



HAL
open science

Pratiques des savoirs, pratiques langagières et problématisation en sciences de la terre : le cas du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision en terminale scientifique

Maroua Eltaief

► To cite this version:

Maroua Eltaief. Pratiques des savoirs, pratiques langagières et problématisation en sciences de la terre : le cas du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision en terminale scientifique. Education. Université de Bordeaux, 2023. Français. NNT : 2023BORD0076 . tel-04084797

HAL Id: tel-04084797

<https://theses.hal.science/tel-04084797>

Submitted on 28 Apr 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE
DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX

ÉCOLE DOCTORALE SOCIÉTÉS, POLITIQUE, SANTÉ PUBLIQUE (ED SP2)
SPÉCIALITÉ SCIENCES DE L'ÉDUCATION

Par Maroua ELTAIEF

**PRATIQUES DES SAVOIRS, PRATIQUES LANGAGIÈRES ET
PROBLÉMATISATION EN SCIENCES DE LA TERRE : LE CAS DU
PROBLÈME DE LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE
COLLISION EN TERMINALE SCIENTIFIQUE**

Sous la direction de : YANN LHOSTE
Et la co-direction de: Denise ORANGE RAVACHOL

Soutenue le 27 mars 2023

Membres du jury :

Mme. Patricia SCHNEEBERGER, Professeure des universités émérite, Université de Bordeaux,	Présidente
Mme. Florence LE HEBEL, Maîtresse de conférences des universités HDR, ENS Lyon,	Rapporteuse
M. Jérôme SANTINI, maître de conférences HDR, Université Nice Côte d'Azur,	Rapporteur
Mme. Patricia CREPIN-OBERT, Maitresse de conférences des universités, Université de Paris Est Créteil,	Examinatrice
M. Yann LHOSTE, Professeur des universités, Université des Antilles,	Directeur
Mme. Denise ORANGE-RAVACHOL, Professeure des universités émérite, Université de Lille,	Co-directrice

« Ce n'est qu'en réunissant les données de toutes les sciences qui se rapportent à l'étude du globe que nous pourrions espérer obtenir la « vérité », c'est-à-dire l'image qui systématise de la meilleure façon la totalité des faits connus et qui peut, par conséquent, prétendre être la plus probable. Et, même dans ce cas, nous devons nous attendre à ce qu'elle soit modifiée, à tout moment, par toute nouvelle découverte, quelle que soit la science qui l'ait permise » (Alfred Wegener, La genèse des continents et des océans, Préface, 1928 ; réédition, Paris, C. Bourgeois, 1990, p.XIII-XIV).

Remerciement

Voilà ! Je viens de déposer ma thèse en didactique des sciences de la vie et de la Terre après des années de lectures, de rédactions, de discussions mais aussi de rencontres humaines extraordinaires. Au terme de cette aventure si enrichissante, j'ai l'immense plaisir de rendre hommage à tous ceux dont le nom est rattaché à la réalisation d'un tel travail.

Mes plus vifs remerciements et ma profonde gratitude s'adressent en premier lieu à Yann Lhoste et Denise Orange Ravachol pour leur accompagnement et leur soutien continu avec rigueur et bienveillance. Merci pour leur confiance et leur regard critique qui m'ont beaucoup aidée à faire avancer ma réflexion et dépasser les moments difficiles.

Je veux exprimer aussi ma reconnaissance à Laurent Jolivet qui a accepté de répondre à mes questions. L'entretien mené avec lui en aval de l'observation en classe m'a permis de comprendre davantage comment les scientifiques actuels expliquent les problèmes posés par les élèves en classe. Merci pour le temps qu'il m'a accordé pour mener l'entretien avec lui et pour répondre à mes courriels avec bienveillance.

Tous mes remerciements à Patricia Schneeberger, Patricia Crépin-Obert, Florence Le Hebel, et Jérôme Santini, pour avoir accepté de lire et rapporter sur mon travail.

J'adresse également mes remerciements à Hélène Hairault, enseignante de SVT au lycée Yves Kernanec de Marcq-en-Baroeul (Nord), qui m'a accueillie dans sa classe pour enregistrer la séquence étudiée.

Sans eux, ce projet n'aurait pas vu le jour : Il faut remercier les élèves de terminale S, au lycée Yves Kernanec de Marcq-en-Baroeul (Nord) qui m'ont ouvert leur classe. Je leur dois ce travail doctoral.

Je remercie infiniment Lalina Colange, Patricia Crépin-Obert, et Patricia Marzin-Janvier, les membres du comité de suivi de ma thèse, pour leurs conseils et leur grand

intérêt pour mes recherches.

Je remercie énormément mes collègues de l'équipe de l'INSPE d'Aix-Marseille qui n'ont pas cessé de me soutenir. Je remercie donc Patrice Bonnet, Julie Gobert, Solenne Alberteni-Mattei, Jérémy Castera, Lionel Roux, et Pierre Bany.

Un grand merci aussi à mes collègues de l'ENS de Lyon, de l'université Claude Bernard Lyon 1, et de l'université de Montpellier. Je remercie alors Karine Bécu-Robinault, Charles-Henri Eyraud, Olivier Morin, Virginie Deloustal-Jorrand et Aurélie Zwang.

Je termine en remerciant ma mère et mon père. Sans eux je n'aurais jamais pu réaliser ce travail. Autant de phrases et d'expressions éloquentes ne sauraient exprimer le degré de reconnaissance que j'éprouve pour vous mes chers parents. Vous avez su m'inculquer le sens de la détermination et comment ne jamais lâcher prise face aux difficultés... Vos conseils ont toujours guidé mes pas. Vous n'avez cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes ces années de préparation de thèse de doctorat. Vous avez toujours été présents à mes côtés pour me consoler quand il fallait. Merci du fond du cœur.

Sommaire

SOMMAIRE	8
TABLE DES FIGURES	11
TABLE DES TABLEAUX	13
INTRODUCTION GENERALE	15
CHAPITRE I. LA PROBLEMATISATION. UNE FOCALISATION SUR LE CADRE THEORIQUE DE L'ETUDE	20
1 La problématisation et l'activité scientifique	20
2 Processus de problématisation : double dédoublement	22
3 La problématisation sous l'angle de l'espace de contraintes	24
CHAPITRE II. PRATIQUES LANGAGIERES, PROBLEMATISATION ET APPRENTISSAGES EN SCIENCES DE LA TERRE	31
1 La relation entre langage et apprentissage : des travaux qui s'inscrivent dans l'approche historico-culturelle de Vygotski	32
2 La conception constructive du langage	33
3 La compatibilité entre approche langagière choisie et le processus de problématisation	34
3 - 1 Une conception dialogique cohérente avec une conception problématologique de Meyer	34
3 - 2 La cohérence entre l'autonomisation des énoncés du genre second avec l'autonomisation épistémologique du savoir	36
4 Les outils utilisés pour analyser les situations en classe	38
CHAPITRE III. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION : UN ETAT DU SAVOIR ACTUEL	40
1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes par les géologues actuels	40
2 Modélisation de la formation des chaînes de montagnes de collision dans le cadre de la problématisation	43
CHAPITRE IV. ETUDE DE LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DANS LE CADRE DE L'HISTOIRE DES SCIENCES	56
1 L'explication de la formation des chaînes de montagnes par les neptunistes	57
1 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes par les neptunistes	57
1 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon les neptunistes	58
1 - 3 La théorie neptunienne: points de controverse et conditions de possibilité	59
2 Le plutonisme et le rôle central du feu souterrain dans la formation des chaînes de montagnes	61
2 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes par les plutonistes	61

2 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon les plutonistes	64
2 - 3 Les critiques de la théorie plutoniste par la communauté scientifique : points de controverse et conditions de possibilité	65

3 Le modèle de soulèvement d'Élie de Beaumont : le rôle des mouvements verticaux, pour expliquer la formation des chaînes de montagnes **66**

3 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes par Elie de Beaumont	66
3 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon Elie de Beaumont	68
controverses et les critiques qui ont eu lieu dans la communauté scientifique de l'époque concernant la théorie explicative d'Élie de Beaumont. Ces critiques vont jouer un rôle crucial pour faire évoluer ce modèle vers un autre modèle explicatif.	71
3 - 3 Les critiques de la théorie explicative d'Élie de Beaumont par la communauté scientifique : points de controverse et conditions de possibilité	71

4 Le modèle des continents effondrés et des terrains plissés d'Eduard Suess suivi par les nappes de charriage de Marcel Bertrand **72**

4 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes selon Suess et Bertrand	73
4 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon Suess et Bertrand	74
4 - 3 Le modèle explicatif proposé par Suess et Bertrand: points de controverse et conditions de possibilité	76

5 Le modèle de translations continentales de Wegener **77**

5 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes selon Wegener	78
5 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon Wegener	79
5 - 3 Le modèle explicatif proposé par Wegener : points de controverse et conditions de possibilité	82

6 Le modèle de mouvements de convection d'Holmes **83**

6 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes selon Holmes	83
6 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon Holmes	84
6 - 3 Les critiques de la communauté scientifique concernant le modèle explicatif d'Holmes : points de controverse et conditions de possibilité	86

CHAPITRE V. QUESTION DE RECHERCHE, OBJETS D'ETUDE ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL **93**

1 L'explicitation des objectifs de recherche	93
2 Les objets d'étude, niveau de classe et situations retenues	94
3 Le choix d'une méthodologie fondée sur une séquence ordinaire	97
4 Méthodologie d'analyse du débat scientifique	108

CHAPITRE VI. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION : ANALYSE THEMATIQUE D'UNE SEQUENCE ORDINAIRE EN CLASSE DE TERMINALE SCIENTIFIQUE **111**

1 Analyse thématique de la séquence ordinaire étudiée	112
---	-----

CHAPITRE VII. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION : ANALYSE DES MACROSTRUCTURES DES MACRO-ÉPISODES CONCORDANTS **132**

1 La notion de macrostructure	133
2 Les macrostructures des macro-épisodes concordants : construction et analyse	135

CHAPITRE VIII. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION : ANALYSE DES MACROSTRUCTURES DES MACRO-ÉPISODES DISCORDANTS	163
1 Les macrostructures des macro-épisodes discordants : construction et analyse	164
CHAPITRE IX. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION: ANALYSE EPISTEMOLOGICO-LANGAGIERE DES MACRO-ÉPISODES CONCORDANTS	178
Introduction	178
1 Analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes concordants	179
Conclusion de l'analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes concordants	201
CHAPITRE X. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION: ANALYSE EPISTEMOLOGICO-LANGAGIERE DES MACRO-ÉPISODES DISCORDANTS	204
Introduction	204
1 Analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes discordants	205
Conclusion de l'analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes discordants	235
CHAPITRE XI. DISCUSSION DES RESULTATS	240
Introduction	240
1 Le potentiel du cours dialogué lorsqu'il s'ouvre sur la problématisation	240
2 Les apports de l'analyse épistémologico-langagière dans la compréhension des macro-épisodes concordants et discordants	249
3 Les difficultés des élèves	252
Conclusion	254
CONCLUSION GENERALE	258
Introduction	258
1 Les apports de notre étude	258
2 Limites et perspectives de notre recherche	261
BIBLIOGRAPHIE	264
TABLE DES ANNEXES	272
INDEX	389

Table des figures

Fig.1. Les deux dédoublements de la problématisation (Lhoste, 2008).	24
Fig.2. Le schéma de modélisation de Martinand (1994)	26
Fig.3. Les différents registres mis en jeu dans la modélisation (Orange, 2000)	27
Fig.4. Les différents registres mis en jeu dans la modélisation (Orange Ravachol,2003, p. 62)	27
Fig.5. Les sciences de la Terre entre un pôle fonctionnaliste et un pôle historique	29
Fig.6. Problème de la formation des chaînes de montagnes de collision : espace de contraintes des chercheurs.	52
Fig.7. Problème de la formation des chaînes de montagnes : ébauche d'un espace de contraintes d'Elie de Beaumont.	70
Fig.8. Problème de la formation des chaînes de montagnes : ébauche d'un espace de contraintes de Suess et Bertrand	76
Fig.9. Problème de la formation des chaînes de montagnes : ébauche d'un espace de contraintes de Wegener.	81
Fig.10. Problème de la formation des chaînes de montagnes : ébauche de l'espace de contraintes de Holmes.	85
Fig.11. Les modèles explicatifs de la formation des chaînes de montagnes, construits par les scientifiques dans les cadres théoriques anciens.	92
Fig.12. Les étapes de la séquence étudiée	99
Fig.13. Fiche de travail sur les traces d'un domaine océanique(document support N1) (séance. 1)	100
Fig.14. (page1/3) Fiche de travail sur l'histoire des Alpes (avec l'épisode de subduction) (séance.2)	101
Fig.15. Fiche de travail (page 2 /3) présentant respectivement le domaine de stabilité de quelques minéraux ainsi que l'isotherme de température dans une zone de subduction (séance.2)	102
Fig.16. Fiche de travail (page 3/ 3) indiquant les étapes à suivre durant le TP(séance2)	103
Fig.17. (page1/2). Fiche de travail sur le scénario de formation des Alpes(séance 3)	105
Fig.18. (page2/2). Fiche de travail sur le scénario de formation des Alpes : schéma bilan (séance 3)	106
Fig.19. Fiche de travail sur le moteur de la subduction	107

Fig.20. Méthodologie de mise en œuvre pour mener l'étude de cas.	110
Fig.21. Figure expliquant la logique du découpage mené dans notre étude : Exemple 1	112
Fig.22. Figure expliquant la logique du découpage mené dans notre étude : Exemple 2	114
Fig.23. Macrostructure du macro-épisode MEP15 qui aborde le thème du moteur de la subduction en classe de terminale S.	146
Fig.24. Macrostructure du macro-épisode MEP9 qui aborde le problème	158
Fig.25. Macrostructure du MEP4 qui met en exergue le problème de l'orogénèse actuelle.	169
Fig.26. Macrostructure du MEP8 qui met en exergue le problème de la position anormale de roches métamorphiques d'origine océanique.	173
Fig.27. Schéma expliquant la situation scolaire qui a été étudiée dans notre travail et ce qui aurait pu avoir lieu en classe.	245
Fig.28. Macrostructure du MEP1 qui aborde le thème de la subduction en classe de terminale S.	304
Fig.29. Macrostructure du macro-épisode ME2 qui aborde le thème de la collision en classe de terminale S.	310
Fig.30. Macrostructure du macro-épisode MEP3 qui aborde le thème de la marge passive en classe de terminale S.	315
Fig.31. Macrostructure du macro-épisode MEP11 qui aborde le thème des failles dans le cadre de divergence et de convergence en classe de terminale S.	321
Fig.32. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP5 qui met en exergue le problème du devenir de l'eau océanique	326
Fig.33. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP6 qui aborde la formation de relief.	329
Fig.34. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP7 qui met en exergue le problème du vide	333
Fig.35. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP10 met en exergue le problème du devenir de la lithosphère océanique enfouie	337
Fig.36. Macrostructure de l'épisode discordant MEP12 qui met en exergue le problème de l'origine de l'eau.	339
Fig.37. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP13 qui aborde le thème des plaques tectoniques.	341
Fig.38. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP14 qui aborde les failles dans le contexte de convergence et de divergence.	343

Table des tableaux

Tableau. 1. Les caractéristiques de la séquence étudiée	108
Tableau. 2. Les épisodes thématiques de la séquence étudiée.	118
Tableau. 3. Les macro-épisodes de la séquence étudiée	124
Tableau. 4. Le macro-épisode MEP15.	136
Tableau. 5. Le macro-épisode MEP9.	147
Tableau. 6. Tableau récapitulatif des caractéristiques des macrostructures des six macro-épisodes concordants identifiés en classe de terminale S.	162
Tableau. 7. Le macro-épisode MEP4.	165
Tableau. 8. Le macro-épisode MEP8.	170
Tableau. 9. Tableau récapitulatif des caractéristiques des macrostructures des dix macro-épisodes discordants identifiés en classe de terminale S.	176
Tableau. 10. L'analyse du macro-épisode MEP15	181
Tableau. 11. L'analyse du macro-épisode MEP9	191
Tableau. 12. Tableau récapitulant les problèmes proposés par l'enseignante et ceux posés par les élèves durant les macro-épisodes concordants étudiés	202
Tableau. 13. L'analyse du macro-épisode MEP4	207
Tableau. 14. L'analyse du macro-épisode MEP7	213
Tableau. 15. L'analyse du macro-épisode MEP5	221
Tableau. 16. L'analyse du macro-épisode MEP8	227
Tableau. 17. L'analyse du macro-épisode MEP10	232
Tableau. 18. Tableau récapitulant les problèmes de l'enseignante, les problèmes des élèves et indiquant ce qui a aidé les apprenants à poser leurs problèmes	237
Tableau. 19. Le macro-épisode MEP1	300
Tableau. 20. Le macro-épisode MEP2	305
Tableau. 21. Le macro-épisode MEP3	311
Tableau. 22. Le macro-épisode MEP11	316
Tableau. 23. Le macro-épisode MEP5	322

Tableau. 24. Le macro-épisode MEP6	327
Tableau. 25. Le macro-épisode MEP7	330
Tableau. 26. Le macro-épisode MEP10	334
Tableau. 27. Le macro-épisode MEP12	338
Tableau. 28. Le macro-épisode MEP13	339
Tableau. 29. Le macro-épisode MEP14	342

INTRODUCTION GENERALE

Les séquences ordinaires (Mercier, 2008) permettent généralement d'étudier le travail ordinaire entre enseignant(e) et apprenants tel qu'il se fait en classe. Ce sont des séquences qui n'accordent pas aux chercheurs le choix de préparer les situations d'enseignement avec le/ la professeur(e) en fonction des objectifs de la recherche. Elles rendent possibles des observations concernant le déroulement de la classe. Mercier (2008, p. 31) précisait que « *Dans un enseignement ordinaire, on observe une suite d'épisodes didactiques* ». Ils sont identifiables « *soit, au fait qu'un élève au moins doit y faire face à son ignorance et peut le faire en mobilisant par après-coup des savoirs pertinents (mais le plus souvent, l'appartenance disciplinaire des apprentissages idoines à la situation n'est pas garantie, leur identification n'ayant pas été faite par avance, au cours de la préparation de l'enseignement) ; soit, au fait qu'un professeur y tente de mettre en place un jeu à enjeu de savoir dont les élèves puissent s'emparer (que ce jeu fonctionne comme organisateur de rapports à un milieu ou comme organisateur d'enquête dans un média, il est toujours sous contrat didactique désignant son enjeu) ; soit, au fait qu'un objet de savoir identifiable s'y trouve en scène dans un jeu auquel les élèves peuvent jouer et auquel le professeur peut, selon les moments, les accompagner.* ». Mercier conclut que cette suite d'épisodes ne permet pas aux élèves de « *vivre [...] le parcours complet de la production d'un contenu disciplinaire (le profil épistémologique des savoirs effectivement enseignés est en général fortement lacunaire)* » (ibid, 2008, p. 31). Cette suite d'épisodes ne permet pas non plus « *de parcourir un trajet un peu long sur ce chemin* » (ibid).

En inscrivant notre étude dans le cadre de l'apprentissage par problématisation en sciences de la Terre (Orange Ravachol, 2003), nous avons posé en tant que chercheure en sciences de l'éducation la question suivante : les séquences ordinaires permettent-elles ou non la mise en exergue de certains moments où la classe a une tendance à s'inscrire dans un processus de problématisation ? Et si oui, qu'est-ce qui a permis l'engagement des élèves dans une enquête qui pourra évoluer possiblement vers la construction de problèmes géologiques ? De même, est-ce que la construction de problèmes pourra avoir lieu durant ces séquences ordinaires et si non, qu'est ce qui l'empêche de s'opérer ?

Pour répondre à toutes ces questions, nous cherchons alors à comprendre dans ce travail comment les élèves de terminale scientifique peuvent s'engager dans la construction de la formation des chaînes de montagnes de collision, lors d'un débat scientifique observé pendant une séquence ordinaire consacrée à l'étude du thème « La convergence lithosphérique : contexte de formation des chaînes de montagnes ». Cela nous donnera des informations cruciales sur le potentiel des séquences ordinaires lorsqu'elles sont étudiées dans le cadre de la problématisation.

Ainsi, nous allons essayer de nous focaliser dans un premier temps sur la manière dont les scientifiques expliquent la formation des chaînes de montagnes de collision en nous inscrivant dans le cadre de la problématisation (Orange, 2000 ; Orange Ravachol, 2010 a ; Lhoste, 2017). Ces repères épistémologiques vont nous permettre dans un deuxième temps de mener une analyse épistémologico-langagière d'un débat en classe qui a été consacré à l'étude de la formation des chaînes de montagnes de collision afin de mieux comprendre comment les élèves ont pu ou non construire de manière raisonnée ce phénomène. Ce faisant, nous repérerons les difficultés rencontrées chez eux dans cette construction et nous identifierons et discuterons les problèmes que posent vraiment les lycéens.

Dans le premier chapitre, nous viserons présenter le cadre théorique de notre étude. Il correspond au cadre théorique de l'apprentissage par problématisation en sciences de la Terre (Orange Ravachol, 2003, 2010a). L'explicitation de notre cadre théorique va normer les analyses épistémologiques et didactiques qui seront traitées dans la suite du travail. Suite à l'explication des liens entre problèmes et activité scientifique, nous viserons comprendre davantage le processus de problématisation en présentant la description de la dynamique de ce processus. Nous mettons en lumière dans le reste du chapitre, les outils fondamentaux que la problématisation peut nous fournir pour mener nos analyses didactiques.

Dans le deuxième chapitre, nous allons essayer de mettre en exergue d'autres outils et concepts fondamentaux pour comprendre la dimension intersubjective qui prend un espace considérable dans les situations de classes. Ces moyens vont outiller nos analyses didactiques et nous permettront de comprendre les dynamiques des interactions entre enseignante et apprenants. C'est dans ce cadre, que nous allons nous intéresser dans ce chapitre aux pratiques langagières. Nous allons ainsi faire un focus sur la conception du langage qui sera choisie pour rendre compte les

activités langagières problématisantes en classe. Nous essayerons ensuite de mettre en exergue la compatibilité entre l'approche langagière mobilisée et le processus de problématisation. Cela va consolider davantage notre choix qui vise à étudier les pratiques langagières des élèves et de l'enseignante en classe afin de comprendre comment les lycéens de terminale S peuvent s'engager dans la construction de la formation des chaînes de montagnes durant une séquence ordinaire.

Nous allons mener dans le troisième chapitre une analyse épistémologique qui nous permettra de comprendre comment les scientifiques construisent le savoir actuel de la formation des chaînes de montagnes de collision, en nous inscrivant dans le cadre de la problématisation et en suivant la méthodologie décrite par Orange (2000), Orange Ravachol (2003) et Lhoste (2008). C'est avec ces repères épistémologiques que nous allons nous intéresser ensuite au fonctionnement des élèves en classe de terminale S. Ainsi, nous nous focaliserons dans la première partie de ce chapitre à comprendre la formation des chaînes de montagnes de collision, selon les géologues actuels. Nous allons ensuite consacrer la deuxième partie de ce chapitre à modéliser ce savoir dans le cadre de la problématisation. Nous viserons alors identifier les nécessités associées à ce concept construites par les scientifiques actuels, en fonction des registres explicatifs qu'ils mobilisent pour penser les explications géologiques. Parmi les références que nous utiliserons pour mener cette modélisation, nous citons l'entretien que nous avons réalisé avec Laurent Jolivet, professeur à Sorbonne université, chercheur et responsable de l'équipe « Dynamique et évolution des marges et des orogènes » à l'institut des sciences de la Terre de Paris (ISTeP).

En ce qui concerne le quatrième chapitre, il s'agira d'étudier la formation des chaînes de montagnes de collision dans le cadre de l'histoire des sciences. Plus clairement, nous essayerons de comprendre comment les scientifiques dans les cadres théoriques anciens, ont construit ce concept. Nous nous focalisons sur les ruptures, les critiques, et les changements d'idées qui ont permis l'évolution d'un modèle explicatif à un autre. Par ce chapitre, nous viserons à montrer la complexité de la formation des chaînes de montagnes qui nous servira ensuite à comprendre les difficultés qui peuvent être rencontrées chez les apprenants dans la construction de ce phénomène.

Le cinquième chapitre sera consacré à l'explicitation de la méthodologie suivie pour le recueil et l'analyse des données de notre recherche.

Le sixième, le septième, le huitième, le neuvième, et le dixième chapitre, seront consacrés au fonctionnement des lycéens en classe. Par ces cinq chapitres, nous viserons à déterminer les moments durant lesquels les élèves pourront s'engager dans un processus de problématisation. Nous essaierons ainsi, d'identifier les problèmes pris en charge par les élèves, les nécessités qu'ils ont pu ou pas construire, l'échelle d'étude où ils se situent et les difficultés qu'ils rencontrent.

Pour arriver à répondre à ces questions, nous allons essayer dans le sixième, le septième et le huitième chapitre de mener tout d'abord une analyse macroscopique de notre séquence.

Cette analyse comporte deux étapes : la première étape sera une analyse thématique qui nous permettra d'avoir une idée générale sur les thèmes introduits tout au long de notre séquence. Elle sera présentée dans le sixième chapitre. La deuxième étape de l'analyse macroscopique correspond à une analyse des macrostructures identifiées dans notre corpus étudié (Fabre et Orange, 1997 ; Fabre, 1999 ; Lhoste, 2008). Elle sera étudiée dans le septième et le huitième chapitre. Nous cherchons par l'analyse des macrostructures, à avoir des précisions sur la possibilité ou non de la présence des moments d'argumentation et de controverses dans les échanges en classe qui pourraient aboutir possiblement à la construction des savoirs problématisés liés à la formation des chaînes de montagnes de collision.

Le neuvième et le dixième chapitre, quant à eux, seront consacrés à mener une analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes construits dans le sixième chapitre. Cette analyse microscopique va nous permettre d'identifier les problèmes qui sont posés vraiment par les élèves, les registres explicatifs qu'ils mobilisent, et les difficultés qu'ils peuvent rencontrer. Et pour y arriver, nous mettrons en comparaison pour chaque problème posé, le raisonnement des scientifiques et le raisonnement des lycéens. Nous consoliderons cette comparaison par les réponses de Laurent Jolivet à nos questions posées en aval de la séquence enregistrée.

Dans la partie discussion, nous viserons à montrer l'apport et les limites de notre étude par rapport au processus de problématisation.

Suite à cette introduction générale, nous passons maintenant à la présentation du

cadre théorique de notre étude.

CHAPITRE I. LA PROBLEMATISATION. UNE FOCALISATION SUR LE CADRE THEORIQUE DE L'ETUDE

Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présentons le cadre théorique de notre étude. Il correspond au cadre théorique de l'apprentissage par problématisation en sciences de la Terre. La précision de notre positionnement épistémologique va normer les analyses didactiques (les analyses de l'activité des lycéens en classe) qui seront menées dans la suite de notre travail.

Pour argumenter la raison pour laquelle nous avons choisi le cadre théorique de l'apprentissage par problématisation, nous allons essayer dans la première partie d'explicitier les liens existants entre problèmes et activité scientifique.

Pour comprendre le processus de problématisation, nous consacrerons la deuxième partie de ce chapitre à la description de la dynamique de ce processus. Nous viserons ensuite à mettre en exergue les moyens que ce cadre théorique peut nous fournir pour analyser les situations d'enseignement apprentissage en classe de SVT. Puisque notre travail s'inscrit dans le cadre théorique de l'apprentissage par problématisation en sciences de la Terre, nous allons ainsi nous focaliser en particulier sur un outil crucial mobilisé dans les problèmes des sciences de la Terre : il correspond au principe méthodologique de l'actualisme.

1 La problématisation et l'activité scientifique

Notre travail s'ancre dans le cadre de l'apprentissage par problématisation en sciences de la Terre (Orange Ravachol, 2003) qui s'inscrit dans une approche rationaliste de l'activité scientifique. Cette conception rationaliste montre à la suite de Bachelard que le savoir scientifique ne peut être considéré que comme une réponse à un problème :

« *Pour un esprit scientifique, toute connaissance est une réponse à une question* » (Bachelard, 1938/ 1993, p. 14). Collingwood précise de son côté que le processus de

connaissance ne peut pas être réduit à des actes assertifs (des propositions, des affirmations, etc...), mais à un ensemble de questions et de réponses : « *Un savoir ne consiste pas en propositions, en affirmations, en jugements, quel que soit le nom que les logiciens ont l'habitude d'utiliser pour désigner les actes assertoriques de la pensée...il consiste dans la synthèse de ces assertions avec les questions auxquelles elles sont censées répondre ; et une logique dans laquelle on se soucie des réponses et on néglige les questions est une fausse logique* » (Collingwood, cité dans Meyer, 1991, p.35).

En s'appuyant sur les travaux de Bachelard, Dewey, Deleuze et Meyer, Fabre adopte la même position en mettant en exergue la place fondamentale des problèmes dans l'activité scientifique : « *L'oubli des problèmes, qui trouve son expression logique dans le propositionnalisme, hante les théories de la connaissance. Pas de science, sans problème !* » (Fabre, 2017, p.64-65).

Dans cette dimension rationaliste, l'activité scientifique permet alors la construction des savoirs scientifiques en rupture avec la pensée commune (Bachelard, 1938/1993).

Ces savoirs scientifiques ne peuvent pas se limiter à des savoirs solutions. Ce sont plutôt des savoirs raisonnés, fondés sur des problèmes explicatifs et sur la construction argumentée des solutions (Fabre et Orange, 1997 ; Orange, 2000, 2002 ; Orange Ravachol, 2003, 2010a ; Lhoste, 2008, 2017). Cette construction argumentée des solutions, mobilise à la fois des éléments théoriques (les principes, les théories) et les faits construits (contraintes empiriques) [Ces éléments seront détaillés dans la section suivante].

Ces approfondissements font émerger un caractère essentiel des savoirs scientifiques : « leur nécessité » ou « apodicticité ». En effet, les savoirs ne se focalisent pas seulement sur les solutions des problèmes, mais incluent aussi ce qui fait que ces solutions, sont retenues parmi d'autres solutions écartées. Ainsi, le savoir scientifique ne se limite pas à « *savoir que* », « *c'est aussi savoir pourquoi cela ne peut pas être autrement* » (Orange Ravachol, 2010a, p. 8).

À partir des précisions épistémologiques menées ci-dessus, nous pouvons dire que le cadre théorique de l'apprentissage par problématisation privilégie le travail des problèmes et la construction de savoirs apodictiques, raisonnés. Ce cadre nous mène à penser la construction du problème comme « *processus d'ouverture* »

marqué par la proposition des différentes solutions possibles et « *d'un processus de fermeture* » qui se manifeste par la construction des nécessités (Orange Ravachol, 2010a, p.9). Ainsi, il nous paraît fondamental d'expliciter dans la partie suivante la question de construction de problème qui permet de différencier la problématisation de la résolution des problèmes

2 Processus de problématisation : double dédoublement

La construction du problème peut être décrite comme un double dédoublement : un premier dédoublement entre les faits et les idées et que l'on peut associer à la dialectique des références et inférences (Fabre, 2009, p.27-28), et un deuxième dédoublement entre l'assertorique (le champ du possible) et l'apodictique (le champ du nécessaire). Nous essayerons dans cette partie d'expliciter ces deux dédoublements afin de comprendre davantage le processus de problématisation.

- Le premier dédoublement est considéré par Dewey comme la transition d'une situation indéterminée vers une situation unifiée par l'enquête. Cela demande deux types d'opérations : « *l'une a un objet idéal ou conceptuel. Cet objet représente des moyens et des fins possibles de solutions* », « *l'autre est faite d'activités impliquant les techniques et les organes de l'observation* » (Dewey, 1967/ 1993, p.183).

- Ce premier dédoublement est considéré par Bachelard comme un dédoublement des faits et des idées. À partir d'une situation problématique, ce dédoublement articule une dialectique des références (ce sont les données du problème) et d'inférences (ce sont les hypothèses, les suggestions) (Fabre, 2009, p.27).

Les faits ou encore les références, révèlent : « *a) ce qui est présent [...] dans la situation problématique ; b) ce qui a le statut de contraintes, ce que je me vois obligé de prendre en compte ; et enfin c) ce qui s'avère connu* » (Fabre, 2009, p. 27).

Contrairement aux références (ou faits), les inférences désignent « *a) ce qui est encore à venir ; b) ce qui n'est pas réellement présent dans la situation (problématique) ; c) ce qui est inconnu mais qui peut être inféré à partir du connu* » (ibid). Ce qui est déterminant dans ce premier dédoublement, c'est que rien n'est donné ni les faits ni les idées. Ils n'existent pas en soi, au contraire, ils sont

construits par celui qui travaille le problème lors de la construction du problème. De même, les faits et les idées sont toujours en lien : « *l'observation des faits et la suggestion des significations ou idées naissent et se développent en corrélation* » (Dewey, 1967/ 1993, p.174). Dewey donne des explications sur cette corrélation : en fait, selon lui l'idée entraîne des nouvelles observations, qui provoquent à leur tour une nouvelle « idée ». De même, le cumul des faits « *suggèrent des hypothèses : c'est la dialectique des indices et des preuves* » (Fabre, 2006, p.19). Dans ce cadre, l'induction consiste selon Dewey « *à faire de l'objet de l'enquête un objet générique, un spécimen. Sa fonction est de réduire la situation à son schéma intelligible en la dépouillant de tous ses éléments parasites* » (Fabre, 2009, p.28). La déduction permet quant à elle « *la formation des hypothèses et le déroulement de leurs conséquences* » (Fabre, 2006, p.19). Ainsi, si l'induction « *procède du particulier à l'universel* » en allant « *des détails fragmentaires de la situation vers un principe qui l'unifie en un tout cohérent* » (Fabre, 2009, p. 28). Au contraire, la déduction « *apporte la preuve en retrouvant le particulier à partir de l'universel : Elle relève de la justification* » (ibid). Mais la question qu'on peut poser ici est la suivante : comment peut-on contrôler le traitement de problème et garantir la valeur des propositions émises dans le premier dédoublement ?

La nécessité de contrôler le traitement du problème correspond au second dédoublement. Bachelard décrit ce second dédoublement de la façon suivante : « *Toute pensée scientifique se dédouble en pensée assertorique et pensée apodictique, entre une pensée consciente du fait de penser et pensée consciente de la normativité de penser* » (Bachelard, 1949/ 1998, p.25). Ce second dédoublement met en exergue d'un côté ce qui appartient au champ de l'assertorique, ce qui se passe comme cela et peut se passer autrement et d'un autre côté, ce qui relève de l'apodictique et impose une conscience de nécessités. Ainsi dans le premier dédoublement, les faits et les idées relèvent de l'assertorique (voir le plan horizontal de la **Fig. 1**), puisqu'ils ne sont pas examinés dans leurs fondements. Si on en reste là, aucun savoir scientifique ne peut se construire. C'est le second dédoublement qui permet l'utilisation de faits et des idées dans un raisonnement (voir le plan vertical de la **Fig.1**) entraînant alors la construction d'un savoir raisonné apodictique.

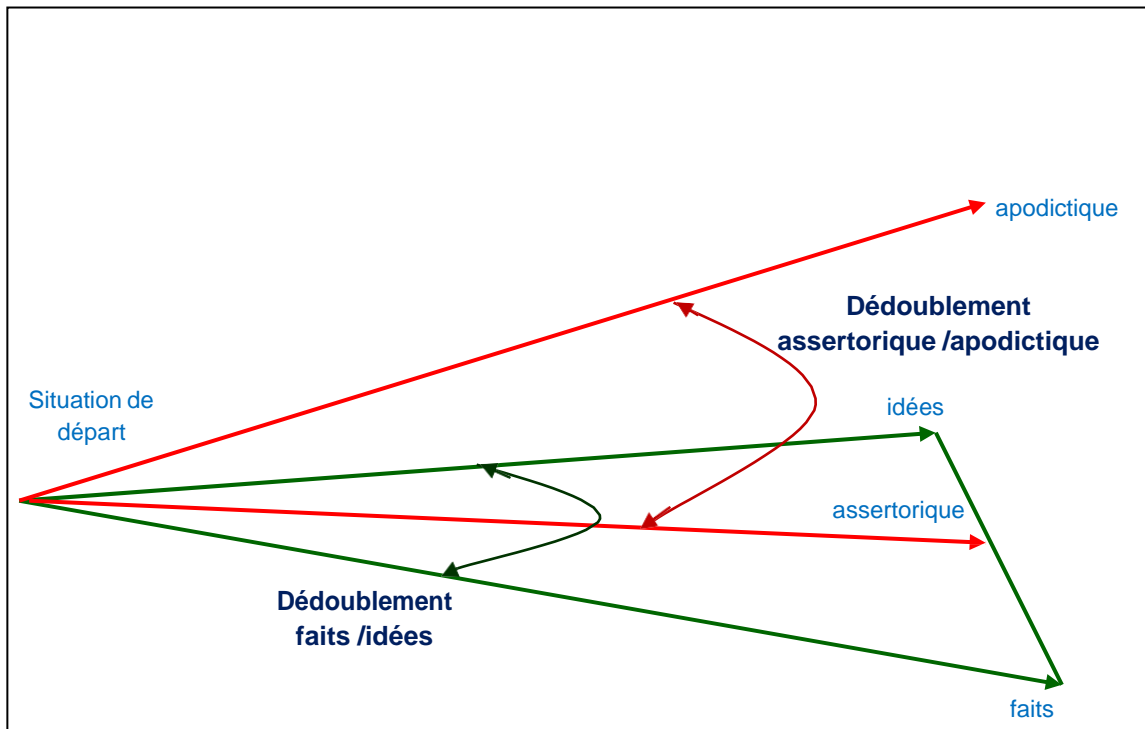


Fig.1. Les deux dédoublements de la problématisation (Lhoste, 2008).

À partir du moment où « l'enquête¹ » (Dewey, 1993) est terminée, nous pouvons utiliser certains outils qui nous permettront de modéliser la construction du problème (la problématisation).

3 La problématisation sous l'angle de l'espace de contraintes

En nous inscrivant dans une approche rationaliste de l'activité scientifique, nous rappelons que dans la première partie de ce chapitre, nous avons vu que l'activité scientifique permet la construction des savoirs raisonnés apodictiques. Elle s'occupe des problèmes explicatifs dont la résolution est liée à une problématisation explicite (Fabre et Orange, 1997 ; Orange, 2000, 2002 ; Orange Ravachol, 2003, 2010a, 2010b).

Certains auteurs ont essayé de souligner la relation forte entre explication et modélisation. Parmi lesquels, nous citons Garcia par exemple qui précise que «

¹ : Selon Dewey, le processus d'enquête correspond à « *la transformation contrôlée et dirigée d'une situation indéterminée en une situation qui est si déterminée en ses distinctions et relations constitutives qu'elle convertit les éléments de la situation originelle en un tout unifié* » (Dewey, 1993, p. 169).

fournir une explication des phénomènes dans un secteur de la réalité physique, consiste essentiellement, à en fournir un modèle explicatif. Mais ce qui est “ explicatif” dans ces modèles, ce ne sont pas les idées intuitives qui pourraient être associées à certains des concepts : Ce sont plutôt les relations structurelles entre les concepts eux-mêmes » (Garcia, 1973, p. 111). Vergnioux considère de son côté que « l’explication renvoie à la construction de modèles » (2003, p. 37). En s’intéressant fondamentalement aux problèmes scientifiques explicatifs, la construction des problèmes renvoie alors à la construction de modèle. Pour décrire le modèle, Martinand propose « de distinguer le modèle de son référent empirique » (Martinand, 1992, p.15). Selon lui, le registre empirique comporte les éléments de la phénoménologie, de la phénoménographie et de la phénoménotechnique. Il précise que ce référent empirique ne se limite pas seulement à des phénomènes et d’objets. Il est constitué aussi par des éléments théoriques, des « déjà-là » antérieurement construits. Ces éléments théoriques interviennent dans l’acquisition des données indirectement à travers les techniques utilisées et qui sont chargées de théories mais qui n’ont pas un lien direct avec les faits : « Il y a “ déjà-là” des descriptions, des règles d’action, des savoirs disponibles. Ils ont un statut “empirique”, même s’ils sont l’aboutissement de processus antérieurs d’élaboration conceptuelle, théorique ou modélisante, en ce sens qu’ils sont inconsciemment projetés sur la réalité » (Martinand, 1996, p. 14).

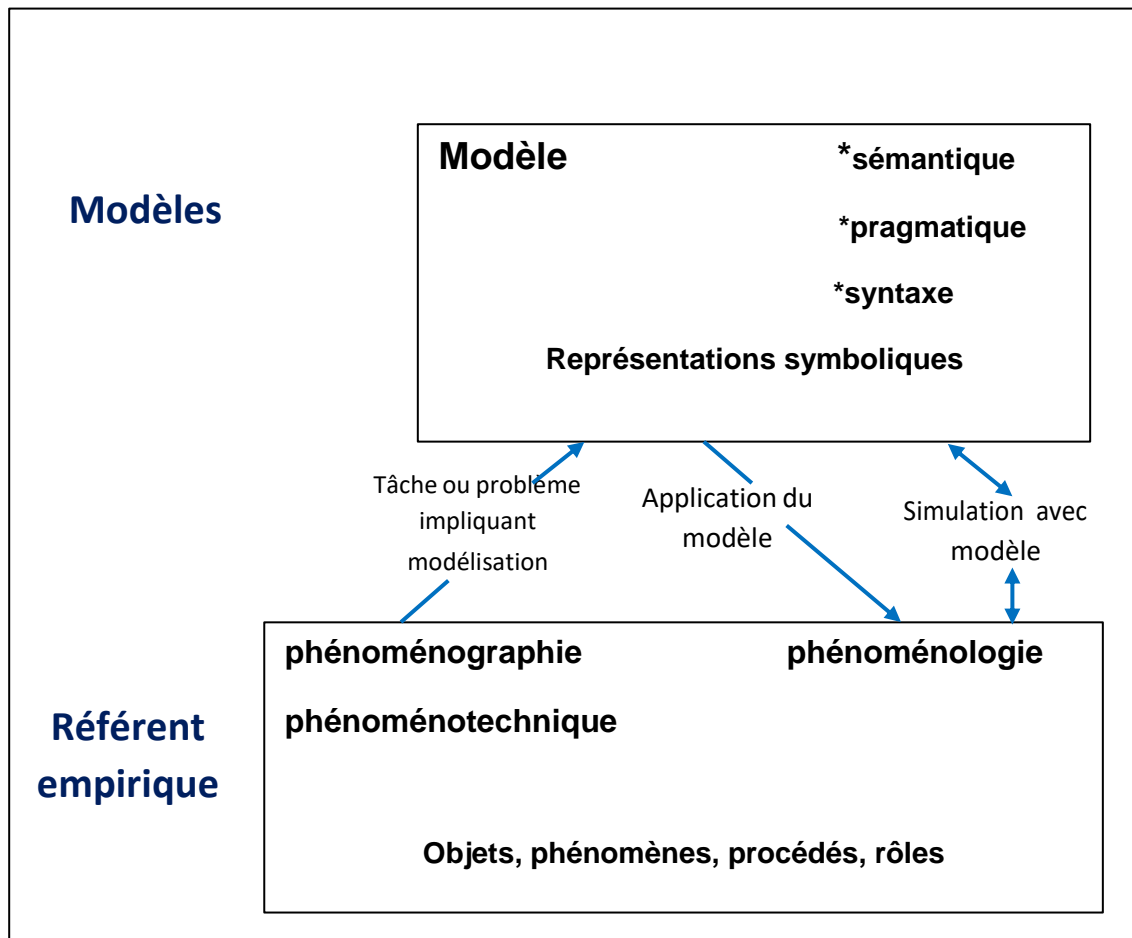


Fig.2. Le schéma de modélisation de Martinand (1994)

En se basant sur la distinction entre registre empirique et registre des modèles introduits par Martinand, Orange propose de rendre compte du processus de problématisation sous forme d'espace de contraintes. Dans le cadre du travail d'un problème explicatif, cet espace de contraintes (voir **Fig. 2**), comporte :

Le registre empirique (ou « *monde des faits et des phénomènes* » [Orange, 2000]) qui est constitué des faits et de phénomènes du monde que l'on doit prendre en compte ou expliquer dans le cadre du problème étudié.

