classe. Au cours de ces réunions, le groupe prépare la séance suivante en se basant sur les objectifs d'apprentissages et de recherche et en prenant appui sur les productions des séances précédentes. Selon les renseignements apportés par l'enseignant, des choix sont pris à propos des propositions de poursuite de la séquence suggérées par les didacticiens (Orange, 2010). Cette séquence forcée se divise en 3 grands blocs : la séance 1 ; les séances 2 et 3 ; la séance 4 (figure 49). Deux vagues d'échanges ont eu lieu, par courrier électronique, entre les enseignantes 3 et 4 et le didacticien avant et après la première séance. La dernière partie de la séquence a été préparée uniquement par l'enseignante 3, compte tenu de l'impossibilité de la poursuite des échanges et des contraintes de temps inhérentes à la préparation du baccalauréat par les élèves de Terminale. Malgré cela, l'analyse de la phase « forcée » de la séquence permet d'apporter des éléments de réponse à nos questionnements de recherche même si le travail n'a pas été mené jusqu'au bout avec la production d'un texte final qui garderait les traces de la problématisation.

La figure 49 ci-dessous présente le déroulement de la séquence forcée préparée par l'équipe de recherche.

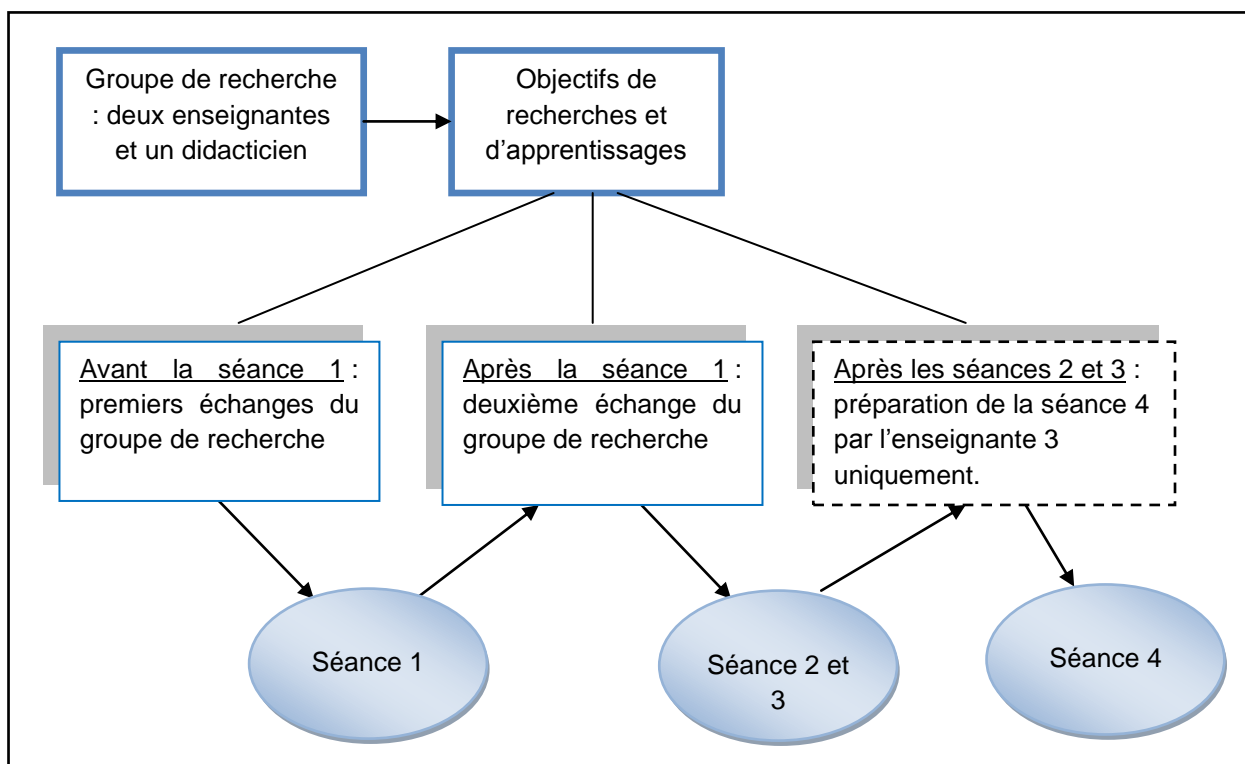


Figure 49. Déroulement de la séquence forcée de Terminale S.

Nous présentons une description détaillée des échanges entre les membres du groupe de recherche et des séances de classe telles qu'elles se sont réellement passées.

Avant la séance 1 : premiers échanges entre les membres du groupe de recherche

Les premiers échanges entre les enseignantes 3 et 4 et le didacticien ont pour objectif de fixer l'organisation générale de la séquence et de spécifier le déroulement de la première séance en fonction des objectifs de recherche et d'apprentissage établis. Cette première séance s'appuie sur la réalisation d'une **évaluation diagnostique des systèmes explicatifs des élèves** en rapport avec l'origine du magmatisme et le fonctionnement des zones de subduction. Le groupe prévoit d'abord de demander aux élèves d'expliquer individuellement par un schéma et un texte le fonctionnement des zones de subduction puis d'effectuer le même travail en groupes homogènes du point de vue des conceptions. Le but de cette phase étant de mettre en place, par la suite, un débat collectif durant lequel les travaux de groupe sont présentés, questionnés et confrontés afin de faire émerger les possibilités et les impossibilités de fonctionnement.

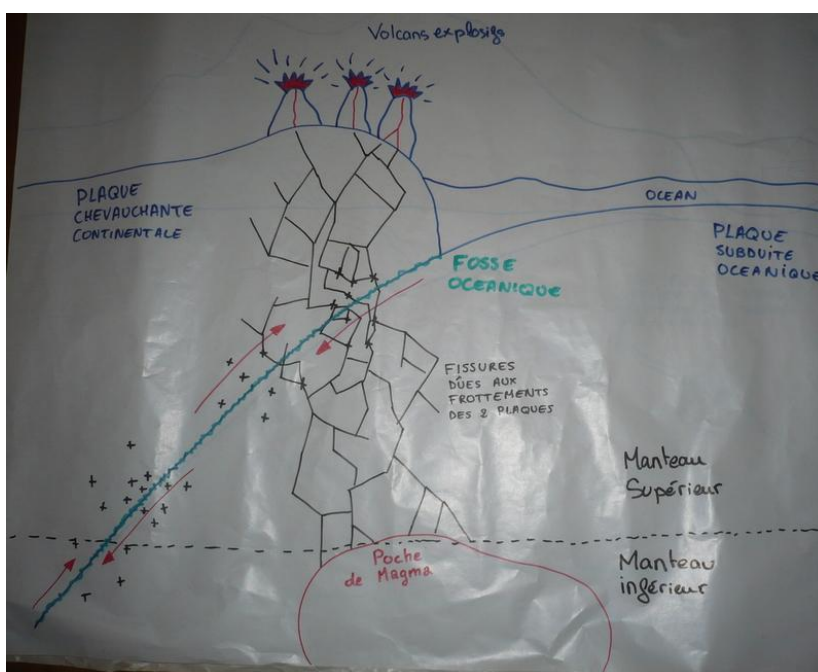
Séance 1

Les élèves répondent individuellement et par écrit (annexe 15) à la consigne suivante : « *Représenter sous la forme d'un schéma accompagné d'un texte le fonctionnement d'une zone de subduction, permettant d'expliquer la répartition des foyers des séismes et des volcans* ». Ensuite, l'enseignante répartit les élèves en groupes homogènes (sept groupes) du point de vue des conceptions et du fonctionnement. Le repérage des conceptions s'appuie sur les explications apparus dans les productions individuelles concernant le fonctionnement des zones de subduction. Les groupes élaborent, après discussion, un modèle commun sur une affiche (annexe 16). Les sept affiches produites ont été ramassées pour servir à la préparation des séances suivantes par les membres du groupe de recherche.

Après la séance 1 : deuxièmes échanges entre les membres du groupe de recherche

La préparation du débat scientifique de manière à engager les élèves dans un travail de problématisation et de construction des nécessités est envisagée. Dans un premier temps, l'équipe étudie les affiches explicatives des sept groupes et établit **un ordre de passage** ainsi **qu'une liste de questions possibles à poser** (figure 50 pour un exemple et annexe 16 pour l'intégralité des questions relatives aux sept affiches). Ces questions, du type « *comment est-ce*

possible ? » et « *peut-il en être autrement ?* » (Orange, 2007c, p.87), visent à interroger les idées explicatives qui seront exposées lors du débat en termes du possible, de l'impossible, du contingent et du nécessaire. Le but de la construction de ces questions est d'équiper l'enseignante pour emmener les élèves à problématiser et à exprimer les raisons sous-jacentes à leurs idées. Il s'agit de les pousser à montrer pourquoi ils sont parvenus à leur explication et pas à une autre. La classe a été divisée en deux demi-classes : la première comprenant les groupes 1, 2, 3 et 4 et la deuxième les groupes 5, 6 et 7 (annexe 16).



Suggestions de questions à poser pour le groupe 1 :

- Précisez la localisation de la poche de magma.

Deux cas :

1) ils sont sur du magma tout fait 2) ils fabriquent du magma

- Pourquoi est-il possible qu'il y ait une poche de magma là et pas ailleurs ? (plus haut, plus bas ? plus sur la droite, plus sur la gauche ?)

- Que se passe-t-il quand la poche de magma est vide ?

- Pourquoi est-il possible qu'il se fabrique du magma là et pas sur les côtés ? (on peut en effet envisager des lieux sur les côtés où les conditions sont équivalentes à cet endroit).

- Comment expliquez-vous la formation des fissures ici et pas ailleurs ?

- Si la Terre est plus chaude quand on s'enfonce, comment expliquer qu'elle ne soit pas fondue partout ? Qu'il y ait encore des fissures en profondeur ?

Figure 50. Exemple de production de groupe et des questions possibles à poser construites par le groupe de recherche (séquence forcée Terminale S).

Ensuite, il s'agit de réfléchir à la clôture de la phase de débat et à la préparation de celle de la documentation scientifique. Afin de clôturer le débat, le groupe construit le tableau de la figure 51 ci-dessous dans l'objectif de garder une trace écrite des argumentations mentionnées lors des discussions et des échanges. Le tableau met en avant trois modèles explicatifs majeurs apparus dans les affiches de groupe. Le premier révèle un magma provenant d'une réserve située dans le manteau/noyau et qui remonte par des fractures dues à la subduction. Le deuxième indique que la production du magma résulte de la fusion du manteau par augmentation de la température due aux frottements des deux plaques. Le troisième explique que le magma est issu d'une fusion du manteau causée par une diminution de la pression. Il est demandé aux élèves de situer la position de départ de leur groupe puis d'avancer pour chaque modèle explicatif, suite au débat, des argumentations « pour » ou « contre » son fonctionnement. Pour la suite, l'équipe sélectionne quelques documents scientifiques (annexe 17) à distribuer aux élèves dans lesquels ils devront relever, suite à leur étude, des argumentations « pour » ou « contre », les modèles explicatifs et compléter la deuxième ligne du tableau (figure 51). Nous soulignons que la préparation des documents a été effectuée par les enseignantes 3 et 4 sans participation du didacticien à ce travail. Les documents permettent aux élèves de relever des arguments opposés au fonctionnement des trois modèles explicatifs.

MODELE EXPLICATIF	Le magma provient d'une réserve située dans le manteau /noyau ; il remonte par des fractures dues à la subduction.	Le magma est issu de la fusion du manteau par augmentation de température due aux frottements des deux plaques.	Le magma est issu de la fusion du manteau due à une diminution de la pression.
<u>Situation de la proposition initiale de votre groupe</u> (voir affiche) Mettre une croix dans la case qui convient			
<u>Argumentation pour ou contre à l'issue du débat</u> Pour chaque modèle explicatif, dites pourquoi il peut fonctionner et pourquoi il ne peut pas fonctionner. Argumentez.			
<u>Validation à l'issue de l'étude des documents</u> Pour chaque modèle explicatif, dites pourquoi il peut fonctionner et pourquoi il ne peut pas fonctionner. Argumentez.			

Figure 51. Document préparé par le groupe de recherche et distribué aux élèves de Terminale S à l'issue du débat scientifique.

Séance 2 et 3

Les groupes de chaque demi-classe présentent et expliquent leur modèle commun. Cette phase est suivie par un débat collectif portant sur les différentes explications. Les affiches sont gardées au tableau au fur et à mesure du passage des groupes. A l'issue du débat, l'enseignante distribue aux élèves le document préparé, au préalable, par l'équipe de recherche (figure 51). Individuellement, ils indiquent leur(s) proposition(s) de départ et rédigent des argumentations « pour » et « contre » les trois modèles explicatifs. Après l'accomplissement de ce travail, ils consultent, par binôme et sur ordinateur, les documents scientifiques (annexe 17) et complètent la dernière ligne du tableau. En se basant sur les supports documentaires, les élèves repèrent des arguments expliquant pourquoi chacun des modèles peut ou non fonctionner. Ces productions écrites (exemple en figure 52) constituent, pour la partie rédigée à l'issue du débat, le premier écrit intermédiaire (E1) et pour celle rédigée suite à l'étude des documents, un deuxième écrit intermédiaire (E2).

MODELE EXPLICATIF	Le magma provient d'une réserve située dans le manteau /noyau ; il remonte par des fractures dues à la subduction.	Le magma est issu de la fusion du manteau par augmentation de température due aux frottements des deux plaques	Le magma est issu de la fusion du manteau due à une diminution de la pression
Proposition initiale de votre groupe (voir affiche) Mettre une croix dans la case qui convient		X	X
Argumentation pour ou contre à l'issue du débat : Pour chaque modèle explicatif, dites pourquoi il peut fonctionner et pourquoi il ne peut pas fonctionner. Argumentez.	<u>Contre</u> La poche de magma ne peut pas précéder et impossible la coïncidence d'une poche dans la même zone de chaque plaque.	<u>Pour :</u> Les frottements sont l'un des seuls paramètres qui varient par rapport au reste de la Terre	<u>Pour :</u> On retrouve des mouvements de convections, comme au niveau des dorsales .
Validation à l'issue de l'étude des documents Pour chaque modèle explicatif, dites pourquoi il peut fonctionner et pourquoi il ne peut pas fonctionner. Argumentez.	<u>Contre :</u> Les mouvements de convection sous la lithosphère se font dans une asthénosphère plastique ⇒ il n'y a pas de fractures dues à la subduction dans la zone manteau /noyau .	<u>Contre :</u> Il n'y a pas de frottements : on a des fractures et des ruptures . Selon la courbe des températures : zone froide la zone de collision .	<u>Contre :</u> Plus on est profond , plus la pression augmente .

Figure 52. Exemple de production argumentative individuelle produite par un élève de Terminale S à l'issue du débat et de l'étude de la documentation scientifique (Ecrit 1 et 2).

Après les séances 2 et 3 : préparation de la séance 4 par l'enseignante 3 uniquement

Les échanges entre le chercheur didacticien et les enseignantes 3 et 4 s'interrompent à ce stade de la préparation de la séquence forcée. La suite de cette séquence a été conçue par l'enseignante 3 pour les raisons que nous avons déjà désignées (impossibilité de la poursuite des échanges et contraintes de temps propres à la préparation du baccalauréat). De plus, la préparation de la suite de la séquence, à partir de l'analyse des écrits produits E1 et E2, demandait un temps de travail que les membres du groupe de recherche n'étaient plus en mesure d'assurer.

Séance 4

L'enseignante revient sur le problème posé et les différents modèles explicatifs possibles. Elle met l'accent sur les arguments, tirés à partir des documents scientifiques, qui permettent de rejeter les trois modèles explicatifs et note que la production du magma est locale (entre 50 et 150km) mais qu'elle n'est pas due à une augmentation de température ni à une diminution de pression. Par conséquent, la recherche d'une autre explication s'impose. Etant donné que la roche qui constitue le manteau est la péridotite, il s'agit de chercher à expliquer la fusion de cette roche entre 50 et 150km. L'écrit intermédiaire E3 (figure 53) est noté au tableau. Puis, l'enseignante distribue aux élèves deux documents à exploiter (annexe 18).

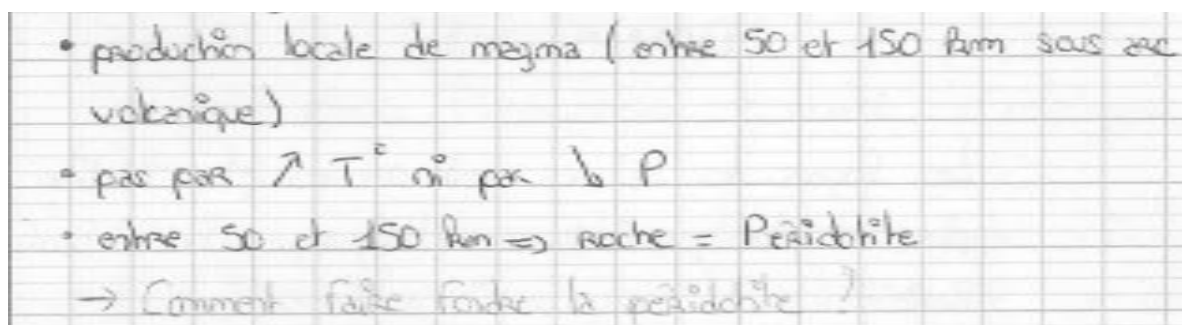


Figure 53. Troisième écrit intermédiaire (E3).

Suite à l'exploitation des documents et la mise en commun, les élèves apprennent qu'une péridotite hydratée pourrait fondre ce qui n'est pas le cas d'une péridotite sèche. La suite consiste à expliquer l'origine de l'eau et le texte final (E4, figure 54) est distribué aux élèves sous forme photocopiée.

➤ Les magmas des zones de subduction ont pour origine une fusion partielle du manteau de la plaque lithosphérique chevauchante au-dessus du plan de Bénioff. A la profondeur où sont produits ces magmas, les péridotites anhydres ne peuvent fondre ; cependant, les études expérimentales ont montré que l'hydratation des péridotites abaisse leur point de fusion. La formation du magma serait donc due à l'hydratation du manteau, l'eau provenant de la déshydratation des roches de la plaque plongeante.

Figure 54. Ecrit bilan final distribué aux élèves de Terminale S (Ecrit 4).

Dans cette étude, **nous nous limitons à l'analyse de la partie « forcée » de la séquence** c'est-à-dire à la phase aboutissant aux écrits E1 et E2 étant donné que la suite de la séquence a été préparée d'une manière « ordinaire » par l'enseignante. Ainsi, lorsque nous parlerons de séquence, dans les analyses suivantes, c'est uniquement la phase « forcée » qui sera concernée. Nous poursuivons l'analyse générale du scénario didactique en étudiant les caractéristiques globales de la séquence.

1.3 Caractéristiques générales de la séquence forcée construite par le groupe de recherche

La notion de synopsis est reprise pour identifier les caractéristiques de la phase « forcée » de la séquence d'enseignement-apprentissage. Le tableau synoptique obtenu (tableau 18) nous permet de réaliser une première analyse de cette séquence (Tiberghien & al., 2007). Il comprend plusieurs dimensions que nous avons spécifiées de façon à convenir à nos questionnements de recherche. L'étude du synopsis montre que les productions langagières orales et écrites sont diverses (tableau 18). En effet, les échanges oraux concernent des discussions d'élèves en binôme ou en groupe et des débats collectifs. Les écrits initiaux (schéma et texte) présentent les idées explicatives des élèves ainsi que leurs conceptions en ce qui concerne le problème posé. Les écrits intermédiaires (sous forme de tableau) portent des arguments « pour » et/ou « contre » le fonctionnement des modèles explicatifs. Le rôle de ces « écrits d'investigation » (Orange & al., 2001) est fondamental au sein de la séquence et dans la démarche de problématisation suivie. La séquence est ainsi marquée par une présence considérable des productions langagières ce qui relève de l'importance qui leur est octroyée dans la problématisation par l'équipe du CREN.

La phase « forcée » de la séquence a été élaborée dans le but de construire des textes qui soient problématisés et non propositionnels et d'engager les élèves dans une construction des savoirs magmatiques qui s'accorde avec les principes du cadre théorique de la problématisation. Dans

quelle mesure le groupe de recherche est-il parvenu à atteindre ces objectifs ? Avec quelles pratiques, quelles difficultés et sous quelles conditions ? Nous débutons cette analyse avec la caractérisation et l'étude des écrits produits lors de cette séquence.

Etapes de la séquence	Organisation de la classe	Tâche	Productions langagières	Forme des écrits produits	Nature des écrits	Auteur des écrits
Première séance	Individuelle	Produire un schéma et un texte le fonctionnement d'une zone de subduction, permettant d'expliquer la répartition des foyers des séismes et des volcans	Ecrits individuels	Schéma légendé et texte	Ecrits initiaux	Elève
	En groupe	Produire une explication commune en groupe et un écrit de groupe	Echanges oraux - discussions de groupe Ecrits de groupe	Schéma légendé		Groupe d'élèves
Deuxième et troisième séance	Collective	Débattre sur les productions de groupe	Echanges oraux - débat collectif (arguments oraux)	-	Ecrits intermédiaires	Elève
	Individuelle	Produire des raisons « pour » et « contre » le fonctionnement des trois modèles explicatifs suite au débat	Productions individuelles écrites de raisons (E1)	Texte (tableau)		
	En binôme	Exploiter les documents scientifiques Produire des arguments « pour » et « contre » le fonctionnement des trois modèles	Echanges oraux entre les élèves Productions individuelles écrites de raisons (E2)	Texte (tableau)		

Tableau 18. Synopsis de l'organisation de la séquence forcée de Terminale S et des activités langagières mises en œuvre.

2. Caractérisation des écrits élaborés lors de la séquence forcée

Cette étape concerne l'analyse du contenu des écrits produits lors de la séquence forcée. Après avoir identifié leur forme, leur nature et leur place au sein de séquence, il s'agit de se focaliser sur la problématisation qu'ils donnent à voir et sur ce qu'ils évoquent concernant le fonctionnement des zones de subduction et l'origine du magmatisme. La figure 55 ci-dessous montre les écrits construits pendant la séquence forcée que nous analysons en détail ainsi que les documents introduits par le groupe de recherche.

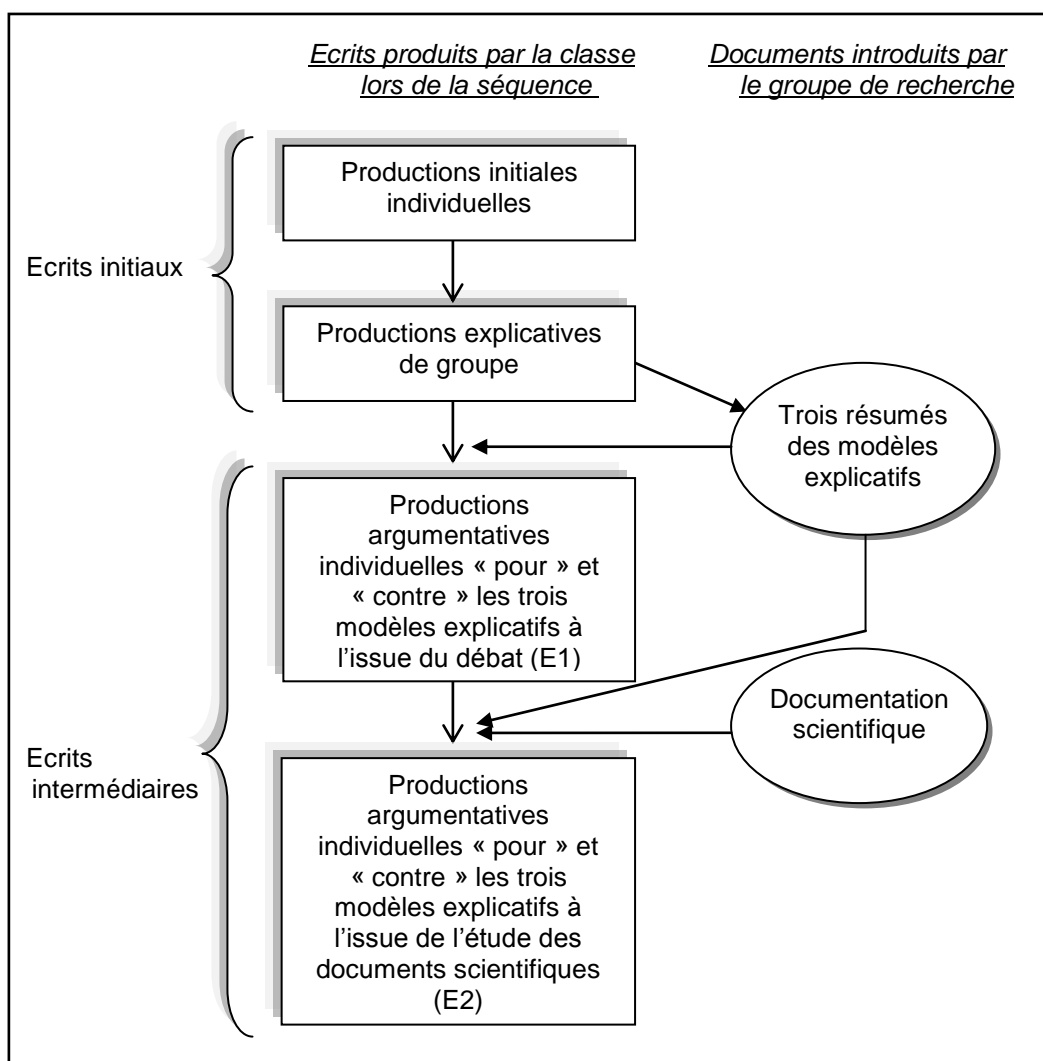


Figure 55. Les écrits produits par la classe et les documents introduits par le groupe de recherche lors de la séquence forcée de Terminale S.