Le registre des modèles (ou « *monde des explications imaginées* » [Orange, 2000]) qui est formé de constructions rendant raison de certains faits et phénomènes du registre empirique.

Les éléments du registre empirique et du registre des modèles sont inclus dans une articulation entre des contraintes empiriques pertinentes pour le

problème avec des nécessités sur les modèles ou encore des conditions de possibilité de modèle (Orange, 2000, p.27 ; Orange Ravachol, 2003, p.73).

Orange apporte une nouveauté par rapport au modèle de Martinand. Il ajoute un troisième registre qu'il nomme **registre explicatif (Fig.3)**. Il correspond au "monde qui donne sens au modèle et permet de le manipuler". Il permet de cadrer et structurer les éléments du registre empirique et du registre des modèles explorés lors de la construction du problème.

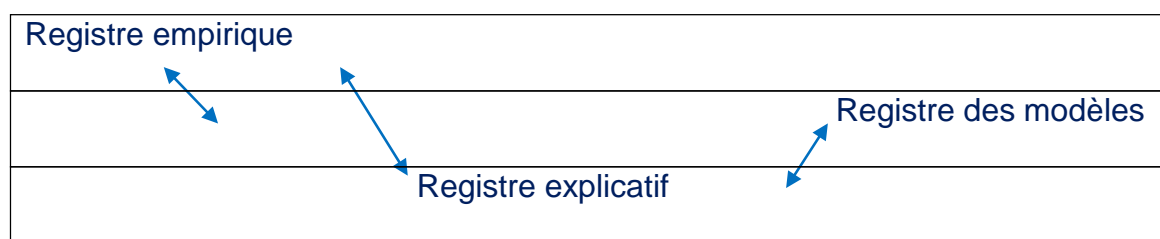


Fig.3. Les différents registres mis en jeu dans la modélisation (Orange, 2000)

En s'inspirant du schéma de mise en relations des registres de modélisation construit par Orange, Orange Ravachol (2003) construit le schéma de modélisation de la **Fig.4**. Ce schéma « reprend les interactions entre le registre empirique et le registre des modèles » (Orange Ravachol, 2003, p. 62) représentées par le schéma d'Orange, mais se distingue de ce dernier par la place du registre explicatif. En fait, pour Orange Ravachol, le registre explicatif est « plus englobant » (ibid, p.62).

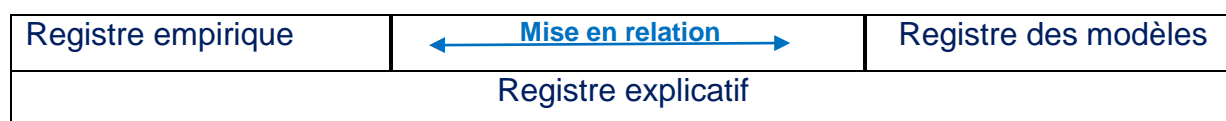


Fig.4. Les différents registres mis en jeu dans la modélisation (Orange Ravachol, 2003, p. 62)

Les différents registres détaillés ci-dessus et leurs relations sont représentés, comme nous l'avons dit auparavant, sous la forme d'un espace de contraintes qui permet de rendre compte de l'activité de problématisation. Cet espace de contraintes représente un moyen important pour pouvoir mener des analyses épistémologiques consistantes qui permettront d'outiller ensuite nos analyses didactiques (du côté éléments de savoirs).

Puisque notre recherche s'intéresse à la problématisation en sciences de la Terre (nous l'avons déjà précisé), nous pensons qu'il sera intéressant de nous focaliser dans la partie suivante sur un constituant crucial du registre explicatif qui est mobilisé dans les problèmes des sciences de la Terre. Il s'agit du principe méthodologique de l'actualisme.

- **Le principe méthodologique de l'actualisme : un constituant important du registre explicatif pour les problèmes des sciences de la Terre**

Les sciences de la Terre se définissent dans une tension entre une dimension fonctionnaliste et une dimension historique : « *l'objet de la géologie est définie par cette double préoccupation : connaître la partie de la Terre accessible à l'observation et en déterminer l'histoire* » (Gohau, 1987, p. 7).

Si la géologie fonctionnaliste s'intéresse au fonctionnement actuel de la Terre, la géologie historique se préoccupe de la reconstitution de l'évolution du globe terrestre depuis sa formation (Orange Ravachol, 2003, p. 20).

L'identification de ces deux pôles des sciences de la Terre, permet de distinguer des problèmes fonctionnalistes et des problèmes historiques. Malgré cette typologie de problème, il est important de préciser que la plupart des problèmes géologiques ne sont pas des « *problèmes purs* » (Orange Ravachol, 2003, p. 25), c'est-à-dire qu'ils ne correspondent pas à des problèmes uniquement fonctionnalistes ou uniquement historiques. Ce sont plutôt des problèmes mixtes dans la plupart des cas, relevant en même temps de la géologie fonctionnaliste et de la géologie historique.

Gohau (1997, p.140) précise que le principe méthodologique de l'actualisme appelé aussi principe des causes actuelles représente l'élément de liaison entre les deux pôles fonctionnaliste et historique des sciences de la Terre (voir **Fig.5**).

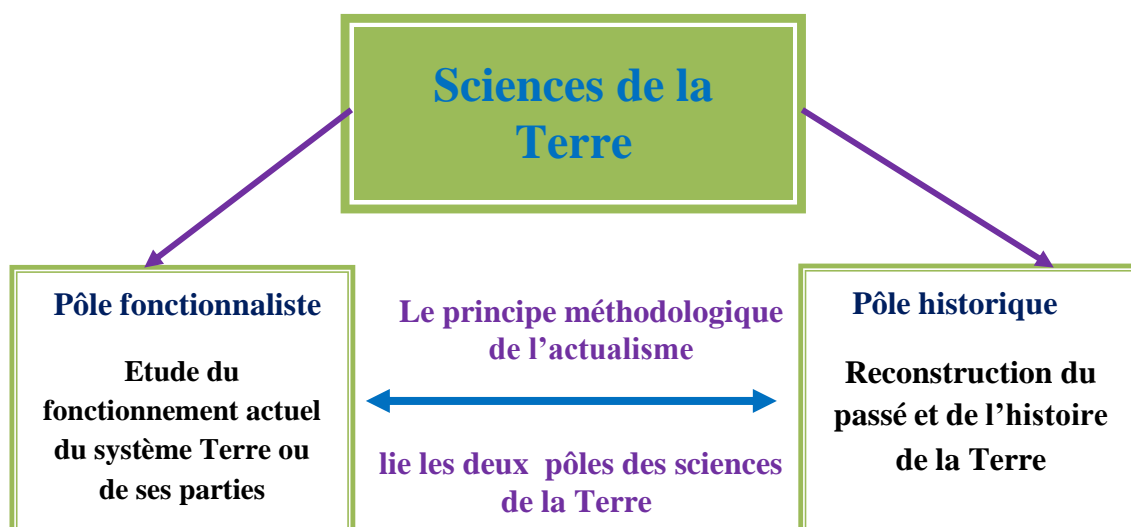


Fig.5. Les sciences de la Terre entre un pôle fonctionnaliste et un pôle historique

Ce principe est fondé sur le fait « *que le présent est la clef du passé, ou que les causes qui ont agi au long de l'histoire de la Terre ne diffèrent point essentiellement des causes géologiques actuelles* » (Gohau, 1997, p.140).

En s'inscrivant dans un cadre actualiste, les phénomènes à l'origine des changements géologiques passés sont considérés comme existants auparavant et existent encore dans la nature actuelle (Orange Ravachol, 2005, p. 185).

Selon Orange Ravachol, nous pouvons distinguer deux niveaux du principe méthodologique de l'actualisme : l'actualisme de premier niveau et l'actualisme de deuxième niveau.

L'actualisme de premier niveau ou l'actualisme d'analogie : consiste à « *référer la trace de phénomène ou d'événements passés à une trace actuelle* » (Orange Ravachol, 2005, p. 186). Cette trace actuelle renvoie « *à un phénomène actuel dont le fonctionnement est connu* » (ibid). Dans ce cas, l'explication de phénomène ou événement historique se ramène alors « *à un problème fonctionnaliste actuel que l'on transfère dans le passé* » (ibid). Il s'agit bien, comme l'a indiqué Orange Ravachol « *d'une explication fonctionnaliste mais avec déplacement, via le temps d'un registre empirique à un autre* » (2005, p.186). Orange Ravachol donne comme exemple de l'actualisme d'analogie, le pillow lavas de Chenaillet qui sont considérés comme « *des structures comparables aux pillow lavas actuelles des dorsales médio-océaniques* » (ibid) dont la formation peut s'observer « *par refroidissement d'un*

magma basaltique en milieu aquatique » (ibid).

L'actualisme de deuxième niveau (actualisme à temps long) : consiste à « *référer la trace d'évènements ou de phénomènes passés aux traces d'un phénomène actuel qui n'en est pas l'exact équivalent* ». En fait, « *pour obtenir la trace passée telle que le géologue l'identifie, il est nécessaire d'envisager un processus de transformation s'exerçant sur une longue durée* » (ibid) qui « *dépasse la perception humaine* » (Orange Ravachol, 2003, p. 75). L'explication des phénomènes ou d'évènements passés est une « *explication historique qui se ramène à un problème fonctionnaliste et à la mobilisation d'un temps long* » (Orange Ravachol, 2005, p. 186). Pour comprendre davantage l'actualisme à temps long, Orange Ravachol prend en particulier l'exemple de la surface structurale gréseuse cambrienne avec ripple marks (marques en rides). Ces rides cambriennes ont une forme comparable à celles observées actuellement sur le fond marin (ibid). Ce sont « *des figures de courants* » (ibid).

Nous pouvons alors à ce niveau appliquer l'actualisme d'analogie, en exportant la formation de ces ripple marks au passé « *sans qu'il soit possible de préciser la profondeur du dépôt par l'identification des seules ripple marks* » (ibid). Cependant, Orange Ravachol précise que ces ripple marks observées dans les roches cambriennes indurées « *sont complètement figées en un ensemble rocheux compact. Nous n'observons pas cette transformation, nommée diagenèse dans sa totalité à l'échelle du temps humain* » (ibid) d'où la nécessité de la mobilisation du temps long qui dépasse la perception humaine.

Il est important de préciser ici que le recours à l'actualisme présente des limites. En fait, pour expliquer certains phénomènes ou événements géologiques (exemple : l'extinction massive d'espèces durant la fin du Crétacé et du début du Tertiaire), on ne peut pas faire appel à l'actualisme d'analogie puisqu'il n'y a pas à l'état actuel des causes comparables aux causes qui ont provoqué l'événement ou le phénomène géologique.

On ne peut pas recourir non plus à l'actualisme de deuxième niveau qui suppose que l'ampleur du phénomène géologique se déploie sur une grande durée. On ne peut pas faire appel à ce type d'actualisme, puisque l'événement ou le phénomène géologique qu'on cherche à expliquer est borné dans un intervalle du temps court.

Face à l'insuffisance de l'actualisme, on recourt alors au catastrophisme. Orange Ravachol précise qu'il s'agit bien dans ce cas d'un catastrophisme de deuxième niveau où « *les catastrophes sont vues comme des nécessités* » (Orange Ravachol, 2003, p.58). En effet, le catastrophisme est « *sollicité après que les outils des deux actualismes méthodologiques ont été employés* » (ibid, p.71).

Ainsi par cette section, nous avons voulu mettre en exergue l'importance du principe méthodologique de l'actualisme dans l'explication des problèmes en sciences de la Terre. Cela va nous aider d'un point de vue didactique à caractériser les utilisations explicatives du temps mobilisées par les élèves confrontés à des problèmes géologiques et notamment au problème de la formation des chaînes de montagnes.

Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons essayé de présenter le cadre théorique de notre étude : Il s'agit du cadre théorique de l'apprentissage par problématisation en sciences de la Terre qui s'inscrit dans une approche rationaliste de l'activité scientifique.

Dans cette approche rationaliste de problématisation, travailler les problèmes conduit à dégager des nécessités (des raisons) qui contraignent les solutions et leur donnent un caractère apodictique. Nous avons ensuite essayé de présenter des outils capitaux (espace de contraintes, principe méthodologique d'actualisme) pour mener des analyses épistémologiques solides qui pourront nous permettre d'outiller nos analyses didactiques. En revanche, l'analyse des situations d'enseignement apprentissage réalisées dans le cadre de la problématisation se focalise sur l'activité d'élève considéré comme « épistémique » en laissant dans l'ombre la dimension intersubjective qui joue un rôle crucial dans les situations en classe. Il nous paraît alors important de recourir dans le deuxième chapitre à d'autres outils qui nous aideront à tenir compte de cette dimension intersubjective.

CHAPITRE II. PRATIQUES LANGAGIERES, PROBLEMATISATION ET APPRENTISSAGES EN SCIENCES DE LA TERRE

Introduction

Nous avons essayé dans le premier chapitre de préciser le cadre théorique de notre étude, qui correspond au cadre théorique de l'apprentissage par problématisation. Nous avons ainsi montré en quoi la problématisation peut nous fournir des outils fondamentaux pour mener des analyses épistémologiques robustes, qui peuvent être considérées comme références pour mener ensuite les analyses didactiques en suivant le fil du savoir. Néanmoins, l'analyse des situations d'enseignement et d'apprentissage menées dans le cadre de la problématisation se focalisent sur la dimension épistémologique de l'activité des élèves laissant dans l'ombre la dimension intersubjective qui prend une part importante dans les situations en classe. Ainsi, nous trouvons important dans ce deuxième chapitre de faire appel à d'autres concepts et de mobiliser d'autres outils qui nous permettront de comprendre les dynamiques des interactions entre élèves et enseignante qui sont fondamentales pour mettre en exergue et construire collectivement les problèmes géologiques en classe. C'est dans ce sens, que nous allons nous intéresser aux liens entre pratiques langagières et apprentissage. Nous allons plus explicitement préciser la conception du langage et les outils qui seront mobilisés pour rendre compte des activités langagières problématisantes en classe de SVT. Ainsi, nous viserons la mise en avant dans ce chapitre de ce en quoi la conception du langage choisie peut nous aider à comprendre comment les élèves peuvent ou non construire un savoir problématisé en classe de SVT.

Avant de nous concentrer sur la façon selon laquelle nous allons traiter les relations entre langage et apprentissage, nous allons nous positionner par rapport à certains travaux qui ont traité auparavant cette question.

1 La relation entre langage et apprentissage : des travaux qui s'inscrivent dans l'approche historico-culturelle de Vygotski

Un nombre considérable de travaux ont été instruits dans une approche historico-culturelle de développement humain de Vygotski (1934/ 1985). Selon Vygotski, c'est en s'appropriant les productions culturelles de la société à laquelle l'enfant fait partie, qu'il sera capable de construire en lui-même les fonctions psychiques supérieures (comme la pensée réflexive, etc...). D'après la théorie de Vygotski, le développement du psychisme humain, ne peut pas être considéré comme un processus uniquement interne. Au contraire, le développement de l'enfant nécessite une intériorisation des contenus culturels à travers la médiation de l'adulte considéré comme expert, et plus explicitement lors des interactions nouées entre adultes et enfants.

Parmi ceux qui se sont inspirés de la théorie historico-culturelle de Vygotski, nous citons à titre d'exemple Ducancel qui indique que la communication orale et écrite est fondamentale « *au progrès de la pensée scientifique et se confond avec lui, en particulier par les échanges, les controverses, les "disputes" qu'elle permet et par les formulations successives avec quoi se confondent les étapes de l'activité de résolution de problèmes* » (Ducancel, 1980, p. 5). Les travaux d'Astolfi montrent que le langage oral et écrit jouent un rôle fondamental dans la construction des savoirs scientifiques (Astolfi, 1986 ; Astolfi, Peterfalvi, et Vérin, 1991).

L'élargissement du nombre de travaux qui s'inscrivent dans une approche sociocognitive de Vygotski a conduit les recherches à se focaliser davantage sur les interactions sociales et leur importance dans l'apprentissage. Ainsi, Schneeberger précise que « *considérant que l'activité langagière des élèves renseigne sur leur activité cognitive, nous étudions le contenu des échanges langagiers dans le but de repérer les processus en jeu dans l'élaboration du savoir* » (Schneeberger, 2008, p. 91). Lhoste précise que le langage est « *constitutif et participe pleinement à l'activité dont il est agent* » (Lhoste, 2017, p. 110). C'est dans cet horizon que nous allons positionner notre travail en considérant les pratiques langagières comme fondamentales pour comprendre l'activité cognitive des apprenants et leur apprentissage en classe.

Suite à ces précisions, nous allons passer maintenant à expliciter la conception du langage qui sera mobilisée pour rendre compte des activités langagières problématisantes en classe de SVT.

2 La conception constructive du langage

Pour rendre compte des liens entre activités langagières et apprentissage scientifique, il est important de nous éloigner d'une conception structuraliste du langage. Cette conception considère le langage « *sans épaisseur* » (Jaubert et Rebière, 2012, p.2), « *servant à transporter l'information* » (Borzeix, 2001, p.31). Nous nous démarquons ainsi d'une conception qui assimile le langage à « *un code permettant de transmettre des idées préexistantes* » (Jaubert et Rebière, 2012, p.2), et le considère comme « *un instrument, que l'on a intérêt à rendre aussi transparent, aussi neutre que possible, assujetti à la matière scientifique (opérations, hypothèses, résultats) qui dit-on, existe en dehors de lui et le précède* » (Barthes, 1984/ 1993, p. 12). Il s'agit plutôt de nous inscrire dans une conception opérante du langage (Merleau-Ponty, 1968). Il s'agit en fait de nous inscrire dans une conception constructive du langage. Cette dimension envisage la capacité du langage à créer des mondes (François, 1993) : ces mondes ne sont pas donnés. Ce sont plutôt des mondes qui sont construits « *dans et par le langage* » (Jaubert & Rebière, 2012, p. 3). La conception constructive du langage envisage aussi la capacité du langage à construire « *des objets de discours en référence au monde objectif* » (Lhoste, 2008, p. 104). Ainsi, l'objet de discours est un construit (Grize, 1996) à travers « *le monde de signifiés, à travers des configurations* » et des reconfigurations sémantiques (les reformulations, les modifications...) que sont le langage (Coseriu, 2001, p.26).

En adoptant la capacité du langage à créer des mondes, on fait écho à l'activité de référenciation : « *La parole s'articule à ce qui n'est pas elle, à l'extralinguistique, en construisant à travers un mode de présentation linguistique un monde d'objets qui n'ont dans le langage que la propriété d'être mis en parole* (Fisher, 1999, p. 21) » (Nonnon, 2002, p.28). Dans ce cadre, nous voyons que « *la signification n'est pas dans la référence ni le sens du mot mais dans son / ses emploi(s)* (Wittgenstein, 1953/ 1961 ; Bakhtine, 1952-53-1984) » (Jaubert et Rebière, 2012, p.2).

La capacité du langage à créer des mondes et à construire des objets de discours, nous sépare alors de certaines pratiques qui condamnent « les ratures » (Jaubert et Rebière, 2012, p.3), les reformulations et les controverses qui sont favorables à la formulation des différentes argumentations et par suite à la construction d'un savoir problématisé, raisonné. En nous inscrivant dans cette conception du langage, nous pensons alors que l'étude des activités langagières en classe sera un choix intéressant qui pourra nous aider à comprendre comment les élèves peuvent ou non construire un savoir problématisé en classe. Cela va nous amener à expliciter dans la partie suivante, la forte compatibilité entre l'approche langagière choisie et le processus de problématisation. Cette section va nous permettre de consolider davantage notre choix qui prévoit d'étudier les activités langagières des élèves et de l'enseignante, pour comprendre comment les apprenants peuvent ou non construire un savoir problématisé en classe.

3 La compatibilité entre approche langagière choisie et le processus de problématisation

S'inscrire dans une dimension constructive du langage nous amène à mettre en lumière une forte compatibilité entre cette conception du langage et le cadre théorique de l'apprentissage par problématisation. Ainsi, quels sont les différents points de concordance entre la problématisation et notre dimension constructive du langage choisie.

3 - 1 Une conception dialogique cohérente avec une conception problématologique de Meyer

Admettre que le langage joue un rôle fondamental dans la construction des mondes et d'objets de discours, nous ramène à déduire que l'activité langagière est essentiellement dialogique. Cette conception est développée par Bakhtine qui considère « *ce qui importe ce n'est plus le mot ou quelque forme que ce soit, mais la circulation discursive dans laquelle la différence d'accentuation fonctionne comme ce qui fait sens* » (François, 1989, p. 43).

Bakhtine explicite le caractère dialogique du langage en indiquant que « *les frontières de l'énoncé concret, compris comme une unité de l'échange verbal, sont déterminées par l'alternance des sujets parlants, c'est-à-dire par l'alternance des*

locuteurs. Tout énoncé depuis la réplique brève jusqu'au roman ou au traité scientifique comporte un commencement absolu et une fin absolue : avant son début, il y a les énoncés des autres, après sa fin, il y a les énoncés-réponses des autres » (Bakhtine, 1984, p.277).

La structure dialogique des activités langagières nous conduit à considérer les discours comme « hétéroglossiques ». Cette notion d'hétéroglossie donne une grande importance à l'origine sociale contextuelle de l'activité langagière. Pour la mieux comprendre, nous faisons appel à Bakhtine (1978), pour qui chaque énoncé signale le contexte social dans lequel il est établi et il porte l'ensemble des valeurs partagées par la communauté discursive au sein de laquelle cet énoncé est tenu, « *même si ce partage est géré sur le mode de la polémique* » (Jaubert & Rebière, 2012, p.3-4). Ainsi, dans une situation d'énonciation, des contradictions peuvent être détectées dans le discours émis. Elles signalent les différentes voix qui émergent, résultant de l'environnement social auxquelles les « acteurs » de la communauté discursive (élèves, etc...) sont confrontés et qui essayent de les coordonner et les harmoniser pour créer des énoncés qui prennent en charge une partie ou un tout des données présentées : « *la vie sociale vivace et le devenir historique créent, à l'intérieur d'une langue nationale abstraitement unique, une multitude de mondes concrets, de perspectives, d'identiques éléments abstraits du langage se chargent de différents contenus sémantiques et axiologiques, et résonnent différemment* » (Bakhtine, 1978, p. 110). Dans notre travail, nous utiliserons le terme d'hétéroglossie alors pour désigner « *la présence simultanée, au sein d'un énoncé [...] d'une pluralité de voix d'origines contextuelles diverses ainsi qu'à leurs modalités de prise en charge énonciative* » (Jaubert, 2000, p.198).

L'hétéroglossie nous paraît compatible avec la première étape de la mise en place d'une problématisation. En effet, à partir d'un problème, les élèves sont amenés au départ à s'engager à proposer des premières solutions et/ ou à confronter plusieurs solutions possibles. C'est à ce niveau-là, qu'il va y avoir du côté langagier différentes voix, qui peuvent s'entendre en classe, et plusieurs points de vue qui peuvent être mis en scène (c'est le cœur de la notion de l'hétéroglossie).

Cette conception dialogique du langage nous amène aussi à examiner la distinction classique entre l'énonciation active et la réception passive d'un énoncé. En effet, le récepteur d'un énoncé montre une certaine « compréhension responsive » qui

l'oblige, selon le contexte de l'énonciation, à reconstruire la signification de cet énoncé : « *tout acte de compréhension est une réponse, dans la mesure où il introduit l'objet de la compréhension dans un nouveau contexte, le contexte potentiel de la réponse* » (Volchinov, 1977, p.101). C'est en fonction du contexte de l'énonciation, de ce qui a été déjà dit et ce qui est prévu dit qu'on peut générer un déplacement de signification. Ainsi, une répétition par exemple d'un énoncé déjà formulé auparavant ne représente pas une simple « reprise à l'identique », mais il y a une reconstruction de signification dans le fait de réutiliser l'énoncé (François, 1998). Dans une dimension dialogique du langage, ce déplacement de signification, nous paraît compatible avec la conception problématologique proposée par Meyer. Selon lui, « *les expressions isolées, détachées du contexte, sont en soi apocritiques et problématologiques*² » (Meyer, 1979, p.240). Ainsi, ce qui a le statut de solution peut avoir le statut de problème dans un autre contexte. C'est cette capacité pour la proposition de s'introduire dans des contextes différents en changeant de fonction tantôt apocritique tantôt problématologique, qui nous paraît compatible du côté langagier avec le déplacement de signification.

Mais quels sont les autres points de compatibilité entre l'approche langagière choisie et notre cadre théorique de l'apprentissage par problématisation ?

3 - 2 La cohérence entre l'autonomisation des énoncés du genre second avec l'autonomisation épistémologique du savoir

La communauté discursive scientifique produit différentes formes langagières spécifiques qui interviennent dans l'élaboration et la diffusion de nouvelles explications. Ces pratiques langagières correspondent à des genres de discours différents (elles peuvent varier des échanges informels à la communication institutionnelle). Ce concept de genre est emprunté à Bakhtine : « *Pour parler nous nous servons toujours des genres du discours, autrement dit, tous nos énoncés disposent d'une forme type et relativement stable, de structuration d'un tout* » (Bakhtine, 1984, p. 284). Il existe plusieurs genres de discours, mais selon les travaux de Bakhtine, on distingue essentiellement le genre de discours premier et le genre de discours second (Bakhtine, 1984, p. 267).

² : Meyer fait la distinction entre un savoir problématologique, c'est-à-dire un savoir du questionnement, du problème et un savoir apocritique qui est le savoir des réponses.

Les genres premiers sont « *peu élaborés, dans l'immédiateté de l'échange, les interactions de la vie quotidienne et ils sont étroitement liés à l'action* » (Jaubert & Rebière, 2012, p. 5). C'est ainsi que « *les discours premiers ont une structure qui est dépendante des actions non-langagières auxquelles ils s'articulent* » (Bronckart, 1996, p. 63).

Les genres seconds « *sont en revanche plus complexes. Ils recouvrent des pratiques langagières souvent écrites, mais pas uniquement, qui permettent de gérer des échanges culturels qui supposent la mise à distance de l'action et sa réorganisation, sur le plan langagier, selon des formes reconnues* » (Jaubert & Rebière, 2012, p. 5). Cette distinction permet de rendre compte de la transmutation subie par les genres premiers quand ils sont utilisés pour former des discours du genre second.

Ce passage des discours du genre premier à des discours du genre second est désigné selon Jaubert et Rebière par la *secondarisation*³ (2005). Bakhtine précise à ce niveau que les « *genres seconds absorbent et transmutent les genres premiers (simples) de toutes sortes, qui se sont constitués dans les circonstances d'un échange verbal* » (Bakhtine, 1984, p.267). On peut parler alors de l'existence de deux transformations marquantes subies par les discours du genre premier : ils se séparent d'une part du réel existant et d'une autre part, du réel des énoncés. Ceci nous amène à dire que les énoncés de genre second, font l'objet d'une structuration autonome (spécifiquement linguistique), par rapport à la situation et à l'action qui leur donne naissance (Bronckart, 1996, p. 63).

Cette autonomisation des énoncés du genre second nous paraît compatible avec l'autonomisation épistémologique du savoir. En fait, comme l'affirme Popper (1991), le savoir scientifique n'appartient pas à un monde des sujets. Au contraire, il s'inscrit dans « *un monde sans sujet connaissant* », un monde autonome dont les habitants sont les théories, les problèmes et les raisonnements critiques. Popper qualifie ce monde de troisième monde qu'il différencie d'un deuxième monde qui est le monde des expériences conscientes des sujets et d'un premier monde qui est le monde physique.

³ : En parlant de la secondarisation, la question fondamentale « *n'est pas de savoir si l'élève produit un genre premier ou second mais si, dans les ébauches d'appropriation des outils culturels et sémiotiques, un nouveau comportement cognitif et langagier s'élabore avec recours à des formes sémiotiques plus conventionnelles et peu à peu stabilisées, propres au champ disciplinaire et aux principes qui régissent sa fonction énonciative* » (Jaubert & Rebière, 2012, p. 5)

Il considère ce troisième monde comme le produit de l'activité humaine qui devient paradoxalement indépendante des humains mais qui rétroagit sur eux. Ainsi, l'activité scientifique est considérée comme un passage du deuxième au troisième monde et « *le savoir scientifique ne peut en rien se limiter aux solutions des problèmes. C'est un savoir problématique et raisonné* » (Orange Ravachol, 2010a, p. 6). Cette autonomisation du savoir qui se fait par l'accès à un savoir apodictique raisonné (voir le premier chapitre) nous paraît cohérente avec l'autonomisation des énoncés du genre second détaillé ci-dessus. Autrement, il nous paraît que la construction des contraintes et des nécessités lors de la mise en place d'une problématisation est accompagnée du point de vue langagier par une secondarisation

Dans cette section, nous avons essayé de montrer la compatibilité entre notre cadre théorique de l'apprentissage par problématisation et la conception du langage choisie. Cette cohérence nous paraît fondamentale pour pouvoir étudier l'apprentissage en classe. Ainsi, c'est par l'intérêt qui sera donné aux activités langagières des élèves et du professeur que nous pourrons comprendre comment les élèves ont pu construire ou non un savoir problématisé.

Suite à l'identification d'une forte cohérence entre le cadre théorique de l'apprentissage par problématisation et l'approche langagière choisie, il est temps de comprendre les conséquences de cette compatibilité sur le choix des outils utilisés pour analyser les situations en classe.

4 Les outils utilisés pour analyser les situations en classe

Nous allons utiliser différents outils, qui nous permettront d'analyser l'activité cognitive et langagière des élèves en classe.

Nous mobiliserons les outils issus de l'interactionnisme socio-discursif (Bronckart, 1985, 1996, 2007) afin de comprendre comment le discours est géré en classe. Ainsi, nous essayerons de mener une analyse des mécanismes de textualisation (liés à plusieurs types d'opérations comme la cohésion nominale et verbale assurées par la récurrence, les anaphores ou encore le changement du temps du verbe, etc...et la connexion assurée par les organisateurs textuels par exemple). Cette analyse peut nous fournir des informations sur les genres de discours qui sont émis

en classe et s'il y a transformation de ces genres de discours ou non durant l'avancement de la séquence étudiée, et si non ce qui limite cette transformation.

En tentant aussi une analyse de la prise en charge énonciative, nous viserons à identifier la présence ou non de différentes voix présentes dans les productions langagières des élèves et de l'enseignante, et est-ce que ces moments d'hétéroglossie (Bakhtine, 1978) sont orchestrés ou non. Et si non, qu'est-ce qui a bloqué cette orchestration.

Nous allons faire appel aussi aux différentes opérations logico-discursives proposées par Grize (1982,1990, 1996) dans ses ouvrages en nous intéressant essentiellement à l'étude des reformulations qui ont été produites en classe. Ces reformulations des élèves et de l'enseignante vont donner des informations sur la dynamique cognitive en situation de classe.

Conclusion

Nous avons pointé dans le premier chapitre le cadre théorique de notre étude qui correspond au cadre de l'apprentissage par problématisation en sciences de la Terre. Nous avons réussi dans ce chapitre à présenter des outils fondamentaux (comme l'espace de contraintes et l'actualisme) qui vont nous permettre d'outiller nos analyses didactiques. Dans ce deuxième chapitre, nous avons essayé de mettre en avant la place fondamentale du langage pour comprendre si les élèves ont pu construire ou non un savoir problématisé. Suite à ces fondements théoriques menés dans ces deux premiers chapitres et puisque le phénomène de la formation des chaînes de montagnes de collision représente notre objet d'étude, nous trouvons important de mener dans le troisième chapitre une analyse épistémologique qui vise à comprendre la manière dans laquelle les scientifiques actuels construisent le savoir de la formation des chaînes de montagnes de collision. Cela jouera le rôle de norme pour étudier ensuite les explications des élèves en classe.

CHAPITRE III. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION : UN ETAT DU SAVOIR ACTUEL

Introduction

Notre travail doctoral vise à comprendre comment les élèves de Terminale S (scientifique) s'engagent ou peuvent s'engager dans la construction du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision. Pour y parvenir, nous allons dans ce chapitre mettre en avant une analyse épistémologique qui cherche à comprendre la manière dans laquelle les scientifiques construisent le savoir actuel de la formation des chaînes de montagnes de collision, en nous inscrivant dans le cadre théorique de l'apprentissage par problématisation et en suivant la méthodologie décrite par Orange (2000), Orange Ravachol (2003), Lhoste (2008). Ces fondements épistémologiques joueront le rôle de repères pour comprendre ensuite l'activité des apprenants et de l'enseignante en classe. Ainsi, nous allons consacrer la première partie du chapitre pour comprendre la formation des chaînes de montagnes de collision, selon les géologues actuels dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques. Nous menons ensuite une modélisation de ce savoir dans le cadre de la problématisation. Pour la faire, nous nous référons à l'entretien que nous avons eu notamment avec Laurent Jolivet, professeur à Sorbonne université, chercheur à l'Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP).

1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes par les géologues actuels

Les chaînes de montagnes sont définies selon Hallam comme « *des structures allongées, de forme droite ou légèrement arquée, marquées par des zones de sédimentation et des types de déformation caractéristiques ; la présence de vastes plissements et de poussées verticales suggère une compression perpendiculaire à leur axe* » (Hallam, 1976, p. 125). Dans le cadre de la tectonique des plaques, la communauté scientifique actuelle reconnaît que les chaînes de montagnes de collision sont faites dans un contexte général de convergence des plaques

tectoniques : la lithosphère océanique porteuse d'une masse continentale (initialement formée au niveau des dorsales dans un régime distensif) va s'enfoncer dans l'asthénosphère à cause de l'augmentation de sa densité par rapport à celle de l'asthénosphère en s'éloignant de l'axe de la dorsale. Lorsque l'ensemble du domaine océanique disparaît par subduction, l'une de ses marges continentales peut être entraînée dans le manteau par la lithosphère océanique enfoncée. La densité de la lithosphère continentale (LC) [constituée de croûte continentale et du manteau lithosphérique] étant plus faible que celle de la lithosphère océanique (LO), la subduction de la masse continentale devient alors de plus en plus difficile et se termine par se bloquer. Le raccourcissement imposé par la convergence ne peut plus être absorbé par subduction. La collision de deux lithosphères continentales prend le relais. Lors de la collision, le raccourcissement imposé par la convergence provoque des chevauchements et des empilements de nappes à l'origine des reliefs et d'un épaissement crustal. Voici ce que Jolivet nous dit lors de l'entretien qu'il nous a accordé le 25 novembre 2019 : « ...une fois...l'océan a disparu, la marge continentale qui passe en subduction. Alors, c'est d'abord la partie amincie de la marge continentale puis la partie la plus épaisse, et ça c'est de plus en plus difficile à faire parce que la lithosphère continentale est légère. Donc, quand elle est mince, il y a beaucoup de manteau et peu de croûte continentale, elle est encore dense. Comme ça, ça s'enfouit facilement, mais quand elle est plus épaisse, c'est plus difficile parce qu'il y a toute cette épaisseur de croûte continentale qui est légère. Voilà. Ça va faire que les unités crustales vont refuser de subduire. Pas de refuser, elles vont commencer à subduire même des fois beaucoup. Et une fois elles vont se détacher et ça ce qui va épaissir la croûte parce que vous mettez des unités crustales les unes sur les autres, ça qui va faire le relief, le relief ... c'est le fait que tu mets des roches crustales les unes sur les autres et donc vous épaissez la croûte qui elle, elle est légère et ça vous fait un relief. » (Annexe 1, Entretien avec L. Jolivet, 25 novembre 2019, interventions 117, 119).

Pour construire ce savoir actuel de la formation des chaînes de montagnes de collision, les chercheurs positionnés dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, se sont basés sur des observations de terrain. Parmi ces observations, nous citons « les ophiolites ». En effet, les géologues actuels ont pu identifier dans un nombre important de chaînes de montagnes la présence d'un assemblage particulier de roches ultrabasiques et basiques comme le basalte (généralement

sous forme de laves sous-marines en coussins), le gabbro et la péridotite.

La composition et la structure des roches qui forment cet assemblage particulier nommé ophiolites suggèrent qu'elles proviennent de la lithosphère océanique, « *arrachées par cisaillement aux plaques descendantes, et repoussées de force dans les roches subjacentes sous l'effet d'une compression* » (Hallam, 1976, p.127). Dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, les géologues actuels considèrent en effet les ophiolites comme des restes d'une lithosphère océanique disparue par enfouissement dans l'asthénosphère, aujourd'hui imbriquées dans les chaînes de montagnes. La présence de cet assemblage de roches dans certaines chaînes de montagnes a permis aux géologues de conclure alors que l'histoire des chaînes de montagnes de collision comprend un épisode d'ouverture océanique (dans un contexte d'une dorsale océanique).

D'autres observations faites par les géologues ont permis de mieux comprendre la formation des chaînes de montagnes de collision. Les chercheurs ont remarqué la présence dans certaines chaînes de montagnes, d'un ensemble de roches sédimentaires métamorphisées (schistes) comportant des minéraux caractéristiques d'une haute pression - basse température (comme le glaucophane). Ces minéraux caractéristiques de Haute pression-Basse température sont formés sous les fosses océaniques (endroit de l'enfoncement de la lithosphère océanique par subduction) qui semblent être les seuls lieux où une telle valeur de pression et de température puissent être atteintes (Hallam, 1976, p. 126).

Pour expliquer la présence de ces minéraux caractéristiques d'une Haute pression-Basse température dans les chaînes de montagnes, les géologues supposent que les roches de la lithosphère océanique descendent à travers la plaque enfoncée (par subduction). Ces roches continuent leur mouvement de descente « *tant que leur résistance [...] est suffisante pour compenser la flottabilité qui les rappelle vers la surface. Dès lors qu'une zone de décollement est formée, elles remontent vers la surface* » (Jolivet, 2011, p. 47-48). Ce mécanisme est nommé l'exhumation.

Suite à la présentation du savoir actuel de la formation des chaînes de montagnes de collision, nous essayerons maintenant de modéliser ce savoir selon le cadre théorique de problématisation. Ainsi, nous viserons à identifier les nécessités associées au phénomène de la formation des chaînes de montagnes de collision et

qui sont construites par les géologues actuels. C'est avec ces repères épistémologiques que nous allons nous intéresser ensuite au fonctionnement d'élèves en classe de Terminale S.

2 Modélisation de la formation des chaînes de montagnes de collision dans le cadre de la problématisation

Dans cette partie, nous cherchons à comprendre comment les géologues actuels construisent le problème de la formation des chaînes de montagnes de collision (comme l'Himalaya) qui représente un cas particulier⁴ du problème de la formation des chaînes de montagnes. Cette étude est d'autant plus complexe, que dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, l'orogénèse (la formation des reliefs montagneux) conduit à travailler plusieurs sous problèmes.

Méthodologie :

En référence aux travaux d'Orange Ravachol (2003) sur la problématisation en sciences de la Terre, nous cherchons à préciser « l'espace de contraintes » du problème de la formation des chaînes de montagnes selon les géologues actuels. À partir des contraintes théoriques (dont certaines relèvent du registre explicatif) et empiriques mises en jeu, nous allons alors tenter d'identifier les nécessités portant sur les modèles explicatifs possibles, tout en nous appuyant dans notre analyse sur le fait que « *les contraintes et nécessités n'existent qu'en tension les unes avec les autres* » (Orange-Ravachol, 2003, p. 194).

Les nécessités sur le modèle

Parmi les nécessités que les géologues actuels mobilisent pour expliquer le problème de la formation des chaînes de montagnes de collision, nous pouvons identifier :

- La nécessité d'une disparition des plaques

En 1960, Hess a proposé la théorie de l'expansion océanique à partir de la découverte des fonds océaniques et des dorsales médio-océaniques avec leur rift

⁴ : Les géologues distinguent des chaînes de montagnes de collision de blocs continentaux (ex : l'Himalaya), des chaînes de montagnes liées à la subduction d'une plaque océanique sous une plaque porteuse d'un continent (c'est l'exemple de la cordelière des Andes) et des chaînes de montagnes d'obduction où la plaque océanique ne s'enfonce pas sous la plaque porteuse d'un continent, mais elle vient au contraire la chevaucher (Jolivet, 1997).

médian d'aspect extensif. Cette théorie est avancée par Hess en se basant aussi sur l'existence des zones actives où les foyers des séismes s'alignent selon des plans inclinés, découverts avant la seconde guerre mondiale par le géophysicien japonais Wadachi, ensuite redécouverts plus tard par le sismologue américain Benioff,

Hess essaye de regrouper ces différentes découvertes en une seule hypothèse dans laquelle il explique que les fonds océaniques sont en renouvellement constant. La dorsale est considérée comme le lieu de la formation continue d'une nouvelle lithosphère océanique (dans un cadre distensif) par injection des matières d'origine mantellique.

Le phénomène qui aboutit à la création de la lithosphère océanique au niveau des dorsales océanique est nommé l'accrétion.

En supposant le rayon terrestre constant, la lithosphère océanique formée par expansion à partir des dorsales, doit nécessairement disparaître ailleurs : « *si l'on suppose constant le rayon terrestre, la croûte créée par l'expansion à partir des dorsales doit être détruite ailleurs* » (Hallam, 1976, p. 106) : « *Sur un globe de rayon constant, formation et destruction de croûte s'équilibrent* » (ibid, p.109).

La mise en tension de contraintes de la constance de la surface du globe terrestre et de l'accrétion océanique impose une première nécessité : l'obligation d'une disparition de la lithosphère océanique pour garder le globe terrestre constant en dimension.

C'est en rapport avec cette nécessité que Jolivet nous dit : « *On est d'accord avec ça aujourd'hui, c'est-à-dire, le volume de la Terre ne change pas* (Annexe 1, Entretien avec L. Jolivet, 25 novembre 2019, intervention 6) « *Au cours du temps, puisqu'on a de l'expansion des fonds océaniques le long des dorsales, il faut que cette nouvelle lithosphère qui est fabriquée disparaisse quelque part* » (Annexe 1, intervention 8).

Mais où et comment se fait la « disparition » de cette lithosphère océanique ?

- Nécessité d'un enfoncement de la lithosphère océanique

Pour répondre à la question du lieu de la disparition de la lithosphère océanique, Hallam écrit qu'on sait depuis longtemps que « *l'activité tectonique à l'intérieur de la*

lithosphère se trouve confinée presque exclusivement dans une série de zones étroites » (Hallam, 1976, p. 108). Parmi ces zones actives, il en est une où les foyers des séismes s'alignent selon un plan incliné. Il s'agit du plan Wadachi-Benioff (communément nommé le plan de Wadati-Benioff) qui pourrait être associé à la figure de l'enfoncement de la lithosphère océanique dans l'asthénosphère. La subduction est considérée alors « *comme complémentaire de l'accrétion où se crée la lithosphère océanique, et qui permet, en compensation de maintenir le globe terrestre dans ses dimensions supposées fixes »* (Aubouin, 2010, p. 1). C'est une solution plausible répondant à la nécessité d'une disparition.

Jolivet nous donne des exemples de contraintes empiriques qui servent l'idée de l'enfoncement de la lithosphère océanique dans l'asthénosphère par la subduction comme « la vitesse de subduction » mesurée par le GPS (la géodésie) : « *La géodésie spatiale, le GPS qui montre que...Et avec le GPS, on peut mesurer directement les vitesses de subduction.* » (Annexe 1, Entretien avec L. Jolivet, 25 novembre 2019, intervention 22) et la détermination de la vitesse des failles, de leur fonctionnement et de leur géométrie grâce aux séismes : C'est « la sismotectonique » qui « *fait le lien entre les séismes et ce qu'on voit sur le terrain, les failles qu'on peut étudier sur le terrain, comment elles fonctionnent, à quelle vitesse, quelle géométrie elles ont ? Ça pour comprendre le mécanisme, et ça aussi pour avoir une idée par exemple de la récurrence de séismes sur les grandes failles »* (Annexe 1, intervention 190).

Mais quels sont les mécanismes qui conduisent à la « disparition » des plaques par enfoncement ?

Les géologues dont Hess expliquent que les plaques sont entraînées passivement à la surface des cellules de convection (Bouchardon, 2013, p. 11). Plusieurs chercheurs ont proposé ensuite des modèles (Exemple : Turcotte et Oxburgh, 1967; Jacoby, 1970, 1981) qui ont nié cette idée de l'enfoncement passif de la lithosphère océanique à la surface des cellules de convection comme sur des tapis roulants (Deparis, 2011a). Ils soulignent par contre que les plaques « *prennent une part active de la convection »* (ibid).

En fait, les modèles proposés montrent que la lithosphère océanique au fur et à mesure de son refroidissement, en s'éloignement de l'axe de la dorsale, devient plus dense par rapport à l'asthénosphère provoquant ainsi son enfoncement spontané

dans le manteau (Lévy, 2009, p. 17).

Pour comprendre plus explicitement comment les plaques s'enfoncent par instabilité gravitationnelle, il est important de faire un focus sur l'isotherme 1300°C. En effet, l'isotherme 1300°C, matérialise la partie basale des plaques (la limite lithosphère-asthénosphère ou lithosphère-manteau asthénosphérique). C'est une « *limite thermique de part et d'autre de laquelle les péridotites changent de comportement, et non d'un changement de nature des roches* » (Jolivet, 2011, p. 24-25). Plus explicitement, l'isotherme 1300°C marque la limite entre le manteau lithosphérique composé par de la péridotite rigide avec le manteau asthénosphérique formé par de la péridotite ductile. Cette limite thermique joue un rôle primordial dans l'explication de l'enfoncement d'une plaque sous l'autre : « *Sous l'axe de la dorsale, l'asthénosphère chaude qui atteint des températures voisines de 1300°C (ici le manteau partiellement fondu) est directement au contact de la croûte* » (Jolivet, 1997, p. 47).

En s'éloignant de la dorsale, l'isotherme 1300°C « *s'enfonce au sein du manteau, et donc la lithosphère s'épaissit au dépend de l'asthénosphère. Cet épaississement et la contraction thermique des matériaux de la lithosphère alourdissent celle-ci* » (ibid) la rendant plus dense et entraînant son enfoncement. L'instabilité gravitationnelle (par augmentation de la densité de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale) est une solution possible pour répondre à la nécessité d'enfoncement de la lithosphère océanique.

Pour le mécanisme de l'enfoncement de la lithosphère océanique dans l'asthénosphère, plusieurs recherches dont la plus connue est celle de Forsyth et Uyeda (1977), a montré l'existence (autre que l'instabilité gravitationnelle) de « forces motrices » qui favorisent la plongée de la lithosphère océanique.

Il s'agit en fait de la force de poussée à la ride (ridge push) qui provient selon Jolivet (1997) « *de la variation latérale de densité de la plaque océanique quand on s'éloigne de la ride* ». Elle correspond alors à une force distribuée sur l'ensemble de la plaque et « *est une fonction de l'âge de la plaque* » (Jolivet, 1997, p. 146).

L'autre force qui aide au déplacement de la lithosphère océanique correspond à la traction exercée par la plaque plongeante (« slab pull ») dans le manteau. Cette force dépend aussi de l'âge de la plaque enfouie (Jolivet, 1997, p. 146).

Lors de notre entretien avec Jolivet, celui-ci nous a précisé que la question du mécanisme de l'enfoncement de la lithosphère océanique dans les zones de

subduction n'est pas encore résolue. Il y a une grande discussion au sein de la communauté scientifique sur l'origine de l'enfoncement de la lithosphère océanique : « *Alors, il y a sans doute deux choses différentes : d'abord, elle n'est pas résolue la question d'initiation de la subduction. Il avère qu'il y a deux mécanismes possibles, la plus simple [...] c'est effectivement, le moteur principal de la subduction c'est la densité de la lithosphère, c'est une instabilité gravitaire, donc la lithosphère la plus dense passe en subduction* », « *mais il peut y avoir [...] des endroits où la lithosphère qui va subduire, subductée, elle va pousser pour passer en subduction, c'est pas le poids de la lithosphère mais qu'on pousse dans les côtés* », « *des forces horizontales qui sont transmises dans la lithosphère qui forcent la subduction* » (Annexe 1, intervention 42, 44, 48).

En conclusion, nous pouvons dire que l'instabilité gravitationnelle (par augmentation de la densité de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale) et les forces motrices sont des solutions possibles pour répondre à la nécessité d'un enfoncement de la lithosphère océanique.

L'étude de la convergence lithosphérique dans le contexte de la formation des chaînes de montagnes de collision est d'autant plus complexe que dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, l'orogénèse (la formation des reliefs montagneux) conduit à travailler plusieurs « sous problèmes ». Parmi eux, nous avons la position émergée et « perchée », au sein des massifs montagneux, de lambeaux de roches caractéristiques de la lithosphère océaniques (les ophiolites) et de fossiles marins. Pour expliquer cette position, les géologues mobilisent d'autres contraintes et construisent de nouvelles nécessités :

- Nécessité de la formation des roches de la lithosphère océanique dans un contexte d'une dorsale océanique

Orange-Ravachol (2003) a donné des exemples de contraintes empiriques qui peuvent servir cette nécessité construite dans le cadre de la tectonique des plaques. Il s'agit par exemple de « *prélèvements d'échantillons utiles pour faire du paléomagnétisme* » ou encore « *l'étude des fossiles et des nanofossiles* » (Orange-Ravachol, 2003, p. 197). Jolivet nous a parlé essentiellement des « *failles normales* » qui sont observées dans les chaînes de montagnes et qui ont fonctionné pendant la phase de rifting lors d'un processus d'extension. Parmi les autres contraintes empiriques qui peuvent servir cette nécessité, nous avons la présence au sein

des massifs montagneux, de lambeaux de roches caractéristiques de la lithosphère océanique : les ophiolites. Il est important de préciser ici que pour comprendre la formation de ces roches ophiolitiques présentes dans certaines chaînes de montagnes, les géologues actuels ont eu recours dans leur explication à « l'actualisme de premier niveau » (Orange Ravachol, 2003). En effet, Nicolas disait « *Avec l'exploration systématique des océans dans les années soixante que l'analogie entre ophiolites et la lithosphère océanique fut acceptée* » (Nicolas, 1999, p. 92) permettant ainsi à la communauté scientifique actuelle de reconnaître une origine océanique aux ophiolites⁵.

- Nécessité d'un charriage

Pour expliquer la position perchée au sein des massifs montagneux, de roches caractéristiques de la lithosphère océanique, les géologues mettent en jeu d'autres contraintes empiriques comme le pendage des formations rocheuses, les plans de schistosités au sein des roches, les « failles inverses », « les chevauchements », ou encore « les grands plis » qui conduisent à envisager des compressions et des déformations, voire des charriages⁶. Jolivet nous a dit qu'on « *ne peut pas voir tout le scénario du charriage* » (Annexe 1, intervention 196). C'est un phénomène qui demande un temps long non perceptible par l'homme. Mais il a donné des indices de terrain [Exemple : « Failles inverses », « chevauchements » (Annexe 1, intervention 200)] ou encore de outils de l'imagerie sismique [Exemple : « *GPS, profil sismique, tomographie sismique* » permettant la mesure de « *la vitesse à*

⁵ : Pour le scénario de la mise en place des ophiolites, A. Michard dans l'entretien réalisé par Orange-Ravachol (2003), caractérise au début « un régime de divergence et formation d'un océan » (Orange-Ravachol, 2003, p. 192).

Lors de notre entretien avec lui, Jolivet nous a parlé de la phase initiale de l'ouverture de l'océan à partir « d'un rift continental » Où « on n'a pas encore de lithosphère océanique » (Entretien N 1, intervention 202). Il a ajouté que les vitesses de l'ouverture de l'océan « mesurées très bien aujourd'hui » « ne sont pas très rapides. Elles sont inférieures à 1 cm/an » (Annexe 1, Entretien avec L. Jolivet, 25 novembre 2019, intervention 202).

⁶ : Il est important d'indiquer que L. Jolivet nous a précisé que dans les chaînes de montagnes, il y a des nappes de charriages qui correspondent à la partie océanique et d'autres nappes qui correspondent à la partie continentale : « *il y a des nappes de charriage qui correspondent à la partie océanique : la nappe ophiolitique va être obductée [...] Et aussi il y a des nappes de charriage dans la croûte continentale [...] qui amènent des unités crustales les unes sur les autres* » (Annexe1, Entretien avec L. Jolivet, 25 novembre 2019 , intervention 115).

laquelle se déplace les unités sur les autres » (Annexe 1, intervention 196, 198)] qui montrent aux chercheurs que le phénomène de charriage est en cours de réalisation. Le chercheur ici ne voit pas le charriage se réaliser en sa totalité devant nos yeux mais il considère les failles inverses, les chevauchements ou encore la vitesse de déplacement des unités les unes sur les autres comme un indice d'un charriage en cours.

Dans d'autres parties de l'entretien, Jolivet fait encore référence à l'actuel en disant qu' « *on ne connaît pas des zones actuellement en obduction aujourd'hui* ». Par contre, « *pour faire l'obduction, il faut déformer la lithosphère océanique pour qu'elle se casse et que cette lithosphère aille sur la lithosphère continentale* » (Annexe 1, intervention 100). Parmi les rares exemples de ces « *déformations intraocéaniques compressives en cours de formation* » (Jolivet, 1997, p. 220), il nous a parlé de la zone située « *au sud de l'Inde* » qui montre « *des déformations, des grands plis qui sont à l'échelle de la centaine de Km de la lithosphère et associés à ces grands plis on a pleins de failles inverses* ». « *C'est une zone compressive assez large qui fait peut-être 1000 Km de large au sud de l'Inde* » (déformation répartie dans l'espace), « *c'est une limite pas très nette et on se dit peut-être un jour il y aura une zone de subduction et qu'elle commencera peut-être par l'obduction* » (Annexe 1, intervention 100).

Cet exemple donné par Jolivet est caractérisé par :

-L'ampleur spatiale de cette zone compressive.

-Cette zone ne représente que la phase de démarrage du phénomène d'obduction.

Par ces caractéristiques qui marquent des difficultés de temps et d'espace, le recours à l'actualisme d'analogie fait problème : Pour saisir le phénomène de charriage en sa globalité, il est nécessaire de faire appel à un temps long. Les chercheurs recourent alors à « l'actualisme de deuxième niveau » (Orange Ravachol, 2003). C'est ce que pensait aussi Nicolas : le charriage est un événement difficile à reconstituer vu son ampleur spatiale et parce que « *nous ne connaissons aucun exemple montrant clairement l'extraction actuelle d'une ophiolite à partir d'un océan* » (Nicolas, 1999, p. 94).

- Nécessité d'une exhumation

Pour expliquer la position perchée au sein des massifs montagneux, de roches caractéristiques de la lithosphère océanique, les géologues (Exemple : Jolivet) mettent en jeu d'autres contraintes empiriques en interaction avec des contraintes théoriques (qui sont toutes construites dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques). Dans notre entretien, Jolivet nous a donné un exemple de ces contraintes empiriques : il s'agit de la présence « *des roches océaniques* » « *métamorphiques de HP-BT* » dans certains sommets des chaînes de montagnes. Plus explicitement, puisqu'il y a une présence dans certaines chaînes de montagnes (exemple : Les Alpes [Le Briançonnais]) des roches océaniques marquant un métamorphisme de HP-BT caractéristique des zones de subduction, il est nécessaire qu'il y a eu remontée d'une partie de roches de la lithosphère océanique subduite qui a subi des conditions de HP-BT : C'est ce qu'on appelle l'exhumation.

Pour mieux comprendre le mécanisme de l'exhumation, Jolivet nous a précisé que les géologues actuels pensent que « *dans la zone de subduction, que ce soit la lithosphère océanique ou la lithosphère continentale, alors la lithosphère elle va amener avec elle des sédiments, ou des roches magmatiques, elle va amener jusqu'à des profondeurs très variables selon les unités, jusqu'à ce que le différentiel de densité entre ces roches qui plongent et l'environnement, c'est-à-dire le manteau en gros, soit suffisamment faible pour que ces roches puissent continuer à rester attachées à la lithosphère, et il y a un moment où aux différentes raisons, le contact entre ces roches qui sont enfouies et la lithosphère qui descend va être fragilisé par, par exemple des fuites pour transformer la roche et la rendre plus faible et du coup elles vont se détacher de la lithosphère qui plonge et comme elles sont plus légères, elles vont remonter dans l'interface entre deux plaques* » « *Ce qu'on appelle le canal de subduction* », « *Donc, elles descendent avec la lithosphère jusqu'à un certain point, puis à un moment lorsqu'elles atteignent le pic de pression, elles vont se détacher et remonter* » (Annexe 1, intervention 80, 82, 84).

- Nécessité d'un passage de régime tectonique (d'une divergence à une convergence)

Puisqu'il est nécessaire d'envisager d'un côté la formation des roches d'origine océanique dans un cadre distensif [nécessité 1] et de considérer d'un autre côté la transformation de roches en roches métamorphiques dans un contexte de

convergence [nécessité 2], le passage du régime tectonique (d'une divergence à une convergence) est donc une nécessité qui découle de deux premières nécessités (Orange Ravachol, 2003, p. 195).

Jolivet nous a donné des exemples de contraintes empiriques de terrain qui aident les scientifiques à comprendre la chronologie du scénario de la formation des chaînes de montagnes (« *ce qui vient avant, ce qui vient après* ») et par suite comprendre le passage d'un régime de divergence à un régime de convergence. Il nous a parlé surtout des « *failles normales trouvées dans les chaînes de montagnes* » et qui « *sont découpées par failles inverses ou elles sont plissées parce qu'on est en compression* » (Annexe 1, intervention 212).

Ces observations (comme le plissement de failles normales) ne peuvent pas se faire d'un jour à un lendemain, mais elles demandent un temps long nécessaire pour le basculement d'un régime à un autre.

Pour comprendre le changement de régime tectonique, Orange-Ravachol (2003) a parlé suite à son entretien avec Michard, de la mise en jeu aussi de l'actualisme d'analogie qui « *s'opère vis à vis des travaux de laboratoire sur les domaines P, T de stabilité des minéraux* » (Orange-Ravachol, 2003, p. 194). Ces études de laboratoire qui essaient de déterminer « *l'évolution d'associations de minéraux du métamorphisme* » permettent « *de repérer des marques d'un enfoncement continu ou d'une remontée continue et envisager entre ces différentes périodes d'évolution un changement de régime* » (ibid, p. 193).

Michard n'élimine pas aussi un changement de mouvements à cause des phénomènes plus catastrophiques, brutaux (ibid, p. 194).

La **figure.6** propose l'espace de contraintes théoriques et empiriques que les géologues actuels peuvent construire en se basant sur les explicitations présentées ci-dessus. Les chercheurs actuels s'inscrivent dans le cadre global de la tectonique des plaques. Ils mobilisent les deux types d'actualisme (de premier niveau et de deuxième niveau, Orange Ravachol, 2003) « dans leurs rapports avec les nécessités sur le modèle » de la formation des chaînes de montagnes de collision.

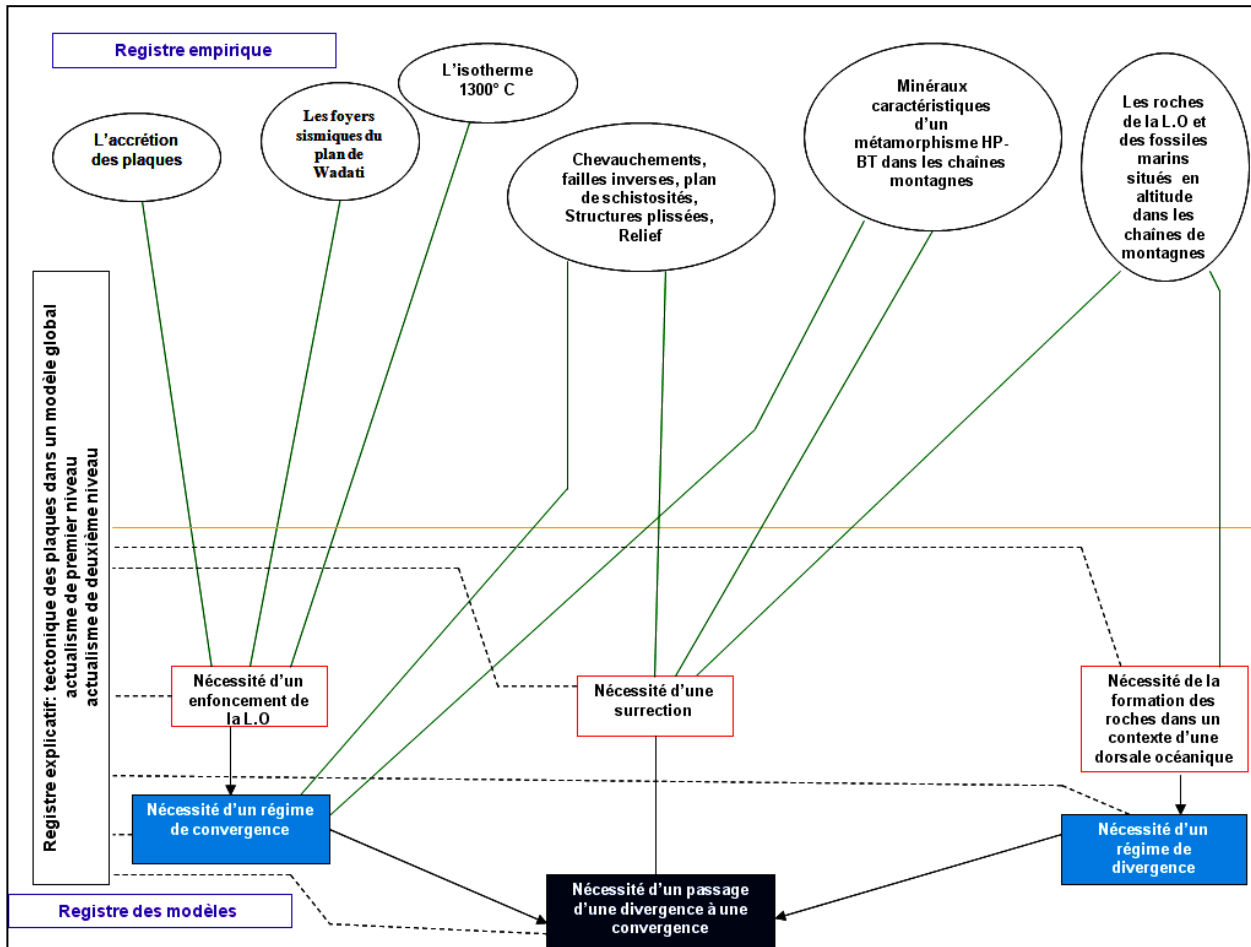


Fig.6. Problème de la formation des chaînes de montagnes de collision : espace de contraintes des chercheurs.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une analyse épistémologique qui nous a permis de comprendre la manière dans laquelle les géologues construisent le savoir actuel de la formation des chaînes de montagnes de collision en nous inscrivant d'une part dans le cadre théorique de la tectonique des plaques et d'autre part dans le cadre de la problématisation. Ainsi, dans le sillage des travaux d'Orange Ravachol (2003), nous avons pu identifier les contraintes et les nécessités associées à ce phénomène construites par les géologues et les registres explicatifs qu'ils mobilisent pour construire les explications géologiques. Parmi les nécessités construites par les géologues actuels, nous citons :

La nécessité d'une disparition des plaques : Partant de l'idée que le globe terrestre n'est pas en expansion, si les plaques s'agrandissent d'un côté (elles se renouvellent

au niveau des dorsales), il est nécessaire qu'elles disparaissent ailleurs pour garder la constance de la surface du globe terrestre.

La nécessité d'un enfoncement des plaques tectoniques : dans le cadre de la tectonique des plaques, les géologues ont détecté une zone active où les foyers des séismes s'alignent selon un plan incliné (plan de Wadati- Benioff) qui pourrait être associé à la figure d'enfoncement d'une plaque sous une autre.

Pour expliquer les mécanismes qui conduisent à la disparition des plaques par enfoncement, les géologues mobilisent d'autres contraintes. En effet, l'isotherme 1300°C (c'est la limite entre lithosphère- asthénosphère) qui est une limite thermique de part et d'autre de laquelle il y a un changement du comportement mécanique des roches et non pas d'un changement de nature de roches (Jolivet, 2011, p. 24-25), joue un rôle fondamental dans l'explication de l'enfoncement d'une plaque sous une autre. En effet, « *Sous l'axe de la dorsale, l'asthénosphère chaude qui atteint des températures voisines de 1300°C (ici le manteau partiellement fondu) est directement au contact de la croûte. La lithosphère n'est alors constituée que de la croûte* » (Jolivet, 1997, p. 47). En s'éloignant de la dorsale, l'isotherme 1300°C « *s'enfonce au sein du manteau et donc, la lithosphère s'épaissit aux dépens de l'asthénosphère. Cet épaississement et la contraction thermique des matériaux de la lithosphère alourdissent celle-ci* » (Jolivet, 1997, p. 47) la rendant plus dense et entraînant son enfoncement. L'instabilité gravitationnelle (par augmentation de la densité de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale) ou encore les forces motrices (voir **pp. 46- 47** de ce chapitre) sont des solutions possibles pour répondre à la nécessité d'enfoncement.

Dans ce chapitre, nous avons précisé que l'étude de la convergence lithosphérique dans le contexte de la formation des chaînes de montagnes de collision est d'autant plus complexe que l'orogénèse (et la tectogénèse) conduit à travailler plusieurs « sous-problèmes » et à mobiliser en particulier de nouvelles contraintes empiriques. Parmi ces « sous-problèmes », nous avons la position émergée et « perchée », au sein des massifs montagneux, de lambeaux de roches caractéristiques de la lithosphère océanique (les ophiolites) et de fossiles marins. Cela permet de construire la nécessité d'une formation de ces roches dans le contexte d'une dorsale océanique (accrétion). La mise en jeu d'autres contraintes empiriques comme le pendage des formations rocheuses ou encore les plans de schistosités au sein des roches conduisent à envisager des compressions et des déformations, voire des

charriages. La présence dans ces roches « perchées » de minéraux caractéristiques d'un métamorphisme haute pression – basse température (HP-BT) oblige à penser que ces roches ont subi des transformations dans les conditions d'un enfouissement. Toutes ces données pétrologiques, tectoniques et sismiques orientent vers la mobilisation articulée de plusieurs processus : l'accrétion océanique, la subduction, l'exhumation (c'est-à-dire « remontée vers la surface » des roches de la lithosphère enfouie, à travers « le canal de subduction » (Jolivet, 2011, p. 8) et la collision de masses continentales conduisant à la surrection (c'est-à-dire un soulèvement orogénique entraînant la formation de relief). Puisqu'il est nécessaire d'envisager d'un côté la formation des roches d'origine océanique dans un cadre distensif [nécessité1] et de considérer, d'un autre côté, la transformation de ces roches en roches métamorphiques dans un contexte de convergence (subduction) [nécessité 2], le passage du régime tectonique (d'une divergence à une convergence) est donc une nécessité qui résulte des deux premières nécessités (voir l'espace de contraintes d'un géologue pour la mise en place des ophiolites, Orange Ravachol, 2003, p. 199).

Nous avons vu aussi que les géologues font appel dans leur explication à l'actualisme de premier niveau (pour comprendre par exemple la formation des ophiolites) et à l'actualisme de deuxième niveau (pour saisir par exemple le phénomène de charriage dans sa globalité).

Ces contraintes et ces nécessités construites ainsi que le registre explicatif mobilisé par les géologues actuels pour expliquer la formation des chaînes de montagnes de collision (précisés ci-dessus), joueront le rôle de repères épistémologiques qui vont nous aider à comprendre les explications des élèves en classe.

Suite à l'explicitation de ces références épistémologiques, il est temps maintenant d'étudier le phénomène de la formation des chaînes de montagnes dans le cadre de l'histoire des sciences. Ainsi, nous tentons dans le prochain chapitre de représenter les différents modèles explicatifs liés à ce phénomène, qui ont été construits par les scientifiques dans les cadres théoriques anciens à récents. Nous essayerons alors d'identifier les points de discussion portés sur chaque modèle ainsi que les conditions de possibilité qui ont permis l'émergence d'autres modèles explicatifs (jusqu'à celui proposé par les scientifiques actuels et qui a été traité en détails dans ce troisième chapitre). Nous viserons par cette étude à montrer la complexité de

l'explication de la formation des chaînes de montagnes. Cela peut nous aider à comprendre les difficultés rencontrées chez les élèves lors de l'analyse didactique.

CHAPITRE IV. ETUDE DE LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DANS LE CADRE DE L'HISTOIRE DES SCIENCES

Introduction

Notre recherche vise à comprendre comment les lycéens de Terminale S, peuvent s'engager dans la construction du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision en classe. Pour y parvenir, nous allons essayer dans ce quatrième chapitre d'étudier la formation des chaînes de montagnes dans le cadre de l'histoire des sciences. Autrement, nous tentons de comprendre ce phénomène, construit par les scientifiques dans les cadres théoriques plus anciens, tout en pointant notre attention sur les ruptures, et les basculements d'idées et des problématiques qui ont abouti au changement des modèles explicatifs construits. Pour chaque modèle explicatif, nous viserons à identifier les contraintes empiriques et théoriques mobilisées et le registre explicatif utilisé, qui ont permis la construction d'autres nécessités et par suite le changement d'un modèle explicatif à un autre.

Nous cherchons par cette analyse historique, à montrer la complexité de l'explication de la formation des chaînes de montagnes tout en essayant de présenter les points de discussion portés sur chaque modèle ainsi que les conditions de possibilité qui ont permis aux scientifiques de remanier les modèles. Cela, nous aidera dans l'analyse didactique à comprendre les difficultés que les élèves pourront rencontrer dans la construction de ce phénomène et les conditions de possibilité⁷ qui leur permettent de construire des nouvelles modélisations. Nous pensons de même, que les différentes explications de la formation des chaînes des montagnes fondées sur des repères historiques peuvent se retrouver spontanément chez les élèves en classe.

Commençons tout d'abord comprendre comment les scientifiques de XVII^{ème} siècle expliquent-ils la formation des chaînes de montagnes.

⁷ : Chez Canguilhem et Foucault « les conditions de possibilité peuvent recouvrir tout autant des conditions intellectuelles (qui renvoient chez Foucault à une épistémè) et/ou techniques qui permettent l'émergence de nouveaux concepts » (Lhoste, 2008, p. 160).

1 L'explication de la formation des chaînes de montagnes par les neptunistes

Nous allons consacrer la première partie de cette section pour comprendre la formation des chaînes de montagnes selon les neptunistes. Cela va nous permettre ensuite de mener une modélisation de ce savoir dans le cadre de la problématisation.

1 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes par les neptunistes

Le neptunisme est une théorie explicative qui considère les eaux marines comme l'agent fondamental de la formation des matières du globe terrestre, dont les chaînes de montagnes. Parmi les pionniers de la théorie neptunienne, nous citons principalement De Maillet et Werner. Ce dernier est considéré comme le fondateur du neptunisme.

En se basant sur « *un scénario d'une terre primitivement recouverte par un océan, qui serait lentement retiré jusqu'à sa position initiale* » (Savaton, 2016, p. 30), De Maillet (1656-1738) avant Werner (1749- 1817), propose un modèle général de la formation de la Terre en relation avec une baisse continue et régulière du niveau de la mer (Gallay, 1995, p.20). À ce propos, Gohau précise que « *son système en effet, postule que le niveau marin s'abaisse graduellement de quelques trois pouces par siècles. Cela fait moins d'un mètre pour un millénaire : et comme les plus hautes montagnes furent formées sous les eaux, la baisse se poursuit donc depuis des millions d'années* » (Gohau, 1990, p. 161). Pendant l'abaissement du niveau de la mer, apparaissent des montagnes de plus en plus récentes et de moins en moins élevées : « *On voit que la baisse régulière du niveau des mers produit la naissance successive de montagnes de plus en plus chétives* » (ibid, p. 163).

Werner (1749-1817), part aussi d'un océan primitif qu'il considère comme chaotique. L'abaissement du niveau de la mer est accompagné alors par la formation des montagnes par précipitation chimique : « *[...] une vaste dissolution a recouvert tout le globe, et qu'elle a dépassé, en élévation, les plus hautes montagnes : ce vaste océan, cet océan chaotique, bien différent de nos mers actuelles, contenait les*

éléments des terrains primitifs » (Aubuisson de Voisins, 1819, pp. 353-373). Concernant la classification des montagnes, Werner identifie tout d'abord les montagnes primaires, composées de granites et de roches associées comme le gneiss et le "schistes" indiquant un aspect cristallin. Ces terrains primitifs sont issus de la précipitation d'une quantité de masses dissoutes dans un océan primordial chaotique et sont dépourvus de fossiles.

Suite à la formation de ces montagnes primitives, viennent s'accumuler, au-dessus des roches précédemment formées, les masses des roches secondaires suivant le même mécanisme de précipitation. Ces roches secondaires étaient au début dans un état de dissolution. Le retrait progressif de l'océan par évaporation va ensuite permettre la superposition des sédiments stratifiés entraînant ainsi la formation des montagnes secondaires.

Outre ces deux classes de montagnes, Werner introduisait une nouvelle catégorie : les montagnes de transition ou « *Übergansgebirge* », situées après les montagnes primaires. Ces montagnes ont été identifiées par Werner par le fait que certaines couches considérées au début comme primitives, comportent en réalité des fossiles. Ces montagnes de transition se situent avant les montagnes secondaires, qui se situent à leur tour avant les dépôts mécaniques ou montagnes d'alluvion.

Pour les basaltes et les roches associées, ils sont considérés par Werner comme « *le produit d'une précipitation chimique aqueuse tardive après une dissolution particulière, et leurs dépôts ont été précédés par des graviers, sables et argiles issus de la destruction de roches antérieures* » (Delamétherie, 1802, p. 448).

Suite à la compréhension de la formation des chaînes de montagnes selon la théorie neptunienne, nous allons maintenant essayer dans la deuxième partie de cette section, de modéliser ce savoir dans le cadre de la problématisation.

1 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon les neptunistes

Dans cette partie nous cherchons à comprendre comment les neptunistes construisent-ils le problème de la formation des chaînes de montagnes. Pour le faire, nous allons nous référer aux travaux d'Orange Ravachol (2003) sur la problématisation en Sciences de la Terre. Nous essayerons alors d'identifier les

nécessités associées au phénomène de la formation des chaînes de montagnes construites par les neptunistes, et les registres explicatifs qu'ils mobilisent.

- Les nécessités sur les modèles

La nécessité d'une précipitation des roches

L'explication de la formation des chaînes de montagnes par les neptunistes s'inscrit dans le cadre d'un directionnalisme⁸ régressif. En fait, pour les neptunistes « *la Terre a évolué jusqu'à son état actuel qui représente l'achèvement de cette évolution* » (Orange Ravachol, 2003, p. 51). Selon eux, « *tout va dans le sens de régression : baisse du niveau marin, enfantement de roches jusqu'à épuisement des eaux* » (ibid).

Parmi les contraintes théoriques qui sont mobilisées par les neptunistes, nous citons la présence d'un océan primitif qui recouvre tout le globe terrestre. Dans cette eau océanique, il se produit des précipitations chimiques donnant des roches à partir des minéraux initialement dissouts dans l'océan primitif. Le fait que cette eau s'abaisse continuellement selon les neptunistes, cela permet de mettre à l'air libre des montagnes suite à la précipitation des roches.

Après la modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon les neptunistes, nous allons essayer dans la partie suivante d'étudier les controverses et les critiques qui ont eu lieu dans la communauté scientifique concernant cette théorie explicative et qui ont provoqué sa fragilisation. Nous cherchons dans cette partie de faire émerger les points de controverse rencontrés par les neptunistes et les conditions de possibilité de solutions pour dépasser ces controverses.

1 - 3 La théorie neptunienne: points de controverse et conditions de possibilité

La théorie neptunienne, a été critiquée surtout avec la découverte des anciens volcans en Europe et l'installation progressive de la thèse vulcaniste qui attribue au basalte une origine volcanique : « *le volcanisme, c'est-à-dire l'assimilation des masses basaltiques à des laves anciennes* » (Gohau, 1990, p. 222).

Cette découverte représente un premier point de discussion entre les vulcanistes et

⁸: Le directionnalisme : c'est de penser que la Terre « *évolue, qu'elle change par accumulation des effets des causes géologiques* » (Orange Ravachol, 2003, p. 50).

les neptuniens qui admettent une origine aqueuse au basalte. Nous citons dans ce cadre, Desmarest (1725-1815) qui est considéré comme le premier à avoir compris l'origine ignée du basalte.

Gohau écrit à ce propos « *Nicoals Desmarest parcourt à pied l'Auvergne, dans le cadre de ses tournées d'inspection pour le compte des manufactures. Il affirme que les colonnades du basalte de puy de Pradelle sont des laves* » (Gohau, 1990 ; p. 222).

La thèse qui postule que le basalte est d'origine volcanique a reçu l'accord de nombreux scientifiques de l'époque. Néanmoins, elle a été fortement contestée par d'autres scientifiques de l'époque dont Werner. Ce dernier se basait sur la transition stratigraphique de couches observée sur le terrain pour conclure que le basalte est une roche stratifiée d'origine aqueuse (Werner, 1788).

Les controverses entre les neptuniens et les vulcanistes ne se limitent pas à ce niveau. En fait, les minéralogistes de l'époque ne sont pas d'accord sur l'origine des minéraux accidentels (comme la calcite ou la pyrite) qui se trouvent dans les basaltes : Si les werneriens pensent que ces minéraux sont formés par précipitation, les vulcanistes quant à eux voient que ces minéraux sont formés suite au refroidissement de la lave en fusion (Retif, 2017, p. 68)

Des discussions émergeaient aussi dans la communauté scientifique sur l'aspect stratifié des basaltes. Pour les neptuniens, la stratification observée dans les basaltes est une preuve que ces roches sont d'origine sédimentaire. Pour les vulcanistes, ces couches stratifiées résultent selon eux d'un empilement de nombreuses coulées (ibid).

Pour contester l'origine ignée du basalte, les neptunistes affirment la présence des restes organiques (comme les coquilles d'ammonites et des restes de végétaux, etc...) dans les basaltes (Young, 2003). Cette affirmation a été fortement réfutée par Playfair, qui selon lui, il est impossible de trouver des coquilles dans les basaltes. Il pense en contrepartie que « *des couches stratifiées contenant ces coquilles aient pu être injectées de basaltes et indurées par la chaleur, ces couches altérées devenant alors d'apparence similaire à du basalte* » (Retif, 2017, p. 69).

A partir de ces précisions présentées ci-dessus, nous pouvons dire que les différents arguments proposés par la communauté scientifique ne permettent pas d'affirmer l'origine aqueuse ou ignée du basalte et ne permettent pas par suite de valider un

modèle ou autre (modèle neptunien vs modèle vulcaniste). Pour dépasser cette controverse et pour trancher entre l'origine ignée ou aqueuse du basalte, les scientifiques de l'époque dont principalement Cordier (1777- 1861) a réussi de faire des analyses chimiques des roches basaltiques dont l'objectif principal est d'identifier la composition minéralogique des basaltes et de la comparer avec celle des laves. Les résultats de ces analyses chimiques ont permis d'identifier la présence d'une forte similitude dans la composition minéralogique des laves et des basaltes, et par suite de conclure l'origine volcanique des basaltes (Young, 2003).

L'identification minéralogique des basaltes et des laves par analyse chimique représente selon nous une condition de possibilité de l'origine ignée de ces roches. Elle entraîne par suite la fragilisation de la théorie neptunienne et ouvre la porte à la formulation d'une autre théorie exposée par Hutton dans son livre « Theory of earth with proofs and illustrations » (1795). Dans cette œuvre, Hutton installait des ruptures avec les idées neptuniennes qui vont à fond changer les fondements de la géologie fortement ancrée dans un cadre explicatif de neptunisme. Ses idées présentées dans son œuvre vont construire les fondements de base d'une nouvelle théorie concurrente à la théorie neptunienne. Elle est nommée la théorie plutoniste.

Alors comment la théorie plutoniste a provoqué ce changement dans la communauté scientifique et quelle explication donne-t-elle à la formation des chaînes de montagnes ?

2 Le plutonisme et le rôle central du feu souterrain dans la formation des chaînes de montagnes

Nous allons essayer dans cette partie de comprendre le phénomène de la formation des chaînes de montagnes selon les plutonistes. Ceci va nous aider ensuite à mener une modélisation de ce savoir dans le cadre de la problématisation.

2 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes par les plutonistes

La théorie plutoniste repose sur l'action de chaleur centrale ou du feu souterrain « subterraneous fire or heat » et lui donne un rôle central dans l'histoire et le développement du globe terrestre. Cette chaleur centrale joue un rôle fondamental dans la consolidation des sédiments (action diagénétique), le soulèvement des

strates et la formation des chaînes de montagnes (l'orogénèse), ainsi que l'injection du granite à l'état fluide dans les couches (plutonisme) (Gohau, 1990, p. 267). Nous précisons ici, que nous allons dans ce travail nous focaliser essentiellement sur l'effet de la chaleur sur la formation des chaînes de montagnes.

À l'opposé des neptuniens qui abandonnent tout mouvement tectonique et qui voient que les strates ont gardé leur position depuis le mouvement de leur dépôt, Hutton le plutoniste considère que sous l'effet de la chaleur, les couches qui étaient initialement horizontales peuvent s'élever entraînant des fractures (Gohau, 1990, p. 269-270). Hutton envisage d'une part l'élévation progressive des strata sous l'effet du feu entraînant la formation du relief, tandis que l'eau dégrade les roches, les transporte, et les dépose d'autre part. Il associe ainsi deux éléments contradictoires qui sont l'eau considérée comme le processus destructeur existant en parallèle avec le feu vu comme l'élément réparateur de sorte qu'on permette en permanence la stabilité de la Terre.

Ses questionnements sur la position des couches immergées puis exondées, ont permis à Hutton de découvrir ce qui s'appelle aujourd'hui en géologie la discordance angulaire. Ce phénomène déduit de la théorie s'est renforcé par des observations faites par Hutton et qui lui ont permis de détecter sur terrain des discordances angulaires. C'est le cas de la discordance observée à Siccar Point en Écosse ou encore à l'île d'Arran et à Jedburgh en 1787. Il est le premier à trouver dans ces couches redressées sur lesquelles reposent les couches horizontales calcaires, la preuve d'un soulèvement et non d'un effondrement, ce qui est considéré comme révolutionnaire. Même si l'école wernérienne abandonne toute tectonique, elle reconnaît la présence de ces discordances. Mais pour l'expliquer, ils font appel à la dégradation des couches par érosion : « *Lorsque les roches sur lesquelles le basalte [sédimentaire selon les wernériens] est placée sont stratifiées, on trouve que la surface de superposition n'est pas parallèle à la direction des couches. Avant que le basalte eût été déposé sur ces montagnes, elles avaient éprouvé des dégradations considérables* » (Aubuisson de Voisins, 1803, pp. 51-52).