2.1 Les écrits initiaux individuels et de groupe

Les productions initiales individuelles des élèves de Terminale S comportent globalement un schéma et un texte (annexe 15) alors que celles de groupe sont constituées uniquement d'un schéma (annexe 16). Les élèves révèlent, à travers ces productions, leurs explications spontanées

à propos du fonctionnement des zones de subduction et l'origine du magmatisme qui s'y produit. Pour analyser le contenu de ces écrits initiaux, nous procédons à leur catégorisation selon les explications qu'ils attribuent à l'origine du magma. Quatre catégories d'explications ont été définies *a priori* et ont été utilisées pour former les groupes homogènes d'élèves (séance 1). Ces catégories ont été adaptées au contenu des productions schématiques concernant le fonctionnement des zones de subduction. La mise en catégorie repose sur les critères suivants :

- naissance du magma : magma préexiste ou se forme suite à une fusion ;
- conditions de fusion du magma : pression, température (augmentation/diminution) etc.
- endroit où préexiste le magma/se produit la fusion : manteau/noyau, fusion du manteau ou de la lithosphère océanique plongeante.

Le tableau 19 ci-dessous présente la mise en catégorie des productions initiales en fonction des explications qu'elles donnent à voir.

	Productions individuelles (PI)	Productions de groupe (PG)
Exp. A : Le magma provient d'une réserve située dans le manteau ou le noyau. Il remonte par des fractures dues à la subduction, aux séismes, aux frottements, etc.	8	1
Exp. B : Le magma provient d'une fusion (du manteau ou de la lithosphère océanique plongeante) par augmentation de température (et de la pression) qui peut être due aux frottements des deux plaques.	16	5
Exp. C : Le magma est issu de la fusion de la roche par une diminution de la pression.	1	1
Exp. D : Le magma provient de la fusion des roches qui se fait avec la remontée de l'intérieur de la Terre (ou du manteau).	1	-
Exp. 0 : Explications floues avec un fonctionnement difficile à déterminer/absence de réponse.	7	-
Total	33	7

Tableau 19. Fonctionnement des zones de subduction et origine du magmatisme et dans les productions individuelles et de groupe des élèves de Terminale S (séquence forcée).

Les explications initiales spontanées des élèves de Terminale S concernant le fonctionnement des zones de subduction et l'origine du magmatisme sont manifestement variées :

- 8 productions individuelles (PI) sur 33 et 1 production de groupe (PG) sur 7 considèrent que le magmatisme des zones de subduction a pour origine une réserve de magma située dans le manteau ou le noyau. Toutefois, il reste difficile de savoir à ce stade si, pour ces productions, le magma préexiste dans la poche ou s'il y est fabriqué. Mais les propos avancés pendant le débat scientifique, sur l'affiche en question, nous ont permis de constater que le magma préexiste dans une poche en profondeur pour les élèves de cette catégorie. Ainsi, le problème de la formation de ce magma ne se pose pas au contraire de celui de sa remontée qui semble préoccuper, en priorité, les élèves. Ce magma remonte par des fractures pouvant être dues à la subduction, aux séismes ou aux frottements qui en résultent.

- 16 PI sur 33 et 5 PG sur 7, soit une majorité des productions, révèlent une formation locale du magma qui provient d'une fusion (du manteau ou de la lithosphère océanique plongeante) provoquée par l'augmentation de la température et de la pression. Parfois, c'est la température seule qui est mise en cause. Cette augmentation semble due aux frottements entre les des deux plaques. D'après ces productions, le magma ne préexiste pas dans la Terre mais se forme localement, à des endroits particuliers liés à la subduction, grâce à une augmentation de la température accompagnée pour certains élèves de celle de la pression. La fusion est concernée par deux paramètres : la température et la pression.

- 1PI sur 33 et 1PG sur 7 évoquent une formation due à une diminution de la pression. Ici, c'est la pression qui est le paramètre déterminant dans la fusion des roches. Cela exprime une remobilisation de l'explication du magmatisme des dorsales océaniques où la fusion partielle des roches du manteau est déclenchée suite à une décompression adiabatique (chute brusque de pression que subissent les matériaux ascendants avec les mouvements de convection).

- 1PI sur 33 mentionne une fusion due à des variations de pression et de température lors de la remontée des roches du manteau vers la surface.

L'analyse des explications initiales des élèves de Terminale S sur le magmatisme des zones de subduction montre que bon nombre d'entre eux mettent en évidence une production locale du magma par fusion de la roche sous l'influence d'une augmentation de la température accompagnée, pour certains, de la pression. Cette fusion pourrait également être le résultat d'une diminution de la pression ou alors être provoquée par la remontée des roches de l'intérieur du globe. Au contraire, d'autres élèves raisonnent en termes de remontée du magma préexistant dans les profondeurs du globe. Ces raisonnements se distinguent de l'explication actuelle de l'origine du magmatisme des zones de subduction où le magma est fabriqué localement mais

sous des conditions de fusion impliquant plusieurs paramètres (P, T, P_{H_2O}) et où deux nécessités sous-tendent les solutions de ce problème : la nécessité d'une production locale du magma et celle d'un mécanisme faisant baisser la température de fusion des roches du manteau (Orange Ravachol, 2003, 2010).

2.2 Les écrits intermédiaires (E1 et E2)

L'écrit intermédiaire E1 représente une production d'arguments appuyant ou s'opposant au fonctionnement des trois modèles explicatifs apparus dans la classe. Suite au débat, l'enseignante demande aux élèves de compléter le document préalablement préparé par l'équipe de recherche (figure 51, p.245) qui explicite trois modèles explicatifs différents tirés des affiches initiales de groupe. Les élèves se positionnent par rapport à ces modèles puis indiquent pour chacun s'il pourrait ou non fonctionner et pourquoi. Un tableau présentant les argumentations individuelles élaborées par les élèves est disponible en annexe 19. Le même travail leur a été demandé à l'issue de l'étude des documents scientifiques (écrit intermédiaire E2) et l'annexe 20 donne à voir les argumentations produites. Nous examinons le contenu et les caractéristiques de ces écrits dans le but de déterminer leurs véritables fonctions au sein de la séquence. Dans un premier temps, nous effectuons une étude quantitative des argumentations produites à l'issue des deux phases d'activités. Puis, nous procédons à une étude qualitative de celles avancées pour chacune des trois explications.

2.2.1 Etude quantitative des argumentations

Il s'agit, dans cette étude quantitative, de mettre en avant le nombre d'argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement des trois modèles explicatifs à l'issue du débat et de l'étude de la documentation scientifique. Le tableau 20 ci-dessous montre les résultats de cette étude.

Nombre d'argumentations		Explication A	Explication B	Explication C	Total
A l'issue du débat	Argumentations « pour » le fonctionnement	1	9	5	15
	Argumentations « contre » le fonctionnement	25	8	15	48
	Argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement	6	9	5	20
	Absence de réponse	-	6	7	13
	Total	32	32	32	96
A l'issue de l'étude des documents	Argumentations « pour » le fonctionnement	-	2	7	9
	Argumentations « contre » le fonctionnement	27	21	17	65
	Argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement	2	4	2	8
	Absence de réponse	3	5	6	14
	Total	32	32	32	96

Tableau 20. Nombre d'argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement des trois explications avancées par les élèves de Terminale S à l'issue du débat et de l'étude des documents.

(Exp. A : Le magma provient d'une réserve située dans le manteau /noyau ; il remonte par des fractures dues à la subduction ; Exp. B : Le magma est issu de la fusion du manteau par augmentation de température due aux frottements des deux plaques; Exp. C : Le magma est issu de la fusion du manteau due à une diminution de la pression).

L'étude du tableau 20 nous permet de constater qu'à l'issue du débat et de l'étude des supports documentaires, le nombre d'argumentations opposées à la possibilité de fonctionnement le l'explication A est important (25 puis 27 argumentations « contre »). Cette explication, postulant que le magma préexiste dans une réserve située dans le manteau/noyau et qu'il remonte par des fractures causées par la subduction, était déjà privilégiée par 8 productions individuelles et 1 de groupe. Nous pensons que l'impossibilité de son fonctionnement a pu éventuellement se construire au cours du débat et se maintenir après la consultation des documents.

Suite au débat, les argumentations sont favorables, avec un faible nombre (9 argumentations), à l'explication B précédemment majoritaire dans les productions initiales (16 productions individuelles et 5 productions de groupe). Un certain nombre d'élèves (8 argumentations) sont opposés à cette explication et d'autres semblent hésiter quant à la possibilité de son fonctionnement (9 arguments « pour » et « contre »). Cependant, nous remarquons un changement à l'issue de l'exploitation des supports documentaires où le nombre d'arguments désapprouvant le fonctionnement de l'explication B devient plus important (21 arguments « contre » et 2 arguments « pour »). Ainsi, cette explication pouvant fonctionner suite au débat, ne peut plus l'être après l'examen de la documentation scientifique.

Quant à l'explication C, nous notons que le nombre d'argumentations a été quasiment constant suite aux deux phases d'activités menées (à l'issue du débat : 5 « pour » et 15 « contre », à l'issue de l'étude des documents : 7 « pour » et 17 « contre »). Il apparaît que cette explication ne peut pas fonctionner pour un nombre important d'élèves.

L'analyse quantitative montre que, suite au déroulement du débat, les arguments des élèves privilégient l'explication B mais avec un faible nombre. Tandis que les explications A et C sont impossibles pour un effectif important d'élèves. A l'issue de l'exploitation des documents, c'est le fonctionnement des trois explications qui devient impossible pour la majorité des élèves. Par ailleurs, nous remarquons que – pour l'ensemble des trois explications et pour les deux moments de travail – les arguments opposés au fonctionnement sont nettement plus nombreux que ceux qui le favorise (suite au débat : 15 « pour » et 48 « contre » ; suite à la consultation des documents : 9 « pour » et 65 « contre »).

Après cette étude quantitative des argumentations des élèves de Terminale S, nous procédons à une analyse qualitative et examinons spécifiquement le contenu de ces argumentations.

2.2.2 Etude qualitative des argumentations

Nous reprenons, dans ce qui suit, chacune des explications A, B et C en étudiant de près le positionnement des élèves – à l'issue du débat et de l'étude des supports documentaires – selon leurs argumentations avancées (« pour », « pour et contre » et « contre »). Des tableaux croisés seront construits (tableau 21, 22, 23). Les élèves situés au niveau de la diagonale principale de ces tableaux ne changent pas d'avis suite aux deux moments de travail alors que ceux qui en sont éloignés modifient leur positionnement. Cette analyse sera illustrée par des exemples d'argumentations soutenant ou s'opposant aux différents modèles (annexe 19 et 20).

L'explication A postule que le magma provient d'une réserve située à la limite du manteau/noyau et qu'il remonte par des fractures provoquées par la subduction. Le tableau croisé 21 ci-dessous montre le positionnement des élèves de Terminale S selon leurs argumentations relatives à l'explication A suite au débat et à l'étude de la documentation scientifique. Nous pouvons constater que les élèves qui étaient majoritairement « contre » le fonctionnement de l'explication A à l'issue du débat ont maintenu leur position suite à l'étude des supports documentaires. Un seul élève, Valentin, avance des arguments « pour et contre » suite aux deux moments de travail. Par ailleurs, nous remarquons que les élèves dont les argumentations étaient « pour » (Antoine) ou « pour et contre » (Fanny, Cyril, Aurélien, Pierre, B., Julie) l'explication A suite au débat ont opté pour un positionnement « contre » à l'issue de l'étude des documents. De plus, Sophie qui s'opposait à cette explication change pour une situation intermédiaire, « pour et contre ».

		<i>A l'issue du débat</i>			
		Argumentations « pour » le fonctionnement	Argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement	Argumentations « contre » le fonctionnement	Absence de réponse
<i>A l'issue de l'étude des documents</i>	Argumentations « pour » le fonctionnement				
	Argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement		Valentin	Sophie	
	Argumentations « contre » le fonctionnement	Antoine	Fanny, Cyril, Aurélien, Pierre, B., Julie,	Célia, Pierre, G., Corentin, Eléonore, Anne, Audrey, Victor, Lahcen, Camille, Marine, Mathilde, Benjamin, Yvan, Pierre-Marin, Fatima, Anthony, Hadrien, Adeline, Paul, Lise, Marion	
	Absence de réponse			Martin, Alex, Chloé	

Tableau 21. Tableau croisé des argumentations avancées par les élèves de Terminale S en lien avec l'explication A à l'issue du débat et de l'étude de la documentation scientifique.

(Les cases en gras représentent les élèves situés au niveau de la diagonale principale du tableau croisé n'ayant pas changé d'avis. L'ellipse correspond au positionnement majoritaire des élèves suite aux deux moments de travail).

Nous examinons de près le contenu des argumentations relatives à l'explication A. Pour les élèves ayant maintenus un positionnement opposé à cette explication, les arguments avancés ne sont pas les mêmes après le débat et l'étude des documents :

- Suite au débat, le fonctionnement de l'explication A est impossible pour la plupart des élèves pour les principales raisons évoquées ci-dessous :

- Impossibilité de la remontée du magma. Les élèves considèrent que les fractures causées par la subduction ne peuvent pas atteindre la limite manteau/noyau, très profonde, pour permettre la remontée du magma : « *Les poches de magma seraient trop profondes pour que les failles atteignent ces poches* » (Pierre-Marin). D'autres arguments mentionnent le fait que le manteau n'est pas fracturé lors de la production des séismes. De plus, selon ce modèle, des failles seraient créées partout et le magma remonterait de n'importe où, ce qui est impossible.
- Il y aurait une localisation aléatoire des volcans et non pas au niveau des limites des plaques, ce qui n'est pas le cas : « *La poche de magma est toujours présente au bon endroit ce*

qui est absurde. Si on suivait le modèle, il y aurait des volcans partout et non juste à côté des limites de plaques » (Pierre, G.).

- Impossibilité de la préexistence du magma dans la poche ou dans tout le globe. Si c'était le cas, le magma remonterait après chaque séisme et il y aurait des volcans partout sur Terre : « *Cela sous-entend qu'il y a du magma partout sous-terre : contre. Si le magma est présent partout, selon leur hypothèse chaque séisme sur Terre serait suivi d'une remontée de magma : contre* » (Lahcen). De plus, la présence de la poche en-dessous de la zone de subduction ne peut pas être due à une simple coïncidence : « *La poche de magma ne peut pas préexister et impossible la coïncidence d'une poche dans la même zone de chaque plaque* » (Eléonore). La présence de réserve de magma sur tout le long d'une faille est impossible puisque les volcans seraient en activité permanente.
- Suite à l'étude des supports documentaires, les argumentations des élèves défavorisent la première explication pour les raisons suivantes :
- Il est impossible qu'il se produise des fractures dans le manteau. En effet, l'asthénosphère est plastique et les fractures, évoquées par le modèle, ne peuvent pas avoir lieu dans un tel milieu. Généralement, elles se produisent plutôt dans un matériel cassant et rigide ce qui n'est pas le cas de l'asthénosphère : « *Les mouvements de convection sous la lithosphère se font dans une asthénosphère plastique : il n'y a pas fractures dues à la subduction dans la zone manteau/noyau* » (Eléonore). Ainsi, les fissures ne peuvent pas atteindre les poches de magma situées dans le manteau inférieur, le magma ne pourrait pas remonter et l'explication en question ne fonctionnerait pas.
 - Le magma ne préexiste pas dans une poche en profondeur et n'est pas omniprésent dans le manteau qui n'est pas liquide. Au contraire, il est formé grâce à une fusion partielle des roches du manteau : « *Magma non omniprésent. Il se forme par fusion* » (Lahcen). La seule partie liquide de la Terre est le noyau externe composé de métaux. Ainsi, Lahcen maintient toujours l'idée d'un magma non présent sous terre et il y rajoute celle de sa formation par fusion. De plus, le magma ne peut pas se former dans le manteau inférieur et provient d'une fusion des roches situées à des profondeurs comprises entre 50 et 150 km dans le manteau supérieur (Pierre, G.).
 - Le magma ne peut pas remonter et la limite manteau/noyau, où se trouve la réserve de magma, semble très profonde.

Quant aux élèves qui ont modifié leur positionnement, les argumentations « pour » et « contre » considèrent au départ que la remontée du magma se fait bien avec les fractures mais que le

manteau inférieur n'est pas formé d'une couche de magma. Par exemple, Cyril estime, après le débat, que l'explication A « *peut fonctionner pour le magma qui remonte par les failles produites par la subduction, mais il est étrange qu'il y ait du magma pile sous la plaque subduite et partout sous la planète* ». Suite à la consultation des documents, il avance que « *Le magma n'est pas partout et provient de la fusion du manteau* » (Cyril).

A l'issue du débat, Sophie était opposée à l'explication A parce que la limite manteau/noyau est trop profonde et que les failles ne vont pas jusque là. Après l'étude des documents, elle hésite quant à la possibilité de fonctionnement de cette explication « *Marche : le magma provient du manteau et peut transiter pendant plusieurs siècles entre le manteau et la surface xxx de réserve. Marche pas : le magma ne remonte pas nécessairement par des fractures dues à la subduction (exemple volcan de point chaud)* ».

Suite au débat, Antoine considère que le magma est conservé sous une importante pression dans une réserve de magma qui occupe une place importante et que la moindre faille causée par un séisme est infiltrée. Il change intégralement de positionnement après la consultation des documents en affirmant que les poches de magma ne semblent pas omniprésentes dans les profondeurs terrestres.

Après les phases de débat et de documentation scientifique, l'impossibilité de fonctionnement de l'explication A se consolide. Les raisons évoquent principalement l'impossibilité de la remontée du magma puisque la réserve est profonde et que le manteau ne peut pas être atteint par les failles et celle de la préexistence du magma qui n'est pas présent sous forme liquide mais se forme à une certaine profondeur.

L'explication B stipule que le magma provient de la fusion du manteau par augmentation de température due aux frottements des deux plaques. Le tableau croisé 22 ci-dessous révèle le positionnement des élèves de Terminale S selon leurs argumentations avancées en lien avec l'explication B à l'issue du débat et de l'étude de la documentation scientifique. Nous remarquons que, suite au débat, les argumentations des élèves sont partagées entre celles « pour », celles « pour et contre » et celles « contre ». Après l'étude des documents, un bon nombre d'élèves adopte un positionnement « contre » le fonctionnement de l'explication B alors que d'autres maintiennent une position plus ou moins en faveur de cette explication (« pour » : Yvan et Pierre-Marine et « pour et contre » : Pierre G, Valentin, Aurélien et Cyril). De plus, Cyril

qui était opposé à l'explication B change pour des argumentations « pour et contre ». Ainsi, le soutien à l'impossibilité de fonctionnement de l'explication B augmente considérablement après l'étude des documents scientifiques.

		A l'issue du débat			
		Argumentations « pour » le fonctionnement	Argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement	Argumentations « contre » le fonctionnement	Absence de réponse
A l'issue de l'étude des documents	Argumentations « pour » le fonctionnement	Yvan, Pierre-Marin			
	Argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement		Pierre, G., Valentin, Aurélien, Cyril		
	Argumentations « contre » le fonctionnement	Corentin, Eléonore, Anne, Marion, Benjamin,	Audrey, Lise, Camille, Fanny, Pierre, B.	Célia, Victor, Lahcen, Mathilde, Sophie, Martin, Antoine	Marine, Julie, Hadrien, Adeline,
	Absence de réponse	Anthony, Paul		Fatima	

Tableau 22. Tableau croisé des argumentations des élèves de Terminale S en lien avec l'explication B à l'issue du débat et de l'étude de la documentation scientifique.

(Les cases en gras représentent les élèves situés au niveau de la diagonale principale du tableau croisé n'ayant pas changé d'avis. L'ellipse correspond au positionnement majoritaire des élèves suite aux deux moments de travail).

Nous étudions de près le contenu des argumentations en débutant par les élèves ayant maintenus leur positionnement initial. Après le débat, le fonctionnement de l'explication B est possible pour Yvan parce que les frottements entre les deux plaques dégagent de la chaleur entraînant la fusion des roches environnantes : « *Cela semble plausible car tout frottement s'accompagne d'un dégagement de chaleur, [...] pour faire fondre les roches* » (Yvan). Il maintient ses arguments après l'étude des documents scientifiques en postulant toujours que les frottements augmenteraient la température responsable de la fusion des roches. Il en est de même pour Pierre-Marin.

Pierre, G. Valentin, Aurélien et Cyril appuient simultanément la possibilité et l'impossibilité de fonctionnement de certains aspects de l'explication B après les deux phases de travail. Suite au débat, leurs argumentations semblent d'accord avec l'idée d'une fusion se produisant par augmentation de la température mais évoquent des problèmes concernant la remontée et la production permanente du magma. De plus, Pierre, G. et Cyril proposent d'inclure la pression

parce que l'augmentation de la température ne pourrait pas entraîner seule la fusion. Après l'étude des documents scientifiques, les élèves en question notent que l'augmentation de la température n'est pas due aux frottements. Ce sont surtout « *les séismes qui dégagent l'énergie suffisante pour réchauffer la roche* » (Aurélien). Le problème de la remontée est toujours mentionné : « *On ne sait toujours pas comment le magma remonte* » (Pierre, G.).

Au contraire, certains élèves évoquent l'impossibilité de fonctionnement de l'explication B. Si le magma avait pour origine la fusion du manteau par augmentation de la température due aux frottements, il se formerait tout le long de la plaque où les frottements se produisent et la formation des volcans serait plus importante en surface occupée : « *Si cette conditions était suffisante alors on pourrait penser que du magma pourrait se former n'importe où il y a un frottement entre deux plaques* » (Mathilde). Les mêmes argumentations sont avancées par Sophie et Martin. De plus, la température n'est pas la seule responsable de la fusion, la pression est également impliquée et le modèle proposé n'en rend pas compte. Les élèves ne semblent pas d'accord avec les mécanismes qui expliquent la fusion. Suite à l'étude des documents, Mathilde avance que l'explication B est impossible car la zone de subduction est une zone froide et non chaude comme on pourrait le croire et Martin considère que les frottements ne sont pas à l'origine d'un échauffement. Ce n'est donc pas l'élévation de la température qui est à l'origine du magmatisme.

Quant aux élèves qui ont changé de positionnement, les argumentations ayant virés du « pour » au « contre » considéraient, suite au débat, que l'augmentation de la température due aux frottements était responsable de la formation du magma au niveau des zones de subduction. Avec l'étude des documents, les élèves apprennent que la température n'augmente pas avec les frottements des plaques et que la zone de subduction est, au contraire, une zone froide : « *Zone de subduction = zone froide. Donc la température n'augmente pas avec les frottements des plaques* » (Corentin). Anne et Eléonore estiment, après le débat, que les frottements constituent un paramètre qui varie par rapport au reste de la Terre. A l'issue de l'étude des documents, elles avancent qu'il n'y a pas de frottements au niveau des zones de subduction mais plutôt des fractures et des ruptures. De plus, la zone de subduction est une zone de convergence froide. Ainsi, le magma ne peut pas se former sous les conditions révélées par l'explication B.

Suite au débat, Pierre, B. semble d'accord avec l'augmentation de la température grâce aux frottements des plaques. Cependant, il considère que si cette explication était plausible le magma serait produit en permanence tout le long de la limite des plaques et il y aurait plus de volcans en

surface : « *Problème : magma produit constamment donc volcan tout le temps en activité. D'accord avec la température due aux frottements des deux plaques* » (Pierre, B.). Après l'étude des documents, Pierre, B. opte pour un positionnement différent. Pour lui, l'explication B ne pourrait pas fonctionner car « *la théorie de la température due aux frottements est fausse. La température est due à un changement de pression par la convection mantellique* ». Camille estime, suite au débat, que les failles dégageraient de l'énergie sous forme de chaleur ce qui pourrait permettre de faire fondre les roches du manteau. Mais cette explication impliquerait une création de magma sur tout le long des deux plaques. L'explication B devient impossible pour elle à l'issue de l'étude des documents : « *Impossible : les roches de la lithosphère océanique se réchauffent lentement, les isothermes s'abaissent* ».

Nous constatons que les argumentations en faveur de l'explication B suite au débat affirment l'augmentation de la température grâce aux frottements entre les plaques. Tandis que celles opposées précisent que le magma, dans ce cas, se formerait tout le long de la plaque où il y aurait des frottements et qu'il naîtrait, par conséquent, plus de volcans à la surface. Après la phase de documentation, les élèves apprennent que la température n'augmente pas avec les frottements et que la zone de subduction est une zone froide ce qui les emmène, en nombre important, à appuyer l'impossibilité de fonctionnement de l'explication B. Celle-ci présente de manière importante dans les productions individuelles et de groupe, devient de moins en moins possible après le débat pour s'avérer totalement impossible suite à l'étude des supports documentaires où une nouvelle donnée empirique (la zone de subduction est une zone froide) est repérée et prise en compte.

L'explication C précise que la diminution de la pression serait responsable de la création du magma à partir d'une fusion du manteau. Le tableau croisé 23 ci-dessous montre le positionnement des élèves de Terminale S selon les argumentations avancées en lien avec l'explication C à l'issue des deux phases de travail, le débat et la documentation scientifique. Nous pouvons constater que, suite à ces deux moments, les élèves qui s'opposaient en majorité à l'explication C ont gardé leur positionnement. Aurélien et Cyril ont maintenu leurs argumentations « pour et contre » et Benjamin celles « contre » cette explication. Quatre élèves ont changé radicalement de position : Eléonore et Anne sont passées du « pour » au « contre » et Martin et Lahcen du « contre » au « pour ». Valentin, Fanny et Pierre, B. optent pour des arguments « contre » suite à un positionnement initial hésitant entre la possibilité et l'impossibilité de fonctionnement de l'explication C.

		<i>A l'issue du débat</i>			
		Argumentations « pour » le fonctionnement	Argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement	Argumentations « contre » le fonctionnement	Absence de réponse
A l'issue de l'étude des documents	Argumentations « pour » le fonctionnement	Benjamin	Valentin, Fanny, Pierre, B.	Martin, Lahcen	Paul
	Argumentations « pour » et « contre » le fonctionnement		Aurélien, Cyril		
	Argumentations « contre » le fonctionnement	Eléonore, Anne		Corentin, Camille, Mathilde, Sophie, Yvan, Pierre-Marin, Marion, Anthony, Antoine, Hadrien, Adeline, Lise	Célia, Pierre, G., Marine
	Absence de réponse	Chloé, Victor		Julie	

Tableau 23. Tableau croisé des argumentations des élèves de Terminale S en lien avec l'explication C à l'issue du débat et de l'étude de la documentation scientifique.

(Les cases en gras représentent les élèves situés au niveau de la diagonale principale du tableau croisé n'ayant pas changé d'avis. L'ellipse correspond au positionnement majoritaire des élèves suite aux deux moments de travail).

Nous examinons le contenu des argumentations en étudiant d'abord celles des élèves n'ayant pas changé de positionnement. Les arguments opposés au fonctionnement de l'explication C ne sont pas identiques suite aux deux phases de travail :

- Après le débat, le fonctionnement de l'explication C est impossible pour les raisons suivantes :

- La diminution de la pression ne suffit pas à elle seule pour entraîner la fusion des roches mais nécessite l'action supplémentaire de la température : « *Il manque les phénomènes de température, car c'est l'adéquation pression/température qui crée du magma [...]* » (Lise).
- La pression augmente avec la profondeur – là où le magma est créée – et ne diminue pas comme le postule l'explication : « *Ne peut pas être possible, car le magma se crée en profondeur, or plus on va profond, plus la pression augmente* » (Yvan).
- Ce modèle n'est pas particulier aux frontières des plaques et le magma pourrait se former ailleurs qu'au niveau des ces zones : « *Cela n'explique pas la présence de magma, car les zones de subduction ne sont pas les seules zones où la pression peut diminuer* » (Antoine).

- Suite à l'étude des supports documentaires, les élèves précisent que la pression augmente en profondeur et ne diminue pas. La densité des roches serait importante ce qui les rend solides : « *La pression augmente avec la profondeur. Les roches sont donc plus denses et moins sujettes à la fusion* » (Yvan).

Les argumentations d'Aurélien et de Cyril s'accordent, suite au débat, avec une fusion causée par la diminution de la pression mais reprochent à l'explication le manque de prise en compte de la température et l'absence d'explication du mécanisme de remontée du magma. A l'issue de l'étude des documents, ces deux élèves maintiennent leur position concernant la température mais Aurélien avance que la pression n'a rien à voir avec la formation du magma. Il postule que ce sont les séismes qui dégagent l'énergie suffisante pour réchauffer la roche.

Tandis que Benjamin considère, après le débat, que l'explication C pourrait fonctionner car il n'y a aucune objection concernant l'explication de la création du magma. Suite aux documents, il estime que c'est la pression qui est en cause puisque la formation du magma n'est pas due à la température.

Quant aux élèves ayant modifié leur positionnement, Eléonore et Anne pensaient que l'explication C pouvait fonctionner parce que le magma entre en fusion suite à une diminution de la pression accompagnant la remontée des roches du manteau à travers les mouvements de convection. Le magmatisme des zones de subduction aurait la même origine que celui créé au niveau des dorsales océaniques : « *On retrouve des mouvements de convection comme au niveau des dorsales* » (Eléonore). Après l'étude des documents, elles notent qu'en profondeur, la pression augmente ce qui les conduit à se positionner contre l'explication C.

A l'issue du débat, Lahcen estime que si le magma se forme grâce à un lien unique avec la pression, chaque séisme serait accompagné d'une remontée de magma. Pour Martin, toute la partie supérieure serait fondue. A l'issue de l'étude supports documentaires, Lahcen considère que les séismes peuvent entraîner la diminution de la pression et l'explication C fonctionnerait. Tandis que Martin précise qu'elle est correcte sans justifier son choix.

Les arguments « pour et contre » s'accordent, à l'issue du débat, avec la diminution de la pression. Cependant, Pierre, B. et Valentin notent que les plaques océaniques et continentales sont formées de roches différentes et que leur fusion nécessiterait des températures et des pressions différentes. Fanny rejette l'idée des frottements. Suite à l'étude des documents, les élèves adoptent l'explication C et valident l'hypothèse de la variation de la pression.

Nous remarquons que les argumentations des élèves s'opposent en majorité au fonctionnement de l'explication C suite aux deux phases d'activités réalisées. Le rôle de la pression et de sa diminution dans la fusion des roches est souvent mis en cause. De plus, les conséquences d'une explication basée sur l'unique diminution de la pression sont pointées.

2.2.3 Bilan

Les écrits intermédiaires individuels E1 et E2 retiennent une trace écrite des arguments présentés pendant le débat scientifique et de ceux retenus par les élèves après l'étude des documents scientifiques. Cela s'accorde avec les objectifs de recherche de la séquence forcée mise en place. Les élèves ont travaillé sur trois modèles possibles identifiés, par l'équipe, à partir de leurs affiches de groupe. L'étude des argumentations proposées, qui pointent des possibilités et des impossibilités de fonctionnement, révèle leur diversité et leur richesse. Les explications A et C ne fonctionnent pas majoritairement suite au débat scientifique alors qu'à l'issue de l'étude des documents scientifiques, ce sont les trois explications qui ne peuvent pas fonctionner pour les élèves. Les arguments avancés critiquent les mécanismes de formation et de remontée du magma. Les écrits intermédiaires E1 et E2 se placent plutôt dans l'**ordre épistémologique du « problématique »** et non pas du « vrai » et du « faux » (Orange & al., 2001). Ils donnent à voir des argumentations relatives à des possibilités et des impossibilités de fonctionnement ce qui exprime une progression vers la construction de nécessités. Par conséquent, les écrits E1 et E2 sont des **mono-textes raisonnés** car ils intègrent plusieurs argumentations (ou raisons) non contradictoires. Leur objectif est **d'identifier, suite au débat et à la consultation des supports documentaires, les raisons gardées par les élèves « pour » et « contre » le fonctionnement des trois modèles repérés dans les productions initiales**. La focalisation est centrée sur les arguments et non pas sur les solutions et la phase de documentation scientifique n'a pas servi à identifier la bonne solution au problème mais à enrichir les arguments déjà produits. La mise en texte apparaît centrée sur une **logique de problématisation** qui se focalise davantage sur les conditions de possibilités des solutions que sur les solutions elles-mêmes. Pour mieux comprendre les pratiques de mise en texte mises en place par l'équipe de recherche et ce mode de fonctionnement qui semble basé sur les raisons, nous nous proposons d'effectuer une modélisation praxéologique des pratiques forcées enseignantes en jeu dans cette séquence.

3. Modélisation praxéologique des pratiques enseignantes de mise en texte

La description et l'analyse des écrits produits lors de la séquence forcée nous permettent de modéliser les pratiques en jeu dans la mise en texte forcée du problème de l'origine du magmatisme des zones de subduction. Nous nous basons sur l'analyse praxéologique de la pratique enseignante telle qu'elle est définie dans la théorie anthropologique du didactique (TAD) (Chevallard, 1998) pour réaliser cette modélisation. Nous étudions spécifiquement, à partir des données dont nous disposons, le bloc pratico-technique (savoir-faire), c'est-à-dire les techniques et les tâches et une partie du bloc technologico-théorique (savoir) en identifiant les technologies. La mise en texte relève d'une tâche enseignante dont l'accomplissement appelle des techniques spécifiques que nous cherchons à déceler. Pour cela, nous avons repéré les tâches sur lesquelles a porté le travail de la classe et nous en avons identifié six qui sont déjà présentes dans le synopsis de la séquence (tableau 18, p.250) :

- produire un schéma et un texte pour expliquer comment fonctionne une zone de subduction ;
- produire une explication commune en groupe ;
- débattre sur les productions de groupe ;
- produire des arguments écrits « pour » et « contre » le fonctionnement des trois modèles explicatifs à l'issue du débat ;
- exploiter en binôme les documents scientifiques ;
- produire des arguments écrits « pour » et « contre » le fonctionnement des trois modèles explicatifs à l'issue de l'exploitation des documents.

Par la suite, nous avons identifié, pour chacune de ces tâches, les ostensifs produits et utilisés. La modélisation praxéologique obtenue (figure 56) montre les spécificités de la technique de mise en texte construite par le groupe de recherche pour la séquence forcée :

- Un schéma accompagné d'un texte est produit d'une manière individuelle par les élèves en réponse à la consigne de départ. Ces productions sont utilisées au cours du travail de groupe pour produire des explications communes à chacun des groupes. Les explications sont présentées, examinées et discutées lors du débat scientifique où des arguments oraux sont émis. Cette première étape vise **l'identification des idées explicatives des élèves, les solutions possibles qu'ils envisagent pour le problème du magmatisme des zones de subduction de même que les raisons fondant ces solutions.**

- Le groupe de recherche s'appuie sur les productions explicatives de groupe des élèves pour repérer trois modèles explicatifs majeurs et construire un document qui constitue un ostensif de travail utilisé pour que les élèves produisent des arguments écrits « pour » et « contre » leur possibilité de fonctionnement suite au débat (E1) et à l'étude des supports documentaires (E2). Cette deuxième étape a pour but de faire produire aux élèves **des raisons « pour » et « contre » le fonctionnement des trois modèles construits à partir des explications initiales**. Nous rappelons que ce travail « forcé » n'a pas pu être poursuivi par l'équipe de recherche. Les écrits E1 et E2 produits donnent à voir, suite au débat et à l'exploitation de la documentation scientifiques, les raisons qui font que les trois explications peuvent ou non fonctionner ce qui permet de garder une trace de la problématisation.

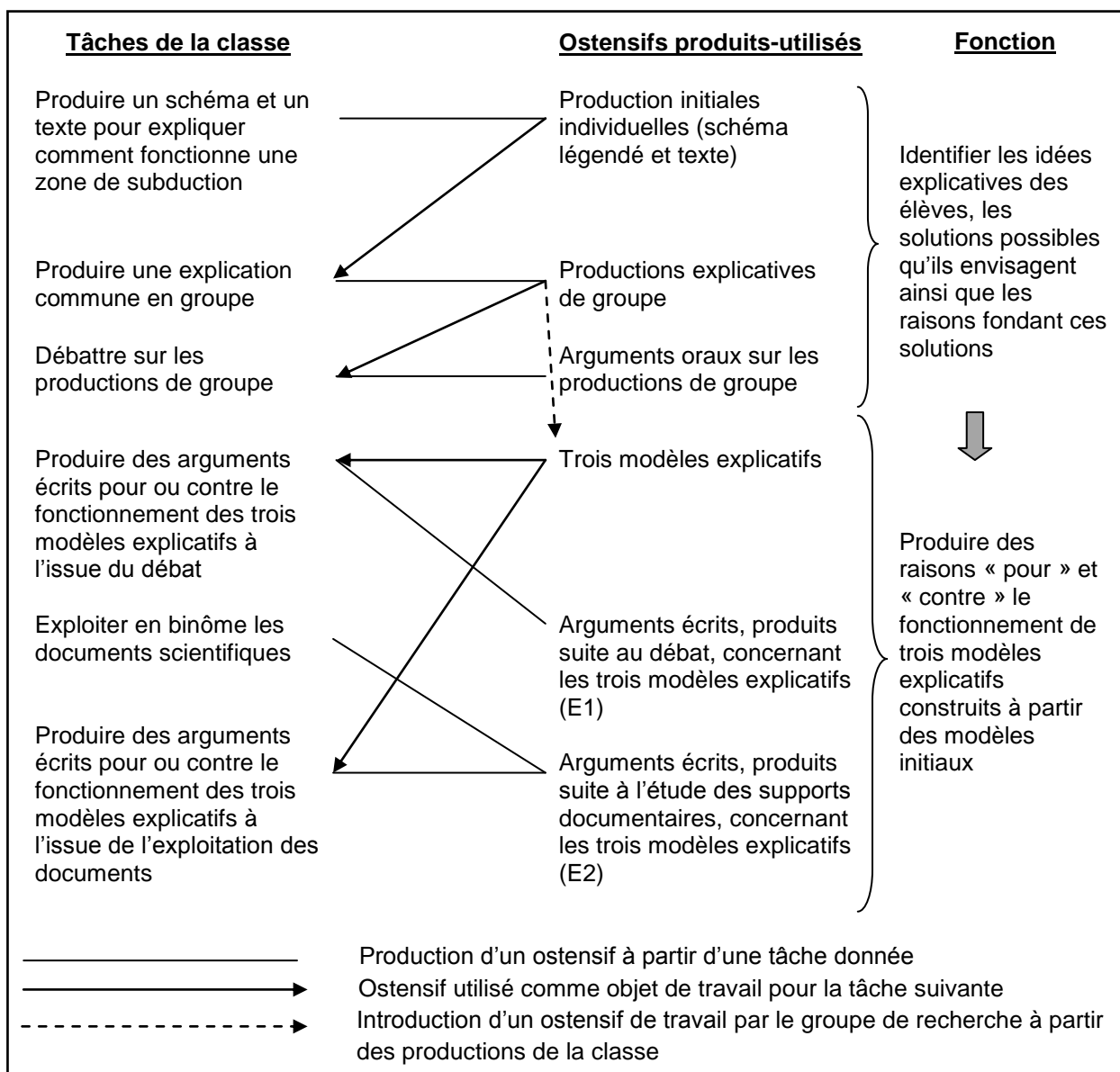


Figure 56. Techniques enseignantes de mise en texte pour la séquence forcée de Terminale S en rapport avec le fonctionnement et le magmatisme des zones de subduction.

Prenant appui sur théorie anthropologique du didactique de Chevallard (1998), la modélisation praxéologique construite (figure 56) permet de souligner plusieurs éléments caractéristiques des techniques de mise en texte. Mise en œuvre par le groupe de recherche, ces techniques semblent basées sur la production d'ostensifs à partir de l'accomplissement de tâches et sur l'emploi de certains ostensifs produits en tant qu'objets de travail pour les tâches à suivre. De plus, l'équipe de recherche a introduit un nouvel ostensif qui a été utilisé comme objet de travail pour deux tâches suivantes. L'introduction de cet ostensif a été jugée nécessaire pour répondre aux objectifs de recherche fixés et amener la classe vers la construction d'un texte problématisé. Cette intervention repose sur la **simplification et la dépersonnalisation** (ne pas attribuer à un auteur) des explications possibles révélées par les productions de groupe. L'introduction du document, construit à partir de ces explications, a engendré la production d'argumentations individuelles écrites qui ont été enrichies par l'étude des documents scientifiques.

La mise en place de la séquence forcée de Terminale S a été guidée par **une logique de problématisation axée sur les conditions de possibilités des solutions**. Les techniques de mise en texte (figure 56), qui impliquent la production et la création d'ostensifs écrits, ont permis de produire des écrits problématisés intégrant des argumentations « pour » et « contre » les modèles explicatifs. La technologie, discours rationnel justifiant les techniques de mise en texte, se base sur une conception des savoirs scientifiques les considérant comme raisonnés et ne se limitant pas aux solutions vraies des problèmes. Cependant, le travail « forcé » de mise en texte s'arrête à ce niveau pour cette séquence. Les deux niveaux de travail (sur les raisons puis sur les solutions) réalisés dans la séquence de 4^{ème} précédente n'ont pas pu être mis en place. Pour garder les traces du travail de problématisation et aboutir aux deux nécessités, il aurait fallu poursuivre la séquence avec une focalisation sur les raisons.

La description du déroulement de la séquence forcée et l'analyse des écrits construits nous ont permis de réaliser une modélisation des techniques de mise en texte enseignantes pour une activité apparue problématisée. Cependant, nous ne pouvons pas nous satisfaire de cette analyse et il est primordial d'examiner l'activité de mise en texte orale des élèves et de l'enseignante étant donné que les savoirs ne se réduisent pas aux seuls textes écrits. Qui des élèves ou de l'enseignante a introduit les arguments retrouvés dans les écrits intermédiaires E1? Repère-t-on, au cours de la mise en texte orale, les traces de la problématisation retrouvée dans les écrits? Comment cette problématisation s'est-elle développée et comment les textes ont-ils été

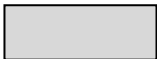



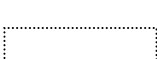
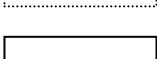
construits ? C'est ainsi que nous poursuivons notre analyse avec l'étude de l'activité de mise en texte des élèves et de l'enseignante pendant le débat.

4. Etude de la mise en texte du problème du magmatisme des zones de subduction lors du débat scientifique

L'écrit intermédiaire E1 a été produit à l'issue du débat scientifique et comporte des argumentations d'élèves « pour » et « contre » le fonctionnement des trois modèles explicatifs résumant les propositions majeures apparues dans les affiches de groupe. Son étude nous avait permis de constater que les élèves ont construit l'impossibilité de fonctionnement des explications A et C et la possibilité de l'explication B mais avec un faible nombre. Nous analysons l'activité de mise en texte des élèves et de l'enseignante pendant la phase de débat pour mieux comprendre comment les argumentations, figurant dans l'écrit intermédiaire E1, se sont développées et qui les a introduites. Cette analyse débute avec la construction de la macrostructure du débat de classe et sera prolongée par un approfondissement de l'étude des interventions de l'enseignante et des élèves lors des discussions. Nous rappelons que la classe, composée de 33 élèves, a été divisée en deux demi-classes : la première comprenant les groupes 1, 2, 3 et 4 et la deuxième les groupes 5, 6 et 7. Nous limitons notre analyse suivante au débat mené avec la première demi-classe.

4.1 Analyse globale et construction de la macrostructure du débat

Dans l'objectif de suivre l'activité de mise en texte de l'enseignante et des élèves durant le débat, nous avons eu recours à la méthodologie de construction de la macrostructure des débats telle qu'elle est précisée par Michel Fabre (Fabre & Orange, 1997 ; Fabre, 1999) (figure 57). Il s'agit de construire un résumé global du débat intégrant des propositions de type question (Q), de type réponse (R) et de type objection (O). La réalisation de ce travail s'est appuyée sur la transcription du débat (annexe 21) qui a duré 1h et 5 minutes. Les propositions ont été simplifiées et reformulées tout en respectant leur sens originel dans le débat. Les lignes (figure 57) présentent les liens entre les différentes propositions et les chiffres désignent les numéros des interventions dans la transcription du débat de la demi-classe 1.

	Questions posées par l'enseignante
	Questions posées par les élèves
	Questions posées par l'enseignante et les élèves
	Objections de l'enseignante
	Objections d'élèves
	Réponses d'élèves

Légende de la figure 57. Légende de la macrostructure du débat de la séquence forcée de Terminale S.

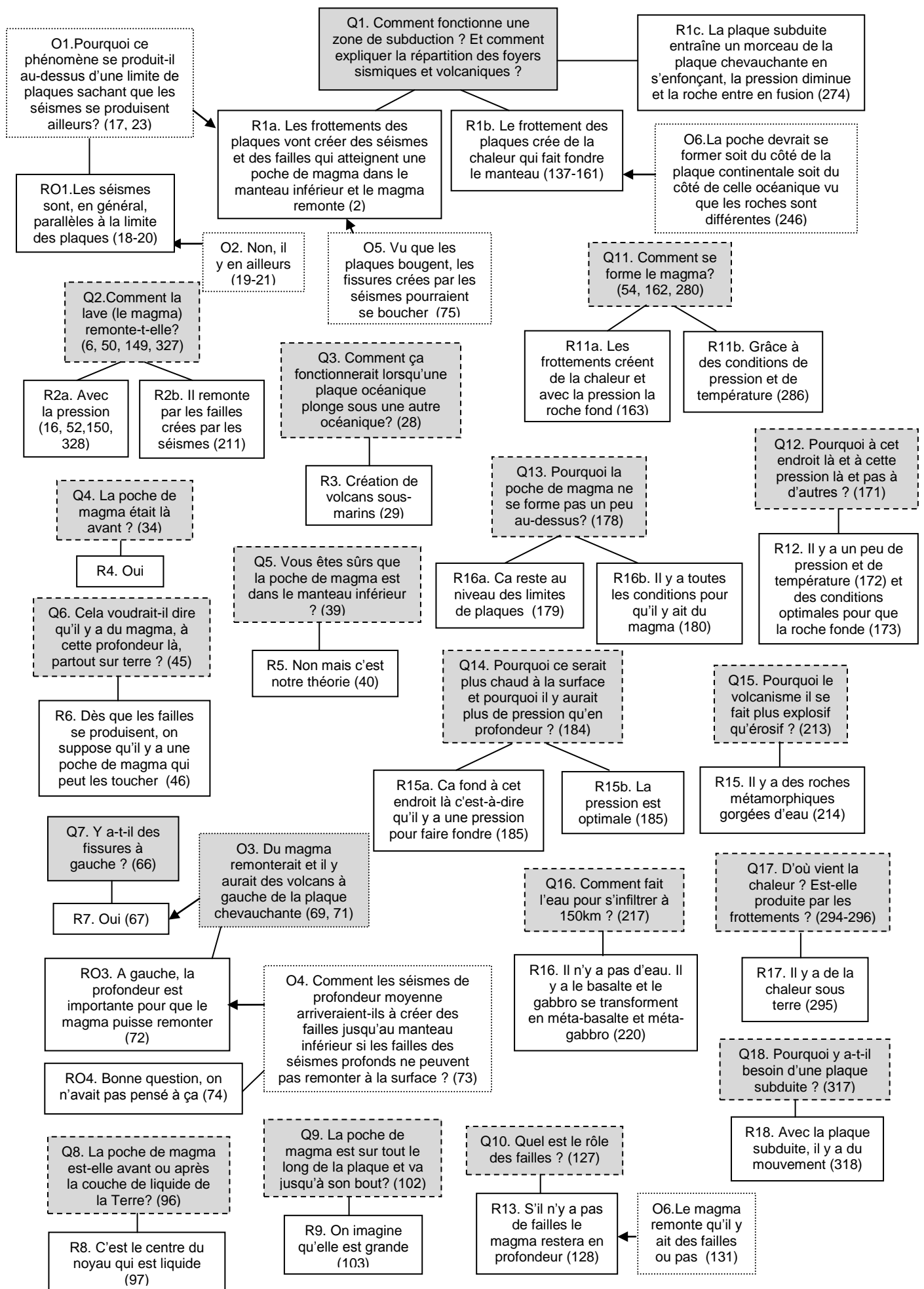


Figure 57. Macrostructure du débat (demi-classe 1) de la séquence forcée de Terminale S.