Même si l'explication des discordances angulaires est différente entre les neptunistes et les plutonistes, ces deux écoles se rencontrent en revanche pour donner à l'érosion un rôle fondamental dans le cycle géologique. Ce « cycle » est complètement sédimentologique pour les neptuniens, mais fortement tectonique pour Hutton (Gohau, 2010, p. 106).

La nouveauté d'Hutton est marquée par l'explication donnée aux déformations des couches. En fait, Hutton voit que ces déformations sont la preuve d'un mouvement de soulèvement. Il instaure la théorie de soulèvement fragilisant ainsi toutes les explications anciennes : « *Le système neptunien, impliquant l'effondrement du toit de cavernes souterraines serait une "explication fort heureuse", s'il n'y avait des "ondulations, des inflexions et une grande variété de formes" tectoniques, nous dit son élève Playfair* » (Gohau, 2010, p. 110).

En poursuivant les investigations de son maître, Hall (1761-1832), disciple d'Hutton, a observé avec Hutton et Playfair (1748-1819) dès 1788 « *d'amples ondulations* » (Gohau, 2010, p.112). Il s'est questionné sur la possibilité d'expliquer ces ondulations par une « *puissante force agissant horizontalement, et s'opposant à une résistance insurmontable placée au côté opposé des lits* » (Hall, 1815, p. 84). Pour modéliser les forces présentes, Gohau précise qu'Hall propose une expérience faite par « *des pièces d'étoffes surmontées de poids (pour figurer les roches surincombantes) et placées entre deux planches qu'on rapprochait pour représenter la (ou les) forces latérales* » (Gohau, 2010, p. 112). En mettant en relation les mouvements latéraux avec des montées plutoniques, l'identification des poussées latérales étaient alors interprétées par des montées verticales du magma granitique sous l'effet du feu souterrain (ibid), entraînant ainsi le soulèvement des couches et la formation des montagnes.

La découverte dans les Alpes du Nord de l'Ecosse, des veines de granites s'introduisant dans plusieurs directions, montre selon Hutton un comportement identique à celui des laves. Cette observation vient ainsi confirmer sa théorie de soulèvement : en effet, le granite est considéré par Hutton comme le résultat d'une fusion des sédiments enfouis. Des montées intrusives de granite (des laves de granite) s'effectuent sous l'effet de la chaleur souterraine marquant un rôle tectonique en provoquant le soulèvement des couches et la formation de reliefs : « *le granite rejoignait les laves souterraines dans son rôle tectonique : les montées granitiques déterminent le soulèvement des couches ainsi que leur refoulement latéral* » (Gohau, 1990, p. 273).

Suite à l'explication de la formation des chaînes de montagnes selon la théorie huttonienne, nous allons maintenant essayer de modéliser ce savoir dans le cadre de la problématisation.

2 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon les plutonistes

Dans cette partie, nous cherchons comprendre de quelle manière les plutonistes construisent-ils le problème de la formation des chaînes de montagnes, à quels modèles explicatifs ils recourent et les nécessités (par rapport à celles construites par les neptunistes) qu'ils mobilisent.

- Les nécessités sur les modèles

La nécessité d'un soulèvement

Parmi les contraintes qui peuvent servir cette nécessité, nous pouvons citer les couches redressées sur lesquelles reposent des couches horizontales, les déformations observées dans plusieurs couches ainsi que les veines de granite détectées dans certaines chaînes de montagnes et qui ressemblent à des laves. Cela permet de construire la nécessité d'un soulèvement de couches provoqué par la montée et la fusion des sédiments enfouis sous l'effet de la chaleur souterraine, provoquant ainsi la formation de montagnes.

Hutton pense à ce soulèvement dans le cadre d'une histoire cyclique de la Terre : En effet, pour garder la stabilité de la Terre, considérée selon lui comme « *objet physique parfait inscrit dans une finalité* » (Orange Ravachol, 2003, p. 30), Hutton fait appel au soulèvement qui représente un mécanisme régénérateur des reliefs, alors que l'érosion est au contraire, considérée comme élément de dégradation des reliefs.

Ainsi, il inscrit la Terre dans une succession de cycles conformes, qui se reproduisent depuis la formation de la Terre et pour toujours, sans aucune différence. Ces cycles apparaissent alors sans limite temporelle : « *A un moment donné, que l'on regarde vers l'avenir ou vers le passé, l'histoire terrestre se perd, immuable, dans l'immensité du temps, dans le temps profond* » (Orange Ravachol, 2003, p. 30).

Suite à la modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon les plutonistes, nous montrerons dans la partie suivante les critiques formulées par les scientifiques de l'époque concernant la théorie d'Hutton. Ces critiques vont nous aider à comprendre les points de controverse portés sur la théorie plutoniste et les conditions de possibilité qui vont permettre l'émergence d'un autre modèle.

2 - 3 Les critiques de la théorie plutoniste par la communauté scientifique : points de controverse et conditions de possibilité

Malgré les nouveautés présentées par Hutton, la thèse huttonienne explique toujours l'origine de la chaleur souterraine par la combustion de charbon et de bitume : « *Les roches combustibles contenant des corps végétaux (débris), issues d'une sédimentation et d'un enfouissement, sont la source inépuisable de cette chaleur* » (Hutton, 1795, p. 243). Cette proposition a été fortement critiquée par Kirwan (1733-1822), qui est l'un des opposants majeurs d'Hutton. Selon lui, la combustion du charbon et de bitume ne peut pas avoir lieu au fond des mers. Il précisait que la quantité de ces combustibles est insuffisante pour provoquer la fusion des roches et que le dioxygène nécessaire à la combustion ne peut pas se trouver en quantité suffisante en profondeur.

En niant la présence d'un feu souterrain par Kirwan, Hutton maintient en contrepartie sa théorie. Néanmoins, il pense qu'il fallait apporter des précisions sur l'origine de la chaleur souterraine. La faiblesse des arguments sur l'origine de la chaleur souterraine représente une difficulté pour Hutton afin de convaincre la communauté scientifique de sa théorie. Malgré sa fragilisation, cette théorie a été fortement acceptée par les scientifiques de l'époque surtout avec les expériences menées par Cordier (1777-1861) et qui ont permis de faire des conclusions sur l'élévation de la température avec la profondeur et sur la fluidité initiale du globe. Gohau précise à ce niveau qu' « *En rassemblant les observations antérieures sur la température à différentes profondeurs, notamment dans les mines plus au moins profondes, et en les complétant d'expériences nouvelles, Luis Cordier [...] parvient en 1827, à un certain nombre de conclusions sur l'élévation de la température avec la profondeur. Il établit notamment que la fluidité initiale du globe est le produit de la chaleur et non de la dissolution. Et il arrive à la supposition qu'à une profondeur qui varie entre 23 et 55 lieus (de 5 km) le point de fusion des laves est atteint* » (Gohau, 2010, p. 119). Ces expériences représentent selon nous une condition de possibilité de la théorie plutoniste.

Les discordances étudiées par Hutton, permettent de distinguer des couches primaires redressées et secondaires horizontales. Ce classement de couches marque selon lui une valeur universelle. En effet, Hutton pense que la discordance a

le même âge dans tous les endroits du globe où on l'observe (Gallay, 1995, p. 22). Ainsi, malgré les avancées apportées par la thèse huttonienne, Hutton ne comprenait pas que l'orogénèse est un phénomène régional (Gohau, 2010, p. 111). C'est avec la nouvelle théorie d'Elie de Beaumont (1798-1874) que l'orogénèse est régionalisée.

3 Le modèle de soulèvement d'Élie de Beaumont : le rôle des mouvements verticaux, pour expliquer la formation des chaînes de montagnes

Nous allons essayer dans un premier temps de comprendre la formation des chaînes de montagnes selon Elie de Beaumont. Ceci va nous permettre dans un deuxième temps de modéliser ce savoir dans le cadre de la problématisation.

3 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes par Elie de Beaumont

Elie de Beaumont (1798-1874) reprend le modèle de soulèvement et essaye de le généraliser en s'inscrivant dans le modèle de refroidissement d'une Terre qui était initialement en fusion : « *A l'origine, notre planète aurait été une boule de feu, comme le soleil, mais elle aurait subi un premier refroidissement conduisant à la formation d'une croûte solide. Le refroidissement se poursuivant, entraînait la contraction du noyau, obligeant la croûte adhérente à se rider pour s'adapter à la diminution de la surface* » (Touret, 2007, p. 132). En se contractant, la surface de la Terre rigide va subir des dislocations. Il en découle des mouvements de soulèvements qui se localisent le long des fractures, déterminant la formation des montagnes.

La théorie d'Elie de Beaumont est formulée en interaction avec des observations de terrain. Parmi lesquelles, nous citons la détection de la disposition anormale des couches de granite et de gneiss du massif des Ecrins-Pelvoux (couches primaires), qui se placent sur des terrains de secondaire, qui eux-mêmes se placent sur des terrains du tertiaire (Savaton, 2019, p. 56). Selon Elie de Beaumont, cette disposition est le marqueur d'un soulèvement : « *les masses de granites auraient repoussé les couches de gneiss et de roches secondaires sus-jacentes* » (Savaton, 2019, p. 56-57). Il est important de préciser que selon Elie de Beaumont, l'origine des roches qui surgissent au niveau des fractures ne correspond pas à un magma fondu résultant

du feu central, mais plutôt des roches (granites) solidifiées, présentes à proximité du noyau en feu (Touret, 2007, p. 133). Il s'est basé sur l'observation de déformations dans les granites (roches primaires) normalement placées sous les autres couches de roches, pour conclure que ces déformations sont le marqueur d'une plasticité des roches. Ceci veut dire qu'elles étaient fortement chaudes lorsqu'elles arrivaient en surface. Pour que ces roches gardent leur plasticité, il est nécessaire que leur remontée à la surface se fasse dans un intervalle de temps très court, c'est-à-dire d'une façon très rapide. Ceci nous amène à dire que le soulèvement qui entraîne ensuite la formation des chaînes de montagnes, est considéré par Elie de Beaumont comme un « phénomène brutal » (Touret, 2007, p. 133).

Parmi les autres observations qui ont permis à Elie de Beaumont de formuler sa théorie, nous citons aussi les observations faites par lui dans le massif de l'Oisans et qui l'ont amené à détecter un « cratère de soulèvement » au sens de Léopold Von Buch (1774-1853). En fait, selon ce dernier, les magmas qui proviennent de la profondeur, en se rapprochant de la surface, provoquent la déformation des couches qui les surmontent et entraînent par suite la formation d'un cône volcanique nommé « cratère de soulèvement » (Savaton, 2019, p. 58). D'après Durand-Delga, le cratère de soulèvement du massif de l'Oisans présente « *en masse un profil incliné vers l'extérieur* », il comporte un anneau intérieur de granite sur les 4/5 de sa circonférence. Ce granite pénètre au sein de gneiss qui plongent presque constamment vers la périphérie sous des « masses secondaires » [...]. Comme ces terrains sédimentaires, plongent vers l'extérieur du massif, le pendage similaire des gneiss doit résulter d'un « *soulèvement postérieur au dépôt de la craie* » (Durand-Delga, 2006, p. 79).

Elie de Beaumont rajoute à sa théorie une composante chronologique. Pour lui, toute surrection d'une chaîne de montagne est unique et se réalise en même temps sur tout le globe terrestre avec la même direction. Il détermine l'âge de chaque surrection par la discordance séparant les couches plissées des couches horizontales placées en dessus (Gohau, 2010, p. 124). Il identifie alors la chronologie de nombreuses phases de soulèvement responsables à la formation des montagnes. Il nomme ces phases de soulèvements des systèmes de montagnes : « En quelques *décennies*, le professeur au collège de France, aidé de quelques élèves fidèles, et plus ou moins complaisants (au premier chef, Charles Sainte-Claire Deville (1814-1876) et Alexandre-Emile Béguyer de Chancourtois (1820-1886), qui le suppléeront dans son

enseignement et lui succéderont, le premier au collège et le second à l'école des mines) recensera des dizaines de phases de soulèvements qu'il nomme des "systèmes de montagnes" » (Gohau, 2010, p. 124). Touret (2007) explicite la dimension chronologique de la théorie d'Elie de Beaumont en précisant qu' « Elie de Beaumont ajoute une dimension chronologique : chaque surrection d'une chaîne de montagne est un phénomène unique, qui se produit simultanément sur toute la Terre avec la même direction ; formant un grand cercle à l'échelle du globe. Inversement, pourrait-on dire, deux directions successives forment un certain angle, souvent proche de 90°, variable dans le détail en fonction des régions considérées [...] L'âge d'une surrection doit se retrouver entre celui du terrain redressé le plus jeune et celui du terrain horizontal qui le recouvre : on parlait aujourd'hui de discordance. De proche en proche, on peut ainsi établir la chronologie des divers « systèmes de montagne », terme utilisé par Elie de Beaumont dès ses premières publications [...] A la surface de la Terre, les chaînes de montagnes alternent avec des bassins sédimentaires, dans des « fuseaux » d'une largeur maximale de quelques 2000 Kilomètres. Un fuseau contient tous les chaînons d'un même système, même si lorsque ceux-ci ne sont pas strictement parallèles » (Touret, 2007, p. 134-135).

Suite à la compréhension de la manière par laquelle Elie de Beaumont explique la formation des chaînes de montagnes (selon lui, les montagnes se sont formées par des soulèvements brutaux des strates, qui se localisent le long des fractures), nous allons essayer maintenant de modéliser ce savoir dans le cadre de la problématisation.

3 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon Elie de Beaumont

Nous allons essayer dans cette partie de comprendre comment Elie de Beaumont peut construire le problème de la formation des chaînes de montagnes, les nécessités et le registre explicatif qu'il mobilise.

Partant de l'idée que la Terre subit un état de refroidissement. Ce refroidissement conduit à la nécessité d'une contraction du globe terrestre.

La mobilisation de certaines contraintes comme la position anormale des roches (granites) placées sur les terrains du secondaire, qui sont à leur tour posés sur

les terrains du tertiaire (position anormale), ainsi que la déformation des roches (les granites) ou encore les cratères de soulèvement observés dans les chaînes de montagnes permet d'établir la nécessité d'un soulèvement qui se matérialise par la remontée brutale et très rapide du granite (ce qui explique l'arrivée de granite en surface tout en gardant sa plasticité).

Puisqu'il est nécessaire d'envisager d'un côté la contraction de la Terre et de considérer d'un autre côté le soulèvement des couches, les mouvements verticaux responsables à la formation des chaînes de montagnes sont une nécessité qui résulte des deux premières nécessités.

Nous précisons ici que l'explication de l'orogénèse par Elie de Beaumont est basée sur « *la brutalité* » et « *la sporadicité* » des mouvements qui n'ont « *pas d'équivalent actuel* » (Orange Ravachol, 2003, p.52). Ceci peut faire penser qu'Elie De Beaumont est catastrophiste. Néanmoins, on ne peut pas le cantonner dans ce positionnement strict en écartant qu'il ancre ses explications dans un cadre actualiste, et ceci pour différentes considérations :

-En étudiant le problème de la formation des chaînes de montagnes, Elie de Beaumont fait succéder des périodes calmes et d'autres périodes de révolution caractérisées par des mouvements de soulèvement brutal. Ces périodes révolutionnaires ont eu lieu au passé et peuvent se répéter au futur. Néanmoins, quelles que soient les périodes, les causes sont identiques aux causes passées [mais leur intensité peut changer] (Orange Ravachol, 2003, p. 53). Elie de Beaumont fait appel ainsi à l'actualisme.

-Elie de Beaumont construit sa théorie en se basant sur le refroidissement progressif de la Terre. Etant donné que cette cause est continuellement présente et d'intensité constante, Elie de Beaumont ancre son explication de la formation des chaînes de montagnes dans un cadre actualiste (Orange Ravachol, 2003, p. 52-53). Néanmoins dans l'explication d'Elie de Beaumont, ce que le présent ne peut pas offrir, ce sont les phases orogéniques (ou les systèmes) qui peuvent être considérées comme catastrophes. Mais, ces catastrophes sont vues comme une nécessité suite à l'insuffisance de l'actualisme (Orange Ravachol, 2003, p. 53).

L'évolution assez rapide du nombre de systèmes proposés par Eliede Beaumont (de 4 systèmes en 1829 à 96 systèmes en 1869) donne au catastrophisme un aspect

modéré (ibid).

En étudiant le problème de la formation des chaînes de montagnes, nous pouvons dire alors qu'Elie de Beaumont s'appuie sur l'actualisme à tous les moments. Mais à cause de l'insuffisance de l'actualisme, il est nécessaire de s'en décrocher pour un catastrophisme qu'il n'a cessé d'être lié à l'uniformitarisme. Ce catastrophisme est nommé par Orange Ravachol (2003) un catastrophisme de deuxième niveau (voir chapitre1).

D'après les explications indiquées ci-dessus, nous tentons dans la **Fig.7** une ébauche d'espace de contraintes de la formation des chaînes de montagnes selon Elie de Beaumont.

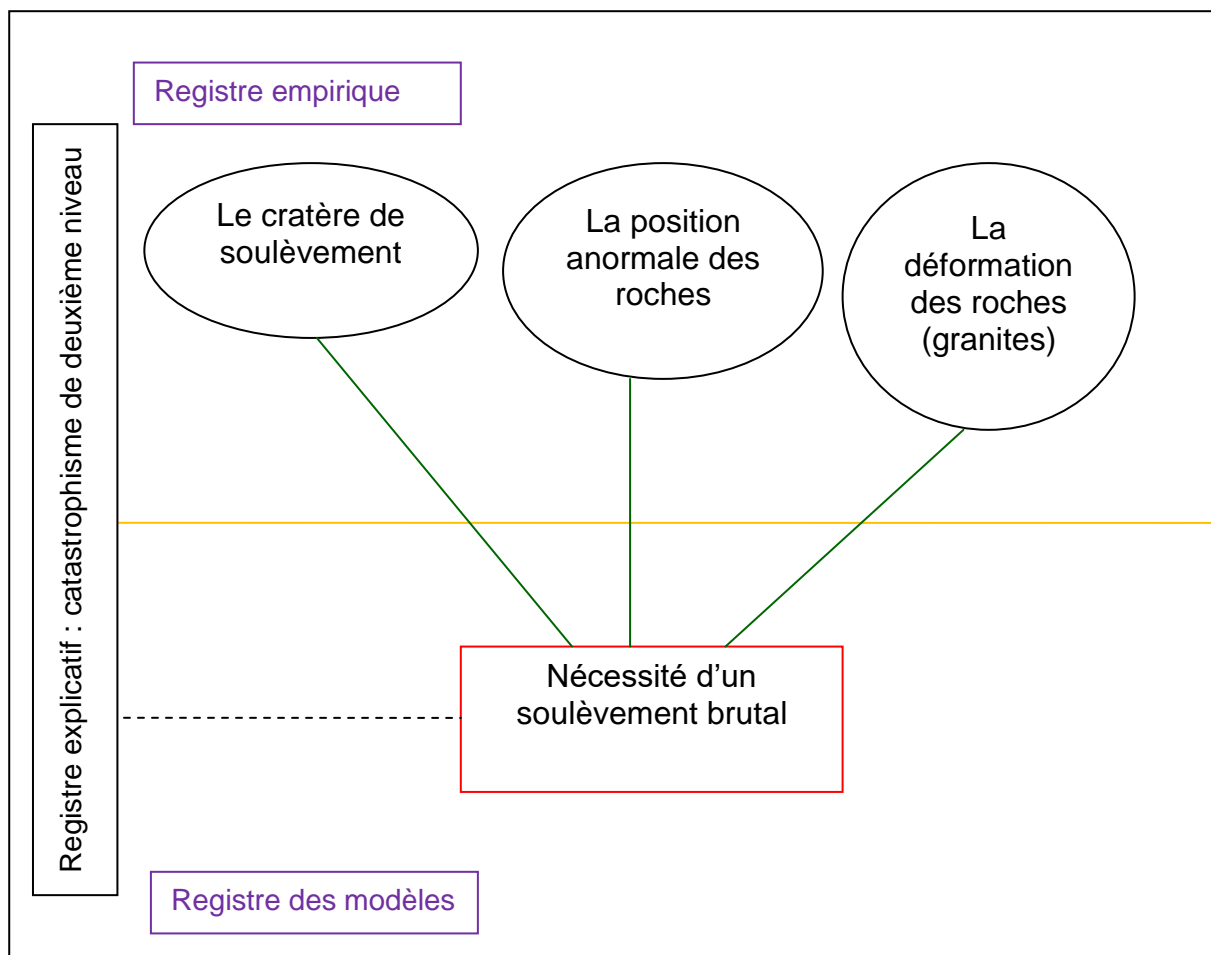


Fig.7. Problème de la formation des chaînes de montagnes : ébauche d'un espace de contraintes d'Elie de Beaumont.

Suite à la modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon Elie de Beaumont, nous allons essayer dans la partie suivante de mettre en exergue les

controverses et les critiques qui ont eu lieu dans la communauté scientifique de l'époque concernant la théorie explicative d'Élie de Beaumont. Ces critiques vont jouer un rôle crucial pour faire évoluer ce modèle vers un autre modèle explicatif.

3 - 3 Les critiques de la théorie explicative d'Élie de Beaumont par la communauté scientifique : points de controverse et conditions de possibilité

Des voix discordantes de nombreux scientifiques s'élèvent pour présenter leurs oppositions aux explications d'Élie de Beaumont. Lyell (1797-1875) fut l'un des plus importants opposants à ses idées. En tant qu'uniformitariste⁹, il voit que la Terre ancienne a eu un état similaire à celui qu'elle nous montre actuellement. Selon lui, des changements se produisent à l'échelle globale mais ils se compensent d'une région à une autre ce qui donne à la Terre un état stable en gardant ses structures.

Sa vision stationnariste¹⁰, s'oppose au modèle directionnaliste progressif adopté par Élie de Beaumont, qui admet une Terre en évolution, en refroidissement lent.

D'une autre part, Lyell refuse le discontinuisme d'Élie de Beaumont « *qui postule "des époques d'activité catastrophique séparées par des périodes comparativement tranquilles"* » (Gohau, 1990 ; p. 318). Il s'inscrit plutôt dans un continuisme¹¹ « *supposant que les changements qui nous mènent d'une époque géologique à l'autre ont été, dans leur moyenne, d'intensité uniforme* » (ibid).

Dans le troisième volume des *Principles of geology* paru en 1833, Lyell accorde toute une partie pour réfuter les différents arguments d'Élie de Beaumont : « *Il n'existe aucun signe de "catastrophe" correspondant à la surrection des chaînes de montagnes, beaucoup d'extrapolations sont faites dans des régions inconnues, "jamais touchées par le marteau", comme dit Boué* » un autre opposant à Élie de Beaumont (Touret, 2007, p. 138).

⁹ : « L'uniformitarisme exige que la surface du globe terrestre demeure dans un état d'équilibre qui exclut une évolution trop marquée » (Gohau, 1990, p. 12).

¹⁰ : « Les scientifiques qui s'inscrivent dans un modèle stationnaire « voient le globe maintenir un équilibre entre changements complémentaires » (Gohau, 1990, p. 318).

¹¹ : Gohau précisait que « Faute de pouvoir assurer une continuité parfaite de l'activité orogénique, Lyell affirme son égalité statistique dans le temps. À l'échelle du globe, l'activité orogénique est constante dans son existence (et son intensité). » (Gohau, 1990, p. 326).

L'évolution du nombre de systèmes proposés par Elie de Beaumont (le passage de 4 à 96 systèmes) a été fortement critiquée par Boué (1794-1881). Ce dernier met en question l'intérêt d'une méthode où la différenciation des révolutions (phases orogéniques) est basée sur leurs directions : « [...] le parfait parallélisme qu'Elie de Beaumont attribuait aux chaînes nées lors d'une même « révolution » ne résistent pas aux réalités du terrain. On s'aperçut vite- Ami Boué pourtant initialement admirateur de cette théorie, fut l'un des premiers à le voir, dans les Carpates- que la même chaîne pouvait avoir un tracé sinueux et qu'inversement des chaînes parallèles pouvaient être d'âges différents » (Durand-Delga, 2006, p. 87).

Suite à toutes ces critiques qui représentent des vrais difficultés pour la théorie d'Elie de Beaumont, la communauté scientifique a besoin de remanier les théories existantes surtout avec les observations faites par Eduard Suess (1831-1914) dans la chaîne alpine et qui lui ont permis de conclure qu'au contraire de la thèse des chaînons parallèles des systèmes d'Elie de Beaumont, les chaînes de montagnes forment des arcs nommés des virgations : « [...] les chaînes forment des arcs : c'est évident pour tout observateur de la chaîne alpine, dès lors qu'on la considère dans son ensemble. L'arc alpin se poursuit en Asie par l'arc iranien, l'arc de l'Hindou-Kouch, l'Himalaya, pour aboutir à l'arc malais [...] La thèse des chaînons parallèles des systèmes de montagnes d'Elie de Beaumont est ainsi totalement caduque » (Gohau, 2010, p. 128). Ces arcs que les chaînes de montagnes forment représentent selon nous une condition de possibilité du modèle qui sera présenté par Suess.

C'est ainsi qu'après l'œuvre d'Elie de Beaumont, Suess prend le relais. En se basant sur une quantité d'observations et des appuis théoriques, il a réussi à faire entrer les sciences de la Terre dans une nouvelle période en exposant une version globale de la tectonique de surface.

4 Le modèle des continents effondrés et des terrains plissés d'Eduard Suess suivi par les nappes de charriage de Marcel Bertrand

Dans cette partie, nous allons essayer de comprendre la formation des chaînes de montagnes selon Suess et Bertrand. Cela nous permettra ensuite de mener la modélisation de ce savoir dans le cadre de la problématisation.

4 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes selon Suess et Bertrand

Pour expliquer la formation des chaînes de montagnes, Suess se base sur le même axiome qu'Elie de Beaumont : le refroidissement terrestre. Néanmoins, il va contredire la plupart des thèses de son prédécesseur. En effet, selon ce dernier, le refroidissement du globe depuis son origine aurait provoqué une diminution de son volume, et donc de sa surface. Celle-ci serait donc contractée et plissée. L'écorce terrestre en état de rétrécissement, va subir des tensions les unes radiales, les autres tangentielles. Ces tensions tangentielles entraînent des plissements qui sont à l'origine de la formation des chaînes de montagnes. Quant aux tensions radiales, elles sont responsables d'effondrement permettant la formation des océans (Gohau, 2010, p.127).

Aux mouvements verticaux, Suess ajoute ainsi le rôle fondamental des mouvements horizontaux dans la formation des chaînes de montagnes. Celles-ci sont dissymétriques selon lui : elles « *sont dissymétriques du fait des poussées, comme l'auteur s'en était aperçu dès 1875 ; il existe donc un avant-pays sur lequel s'avancent les plis et un arrière-pays. Des effondrements accompagnent ces mouvements tangentiels, tant dans l'avant pays que dans l'arrière-pays. L'Adriatique correspond à un affaissement de l'arrière-pays alpin, tandis que Bohême et Alsace sont des affaissements de l'avant-pays* » (Gohau, 2010, p. 128).

Des observations de terrain (comme la présence d'une structure symétrique entre les côtes américaines et européennes ou encore la présence de fossiles semblables de part et d'autre des continents), ont permis à Suess d'étendre sa théorie initiale en présentant la théorie des ponts continentaux. Selon lui, les deux continents étaient reliés par un pont continental qui serait ensuite effondré en donnant des océans.

« *Puisque, par le jeu des affaissements, océans et continents peuvent s'échanger* », Suess voit que « *la croûte terrestre est partout de même nature* » (Orange Ravachol, 2003, p. 98).

Bertrand poursuit les idées de Suess en introduisant en 1884, la notion de nappe de charriage. En effet, il explique que dans les chaînes de montagnes, certains terrains peuvent chevaucher d'autres terrains d'âge et de nature complètement différents. Ce déplacement d'unités est nommé charriage. Ces nappes de charriage ne peuvent

être expliquées selon lui que par des mouvements horizontaux très importants qui se font sur des centaines de kilomètres (Deparis et Thomas, 2011, p.4).

Gohau parle de la découverte des nappes de charriages en explicitant qu' « *En 1884, Marcel Bertrand (1847-1907) compare les Alpes de Glaris, un curieux entrelacement de couches qu'on venait d'interpréter comme un double pli à la façon dont Saussure avait expliqué un siècle plutôt les structures alpines au bassin houiller franco-belge. Il montre que ces dispositions peuvent s'expliquer par des recouvrements de terrains récents par d'autres, antérieurs [...] C'est un lambeau d'une nappe de recouvrement ou de charriage* » (Gohau, 2010, p. 129).

Suite à la compréhension de la formation des chaînes de montagnes selon Suess et Bertrand, nous allons essayer de modéliser ce savoir dans le cadre de la problématisation.

4 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon Suess et Bertrand

Dans cette partie, nous allons essayer de comprendre de quelle façon Suess et Bertrand construisent le problème de la formation des chaînes de montagnes, à quels modèles explicatifs ils recourent et les nécessités qu'ils mobilisent.

Suess et Bertrand considèrent la Terre en état de refroidissement continu. Cela veut dire que cet état du globe a eu lieu au passé et continue à avoir lieu au présent. Cela nous amène à dire que les mouvements horizontaux et les effondrements (responsables à la formation des montagnes) qui résultent de la contraction de la Terre par refroidissement, sont les mêmes entre le passé et le présent. Ainsi, nous pouvons conclure que Suess et Bertrand font appel à l'actualisme dans l'explication de la formation des chaînes de montagnes. Nous précisons ici que même si Suess est actualiste, il ne se contente pas uniquement « *des mouvements réguliers* » pour expliquer la formation des montagnes: « *Pour lui des phénomènes exceptionnels par leur violence y participent aussi* » (Orange Ravachol, 2003, p. 98). Ainsi, avec l'actualisme, il fait appel au catastrophisme dans ses explications.

La mobilisation de certaines contraintes comme le chevauchement des terrains d'âges et de nature différents ou encore les plissements des couches, permet de

construire la nécessité de mouvements tangentiels et des affaissements accompagnant ces mouvements (voir **p. 73**) et qui sont responsables de la formation des chaînes de montagnes.

La mise en jeu d'autres contraintes empiriques comme les fossiles semblables de part et d'autre des continents actuellement séparées ou encore la structure semblable de certaines côtes séparées à l'état actuel par un océan, obligent à penser à la présence de mouvements verticaux qui provoquent l'affaissement et par suite la formation des océans.

En se basant sur les explications présentées ci-dessus, nous tentons dans la **Fig.8** une ébauche d'espace de contraintes du problème de la formation des chaînes de montagnes selon Suess et Bertrand.

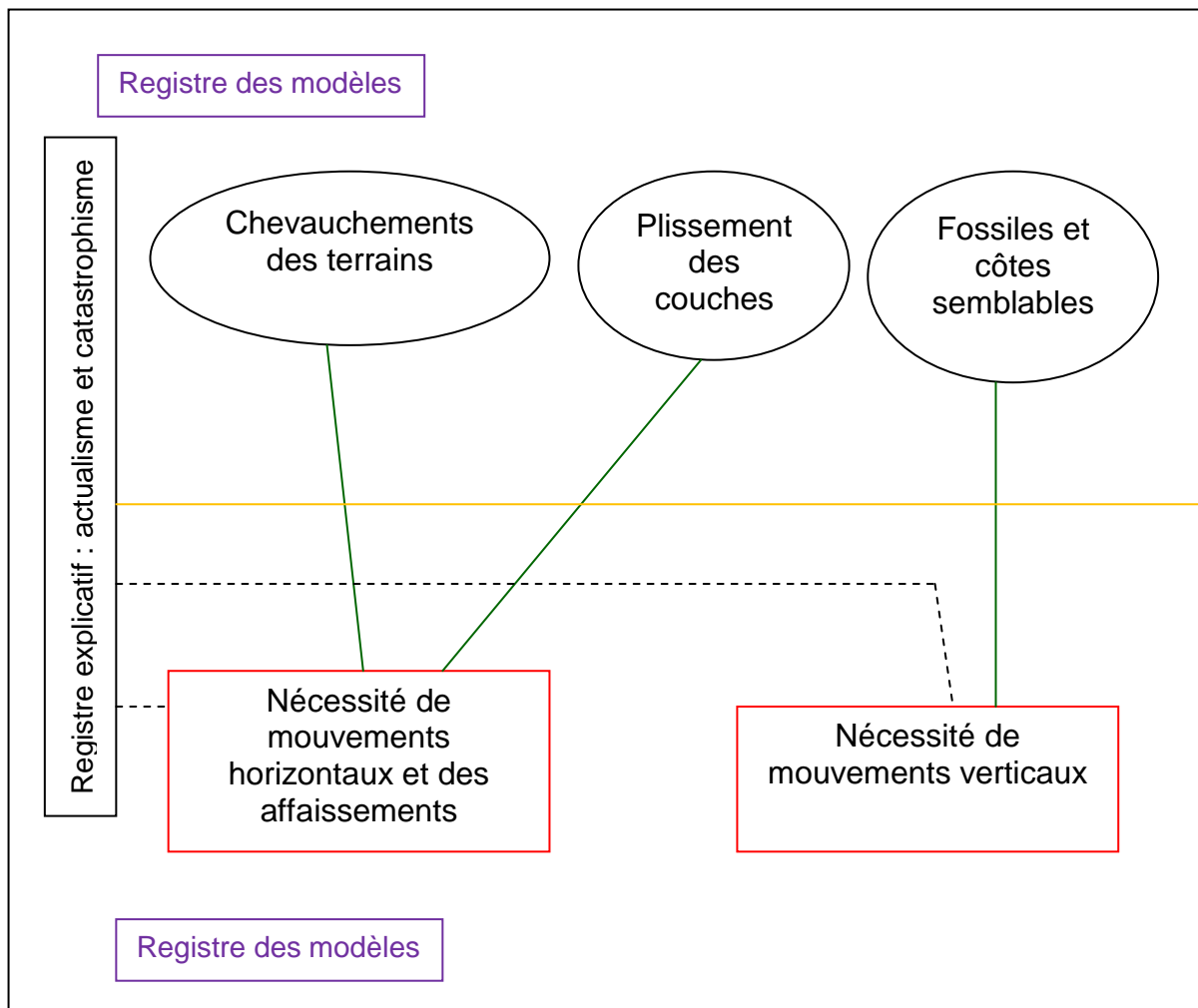


Fig.8. Problème de la formation des chaînes de montagnes : ébauche d'un espace de contraintes de Suess et Bertrand

Suite à la modélisation menée ci-dessus, nous allons essayer maintenant d'explicitier les controverses et les critiques qui ont été formulées par la communauté scientifique de l'époque concernant la théorie explicative de Suess et Bertrand tout en cherchant à faire émerger les conditions de possibilité qui ont permis l'émergence d'un autre modèle explicatif.

4 - 3 Le modèle explicatif proposé par Suess et Bertrand: points de controverse et conditions de possibilité

Le modèle d'effondrement proposé par Suess, a été fortement critiqué surtout par Wegener (1880-1930). Ce dernier s'est basé dans ses arguments sur les recherches

qui ont été réalisées depuis la seconde moitié du XIX^{ème} siècle sur l'équilibre isostatique des continents. Ces études auxquelles Suess contribue, montrent que ceux-ci sont représentés comme des blocs légers d'un composé appelé Sial (les roches sont formées fondamentalement de silicium et d'aluminium) qui se trouvent en équilibre sur une couche plus dense d'un composé appelé Sima en état solide mais légèrement visqueux (ce sont des roches formées principalement par du silicium et du magnésium) qui affleure au niveau des océans (Deparis et Thomas, 2011, p. 8). En fait Wegener voit que la théorie de l'effondrement n'est pas compatible avec les lois de la physique puisque les parties continentales flottent en équilibre sur un « soubassement » plus dense et ils sont trop légers pour pouvoir s'enfoncer au niveau des fonds océaniques. Wegener insiste aussi sur la réfutation de la théorie du refroidissement par la communauté scientifique suite aux découvertes qui ont montré la production de chaleur due à la radioactivité du globe terrestre: *« Le modèle d'une Terre en contraction proposé par Suess était critiquable à plusieurs égards. La découverte alors toute récente, dans les Alpes, d'énormes tranches rocheuses ou « nappes » ayant subi un formidable charriage ne pouvait s'expliquer qu'en accordant aux contractions du Tertiaire une ampleur qui semblait excessive. De plus, pourquoi les rides plissées n'étaient-elles pas réparties de façon plus uniforme à la surface de la Terre et se trouvaient-elles concentrées sur des ceintures relativement étroites ? Certaines hypothèses fondamentales sur le refroidissement de la Terre semblaient en outre réfutées par la découverte de la radioactivité générale des roches, entraînant la production de quantités de chaleur assez considérables pour compenser la perte thermique due au rayonnement dans l'espace »* (Hallam, 1976, p. 24).

La découverte de l'équilibre isostatique et de la radioactivité du globe représentent selon nous, des conditions de possibilité du modèle suivant proposé par Wegener. Ainsi, il est intéressant maintenant d'étudier la formation des chaînes de montagnes selon ce scientifique.

5 Le modèle de translations continentales de Wegener

Nous allons chercher dans cette première partie à comprendre comment Wegener explique-t-il la formation des chaînes de montagnes.

5 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes selon Wegener

En se basant sur des idées mobilistes, Wegener considère la géographie de la Terre comme changeante au cours des temps géologiques (Savaton, 2011, p. 111). Selon lui, les continents composés par des roches de moindre densité par rapport à celles des océans, flottent sur des fonds océaniques formés par des roches à caractère visqueux, et se déplacent à la surface de la Terre provoquant des collisions. Ces collisions sont responsables alors à la formation des chaînes de montagnes sur le globe.

Wegener précise les bases sur lesquelles, il formule sa théorie de la dérive des continents : « *La première idée des translations continentales me vint à l'esprit dès 1910. En considérant la carte du globe, je fus subitement frappé de la concordance des côtes de l'Atlantique, mais je ne m'y arrêtai point tout d'abord, parce que j'estimai de pareilles translations invraisemblables. En automne 1911, j'eus connaissance par hasard, en lisant une collection de rapports scientifiques, de conclusions paléontologiques, inconnues jusqu'alors pour moi, admettant l'existence d'une ancienne liaison terrestre entre le Brésil et l'Afrique. Cela m'engagea à faire un examen préalable et sommaire des résultats connexes au problème des translations, tant en Géologie qu'en Paléontologie. J'obtins tout de suite des confirmations assez importantes pour commencer à être convaincu de l'exactitude systématique de la théorie* » (Wegener, 1928, p. 1)

Les arguments de sa théorie sont alors :

-L'emboîtement possible du contour des continents bordant l'Atlantique fut, a écrit Wegener, le déclenchement en 1910, de sa réflexion. Cet emboîtement possible est renforcé par les remarquables similitudes des formations géologiques qui se poursuivent d'un continent à un autre : c'est le cas des similitudes observées entre les séries plissées du Cap et de Buenos Aires, les similitudes entre des séries houillères du Karroo en Afrique de sud et de Santa Carina au Brésil, ou encore les similitudes entre les grès rouges d'Amérique du Nord, du Groenland et d'Europe (Bouchardon¹², 2013, p. 5).

¹² : La référence correspond à un article rédigé par J-L Bouchardon, géologue-géochimiste à l'école nationale supérieure des mines de Saint-Étienne.

- Les analogies des faunes et des flores fossiles continentales, actuellement séparées par des domaines océaniques. Parmi les exemples utilisés par Wegener pour indiquer des analogies des faunes et des flores fossiles qui imposent des liaisons intercontinentales, figurent les cas du « *petit reptile Mesosaurus, dont l'existence n'est attestée qu'à partir du Permien en Afrique du Sud et au Brésil, et le Glossopteris, plante très largement répandue à la fin du Paléozoïque mais exclusivement dans les continents du Sud* » (Hallam, 1976, p. 32). Wegener s'appuyait de même sur des espèces actuelles comme les marsupiaux et les vers de terre afin de montrer l'existence d'anciennes connexions terrestres (ibid).

-Les traces glacières qui ont été retrouvées sur tous les continents de l'hémisphère sud, aujourd'hui très éloignés les uns des autres ne peuvent se comprendre selon Wegener que si ces continents ont été autrefois rassemblés.

Pour expliquer le moteur de la dérive des continents, Wegener s'est basé sur des raisons dans le milieu externe (au contraire de l'intérieur du globe). Pour expliquer le déplacement respectif des continents vers le sud et vers le l'ouest, il évoque « une action Eötvös ». Elle correspond à une force centrifuge associée à la rotation de la Terre et est capable de déplacer les masses continentales vers l'équateur (Durand-Delga, 2006, p. 99). Concernant la dérive vers l'ouest, il parle d'une conjugaison des attractions solaires et lunaires avec la rotation de la Terre vers l'est, ce qui entraîne un retard des masses « sialiques », qui se détachent du Sima, qui lui, tourne plus rapidement que son enveloppe (ibid).

Suite à la compréhension de la formation des chaînes de montagnes selon Wegener, nous essayerons dans la partie suivante de mener une modélisation de ce savoir dans le cadre de la problématisation.

5 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon Wegener

Dans un cadre mobiliste postulant que la position des masses continentales change au cours du temps, Wegener mobilise plusieurs contraintes empiriques et théoriques dans la construction du problème de la formation des chaînes de montagnes. Partant de l'idée que les roches du globe présentent des éléments radioactifs, la désintégration de ces éléments radioactifs engendre la chaleur. Cela conduit nécessairement à l'impossibilité d'un refroidissement du globe. D'autres

contraintes comme l'équilibre isostatique des continents mène à l'impossibilité d'un effondrement des "ponts continentaux". Les observations comme l'emboîtement du contour des continents, l'analogie des faunes et des flores, les traces glaciaires, ou encore les forces « Eötvös » et d'attraction solaire et lunaire conduisent à la nécessité d'une translation des continents.

D'après les explications présentées ci-dessus, nous représentons dans la **Fig.9** une ébauche de l'espace de contraintes du problème de la formation des chaînes de montagnes selon Wegener.