La macrostructure du débat nous permet de relever plusieurs points :

- Les questions formulées pendant le débat sont nombreuses et multiples. Certaines ont été abordées plusieurs fois au cours du débat comme celles en rapport avec la remontée et la formation du magma : la question « *Comment la lave (le magma) remonte-t-elle?* » a été reprise en 6, 50, 149, 327 et « *Comment se forme le magma?* » en 54, 162, 280. De plus, de multiples objections, portant sur quelques réponses, ont été avancées par les élèves et l'enseignante (O1-O6).
- La majorité des questions sont posées par les élèves et abordent la formation et la remontée du magma. Elles sont de nature variées : « Pourquoi ? » et « Comment ? ». Certaines questions donnent lieu à une seule réponse, d'autres à plusieurs réponses qui ne sont pas forcément contradictoires.

Nous constatons, suite à l'examen de la macrostructure du débat de la demi-classe 1, que les échanges pendant cette phase ont été riches en questions et objections. Toutefois, l'analyse de cette macrostructure ne suffit pas pour aborder ce qui se joue pendant ce débat en ce qui concerne les savoirs, la problématisation et les pratiques de mise en texte. Par conséquent, nous examinons certaines interventions de l'enseignante et des élèves en prenant appui sur la transcription des discussions (annexe 21) et nous nous intéressons particulièrement aux moments de construction de possibilités et d'impossibilités de fonctionnement des trois modèles explicatifs. Rappelons que le débat a été mené par une enseignante travaillant, depuis un certain nombre d'années, avec l'équipe de recherche du CREN.

4.2 Construction de l'impossibilité de fonctionnement de l'explication A

Suite à la présentation du modèle du premier groupe (annexe 16) qui explique que le magma remonte à partir d'une poche située dans le manteau inférieur grâce à des failles créées par la subduction, les interventions de Benjamin (17-23) viennent pointer l'aspect contingent de ce modèle. Cet élève se demande – sachant qu'il y a des séismes ailleurs qu'au niveau des zones de subduction – pourquoi ce phénomène se produit spécifiquement au niveau de ces zones et pas ailleurs. Pour le groupe, les séismes seraient toujours parallèles à la limite des plaques (18) et permettent d'expliquer la remontée du magma à partir de la poche. Cela ne satisfait pas Benjamin qui persiste sur le fait que les séismes se produisent ailleurs que sur une limite de plaques (21 ; 23). Un autre élève de la classe (G5) (26) vient appuyer les objections de Benjamin

en demandant au groupe pourquoi les phénomènes qu'ils ont expliqués ne se produisent pas à gauche de l'affiche.

17	Benjamin. Oui, des séismes y en a ailleurs alors pourquoi ce phénomène là se provoque pas ailleurs et juste euh au-dessus d'une limite de plaques ?
18	Antoine. Parce que les séismes ils sont toujours parallèles à la limite des plaques.
19	Benjamin. Non. (rire)
20	Antoine. En général euh les séismes sont sur les limites des plaques.
21	Benjamin. Mais y en a ailleurs !
22	Antoine. Ben oui mais là c'est une représentation euh...
23	Benjamin. Pourquoi ce ne serait pas la même chose ailleurs ? et juste à ce niveau là.
24	Antoine. Ailleurs, les limites de plaques xxxx, que je viens d'expliquer.
25	Benjamin. Ça tombe bien.
26	G5. Sur ton affiche tout à gauche, pourquoi y aurait pas la même chose ?
27	Antoine. Parce que c'est très schématique.

Un peu plus loin dans le débat, d'autres interventions d'élèves viennent remettre en cause l'existence d'une poche de magma en-dessous de la zone de subduction. Pour l'élève G3 et pour Lahcen, il apparaît impossible qu'il y ait une poche de magma à chaque limite de plaques (43) et qu'il y ait du magma partout sous Terre à la même profondeur (45). Les membres du groupe expliquent alors que les failles peuvent se produire dans toutes les directions et toucher la poche de magma (46) qui pourrait être plus grande que celle représentée sur le schéma (44). Ces propos laissent penser qu'il y aurait une grande poche de magma en profondeur qui pourrait s'étendre sous des zones plus importantes du globe. Il suffirait que des fractures soient créées par la subduction pour que le magma remonte. Ces explications rappellent celles du modèle central magmatique historique (chapitre 2).

43	G3. Ça veut dire que vous pensez que, qu'à chaque limite de plaques y a une poche de magma !
44	Antoine. On est juste en train d'expliquer que des fois on peut, enfin nous on pense qu'il y a eu une poche de magma mais on l'a schématisé comme ça mais on peut imaginer qu'elle est beaucoup plus grande et euh voilà.
45	Lahcen. Ça veut dire que, par exemple que, ça serait placé ailleurs, en fait ça voudrait dire que, à cette profondeur là, partout sous Terre il y a du magma, c'est ça ou euh ?
46	Pierre. Dès que les failles vont dans tous les sens, on peut supposer qu'il y a une poche de magma qui peut les toucher.
47	Lahcen. Et forcément à chaque limite de, à chaque euh, enfin...
48	Pierre. Ben où il y a des séismes.

Pour ce groupe, la problématique du magmatisme se limite simplement à sa remontée qui se ferait à l'aide de la pression (52) et des failles créées par la subduction. En effet, lorsque Lise leur demande d'expliquer la formation de ce magma (54), les élèves sont embarrassés et

n'élucident pas cette formation (55). Ils rappellent que la poche de magma serait plus grande ce qui sous-entend qu'il y aurait une grande réserve de magma dans le globe. Lahcen réplique en disant que si la poche était plus grande, il y aurait plusieurs lignes de volcan à la surface (58).

54	Lise. Comment il se forme le magma ?
55	Antoine. Comment il se forme le magma ! On a vu ça en cours de Première.
56	Lise. Comment il arrive à cet endroit là ? xxx à côté.
57	Antoine. Ben justement, parce que là en fait j'ai dit, là c'était schématique mais on peut imaginer qu'elle est beaucoup plus grande la poche et euh, vas-y Lahcen.
58	Lahcen. Mais si la poche était beaucoup plus grande il n'y aurait pas qu'une seule ligne de volcan, il y en aurait surtout d'autres.
59	Antoine. Il y en aurait surtout d'autres, ben euh
60	Lahcen. Comme on avait dit que c'était parallèle à la limite des plaques.
61	Antoine. Oui mais les séismes euh il y en a surtout ici.

C'est là qu'intervient l'enseignante pour aller dans le même sens des discussions entamées et demande au groupe s'il y avait des fissures produites à côté de celles représentées sur le schéma (64 ; 66). Suite à leur réponse affirmative, l'enseignante avance que le magma pourrait remonter par ces fissures là (69) et qu'il y aurait des volcans plus à gauche de la plaque chevauchante (71). En réponse à cette objection, le groupe considère que les séismes créés plus à gauche seraient trop profonds pour que le magma puisse remonter. Cette explication est contestée par Paul (73) qui remet en cause l'idée principale d'une création de failles, à partir des séismes moyens, qui arriveraient jusqu'au manteau inférieur puisque le groupe considère que les failles créées par les séismes profonds seraient très profondes pour faire remonter le magma à la surface.

69	P. Alors s'il y en a, si on raisonne euh selon votre schéma, du magma remonterait aussi par ces fissures qui seraient à gauche ?
70	Antoine. Oui mais là euh...
71	P. Donc on aura des volcans, plus à gauche sur la plaque chevauchante.
72	Antoine. Mais là on imagine aussi que, que là, enfin il y a une très importante profondeur à gauche, puisque on voit bien qu'on a des épicentres, c'est beaucoup plus profond, donc euh ça va peut être trop loin, la croûte euh ça va peut être trop loin pour que le magma puisse remonter jusqu'ici. Puisqu'on imagine que sans la poche de magma en fait, il y aurait eu une fissure euh comme ça et que le magma euh puisse les agrandir jusqu'à, jusqu'à la croûte.
73	Paul. Oui mais si on part de votre raisonnement, les séismes qui sont les plus profonds, enfin ils sont quand même à une profondeur qui est, enfin proportionnellement ils sont très très bas et comment est-ce que les séismes de profondeur moyenne ils arriveraient à créer des failles euh jusqu'au manteau inférieur ? Enfin si les autres, les séismes profonds, ils ne peuvent pas remonter à la surface, enfin les failles ne peuvent pas remonter à la surface.
74	Antoine. Bonne question. On n'avait pas pensé à ça...

Ces moments intenses de problématisation et l'ensemble des objections et des questions avancées par les élèves de la classe et par l'enseignante conduisent à l'impossibilité de fonctionnement de l'explication A. L'intervention de Paul (73) amène la classe à douter de la possibilité d'une création de failles qui atteindrait le manteau inférieur profond. Le mécanisme expliquant la remontée du magma ne pourrait pas fonctionner. De plus, les interventions précédentes des élèves conduisent à l'impossibilité de préexistence de la poche en-dessous des zones de subduction. Les traces de ces raisons se retrouvent dans l'écrit intermédiaire E1 produit suite au débat.

4.3 Construction de la possibilité et de l'impossibilité de fonctionnement de l'explication B

Le deuxième groupe explique la formation du magma par une fusion due à la chaleur produite par le frottement des deux plaques et le troisième groupe rajoute l'action de la pression. Les premières questions posées au deuxième groupe portent sur la remontée du magma à la surface (149). Puis, l'intervention de Lahcen vient s'opposer à la possibilité de fonctionnement de cette explication : « 153 Lahcen. Si le magma il se forme euh, c'est à cause de la chaleur. Pourquoi il n'y a pas de magma qui se forme sur tout le long des frottements de la plaque ? »⁸⁴. Cette objection se retrouve dans les arguments de l'écrit E1 opposés au fonctionnement de l'explication B.

A la fin du passage du deuxième groupe, qui a été plus court que le précédent, l'enseignante demande aux élèves d'explicitier les différences pouvant être relevées entre les deux modèles exposés (158-160). C'est une différence basée sur la production du magma qui est pointée.

158	P. Quelle est la différence entre les deux modèles ?
159	E. La production.
160	P. La production donc à droite on a une production en permanence à gauche on a une production qui est plus locale liée à la subduction. On va voir ce qu'ont proposé les autres groupes merci. [...]

Pour le troisième groupe prenant en considération l'action de la pression en plus de la température, Audrey s'interroge sur les raisons qui font que la fusion se produit à l'endroit et à la pression mentionnée et pas à d'autres (171). Pour les élèves du groupe, c'est là où les conditions les plus favorables à la fusion se réunissent que le magma sera créé (173). Cette formation aurait pu se produire plus à droite du schéma si les conditions nécessaires y étaient réunies (174).

⁸⁴ La réponse du deuxième groupe à cette question est inaudible dans les enregistrements.

171	Audrey. Pourquoi à cet endroit là et à cette pression là et pas et pas à d'autres ?
172	K. Je ne sais pas mais euh à cet endroit il va y avoir un petit peu de pression et de température, si le volcan était ici...
173	H. Il y a des conditions optimales pour que la roche fonde et que ça fait que le magma se crée à cet endroit là.
174	Y. On l'a mis arbitrairement ici en fait mais ça aurait pu, enfin on l'a mis arbitrairement ici mais ça aurait pu être un peu plus à droite euh et ça se produit, on pense que ça se produit xxx.

Les questions suivantes des élèves se focalisent de même sur les raisons qui font que la poche se forme à l'endroit pointé par le groupe et pas à d'autres (178). Les membres du groupe affirment qu'à l'endroit mentionné, les conditions sont réunies pour former du magma (180). De plus, puisque cela fonde à cet endroit, c'est que la pression est telle que la roche fusionne (185).

178	E. Pourquoi ce magma il se forme, ça forme une poche, ou ? et pourquoi elle ne se forme pas un peu au-dessus ?
179	K. Ca reste au niveau des, des, des, de la limite des plaques.
180	H. S'il y avait des plaques ici, ça va être moins chaud donc il se retrouve moins de roches. Si elle descend et la pression qui va par exemple augmenter... Ici il y a toutes les conditions qui font qu'il y ait du magma.

184	G3. Alors d'accord, alors pourquoi ça serait plus chaud à la surface et pourquoi il y aurait plus de pression à la surface qu'en profondeur ? enfin moi j'aurais pensé l'inverse.
185	K. Je ne sais pas mais euh xxx là après on sait que ça fond à cet endroit là, c'est-à-dire qu'il y a une pression qui fait que ça fonde

L'élève G3 vient alors noter que ce serait une belle coïncidence que la production du magma au niveau des zones de subduction soit juste au même endroit (194).

194	G3. Non je trouvais que c'était une belle coïncidence quand même que faire toutes les subductions c'était pile au même endroit, les mêmes caractéristiques, c'est beau !
195	L. Ben c'est comme ça, c'est on a supposé ça quoi, on a supposé ça, parce qu'on a vu que c'était que sur une limite, si on avait vu que ça, que ça, on n'en aurait fait d'autres plus bas mais c'est, il y en a qu'une on suppose que c'est ça.

Concernant la remontée du magma, lorsque l'un des élèves s'interroge « 202 E. *Ça remonte comment ?* », l'enseignante intervient dans le même sens et demande si le magma remontait en permanence : « 202 : P. *Ça remonte tout le temps ? Y a tout le temps du volcanisme à la surface ? Y a tout le temps du magma qui sort ? Comment c'est possible ? [...]* ». Cyril considère que les séismes créent des failles qui seront empruntées par le magma pour remonter ce qui

diffère du point de vue de son camarade du groupe (Benjamin) pour qui le magma remonte en dehors de l'action des séismes (208 ; 211).

Au terme de la présentation du troisième groupe, l'enseignante demande aux élèves de situer leur proposition par rapport aux deux précédentes (256). Ils la rapprochent de la deuxième proposition où il y a une production de magma due aux frottements qui créent de la chaleur mais ils rajoutent l'action de la pression.

Nous constatons que ces moments de discussions et de problématisation amènent les élèves à construire la possibilité de fonctionnement de l'explication B puisque les frottements produisent de la chaleur à l'origine de la fusion des roches du manteau. De plus, cette chaleur ne suffit pas à elle seule, la pression intervient également. Mais si cette explication était possible, le magma se formerait en permanence le long de la limite des plaques et la formation des volcans serait plus importante à la surface. Ces arguments ont été cités par les élèves dans l'écrit E1 pour appuyer la possibilité et l'impossibilité de fonctionnement de l'explication B.

4.4 Eléments de construction de la possibilité et de l'impossibilité de fonctionnement de l'explication C

Les élèves du quatrième groupe estiment que lorsque la plaque subduite s'enfonce, elle entraîne des roches de la plaque chevauchante et les emmènent vers le bas. Cela entraîne un mouvement de la roche qui passe au-dessus de l'isotherme puisque la pression et la température sont importantes. Ce mouvement fait que la roche remonte et que la pression diminue ce qui permet le passage à l'état semi-liquide (274). Benjamin intervient et demande aux élèves du groupe les raisons pour lesquelles les roches du manteau asthénosphérique, situées au même niveau où se produit la fusion, ne fondent pas et en quoi la subduction est-elle nécessaire pour leur explication (276). L'un des membres du groupe considère que la roche ne fond pas lorsqu'elle se trouve à une température et à une pression donnée. C'est sa remontée qui va perturber cet équilibre et entraîner la fusion.

276	Benjamin. Pourquoi les roches qui sont pas au même niveau que celle de la fusion dans le manteau euh asthénosphérique, elles fondent pas à ce niveau là, pourquoi est-ce qu'elle fusionne pas naturellement ? oui pourquoi la subduction euh
277	I. Je crois que la roche qui était à une température « x » en fait et sous une pression donnée ben elle ne peut pas entrer en fusion. Le fait de la faire remonter en fait, ben à partir du moment où xxxx elles vont entrer en fusion.

Benjamin persiste avec ses questions pour mieux comprendre la fusion expliquée par le groupe « 280. Benjamin Oui mais comment est-ce qu'elle fond euh ? Comment est-ce qu'elle entre en fusion ? ». Les élèves mentionnent alors des conditions de température et de pression (281 ; 286). Pour ce groupe, les frottements ne produisent pas de la chaleur (296, 297) et la température serait élevée en profondeur.

L'explication de ce groupe semble un peu ambiguë pour la classe. L'élève G3 essaye de comprendre le modèle présenté (300). C'est effectivement la remontée du magma et non pas l'enfoncement de la plaque océanique en profondeur qui est à l'origine de la fusion (301). Cela ne semble pas satisfaire l'élève G3 puisque pour lui, les mécanismes de fusion seraient liés au plongement de la plaque subduite (302).

300	G3. Donc vous pensez que la surface de la, de la plaque océanique en fait c'est quant elle arrive en profondeur, en fait elle se transforme plus facilement dans du magma en fait, enfin...
301	I. C'est quand elle remonte
302	G3. Mais c'est parce que elle descend, enfin ça le fait parce que c'est cette tranche là en fait, enfin comment dire !

L'inscription de cette explication dans le cadre des zones de subduction est justifiée par le fait que c'est la plaque subduite qui va produire le mouvement responsable de la remontée du magma et de la baisse de la pression (318).

317	D. Pourquoi ça se fait pas tout le temps en fait, pourquoi il y ait besoin qu'il y ait une plaque subduite ?
318	I. Ben quand il y a une plaque subduite, il y a du mouvement enfin c'est elle en fait, qui va prendre la roche euh xxx

A la fin de cette présentation, le groupe positionne sa proposition, à la demande de la l'enseignante, en lien avec la précédente. Le magma serait le résultat d'une production locale, avec des conditions spécifiques générées par la subduction, à l'origine de la production de magma.

Cette analyse montre que les éléments de l'explication du quatrième groupe, qui explique la fusion par une diminution de la pression accompagnant la remontée des roches, ont été contestés par les élèves. Par ailleurs, nous n'avons pas retrouvé – au cours du débat – les traces de toutes les argumentations mentionnées dans l'écrit E1. Nous pensons qu'elles ont été développées lors du débat de la demi-classe 2 que nous n'analysons pas dans cette recherche en raison de problèmes techniques empêchant la transcription complète de ce débat.

Nous avons pu analyser la problématisation en jeu pendant le débat de la demi-classe 1 suite à l'étude des interventions et interactions langagières des élèves et de l'enseignante au cours de cette phase. Cette problématisation peut être décrite et représentée sous forme d'espace des contraintes.

4.5 L'espace des contraintes en jeu lors du débat de Terminale S

Pendant le débat, les élèves de la demi-classe 1 de Terminale S ont construit des possibilités et des impossibilités de fonctionnement relatives aux explications A, B et C discutées. Nous représentons la problématisation en jeu par l'espace des contraintes ci-dessous (figure 58) afin d'obtenir une vue d'ensemble des savoirs travaillés lors de ce moment. Pour les élèves, le fait que les failles créées par les séismes ne puissent pas atteindre la limite manteau/noyau profonde conduit à l'impossibilité de la remontée du magma. La répartition des volcans à l'aplomb des zones de subduction combinée à l'idée que le magma n'existe pas partout, à la même profondeur, sous les zones de subduction emmènent à l'impossibilité de l'existence d'une grande réserve de magma à l'intérieur du globe et d'une production permanente du magma. La fusion contrôlée par la température et la pression ainsi que la chaleur produite par les frottements entre les plaques conduisent à la nécessité d'un mécanisme augmentant la température des roches du manteau et d'une production locale du magma. Le registre explicatif est mécaniste et s'appuie sur la tectonique des plaques.

Si nous comparons cet espace des contraintes en jeu pendant le débat (figure 58) avec celui déterminé par le groupe de recherche et définissant les objectifs d'apprentissage de la séquence forcée mise en place (figure 48, p.241), nous pouvons constater que les élèves envisagent la nécessité d'une formation locale du magma mais les contraintes empiriques qu'ils mobilisent pour sa construction (frottement des plaques produit de la chaleur, fusion contrôlée par la température et la pression) sont différentes de celles fixées *a priori* (volcans des zones de subduction, manteau solide). De plus, ces contraintes les emmènent à construire une deuxième nécessité, celle d'un mécanisme augmentant la température des roches du manteau alors que l'espace des contraintes initiale envisage plutôt la nécessité d'un mécanisme faisant baisser la température des roches du manteau (figure 48, p.241). Ce n'est qu'avec l'étude des supports documentaires que les élèves s'aperçoivent que la température n'augmente pas avec les frottements des plaques et que les zones de subduction sont, au contraire, froides. Ainsi, les documents introduits par le groupe de recherche orientent les élèves vers la prise en compte d'une nouvelle contrainte empirique.

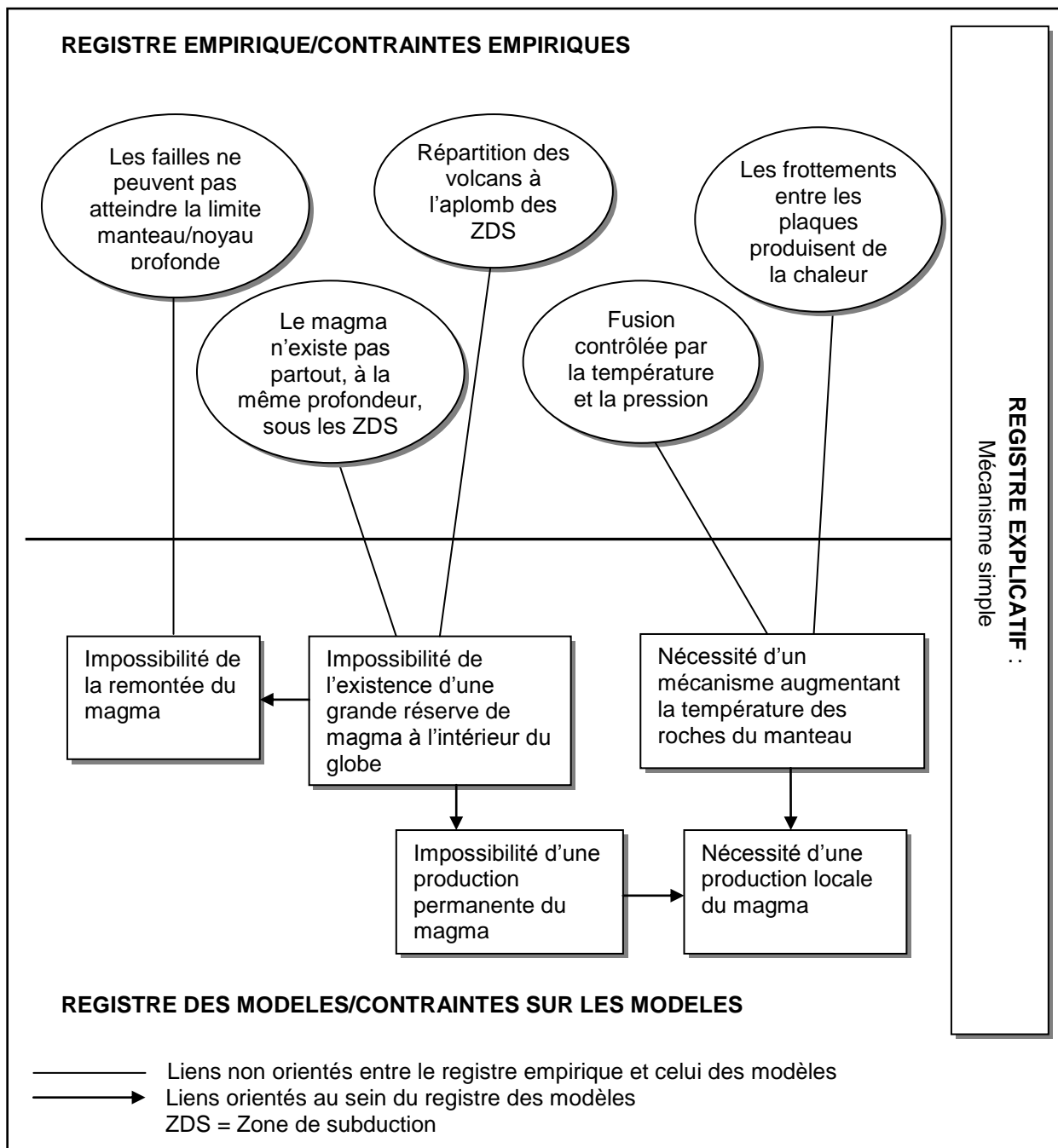


Figure 58. Espace des contraintes en jeu lors du débat de Terminale S en rapport avec le fonctionnement des zones de subduction (séquence forcée).

4.6 Bilan

L'analyse des interactions langagières pendant le débat scientifique nous a permis de constater que cette phase se positionne principalement sur la construction de possibilités et d'impossibilités de fonctionnement et s'éloigne de la recherche de la bonne solution. Les interventions des élèves et de l'enseignante vont dans ce sens et le débat apparaît riche en

objections, en questions qui demandent des arguments et en ouvertures et fermetures des possibles. Les questions posées par les élèves poussent leurs camarades à montrer pourquoi ils sont parvenus à leur explication et pas à une autre. Les idées explicatives sont interrogées d'une manière qui engage les élèves dans un travail de problématisation et d'expression des raisons sous-jacentes à ces idées. Les élèves de la classe débattent entre eux et, lorsqu'il est nécessaire, l'enseignante pose des questions pour appuyer certaines idées présentes et avancer vers la construction de possibilités et d'impossibilités. Après le passage de chaque groupe, l'enseignante demande aux élèves de se positionner par rapport aux explications précédentes. **L'écrit E1 qui se rapporte au débat scientifique garde des traces de la mise en texte orale problématisée pendant ce moment.** Les arguments figurant dans cet écrit correspondent à ceux développés par les élèves au sein du débat. Par contre, les élèves abordent, pendant le débat, une des deux nécessités déterminées *a priori* par le groupe de recherche. En effet, les contraintes empiriques à leur disposition diffèrent de celles figurant dans l'espace des contraintes possible. L'étude des documents scientifiques va les emmener vers la prise en compte de nouvelles contraintes empiriques ce qui pourra les conduire à construire les nécessités visées.

Cependant, le travail « forcé » de mise en texte se termine avec la consultation des documents scientifiques où les élèves repèrent des arguments « pour » et « contre » le fonctionnement des trois modèles explicatifs. Les élèves ont travaillé sur leurs explications puis sur trois modèles tirés à partir de leurs propositions. Les deux niveaux de travail (sur les raisons puis sur les solutions) accomplis dans la séquence précédente de 4^{ème} n'ont pas pu être mis en place pour des raisons qui ont entravé la poursuite des échanges entre les membres du groupe de recherche. Pour garder les traces du travail de problématisation et aboutir aux nécessités qui sous-tendent les solutions au problème du magmatisme des zones de subduction, il serait important de poursuivre une telle séquence dans une logique de problématisation.

5. Conclusion du chapitre 6

L'analyse de la séquence en partie forcée construite au sein du groupe de recherche montre que les textes produits portent des spécificités des textes problématisés. Ce travail a été possible suite à l'introduction par l'équipe de recherche d'un nouvel ostensif qui a permis aux élèves de produire des raisons écrites à partir des discussions du débat et de l'étude des documents scientifiques. Lorsque nous nous sommes intéressés à l'étude de l'activité de mise en texte orale des élèves et de l'enseignante pendant le débat, des traces importantes de problématisation ont

été repérées dans une phase riche en questions, en arguments et en objections. La focalisation était centrée sur la dimension apodictique des savoirs et sur les raisons. L'écrit E1 garde une trace des arguments avancés pendant le débat concernant le fonctionnement des trois modèles. Les élèves favorisent le fonctionnement de l'explication B et s'opposent à celles A et C. Leurs difficultés lors du débat se rapportent aux contraintes empiriques dont ils disposent pour construire les nécessités. L'exploitation de la documentation scientifique suivante conduit également à la production d'arguments (Ecrit E2) qui s'opposent, en majorité, au fonctionnement des trois modèles explicatifs. Les supports documentaires ont emmené les élèves à prendre en considération de nouvelles contraintes empiriques. La mise en texte devrait se poursuivre avec un travail sur les raisons au risque de perdre les traces de la problématisation.

**Chapitre 7. Discussion générale et mise en
perspective des trois études des mises en textes
scolaires**

Introduction

Nous cherchions, au début de ce travail, à étudier les pratiques de mise en texte des enseignants pendant des situations ordinaires et forcées d'enseignement-apprentissage dans le but de repérer les difficultés et les conditions didactiques de construction des savoirs magmatiques problématisés et de textes associant les raisons aux solutions. Au terme des développements théoriques et méthodologiques exposés dans les trois premiers chapitres et des trois études de cas qui nous ont amenée à analyser la mise en texte et la construction des savoirs dans le domaine du magmatisme en 4^{ème} et Terminale S, il s'agit de discuter, de comparer et de mettre en perspective les cas étudiés en relation avec nos questionnements de départ. Les résultats de cette étude seront complétés et comparés à ceux issus d'autres travaux abordant les mêmes thématiques. Nous indiquons également en quoi cette recherche nous a permis de progresser par rapport à la compréhension du processus de problématisation et de ses liens avec la mise en texte et les pratiques de savoirs en sciences de la Terre. Ainsi, nous structurons notre discussion autour des deux points suivants :

- les difficultés d'une mise en texte problématisé des savoirs dans le domaine du magmatisme ;
- les conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé des savoirs dans le domaine du magmatisme.

Ce chapitre sera suivi par une conclusion générale qui précisera les apports de cette recherche ainsi que les limites et les approfondissements futurs à poursuivre.

1. Difficultés d'une mise en texte problématisé des savoirs dans le domaine du magmatisme

Selon notre cadre didactique de la problématisation, l'enseignement scientifique a pour but de construire et de mettre en texte des savoirs « problématisés ». La véritable entrée des élèves dans la science se fait lorsque ceux-ci accèdent aux nécessités, aux raisons qui sous-tendent les solutions (Orange, 2000). Toutefois, lors de nos développements théoriques (chapitre 1), nous avons pointé le propositionnalisme des savoirs (Astolfi, 1992, 2005) comme conséquence de leur mise en texte scolaire et noté que l'épistémologie des enseignants – malgré les efforts qu'ils

mobilisent pour mettre en œuvre des activités didactiques impliquant une problématisation – reste accrochée à une conception propositionnelle du savoir (Fleury & Fabre, 2005). Cela nous a amené à poser la question des difficultés et des conditions d'accès aux savoirs problématisés et des logiques qui font obstacle à une construction des savoirs faisant référence aux problèmes. Dans cette section, nous nous penchons particulièrement sur les difficultés – tirées à partir des analyses de nos études de cas – qui font que la mise en texte ordinaire des savoirs ne va pas dans le sens d'une construction problématisée. Parmi ces difficultés, nous avons identifié la prédominance d'une logique centrée sur le repérage et le tri par l'enseignant des différentes solutions possibles pour accéder à la bonne solution. Nous examinons les techniques de mise en texte enseignantes mobilisées dans cette logique qui semble liée aux conceptions des enseignants concernant les savoirs scientifiques et leur construction avec les élèves. Dans un premier temps, nous nous attardons sur la logique de repérage et de tri des solutions et la manière selon laquelle elle se manifeste concrètement lors de la mise en texte des savoirs. Puis, nous nous intéressons aux techniques de mise en texte mobilisées pour recenser et trier les solutions, aux technologies justifiant ces techniques pour finir avec des difficultés liées à la problématisation du concept de magmatisme dans le cadre scolaire.

1.1 Logique de repérage et de tri des solutions

L'étude de la séquence ordinaire de 4^{ème} (chapitre 4) permet de montrer que la pratique de mise en texte enseignante est dominée par une logique de repérage puis de tri des solutions possibles au problème explicatif posé dans le but d'accéder à la bonne solution. La pratique de l'enseignante n'avait pas pour but d'aller vers un texte de savoir problématisé dans le domaine du magmatisme. En effet, la mise en texte orale lors du débat (ou de la phase d'échanges) privilégie l'explicitation des idées des élèves dans le but de retenir les différentes solutions proposées. Les idées contradictoires, figurant dans un pluri-texte propositionnel produit à la fin du débat, sont soumises aux apports des documents scientifiques qui serviront à les trier. La bonne solution est ainsi repérée grâce à des arguments qui lui permettent de résister à la discussion et figure dans un mono-texte propositionnel tandis que les autres solutions sont réfutées au moyen d'arguments qui les invalident. Ces pratiques de mise en texte privilégient plutôt la construction de textes propositionnels révélant les seules solutions. La production de tels textes est, rappelons-le, largement critiquée par les didacticiens car elle limite les savoirs à de simples énoncés factuels (Astolfi, 1992, 2005a). Cela met en évidence des pratiques n'allant pas dans le sens de la mise en texte problématisé des savoirs scientifiques. Ces pratiques

semblent liées, d'après nos analyses, à cette logique de repérage et de tri des solutions et aux conceptions épistémologiques et didactiques des enseignants que nous abordons par la suite (paragraphe 1.3). Lorsque l'enseignant met en place des activités orientées vers l'identification de la bonne solution au problème scientifique posé, le processus de problématisation n'est pas privilégié. C'est la dimension assertorique qui est favorisée au dépend de celle apodictique caractérisant les savoirs scientifiques.

Le tri des solutions avait déjà été pointé par une autre recherche réalisée par Orange Ravachol (2010) qui a caractérisé, en situation ordinaire, l'activité de deux enseignantes au cours de deux débats scientifiques en Terminale S abordant le problème du magmatisme des zones de subduction. Les enseignantes concernées mettent en place depuis quelques temps des débats au sein de leurs séquences et accordent de l'importance à la construction des raisons qui soutiennent les solutions des problèmes. De plus, elles sont engagées dans les travaux didactiques du laboratoire CREN⁸⁵ qui confèrent un rôle primordial à la problématisation. Les résultats des analyses menées par Orange Ravachol (2010) montrent une association, pour ces deux enseignantes, entre une logique de problématisation hésitante au cours du débat puis une logique de tri de la bonne solution par la preuve au terme de cette phase où les raisons discutées sont ignorées lors du passage à l'écrit. En effet, il apparaît que même si des nécessités sont construites lors du débat, elles disparaissent quand il s'agit de passer à l'étude des documents scientifiques qui servent principalement à identifier ce qui est vrai, à rejeter ce qui est faux et à repérer la bonne solution. Ainsi, lorsqu'une mise en texte orale problématisée est développée, elle se retrouve rompue par un basculement – quand débute le tri des solutions – vers une logique de réfutation mettant en avant les solutions et laissant de côté les raisons (ibid.). **Cette démarche va dans le sens d'une problématisation technique utilisant les raisons et les preuves empiriques pour accéder aux solutions.** La logique de tri des solutions prend le devant même si la problématisation et la construction des nécessités figurent parmi les buts des enseignantes. Orange Ravachol (2010) évoque alors la difficulté de ces enseignantes à conserver la dimension apodictique dans le texte du savoir et à l'articuler à celle assertorique. Pour construire un savoir problématisé, il ne suffit pas de mener un travail de construction des problèmes pendant les débats scientifiques qui ne constituent que des moments particuliers des situations d'enseignement-apprentissage. La mise en texte problématisé des savoirs – comme nous l'avons déjà évoqué au cours de nos développements théoriques (chapitre 1) – nécessite que la focalisation sur les raisons soit prolongée avec les phases suivantes telles que les séquences

⁸⁵ Centre de recherche en Education de Nantes.

forcées de 4^{ème} et de Terminale S se sont proposées de faire. D'ailleurs, la mise en texte des savoirs elle-même tend à faire disparaître les raisons. Il suffit de voir l'ensemble des artifices qu'il faut utiliser pour garder une part d'apodicticité et que nous présentons dans le deuxième paragraphe de ce chapitre.

Nous remarquons que, pour les études de cas réalisées au cours de ce travail ainsi que celles analysées par Orange Ravachol (2010), la priorité des enseignants est accordée aux solutions même si la construction des problèmes peut figurer parmi leurs objectifs. **Cela prouve que la mise en texte problématisé est un processus complexe et difficile à mettre en place.** Ces pratiques usuelles dans l'enseignement scientifique, faisant passer les élèves des différentes solutions possibles à celle qui est bonne, sont différentes de celles auxquelles conduit une logique de problématisation. Cette dernière se centre plus sur les conditions de possibilités des solutions que sur les solutions elles-mêmes et a pour but de faire passer les élèves de leurs idées « spontanées » à des savoirs scientifiques caractérisés par une part d'apodicticité (Fabre & Orange, 1997 ; Orange, 2000). La logique de problématisation a été mobilisée, par le groupe de recherche, lors de la construction de nos deux séquences forcées (chapitre 5 et 6). Avant d'examiner les conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé tirées à partir de l'étude des séquences forcées de cette recherche voyons comment s'effectuent le repérage et le tri des solutions et avec quelles techniques.

1.2 Techniques de mise en texte mobilisées dans le repérage et le tri des solutions

Les outils empruntés à la théorie anthropologique du didactique de Chevallard (1992, 1996, 1997, 1998) nous ont été d'une grande utilité pour décrire et modéliser les pratiques de mise en texte enseignantes et mieux comprendre comment les écrits ont été construits. Rappelons que la mise en texte relève d'un type de tâche enseignant dont l'accomplissement appelle des techniques enseignantes particulières (ou manières de faire). Pour identifier ces techniques, nous avons repéré les tâches effectuées par la classe, les ostensifs produits ou utilisés par ces tâches. Nous avons constaté, grâce à la modélisation praxéologique des pratiques, que le tri des solutions est effectué par l'intermédiaire de la production de différents niveaux d'écrits suite à la réalisation de tâches par la classe. L'enseignante décompose le travail de mise en texte en plusieurs « sous-tâches » qui consistent à faire repérer aux élèves les solutions possibles (production d'un pluri-texte propositionnel), puis de les faire trier (production d'un mono-texte

argumentatif) pour retenir la bonne solution (production d'un mono-texte propositionnel). Nous développons, par la suite, ces différentes « sous-tâches ».

1.2.1 Production d'un pluri-texte propositionnel et repérage des solutions possibles

Lors de la séquence ordinaire de 4^{ème} (chapitre 4), la mise en texte orale lors du débat (ou de la phase d'échanges) permet de retenir les différentes solutions proposées par les élèves et se termine par la production d'un pluri-texte propositionnel mettant en évidence ces solutions. Pendant le débat, c'était la recension des idées des élèves qui intéressait l'enseignante plus que les arguments qu'ils peuvent échanger. Le pluri-texte élaboré expose plusieurs idées incompatibles consignées dans un même écrit. Sa production marque la recension des solutions et prépare ainsi la phase de tri suivante. Les idées sélectionnées par ce pluri-texte ne peuvent pas demeurer ensemble et il faudra en choisir une par la suite. Des pluri-textes propositionnels se retrouvent également dans les deux séquences forcées de 4^{ème} et de Terminale S mais leurs usages et leurs fonctions sont différentes. Lorsque le groupe de recherche construit, dans la séquence forcée de 4^{ème} (chapitre 5), trois « caricatures » à partir des affiches de groupe, le schéma produit exposant les trois explications possibles A, B et C (figure 35, p. 185) est bien un pluri-texte propositionnel. Cependant, ce schéma est accompagné d'un tableau qui demande aux élèves si ces explications peuvent ou non fonctionner et pour quelles raisons. Il est donc utilisé pour faire produire des arguments aux élèves et non pas dans le but de repérer les solutions possibles afin d'en choisir une par la suite. L'introduction des caricatures et du tableau les accompagnants, représente une abstraction du débat proposée par le groupe de recherche. Le travail de ce document par les élèves produit des mono-textes raisonnés individuels (E1) (figure 36, p.186) qui mentionnent les argumentations « pour » et « contre » les trois modèles explicatifs. La même procédure est suivie lors de la séquence forcée de Terminale S où des caricatures sous forme de phrases (résumés des trois modèles explicatifs apparus à travers les productions individuelles et de groupe) sont proposées aux élèves et non de schémas.

1.2.2 Production d'un mono-texte argumentatif et tri des solutions

Après la recension des solutions possibles, la technique de mise en texte consiste à procéder à leur tri. Pour cela, les idées contradictoires repérées dans le pluri-texte propositionnel seront soumises aux apports des supports documentaires. La bonne solution est alors repérée grâce à

des arguments qui lui permettent de résister à la discussion tandis que les autres sont réfutées à travers des arguments qui les invalident. Le texte produit suite à cette phase est un mono-texte argumentatif, qui expose les argumentations participant au tri des solutions. Ces arguments pointent la bonne solution et réfutent les autres. Ainsi, les arguments, dégagés à partir des documents scientifiques ou évoqués oralement, ont été utilisés pour trier les solutions. Ils contribuent au tri en favorisant ou défavorisant l'une ou l'autre proposition.

1.2.3 Production d'un mono-texte propositionnel intégrant la bonne solution

Les phases précédentes ouvrent la voie vers la production d'un mono-texte propositionnel dévoilant la bonne solution au problème posé. Cet écrit bilan est un texte simple qui présente la solution vraie mais qui n'entretient aucune relation avec les problèmes. Les arguments, figurant dans l'écrit précédent et qui valident et invalident les différentes propositions de solutions, disparaissent. Le travail de mise en texte avait pour but principal d'aller vers la solution du problème et d'arriver à ce mono-texte qui représente la trace finale retenue par les élèves. C'est l'aboutissement à ce type de texte qui a été considérablement critiqué par les recherches en sciences de l'éducation (Astolfi, 1992, 2005a ; Fabre 2007).

Pour conclure, les techniques de repérage et de tri des solutions, mises en œuvre par l'enseignante, permettent de passer de l'identification des solutions possibles (pluri-texte propositionnel), à la validation et l'invalidation des solutions (mono-texte argumentatif) à l'identification de la bonne solution (mono-texte propositionnel) (figure 58). Les activités langagières qui jalonnent la séquence de 4^{ème} étudiée ont été employées au service du tri des solutions. De plus, les élèves sont orientés vers la recherche de la bonne solution du problème et éloignés de l'identification des raisons. Ces pratiques ouvrent la voie à la production de textes de savoirs propositionnels et non problématisés. Cette façon de mettre en texte le savoir scientifique constitue un obstacle à la problématisation et à la construction des savoirs problématisés. Elle fait que les élèves, comme le note Fabre (2007), accèdent à des savoirs présentés sous forme de textes exposant les résultats de la science et masquant la problématisation dont ils sont issus. La primauté est assignée à la solution dans le texte de savoir et les raisons sont refoulées. On renonce au caractère apodictique des savoirs pour se restreindre au celui assertorique et à une solution finale vraie. Nous verrons dans le paragraphe 2 de ce chapitre en quoi ces techniques diffèrent de celles qui prennent en compte la problématisation. Nous nous intéressons, dans ce qui suit, aux technologies justifiant ces pratiques.

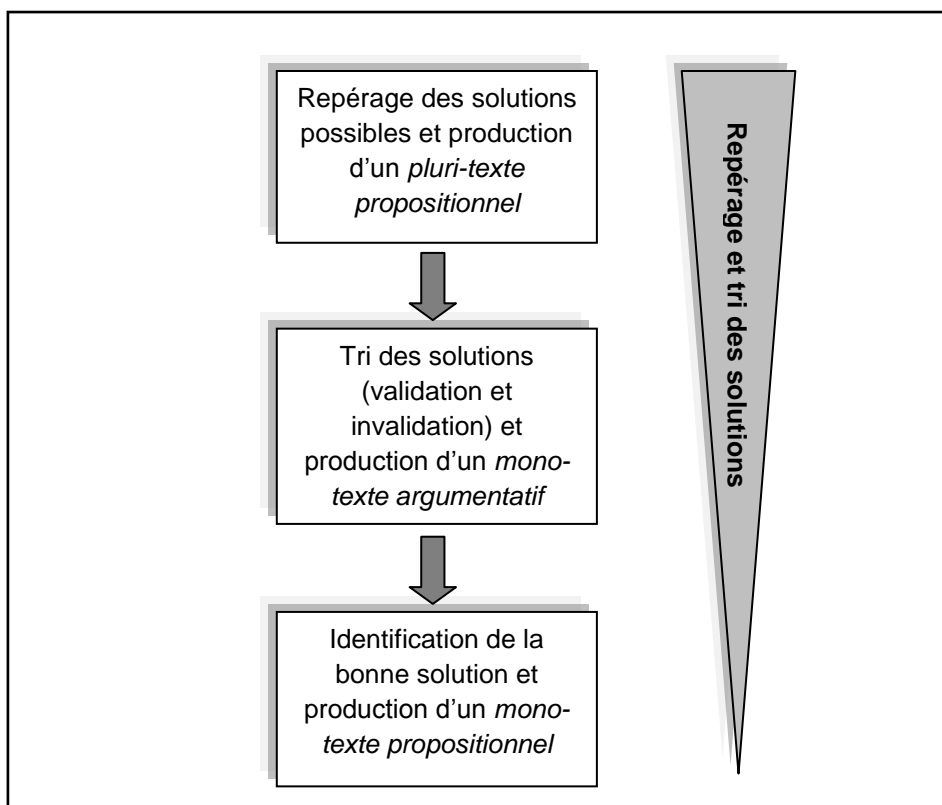


Figure 59. Les techniques enseignantes de mise en texte mobilisées dans une logique de repérage et de tri des solutions.

1.3 Technologies justifiant les techniques mobilisées dans la mise en texte propositionnelle des savoirs dans le domaine du magmatisme

Comme nous l'avons déjà pointé, les pratiques de mises en textes basées par une logique de repérage et de tri des solutions semblent être marquées par les conceptions épistémologiques et didactiques des enseignantes sur les savoirs scientifiques et leur mode de construction avec les élèves. Tout d'abord, au cours de la séquence ordinaire de 4^{ème} (chapitre 4), le but de l'enseignante 1 – à travers les techniques de mise en texte – était d'arriver à la bonne solution du problème de l'origine des matériaux volcaniques. Pour elle, les solutions scientifiques ne sont pas données directement aux élèves mais sont construites avec eux ce qui justifie la démarche suivie et la décomposition du travail de mise en texte. Ensuite, lors de la séquence forcée de 4^{ème} (chapitre 5), l'analyse de l'entretien d'autoconfrontation réalisé avec l'enseignante 2, dont le but est d'éclaircir les connaissances qui organisent ses choix en situation, montre que celle-ci était perturbée par la façon demandée par le groupe de recherche pour gérer le débat. Cette façon, de son point de vue, n'apporte rien aux élèves puisqu'elle ne donne pas de solution et ne prend pas partie lorsqu'une controverse se manifeste dans la classe. Habituellement, elle ne laisse pas les

élèves dans le doute ni dans l'incertitude et leur emmène les réponses aux problèmes qu'ils se posent. Malgré sa pratique ordinaire, l'enseignante 2 s'est calée par rapport aux attentes de l'équipe de recherche en mobilisant un concept organisateur qui est celui de la réticence didactique de donner la réponse aux questions des élèves. C'est ce qui a probablement ouvert la voie vers le positionnement lors du débat, comme nos analyses l'ont déjà montré (étude des interactions langagières) (chapitre 5), sur la construction de possibilités ou d'impossibilités de fonctionnement que sur la recherche des solutions. Le débat de la séquence forcée de 4^{ème} s'est effectivement révélé riche en arguments, en objections et en ouvertures vers les possibles.

Ces enseignantes mobilisent donc, dans leurs pratiques et la conduite de leur enseignement, une épistémologie du vrai et du faux et non du problématique. Tout se passe comme si, pour elles, les savoirs scientifiques sont le fruit du travail des chercheurs et constituent des solutions vraies et factuelles aux problèmes posés. Par conséquent, l'importance est accordée, dans la construction des savoirs à l'école et dans les textes de savoirs élaborés, aux solutions ce qui privilégie le caractère propositionnel fortement dénoncé par les didacticiens et les chercheurs en sciences de l'éducation (Astolfi, 1992, 2005a ; Fabre 2007). Le choix du processus de tri par rapport à une problématisation plus poussée serait éventuellement lié à ces conceptions. Cette image du savoir cantonne les enseignants et leurs élèves dans un savoir « propositionnel » et conduit à la production de textes qui énoncent des vérités et se déclinent en des propositions indépendantes (Fleury & Fabre, 2005). La construction du savoir avec les élèves devrait conduire à ces solutions dans une démarche centrée davantage sur la « résolution » des problèmes mettant de côté leur « construction ». Nous voyons bien pourquoi la construction des savoirs problématisés rencontre des difficultés à pénétrer l'enseignement et l'apprentissage scientifique au vu de cette image dominante des savoirs chez les enseignants. Comment envisager l'élaboration de textes problématisés si, pour les enseignants, les savoirs sont considérés comme des solutions factuelles aux problèmes ? Les conceptions enseignantes en acte de la science organisent visiblement l'enseignement habituel des sciences. Rappelons que les savoirs scientifiques ne sont pas de simples propositions factuelles et « vraies » mais des réponses à des questions bien posées (Bachelard, 1949).