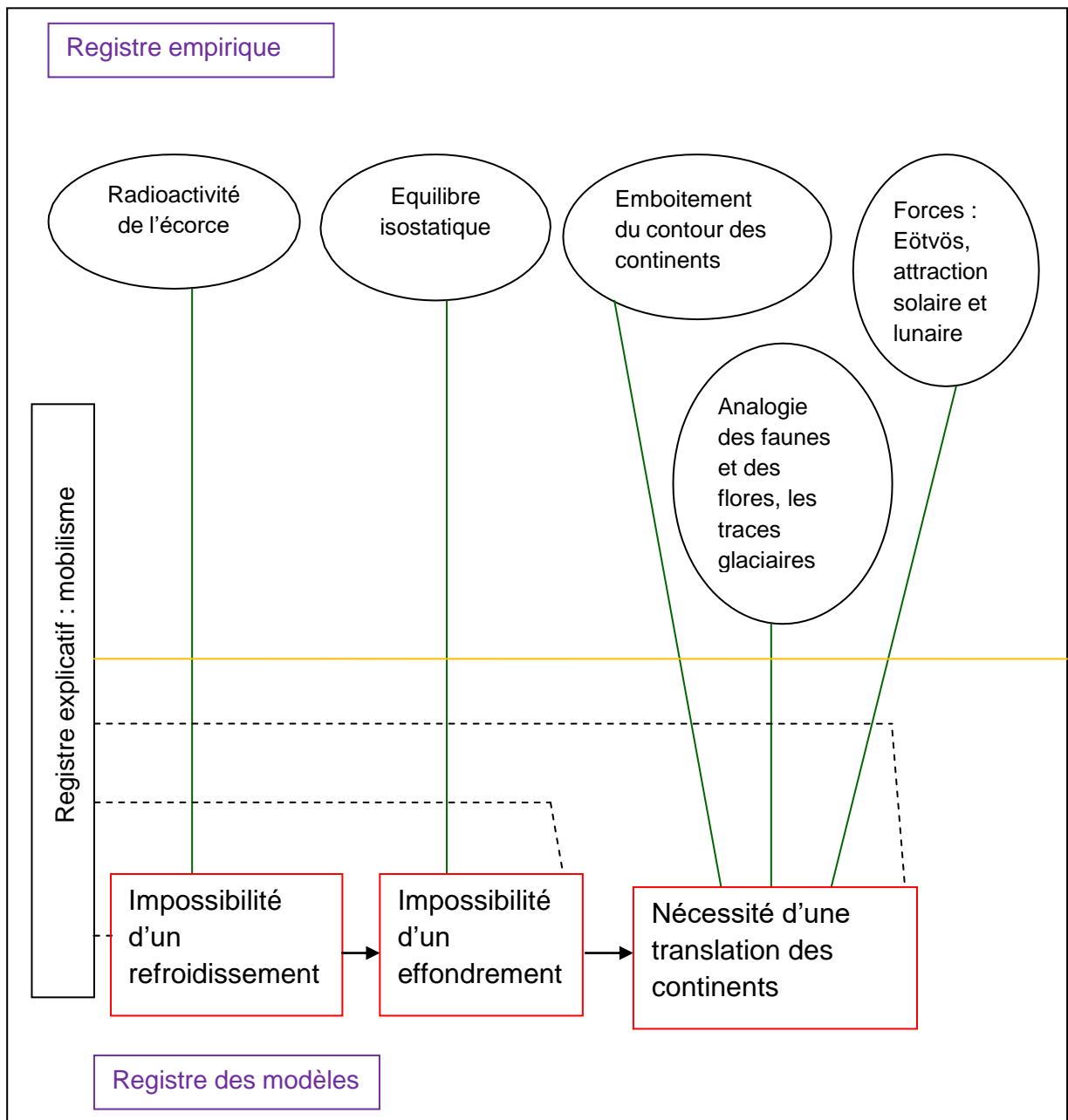


Fig.9. Problème de la formation des chaînes de montagnes : ébauche d'un espace de contraintes de Wegener.

Nous allons maintenant présenter les différentes critiques formulées concernant le modèle de translations continentales proposé. Autrement, nous viserons dans la partie suivante à montrer d'un côté les difficultés rencontrées par Wegener pour convaincre la communauté scientifique de sa théorie et de présenter d'un autre côté les conditions de possibilité qui permettent l'émergence du modèle suivant.

5 - 3 Le modèle explicatif proposé par Wegener : points de controverse et conditions de possibilité

Le modèle de translations continentales, qui envisage une zone avec une certaine fluidité facilitant le déplacement des continents, va rapidement affronter les données établies par la sismologie et qui admettent que le globe terrestre est entièrement solide jusqu'à une profondeur de 2900 km.

En remarquant qu'une certaine confusion régnait chez les spécialistes concernant la possibilité (ou non) du déplacement des continents au sein d'un milieu solide, Wegener répondait en admettant que la translation des continents n'est pas liée de l'état solide de la planète mais plutôt de son comportement rhéologique qui dépend des échelles de temps impliquées. Son idée a été fortement critiquée par la communauté scientifique. En fait, toute la difficulté se trouve dans la compréhension du comportement rhéologique de la Terre : la modélisation viso-élastique de la Terre a-t-elle un sens ? Est-ce que les couches externes du globe peuvent se déformer par des forces faibles mais qui agissent pendant de très longues durées ? Les études faites en 1920, surtout par Jeffreys (1891-1989) concluent que l'intensité des forces proposées par Wegener est trop faible, et que la résistance du Sima est aussi forte, empêchant ainsi un déplacement des continents.

Le modèle de translations paraît prometteur malgré la faiblesse du moteur de la dérive des continents proposé. Nous pouvons dire alors que ce dernier (le moteur de la dérive) représente une difficulté pour Wegener qui cherche à convaincre la communauté scientifique de sa théorie. Des découvertes comme celle liée à la sismologie (qui montre que la Terre est traversée par les ondes de cisaillement S, caractérisées par leur inaptitude de se propager dans des matériaux liquides) ou encore les remarques émises par Holmes et qui précisent que l'activité volcanique est insuffisante à évacuer toute la chaleur d'origine radioactive du globe (voir la partie suivante de ce chapitre) ont joué un rôle dans la fragilisation du modèle de translations et ouvre l'horizon sur d'autres modèles qui s'intéressent de la structure et le comportement internes du globe terrestre. Ainsi, la sismologie du globe ou encore la chaleur d'origine radioactive sont considérées selon nous comme des conditions de possibilité du modèle suivant proposé par Holmes.

6 Le modèle de mouvements de convection d'Holmes

Nous étudions dans la première partie de cette section, la façon par laquelle Holmes explique la formation des chaînes de montagnes.

6 - 1 La compréhension de la formation des chaînes de montagnes selon Holmes

Malgré le refus des idées de Wegener par un nombre important de spécialistes (dont Jeffreys), Holmes (1890-1965) soutenait la théorie de la dérive des continents tout en réfutant le moteur. Holmes s'interroge sur l'insuffisance de l'activité volcanique à transmettre toute la chaleur d'origine radioactive. Il propose alors une circulation convective planétaire produite sous l'écorce permettant l'évacuation de la chaleur interne. Ces courants de convection sont responsables selon lui de la dérive des continents. Il propose que les courants ascendants soient placés sous les continents vu que ces derniers comportent la plus grande part des éléments radioactifs (Bouchardon, 2013, p. 7). Hallam (1976) parle de ces courants de convection en précisant qu' « *Il apparaissait déjà évident à l'époque que l'activité volcanique ordinaire ne suffisait pas à transmettre toute la chaleur d'origine radioactive que l'on estimait passer du substrat (thermiquement fluide) à la surface de la Terre. Les données s'expliquaient mieux si l'on supposait dans le substrat l'existence de courants de convection qui, s'ils étaient ascendants sous les continents, pouvaient provoquer leur dérive. Dans le cas simple d'une couche de liquide visqueux uniformément chauffé, limitée en haut et en bas par des surfaces conductrices, rigides, un état de stabilité convective se maintient jusqu'à ce que soit atteint un certain gradient thermique critique, fonction de la compressibilité, de la conductivité et de la viscosité du fluide. Lorsque ce gradient est dépassé, il s'établit une sorte de circulation convective. Des centres locaux apparaissent, à partir desquels naissent des courants ascendants. Au sommet de la couche de liquide, ceux-ci s'étalent se mélangent et redescendent, formant un système de prismes polygonaux irréguliers* » (Hallam, 1976, p. 49-50).

Les courants ascendants provoquent selon Holmes la distension de la croûte continentale qui se divise en deux blocs, glissant chacun de son côté. Cette

distension provoque ainsi la formation d'une nouvelle croûte océanique entre deux blocs séparés. En se basant sur l'idée que la Terre est un espace fini, il approuve que s'il y a une distension dans certaines zones du globe il va y avoir nécessairement une compression dans d'autres zones. Ces zones se situent au niveau des bordures des continents et au niveau des océans froids (en comparaison aux continents). Pour Holmes, c'est là que doivent se positionner les courants descendants, transportant en quelque sorte la croûte océanique dans le manteau.

Holmes considère enfin que ces mouvements tangentiels puissent entraîner un transfert du matériel sialique léger en engendrant un épaissement de la croûte et par suite la formation des chaînes de montagnes (Bouchardon, 2013, p. 7).

Suite à la compréhension de la formation des chaînes de montagnes selon Holmes, nous allons essayer maintenant de modéliser ce savoir dans le cadre de la problématisation.

6 - 2 La modélisation de la formation des chaînes de montagnes selon Holmes

Nous allons essayer dans cette partie de comprendre comment Holmes peut construire le problème de la formation des chaînes de montagnes, les nécessités qu'il construit et le registre explicatif qu'il mobilise.

Pour expliquer la formation des chaînes de montagnes, Holmes, s'inscrit comme Wegener dans un cadre mobiliste, où il postule que les masses continentales peuvent changer de position tout au long du temps géologique. Il mobilise dans son explication plusieurs contraintes empiriques et théoriques. Partant de l'idée que la valeur de la chaleur libérée par le volcanisme n'est pas suffisante pour évacuer toute la chaleur produite par radioactivité sur le globe. Cela mène à la construction de la nécessité de mouvements de convection qui permettent l'évacuation du reste de la chaleur interne de la Terre. La présence d'éléments radioactifs responsables à la production importante de chaleur sous les continents (par rapport à celle des océans) mène à la formation de courants ascendants sous les continents et des courants descendants au niveau des océans. Les courants ascendants sont responsables de la distension des blocs. En se basant sur l'idée que la Terre est un espace fini, il est nécessaire qu'il y ait une compression pour garder la surface du

globe stable (Hallam, 1976) [Holmes raisonne ici à l'échelle du globe]. Cette compression est responsable de l'épaississement sialique et par suite la formation des chaînes de montagnes.

D'après les explications présentées ci-dessous, nous représentons dans la **Fig.10** une ébauche d'espace de contraintes de la formation des chaînes de montagnes d'Holmes.

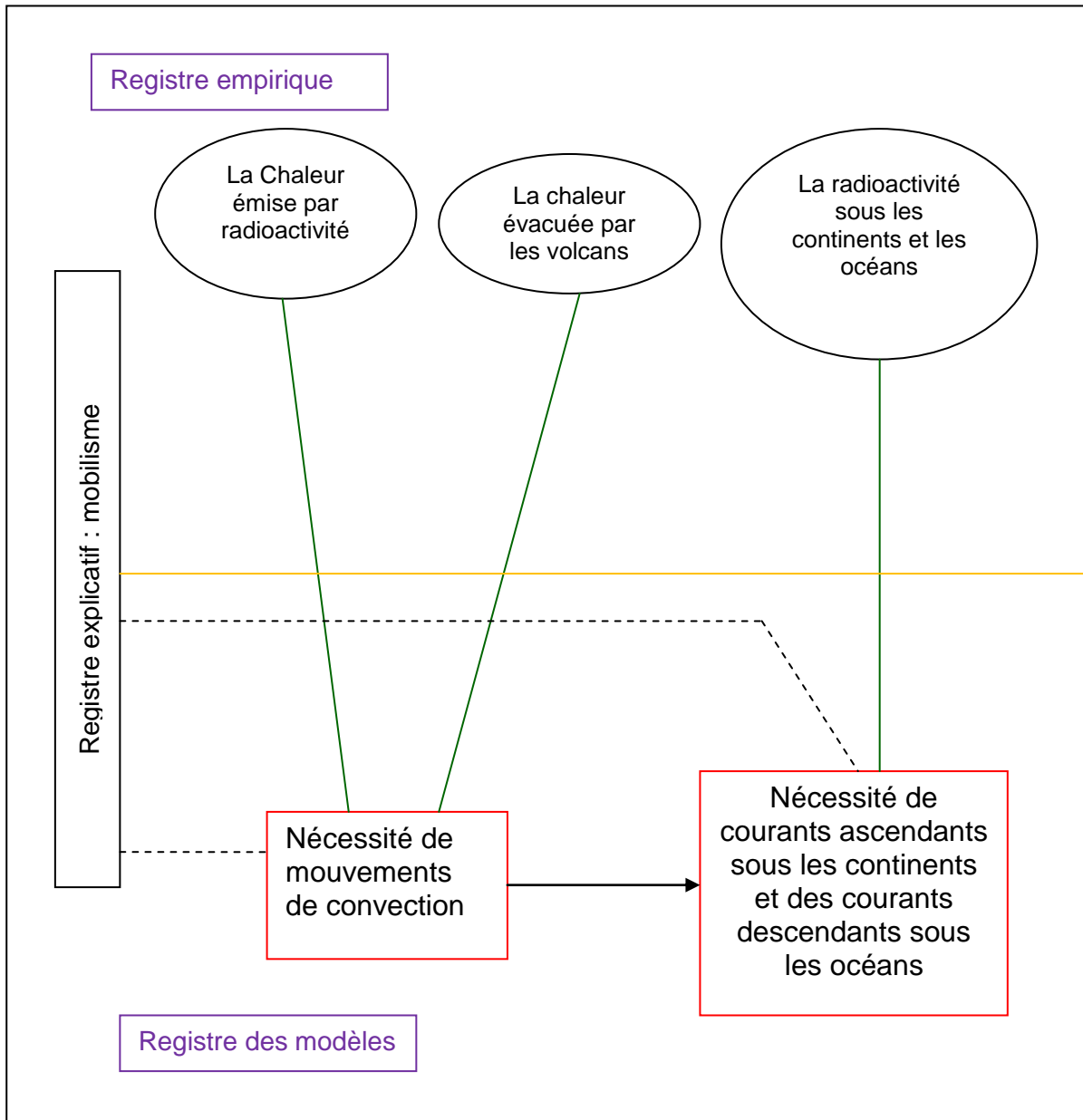


Fig.10. Problème de la formation des chaînes de montagnes : ébauche de l'espace de contraintes de Holmes.

Suite à la modélisation de la formation des chaînes de montagnes dans le cadre de

la problématisation, nous présenterons dans la partie suivante les critiques qui ont été formulées concernant le modèle de mouvements de convection. Nous viserons dans cette partie à mettre en lumière d'un côté les difficultés rencontrées par Holmes pour convaincre la communauté scientifique de son modèle et de présenter d'un autre côté les conditions de possibilité du modèle suivant.

6 - 3 Les critiques de la communauté scientifique concernant le modèle explicatif d'Holmes : points de controverse et conditions de possibilité

Au contraire des autres modèles explicatifs, le modèle explicatif d'Holmes a pu saisir « *le couplage entre les mouvements superficiels et internes du globe et la possibilité d'une liaison entre les approches dynamique, thermique et géologique* » (Deparis, 2011a, p.9). L'hypothèse des mouvements de convection est mise en doute par nombreux scientifiques. Nous citons ici Jeffreys (1891-1989) qui affirme que « *J'ai examiné assez longuement la théorie du professeur Holmes sur les courants de convection, et je n'ai trouvé aucun test qui pourrait l'appuyer ou la contredire. Autant que je peux voir, elle ne contient rien de fondamentalement impossible, mais l'association de conditions devant être réunies pour qu'elle puisse fonctionner appartient plutôt au domaine de l'extraordinaire* » (Jeffreys, in Frankel, 1978, p.146). La situation n'a évolué qu'en 1960 grâce à la découverte des fonds océaniques (et plus précisément les dorsales médio-océaniques) qui a permis ensuite de formuler la théorie de l'expansion océanique. Le questionnement et l'interprétation des mesures magnétiques menées durant les explorations marines, ont été ensuite reliés aux dorsales et à leur fonctionnement. Ces mesures ont permis de montrer la présence des anomalies des bandes magnétiques par rapport au champ dipolaire (le champ magnétique terrestre). Ces bandes représentent des anomalies négatives ou positives placées d'une façon parallèle et symétrique de part et d'autre des dorsales. Elles résultent de l'aimantation propre des roches du fond océanique établie lors de la création de ces roches de la croûte océanique. Le signe négatif ou positif des bandes varie en fonction de l'orientation inverse ou normale du champ magnétique terrestre durant le refroidissement des laves (Deparis, 2011b). Cette découverte a permis de conclure que durant la création de la croûte océanique au

niveau des dorsales, cette dernière (la croûte) acquiert une « aimantation propre » durant son refroidissement. Elle s'éloigne après d'une façon symétrique de part et d'autre de la dorsale quand un nouveau matériau est injecté au centre. Ainsi, c'est par la découverte de l'expansion océanique que les scientifiques admettent que les indicateurs de la dérive ne sont pas uniquement continentaux, mais océaniques aussi : *« Les linéations magnétiques alternées se comprennent donc par la combinaison de la divergence de la croûte océanique et des inversions du champ magnétique. Les indices de la dérive ne sont donc plus uniquement continentaux mais également océaniques »* (Deparis, 2011b, p. 4).

L'observation de la localisation de l'activité sismo-tectonique de la Terre a montré de plus, que les séismes sont distribués dans des zones bien déterminées qui sont les dorsales, les fosses, les failles transformantes et les chaînes de montagnes. A part les fosses, où les séismes peuvent se trouver jusqu'au 700 km de profondeur, les tremblements de Terre existent dans la partie superficielle du globe terrestre à une profondeur inférieure à 100 Km (c'est une profondeur largement importante par rapport à celle de la croûte océanique qui est de l'ordre de 12 Km). Ceci amène les spécialistes de conclure qu'il n'y a pas que la croûte océanique qui « dérive » sur le manteau (la partie supérieure du manteau se déplace aussi avec la croûte). En se plaçant à l'échelle du globe et en intégrant la possibilité de mouvements dans un corps solide, L'étude de la variation des vitesses d'ondes sismiques sous les océans et les continents a permis de conclure que *« la partie superficielle de la Terre constitue une couche au comportement rigide, appelée la lithosphère, qui surmonte une couche au comportement ductile, l'asthénosphère. La lithosphère se distingue donc de l'asthénosphère, non pas par sa composition chimique mais par son comportement mécanique. Elle comprend la croûte et la partie supérieure du manteau »* (Deparis, 2011b, p.6-7).

Concernant les tremblements de Terre qui ont eu lieu au niveau des fosses à des profondeurs très importantes (700 Km), Wadachi (1902-1995) a remarqué que les foyers de séismes s'inclinent selon un plan incliné qui est interprété comme le marqueur de la lithosphère océanique qui s'enfonce dans le manteau.

Suite à toutes ces précisions mentionnées ci-dessus, nous pouvons dire que la découverte de l'expansion océanique ou encore l'observation de la localisation de l'activité sismo-tectonique du globe terrestre, sont considérées selon nous comme

des conditions de possibilité du modèle de la tectonique des plaques. Ce modèle (qui suit celui d'Holmes) est déjà explicité dans le troisième chapitre au cours duquel nous avons réussi à comprendre comment les scientifiques actuels construisent la formation des chaînes de montagnes dans le cadre de la tectonique des plaques et à identifier les contraintes et les nécessités qu'ils mobilisent.

Conclusion

Nous avons pu étudier dans ce quatrième chapitre le phénomène de la formation des chaînes de montagnes (orogénèse et tectogénèse) dans le cadre de l'histoire des sciences. Nous avons ainsi, abouti à représenter les différents modèles explicatifs liés à ce concept, qui ont été construits par les scientifiques dans les cadres théoriques anciens à récents. Nous représentons dans la **Fig.11** une récapitulation de ces modèles explicatifs. Cette figure met en valeur les controverses observées dans la communauté scientifique et les contraintes mobilisées et qui ont permis le passage d'un modèle explicatif à un autre. On peut donner à titre d'exemple le travail sur la question de la formation des basaltes (ces roches sont-elles d'origine sédimentaire ou volcanique) qui a permis le passage d'un modèle neptunien à un modèle plutonien.

A partir de ces controverses, nous avons ainsi réussi à préciser les points de discussion ayant porté sur chaque modèle et à identifier les conditions de possibilité qui ont favorisé l'émergence de "nouveaux" modèles explicatifs. A ce niveau, nous précisons que les éléments de l'histoire de la formation des chaînes de montagnes nous ont permis d'identifier plusieurs points de discussion (au sein de la communauté scientifique). Nous citerons en particulier ce qui nous paraît les trois principaux :

-Des discussions liées à l'origine des roches qui forment les chaînes de montagnes.

Nous avons précisé dans ce chapitre que « Le neptunisme » postule que toutes les roches constituant les chaînes de montagnes se forment par précipitation chimique suite à l'abaissement du niveau d'un océan primitif considéré comme chaotique.

Dans ce cadre de pensée, la formation des chaînes de montagnes est envisagée comme d'origine sédimentaire, ce qui empêche d'aller chercher d'autres explications (une origine ignée des roches par exemple).

Cette façon de penser a été dépassée par la communauté scientifique suite à la découverte des anciens volcans en Europe et après l'identification minéralogique des basaltes et des laves par analyse chimique. Ces découvertes représentent selon nous des conditions de possibilité de l'origine ignée des roches (basaltes) formant les montagnes.

-Des discussions liées aux mouvements responsables à la formation des chaînes de montagnes

Ce quatrième chapitre a montré que certains scientifiques (comme Hutton) considèrent « Le soulèvement » comme mouvement qui explique la formation des chaînes de montagnes par la montée et la fusion des sédiments enfouis sous l'effet de la chaleur souterraine.

Selon cette conception, la formation des chaînes de montagnes est considérée comme le produit de mouvements verticaux (soulèvement), ce qui empêche d'entrer dans une vision qui donne aux mouvements horizontaux un rôle important dans la formation des chaînes de montagnes.

Cette façon de penser a été dépassée suite à l'observation des plissements des couches ainsi que le chevauchement des terrains d'âge et de nature différents voire la découverte des nappes de charriages, qui ont amené la communauté scientifique à donner aux mouvements horizontaux un rôle fondamental dans la formation des chaînes de montagnes.

-Des discussions liées au moteur du déplacement horizontal des « continents »

Nous avons pu préciser dans ce chapitre que les « translations continentales » proposées par Wegener, expliquent que les continents composés par des roches de moindre densité par rapport à celle des océans flottent sur des fonds océaniques. Ils (les continents) se déplacent à la surface de la Terre grâce à la force centrifuge liée à la rotation du globe et grâce à la combinaison des attractions solaires et lunaires avec la rotation de la Terre. Ce déplacement entraîne ainsi des collisions qui sont responsables à la formation des chaînes de montagnes.

Dans ce cadre de pensée, ce sont les continents qui se translatent et non pas les plaques formées par la croûte [océanique ou continentale] (donc porteuses des continents) associée à la partie supérieure du manteau. Ces continents sont considérés comme des objets immuables et permanents, et il est difficile d'expliquer leur déplacement (les forces responsables à la translation des continents, proposées

par Wegener, ont été fortement critiquées). La communauté scientifique a réussi à dépasser ce problème d'explication de ce qui permet la dérive des continents suite à un ensemble de découvertes comme celle liée à la sismologie (C'est surtout le fait que la propagation des ondes P et S montraient que la partie superficielle de la Terre est solide) ou encore les observations émises notamment par Holmes qui indiquent que l'activité volcanique n'est pas suffisante pour évacuer toute la chaleur d'origine radioactive du globe. Ces observations ont permis ainsi de fragiliser le moteur proposé par Wegener pour expliquer le déplacement des continents.

Avec ces observations, d'autres découvertes comme celle de l'expansion océanique ou encore l'observation de la localisation de l'activité sismo-tectonique du globe terrestre (voir pp. **86-87**) ont permis de proposer un nouveau modèle : c'est le modèle de la tectonique des plaques. Dans ce cadre, les chaînes de montagnes sont formées dans un contexte général de convergence des plaques tectoniques, où la lithosphère océanique formée initialement au niveau de l'axe de la dorsale par remontée de magma, va s'enfoncer par augmentation de sa densité en s'éloignant de l'axe de la dorsale. Lorsque la subduction de la lithosphère continentale devient impossible (puisque la densité de la lithosphère continentale est plus faible que celle de la lithosphère océanique), la collision de deux lithosphères continentales (LC) prend le relais. Elle provoque le chevauchement et l'empilement des nappes qui sont responsables à la formation de relief (orogénèse ; voir le chapitre suivant pour plus de détails). Dans le cadre de la tectonique des plaques, l'enfoncement de la lithosphère océanique au niveau des zones de subduction, est remplacé par la formation continue d'une nouvelle lithosphère océanique (formée au niveau de la dorsale par montée du magma).

Par ces éléments, nous avons réussi à montrer la complexité de l'explication de la formation des chaînes de montagnes. Les points de discussion et les conditions de possibilité précisés ci-dessus présentent des repères qui nous aideront à comprendre les explications spontanées des élèves, les difficultés qu'ils peuvent rencontrer dans la construction de ce phénomène et les conditions de possibilité de la construction par les élèves des nouvelles modélisations.

Suite à l'étude du phénomène de la formation des chaînes de montagnes dans le cadre de l'histoire des sciences, nous trouvons important d'explicitier dans le cinquième chapitre notre question de recherche et la méthodologie menée pour le

recueil et l'analyse des données de notre étude.

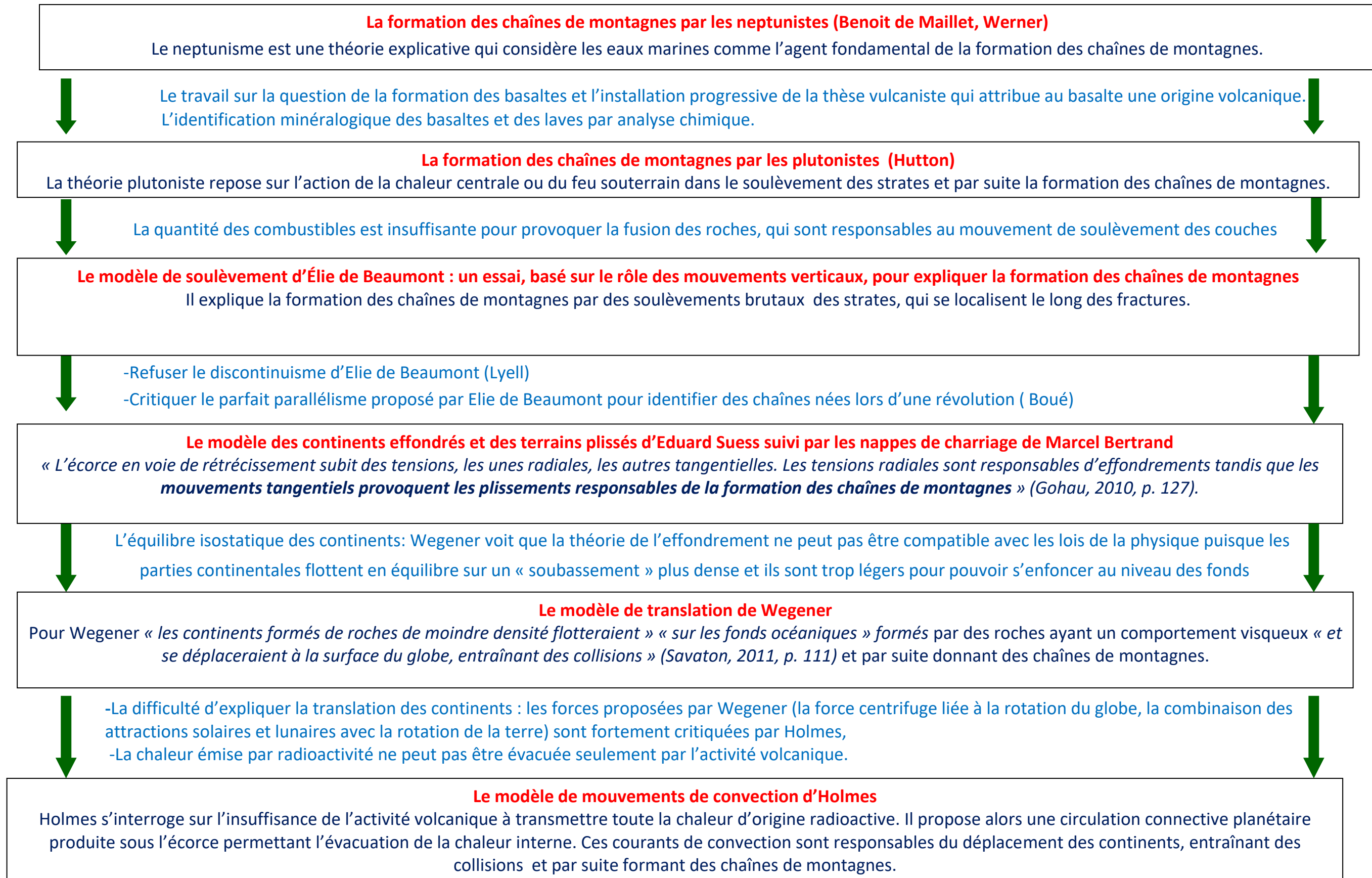


Fig.11. Les modèles explicatifs de la formation des chaînes de montagnes, construits par les scientifiques dans les cadres théoriques anciens.

CHAPITRE V. QUESTION DE RECHERCHE, OBJETS D'ETUDE ET METHODOLOGIE DE TRAVAIL

Introduction

Les approfondissements théoriques et les précisions épistémologiques présentés dans les chapitres précédents préparent à l'étude didactique qui sera menée dans les chapitres suivants.

Avant de nous focaliser sur l'analyse des situations de classe, nous allons, dans ce chapitre, présenter la méthodologie suivie pour le recueil et l'analyse des données de notre recherche.

Nous expliciterons en premier lieu nos objectifs de recherche. Nous présenterons ensuite la méthodologie de travail.

1 L'explicitation des objectifs de recherche

Notre recherche s'ancre dans le cadre de l'apprentissage par problématisation en sciences de la Terre (Orange-Ravachol, 2003). Nous étudions le débat entre élèves et enseignante observé en situation pendant une séquence dite « ordinaire » de classe (Mercier, 2008) [voir la partie 3 de ce chapitre pour plus de détails sur les séquences ordinaires]. Cela, nous donnera des informations sur le potentiel de ces séquences ordinaires lorsqu'elles sont étudiées dans le cadre de l'apprentissage par problématisation. Nous essayerons alors de comprendre comment les lycéens peuvent s'engager dans la construction du phénomène de la formation des chaînes de montagnes de collision et d'avoir des renseignements sur les difficultés rencontrées chez les apprenants dans la construction de ce problème.

La méthodologie mise en place devrait ainsi permettre d'atteindre les objectifs suivants :

- En nous référant aux nécessités identifiées chez les chercheurs, déterminer les nécessités qui sont ou non construites par les apprenants en lien avec les registres explicatifs qu'ils mobilisent pour penser les explications géologiques.

- Ces précisions vont permettre de dégager certaines difficultés rencontrées par les élèves dans la construction du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision.

-Ce faisant, repérer et discuter les problèmes que se sont vraiment posés les élèves.

Pour atteindre ces objectifs, nous envisageons de mener une analyse des débats lors d'une séquence ordinaire d'enseignement et d'apprentissage portant sur la formation des chaînes de montagnes de collision conduite par une enseignante expérimentée. Il est important de préciser ici que le débat scientifique¹³ en classe est un dispositif pédagogique qui ne fait pas partie des pratiques ordinaires¹⁴ de l'enseignante. La mise en œuvre d'un débat en classe est plutôt une demande *a priori* faite par nous, chercheure, afin d'essayer d'engager le plus possible le travail de la classe, en fonction des objectifs de notre recherche. Le fait alors que le chercheur intervient dans le choix de l'enseignement et propose le débat comme dispositif privilégié pour mener les séances, nous amène à considérer la séquence étudiée comme non tout à fait ordinaire (voir la partie 3 de ce chapitre pour plus de détails sur le choix de la méthodologie de recueil des données).

2 Les objets d'étude, niveau de classe et situations retenues

Concernant l'objet d'étude, nous aborderons le thème de la formation des chaînes de montagnes de collision. Il s'agit d'un thème qui a été précédemment étudié dans le cadre des travaux de la problématisation en sciences de la Terre (Orange Ravachol, 2010b). Cela permettra la mise en lumière de la spécificité de notre approche par rapport aux travaux publiés. En fait, la particularité de notre travail tient au fait que nous visons de faire une analyse (macroscopique et microscopique) d'un débat qui va être mené par une enseignante dont ce dispositif ne fait pas partie de ses pratiques ordinaires (voir paragraphe précédent). C'est particulier par rapport

¹³: Les fonctions du débat ne se limitent pas à « l'explication et à la "fissuration" des conceptions : c'est avant tout la construction de raisons- contraintes et nécessités portant sur les solutions possibles- qui est visée » (Orange, 2003, p. 85).

¹⁴: Nous avons remarqué que le débat ne fait pas partie des pratiques ordinaires de l'enseignante, suite à l'observation d'une séance menée par la professeure avant la séquence étudiée dans notre recherche. Durant cette séance, nous avons remarqué qu'il n'y a pas eu un débat en classe (le script de cette séance se trouve dans l'**annexe.3**).

à un certain nombre des travaux étudiés sur ce sujet qui ont mis en place des « situations forcées » (Orange & Orange Ravachol, 2007, Orange, 2010).

Le phénomène de formation des chaînes de montagnes de collision que nous abordons constitue un sujet d'étude majeur qui est pris en compte par les programmes de SVT de Terminale S de 2011¹⁵ consacrés à l'étude du thème « la convergence lithosphérique : contexte de formation des chaînes de montagnes ».

Les connaissances visées pour ce problème et indiquées par le programme officiel de 2011 sont : « *Les chaînes de montagnes présentent souvent les traces d'un domaine océanique disparu (ophiolites) et d'anciennes marges continentales passives. La « suture » de matériaux océaniques résulte de l'affrontement de deux lithosphères continentales (collision). Tandis que l'essentiel de la lithosphère continentale continue de subduire, la partie supérieure de la croûte s'épaissit par empilement de nappes dans la zone de contact entre les deux plaques. Les matériaux océaniques et continentaux montrent les traces d'une transformation minéralogique à grande profondeur au cours de la subduction. La différence de densité entre l'asthénosphère et la lithosphère océanique âgée est la principale cause de la subduction. En s'éloignant de la dorsale, la lithosphère océanique se refroidit et s'épaissit. L'augmentation de sa densité au-delà d'un seuil d'équilibre explique son plongement dans l'asthénosphère* » (M.E.N, 2011, p. 10).

La plupart des phénomènes liés au phénomène de formation des chaînes de montagnes de collision (comme la subduction) sont plutôt familiers pour les élèves de terminale S étant donné qu'ils ont été déjà travaillés en première S dans le cadre de la tectonique des plaques. Nous pouvons lire par exemple dans le programme officiel de 2010 de première S et plus précisément dans la partie connaissances du thème « La tectonique des plaques : « L'histoire d'un modèle » : « *Au voisinage des*

¹⁵ : Le phénomène de la formation des chaînes de montagnes de collision ne prend pas la même ampleur dans le nouveau programme. En effet, dans le programme d'enseignement de spécialité de sciences de la vie et de la Terre de la classe de Terminale de la voie générale de 2019, on ne trouve pas tout un thème consacré à l'étude de ce phénomène. En revanche, on le trouve implicitement au niveau du thème « Les traces du passé mouvementé de la Terre » et plus précisément dans la partie « la recherche d'océans disparus ». En effet, les connaissances visées dans cette partie sont « *Les ophiolites sont des roches de la lithosphère océanique. La présence de complexes ophiolitiques formant des sutures au sein des chaînes de montagnes témoigne de la fermeture de domaines océaniques, suivie de la collision de blocs continentaux par convergence de plaques lithosphériques. L'émergence d'ophiolites résulte de phénomènes d'obduction ou de subduction, suivis d'une exhumation* » (M.E.N, 2019, p. 12).

fosses océaniques, la distribution spatiale des foyers des séismes en fonction de leur profondeur s'établit selon un plan incliné. Les différences de vitesse des ondes sismiques qui se propagent le long de ce plan, par rapport à celles qui s'en écartent, permettent de distinguer : la lithosphère de l'asthénosphère. L'interprétation de ces données sismiques permet ainsi de montrer que la lithosphère s'enfonce dans le manteau au niveau des fosses dites de subduction. La limite inférieure de la lithosphère correspond généralement à l'isotherme 1300° C » (B.O spécial n° 9 du 30 septembre 2010, p. 5).

Le programme de 2010 précise qu'en 1 ère S « *On se contente de présenter la notion de subduction* » (p.5) et que « *le mécanisme et les conséquences géologiques de ce phénomène seront abordés en Terminale* » (ibid, p.5).

Au vu de ces précisions curriculaires, nous avons choisi de mener notre séquence en classe de terminale S. En fait, nous trouvons intéressant d'examiner si les phénomènes liés à la formation de chaînes de montagnes étudiés déjà en 1 ère S dans le cadre de la tectonique des plaques et par suite considérés comme pré-requis selon les instructions officielles, seront directement remobilisables par les élèves en terminale S dans un autre contexte (contexte de la formation des chaînes de montagnes de collision) ou si cela demande plutôt un travail de décontextualisation- recontextualisation rendant possible l'apprentissage et par suite la construction des nouveaux savoirs.

Le problème de la formation des chaînes de montagnes de collision retenu pour notre étude est un problème mixte : « *c'est-à-dire relevant à la fois de la géologie fonctionnaliste et la géologie historique* » (Orange-Ravachol, 2003, p. 79). En effet, construire ce problème demande tout d'abord de chercher les conditions de possibilité d'un enfoncement de la lithosphère océanique dans l'asthénosphère. On est à ce niveau devant un problème de géologie fonctionnaliste. A la composante fonctionnaliste du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision s'ajoute une composante historique. En effet, pour expliquer les traces d'un ancien domaine océanique au niveau des chaînes de montagnes, comme en atteste par exemple la présence des ophiolites à certains endroits des Alpes, il s'agit de faire une comparaison entre cet ensemble de roches avec ce qui se forme aujourd'hui au niveau des dorsales océaniques. On est à ce niveau devant un problème géologique qui met en jeu l'actualisme de premier niveau en imaginant une structure ancienne et

son fonctionnement en le comparant à une structure actuelle dont nous connaissons le fonctionnement (Orange Ravachol, 2003). Expliquer ensuite la présence de ces ophiolites dans les sommets de certains massifs montagneux tout en écartant le déroulement d'un événement catastrophique (qui se fait dans un temps rapide) nécessite de faire appel à un temps long « *pour rendre compte d'une histoire de la Terre à partir de traces dont on ne voit pas directement de réalisations semblables aujourd'hui* » (Orange et Orange Ravachol, 2017, p. 25). En fait, passer d'un fond océanique immergé à des ophiolites perchées dans les sommets de certains massifs montagneux est expliqué par « *la mise en place de petites modifications dont la sommation sur une longue durée produit un grand effet* » (Orange-Ravachol, 2005, p. 190). Il s'agit ainsi d'expliquer la position atypique de ces ophiolites par exhumation des lambeaux de la lithosphère océanique enfouie à travers le canal de subduction ou par charriage des lambeaux de lithosphère océanique sur la lithosphère continentale (obduction) (voir chapitre 3).

Suite à la présentation du problème choisi et du niveau de classe retenu, il est temps d'explicitier le choix et l'intérêt de la méthodologie mobilisée durant l'étape du recueil des données.

3 Le choix d'une méthodologie fondée sur une séquence ordinaire

Du point de vue du recueil des données, notre recherche mobilise dans l'étude de la séquence d'enseignement la méthodologie dite des « situations ordinaires » (Mercier, 2008). Ce type de séquence va nous permettre d'étudier le travail ordinaire de débat entre élèves et enseignante tel qu'il se fait en classe et les difficultés auxquelles sont confrontés les apprenants dans la construction de la formation des chaînes de montagnes de collision.

Néanmoins, comme nous l'avons précisé dans la première partie de ce chapitre « L'explication des objectifs de recherche », le débat que l'enseignante va mener en classe ne fait pas partie de ses pratiques ordinaires. C'est nous, chercheure de cette étude, qui avons demandé à l'enseignante de privilégier ce dispositif pédagogique afin d'essayer d'engager le travail de la classe, en fonction des objectifs de notre recherche (**Fig.12**). Dans ce cas, vu que le chercheur intervient dans le choix de l'enseignement en classe, nous ne pouvons pas considérer alors la séquence

comme tout à fait ordinaire.

En fait, les séquences 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. Ces derniers s'abstiennent d'influencer ce qu'ils observent et ne cherchent, en aucun cas, à modifier les effets attendus* » (Chalak, 2014, p. 59).

Nous ne pouvons pas non plus considérer la séquence étudiée comme une séquence forcée. En effet, les situations forcées sont « *des situations d'enseignement construites au sein d'un groupe de recherche comportant des chercheurs en didactique et des enseignants engagés dans une formation par la recherche, dont l'enseignant de la classe* » (Orange, 2010, p.2) et durant lesquelles les objectifs d'apprentissages et les objectifs de recherche de la séquence sont définis a priori (ibid). «*Avant chaque séance, le groupe construit la préparation en fonction de ce double objectif et de ce qui s'est passé avant* » et «*après chaque séance un débriefing est fait, suivi de la préparation de la séance suivante dans le but d'aller aussi loin que possible vers les objectifs définis a priori* » (ibid).