La transmission des savoirs aux élèves sous une forme propositionnelle affecte l'image de la science qui leur est véhiculée comme nous l'avons évoqué au cours de nos développements théoriques (chapitre 1). C'est une vision simpliste de la science comme une accumulation de faits ne soulevant aucun problème qui est transmise. Le savoir scolaire se retrouve ainsi désarmé des problématiques qui lui accordent tout sens pour se laisser présenter comme un savoir factuel et

« déproblématisé ». Par conséquent, il apparaît nécessaire de dépasser les conceptions épistémologiques des enseignants pour que la mise en texte problématisé puisse avoir une place à l'école. Mais il est important de signaler que les conceptions des enseignants que nous désignons sont indirectement nourries par la « forme scolaire » des savoirs scientifiques. Rappelons que nous avons pointé (chapitre 1) en référence à Verret (1975), les contraintes comme la dépersonnalisation et la désyncrétisation accompagnant la mise en texte et la transposition didactique des savoirs scolaires. Nous avons relevé leurs conséquences sur la nature des savoirs scientifiques et montré que l'école privilégie les faits et les énoncés. C'est précisément cette forme du savoir que les enseignants transmettent à leurs élèves et qui leur a été transmise par ailleurs. Ainsi, **l'institution scolaire participe dans le maintien des caractéristiques propositionnelles des savoirs scientifiques**. Dans ce sens, Kahn & Rey (2008, p.24) estiment que « *ce qui structure nécessairement les pratiques de l'enseignant, c'est qu'il est un opérateur au sein d'une forme anthropologique de transmission tout à fait particulière et qui n'a pas toujours existé : la forme scolaire* ». Repérer cette forme, ne plus la considérer comme allant de soi « *permet de mieux voir certaines de ces caractéristiques et leurs conséquences sur les pratiques de l'enseignant aussi bien dans la classe qu'en dehors d'elle* » (ibid.).

En plus des difficultés liées à une logique de repérage et de tri des solutions et aux conceptions épistémologiques et didactiques des enseignants, nous avons identifié quelques difficultés liées à la possibilité de problématisation du concept de magmatisme dans le contexte scolaire.

1.4 Problématiser et mettre en texte le concept de magmatisme dans le cadre scolaire

Nous avons reconstitué, lors du chapitre 2, les problématisations des différents modèles explicatifs du magmatisme (local, central et global). Actuellement, la problématique du magmatisme est construite dans un cadre global et s'inscrit au sein de la théorie de la tectonique des plaques. C'est en termes d'une production locale du magma, à tel ou tel endroit, sous des conditions précises et à certaines profondeurs que le magmatisme est expliqué par les scientifiques. En classe de Terminale S et en référence aux programmes officiels correspondants (M.E.N., 2001), les élèves étudient la formation du magma à des endroits particuliers (zones de subduction) en relation avec la tectonique des plaques. L'exemple présenté avec la séquence forcée de Terminale S montre que la problématisation et la mise en texte du concept de magmatisme semble possible à développer chez ces élèves qui disposent de connaissances élaborées concernant la structure du globe, la convection du manteau, les processus

magmatiques, la tectonique et le mouvement des plaques lithosphériques leur permettant de construire les problèmes. Ils possèdent certainement leurs propres explications spontanées : poche de magma préexistante, magma liquide et prêt à sortir ou formation due à un seul paramètre comme l'augmentation de la température grâce aux frottements. De plus, les contraintes empiriques mobilisées par les élèves se démarquent de celles prises en compte par les chercheurs actuels ce qui les emmène à construire des nécessités distinctes de celles des scientifiques. Ces difficultés et ces écarts ont déjà été soulignés par Orange Ravachol (2005) suite à la comparaison réalisée entre la problématisation des élèves de Terminale S et celle des scientifiques concernant le problème du magmatisme des zones de subduction : « *le registre empirique des élèves est moins fourni que celui des chercheurs et les conduit dans une problématisation du sens commun* » (ibid., p. 182). Malgré ces difficultés, le modèle global magmatique, dans son acception actuelle, leur est accessible car la prise en compte de l'intervention de plusieurs paramètres dans la fusion est possible à ce niveau d'étude (Orange, 1995). En classe de 4^{ème}, la situation est différente. D'emblée, les programmes officiels scolaires de 4^{ème} envisagent l'explication du magmatisme sans relation avec la tectonique des plaques abordée ultérieurement selon la partie du programme de 4^{ème} consacrée à l'« activité interne du globe » terrestre (M.E.N., 2008b, p.47). Ces programmes officiels indiquent les objectifs d'apprentissage suivants concernant le magmatisme : « *Les magmas sont contenus dans des réservoirs magmatiques localisés, à plusieurs kilomètres de profondeur* » (ibid., p.48). Cette situation occasionne des difficultés pour les enseignants de 4^{ème} qui suivent les recommandations officielles, afin de construire des savoirs problématisés en relation avec le domaine du magmatisme. Tout d'abord, la formation du magma est en lien avec la tectonique des plaques alors pourquoi dissocier ces deux phénomènes et les étudier séparément ? Ensuite, même si l'explication globale paraît inaccessible aux élèves de 4^{ème} en raison des difficultés de compréhension des diagrammes P, T et P_{H₂O} (Orange, 1995) à ce niveau, la séquence forcée de 4^{ème} de cette recherche montre qu'il est possible de faire accéder les élèves à deux nécessités importantes qui fondent le concept de magmatisme, celles de la formation et de la remontée du magma. Ajoutons à cela que la mise en texte de ce concept en classe de 4^{ème} peut, dans des conditions précises explicitées dans la partie suivante, aller dans le sens d'une construction problématisée.

2. Conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé des savoirs dans le domaine du magmatisme

Pour dégager les conditions de possibilités d'une mise en texte problématisé des savoirs et d'une construction de textes de savoirs non propositionnels, l'observation des situations ordinaires de classe nous est apparue insuffisante. L'exploration des difficultés identifiées lors de la séquence ordinaire de 4^{ème} a nécessité la mise en œuvre de séquences forcées. Les deux séquences forcées construites et présentées lors de cette recherche (chapitre 5 et 6) visaient l'identification des conditions permettant de tenir la dimension apodictique du savoir le long de sa construction pour en garder une trace dans le texte final. Ce travail a été contrôlé par le cadre théorique didactique de la problématisation au sein duquel s'inscrit cette recherche. Visiblement, les techniques de mise en texte problématisé des savoirs nécessitent la production de plusieurs niveaux de textes permettant un travail d'abstraction et de généralisation des problèmes. La focalisation sur les raisons a été prolongée et poursuivie au-delà des débats scientifiques dans le but de déterminer les pratiques qui permettraient de parvenir à des textes décontextualisés et universels mais qui intègrent les raisons. Comment emmener les élèves à problématiser, à privilégier les raisons et à construire de tels types de textes ?

2.1 Travail d'abstraction et de généralisation dans la construction des savoirs problématisés

Les **problématisations scientifiques (ou théoriques)** se caractérisent par la mise en relation des registres des modèles et des registres empiriques sous le contrôle du registre explicatif. Nous avons d'ailleurs, au cours du deuxième chapitre de cette recherche, reconstruit les problématisations pour les différents modèles d'explications historiques et actuels du magmatisme et représentés celles accessibles aux deux niveaux scolaires étudiés (4^{ème} et Terminale S) et en jeu pendant les débats de classe sous forme d'« espace des contraintes ». Selon Orange (2007b), les problématisations théoriques en sciences – où les solutions sont considérées comme des moyens de construction des conditions de possibilités et des nécessités – se caractérisent également par le travail de généralisation qu'elles permettent et par leur abstraktivité « *c'est-à-dire ce qui fait qu'elles dépassent les cas sur lesquels elles sont construites* » (ibid. p.8). Par cela, elles se distinguent des **problématisations techniques** qui utilisent les conditions pour atteindre les solutions du problème. Le renversement qui fait que, dans les problématisations théoriques, les solutions sont au service des raisons « *n'est pertinent*

que grâce au travail d'abstraction et de généralisation [...]» (Orange, 2007b, p.11-12). Les séquences forcées, construites au cours de cette étude, s'appuient sur un travail d'abstraction permettant dépasser les cas des problématisations techniques pour atteindre celles théoriques. Un travail similaire a été mené dans un domaine en sciences de la vie concernant les mouvements des bras (Orange & Orange Ravachol, 2007). Nous discutons la particularité et les apports de notre étude dans le domaine du magmatisme. Comment le travail d'abstraction et de généralisation a-t-il été conduit ? Sous quelles conditions ? Et quelles sont les techniques enseignantes de mise en texte problématisé ?

2.1.1 Techniques de mise en texte problématisé : passer des idées aux raisons à travers l'introduction de sauts abstractifs

Les débats scientifiques correspondent à des situations où les élèves sont invités à explorer le champ des possibles, à avancer des arguments opposés ou en faveur des idées explicatives proposées et à construire les raisons (Fabre & Orange, 1997). Faire développer les raisons aux élèves pendant cette phase et maintenir ces raisons dans les textes produits constituent des difficultés qu'il est nécessaire de dépasser. **L'étude des séquences forcées construites en 4^{ème} et en Terminale S montrent que la mise en texte problématisé nécessite la mise en œuvre de techniques permettant la production de sauts abstractifs dans le but de faire passer les élèves des idées aux raisons.** Ces techniques sont différentes de celles employées pendant la séquence ordinaire de 4^{ème} où l'enseignante cherchait à faire passer les élèves des solutions possibles à la bonne solution. C'est dans une logique de problématisation opposée à celle du repérage et du tri des solutions que les séquences forcées ont été construites. Les techniques de mise en texte se caractérisent par un aménagement, par le groupe de recherche, de quelques ostensifs élaborés par les élèves pour en introduire de nouveaux qui seront employés comme objets de travail pour les tâches suivantes. Les transformations réalisées portaient sur les écrits précédemment élaborés par les élèves et se basaient sur ce que la classe produit à partir de là. Trois interventions importantes de l'équipe ont permis d'engendrer trois sauts abstractifs qui ont conduit la classe vers la construction de textes problématisés et non propositionnels. Le premier saut concerne les deux séquences forcées de 4^{ème} et de Terminale S alors que les autres concernent uniquement celle de 4^{ème} puisque le travail en Terminale S n'a pas pu être accompli pour diverses raisons hors de notre portée et déjà mentionnées (chapitre 6). Les choix des interventions de l'équipe ont été opérés en relation avec le cadre théorique de la problématisation et les objectifs de recherche fixés au préalable.

Première intervention enseignante et introduction de sauts abstractifs

La première intervention du groupe de recherche consiste à simplifier, schématiser et dépersonnaliser (ne pas attribuer à un auteur) les explications possibles révélées par les productions de groupe des élèves pour construire trois caricatures (sous forme de schémas pour la séquence forcée de 4^{ème} et de résumés des modèles d'explications en Terminale S). Au terme du débat, les caricatures sont proposées aux élèves qui indiquent si elles peuvent ou non fonctionner et pourquoi. Ce travail conduit à une production d'arguments abordant la possibilité et l'impossibilité de fonctionnement des caricatures à partir des raisons discutées oralement pendant le débat. Ce sont des mono-textes raisonnés comportant plusieurs argumentations que les élèves fournissent (figure 60). Cela les fait passer d'une discussion orale des solutions possibles et des nécessités à des arguments écrits individuels. **Ce premier saut épistémique et langagier engage les élèves dans un travail d'abstraction rendu possible suite à la simplification, la schématisation et la dépersonnalisation des modèles produits par les groupes et soumis à la discussion lors du débat. Il a une portée didactique importante et constitue un premier pas vers la construction d'une problématisation théorique.** Le travail sur les arguments écrits portant sur les impossibilités de fonctionnement va conduire les élèves, plus tard dans la séquence de 4^{ème} et suite à d'autres sauts abstractifs que nous exposons ci-dessous, aux nécessités qui définissent le concept de magmatisme (nécessité de formation et de remontée du magma).

Cette démarche diffère entièrement de celle adoptée par l'enseignante 1 au cours de la séquence ordinaire de 4^{ème} et qui se limite à la recension des solutions possibles proposées par les élèves. L'équipe de recherche vise, au contraire, à repérer et à avoir une trace écrite, à l'issue du débat, des argumentations portant sur la possibilité et l'impossibilité du fonctionnement des modèles probables. Les séquences forcées de ce travail utilisent les différentes solutions possibles avancées par les élèves pour accéder aux raisons dans une démarche de problématisation théorique. Elles ne visent pas l'identification des solutions pour elles-mêmes comme c'est le cas lors la séquence ordinaire.

Deuxième intervention enseignante et introduction de sauts abstractifs

Le groupe de recherche sélectionne, parmi les raisons individuelles des élèves (72 raisons produites en classe de 4^{ème}) relatives aux trois caricatures, neuf raisons de non fonctionnement. Celles-ci sont décontextualisées et dépersonnalisées c'est-à-dire séparées de la caricature à

laquelle elles font référence et de leurs auteurs puis soumises aux élèves pour classement. La dépersonnalisation est relative, dans le cas présent, aux raisons de non fonctionnement et non aux modèles explicatifs de groupe comme précédemment. Les élèves classent ces raisons en deux catégories et repèrent, suite à la désignation de titres aux catégories obtenues, les raisons principales de non fonctionnement des volcans (figure 60). **Ceci constitue un deuxième saut épistémique et langagier permettant d'avancer et de progresser dans le travail d'abstraction et de généralisation du problème posé. Ce saut marque le passage des éléments de discours argumentatifs à des catégories d'argumentation.** Par rapport à la première intervention, l'équipe de recherche fait passer les élèves d'un travail sur les modèles explicatifs possibles à un autre sur les raisons portant sur les modèles et d'une production d'arguments à un travail sur les arguments fournis. Cela se démarque de la séquence ordinaire de 4^{ème} où l'étape suivant le débat consistait à valider et invalider les solutions possibles proposées auparavant par les élèves grâce à des arguments repérés à partir des supports documentaires ou produits oralement. Il s'agissait de trier les solutions alors que la séquence forcée de 4^{ème} envisage un classement des raisons de non fonctionnement aménagées par l'équipe. Les écrits résultants sont des mono-textes raisonnés élaborés individuellement puis collectivement et la catégorisation des raisons de non fonctionnement vise à faire accéder les élèves aux conditions et aux nécessités de fonctionnement par une sorte d'inversion nécessitant une troisième intervention enseignante.

Troisième intervention enseignante et introduction de sauts abstraits

La troisième intervention enseignante consiste à faire passer les élèves des raisons de non fonctionnement aux conditions qui font que cela pourrait fonctionner par l'introduction d'un tableau désignant ces conditions. Cette introduction ne procède en aucune sélection. Elle est réalisée par l'enseignante mais repose sur le classement des arguments opposés au fonctionnement effectué et sur les titres donnés aux catégories par les élèves (figure 60). L'inversion effectuée par l'enseignante conduit, lors de cette dernière étape, aux nécessités visées par les objectifs d'apprentissage de la séquence forcée et l'espace des contraintes envisageable en classe de 4^{ème} (figure 32, p. 179). Cela correspond à un troisième palier abstraitif permettant de produire – contrairement aux étapes précédentes de la séquence forcée de 4^{ème} – un tableau décontextualisé, général, intégrant les raisons et capable d'être compris indépendamment des activités antérieures (figure 40, p. 190). Les solutions qui réalisent les raisons seront repérées suite à l'étude de la documentation scientifique conçue par l'équipe. Ce sont effectivement les

pratiques conduisant vers un texte de savoir institutionnalisé ayant une formulation générale mais rendant compte, en même temps, des nécessités discutées lors des situations de travail en classe, que nous cherchions à déterminer au début de cette recherche. Rappelons que la problématisation théorique requiert la prise en compte, dans les écrits, des nécessités construites. L'écrit final de la séquence forcée de 4^{ème} est un mono-texte problématisé qui intègre les deux nécessités, celles de la formation et de la remontée du magma, accompagnées des solutions qui les réalisent. Cependant, il s'avère que cet écrit final construit (figure 41, p.190) ne rend pas compte des contraintes empiriques figurant d'une manière explicite dans les espaces des contraintes définis *a priori*. Le travail mené avec une focalisation sur les nécessités et les solutions mettrait de côté les contraintes empiriques (fusion contrôlée par la température et la pression, l'intérieur du globe est solide, les matériaux volcaniques sont libérés lors des éruptions, figure 32, p.179) dont l'importance demeure notable dans la construction des nécessités. Sous quelles conditions et avec quelles pratiques la production d'un texte final combinant les contraintes empiriques et théoriques et les solutions serait-elle possible ? La réponse à cette question demande une poursuite des réflexions et une mise en place, au sein d'une équipe de recherche, d'une autre séquence forcée.

Nous constatons que **la mise en texte problématisé fait appel à l'introduction de plusieurs niveaux d'abstraction et à la production de sauts épistémiques et langagiers permettant aux élèves d'aller des idées aux raisons**. Ces sauts sont dus à des interventions importantes de l'enseignant et sont occasionnés par un travail, dans une logique de problématisation, sur les productions de classe élaborées par les élèves (figure 60). La tenue de la dimension apodictique des savoirs nécessite la production de ces sauts pour maintenir le processus de problématisation et en garder une trace dans les textes de savoirs construits. Ainsi, plusieurs niveaux de textes ont été introduits par le groupe de recherche. Contrairement aux pratiques ordinaires de mise en texte, ce n'est pas la bonne solution au problème qui est recherchée mais plutôt les conditions de possibilités des solutions. Les élèves produisent des explications, des arguments sur les caricatures, classent les raisons de non fonctionnement, désignent celles qui font que cela ne peut pas fonctionner et cherchent dans les documents les solutions qui permettent de réaliser les raisons. De cette façon, ils passent des idées communes, de leurs opinions à des savoirs problématisés ayant une part d'apodicticité. Les techniques de mise en texte problématisés ont permis d'avancer vers la construction des raisons dont les traces sont gardées dans le texte final. En revanche, nous nous sommes aperçus que ces techniques ne rendent pas suffisamment

compte des contraintes empiriques conduisant vers les nécessités. La figure 60 ci-dessous résume les techniques enseignantes de mise en texte mobilisées dans une logique de problématisation.

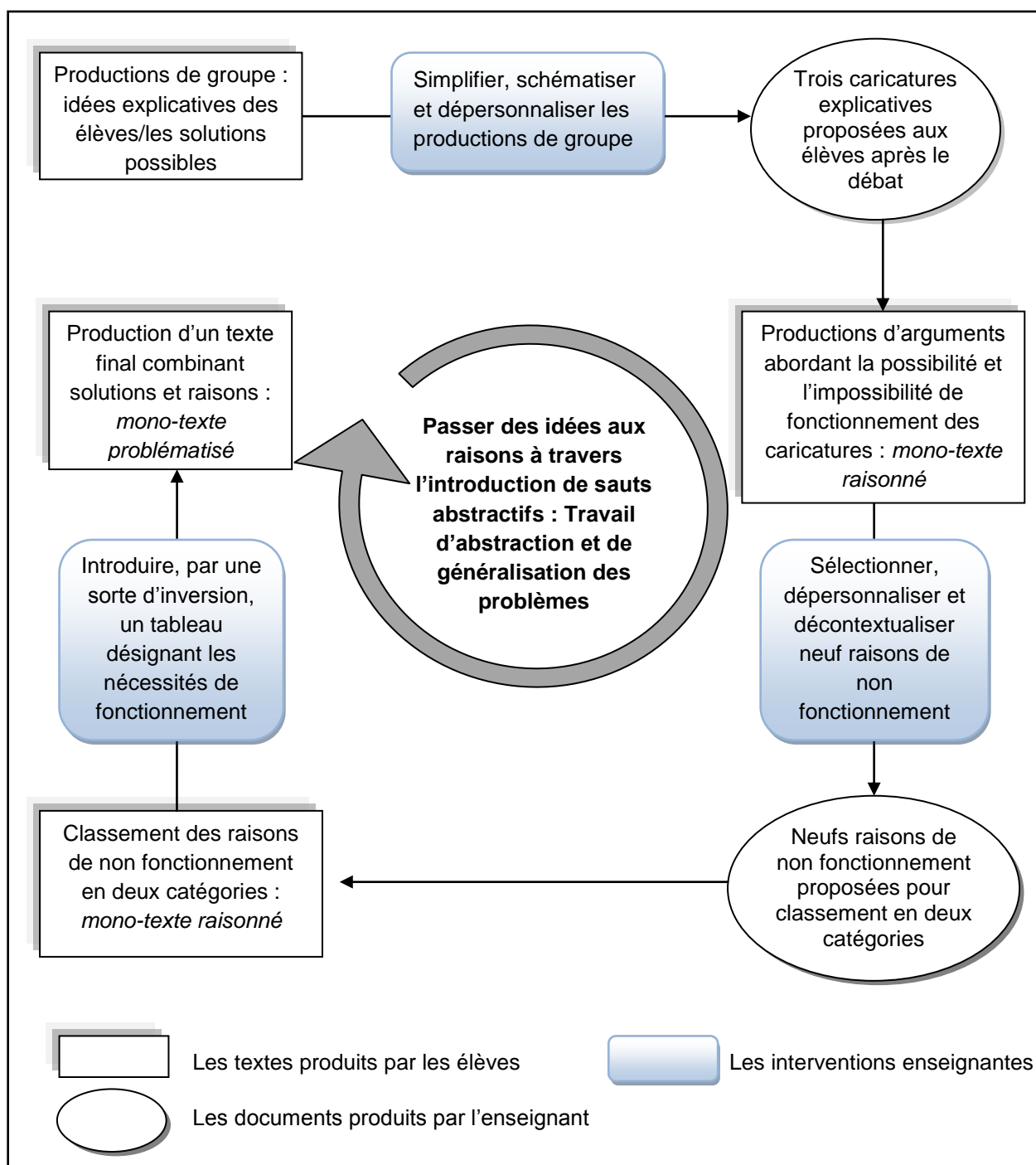


Figure 60. Les techniques enseignantes de mise en texte mobilisées dans une logique de problématisation.

Par ailleurs, le travail d'abstraction, recherché par le groupe de recherche, aide-t-il les élèves à problématiser ou laisse-t-il l'enseignant, par les diverses interventions opérées, faire l'essentiel

de ce travail à la place des élèves ? Afin d'apporter des éléments de réponse à cette question nous nous appuyons sur le modèle d'« inducteur de problématisation ».

2.1.2 Induire et accompagner le travail de problématisation

Le modèle théorique d'« inducteur de problématisation » a été récemment introduit par Fabre & Musquer (2009 a et b). Ces auteurs définissent l'inducteur de problématisation comme « *un élément du milieu pédagogique ou didactique visant à aider le sujet à problématiser* » (Musquer & Fabre, 2010, p.2). Ils notent que l'une des difficultés propres à l'accompagnement de la problématisation « *est de savoir comment aider l'élève à problématiser sans le faire à sa place* » (ibid.). C'est ce qui les a poussés à étudier les aides spécifiques à la problématisation, les inducteurs de ce processus. Nous nous sommes demandés si les techniques de mise en texte introduites par le groupe de recherche lors des séquences forcées ont vraiment guidé le travail de problématisation ou si elles ont laissé à l'enseignant la charge de ce processus. Lorsque nous avons analysé l'activité des élèves pendant les séquences forcées de cette recherche, nous avons constaté que ceux-ci ont bien intégré les sauts abstractifs proposés par l'équipe de recherche. Effectivement, en 4^{ème} et en Terminale S, les élèves se sont retrouvés dans les caricatures proposées (schémas et résumés des modèles explicatifs) et ont produits des arguments « pour » et « contre » inspirés des discussions menées lors des débats. En 4^{ème}, le classement des neuf raisons sélectionnées par le groupe de recherche a été réalisé et pris en charge par les élèves qui ont accédé aux raisons principales marquant l'impossibilité de fonctionnement des volcans. De plus, l'introduction de l'ébauche du texte de savoir par l'enseignante, en se basant sur le classement des raisons effectué au préalable, a été comprise par les élèves et a fait sens pour eux. Ils ont complété ce tableau et ont cherché les solutions réalisant les nécessités repérées à travers l'exploitation de la documentation scientifique. Ainsi, nous pouvons constater que les sauts abstractifs proposés par l'équipe ont été compris par les élèves qui se sont engagés mentalement dans le travail qui leur a été proposé. Il semble donc que **les techniques de mise en texte élaborées par l'équipe de recherche constituent une aide didactique à la mise en texte problématisé et contribuent à l'induction de ce processus**. La mise en œuvre de ce dernier ne paraît pas si évidente et rencontre de nombreuses difficultés comme celles pointées suite à l'analyse de la séquence ordinaire de 4^{ème}. Rappelons que la construction des problèmes n'a pas été induite en raison de la prédominance de la logique de repérage et de tri des solutions. D'où la nécessité de recourir à des inducteurs de problématisation et de mettre en place certaines techniques de mise en texte pour dépasser ces difficultés. Ces techniques se sont basées sur les

activités langagières écrites et orales des élèves pour s'orienter vers une mise en texte problématisée. Nous faisons le point, dans ce qui suit, sur le rôle de ces activités dans la mise en texte des savoirs dans le domaine du magmatisme.

2.2 Rôle des activités langagières dans la mise en texte des savoirs

Lorsque nous avons présenté nos appuis théoriques (chapitre 1), nous avons insisté sur l'importance et le rôle des activités langagières orales et écrites dans les apprentissages scientifiques et dans le processus de problématisation. Etant donné leur rôle dans l'activité des chercheurs, les recherches didactiques soulignent la nécessité de leur transposition en classe de sciences (Jaubert & Rebière, 2000, 2001 ; Jaubert, 2007). La perspective socio-historique, au sein de laquelle s'inscrit notre recherche, voit dans « *le langage un outil de conceptualisation* » (Jaubert & Rebière, 2002, p.163). Les synopsis des séquences que nous avons construits, nous ont permis de déterminer leurs caractéristiques principales et d'en effectuer une analyse globale. Ces synopsis ont révélé une variété dans les activités langagières orales et écrites (discussions, débat, texte, schéma, écrits initiaux, intermédiaires et finaux). Le rôle de ces activités a été élucidé dans les analyses suivant l'élaboration des synopsis. Pour la séquence ordinaire de 4^{ème}, les analyses ont montré que les diverses productions langagières ont été utilisées au service du repérage et du tri des solutions. Les « écrits de travail » ont constitué un bon moyen pour arriver à la bonne solution des problèmes. Tandis que les séquences forcées se sont appuyées sur les activités langagières dans l'objectif de conduire une mise en texte problématisé axée sur la construction des raisons. Ainsi, nous constatons que le rôle de ces activités dans la construction des savoirs scientifiques et la problématisation pourrait être détourné lorsque la logique de mise en texte de l'enseignant se centre sur le repérage et de tri des solutions ce qui favorise plutôt une mise en texte propositionnelle. Inversement, quand ces activités sont utilisées dans une logique de problématisation, elles sont mises au service de la construction des savoirs problématisés et y contribuent fortement. Rappelons que la problématisation scientifique est inextricablement liée à la verbalisation et au travail langagier (Orange, 2005) et que les échanges, les discussions, les écrits produits représentent une condition de possibilité des savoirs scientifiques problématisés (Orange & al., 2001). Il est alors nécessaire que la centration des enseignants sur le repérage et le tri des solutions soit dépassée pour que la problématisation soit privilégiée et qu'elle puisse profiter de l'apport des activités langagières dans les situations d'enseignement-apprentissage scolaires. Par ailleurs, nous notons que l'étude menée concernant les difficultés et les conditions

de possibilités d'une mise en texte problématisée a bénéficié de l'apport de la méthodologie basée sur les séquences ordinaires et forcées.

2.3 Apports des méthodes des séquences ordinaires et forcées dans la compréhension des difficultés et des conditions de possibilités de la mise en texte problématisé

Au cours de cette recherche, nos choix méthodologiques ont porté sur la conception et l'analyse des situations forcées en plus des situations ordinaires puisque l'étude de ces dernières apparaît insuffisante pour construire de nouveaux phénomènes didactiques (Orange, 2010). Les séquences forcées visent, à travers la création de ces phénomènes didactiques, une meilleure compréhension des apprentissages scolaires, de leurs conditions de possibilités chez les élèves et cherchent à développer des cadres théoriques bien déterminé (ibid.). Nous avons pu identifier grâce à l'étude de la séquence ordinaire de 4^{ème} (chapitre 4) les difficultés qu'affronte la mise en texte problématisé des savoirs dans le domaine du magmatisme. Ces difficultés semblent, comme nous l'avons déjà montré, liées à une logique de repérage et de tri des solutions possibles au problème explicatif posé pour accéder à la bonne solution. Se contenter de ce niveau d'analyse priverait l'étude des apprentissages scientifiques d'approfondissements et d'apports supplémentaires. La mise en place et l'étude des séquences forcées (chapitre 5 et 6) nous a permis de construire de nouveaux phénomènes et de déterminer les conditions de possibilités d'une mise en texte raisonnée des savoirs dans le domaine du magmatisme. Les techniques de mise en texte se sont basées sur un travail d'abstraction et de généralisation à travers la production de sauts épistémiques et langagiers et de nouveaux ostensifs de travail à partir des textes des élèves. Ces procédés didactiques ont déjà été utilisés dans la construction d'une autre séquence forcée portant sur le mouvement du bras (Orange & Orange Ravachol, 2007). Nous avons, dans cette recherche, étudié leur réutilisation dans le domaine du magmatisme et analysé en plus l'activité des élèves en réponse aux sauts introduits par l'équipe de recherche. La méthode des séquences forcées semble donc produire de nouveaux phénomènes didactiques qui peuvent servir dans d'autres situations et qui sont contrôlés par un cadre théorique particulier. Nous avons empruntés à ces recherches l'idée de travail sur des caricatures, de sauts épistémolangagiers et de construction d'un écrit final sous forme d'un tableau combinant les raisons aux solutions. Par ailleurs, les phénomènes didactiques construits lors des séquences forcées de notre recherche ne l'ont pas été *a priori*. La séquence a été pensée au fur et à mesure en fonction des productions des élèves. Les situations forcées sont venues compléter les analyses des situations

ordinaires. Ainsi, elles offrent aux recherches didactiques de nouveaux moyens permettant une meilleure compréhension du processus d'enseignement apprentissage.

3. Conclusion

Ce sont les difficultés et les conditions didactiques d'accès à des savoirs et à une mise en texte problématisé dans le domaine du magmatisme qui nous ont préoccupés le long de cette recherche. La conception d'une mise en texte problématisé semble difficile en raison des techniques enseignantes mobilisées dans une logique fondée sur le repérage et de tri des solutions dans le but d'accéder à la bonne solution. Or les savoirs construits ne peuvent aucunement se restreindre à la solution finale escomptée et il est nécessaire d'y intégrer les raisons. Cette intégration paraît possible grâce à des techniques de mise en texte basées sur l'introduction d'une série de sauts abstraits facilitant le passage des idées des élèves aux raisons qui sous-tendent les solutions aux problèmes posés. Le travail d'abstraction favorise l'engagement de la classe dans une problématisation théorique qui conserve les traces des arguments développés. Ainsi, l'application d'une démarche de mise en texte problématisante gardant une part d'apodicticité des savoirs semble complexe et difficile à mettre en œuvre ordinairement par les enseignants. Elle exige une modification de leurs conceptions épistémologiques et didactiques et un dépassement de la « forme scolaire » des savoirs scientifiques privilégiée par l'école qui valorise surtout les faits et les énoncés au dépend des raisons sous-jacentes aux solutions.

Conclusion générale

Cette recherche avait pour objectif principal d'étudier les difficultés et les conditions didactiques d'accès à des savoirs et à textes problématisés à travers l'analyse de la mise en texte des savoirs et des pratiques enseignantes en œuvre dans une séquence ordinaire (4^{ème}) et deux séquences forcées (4^{ème} et Terminale S) concernant le domaine du magmatisme. Quelles sont les apports spécifiques des investigations menées au cours de ce travail ? Quelles en sont les limites ? Et quels prolongements cette étude permet-elle de concevoir ? Nous tenterons, dans cette conclusion générale, de répondre à ces questions de façon synthétique.

1. Apports de notre recherche

Tout d'abord, les apports de cette recherche concernent l'épistémologie du concept de magmatisme qui a été étudiée du point de vue du cadre théorique de la problématisation. Nous nous sommes effectivement basés sur les « espaces des contraintes » pour reconstituer les différentes problématisations derrière les multiples explications magmatiques soutenues dans l'histoire et de nos jours. Cette étude a servi de repères pour l'analyse des modèles spontanés des élèves et des problématisations qu'ils développent. Ensuite, nous avons pu avancer, à travers ce travail, dans la compréhension du processus de mise en texte et des pratiques enseignantes en jeu. Notre focalisation a porté sur l'intégralité des séquences d'enseignement-apprentissage dans le domaine du magmatisme et non sur des phases ciblées de l'activité scolaire comme les débats scientifiques qui demeurent bien évidemment des moments importants pour construire les savoirs. Cela nous a assuré un meilleur suivi du processus de mise en texte et de problématisation. Les outils que nous avons empruntés à la théorie anthropologique du didactique de Chevallard (1992, 1996, 1997, 1998) et à la didactique professionnelle (Pastré, Mayen & Vergnaud, 2006 ; Pastré, 2007) nous ont été d'une grande utilité pour décrire les pratiques de mise en texte enseignantes et mieux comprendre comment les textes ont été construits pendant les séquences étudiées. Le recours à ces deux cadres théoriques, inhabituels en didactique des sciences de la Terre, représente également une condition de possibilité d'une approche comparatiste en didactique des disciplines. Cette approche occupe actuellement plusieurs recherches en sciences de l'éducation (Les Dossiers des Sciences de l'Education, 2008 ; Bisault & Berzin, 2009 ; Orange, 2007d). En s'appuyant sur ces outils, nous avons développé une méthode d'analyse des pratiques enseignantes de mise en texte des savoirs qui tient compte de l'interaction entre la mise en texte orale et écrite. La méthodologie mobilisée a

permis d'obtenir des résultats qui mettent en exergue les techniques de mise en texte et de comparer celles ordinaires à celles prenant en considération le caractère apodictique des savoirs. Les résultats obtenus permettent de progresser dans la compréhension des liens entre la problématisation, les apprentissages scolaires, la mise en texte des savoirs et les pratiques enseignantes. Ils montrent que le processus de mise en texte problématisé est complexe et difficile à mettre en œuvre. Précisément, les difficultés semblent liées à des techniques enseignantes centrées sur le repérage et le tri des solutions dans le but d'accéder à la bonne solution au problème étudié. Les technologies justifiant ces techniques sont marquées par les conceptions épistémologiques et didactiques des enseignants ainsi que par la forme habituelle des savoirs scientifiques scolaires. Par contre, il s'avère que la mise en texte problématisé nécessite la mobilisation de techniques enseignantes spécifiques aboutissant, dans une logique de problématisation, à la production de sauts abstraits faisant passer les élèves des idées aux raisons sous-jacentes aux solutions. La mise en place de ces techniques aboutit à des textes problématisés et non propositionnels et maintient la focalisation sur les raisons au-delà des seuls débats scientifiques.

2. Limites et perspectives de notre recherche

Les principales limites de notre travail sont en lien avec le travail de recherche en situation réelle de classe dont les contraintes ont pesé sur cette étude. En classe de Terminale S, la séquence « forcée » (chapitre 6) n'a pas pu être menée à terme vu l'indisponibilité des enseignantes mais aussi des chercheurs à certains moments et la prégnance des contraintes de temps inhérentes à la préparation du baccalauréat. De plus, une partie non négligeable des discussions de travail ont eu lieu par courrier électronique étant donné l'impossibilité de la mise en place de réunions régulières. Ces contraintes ont rendu difficile le fonctionnement complet en séquence forcée et la poursuite de la construction de la séquence travaillée. Certains problèmes techniques ont également empêché la réalisation de l'entretien d'autoconfrontation avec l'enseignante de Terminale S. Même si le travail n'a pas été mené jusqu'au bout avec la production d'un texte final qui garderait les traces de la problématisation, l'analyse de la phase « forcée » de la séquence de Terminale S apporte malgré tout des éléments de réponse à nos questionnements de recherche. Ces limites ne remettent pas pour autant en question les résultats de ce travail qui cherche surtout à comprendre le fonctionnement du processus de mise en texte.

La réflexion entamée dans ce travail nécessite d'être prolongée et poursuivie avec des recherches ultérieures dans des domaines en sciences de la vie et de la Terre. En classe de 4^{ème}, nous

estimons qu'il est nécessaire d'envisager la construction d'une séquence forcée abordant l'explication du fonctionnement des phénomènes volcaniques en relation avec la théorie de la tectonique des plaques. Cette articulation serait intéressante à mettre en place afin d'étudier, dans un cadre tectonique, la mise en texte problématisée des élèves de 4^{ème} concernant le problème du fonctionnement des volcans. En outre, nous avons repris, lors de l'élaboration de nos séquences forcées, des procédés didactiques (caricatures, classement des raisons, texte final sous forme d'un tableau) introduits par des recherches étudiant le problème du fonctionnement du mouvement des bras en sciences de la vie (Orange & Orange Ravachol, 2007). Ces mêmes procédés ont visiblement induit la mise en texte problématisé de problèmes fonctionnalistes liés au magmatisme en sciences de la Terre. Mais le passage par ces procédés est-il exclusif et obligatoire? N'y-a-t-il pas d'autres moyens permettant de garder les traces de la problématisation et de construire des savoirs et des textes problématisés? Les procédés didactiques identifiés induiraient-ils la mise en texte problématisé de problèmes concernant la géologie historique ? Autant de questions qui ouvrent la voie vers le développement et la poursuite de cette recherche dans le but d'étudier ces différentes dimensions.

Bibliographie

- ALLEGRE, C. (1983). *L'écume de la Terre*, Paris : Fayard.
- ALLEGRE, C. (1985/1996). *De la pierre à l'étoile*, Paris : Fayard.
- ALLEGRE, C. (1987). *Les fureurs de la Terre*, Paris : O/ Jacob.
- ALTET, M. (1994). *La formation professionnelle des enseignants*, Paris, P.U.F.
- ALTET, M. (2002). « Une démarche de recherche sur la pratique enseignante : l'analyse plurielle », *Revue Française de Pédagogie*, N°138, pp. 85-93.
- ANDERSON, D.L. (1962). « The plastic layer of the earth's mantle », *Scientific American*, vol.207, N°1, pp.202-210, juillet 1962.
- ARTIGUE, M. (1990). « Ingénierie didactique », *Recherches en didactique des mathématiques*, vol.9/3, pp. 281-308, Grenoble, La pensée Sauvage éditions 1988.
- ARTIGUE, M. (2002). « Ingénierie didactique : quel rôle dans la recherche didactique aujourd'hui ? », *Les Dossiers des Sciences de l'Education*, N°8, pp. 59-72.
- ASTOLFI, J.-P., GIORDAN, A., GOHAU, G., HOST, V., MARTINAND, J.-L., RUMELHARD, G., ZADOUNAÏSKI, G. (1978). *Quelle éducation scientifique pour quelle société ?* Paris : PUF.
- ASTOLFI, J.-P. (1992). *L'école pour apprendre*, Paris, ESF.
- ASTOLFI, J.-P. (1993). « Trois paradigmes de recherches en didactique », *Revue française de pédagogie*, N°103, pp. 5-18.
- ASTOLFI, J.-P., PETERFALVI, B. (1993). « Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales », *ASTER*, N° 16, pp.103-149.
- ASTOLFI, J.-P., PETERFALVI, B. (1997). « Stratégies de travail des obstacles : dispositifs et ressorts », *ASTER*, N° 25, pp. 193-216.
- ASTOLFI, J.-P. (2005a). « Problèmes scientifiques et pratiques de formation ». In Maulini, O. et Montandon, C. *Les formes de l'éducation : variété et variations*, Raisons éducatives, Bruxelles : De Boeck.
- ASTOLFI, J.-P. (2005b). « Ecrire, c'est former et transformer sa pensée », In *Ecrire et réécrire dans toutes les disciplines*, pp. 9-14, CRAP-Cahiers pédagogiques, CRDP de l'académie d'Amiens.
- ASTOLFI, J.-P. (2008). *La saveur des savoirs. Disciplines et plaisir d'apprendre*, ESF Editeur.
- BACHELARD, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*, Paris : PUF.
- BACHELARD, G. (1949). *Le rationalisme appliqué*, Paris : PUF.
- BAKTHINE, M. (1984). *Esthétique de la création verbale*, Paris : Gallimard.
- BARREL, J. (1915). « The Strength of the Earth's Crust », *Journal of Geology*, vol.23, pp. 27-44, 425-443.

- BEORCHIA, F. (2003). *La communication nerveuse : conceptions des apprenants et problématisation. Importance des explications mécanistes et vitalistes*, thèse de doctorat, université de Nantes.
- BERNIÉ, J.-P. (2002). « L'approche des pratiques langagières scolaires à travers la notion de 'communauté discursive' : un apport à la didactique comparée ? », *Revue française de pédagogie*, N° 141, pp.77-88.
- BERTRAND, A. (1845). *Lettres sur les révolutions du globe*, Paris, J. Tessier.
- BISAULT, J. (2009). « Les activités langagières des chercheurs: une référence pour les activités de classe », In Schneeberger, P., Vérin, A. (dir.). *Développer des pratiques d'oral et d'écrit en sciences. Quels enjeux pour les apprentissages à l'école*, pp. 29-36, INRP.
- BISAULT, J., BERZIN, C. (2009). « Analyse didactique de l'activité des élèves en sciences à l'école primaire », *Education et didactique*, N°2, vol.3, pp.77-99. Disponible sur : <http://educationdidactique.revues.org/510>, consulté le 10/11/2011.
- BOSCH, M., CHEVALLARD, Y. (1999). « La sensibilité de l'activité mathématique aux ostensifs », *Recherches en Didactique des Mathématiques*, N°19, pp.77-124.
- BRONCKART, J.-P. (1996). *Activités langagières, textes et discours*, Paris : Delachaux et Niestlé.
- BROSSARD, M. (1998). « Approche socio-historique des situations d'apprentissage de l'écrit », In Brossard, M., Fijalkow, J. (éds.). *Apprendre à l'école : perspectives piagétienne et vygotkiennes*, pp.37-50, Pessac: Presses universitaires de Bordeaux.
- BUFFON (1749). *Histoire naturelle, générale et particulière, avec la description du cabinet du Roy*. Disponible sur : http://www.buffon.cnrs.fr/ice/ice_book_detail-fr-text-buffon-buffon_hn-1-1.html#, consulté le 16/09/2011.
- BUFFON (1778). *Histoire naturelle, générale et particulière, supplément, Tome cinquième*, Disponible sur : http://www.buffon.cnrs.fr/ice/ice_book_detail.php?lang=fr&type=text&bdd=buffon&table=buffon_hn&bookId=34&typeofbookId=7&num=0, consulté le 21/11/2011.
- CALMETTES, B. (2011). « Analyse pragmatique de pratiques ordinaires, rapport pragmatique à l'enseigner : étude de cas : des enseignants experts, en démarche d'investigation en physique », *Recherches en didactiques des sciences et des technologies*, N°2, pp. 235-272. INRP.
- CANGHUILHEM, G. (1955). *La formation du concept de réflexe au XVII^e et au XVIII^e siècle*, Paris : Vrin.
- CANGHUILHEM, G. (1988). *Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*, Paris : Vrin.
- CHABANNE, J-C., BUCHETON, D. (2000). « Les écrits "intermédiaires" », *La Lettre de la DFLM*, N°26, pp. 23-27.
- CHABANNE, J-C., BUCHETON, D. (2002). « L'activité réflexive dans les écrits intermédiaires : quels indicateurs ? », In Chabanne J-C., Bucheton D. *Parler et écrire pour penser, apprendre et se construire : L'écrit et l'oral réflexif*, pp. 25-51, Paris : PUF.

- CHALAK, H. (2008). *L'enseignement des Sciences de la Terre dans les collèges homologués et conventionnés libanais : enjeux et obstacles*, mémoire de Master, université Saint-Joseph.
- CHALAK, H., EL HAGE, F. (2011). « L'enseignement des sciences de la Terre au Liban : enjeux, obstacles et orientations professionnelles », *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, N°3, pp. 209-240, INRP.
- CHEVALLARD, Y. (1991). *La transposition didactique : du savoir savant au savoir enseigné*, La pensée sauvage.
- CHEVALLARD, Y. (1992). « Concepts fondamentaux de la didactique : perspective apportée par une approche anthropologique », *Recherches en Didactique des Mathématiques*, N°12, pp.73-112.
- CHEVALLARD, Y. (1996). « La fonction professorale : esquisse d'un modèle didactique », In *Actes de la VIIIe Ecole d'été de didactique des mathématiques*, pp. 83-122, Clermont-Ferrand : IREM de Clermont-Ferrand.
- CHEVALLARD, Y. (1997). « Familiale et problématique, la figure du professeur », *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol. 17/3, pp. 17-54.
- CHEVALLARD, Y. (1998). « Analyse des pratiques enseignantes et didactique des mathématiques : l'approche anthropologique », *Actes de l'Université d'été*, La Rochelle juillet 1998.
- CLOT, Y. (1999). *La fonction psychologique du travail*, Paris : PUF.
- CLOT, Y., FAÏTA, D. (2000). « Genre et style en analyse du travail. Concepts et méthodes », *Travailler*, N°6, pp.7-42.
- COQUIDE, M. (1998). « Les pratiques expérimentales : propos d'enseignants et conceptions officielles », *ASTER*, N°26, pp. 109-132.
- CRÉPIN-OBERT, P. (2010a). *Construction de problèmes et obstacles épistémologiques à propos du concept de fossile : étude épistémologique comparative entre des situations de débat à l'école primaire et au collège et des controverses historiques du XVIIe au XIXe siècle*, thèse de doctorat, université de Nantes.
- CRÉPIN-OBERT, P. (2010b). « Idées et raisons sur les coquilles fossiles : étude épistémologique comparée entre une situation de débat à l'école primaire et une controverse historique », *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, N°1, pp 93-120, INRP.
- DELBOS, G. & JORION, P. (1990). *La transmission des savoirs*, Paris : Éd. De la Maison des sciences de l'Homme.
- DELEUZE, G. (1968). *Différences et répétition*, Paris : PUF.
- DEMOUNEM R., ASTOLFI J.-P. (1996). *Didactique des sciences de la vie et de la Terre*, Paris: Nathan.
- DEPARIS, V., LEGROS, H. (2000). *Voyage à l'intérieur de la Terre. De la géographie antique à la géophysique actuelle. Une histoire des idées*, Paris, CNRS Editions.
- DESAUTELS, J., LAROCHELLE, M. (1992). *Autour de l'idée de science*, université de Laval et Bruxelles : De Boeck.

- DESGAGNÉ, S. (1997). « Le concept de recherche collaborative : l'idée d'un rapprochement entre chercheurs universitaires et praticiens enseignants », *Revue des sciences de l'éducation*, Vol. 23, N°2, pp. 371-393.
- DESGAGNÉ, S., BEDNARZ, N., COUTURE, C., POIRIER, L., LEBUIS, P. (2001). « L'approche collaborative de recherche en éducation : un nouveau rapport à établir entre recherche et formation », *Revue des sciences de l'éducation*, N°27(1), pp.33-64.
- DEVALAY, M. (2004). *De l'apprentissage à l'enseignement*, Paris : ESF.
- DEWEY, J. (1967/1993). *Logique, La théorie de l'enquête*, Paris : PUF.
- DRIVER, R., LEACH, J., SCOTT, P., MILLAR, R. (1996). *Young People's Images of Science*, Buckingham, Open University Press.
- DRIVER R., NEWTON P., OSBORNE J. (2000). « Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms », *Science Education*, N° 84, pp. 287-312.
- DUCANCEL, G., BOULAIN, J-C., DUCANCEL, F. (1995). « Les pratiques de communication scientifique : une référence pour les formateurs de maîtres ? », *Repères*, N°12, pp. 53-77.
- ELLENBERGER, F. (1988). *Histoire de la géologie, Tome 1*, Paris: Technique et Documentation (Lavoisier).
- ELLENBERGER, F. (1994). *Histoire de la géologie, Tome 2*, Paris: Technique et Documentation (Lavoisier).
- EL HAGE, F. (2005). *Le morcellement des connaissances en physiologie du constat à la remédiation*, thèse de doctorat, université Montpellier II et université Saint-Joseph.
- FABRE, M., ORANGE, C. (1997). « Construction des problèmes et franchissements d'obstacles », *ASTER*, N°24, pp.37-57, INRP.
- FABRE, M. (1999). *Situations-problèmes et savoir scolaire*, Paris : PUF.
- FABRE, M. (2007). « Des savoirs scolaires sans problèmes et sans enjeux. La faute à qui ? », *Revue française de pédagogie*, N°161, pp. 69-78.
- FABRE, M. (2008). « Les différents modèles théoriques de la problématisation en philosophie (Dewey, Bachelard, Deleuze, Meyer) », *Côté-Philo*, N°11, pp.23-38.
- FABRE, M. (2009). *Philosophie et pédagogie du problème*, Paris : Jean Vrin.
- FABRE, M., MUSQUER, A. (2009a). « Comment aider l'élève à problématiser ? Les inducteurs de problématisation », *Les Sciences de l'éducation – Pour l'Ere nouvelle*, Vol.42, N°3, pp.111-128.
- FABRE, M., MUSQUER, A. (2009b). « Vers un répertoire d'indicateurs de problématisation, analyse d'une banque de situations problèmes », *Spirale-E, Revue de Recherches et Education*, supplément électronique au N°43. Disponible sur : http://spirale-edu-revue.fr/IMG/pdf/Fabre_et_Musquer_Spiral-E_2009.pdf, consulté le 21/11/2011.
- FABRE, M. (2011). *Eduquer pour un monde problématique. La carte et la boussole*, Paris : PUF.