Nous pouvons considérer la séquence étudiée comme plutôt un continuum entre une séquence ordinaire et une séquence forcée. En effet, dans notre cas nous n'avons pas participé dans la construction et la préparation des situations d'enseignement ni avant, ni après chaque séance comme c'est le cas dans la séquence forcée. Nous avons juste proposé a priori le débat scientifique comme un dispositif à favoriser lors de la réalisation de la séquence dont l'objectif est d'essayer d'obtenir un corpus qui sera le plus cohérent possible avec notre cadre théorique. En fait, nous nous inscrivons dans une approche rationaliste de l'activité scientifique (Bachelard, 1949) admettant comme l'a montré Orange (2003, p. 85) « *que les savoirs scientifiques sont des savoirs raisonnés, résultants de la construction de problèmes explicatifs* » et le débat vise au dépassement « *d'une connaissance commune, d'une opinion non questionnée, à un savoir scientifique possédant un certain degré de nécessité*» (ibid). En classe, ce sont bien des dispositifs didactiques comme le débat que l'on doit pouvoir mettre en place si on veut que les élèves apprennent les sciences dans le cadre de l'apprentissage par problématisation : comme l'a précisé Orange (2003, p. 85), c'est par « les explications qui se font au cours du débat, les controverses qui

s'y développent et les argumentations des élèves » que ces derniers peuvent construire des raisons scientifiques en termes de contraintes et nécessités portant sur les solutions possibles (ibid).

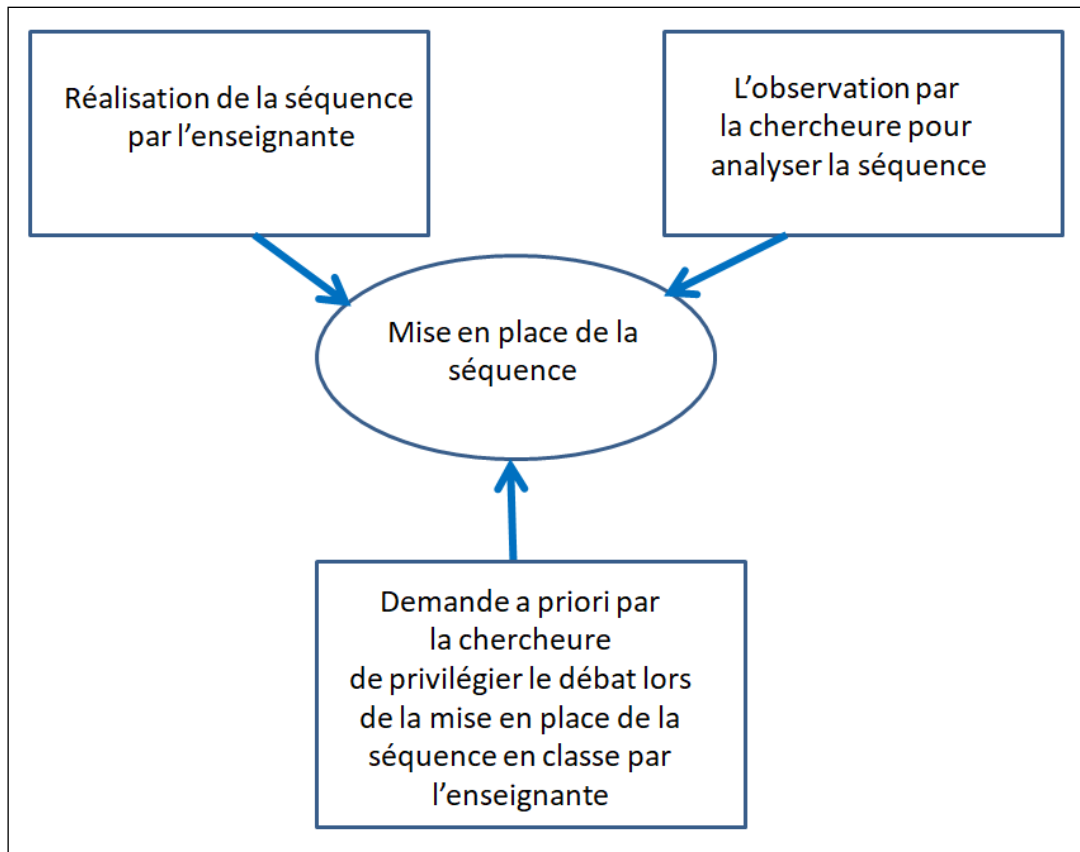


Fig.12. Les étapes de la séquence étudiée

La séquence de classe sur laquelle porte notre réflexion a été mise en place durant l'année scolaire 2018-2019 dans une classe en Terminale S de 32 élèves du lycée Kernanec de Marcq-en-Barœul (Nord).

La séquence étudiée dans notre recherche est composée par 4 séances. Et durant chacune d'elles, nous avons réussi à enregistrer le dialogue mené entre enseignante et élèves sur le phénomène de la formation des chaînes de montagnes de collision. Ainsi :

- La première séance est une séance de cours, elle a eu lieu le 07 janvier 2019. Elle est consacrée à l'étude des traces d'un domaine océanique. Au cours de cette séance, les élèves se sont basés sur le document support N1 (**Fig. 13**) pour

travailler les notions d'« ophiolites » et de « marges passives ».

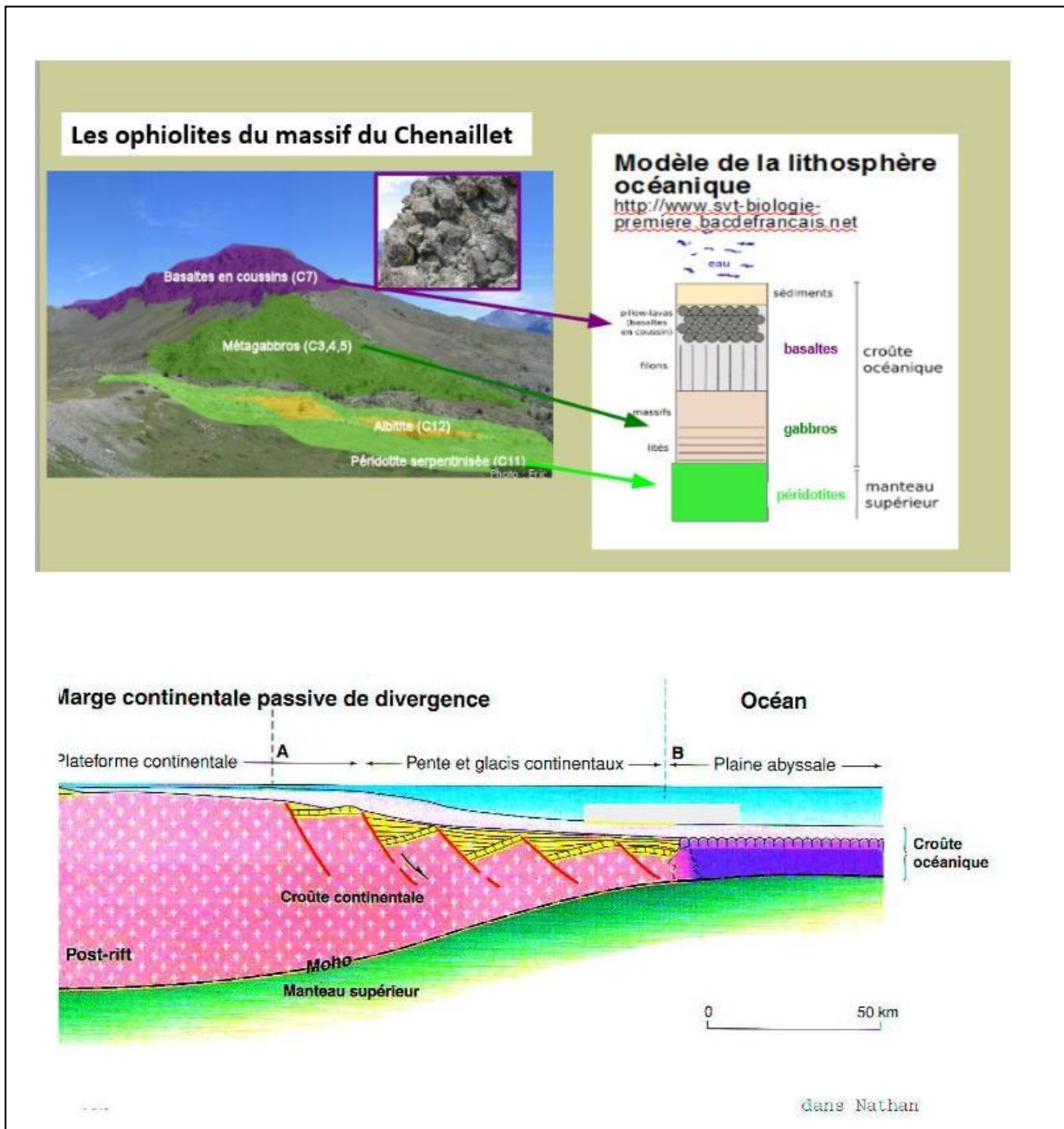


Fig.13. Fiche de travail sur les traces d'un domaine océanique (document support N1) (séance. 1)

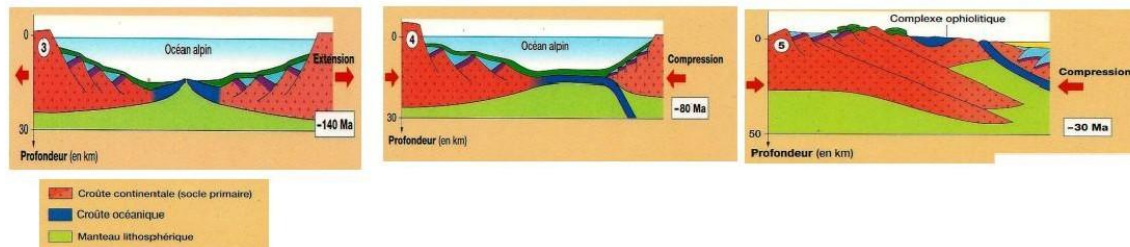
- La deuxième séance c'est une séance de travaux pratiques. Elle a eu lieu le 10 janvier 2019. Durant cette séance, l'enseignante a distribué le document « l'histoire des Alpes » (**Fig. 14**) qui comporte l'épisode de subduction ainsi que les deux diagrammes de la **fig. 15** qui représentent respectivement le domaine de stabilité de quelques minéraux ainsi que l'isotherme de température dans une zone de subduction.

Dans les Alpes, on retrouve des indices témoignant de la présence d'un ancien océan. (Ophiolites, traces d'une ancienne marge passive).

On cherche à montrer que l'histoire des Alpes comprend un épisode de subduction.

Ressources :

Document : L'Histoire des Alpes



A noter : Lors de la subduction, les roches de la croûte océanique subissent des transformations minéralogiques au cours de leur enfouissement (métamorphisme).

Le métamorphisme caractéristique des zones de subduction est un métamorphisme de haute pression, basse température.

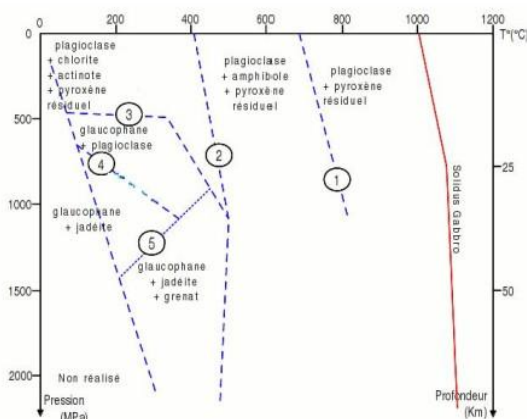
La haute pression est due à l'enfouissement de la croûte océanique, et la température basse est due au fait que la croûte océanique âgée qui subduit est assez froide (voir document isothermes).

Fig.14. (page1/3) Fiche de travail sur l'histoire des Alpes (avec l'épisode de subduction) (séance.2)

Le métamorphisme caractéristique des zones de subduction est un métamorphisme de haute pression, basse température.

La haute pression est due à l'enfouissement de la croûte océanique, et la température basse est due au fait que la croûte océanique âgée qui subduit est assez froide (voir document isothermes).

Document 1: domaine de stabilité de quelques minéraux



Document 2 : Isothermes de température dans une zone de subduction

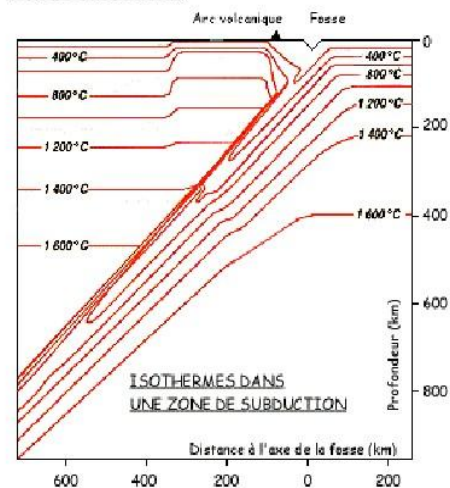


Fig.15. Fiche de travail (page 2 /3) présentant respectivement le domaine de stabilité de quelques minéraux ainsi que l'isotherme de température dans une zone de subduction (séance.2)

En se basant sur ces documents supports, les élèves ont été invités alors à proposer en premier lieu une stratégie de résolution pour montrer que l'histoire des Alpes s'est accompagnée d'un épisode de subduction. Ils ont été amenés en second lieu à faire des observations microscopiques de deux roches métamorphiques trouvées dans les Alpes dont l'objectif est d'identifier des minéraux métamorphiques de haute pression, basse température (HP-BT) caractéristiques des zones de subduction (**Fig. 16**).

MATERIEL DISPONIBLE

-Echantillons macroscopiques et lames minces de 2 roches métamorphiques trouvées dans les Alpes : un métagabbro du Queyras et une éclogite du Viso (roche qui a subi un métamorphisme de haute Pression/basse température).

-Microscope polarisant (filtres et oculaires spécifiques) et fiche technique+CAM-USB + fiche technique » détermination des minéraux.

ETAPE 1 : Proposer une stratégie de résolution pour montrer que l'histoire des Alpes s'est accompagnée d'un épisode de subduction

ETAPE 2 : Mettre en œuvre le protocole suivant :

1- Identifier à **l'œil nu** (ou à la loupe à main) dans les 2 roches fournies :

- le pyroxène bordé de glaucophane, et le plagioclase dans le métagabbro
- le grenat et la jadéite dans l'éclogite.

2- Identifier **sur les lames minces** au microscope polarisant :

-dans le métagabbro : le glaucophane en bordure ou en auréole autour du pyroxène

-dans l'éclogite : l'association jadéite + grenat

Aide : Précisions par rapport à la fiche de détermination des minéraux:

-le **pyroxène** n'a pas toujours des teintes vives en LPA car la les teintes peuvent être très atténuées par la couleur sombre naturelle

-le **grenat** s'éteint en LPA lorsqu'on tourne l'analyseur et possède des contours bien dessinés.

ETAPE 3-Présenter les données pour apporter les informations nécessaires à la résolution du problème.

Des images légendées sont attendues.

ETAPE 4-Exploiter les résultats pour répondre au problème posé.

Fig.16. Fiche de travail (page 3/ 3) indiquant les étapes à suivre durant le TP (séance2)

- La troisième séance est une séance de cours. Elle a eu lieu le 10 janvier 2019, à la suite de la séance de TP. Le cours est consacré à expliciter le scénario type des étapes de la formation d'une chaîne de montagnes de collision. Durant la séance, l'enseignante a utilisé le document support « scénario de formation des Alpes (Extension- Rifting- Formation d'un océan alpin- Subduction- collision) » **(Fig.17)** ainsi que le document « Schéma bilan (indices d'un ancien océan, indices d'une subduction, indices d'une collision) » **(Fig. 18)** afin d'aider les élèves à repérer les traces de chaque épisode du scénario de la formation d'une chaîne de montagne de collision.

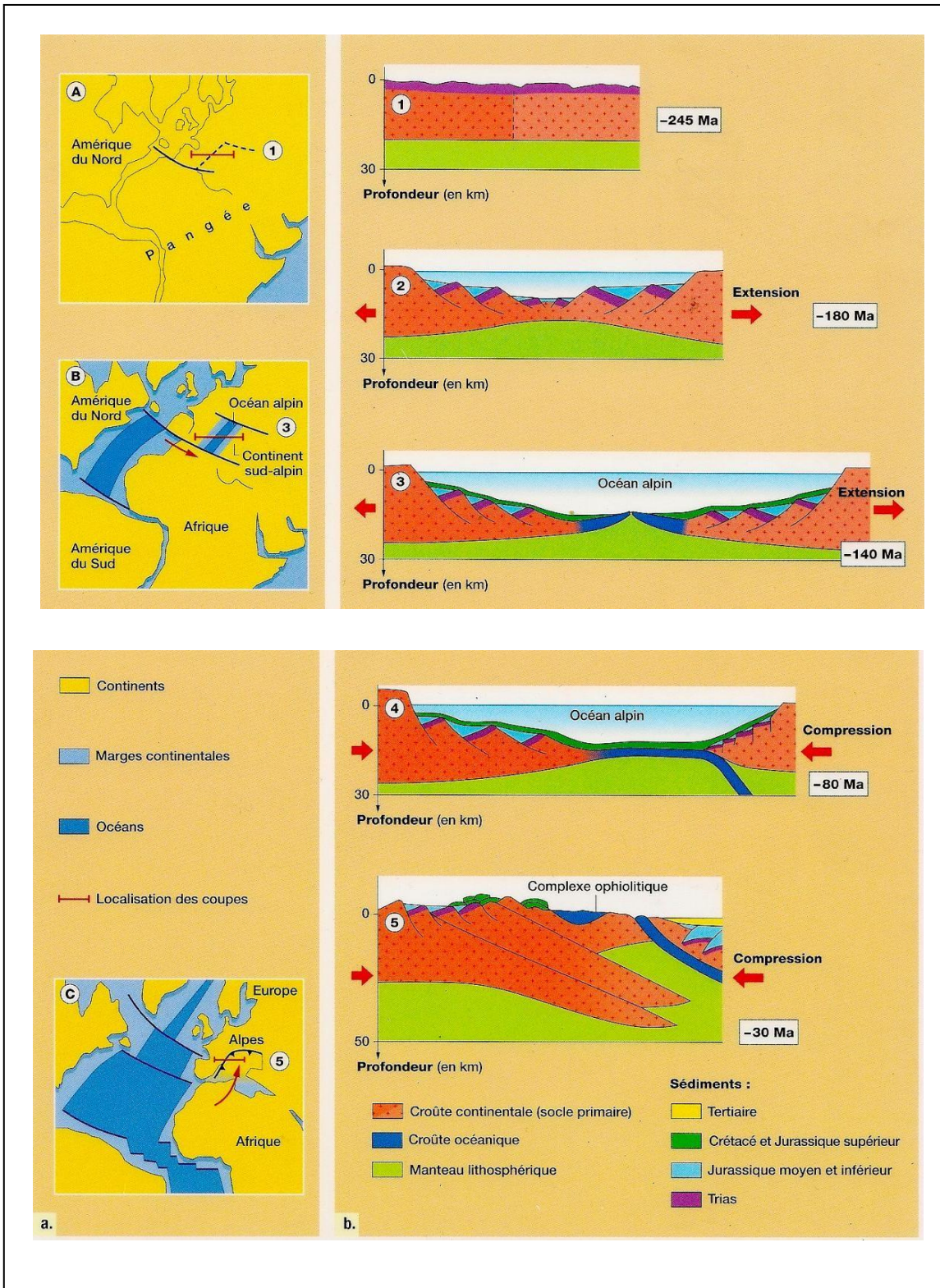


Fig.17. (page1/2). Fiche de travail sur le scénario de formation des Alpes (séance 3)

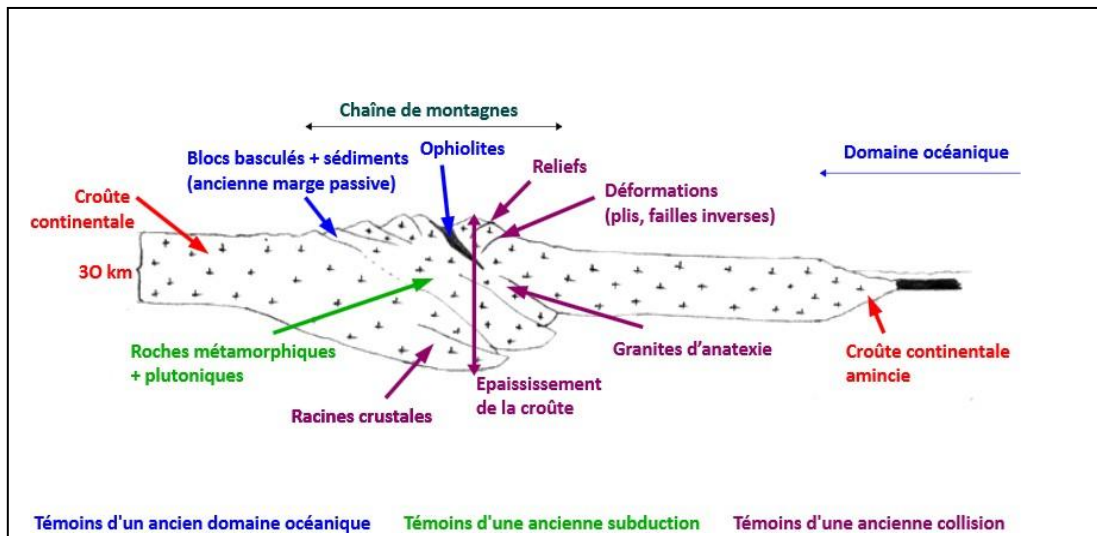
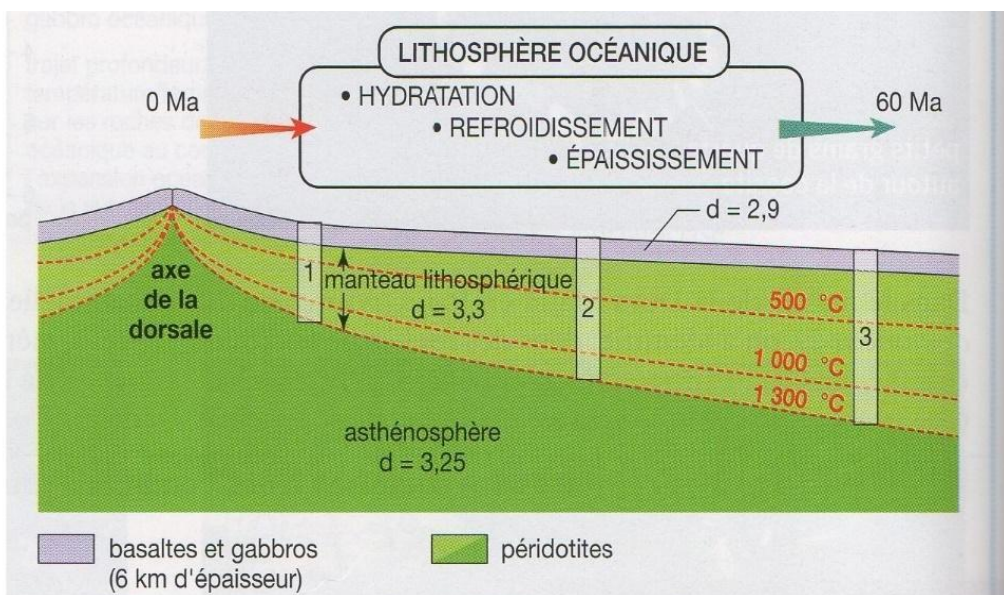


Fig.18. (page2/2). Fiche de travail sur le scénario de formation des Alpes : schéma bilan (séance 3)

- La fin de la troisième séance et la totalité de la quatrième séance (qui a eu lieu le 11 janvier 2019) sont dédiées à l'étude du moteur de la subduction. Au cours de ces séances, l'enseignante a proposé aux élèves un exercice où il leur est demandé de calculer la densité de la lithosphère océanique en différentes zones (près de l'axe de la dorsale et en s'éloignant de l'axe de la dorsale) (**Fig. 19**).



En vieillissant, la lithosphère océanique continue à se refroidir et s'épaissit.

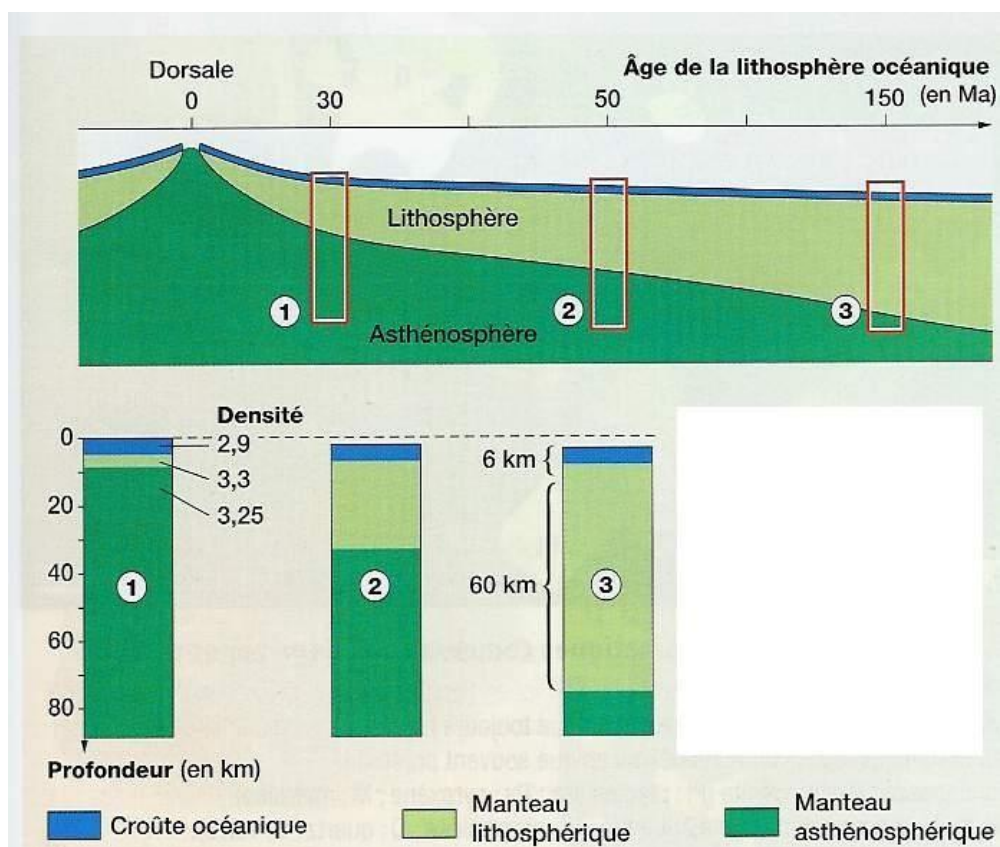


Fig.19. Fiche de travail sur le moteur de la subduction

(séance 3 et 4)

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques de la séquence étudiée.

Tableau. 1. Les caractéristiques de la séquence étudiée

Problème géologique- champ de géologie	Niveau de classe	Séquence étudiée	N° d'élèves	Date de recueil des données	Etablissement scolaire	Production analysée
La formation des chaînes de montagnes (problème mixte)	Terminale S	Séquence ordinaire (4 séances)	32 élèves	Janvier 2019	lycée Kernanec de Marcq-En-Baroeul	Débat de classe, enregistré et transcrit sous forme de script

4 Méthodologie d'analyse du débat scientifique

Nous représentons dans la **Fig. 20**, la méthodologie d'analyse mise en œuvre pour mener notre étude de cas. Notre travail s'inscrit dans le cadre de l'apprentissage par problématisation en sciences de la Terre. Il vise à étudier comment les lycéens peuvent s'engager dans la construction du phénomène de la formation des chaînes de montagnes de collision en classe de Terminale S. Pour atteindre notre objectif, nous allons essayer tout d'abord de distinguer des épisodes selon les thèmes qui ont été travaillés en classe. Ces épisodes peuvent correspondre selon nous à une séquence définie comme « *un bloc d'échanges reliés par un fort degré de cohérence sémantique et /ou pragmatique* » (Kerbrat-Orecchioni, 1998, p. 218). Cette analyse thématique ne nous donne pas des informations sur les questions et les problèmes posés en classe. Pour y parvenir, nous allons construire pour l'ensemble de la séquence enregistrée, une (ou des) macrostructure(s) à la façon de Fabre et Orange (1997) et Fabre (1999). Cette macrostructure vise « *un résumé global* » (Fabre et Orange, 1997, p.45) du débat, nous aidant ainsi à avoir une idée sur la dynamique du dialogue mené en classe. Selon Fabre & Orange « *les propositions du résumé sont de type question / réponse. On peut les regrouper selon le problème (implicite ou explicite) qui les concerne : ce dont il est question. L'ensemble des représentations du débat constitue la représentation du problème à laquelle aboutit la classe* » (ibid). Cette analyse macroscopique (représentée par l'analyse thématique

et l'analyse des macrostructures) sera suivie par une analyse épistémologico-langagière des épisodes déjà construits. Cette étude va nous permettre de comprendre davantage notre séquence étudiée en déterminant les nécessités construites ou non par les lycéens, et identifier les problèmes posés vraiment par eux, les registres explicatifs qu'ils mobilisent et les difficultés qu'ils peuvent rencontrer dans la construction du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision. L'étude épistémologique menée dans le chapitre 3 va nous aider dans l'analyse des explications des élèves (**Fig. 20**). En effet, tout au long de ce chapitre, nous avons pu comprendre comment les scientifiques construisent le savoir actuel de la formation des chaînes de montagnes de collision en nous inscrivant dans le cadre de l'apprentissage par problématisation. Ainsi, nous avons identifié les nécessités associées construites par les scientifiques actuels, en fonction des registres explicatifs qu'ils mobilisent pour penser les explications géologiques. Ces précisions épistémologiques vont jouer le rôle de référence pour comprendre l'activité des élèves et vont nous servir alors à mettre en comparaison le raisonnement des chercheurs et celui des élèves. L'étude faite dans le chapitre 4 va nous aider de même dans l'analyse des explications des élèves (**Fig. 20**). En fait, ce quatrième chapitre nous a permis de comprendre comment les scientifiques ont construit le phénomène de la formation des chaînes de montagnes dans le cadre de l'histoire des sciences tout en faisant un focus sur les ruptures et les basculements d'idées qui ont abouti à l'évolution des modèles explicatifs construits. Les points de discussion et les conditions de possibilité précisés dans ce chapitre présentent des repères qui nous aideront à comprendre les difficultés que les élèves peuvent rencontrer dans la construction de la formation des chaînes de montagnes et les conditions de possibilité de la construction par les lycéens des nouvelles modélisations.

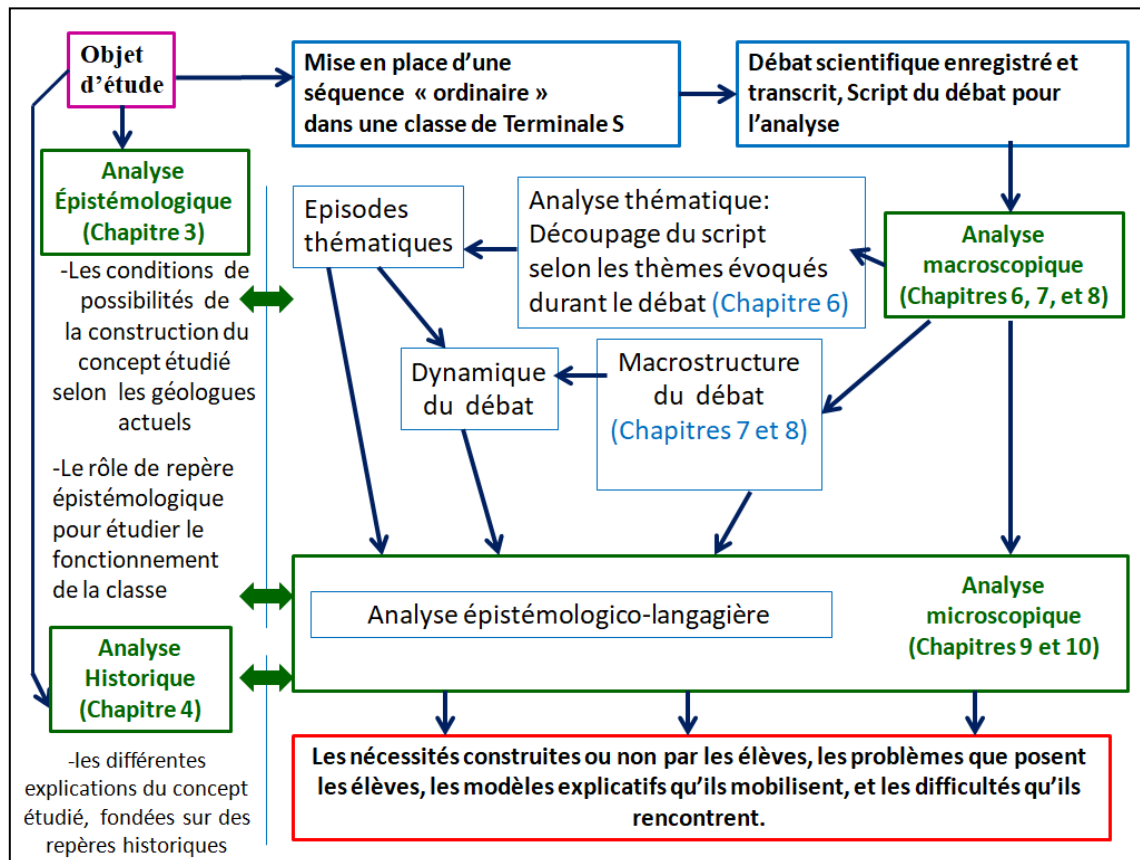


Fig.20. Méthodologie de mise en œuvre pour mener l'étude de cas.

Suite à la précision de la méthodologie de recueil et d'analyse des données, il est temps maintenant de comprendre comment les lycéens de terminale S peuvent s'engager dans la construction du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision, quels sont les nécessités qu'ils ont pu ou pas construire et les difficultés rencontrées dans la construction de ce phénomène.

CHAPITRE VI. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION : ANALYSE THEMATIQUE D'UNE SEQUENCE ORDINAIRE EN CLASSE DE TERMINALE SCIENTIFIQUE

Introduction

Après avoir présenté la méthodologie de recueil et d'analyse des données, nous nous intéressons maintenant au fonctionnement des élèves.

Nous portons une attention particulière aux échanges entre les lycéens (élèves de 17-18 ans) et la professeure qui se sont tenus dans les quatre séances enregistrées de la séquence ordinaire en classe de Terminale scientifique dans le but d'identifier les problèmes pris en charge par les élèves, les nécessités qu'ils ont pu ou non construire, l'échelle d'étude où ils se situent et les difficultés qu'ils rencontrent.

Pour atteindre ces objectifs, nous conduisons tout d'abord une analyse macroscopique de la séquence étudiée. Cette analyse comporte deux phases : La première sera présentée dans ce sixième chapitre. Elle correspond à l'analyse thématique au cours de laquelle, nous essayons de découper notre corpus en épisodes selon les thèmes qui émergent en classe et selon qui pose ces thèmes (l'enseignante ou les apprenants). Cette première analyse donne une idée générale sur le contenu de la séquence et sur les thèmes qui apparaissent tout au long du corpus. La deuxième partie de l'analyse macroscopique sera traitée dans le septième et le huitième chapitre. Elle sera consacrée à la construction et l'analyse des macrostructures des échanges qui ont eu lieu en classe (Fabre & Orange, 1997 ; Fabre, 1999 ; Lhoste, 2008). Ainsi, par l'identification des questions qui ont été posées, les réponses qui ont été données et les objections formulées, nous tenterons d'avoir des détails sur les nœuds problématiques qui ont pu avoir lieu tout au long de la séquence étudiée et comprendre par suite les problèmes pris en charge en classe.

Commençons tout d'abord par l'analyse thématique de notre corpus.

1 Analyse thématique de la séquence ordinaire étudiée

Nous allons mener dans cette partie une analyse thématique des échanges de la séquence étudiée (cette séquence est présentée dans le **chapitre. 5**), qui va nous permettre de présenter des épisodes identifiés par les thèmes posés par les élèves et ceux posés par l'enseignante durant la séquence.

Cela va nous amener à déterminer d'un côté des épisodes comportant les interventions enseignante-élèves et où le thème étudié est **introduit par l'enseignante** (il peut être le même que celui proposé par les apprenants ou différent de celui-ci). De même, nous allons pouvoir identifier d'un autre côté des épisodes, formés par les interventions des apprenants et de la professeure, et durant lesquels ce sont plutôt **les élèves** qui **posent les questions** sur un thème précis (Ce sont eux qui déclenchent le dialogue sur un thème qui peut être identique ou non de celui posé par la professeure).

Notre logique de découpage du corpus est basée sur deux points :

-Nous appliquons le découpage lorsque nous observons l'apparition d'un thème précis proposé par l'enseignante.

-Nous appliquons le découpage aussi lorsque nous observons la discussion d'un thème précis, formulé par les apprenants. Ce thème proposé par les élèves apparaît généralement sous forme d'une question.

Nous présentons dans **les figures.21 et 22** deux exemples de découpages menés dans cette étude afin de mieux comprendre la logique sur laquelle nous avons pu obtenir nos épisodes.

Il est important de préciser ici que nous considérons l'épisode comme l'unité de découpage. Le début et la fin de chaque épisode correspondent à l'introduction d'un thème précis posé soit par l'enseignante soit par les élèves : c'est l'un des deux qui déclenche le dialogue sur un thème qui peut être le même ou non de celui introduit juste avant par la professeure ou par les lycéens. La limite inférieure d'un épisode donné marque son début et la limite supérieure annonce sa fin.

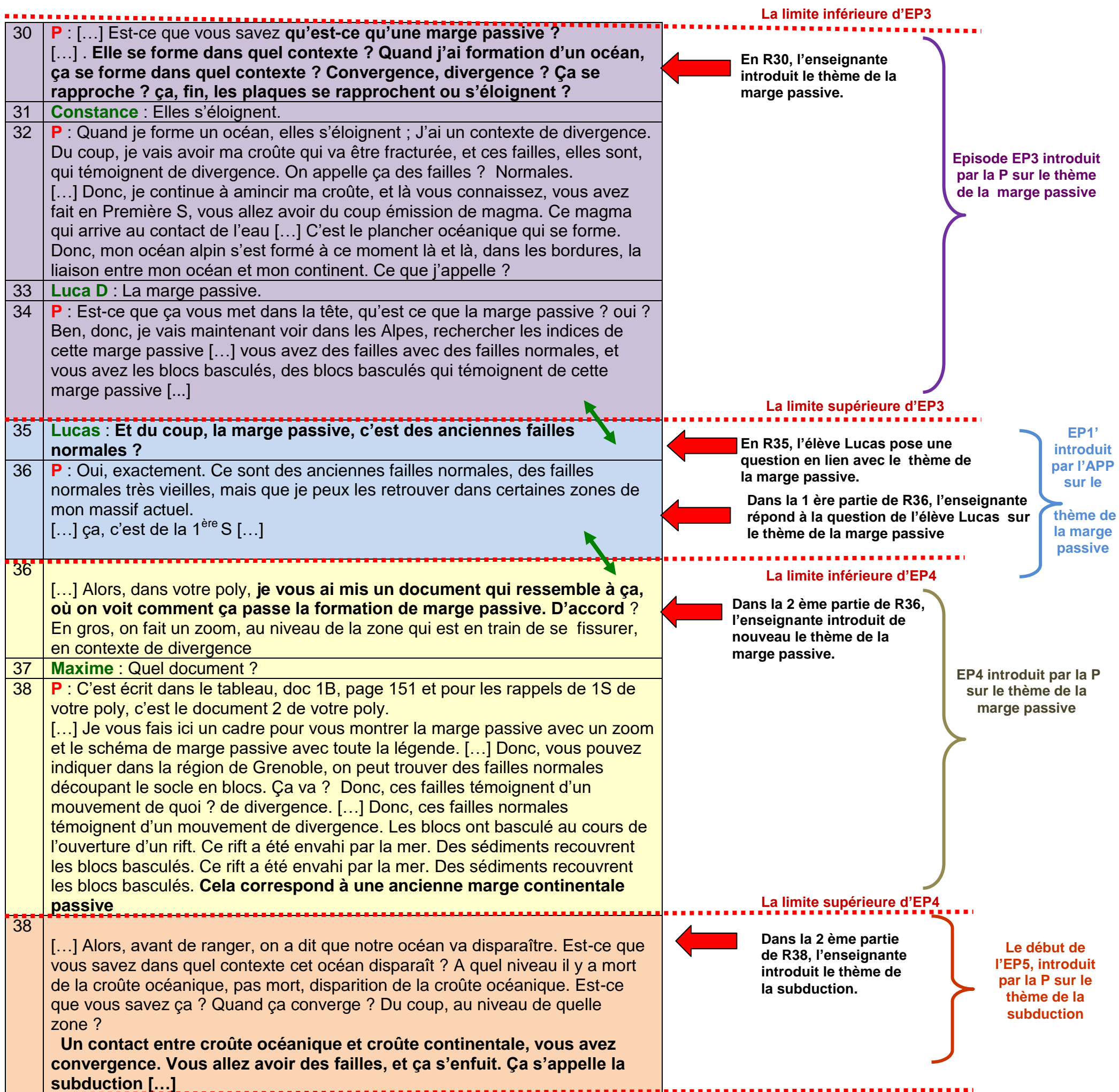
Exemple 1 : Dans la réplique 30 (**Fig.21**), l'enseignante pose une question aux élèves portant sur le thème de la marge passive. Cette réplique (R30) indique pour nous le début de l'épisode EP3 (**tableau.2**). De R30 à R34, il y a eu des échanges entre l'enseignante et les élèves où ces derniers essayent de répondre aux questions de la professeure qui sont toujours en lien avec le thème de la marge passive. En (R35), l'un des élèves pose cette fois-ci une question sur le thème la marge passive. Ceci nous amène à appliquer le découpage entre (R34) et (R35) marquant ainsi la limite entre EP3 qui a été introduit par l'enseignante sur la marge passive et EP1'¹⁶ qui a été proposé par les élèves sur le même thème¹⁷. Au début de l'intervention (R36), l'enseignante répond à la question posée par l'élève en (R35) et puis dans le reste de l'intervention elle introduit de nouvelles informations sur le thème de la marge passive. Ceci nous pousse à appliquer de nouveau le découpage entre la première partie et la deuxième partie de (R36). Ce découpage indique ainsi la limite entre EP1'et EP4 qui a été introduit par la professeure sur le thème de la marge passive. De (R36) jusqu'à la première partie de (R38) il y a eu des échanges entre les apprenants et la professeure sur la marge passive. Dans la deuxième partie de (R38) la professeure introduit le thème de la subduction. Cette deuxième partie de (R38) représente alors selon nous le début de l'épisode EP5 qui a été proposé par la professeure sur la subduction.

Nous précisons ici que suivant notre découpage, EP3 et EP4 sont considérés comme deux épisodes distincts, même s'ils sont tous les deux introduits par la professeure sur le thème de la marge passive. On les identifie de cette façon et on ne les rassemble pas dans un seul épisode, parce que selon la caractérisation d'un épisode, ce dernier est borné par une limite inférieure qui marque son début et une limite supérieure qui signale sa fin. Ces limites sont identifiées par nous chercheure à travers la détection dans la succession d'échanges, d'un thème précis (identique ou non de celui qui le précède) introduit soit par l'enseignante, soit par les élèves. Ainsi, si on prend le cas d'EP3, on peut dire que le début d'EP3 est placé en (R30) puisque dans cette réplique l'enseignante introduit aux apprenants le thème de la

¹⁶ : Voir le tableau. 2 de ce chapitre pour comprendre la dénomination des épisodes (EP3, EP1', etc...).

¹⁷ : Nous avons appliqué le découpage parce que ce sont les élèves qui déclenchent cette fois-ci (et non pas l'enseignante) les échanges sur le thème de la marge passive, voir les deux critères de découpage précisés au début de la section.

marge passive. De même, nous plaçons la fin d'EP3 au niveau de la transition R34-R35 vu que dans la réplique 35, un élève pose cette fois une question sur la marge passive, indiquant ainsi le début d'un autre épisode (EP1', posé par l'élève sur le thème de la marge passive).



La légende	
↔	: La présence d'une conformité thématique entre les épisodes de l'enseignante et ceux des élèves.
EP	: Episode thématique
P	: La professeure
APP	: L'apprenant

Fig.21. Figure expliquant la logique du découpage mené dans notre étude : Exemple 1

Exemple 2 : Dans le tour de parole (R57) (**Fig.22**), l'enseignante introduit le thème du scénario de la formation des chaînes de montagnes de collision. En (R58), un élève pose cette fois-ci une question sur le thème de l'orogénèse actuelle. Ceci nous amène à appliquer notre découpage entre (R57) et (R58). Ce découpage marque la limite entre EP9 qui a été introduit par la professeure sur le thème du scénario de la formation des chaînes de montagnes de collision et EP3' qui a été proposé par l'apprenant sur l'orogénèse actuelle. Entre (R58) et une partie de (R61), il y a eu des échanges entre l'élève et la professeure et où cette dernière répond à la question de l'apprenant. Pour le reste de (R61), la professeure introduit de nouveau le thème du scénario de la formation des chaînes de montagnes de collision. Ces précisions nous ont permis d'appliquer une fois de plus notre découpage entre la première et la deuxième partie de (R61) signalant ainsi la limite entre EP3' et EP10.

Nous mentionnons ici qu'EP9 et EP10, sont deux épisodes distincts. Ils ne constituent pas un seul épisode même s'ils sont tous les deux introduits par la professeure sur le thème du scénario de la formation des chaînes de montagnes. On les identifie de cette façon puisqu'un épisode est défini à travers sa limite inférieure qui indique son début et une limite supérieure qui marque sa fin. Plus explicitement, si on prend le cas d'EP9, on positionne le début de cet épisode en (R57) puisque dans cette réplique, l'enseignante introduit le thème du scénario de la formation des chaînes de montagnes. De même, la fin de cet épisode est placée au niveau de la transition R 57- R58 car au niveau de la réplique 58, un élève pose une question sur le thème de l'orogénèse actuelle. Cette question émise en (R58) marque selon nous le début d'un autre épisode (EP3', posé par l'élève sur l'orogénèse actuelle).

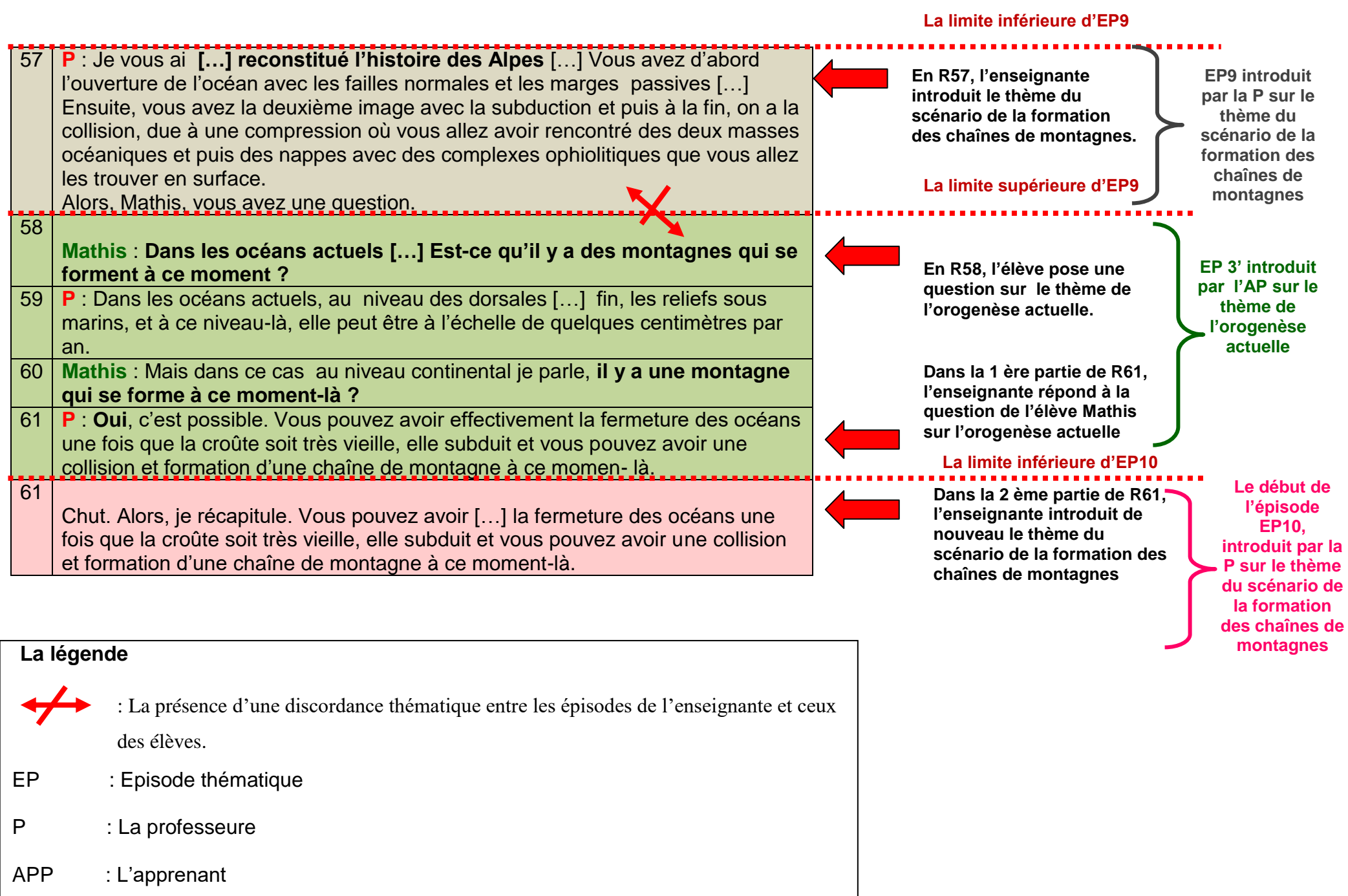


Fig.22. Figure expliquant la logique du découpage mené dans notre étude : Exemple 2





Suite à l'explicitation de la logique du découpage de notre corpus, nous représentons dans le **tableau. 2**, l'ensemble des épisodes que nous avons identifiés sur toute la séquence:

Tableau. 2. Les épisodes thématiques de la séquence étudiée.

N° Séance	EP	Les thèmes introduits par l'enseignante	EP	Les questions posées par les élèves
	1	1-7 : La subduction et la collision		
	2	7-30 : Les ophiolites		
1	3	30-34 : Les marges passives [les failles normales]		
			1'	35-36 : Les marges passives [les failles normales]
	4	36-38 : Les marges passives [les failles normales]		
	5	38 : La subduction		
		39 : Correction du TP de la séance		
	6	39-47 : Les ophiolites		
	7	47 : Les marges passives [les failles normales]		
	8	47-55 : La subduction		
			2'	56-57 : La subduction
	9	57 : Scénario de la formation d'une chaîne de montagnes		
			3'	58-61 : Orogenèse actuelle
	10	61 : Scénario de la formation des chaînes de montagnes		
			4'	62-63 : Devenir de l'eau (après fermeture océanique)
2			5'	64-67 : La formation de reliefs (passage d'un mouvement de descente à un mouvement de remontée)
			6'	68-71 : Devenir de l'eau après fermeture de l'océan
	11	71-83 : Métamorphisme des zones de subduction		
			7'	84-91 : La formation du vide
	12	91-93 : Métamorphisme des zones de subduction		
			8'	94-99 : Position perchée des roches d'origine océanique

				dans les chaînes de montagnes
	13	99-131 : Métamorphisme des zones de subduction		
			9'	132-141 : Métamorphisme des zones de subduction
	14	141-149 : Métamorphisme des zones de subduction		
	15	149-161 : indices de collision (Failles inverses, Nappes de charriage)		
			10'	162-163 : Le devenir de la lithosphère océanique enfouie
	16	163 : Les indices de collision : Failles inverses et Nappes de charriage		
			11'	164-171 : La notion des nappes de charriage et La notion des failles inverses
3	17	171-173 : Scénario de la formation d'une chaîne de montagnes de collision		
			12'	174-175 : L'origine de l'eau océanique
			13'	176-183 : Les plaques tectoniques (tectonique des plaques dans un cadre global)
	18	183 : Le scénario de la formation d'une chaîne de montagne de collision		
			14'	184-185 : Les failles dans le contexte de divergence et de convergence
		185 : Trace écrite		
4	19	185-208 : Moteur de la subduction : l'isotherme 1300°C, et l'augmentation de l'épaisseur et par suite de la densité de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale		
			15'	209-217 : La cause de l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale (moteur de la subduction)
		218-274 : Trace écrite et exercices (QCM)		

La légende des flèches présentées dans le tableau :

-  : La présence d'une conformité thématique entre les épisodes de l'enseignante et ceux des élèves.
-  : La présence d'une discordance thématique entre les épisodes de l'enseignante et ceux des élèves.
-  : La continuité d'un épisode initialement posé par les élèves sur un thème précis mais qui a été coupé ensuite par un autre épisode posé aussi par les apprenants mais sur un autre thème
-  : L'absence de lien thématique entre les deux épisodes successifs posés par les élèves

Nous avons ainsi pu distinguer d'après **le tableau.2**, 34 épisodes thématiques dans cette séquence étudiée (pour un total de 274 interventions).

Plusieurs remarques à propos de ces épisodes peuvent être faites.

- Sur les 34 épisodes identifiés, la subduction apparaît sur 15 épisodes. Elle apparaît seule dans 3 épisodes (EP5, EP8, EP2') et accompagnée de la collision en EP1. Elle est présente aussi dans 5 épisodes en liaison avec le métamorphisme (EP11, EP12, EP13, EP14, EP9') et dans 2 épisodes spécifiques à l'étude du moteur de la subduction (EP19, EP15'). Nous remarquons de même l'apparition du thème de la subduction dans 4 épisodes qui étudient le scénario de la formation d'une chaîne de montagne de collision (EP9, EP10, EP17, EP18).

Nous précisons ici que pour ces 15 épisodes identifiés ci-dessus, nous distinguons 12 épisodes introduits par l'enseignante et 3 uniquement posés par les élèves. Nous pensons que l'évocation abondante du thème de la subduction par l'enseignante signale l'importance donnée par la professeure à ce thème pour étudier la formation des chaînes de montagnes de collision.

En regardant l'emplacement chronologique des épisodes introduits par l'enseignante sur la subduction dans l'ensemble de notre séquence, nous pouvons remarquer qu'au tout début de notre corpus, la professeure évoquait en EP1 la subduction accompagnée avec la collision. En avançant dans la séquence, nous constatons que la professeure introduit cette fois-ci la subduction seule en EP5 et EP8. Dans le reste du corpus, il est clair que l'enseignante parle de la subduction en lien avec d'autres

thèmes comme le scénario de la formation des chaînes de montagnes (exemple : EP9, EP10, EP17, EP18), le métamorphisme des zones de subduction (exemple : EP11, EP12, EP13, EP14), ou encore le moteur de la subduction (exemple : EP19). D'après ces observations, nous faisons l'hypothèse que la professeure ouvre la séquence en introduisant la subduction et la collision pour rappeler aux élèves ces deux concepts qui font partie déjà du programme de 1^{ère} S dans le cadre de la tectonique des plaques, et par suite considérés normalement comme des pré-requis selon les instructions officielles. Il est possible qu'elle s'appuie sur « du connu » (c'est ce qui est supposé comme connaissance antérieure) afin que la classe puisse ensuite les mobiliser pour comprendre d'autres concepts qui sont nécessaires pour accéder au savoir de la formation des chaînes de montagnes de collision. En suivant notre corpus, nous pensons que la focalisation de la professeure à travailler en EP5 et EP8 la subduction seule, signifie peut-être que ce thème est considéré par elle comme un maillon fondamental dans la construction de la formation des chaînes de montagnes de collision : selon la professeure, la subduction devra possiblement être maîtrisée par les élèves pour pouvoir ensuite la mettre en liaison avec d'autres thèmes qui seront étudiés dans la suite de la séquence. Nous privilégions cette hypothèse surtout en observant le reste des épisodes proposés par la professeure sur le thème de la subduction. En effet, ces épisodes (exemple : EP9, EP10, EP11, EP12) mettent en exergue l'introduction par l'enseignante de la subduction accompagnée avec d'autres thèmes comme le scénario de la formation des chaînes de montagnes ou encore le métamorphisme des zones de subduction. Il est probable que dans ces épisodes, la professeure fait appel à la subduction pour introduire d'autres thèmes liés à la formation des chaînes de montagnes de collision. Ce dernier représente le thème principal que l'enseignante cherche à travailler en classe durant ces épisodes (exemple : le thème du moteur de la subduction en EP19). Cette supposition ne peut pas être validée en se basant uniquement sur l'analyse thématique. Il faut mener plus loin une analyse plus épistémologique qui va permettre de valider ou non notre point de vue.

- Sur les 34 épisodes thématiques, nous pouvons distinguer clairement 19 épisodes introduits par l'enseignante et 15 épisodes posés par les élèves. En regardant les thèmes posés par chacun d'eux (élèves et enseignante), nous pouvons remarquer que:

- 6 thèmes sont partagés en commun entre l'enseignante et les élèves¹⁸. Ce sont respectivement : « la subduction » (EP1, EP5, EP8, EP2'), « les marges passives [failles normales] » (EP3, EP4, EP7, EP1'), « La collision » (EP1, EP15, EP16, EP11'), « Le moteur de la subduction (le rôle de l'isotherme 1300°C dans l'augmentation de l'épaisseur et la densité de lithosphère océanique) » (EP19 et EP15'), « le Métamorphisme des zones de subduction » (EP11, EP12, EP13, EP14, EP9') ainsi que le thème « les failles dans le contexte de divergence et convergence » (EP3, EP1', EP4, EP7, EP16, EP11', EP14').

-Certains thèmes sont posés uniquement soit par l'enseignante (6 EP), soit par les lycéens (9 EP). Nous pouvons remarquer par exemple que tout au long de la séquence, l'enseignante s'est concentrée dans la présentation des thèmes suivants : Scénario de la formation d'une chaîne de montagne de collision (4 EP) [EP9, EP10, EP11, EP18] et les ophiolites (2 EP) [EP2, SEP6].

A certains moments de la séquence, les élèves n'entrent pas dans les échanges menés en classe et qui s'intéressent aux thèmes proposés par l'enseignante. Ils choisissent par contre de mettre en place un dialogue fondé sur d'autres thèmes qui sont plus au moins différents de ceux posés par la professeure.

Parmi les thèmes proposés uniquement par les élèves, nous pouvons citer : l'orogénèse actuelle (EP3'), le devenir de l'eau (EP4' et EP6'), la formation de relief (passage d'un mouvement de descente à une remontée) (EP5'), le thème de la « formation du vide » (EP7').

Parmi les autres thèmes qui ont été mis en exergue seulement par les élèves, nous pouvons mentionner respectivement : la position perchée des roches d'origine océanique dans les chaînes de montagnes (EP8'), le devenir de la lithosphère océanique enfouie (EP10'), l'origine de l'eau océanique (EP12'), et le thème des plaques tectoniques (tectonique des plaques dans un cadre global) (EP13').

En nous basant sur les deux catégories de thèmes, (c'est-à-dire des thèmes qui sont posés en commun entre enseignante et élèves et d'autres thèmes qui sont présentés uniquement soit par la professeure soit par les lycéens), nous avons réussi à distinguer deux types de macro-épisodes :

¹⁸ : Chaque thème partagé entre l'enseignante et les élèves est représenté dans le tableau 2 par la même couleur.

- **Des macro-épisodes que nous nommons concordants.** Ces macro-épisodes rassemblent les épisodes où l'enseignante et élèves fonctionnent sur le même thème. Il nous semble correspondre à « *un bloc d'échanges reliés par un fort degré de cohérence sémantique et /ou pragmatique* » (Kerbrat-Orecchioni, 1998, p. 218). Dans notre corpus, nous distinguons 6 macro-épisodes concordants (**tableau.3**).

- Avec ces macro-épisodes concordants, nous pouvons identifier une autre catégorie **des macro-épisodes que nous nommons discordants**. Ces macro-épisodes signalent un désaccord thématique qui a eu lieu plusieurs fois durant le dialogue mené entre enseignante et élèves en classe. En fait, tout au long de la séquence étudiée, nous pouvons remarquer fréquemment que lorsque l'enseignante ouvre un dialogue sur un thème donné, les élèves ne s'engagent pas dans ce dernier. Ils proposent par contre d'entrer dans un dialogue fondé sur d'autres thèmes (liés à la formation des chaînes de montagne) posés pour la première fois par eux-mêmes.

Ces macro-épisodes rassemblent alors les épisodes de l'enseignante qui abordent un thème donné avec ceux présentés en contrepartie par les élèves et qui s'occupent d'un autre thème différent de celui proposé par la professeure.

Nous pouvons distinguer dans notre corpus 9 macro-épisodes discordants. Nous avons rassemblé ces macro-épisodes concordants et discordants, leur composition, ainsi que le thème étudié au sein de ces macro-épisodes dans **le tableau.3** :

Tableau. 3. Les macro-épisodes de la séquence étudiée

N° du Macro-épisodes	Composition (Groupe des épisodes)	Les thèmes étudiés dans le macro-épisode		Type de macro-épisode
MEP1	EP1+EP5+EP8+EP2'	La subduction		concordant
MEP2	EP1+ EP15+ EP16+ EP11'	La collision		concordant
MEP3	EP3+EP1'+EP4+EP7	Les marges passives		concordant
MEP4	EP9+EP3'	Thème de la PR	Scénario de la formation d'une chaîne de montagne	discordant
		Thème des APP	Orogenèse actuelle	
MEP5	EP10+EP4'+EP6'	Thème de la PR	Scénario de la formation d'une chaîne de montagne	discordant
		Thème des APP	Devenir de l'eau	
MEP6	EP10+EP5'	Thème de la PR	Scénario de la formation d'une chaîne de montagne	discordant
		Thème des APP	La formation de relief	
MEP7	EP11+EP7'	Thème de la PR	Métamorphisme des zones de subduction	discordant

		Thème des APP	La formation du vide	
MEP8	EP12+EP8'	Thème de la PR	Métamorphisme des zones de subduction	discordant
		Thème des APP	La position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique	
MEP9	EP11+EP12+EP13+ EP9'+ EP14	Métamorphisme des zones de subduction		concordant
MEP10	EP15+ EP10'	Thème de la PR	La collision	discordant
		Thème des APP	Le devenir de la lithosphère océanique enfouie	
MEP11	EP3+EP1'+ EP4+ EP7+EP15+EP16+ EP11'+ EP14'	Les failles (normales et inverses) dans le contexte de divergence et convergence		concordant
MEP12	EP17+EP12'	Thème de la PR	Scénario de la formation d'une chaîne de montagne	discordant
		Thème des APP	L'origine de l'eau océanique	
MEP13	EP17+EP13'	Thème de la PR	Scénario de la formation d'une chaîne de montagne	discordant
		Thème des APP	Les plaques tectoniques	

MEP14	EP18+EP14'	Thème de la PR	Scénario de la formation d'une chaîne de montagne	discordant
		Thème des APP	Les failles dans le contexte de divergence et convergence	
MEP15	EP19+EP15'	Le moteur de la subduction		concordant
Total : 15 Macro-épisodes				
6 + 9				

PR : La professeure, APP : Les apprenants

L'identification de ces macro-épisodes discordants tout au long de notre séquence est une spécificité de notre travail par rapport à l'analyse thématique menée dans un certain nombre de travaux déjà conduits en didactique des SVT. En fait, dans ces travaux [exemple : Fabre & Orange (1997), Lhoste (2008)], nous pouvons identifier clairement la présence uniquement de macro-épisodes nommés ici concordants. Ils rassemblent les échanges entre élèves et enseignante qui présentent une forte cohérence sémantique. Ces macro-épisodes concordants montrent que les thèmes et par suite l'exercice ou les questions qui sont posées par l'enseignante font problème pour les apprenants. Pour les élèves, il y a un problème puisqu'un « *déséquilibre se fait jour dans la situation* » proposée par l'enseignante, auquel ils ne peuvent pas immédiatement remédier (Fabre, 2009, p. 20) ce qui nécessite une recherche ou encore comme le nommait Dewey « une enquête ». Cela se traduit par leur insertion dans le débat avec l'enseignante (**sur un même thème**), qui sera le lieu propice à l'argumentation, à la formulation des objections et par suite la construction d'un savoir raisonné.

Ainsi, dans notre étude nous pouvons dire à ce niveau d'analyse que la subduction, les marges passives, ou encore le moteur de la subduction font problème pour les élèves. Nous arrivons à cette déduction par le fait que les apprenants s'engagent dans une « enquête » en s'inscrivant dans la discussion avec l'enseignante sur ces thèmes (voir les macro-épisodes concordants du tableau 3). Concernant le scénario de la formation des chaînes de montagnes, nous pensons que ce thème proposé par l'enseignante inspire les élèves, lors des moments d'échanges, à poser un autre thème qui fait problème pour eux. En effet, notre corpus montre que lorsque l'enseignante ouvre un dialogue sur le thème du scénario de la formation des chaînes de montagnes, les apprenants n'entrent pas dans ce dernier. En revanche, ils essaient d'ouvrir le dialogue sur des thèmes comme l'orogénèse actuelle, le devenir de l'eau, la formation de relief, la formation de vide, la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique, le devenir de la lithosphère enfouie, l'origine de l'eau océanique, les plaques tectoniques, ou encore les failles dans le contexte de divergence et convergence. Ce sont des thèmes qui intriguent les lycéens et les incitent à ouvrir une enquête (voir les macro-épisodes discordants du tableau 3). Nous mettons l'hypothèse que ces thèmes représentent des sous-problèmes posés par les lycéens et leur traitement en classe peut probablement favoriser chez eux la compréhension du scénario de la formation des chaînes de

montagnes (qui a été déjà introduit par l'enseignante).

D'après le tableau 3, nous pouvons remarquer aussi la présence de thèmes qui ont été étudiés en même temps dans des macro-épisodes concordants et discordants. C'est le cas du métamorphisme des zones de subduction. En effet, on peut identifier le macro-épisode concordant MEP9 sur le métamorphisme des zones de subduction qui succède aux macro-épisodes discordants MEP7 et MEP8 qui s'intéressent respectivement à l'étude des thèmes de métamorphisme des zones de subduction- la formation du vide ainsi que le métamorphisme des zones de subduction- la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique. Nous pensons à ce niveau d'analyse qu'au début de la séquence (en MEP7 et MEP8), le métamorphisme des zones de subduction proposé par la professeure incite les élèves à poser d'autres thèmes qui font problème pour eux. En effet, dans ces macro-épisodes lorsque la professeure ouvre le dialogue sur le métamorphisme des zones de subduction, les apprenants ne s'inscrivent pas dans ce dernier tout en essayant par contre d'ouvrir un débat sur la formation du vide (MEP7) et la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique (MEP8). Il est possible que les élèves cherchent à travailler tout d'abord ces deux thèmes qui vont possiblement les aider ensuite à comprendre le métamorphisme des zones de subduction. Nous pouvons supposer à ce niveau que la formation du vide et la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique sont des sous-problèmes posés par les élèves et leur traitement en classe semble plus prioritaire que d'autres problèmes (il s'agit ici du métamorphisme des zones de subduction introduit par la professeure). L'insistance de cette dernière à rouvrir le dialogue sur le thème de métamorphisme des zones de subduction dans la suite de la séquence (en MEP9), a permis selon nous les lycéens de s'engager cette fois-ci dans la discussion sur ce thème.

En suivant le tableau 3, nous pouvons remarquer aussi que le thème de la collision a été traité à la fois dans le macro-épisode concordant MEP2 et le macro-épisode discordant MEP10. Dans MEP2, les élèves s'inscrivent dans le dialogue avec l'enseignante sur la collision. Cela traduit selon nous que ce thème fait problème pour eux. Néanmoins, lorsque la professeure rouvre le débat sur le thème de collision au niveau de MEP10, les apprenants ne s'engagent pas dans ce dernier. Nous pensons que la collision introduite de nouveau par la professeure dans cet épisode a inspiré les élèves cette fois-ci à poser un autre thème qui les intrigue. Les

élèves cherchent ici à travailler le thème du devenir de la lithosphère océanique enfouie qui va les aider possiblement dans la compréhension du thème de la collision.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu mener la première phase de l'analyse macroscopique de la séquence ordinaire étudiée. Elle correspond à une analyse thématique. Le découpage de corpus nous a permis d'identifier des thèmes qui sont posés en commun entre l'enseignante et les apprenants et d'autres thèmes qui sont introduits seulement par la professeure ou par les lycéens. En nous basant sur ces deux catégories de thèmes nous avons réussi alors à distinguer deux types de macro-épisodes : des macro-épisodes concordants qui regroupent les épisodes où l'enseignante et les élèves sont concernés par le même thème et d'autres macro-épisodes discordants qui signalent un désaccord thématique qui a eu lieu plusieurs fois en classe entre la professeure et les apprenants. En fait, nous avons remarqué que durant le moment d'échange lorsque l'enseignante ouvre le dialogue sur un thème précis, les élèves ne s'inscrivent pas dans ce dernier et initient par contre un débat avec l'enseignante sur un autre thème.

L'identification de ces deux types de macro-épisodes nous a permis d'émettre des hypothèses par rapport à ce qui fait problème pour les élèves. D'après l'analyse thématique, nous pouvons dire alors que la subduction, les marges passives ou encore le moteur de subduction font problème pour les lycéens. Nous arrivons à cette conclusion par le fait que les apprenants s'engagent dans la discussion avec l'enseignante sur ces thèmes (voir les macro-épisodes concordants du **tableau. 3**). En ce qui concerne le scénario de la formation des chaînes de montagnes, nous pouvons dire que ce thème introduit par l'enseignante dans nombreux macro-épisodes, a incité les élèves à poser d'autres thèmes qui font problème pour eux. En effet, nous remarquons que lors de l'ouverture d'un dialogue sur ce thème par l'enseignante, les lycéens ne s'engagent pas dans ce dernier tout en essayant d'initier un débat sur d'autres thèmes qui les intriguent (comme l'orogénèse actuelle, le devenir de l'eau, la formation du vide, etc...). Travailler ces thèmes en classe peut aider probablement les apprenants à comprendre le scénario de la formation des chaînes de montagnes (proposé par l'enseignante dès le début de ces macro-épisodes).

L'analyse thématique a mis en exergue aussi la présence de thèmes qui se trouvent en même temps dans des macro-épisodes concordants et discordants. Nous parlons ici du métamorphisme des zones de subduction et de la collision. Ainsi, pour le premier thème, nous avons pu distinguer les macro-épisodes discordants MEP7 et MEP8 consacrés à l'étude des thèmes de métamorphisme des zones de subduction- la formation du vide ainsi que le métamorphisme des zones de subduction- la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique, suivis par le macro-épisode concordant MEP9 sur le métamorphisme des zones de subduction. A travers ces observations, nous pouvons dire que dans MEP7 et MEP8 le métamorphisme des zones de subduction introduit par l'enseignante, inspire les élèves à poser d'autres thèmes qui les intriguent. En effet, quand l'enseignante initialise un dialogue sur ce thème (le métamorphisme), les apprenants n'entrent pas dans ce dernier et essaient par contre d'ouvrir un débat avec la professeure sur des thèmes comme la formation du vide ou la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique. Les élèves cherchent ici de travailler en classe ces deux thèmes qui vont les aider possiblement dans la compréhension du métamorphisme des zones de subduction. Nous pensons que l'insistance de l'enseignante à rouvrir le dialogue sur le métamorphisme des zones de subduction en MEP9, a poussé les lycéens cette fois-ci de s'engager dans la discussion sur ce thème. L'inscription des élèves dans cette discussion peut être expliquée aussi par le fait que les apprenants ont réussi déjà en MEP7 et MEP8 de poser et de travailler les différents thèmes qui ont pu émerger chez eux lorsque l'enseignante introduisait le thème du métamorphisme.

Nous avons pu constater de même que le thème de la collision est présent à la fois dans le macro-épisode concordant MEP2 et le macro-épisode discordant MEP 10. Selon nous, la collision fait problème pour les élèves. Nous arrivons à cette déduction par le fait que les apprenants se lancent en MEP2 dans le dialogue initié par l'enseignante sur ce thème. En ce qui concerne MEP10, nous pouvons dire que la réouverture par la professeure du débat sur le thème de la collision n'a pas entraîné cette fois-ci l'inscription des lycéens dans ce dernier. Nous expliquons cela par le fait que le thème de la collision réintroduit par l'enseignante, incite les élèves cette fois-ci à poser un autre thème qui fait problème pour eux. C'est le devenir de la lithosphère enfouie qui les intrigue et les amène à initier un dialogue avec l'enseignante sur ce thème. Travailler le thème du devenir de la lithosphère enfouie

en classe peut probablement faciliter chez les apprenants la compréhension de la collision introduite par l'enseignante (dès MEP2).

L'analyse thématique qui peut être considérée comme une analyse du contenu, ne nous permet pas à ce niveau de comprendre les raisons (le pourquoi) de ce qui a déclenché et permis la mise en exergue des macro-épisodes discordants.

Au sein de ces macro-épisodes et plus précisément pour les thèmes posés par les élèves, l'analyse thématique ne nous donne pas non plus une idée sur les savoirs problématisés qui ont pu possiblement être construits par les élèves. D'autre part, au sein des macro-épisodes concordants, l'analyse thématique ne nous fournit pas des détails sur la possibilité de présence des moments de controverses et d'argumentations qui ont abouti peut-être à la construction de certains savoirs problématisés liés à la formation des chaînes de montagnes de collision.

Pour répondre à toutes ces questions et afin de mieux comprendre le fonctionnement de la classe, nous allons ainsi proposer dans les deux chapitres suivants une étude plus épistémologique qui nous permettra de construire ce que Fabre & Orange (1997) nomment « les macrostructures » des échanges menés entre élèves et enseignante durant la séquence ordinaire étudiée.

CHAPITRE VII. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION : ANALYSE DES MACROSTRUCTURES DES MACRO-ÉPISODES CONCORDANTS

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons mené la première phase de l'analyse macroscopique de la séquence ordinaire étudiée. Elle correspond à l'analyse thématique au cours de laquelle nous avons pu découper notre corpus en épisodes selon les thèmes qui émergent et selon qui pose ces thèmes (l'enseignante ou les élèves). Cela nous a permis alors de distinguer des thèmes qui sont posés en commun entre la professeure et les lycéens d'autres thèmes qui sont introduits uniquement soit par l'enseignante soit par les apprenants. En nous basant sur ces deux catégories de thèmes, nous avons identifié d'un côté des macro-épisodes concordants qui regroupent les épisodes de l'enseignante et des élèves montrant une conformité thématique, et d'un autre côté des macro-épisodes discordants qui mettent en relief un désaccord thématique qui a eu lieu en classe entre la professeure et les lycéens. En effet, comme nous l'avons précisé avant, nous avons remarqué à plusieurs reprises que lorsque l'enseignante initie un dialogue sur un thème précis les élèves ne s'engagent pas dans ce dernier tout en essayant de démarrer un débat avec la professeure sur d'autres thèmes qui font problème pour eux.

Suite à cette analyse thématique, nous allons entamer maintenant la deuxième phase de l'analyse macroscopique. Elle correspond à la construction et à l'analyse des macrostructures des macro-épisodes identifiés dans la partie précédente (Fabre & Orange, 1997 ; Fabre, 1999 ; Lhoste, 2008). Plus explicitement, nous allons consacrer ce chapitre à l'étude des macrostructures des macro-épisodes concordants. Concernant les macrostructures des macro-épisodes discordants, elles seront traitées dans le chapitre suivant.

A travers l'analyse des macrostructures construites, nous essayerons d'avoir des précisions sur la possibilité ou non de la présence des moments d'argumentation et de controverses dans les échanges en classe. Nous donnons une importance à ces

moments puisqu'ils peuvent potentiellement aboutir à la construction des savoirs problématisés liés à la formation des chaînes de montagnes. L'identification ou non des moments d'argumentation dans les macrostructures construites va nous donner des informations sur le format pédagogique qui a été privilégié tout au long de la séquence (Est-ce qu'il s'agit d'un débat marqué par l'abondance d'objections, ou il s'agit plutôt d'un autre format pédagogique comme le cours dialogué).

Avant de présenter les macrostructures des macro-épisodes concordants, il est important d'explicitier dans la première partie de ce chapitre comment nous construisons ces macrostructures et les éléments qui les composent.

1 La notion de macrostructure

Fabre définit la macrostructure comme étant *« 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). Pour construire la macrostructure des échanges menés entre les élèves et l'enseignante durant la séquence étudiée, nous nous sommes inspirée de la méthodologie décrite par Fabre :

« Les propositions sont de type question ou de type réponse. Les réponses peuvent être des thèses (et des antithèses). Les objections ont un statut particulier : nous les traitons comme des questions spéciales. On peut regrouper les propositions selon le problème (implicite ou explicite) qui les concerne : ce dont il est question ! Il s'agit ensuite de reconstruire le réseau de ces propositions pour reconstituer l'espace-problème » (Fabre, 1999, p. 200). Nous avons ainsi construit les macrostructures des débats de la séquence étudiée en présentant les questions qui ont été posées (Q), les réponses qui ont été envisagées (R) et les objections formulées (O).

Il est important de rappeler ici que l'identification dans l'analyse thématique de macro-épisodes concordants et d'autres discordants est une particularité dans notre travail par rapport à d'autres travaux menés avant en didactique des SVT.

Ainsi, pour construire les macrostructures des échanges qui ont eu lieu tout au long de ces macro-épisodes, nous avons ajouté aux questions traitées, aux réponses envisagées et aux objections formulées, les affirmations présentées (AF), les questions de relance posées (QR), ainsi que les questions de reformulation

clarification émises (QRC). Nous avons fait ces ajouts à partir de la version de la macrostructure présentée par Fabre et Orange (Fabre & Orange, 1997 ; Fabre, 1999) afin de l'adapter le plus possible à l'étude de notre corpus marqué par la présence de deux types de macro-épisodes concordants et discordants.

Pour les affirmations, ce sont des assertions qui « *ne renvoient à aucune enquête, mais qui prétendent décrire le réel dans sa positivité* » (Fabre, 2017, p. 62). Elles « *relèvent du vrai et du juste* » (Orange-Ravachol, 2010a). Nous donnons à ce niveau un exemple d'une affirmation émise par l'enseignante dans la réplique 185 : « *vous avez la limite entre la lithosphère et l'asthénosphère [...] Cette limite c'est une limite thermique. Autrement dit cette limite c'est la limite 1300° [...] Plus je m'éloigne de l'axe de la dorsale, plus cette lithosphère est froide, plus elle est vieille. Et du coup, plus ma limite thermique elle va être profonde pour obtenir 1300°C. Je vais être obligée si vous voulez de creuser si vous voulez plus profondément. Je vais avoir la limite lithosphère-asthénosphère qui va être plus profonde* ».

En ce qui concerne les questions de relance, le locuteur qui pose ce type de questions essaye de relancer une explication déjà donnée avant dans la discussion. Par ce type de question, le locuteur motive l'interlocuteur à donner plus de précisions sur certains concepts liés à la formation des chaînes de montagnes de collision (Exemple d'une question de relance : « Pourquoi déjà il y a plus de lithosphère, quand on s'éloigne de la dorsale » posée par un élève dans la réplique 209).

D'autre part, par les questions de reformulation clarification, le locuteur reformule ce qu'il a déjà compris ou déduit dans les propos de l'interlocuteur avec l'objectif de lever une ambiguïté ou encore de chercher du plus précis en stimulant l'interlocuteur à clarifier sa pensée (Exemple d'une question de reformulation clarification: « *Ce qui fait la limite c'est la température. C'est pas la différence des roches ?* » formulée par un élève dans la réplique 215) .

Suite aux précisions menées ci-dessus, nous pensons qu'il est propice maintenant de dévoiler les macrostructures des macro-épisodes concordants.

2 Les macrostructures des macro-épisodes concordants : construction et analyse

Comme nous l'avons déjà évoqué avant, cette partie sera consacrée à la présentation et l'analyse des macrostructures des macro-épisodes concordants que nous avons pu identifier dans l'analyse thématique. Par cette étude, nous viserons à mieux comprendre le régime de fonctionnement de la classe tout en essayant d'avoir des informations sur les « *nœuds* » problématiques [caractérisés par « *une intense activité argumentative* »] (Fabre, 1999) qui ont eu lieu possiblement durant les échanges en classe et qui ont pu ouvrir, sans que cela aboutisse forcément, vers la construction des savoirs problématisés liés à la formation des chaînes de montagnes de collision.

Il est important de préciser ici que nous allons présenter dans cette partie les macrostructures de deux macro-épisodes concordants MEP9 et MEP15 qui présentent une organisation¹⁹ différente. En fait, MEP15 représente le prototype des macro-épisodes concordants. Il comporte à la fois une question de relance et des questions de reformulation clarification posées par les élèves (voir **figure.24**). En ce qui concerne le MEP9, il comporte un nombre important d'objections venant de l'enseignante et un élève, que nous n'avons pas trouvé dans MEP15 [Ce dernier comporte uniquement une objection formulée par la professeure] (voir **figure.25**)

Pour les autres macro-épisodes concordants, puisqu'ils présentent une structure semblable à celle du prototype MEP15, nous avons choisi de mettre les macrostructures correspondantes dans **l'annexe 4**.

Nous commençons par présenter la macrostructure du MEP15 (le prototype) puisqu'elle ressemble dans son organisation à la plupart des macrostructures des macro-épisodes concordants identifiés dans cette étude.

- **La macrostructure du MEP15 qui étudie le moteur de la subduction**

Avant d'analyser la macrostructure du MEP15, nous présentons dans le tableau ci-dessous (**Tableau.4**) l'extrait 1 du corpus (moteur de la subduction) qui correspond à

¹⁹: L'organisation des macro-épisodes varie selon l'occurrence ou non des questions posées, des réponses données, des objections formulées et des affirmations émises en classe, soit par l'enseignante, soit par les élèves.

ce macro-épisode.

Nous précisons ici que les différentes interactions du MEP15, ont eu lieu à la fin de la séance 3 et le début de la séance 4. Durant ces moments de la séquence, l'enseignante présentait l'exercice de la **fig.19** « Fiche du travail sur le moteur de subduction ». Par cet exercice, les élèves ont été invités à calculer la densité de la lithosphère dans différentes zones (près de l'axe de la dorsale et loin de l'axe de la dorsale) afin de comprendre que le moteur de la subduction a à voir avec l'augmentation de la densité de la lithosphère par rapport à celle de l'asthénosphère.

Tableau. 4. Le macro-épisode MEP15.

185	<p>P : La limite lithosphère-asthénosphère [...] c'est une limite de température, c'est l'isotherme 1300°. D'accord, cette isotherme 1300° du coup elle va se situer à une profondeur différente, en fonction de l'endroit où je me trouve par rapport à l'axe de la dorsale. Là en rose, si je creuse un petit peu, je vais être limite à 1300° parce qu'il fait très chaud à ce niveau-là, parce que vous avez remontée du magma. Plus je m'éloigne, plus la lithosphère refroidit, plus je creuse plus profondément pour arriver à 1300°. Donc, je vais avoir ma lithosphère qui va être plus épaisse si vous voulez, plus je m'éloigne de l'axe de la dorsale. C'est pour cela, si vous voulez qu'on représente, ici vous avez l'asthénosphère : partie ductile et ici la partie rigide. La séparation entre l'asthénosphère et la lithosphère c'est bien une limite thermique [...] ²⁰</p>
-----	---

186	<p>P : [...] vous avez la limite entre la lithosphère et l'asthénosphère [...] Cette limite c'est une limite thermique. Autrement dit cette limite c'est la limite 1300°[...] Plus je m'éloigne de l'axe de la dorsale, plus cette lithosphère est froide, plus elle est vieille. Et du coup, plus ma limite thermique elle va être profonde pour obtenir 1300°C. Je vais être obligée si vous voulez de creuser si vous voulez plus profondément. Je vais avoir la limite lithosphère-asthénosphère qui va être plus profonde au point numéro 3 qu'au point numéro 1. D'accord ?</p> <p>Vous allez voir que plus elle est épaisse cette lithosphère, elle va tendance à subduire, à s'enfoncer [...]</p>
-----	--

[Le reste de R186- R187 : discussion sur la trace écrite]

²⁰ : Pour certains tours de parole caractérisés par une longueur très importante, nous avons choisi de mettre qu'une partie de la réplique et représenter le reste de l'intervention par des tirets mis entre deux crochets. Le choix des extraits présentés tient compte de la cohérence de l'idée principale que l'interlocuteur veut transmettre dans une réplique donnée. Il tient compte aussi de ce qui a été formulé avant et après l'extrait (pour respecter la signification globale du discours).