- FILLON, P., ORANGE, C., PETERFALVI, B., REBIERE, M., SCHNEEBERGER, P. (2004). « Argumentation et construction de connaissances en sciences », In Douaire, J. (éd.). *Argumentation et disciplines scolaires*, pp. 203-247, Paris, INRP.
- FLEURY, B., FABRE, M. (2005). « Psychanalyse de la connaissance et problématisation des pratiques pédagogiques. La longue marche vers le processus 'apprendre' », *Recherche et formation*, N°48, pp. 75-90.
- FOUCAULT, A., ROUALT, J.-F. (2010). *Dictionnaire de géologie*, Ed. Dunod.
- GODIN, C. (2002). *La totalité réalisée : les sciences*, Ed. Champ Vallon.
- GOHAU, G. (1987). *Une histoire de la géologie*, Paris: Editions du Seuil, Points Sciences (réédition de 1990).
- GOHAU G. (1990). *Les sciences de la Terre au XVII^e et XVIII^e siècles, Naissance de la géologie*, Paris: Editions Albin Michel.
- GOHAU, G. (1997). « Naissance de la méthode "actualiste" en géologie ». In Gohau, G. *De la géologie à son histoire*, CTHS, pp. 139-149.
- GOIGOUX, R. (2007). « Un modèle d'analyse de l'activité des enseignants », *Éducation et didactique*, vol 1, N°3, pp.47-69. Disponible sur : <http://educationdidactique.revues.org/232>, consulté le 06/09/2011.
- GOIX, H. (1995). « Vous avez dit : cristal ? Je pense : verre », *ASTER*, N°20, pp. 105-137.
- GOIX, H. (1996). *Difficultés d'apprentissage des concepts de cristal et de magmatisme chez les élèves de collège : aspects historiques et didactiques*, thèse de doctorat, université de Paris VII.
- GOODY, J. (1979). *La raison graphique*, Paris : Éd. de Minuit.
- GOODY, J. (2007). *Pouvoirs et savoirs de l'écrit*, Paris : Éd. La Dispute.
- GOULD, S.J. (1990). *Aux racines du temps*, Paris: Grasset. (1987).
- GRIZE, J.-B. (1992). « Sur la nature du discours scientifique d'information », *ASTER*, N°14, pp. 41-52.
- HALLAM, A. (1976). *Une révolution dans les sciences de la Terre. De la dérive des continents à la tectonique des plaques*, Editions du Seuil.
- HALLAM, A. (1989). *Great geological controversies*, Oxford science publications.
- HATEM, R. (2005). *Ecrire et réécrire dans toutes les disciplines*, CRAP-Cahiers pédagogiques, CRDP de l'académie d'Amiens.
- HUTTON, J. (1795). *Theory of the earth. Investigation into Laws observable in the Composition, Dissolution, and Restoration of Land upon the Globe*, Forgotten Books.
- JAUBERT, M. (2000). *Fonctions et fonctionnement du langage dans la construction des savoirs scientifiques : Hétéroglossie et contextes d'apprentissage scolaire*, thèse de doctorat, université Victor-Ségalen-Bordeaux 2, Bordeaux.
- JAUBERT, M. & REBIÈRE, M. (2000). « Observer l'activité langagière des élèves en sciences », *ASTER*, N°33, pp.173-195.

- JAUBERT, M. & REBIÈRE, M. (2001). « Pratiques de reformulation et construction des savoirs », *ASTER*, N°33, pp.81-110.
- JAUBERT, M., REBIÈRE, M. (2002). « Parler et débattre pour apprendre : comment caractériser un 'oral réflexif' ? », In Chabanne J-C., Bucheton D. *Parler et écrire pour penser, apprendre et se construire : L'écrit et l'oral réflexif*, pp. 163-186, Paris : PUF.
- JAUBERT, M. (2007). *Langage et construction de connaissances à l'école*, Pessac : Presses universitaires de Bordeaux.
- JOHNSON, S., DUPIN, J-J. (1989). *Représentations et modélisations : le "débat scientifique" dans la classe et l'apprentissage de la physique*, Berne : Peter Lang.
- KAHN et REY, B. (2008). « Pratiques d'enseignement, forme scolaire et difficultés des élèves », *Les Dossiers des Sciences de l'Éducation*, N°19, pp.13-25.
- KUHN, T.S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, « champs », (1962).
- LAPERRIERE-TACUSSEL M. (1995). « Le volcanisme au cours moyen à l'IUFM », *ASTER*, N° 20, pp. 61-84.
- LES DOSSIERS DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION (2008). « Analyse de situations didactiques : perspectives comparatistes », N°20, Presses Universitaires du Mirail.
- LATOUR, B. (1989). *La science en action*, Paris : Éd. La Découverte.
- LATOUR B. & WOOLGAR S. (1988). *La vie de laboratoire, la production des faits scientifiques*, Paris : Éd. La Découverte.
- LATOUR, B. (1995). *Le métier de chercheur, regard d'un anthropologue*, Editions INRA.
- LAUDAN, L. (1977). *La dynamique de la science*, Bruxelles, Mardaga.
- LEMKE, J. L. (1990). *Talking Science: Language, Learning and Values*, Norwood, New Jersey, Ablex Publishing Corporation.
- LEVY-LEBLOND, J.-M. (1996). *La Pierre de touche. La science à l'épreuve*, Paris : Gallimard.
- LHOSTE, Y. (2008). *Problématisation, activités langagières et apprentissages dans les sciences de la vie. Etude de débats scientifiques dans la classe dans deux domaines biologiques : nutrition et évolution*, thèse de doctorat, université de Nantes.
- MARTINAND, J-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*, Berne, Peter Lang.
- MAYR, E. (1989). *Histoire de la biologie*, Paris : Editions Fayard.
- MERCIER, A. (2008). « Pour une lecture anthropologique du programme didactique », *Éducation et didactique*, Vol. 2, pp. 7-40. Disponible sur : <http://educationdidactique.revues.org/251>, consulté le 21/11/2011.
- MEUNIER, B. (1995). *Magmatisme et tectonique des plaques*, Ellipses.
- MEYER, M. (1986). *De la problématologie*, Bruxelles : Mardaga.
- MUSQUER, A., FABRE, M. (2010). « Les modèles des inducteurs de problématisation, état des lieux et pistes de recherche », *Actes du congrès de l'Actualité de la recherche en éducation*

et en formation (AREF), université de Genève. Disponible sur : <https://plone2.unige.ch/aref2010/symposiums-courts/coordonateurs-en-f/le-modele-des-inducteurs-de-problematisation/Le%20modele%20des%20inducteurs.pdf>, consulté le 16/09/2011.

- ORANGE, C. (1994). *Intérêt de la modélisation pour la définition de savoirs opérants en biologie géologie; l'exemple de la modélisation compartimentale*, thèse de doctorat de didactique des disciplines, université de Denis-Diderot-Paris 7, Paris.
- ORANGE, C. (1995). « Volcanisme et fonctionnement interne de la Terre : repères didactiques pour un enseignement de l'école élémentaire au lycée », *ASTER*, N°20, pp. 85-103, Paris.
- ORANGE, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie; quels apprentissages pour le lycée?*, Paris, P.U.F. coll. l'Éducateur.
- ORANGE, C., BEORCHIA, F., DUCROCQ, P., ORANGE RAVACHOL, D. (1999). « 'Réal de terrain', 'Réal de laboratoire' et construction des problèmes en sciences de la vie et de la Terre », *ASTER*, N°28, pp.107-129.
- ORANGE, C. (2000). *Idées et raisons: construction de problèmes, débats et apprentissages scientifiques en Sciences de la vie et de la Terre*, mémoire de recherche pour l'H.D.R. université de Nantes.
- ORANGE, C., FOURNEAU, J-C., BOURBIGOT, J-P. (2001). « Ecrits de travail, débats scientifiques et problématisation à l'école élémentaire », *ASTER* N°33, pp.111-133.
- ORANGE, C. (2002). « Apprentissages scientifiques et problématisation », *Les Sciences de l'éducation, pour l'ère nouvelle*, vol. 35, N°1, pp. 25-42.
- ORANGE, C. (2003). « Débat scientifique dans la classe, problématisation et argumentation : le cas d'un débat sur la nutrition au cours moyen », *ASTER*, N°37, pp. 83-107.
- ORANGE, C., ORANGE RAVACHOL, D. (2004). « Les conceptions des élèves et leur mode de raisonnement en sciences de la Terre », *Géochronique*, juin, N°90, pp.29-32.
- ORANGE, C. (2005). « Problématisation et conceptualisation en sciences et dans les apprentissages scientifiques », *Les Sciences de l'éducation, Pour l'ère nouvelle*, N°38, 3, pp.69-93.
- ORANGE, C. (2006). « Problématisation, savoirs et apprentissages en sciences ». In Fabre, M., Vellas, E. (2006). *Situations de formation et problématisation*, Perspectives et éducation et formation, pp. 75-90.
- ORANGE, C. (2007a). « Problèmes, savoirs et problématisations : l'exemple des activités scientifiques », In Durand, M., Fabre, M. *Les situations de formation entre savoirs, problèmes et activités*, pp.191-210, Paris : L'harmattan.
- ORANGE, C. (2007b). « Spécificité de la problématisation scientifique : le travail d'abstraction et de généralisation », *Recherches en éducation*, N°3, pp.8-13. Disponible sur : <http://www.recherches-en-education.net/IMG/pdf/REE-no3.pdf>, consulté le 31/08/2011.
- ORANGE, C. (2007c). « L'apprentissage scientifique ce qui se construit et ce qui se transmet », *Recherches en éducation*, N°4, pp.85-92. Disponible sur : <http://www.recherches-en-education.net/IMG/pdf/REE-no4.pdf>, consulté le 31/08/2011.

- ORANGE, C. (2007d). « Quel Milieu pour l'apprentissage par problématisation en sciences de la vie et de la terre ? », *Education et didactique*, vol 1, N°2, pp. 37-56. Disponible sur Internet : <http://educationdidactique.revues.org/152>, consulté le 10/11/2011.
- ORANGE, C. (2008). « Problématisation en sciences et dans les apprentissages scientifiques », *Côté philo*, pp.39-47. Disponible sur : http://www.acireph.org/Files/cp11_web.pdf, consulté le 16/11/2011.
- ORANGE, C. (2009). « Réel, langages et apprentissages scientifiques », In Schneeberger, P., Vérin, A. (dir.). *Développer des pratiques d'oral et d'écrit en sciences. Quels enjeux pour les apprentissages à l'école*, pp.245-250, INRP.
- ORANGE, C. (2010). « Situations forcées, recherches didactiques et développement du métier d'enseignant », *Recherches en Education*, HS N°2, pp. 73-85. Disponible sur : <http://www.recherches-en-education.net/IMG/pdf/REE-HS-no2.pdf>, consulté le 16/11/2011.
- ORANGE, C., ORANGE RAVACHOL, D. (2007). « Problématisation et mise en texte des savoirs scolaires : le cas d'une séquence sur les mouvements corporels au cycle 3 de l'école élémentaire », In *Actes des 5èmes rencontres scientifiques de l'ARDIST*, La Grande Motte, octobre 2007, pp. 305-312. Disponible sur : <http://ardist.aix-mrs.iufm.fr/wp-content/actes2007>, consulté le 31/08/2011.
- ORANGE RAVACHOL, D. (2003). *Utilisation du temps et explications en Sciences de la Terre par les élèves de lycée : étude de quelques problèmes géologiques*, thèse de Doctorat, université de Nantes.
- ORANGE RAVACHOL, D. (2005). « Problématisation fonctionnaliste et problématisation historique en sciences de la terre chez les chercheurs et chez les lycéens », *ASTER*, N°40, pp.177-204.
- ORANGE RAVACHOL, D. (2010). « Collaboration chercheur didacticien / enseignant et choix de l'enseignant en situation scolaire : une étude de cas en sciences de la Terre », *Recherches en éducation*, hors série N°1, juin 2010, pp. 47-59. Disponible sur : <http://www.recherches-en-education.net>, consulté le 06/09/2011.
- PASTRÉ, P. (2002). « L'analyse du travail en didactique professionnelle », *Revue française de pédagogie*, N°138, pp. 9-17.
- PASTRÉ, P., MAYEN, P., VERGNAUD, G. (2006). « La didactique professionnelle », *Revue Française de Pédagogie*, N°154, pp. 145-198.
- PASTRÉ, P. (2007). « Quelques réflexions sur l'organisation de l'activité enseignante », *Recherche et Formation*, N°56, pp. 81-93.
- PERRET-CLERMONT, A.-N. (1979). *La Construction de l'Intelligence dans l'Interaction Sociale*, Ed. Peter Lang, Genève.
- PETERFALVI, B. (1997a). « Les obstacles et leur prise en compte », *ASTER*, N° 24, pp. 3-11.
- PETERFALVI, B. (1997b). « L'identification d'obstacles par les élèves », *ASTER*, N° 24, pp. 171-202.
- PETERFALVI, B. (2006). « Problématisation et travail sur les obstacles en sciences ». In Fabre, M., Vellas, E. *Situations de formation et problématisation*, Perspectives et éducation et formation, pp. 91-106, Bruxelles : De Boeck.

- POIRIER, J.-P. (1996). *Les profondeurs de la Terre*, 2ème édition, Masson, Paris.
- POPPER, K. (1991). *La connaissance objective*, Paris : Aubier (1972).
- PORLAN ARIZA, R., GARCIA GARCIA, E., RIVERO GARCIA, A., MARTIN DEL POZO, R. (1998). « Les obstacles à la formation professionnelle des professeurs en rapport avec leurs idées sur la science, l'enseignement et l'apprentissage », *ASTER*, N°26, pp. 207-235.
- REBIERE, M., SCHNEEBERGER, P., JAUBERT, P. (2009). « Changer de position énonciative pour construire des objets de savoirs en sciences : le rôle de l'argumentation ». In Plantin, C., Buty C. (dir.). *Argumenter en classe de sciences*, pp. 281-329, Lyon : INRP.
- REBOUL, O. (1992). *Les valeurs de l'éducation*, Paris, P.U.F.
- REY, B. (2002). « Diffusion des savoirs et textualité », *Recherche et formation*. N°40, pp. 43-57.
- REY, B. (2005). « Peut-on enseigner la problématisation ? », *Recherche et Formation*, N°48, pp. 91-105.
- REY, B. (2007). « Pourquoi l'école s'obstine-t-elle à vouloir faire acquérir des savoirs ? », In Durand, M., Fabre, M., Antoine, M., Maulini, O. *Les situations de formations entre savoirs, problèmes et activités*, pp. 171-190, L'harmattan.
- RIX, G., LELIEVRE, P. (2005). « Une mise en perspective de modes d'investigation de l'activité humaine ». *6^{ème} Congrès Européen de Sciences des Systèmes*, Paris, France. Disponible sur : <http://www.afscet.asso.fr/resSystemica/Paris05/rix.pdf>, consulté le 04/06/2011.
- RUMELHARD, G. (1979). « Le processus de dogmatisation », In Giordan, A., Martinand, J.-L. *Actes des Premières journées internationales sur l'éducation scientifique*, université Paris VII et université de Genève.
- ROQUEPLO, P. (1974). *Le partage du savoir*, Paris : Éd. Le Seuil.
- SAVATON, P. (2011). « Histoire des sciences et démarche historique dans l'enseignement des SVT. Quelle histoire de la tectonique des plaques ? », *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, N°3, pp. 107-126, INRP.
- SCHNEEBERGER, P., GOUANELLE, C. (2001). « Participer à une recherche sur les pratiques d'écriture, un levier pour modifier ses pratiques d'enseignement en biologie », *ASTER*, N°32, pp. 147-179.
- SCHNEEBERGER, P. (2008). « Travail langagier et construction des savoirs en sciences », *Les Dossiers des Sciences de l'Education*, N°20, pp. 89-104.
- SENVEVY, G., QUILIO, S. (2002). « Les discours du professeur. Vers une pragmatique didactique », *Revue Française de Pédagogie*, N°141, pp. 47-56.
- SUTTON, C. (1992). *Words, Science and Learning*, Buckingham, Open University Press.
- SUTTON, C. (1995). « Quelques repères sur l'écriture de la science : une vue personnelle d'outre-manche », *Repères*, N°12, pp. 37-52.
- THEUREAU, J. (1992). *Le cours d'action : analyse sémiologique. Essai d'une anthropologie cognitive située*, Berne : Peter Lang.

- THEUREAU, J. (2000). « Anthropologie cognitive et analyse des compétences », In Barbier, J.-M. *L'analyse de la singularité de l'action*, pp.171-211, Paris : PUF.
- THOMAS, P. (2002). « Après la tectonique des plaques », *Pour la science*, N° 300, pp. 88-91.
- TIBERGHIEU, A., MALKOUN, L., BUTY, C., SOUASSY, N., & MORTIMER, E. (2007). « Analyse des savoirs en jeu en classe de physique à différentes échelles de temps ». In Sensevy, G., Mercier, A. (Eds.). *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves*, pp. 93-122, Rennes : PUR.
- VENTURINI, P., CALMETTES, B., AMADE-ESCOT, C., TERRISSE, A. (2007). « Analyse didactique des pratiques d'enseignement de la physique d'une professeure expérimentée », *ASTER*, N°45, pp. 211-233.
- VERGNAUD, G. (1990). « La théorie des champs conceptuels », *Recherches en didactique des mathématiques*, vol.10, N°2-3, pp.133-170
- VERGNAUD, G. (1995). « Quelle théorie pour comprendre les relations entre savoir-faire et savoir ? » In Bentolila A. (dir.). *Savoirs et savoir-faire*, Paris, Nathan, pp. 5-20.
- VERGNAUD, G. (1996). « Au fond de l'action, la conceptualisation ». In Barbier J.M., *Savoirs théoriques et savoirs d'action*, Paris, Presses Universitaires de France, pp. 275-292.
- VÉRIN, A. (1988). « Apprendre à écrire pour apprendre les sciences », *ASTER*, N°6, pp.15-46.
- VÉRIN, A. (1995). « Mettre par écrit des idées pour les faire évoluer en sciences », *Repères*, N°12, pp. 21-23.
- VÉRIN, A. (2003). « Entrer dans la culture scientifique et le langage scientifique », *X.Y. ZEP. Bulletin du centre Alain Savary*, N° 16/17, pp. 8-10.
- VERMERSCH, P. (1994). *L'entretien d'explicitation*, Paris : ESF.
- VERMERSCH, P. (2004). « Prendre en compte la phénoménalité : propositions pour une psycho phénoménologie », *Explicititer*, N°57, pp.35-45.
- VERRET, M. (1975). *Le temps des études*, 2vol., Paris, Librairie Honoré Champion.
- VINATIER, I. (2010). « L'entretien de co-explicitation entre chercheur et enseignants : une voie d'émergence et d'expression du « sujet capable » », *Recherches en éducation*, Hors série N° 1, pp. 111-129. Disponible sur : <http://www.recherches-en-education.net>, consulté le 06/09/2011.
- VYGOTSKI, L.S. (1937/1998). *Pensée et langage*, Paris : Éd. La dispute.
- WEGENER, A. (1929/1990). *La genèse des continents et des océans*, Christian Bourgois éditeur.

Programmes et textes officiels :

- M.E.N. (2000). Le plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école, *B.O.E.N.*, N° 23, juin 2000.
- M.E.N. (2001). Programme de l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre en classe terminale de la série scientifique. *B.O.E.N.* hors série n°5, 30 août 2001. (réédition en 2006).

- M.E.N. (2002). Programme d'enseignement spécifique de sciences de la vie et de la Terre en classe de première de la série scientifique. *B.O.E.N.*, hors série n°6 du 29 août 2002.
- M.E.N. (2007). Programmes de l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre (Collège), *B.O.E.N.*, 1ère édition, août 2007.
- M.E.N. (2008a). Cycles des approfondissements CE2-CM1-CM2, hors-série N°3, 19 juin 2008.
- M.E.N. (2008b). Programmes de l'enseignement de sciences de la vie et de la Terre (Collège), *B.O.E.N.*, N° 6, 28 août 2008.

Titre

Conditions didactiques et difficultés de construction de savoirs problématisés en sciences de la Terre : étude de la mise en texte des savoirs et des pratiques enseignantes dans des séquences ordinaires et forcées concernant le magmatisme (collège et lycée).

Résumé

Notre étude porte sur des textes de savoirs (oraux et écrits) produits lors d'une séquence ordinaire (en classe de 4^{ème}) et de deux séquences « forcées » (en classes de 4^{ème} et de Terminale S) dans le domaine du magmatisme, et sur leurs relations avec les pratiques enseignantes de mise en textes. Elle vise à repérer les difficultés et les conditions didactiques d'accès à des savoirs et à des textes problématisés. Nous nous appuyons à la fois sur des outils empruntés au cadre théorique de la problématisation, à la théorie anthropologique du didactique (TAD) et à la didactique professionnelle pour modéliser et mieux comprendre les pratiques de mise en texte enseignantes. Il apparaît que la mise en texte problématisé présente des difficultés en raison de techniques enseignantes centrées sur le repérage et le tri des solutions dans le but d'identifier la bonne solution au problème posé. Ces techniques semblent justifiées par des technologies marquées par les conceptions épistémologiques et didactiques des enseignants et la forme habituelle des savoirs scientifiques scolaires. Par opposition, la construction des savoirs et des textes problématisés nécessite des interventions enseignantes conduisant à des sauts abstraits permettant de faire passer les élèves des idées aux raisons qui sous-tendent les solutions. Dans une logique de problématisation, nous repérons quelques conditions pour que ces techniques de mise en texte puissent aboutir à la construction de textes problématisés et non propositionnels.

Mots-clés : Problématisation, mise en texte des savoirs, pratique enseignante, recherches collaboratives, magmatisme, didactique des sciences de la Terre.

Title

Didactic conditions and difficulties of construction of problematized knowledge in Earth Sciences: study of knowledge text-working and teaching practices in regular and forced sequences concerning magmatism (middle and high school).

Abstract

Our study focuses on knowledge texts (oral and written) produced in a regular sequence (in fourth grade class) and two “forced” sequences (in eighth and twelfth grade classes) in the magmatism area and their relationship with the drafting teaching practices. It aims to identify challenges and didactic conditions of access to knowledge and problematized texts. We rely on both tools borrowed from the theoretical framework of problematization, the anthropological theory of didactics (ATD) and professional didactics to model and understand drafting teaching practices. It appears that problematized drafting presents technical difficulties due to teaching practices focused on identifying and sorting solutions in order to determine the right one for the problem. These techniques seem justified by technologies marked by the epistemological and didactic conceptions of teachers and the usual form of scientific knowledge at school. In contrast, the construction of knowledge and problematized texts requires of teaching actions leading to leaps of abstraction, allowing students to move from ideas to the reasons underlying the solutions. From a problematization logic, we identify some conditions for these drafting techniques to lead to the construction of problematized and non-propositional texts.

Keywords: Problematization, knowledge text-working, teaching practices, collaborative researches, magmatism, Earth Sciences didactics.

DISCIPLINE

Sciences de l'éducation – didactique des sciences

UNIVERSITÉ DE NANTES

UFR Lettres et langages

École doctorale *Cognition, éducation, interaction*

Centre de recherches en éducation de Nantes - CREN

Chemin de la Censive-du-Tertre, BP 81227, F-44312 NANTES CEDEX 3 (France)