188	<p>P : [...] comme la limite lithosphère-asthénosphère est une limite thermique [...] la baisse de température de la lithosphère là, lorsqu'on s'éloigne de la dorsale. [...] Cette baisse de température entraîne une augmentation de l'épaisseur du manteau lithosphérique.</p> <p>Alors, la croûte océanique est d'épaisseur constante. Voyez ici, la partie violet, la même épaisseur partout, mais si j'ai une augmentation de l'épaisseur du manteau lithosphérique, je vais avoir au bilan lithosphère plus (+) partie supérieure du manteau supérieur. Tu vas avoir une épaisseur qui est plus épaisse [...] Et qu'est ce qui se passe s'il y a un matériel moins dense qui se retrouve au-dessus d'un matériel plus dense. Votre matériel qui est dessus il va, il va quoi faire ?</p>
189	Lucie : Bouger.

190	P : Il va?
191	Lucas D : Se déplacer.
192	P : Alors, il peut se déplacer. [...] Si vous avez un matériel moins dense au-dessus d'un matériel plus dense. Si vous mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire quoi ?
193	Plusieurs élèves (au même temps) : Couler.
194	P : Ils ne vont pas, hein, couler. S'ils sont moins denses, ils flottent. [...] Si j'ai une lithosphère plus dense que l'asthénosphère. Qu'est ce qui va se passer [...] Je vais avoir un enfoncement [...]

[194-200] : Calcul de la densité de la lithosphère océanique au point 1 (près de l'axe de la dorsale)

200	P : [...] si je calcule la densité moyenne de ce point numéro 1 (près de l'axe de la dorsale). Vous avez 3,06. Je vais comparer cette densité moyenne de la lithosphère à la densité connue de l'asthénosphère [...] c'est 3,25. Autrement dit, j'ai une valeur qui est inférieure à 3,25, à la densité qui est en dessous [...] Donc, à cet endroit-là au point numéro 1, votre lithosphère est ce qu'elle a tendance à flotter ou à s'enfoncer dans l'asthénosphère ?
201	Lucas D : Flotter.
202	P : Elle a tendance à flotter [...]
203	Lucas D : Est-ce que ça veut dire du coup, au point 3, c'est supérieur de l'asthénosphère. Ce qui crée la solution. C'est ce qu'on cherche?
204	P : Oui .C'est ça. En fait, si vous avez au point 3 une densité moyenne qui est supérieure à 3,25. Ça veut dire que votre lithosphère avec votre manteau lithosphérique + la croûte ont tendance à s'enfoncer [...] C'est le moteur de la subduction [...]

[204-206] : calcul de la densité de la lithosphère océanique au point 3 (loin de l'axe de la dorsale)

206	P : J'obtiens une valeur autour de 3,26 [...] Cette densité moyenne si elle est 3,26, elle est donc supérieure (à la densité de l'asthénosphère), Alors ?
-----	--

207	Lucas : Elle s'enfoncé.
208	P : Et du coup, elle s'enfoncé. Du coup, il y a subsidence [...] C'est le moteur de la subduction. [...] il faut que votre densité moyenne (de la lithosphère océanique), elle soit plus grande (que celle de l'asthénosphère) et ça s'explique par le fait que la température est plus froide quand je suis à distance de l'axe de la dorsale. Et du coup, la limite entre lithosphère-asthénosphère, forcément, elle va être plus profonde [...]
209	Lucas : Pourquoi déjà il y a plus de lithosphère, quand on s'éloigne de la dorsale ?
210	P : Ici ?
211	Lucas : Oui.
212	P : Alors, je reprends.
213	Lucas : Parce que c'est poussé non ?
214	P : [...] L'isotherme est la ligne où vous avez la même température partout. Là, l'isotherme c'est l'isotherme 1300° et si tu veux c'est la limite entre la lithosphère et l'asthénosphère.
215	Lucas : Ce qui fait la limite c'est la température. C'est pas la différence des roches ?
216	P : Non. En fait, ici c'est du manteau, c'est la péridotite partout. En fait, simplement tout va avoir un comportement de roche différent si je suis à moins 1300°, je vais avoir un comportement plutôt rigide et cassant. Si je suis à 1300°, en fait c'est la limite au niveau de laquelle mon matériel va devenir ductile, ou il va devenir élastique.
217	Lucas : Oui.

En nous basant sur les interventions enseignante-élèves du **tableau.4 (p. 136)**, nous avons réussi à construire la macrostructure du MEP15. Cette macrostructure est représentée par la **figure.23 (p. 145)**.

Nous précisons ici que lors de la construction de cette macrostructure (et de l'ensemble des macrostructures déterminées dans ce travail), nous avons remarqué que certaines affirmations ou réponses présentes dans le corpus sont très longues, ou encore qu'il y a certains propos (des réponses surtout) qui sont émis par les interlocuteurs et qui s'étendent sur plusieurs répliques. Ainsi, pour que la macrostructure soit claire et lisible, nous avons essayé dans ces cas de présenter uniquement une partie du propos long [tout en respectant son sens] (Exemple :

A48²¹ ou/ et de rassembler les parties du propos émis sur plusieurs répliques dans

²¹: A+numéro, R+ numéro, QR+ numéro, QRC+numéro ou encore Q+ numéro correspondent aux numéros de l'affirmation, de la question de relance, de la question de reformulation clarification ou encore de la question, présentées dans les macrostructures construites. Ces numéros sont donnés par nous chercheure en suivant l'ordre chronologique des macro-épisodes identifiés dans le sixième chapitre (de MEP1 au MEP15, voir **tableau. 3 du chapitre.6**). Ainsi, pour MEP1 par exemple, la première question détectée dans les interactions en classe est présentée dans la macrostructure correspondante par Q1, etc...

un seul icône (c'est le cas des fragments de réponse émis en 204, 206 et 208 et qui sont représentés dans la macrostructure par R54a).

Plusieurs remarques peuvent être faites à propos de cette macrostructure.

Les différentes caractéristiques des échanges entre élèves et enseignante de macro-épisode concordant MEP15, montre que la classe a fonctionné sur le registre d'un cours dialogué. Nous arrivons à cette qualification, en remarquant une grande cohérence entre les caractéristiques des échanges qui ont eu lieu durant ce macro-épisode avec celles présentées pour caractériser le cours dialogué. En fait, Veyrunes et Saury (2009) définissent le cours dialogué dans sa version classique comme étant un format pédagogique marqué par « *trois mouvements d'interaction publique : une initiation (généralement sous forme d'une question du professeur), une réaction (la recherche par les élèves de la réponse à la question posée) et une évaluation (le professeur réagit à la réponse des élèves). Ces trois mouvements s'enchaînent rapidement* » (Veyrunes et Saury, 2009, p. 68).

Pour distinguer le cours dialogué dans sa forme prototypique, des autres formats pédagogiques, Veyrunes (2017, p.97) parle du « *temps de parole de l'enseignant qui est largement dominant par rapport à celui des élèves (de 60 à 70%) et la faible place à leurs commentaires* », « *le rythme rapide des questions* ». Pour les questions posées par l'enseignant, elles « *appellent généralement une réponse unique et factuelle ; lorsque celle-ci est obtenue, une nouvelle question est posée et si la réponse n'est pas celle attendue, il interroge un nouvel élève ; si la réponse obtenue n'est pas celle attendue, l'enseignant la donne lui-même* » (ibid, p.96). Lorsque les élèves réagissent à la question de l'enseignante en donnant une réponse courte [c'est le cas des réponses (189-R50a) « *Bouger* », (191-R50b) « *se déplacer* », (201-R53a) « *Flotter* »], cette dernière évalue alors cette réponse. S'il s'agit de la bonne réponse selon elle, elle la valide explicitement. C'est le cas où la professeure valide la réponse de l'élève Lucas D (201-R53a) « *Flotter* », en indiquant sa satisfaction vis-à-vis de cette réponse en (202-R53b) « *Elle a tendance à flotter. Il y a un équilibre isostatique qui existe. Elle est en équilibre. Vous n'avez pas de subsidence. Il n'y a pas d'enfoncement* ». Si la réponse ne satisfait pas l'enseignante, c'est-à-dire si la réponse de l'élève n'est pas correcte selon la professeure, cette dernière invalide implicitement cette réponse en reposant sa

question initiale (une auto-reprise avec modification) aux élèves afin d'inciter implicitement les élèves à donner une autre réponse. C'est le cas de la réponse de l'enseignante (192-R50C) « *Il peut se déplacer* » suivie par sa question (192-Q51) « *Si vous avez un matériel moins dense au-dessus d'un matériel plus dense. Si vous mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire quoi ?* », qui invalident la réponse de l'élève Lucas D (191-R50b) « *se déplacer* ».

Dans le cas où l'enseignante pose une question et qu'aucun élève ne propose une réponse, elle la donne elle-même : C'est le cas de la question (194-Q52) « *Si j'ai une lithosphère plus dense que l'asthénosphère, qu'est ce qui va se passer ?* » qui a été posée par la professeure et face à l'absence de réaction de la part des élèves, l'enseignante fournit rapidement la réponse recherchée en (194-R52) « *Je vais avoir un enfoncement. Une subsidence* ».

Dans ce cadre, nous détaillons ci-dessous les principales caractéristiques des échanges formulés en MEP15 et qui nous ont permis de déduire que la classe a fonctionné durant ce macro-épisode sur la logique d'un cours dialogué. En effet, selon la macrostructure de MEP15 nous pouvons signaler une dominance de prise de parole par l'enseignante, surtout du côté des questions posées. En fait, toutes les questions de ce macro-épisode sont émises par l'enseignante. Les quatre questions sont les suivantes : la question (188-Q50) « *Qu'est ce qui se passe s'il y a un matériel moins dense qui se retrouve au-dessus d'un matériel plus dense. Votre matériel au-dessus il va faire quoi ?* » ; la question (192-Q51) « *Si vous avez un matériel moins dense au-dessus d'un matériel plus dense. Si vous mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire quoi ?* » ; la question (194-Q52) « *Si j'ai une lithosphère plus dense que l'asthénosphère, qu'est ce qui va se passer ?* » et la question (200-Q53) « *Au point 1 (près de l'axe de la dorsale), votre lithosphère est ce qu'elle a tendance à flotter ou à s'enfoncer ?* ». Trois de ces quatre questions sont des questions ouvertes [Une question ouverte est une interrogation pour laquelle il n'y a pas qu'une sorte de réponses qui peut être acceptée. Plus explicitement, c'est une question qui laisse, à celui qui va répondre, la possibilité de proposer librement sa réponse sans qu'il soit influencé par des réponses prédéfinies (comme oui ou non)]. Elles correspondent à (188-Q50), (192-Q51), et (194-Q52).

D'un autre côté, sur un total de 12 réponses émises durant ce macro-épisode, six réponses sont données par l'enseignante. Elles correspondent à (192-R50c), (194-

R52), (202-R53b), (204,206,208-R54a), (214-R55), (216-R56a). Trois de ces réponses sont des réponses à des questions déjà posées par la professeure (Q50-R50c ; Q53-R53b ; Q52-R52).

D'autre part, la macrostructure de ce macro-épisode est marquée par la présence de ce que nous avons appelé « Affirmation ». Dans notre macro-épisode, l'enseignante émet deux affirmations qui sont (185-A48) « Ici. *Vous avez l'asthénosphère : partie ductile et ici la partie rigide [...] La séparation entre l'asthénosphère et la lithosphère est une limite thermique [...] C'est l'isotherme 1300°C [...] Elle va se situer à une profondeur différente en fonction de l'endroit où je me trouve par rapport à l'axe de la dorsale* » et (186-A49) « *Plus je m'éloigne de l'axe de la dorsale, plus cette lithosphère océanique est froide [...] Et du coup, plus ma limite thermique elle va être profonde pour obtenir 1300 °c [...] Vous allez voir que plus elle est épaisse cette lithosphère océanique, elle va tendance à subduire* ».

La macrostructure du MEP15 montre de même l'existence d'un rythme très rapide des questions posées par l'enseignante. En étudiant notre corpus, nous pouvons remarquer ce rythme accéléré dans la réplique 188 où l'enseignante a posé trois questions successives dont deux de ces questions représentent des auto-reprises (avec modification) de la question principale « *188-Et qu'est ce qui se passe s'il y a un matériel moins dense qui se retrouve au-dessus d'un matériel plus dense ?* ». Ces deux questions sont « *Votre matériel qui est dessus il va ?* » et « *188- il va quoi faire ?* ». [L'auto-reprise avec modification d'une question signifie la répétition (avec quelques modifications) par un interlocuteur d'une question qui a été posée avant par lui-même **dans le même tour de parole**].

Pour les questions posées par l'enseignante tout au long de ce macro-épisode, nous pouvons distinguer clairement des bouclages simples où la question a été posée plusieurs fois par l'enseignante (nous identifions un bouclage simple lorsqu'un interlocuteur pose une question puis il reprend la même question [avec modification] dans la suite de discours [**dans un autre tour de parole**]). Nous parlons ici de la question (188-Q50) « *Qu'est ce qui se passe s'il y a un matériel moins dense qui se retrouve au-dessus d'un matériel plus dense. Votre matériel au-dessus il va quoi faire ?* » qui est reprise (avec modification) par la professeure en (192-Q51) « *Si vous avez un matériel moins dense au-dessus d'un matériel plus dense. Si vous*

mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire quoi ? » puis en (200-Q53) « *Au point 1 (près de l'axe de la dorsale), votre lithosphère est ce qu'elle a tendance à flotter ou à s'enfoncer ?* ».

En ce qui concerne les interventions des élèves, nous pouvons distinguer clairement la présence de deux questions de reformulation clarification posées successivement par l'élève Lucas. D et Lucas : (203-QRC54) « *Au point 3 (loin de l'axe de la dorsale), c'est supérieur de l'asthénosphère. C'est ce qu'on cherche ? C'est ce qui crée la solution ?* » et (215-QRC56) « *Ce qui fait la limite c'est la température. C'est pas la différence des roches ?* ».

Notre macro-épisode comporte aussi une question de relance qui a été posée en (209-QR55) « *Pourquoi déjà il y a plus de lithosphère, quand on s'éloigne de la dorsale* » par l'élève Lucas sur la cause de l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère en s'éloignant de l'axe de la dorsale.

Nous pouvons remarquer de même que les six réponses données par les élèves ont une longueur très courte. Elles sont formées généralement d'un ou de deux mots au maximum [(217-R56b) « *Oui* » ; (207-R54b) « *elle s'enfonce* » ; (189-R50a) « *Bouger* », etc...].

Nous pouvons signaler de même une quasi absence d'objections formulées. Dans ce macro-épisode, nous pouvons identifier en fait une seule objection formulée par l'enseignante (194-O51) « *Ils ne vont pas couler. S'ils sont moins denses, ils flottent* ».

La proportion élevée des questions posées et des réponses données par l'enseignante est interprétée par le fait que c'est la professeure qui fait la grande part du travail (de point de vue des échanges). En posant ces questions, l'enseignante attend une réponse brève de la part des élèves.

A partir des explicitations présentées ci-dessus, nous pouvons conclure et dire à ce niveau que durant le cours dialogué identifié ci-dessus, les préoccupations de l'enseignante ne sont pas la mise en place d'une problématisation permettant la construction d'un savoir scientifique tenu par des raisons. En effet, par l'émission des affirmations successives (185-A48) et (186-A49) nous pensons que l'enseignante se soucie de donner des assertions et de privilégier « le savoir que ». Elle aide les apprenants à savoir que « *Plus je m'éloigne de l'axe de la dorsale, plus*

cette lithosphère océanique est froide. Et du coup, plus ma limite thermique elle va être profonde pour obtenir 1300 °c. Vous allez voir que plus elle est épaisse cette lithosphère océanique, elle va tendance à subduire ».

Par les affirmations émises par la professeure, cette dernière cherche à présenter des contenus liés au mécanisme de la subduction. De même, les questions posées par l'enseignante, le rythme rapide de ces questions posées ainsi que la longueur courte des réponses des élèves, montrent selon nous que les préoccupations de la professeure sont plutôt faire trouver la réponse juste liée au mécanisme de la subduction suivie par la vérification de l'acquisition de ce concept géologique. La reprise (avec modification) par l'enseignante de la question (188-Q50) et (192-Q51) en (200-Q53) consolide notre hypothèse. En fait, ces bouclages simples, montrent davantage que la professeure cherche à vérifier et confirmer l'appropriation par les élèves du moteur de la subduction (qui a été présenté déjà par l'enseignante comme une solution dans les répliques 185 et 186). Nous sommes arrivés à cette conclusion en se référant aux travaux de R. Vion (2000) qui précisait dans son livre « La communication verbale : Analyse des interactions » que certaines reprises « *ont une fonction idéelle dominante dans la mesure où elles visent notamment à s'assurer qu'on a bien compris. Bon nombre de reprises accompagnées d'une intonation incitative ou interrogative, fonctionnent comme une demande de confirmation* » (Vion, 2000, p. 217).

Dans notre étude, et suite à nos analyses ci-dessus, nous pensons que l'enseignante n'a pas choisi de mettre en place un débat scientifique permettant la construction d'un savoir problématisé, elle a privilégié plutôt d'appliquer le cours dialogué qui apparaît être le format pédagogique le plus compatible avec ses préoccupations. En fait, parmi les fonctions du cours dialogué Veyrunes parle de la présentation des contenus, la vérification de l'acquisition et la mémorisation des connaissances qui ont été l'objectif primordial de l'enseignante tout au long de ce macro-épisode : « *Si ce format visait, jusqu'aux années 1920-1930, à "faire réciter" la leçon apprise dans le manuel et à vérifier sa mémorisation par les élèves, ses fonctions ont par la suite évolué. Les enseignants l'utilisent aujourd'hui dans de nombreux contextes pédagogiques, par la présentation de contenus, en particulier dans les disciplines à fort contenu informatif comme [...] les SVT, pour le rappel et la synthèse des connaissances ou la vérification de leur acquisition* » (Veyrunes, 2017, p. 96).

Néanmoins, il est important de préciser ici que même si la macrostructure du macro-épisode MEP15 montre globalement que la classe a fonctionné sur le registre d'un cours dialogué, c'est par la question de relance présentée par l'élève Lucas D en (209-QR 55) « *Pourquoi déjà il y a plus de lithosphère, quand on s'éloigne de la dorsale* » et les questions de reformulation clarification posées respectivement par l'élève Lucas D et l'élève Lucas en (203-QRC54) « *Au point 3 (loin de l'axe de la dorsale), c'est supérieur de l'asthénosphère. C'est ce qu'on cherche ? C'est ce qui crée la solution?* » et en (215-QRC56) « *Ce qui fait la limite c'est la température. C'est pas la différence des roches ?* », que les apprenants montrent que le savoir solution donné auparavant dans le macro-épisode reste énigmatique pour eux. Ceci les pousse alors à poser ces questions afin de relancer l'explication et résoudre certaines ambiguïtés leur permettant de comprendre le moteur de la subduction.

Ainsi, par ces questions identifiées dans cette macrostructure que nous pouvons dire que la classe pourrait s'orienter vers l'inscription dans un processus de problématisation plutôt qu'un cours dialogué qui permettrait peut-être de construire un savoir tenu par davantage de raisons. Les réponses données par l'enseignante en (204, 206, 208- R54a), (214-R55), et (216-R56a) à la suite de ces questions, montrent selon nous que la professeure continue de privilégier « un savoir solution » moins propice à des moments de controverse et d'argumentation en classe.

A48 : [...] Ici. Vous avez l'asthénosphère : partie ductile et ici la partie rigide [...] La séparation entre l'asthénosphère et la lithosphère est [...] une limite thermique [...] C'est l'isotherme 1300°C [...] Elle va se situer à une profondeur différente en fonction de l'endroit où je me trouve par rapport à l'axe de la dorsale (185,186, 188, 208)

A49 : Plus je m'éloigne de l'axe de la dorsale, plus cette lithosphère océanique est froide [...] Et du coup, plus ma limite thermique elle va être profonde pour obtenir 1300 °c [...] Vous allez voir que plus elle est épaisse cette LO, elle va tendance à subduire ». (185,186, 188, 208)

Q50 : Qu'est ce qui se passe s'il y a un matériel moins dense qui se retrouve au-dessus d'un matériel plus dense. Votre matériel au-dessus il va quoi faire ? (188 [x3], 190)

R50c : Il peut se déplacer. (192)

R50a: Bouger
Lucie (189)

R 50b: se déplacer
Lucas D (191)

Q51 : Si vous avez un matériel moins dense au-dessus d'un matériel plus dense. Si vous mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire quoi ? (192)

R 51a: Couler
Plusieurs élèves (193)

O51 : Ils ne vont pas couler. S'ils sont moins denses, ils flottent. (194)

Q52 : Si j'ai une lithosphère plus dense que l'asthénosphère, qu'est ce qui va se passer ? (194)

R52 : Je vais avoir un enfoncement. Une subsidence. (194)

Q53: Au point 1 (près de l'axe de la dorsale votre lithosphère est ce qu'elle a tendance à flotter ou à s'enfoncer ? (200)

R53a : Flotter (201)
Lucas D

R53b : Elle a tendance à flotter. Il y a un équilibre isostatique qui existe. Elle est en équilibre. Vous n'avez pas de subsidence. Il n'y pas d'enfoncement. (202)

QRC54 : Au point 3 (loin de l'axe de la dorsale), c'est supérieur de l'asthénosphère. C'est ce qu'on cherche ? C'est ce qui crée la solution ? (203)
Lucas D

R54a : Oui. C'est ça [...] Si vous avez [...] une densité moyenne qui est supérieure à 3,25. Ça veut dire que votre lithosphère avec votre manteau lithosphérique + la croûte ont tendance à s'enfoncer [...] C'est le moteur de la subduction [...] (204,206, 208)

R54b : Elle s'enfonce (205, 207)
Lucie, Lucas

QR55 : Pourquoi déjà il y a plus de lithosphère, quand on s'éloigne de la dorsale (209,213)
Lucas

R55 : L'isotherme est la ligne où vous avez la même température partout. Là, l'isotherme 1300°C, c'est la limite entre la lithosphère et l'asthénosphère (214)




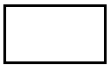






QRC56: Ce qui fait la limite c'est la température. C'est pas la différence des roches ? (215)
Lucas

R56a: Ici, c'est du manteau. C'est la péridotite partout. Simplement, tout va avoir un comportement de roche différent si je suis à moins 1300°C, je vais avoir un comportement plutôt rigide et cassant. Si je suis 1300°C, mon matériel va devenir ductile (216)

R56b : Oui(217)
Lucas

MEP15

La légende des macrostructures des macro-épisodes concordants

-  Question posée par l'enseignante
-  Question posée par les élèves
-  Réponse donnée par l'enseignante
-  Réponse proposée par les élèves
-  Objection formulée par l'enseignante
-  Question de relance posée par les élèves
-  Question de reformulation clarification posée par les élèves
-  Affirmation émise par l'enseignante
-  Objection formulée par les élèves
-  Une première question qui va amener le locuteur à poser la deuxième question.

X [n] Questions posées successivement n fois dans une même réplique pour vouloir poser la même question initiale.

Fig.23. Macrostructure du macro-épisode MEP15 qui aborde le thème du moteur de la subduction en classe de terminale S.

- **La macrostructure du MEP9 qui étudie le métamorphisme des zones de subduction**

Suite à l'analyse de la macrostructure du MEP15, nous nous consacrons maintenant à l'étude de la macrostructure du MEP9.

Nous représentons dans **le tableau.5** la partie du corpus qui correspond au MEP9.

Les différentes interventions du MEP9 ont eu lieu durant la première partie de la deuxième séance. Au début de cette séance, l'enseignante présentait aux élèves les fiches de la **Fig.14** « Fiche de travail sur l'histoire des Alpes (avec l'épisode de subduction) » et les documents de **la Fig.15** « Fiche de travail présentant respectivement le domaine de stabilité de quelques minéraux ainsi que l'isotherme de température dans une zone de subduction ». Ainsi, par ces documents, la professeure invitait les élèves à utiliser ces supports afin de trouver une stratégie de résolution montrant un épisode de subduction dans l'histoire des Alpes : Plus explicitement, les fiches distribuées en classe vont aider les élèves à identifier la présence dans les Alpes, de minéraux de HP-BT rendant nécessaire un métamorphisme de HP-BT caractéristique des zones de subduction.

Tableau. 5. Le macro-épisode MEP9.

71	P : [...] lorsque vous avez subduction, en fait votre croûte océanique, elle va s'enfoncer et du coup elle va avoir des changements de pression et de température [...] Qu'est ce qu'ils peuvent engendrer ? On a vu ça dans le chapitre précédent.
72	Lucas : Evaporation de l'eau.
73	P : Oui, alors, effectivement vous pouvez avoir modification de l'état de l'eau, mais au niveau de la roche, si je la mets dans d'autres conditions de pression et de température ?
74	Salma : Transformation de la roche.
75	P : [...] Des transformations, soit de structure, [...] Mais, vous avez aussi parfois des transformations minéralogiques [...] ça s'appelle le métamorphisme. Vous avez un métamorphisme caractéristique de la subduction. C'est un métamorphisme dans les conditions de haute pression, basse température. Alors, haute pression, pourquoi haute pression ? Est-ce que c'est logique ça ?
76	Lucas : C'est parce que sous l'eau.
77	P : C'est pas parce que sous l'eau. Mais c'est parce que votre croûte océanique elle s'enfonce, si elle s'enfonce, [...] Le matériel qui va être plus bas [...] va au-dessous [...] va forcément avoir une pression plus importante. C'est haute pression, c'est normal puisque vous avez un enfouissement. Après, basse température est ce que ça vous paraît logique comme ça basse température ? [...] Pourquoi, il y a une basse température ?

78	Mathis :C'est parce que c'est loin du soleil.
79	P : Non, c'est pas parce que loin du soleil.
80	Mathis : Mais sous l'eau, il n'y a pas de rayon de soleil.
81	P : Oui c'est vrai, sous l'eau, il n'y a pas de soleil, le soleil ne peut pas passer, mais là, c'est plutôt lié à l'état de la roche au niveau des zones de subduction. [...] Ma croûte [...] Là, à l'axe de la dorsale, c'est comment ? C'est très ?
82	Toute la classe : Chaud.
83	P : C'est très...chaud. Plus je m'éloigne, plus votre croûte a eu de temps de refroidir, parce qu'elle est dans l'eau froide. Elle va avoir du temps à refroidir [...] Donc, je vais avoir une croûte très froide et du coup elle s'enfonce, ben, elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer.[...] cette croûte océanique elle est anormalement froide, elle va quand même se réchauffer, mais elle va mettre un petit peu de temps pour se réchauffer.

91	P : [...] Quand vous avez une subduction, vous allez avoir une roche de la croûte océanique, c'est quoi déjà, ces roches de la croûte océanique ?
92	Mathis : Basalte.
93	P : [...] vous avez votre basalte, votre gabbro, il va plonger, je vous ai dit les conditions : C'est la haute pression, basse température, et du coup, ces gabbros et ces basaltes ils subissent un métamorphisme : les roches, elles vont se modifier quelque peu, et quand un gabbro est métamorphisé, j'appelle ça métagabbro [...]

99	P : [...] Vous avez [...] un diagramme de pression et de température qui vous montre quels sont les minéraux que je vais trouver dans les différents domaines. Alors, regardez la chlorite, c'est un petit minéral vert. Est-ce que vous le voyez tous sur le diagramme ?
100	Toute la classe : Oui.
101	P : En haut, ça va ? Vous l'avez trouvé ? Alors, quand je trouve de la chlorite, dans quelles conditions je me trouve ?
102	Lucas : Entre 0 et 200 °C.
103	P : En termes de température et de...Alors, vous m'avez dit entre 0 et 200° même entre 0 et 400°C, on peut le trouver. Oui, c'est une température qui est plutôt ?
104	Lucas : Basse.
105	P : Basse. D'accord basse température et en termes de pression ?
106	Mathis : Entre 0 et 500.
107	P : Entre 0, alors, en termes de pression la pression c'est Pression en Méga Pascal, c'est l'unité méga Pascal.
108	Lucas D : 500.
109	P : Combien, oui je dis même plus que 500. Regardez la même échelle ici ?
110	Mathis : Ben, pour la chlorite.
111	P : Oui, mais la chlorite, elle va ,elle [...] va jusqu'à 500 voire 1000. [...] Si je me trouve à une température de 400°, je peux aller à 1000 Méga Pascal [...]

132	Amina : Dans une zone de subduction, basse température \ haute pression ?
133	P : Oui, basse température [...] haute pression, basse température.
134	Mathis : Dans une subduction, ça s'enfonce
135	P : Oui.
136	Mathis : Alors, le gradient géothermique est plus chaud
137	P : Oui, mais je l'ai expliqué [...] Plus je m'enfonce, plus c'est fait chaud. C'est vrai. Mais [...] ta croûte [...] elle se réchauffe moins vite que ce qu'on pourrait attendre, parce qu'elle est très froide. [...] Ce sont déjà, des températures chaudes, mais en terme géologique, la température est pas très élevée . [...]
138	Mathis : C'est quoi basse température ?
139	P : Ben, c'est des températures qui sont, qui sont à la partie de ton diagramme, qui sont la partie la plus faible dans ton diagramme. Ici, 0-200°C, ce sont des basses températures.
140	Mathis : mais c'est pas très froid.
141	P : Non, j'ai dit après que c'est pas super froid, mais ça va être plutôt des températures peu élevées. Je sais pas comment comprendre mieux. [...]

À partir des répliques de l'enseignante et des élèves du **tableau.5**, nous avons pu construire la macrostructure du MEP9. Cette macrostructure est représentée dans la **figure.24 (p. 157)**.

Ce macro-épisode présente certaines différences par rapport à celui déjà étudié auparavant. En fait, nous remarquons l'existence de sept objections formulées par l'enseignante et des élèves de la classe, qui sont distribuées de la façon suivante : quatre objections sont émises par la professeure et trois objections sont produites par les élèves. En ce qui concerne les questions posées durant ce macro-épisode, nous remarquons que toutes les questions²² sont émises par la professeure. Elles correspondent à (71-Q26), (75-Q27), (77-Q28), (101-Q37), et (105-Q38). Elles sont des questions ouvertes comme « *Qu'est-ce qu'ils (les changements de pression et de température de la C.O subduite) peuvent engendrer ?* » ou encore « *Pourquoi HP ? Est-ce que c'est logique ça* ».

Pour les réponses données durant le MEP9 et au contraire des macrostructures des autres macro-épisodes étudiés, nous remarquons une légère augmentation du

²² : Les questions de relance et les questions de reformulation clarification ne sont pas incluses dans le comptage de la catégorie « Questions ». Nous les séparons de cette catégorie parce qu'elles sont considérées comme des questions présentant des caractéristiques particulières : les questions de relance sont posées par le locuteur pour relancer une explication déjà donnée dans la discussion. Par les questions de reformulation clarification, le locuteur reformule ce qu'il a déjà compris ou déduit dans le propos de l'interlocuteur tout en essayant de lever une ambiguïté ou chercher de précisions.

nombre de réponses données par les élèves par rapport à celles présentées par l'enseignante. En fait, pour un total de treize réponses, nous trouvons six réponses émises par l'enseignante (75-R26c « *c'est un métamorphisme de HP-BT* », 79-R28b « *Non. C'est pas parce que c'est loin du soleil* », 105-R37c « *D'accord basse température* », 109, 111-R38b « *Oui je dis même plus que 500. Je peux aller à 1000 Méga Pascal* », 133-R39a « *Oui basse température. Non, je ne dis pas des bêtises* », 139-R40a « *C'est des températures qui sont dans la partie la plus faible dans le diagramme* ») contre sept réponses présentées par les élèves (72-R26a « *évaporation d'eau* », 74-R26b « *transformation de la roche* », 76-R27 « *C'est parce que sous l'eau* », 78-R28a « *c'est parce que loin du soleil* », 102-R37a « *entre 0 et 200°C* », 104-R37b « *basse* », 106, 108-R38a « *entre 0 et 500 Méga Pascal* »). Nous pouvons distinguer ici une longueur plus ou moins courte des réponses des apprenants qui peuvent varier entre un mot [Exemple : (104-R37b) « *basse (basse température)* »] jusqu'à six mots approximativement [Exemple : (78-R28a) « *C'est parce que c'est loin du soleil* »].

Durant ce macro-épisode, nous pouvons signaler clairement l'existence d'une question de relance (138-QR40) posée par l'élève Mathis « *C'est quoi basse température ?* ». De même, nous remarquons l'existence d'une question de reformulation clarification (132-QRC39) qui a été émise par l'élève Amina « *Dans une zone de subduction basse température, haute pression ?* ».

Pour les différentes questions posées par l'enseignante, nous remarquons :

-La présence de bouclage en retour²³ où les questions qui sont posées provoquent un retour sur une question déjà traitée en la modifiant : Nous pouvons citer ici l'exemple de la question (105-Q38) « *Et en termes de pression ? (l'enseignante veut dire : Dans quelles conditions de pression se retrouve la chlorite ?)* » qui rétroagit sur la question (75-Q27) « *Pourquoi HP ? Est-ce que c'est logique ça ?* ».

Ce bouclage en retour peut être observé aussi au niveau de la question (101-Q37) « *Quand je trouve de la chlorite, dans quelles conditions je me trouve ?* » qui rétroagit sur les questions (75-Q27) « *Pourquoi HP ? Est-ce que c'est logique ?* » et

²³ : Le bouclage simple et le bouclage en retour sont différents. Si le bouclage simple est identifié lorsqu'un interlocuteur pose une question puis il reprend cette même question [avec modification] dans la suite du discours (dans un autre tour de parole), le bouclage en retour, quant à lui, est identifié lorsqu'un interlocuteur formule une question qui rétroagit sur une autre question déjà posée (elle n'est pas la même que celle émise avant dans un autre tour de parole).

(Q28) « *Pourquoi il y a une basse température ? Est-ce que ça vous paraît logique ?* ».

Les différentes caractéristiques des échanges entre élèves et enseignante, montre selon nous que la classe a fonctionné durant ce macro-épisode sur le registre de cours dialogué que nous avons déjà convoqués plus haut. Nous arrivons à cette conclusion en identifiant « *les trois mouvements d'interaction* » qui caractérisent le cours dialogué. Ils correspondent respectivement à « *une initiation (généralement sous forme d'une question du professeur), une réaction (la recherche par les élèves de la réponse posée), et une évaluation (le professeur réagit à la réponse des élèves)* » (Veyrunes et Saury, 2009, p. 68). Cet enchaînement des questions de l'enseignante, des réponses des élèves et l'évaluation par la professeure peut être observé dans l'exemple suivant que nous avons pu détecter dans ce macro-épisode : En effet, nous pouvons remarquer que par la question posée par l'enseignante en (71-Q26) « *Qu'est-ce qu'ils (les changements de pression et de température de la croûte océanique subduite) peuvent engendrer ?* », cette dernière essaye de faire trouver la réponse juste. Elle cherche ici à vérifier l'acquisition du phénomène de métamorphisme qui est considéré selon elle comme un prérequis. Nous remarquons ceci lorsqu'elle disait dans la réplique 71 « ces changements de température, qu'est-ce qu'ils peuvent engendrer ? On a vu ça dans le chapitre précédent ». Cette question ouverte posée par l'enseignante a suscité la réaction des élèves qui s'observe par la proposition de solution possible en (72-R26a) : Cette réponse proposée par l'élève Lucas « *Evaporation d'eau* » ne satisfait pas les attentes de l'enseignante. Ceci l'amène à répéter (avec modification) la question (Q26) dans la réplique 73 « *au niveau de la roche, si je la mets dans d'autres conditions de pression et de température ?* ». Nous pouvons dire que l'enseignante essaye ici de guider les élèves afin de donner eux-mêmes la solution recherchée. La réponse proposée par l'élève Salma en (74-R26b) « *transformation de la roche* » ne satisfait pas complètement les attentes de l'enseignante. Ceci va l'amener à prendre la parole en ajoutant des précisions sur la réponse (74-R26b) de l'élève et en donnant elle-même la solution recherchée en (75-R26c) « *C'est un métamorphisme [...] de HP-BT* ».

Dans ce cadre, nous pensons que l'enseignante privilégie la présentation d'un savoir solution et que son choix n'est pas la mise en place d'une problématisation.

En effet, tout au long de ce macro-épisode, la professeure cherche à trouver la solution « juste » selon elle. Si la réponse donnée par les élèves est considérée comme insatisfaisante, elle l'invalidé et elle donne elle-même la solution attendue [Exemple : (75-R26c) « *C'est un métamorphisme [...] de HP-BT* »]. Néanmoins, nous pouvons remarquer clairement que même si l'enseignante donne la solution recherchée, elle essaye à certains moments de ce macro-épisode d'inviter les lycéens à proposer des raisons possibles qui peuvent expliquer ce qui a été déjà présenté comme un savoir solution.

Ainsi, pour donner du sens à la solution donnée par l'enseignante en (75-R26c), cette dernière pose les questions (75-Q27) « Pourquoi HP ? Est-ce que c'est logique ça ? » et (77-Q28) « *Pourquoi il y a une basse température ? Est-ce que ça vous paraît logique ?* », tout en essayant de faire passer la classe d'un « savoir que » la lithosphère océanique subduite va subir un métamorphisme HP-BT à « savoir ce que veut dire » les expressions haute pression (HP) et basse température (BT), c'est-à-dire pourquoi on parle de conditions de haute pression et basse température caractéristiques du métamorphisme des zones de subduction.

Si nous prenons tout d'abord la question (75-Q27) « *Pourquoi HP ? Est-ce que c'est logique ça ?* », nous remarquons que cette question ouverte (Pourquoi...) a suscité la réaction de l'élève Lucas en (76-R27) « *C'est parce que sous l'eau* ». Cette réponse (76-R27) ne satisfait pas les attentes de l'enseignante parce qu'elle représente une réponse fautive pour elle. Ceci l'a conduite à invalider explicitement la réponse de l'élève et de donner la réponse juste en (77-O27) « *C'est pas parce que sous l'eau. C'est normal (HP), puisque vous avez un enfouissement* ».

En ce qui concerne maintenant la question (77-Q28) posée par l'enseignante « *Pourquoi il y a une basse température ? Est-ce que ça vous paraît logique ?* », nous remarquons que la réponse (78-R28a) de l'élève Mathis « *c'est parce que c'est loin du soleil* » est considérée comme incorrecte de la part de la professeure. Ceci l'a amenée à réfuter cette réponse explicitement en formulant la réponse (79-R28b) « *Non. C'est pas parce que loin du soleil* ». Il est important de préciser ici que nous avons considéré la réplique 79 de l'enseignante « *Non. C'est pas parce que loin du soleil* » comme une réponse et non pas une objection parce qu'elle s'est limitée à réfuter la proposition de l'élève mais sans donner l'argument qui explique son désaccord.

Même avec la réfutation de la réponse (78-R28a) de l'élève Mathis par l'enseignante, l'apprenant a pris la parole en montrant son opposition à ce que disait l'enseignante. Il essaye cette fois-ci d'explicitier encore la raison qui lui permet de dire qu'il y a une basse température. Cette opposition argumentée s'observe dans notre macrostructure au niveau de l'objection (80-O28a) « *Mais sous l'eau, il n'y a pas de rayon de soleil* ». Cette objection formulée par l'élève Mathis ne représente pas le produit attendu par l'enseignante. Ceci lui a amené à invalider implicitement cette réponse en donnant elle-même la réponse correcte recherchée en (81-O28b) « *Mais là, c'est [...] lié à l'état de roches au niveau des zones de subduction* ».

Pour vérifier l'acquisition du concept de métamorphisme HP-BT déjà donné par l'enseignante et lui donner de la consistance en classe, la professeure pose alors successivement la question (101-Q37) « *Quand je trouve de la chlorite, dans quelles conditions je me trouve ?* » qui rétroagit sur les questions (75-Q27) « *Pourquoi HP ? Est-ce que c'est logique ça ?* » et (77-Q28) « *Pourquoi il y a une basse température ? Est-ce que ça vous paraît logique ?* » et la question (105-Q38) « *Et en termes de pression ? (L'enseignante veut dire dans quelles conditions de pression se retrouve la chlorite ?)* » qui rétroagit sur la question (75-Q27) « *Pourquoi HP ? Est-ce que ça vous paraît logique ?* ».

Pour la question (101-Q37), nous remarquons que les élèves ont réagi envers cette question en donnant deux propositions de réponses émises par l'élève Lucas en (102-R37a) « *Entre 0 et 200°C* » et en (104-R37b) « *Basse (l'élève veut dire basse température)* ». Ces réponses de l'élève sont considérées comme satisfaisantes par l'enseignante. Ceci va l'amener à les valider explicitement en (105-R37c) « *D'accord basse température* ».

En ce qui concerne maintenant la question (105-Q38) « *Et en termes de pression ?* », nous remarquons que cette question a suscité la réponse de l'élève Mathis dans la réplique 106 « *Entre 0 et 500 (Méga Pascal)* » et l'élève Lucas D dans la réplique 108 « *500* ». Cette réponse satisfait partiellement l'enseignante. Ceci l'a poussée à valider explicitement la réponse des élèves tout en ajoutant certaines précisions liées aux conditions de pression permettant la formation des minéraux observés dans les zones de subduction [(109,111-R38b) « *109 : Oui je dis même plus que 500 - 111 : Je peux aller à 1000 Méga Pascal* »].

Nous pouvons dire alors à ce niveau d'analyse que les questions posées par

l'enseignante en (75-Q27) et (77-Q28) peuvent être interprétées par le fait que la professeure essaye de guider les élèves pour trouver les conditions de possibilité du phénomène de métamorphisme HP-BT. Pour une classe qui met en place un processus de problématisation, le dialogue ne s'arrête que lorsque s'impose la conscience de nécessité (Fabre, 2017, p. 43). Mais si on regarde notre macrostructure, nous allons voir clairement que les conditions de basse température (BT) et de haute pression (HP), n'ont pas été construites en tant que nécessités en classe. En fait, même s'il y a des objections qui ont été détectées, nous pouvons voir que ces dernières ne sont pas formulées seulement par les élèves entre eux [comme c'est le cas par exemple dans les travaux de Fabre & Orange (1997), ou encore Lhoste (2008)]. Il s'agit plutôt d'objections émises d'une part par un seul élève (c'est l'élève Mathis) et d'une autre part par l'enseignante. Ces moments de controverses n'ont pas permis de construire les nécessités parce que les objections de l'enseignante sont formulées ici pour invalider les propositions de l'élève et pour donner la bonne solution en utilisant « des arguments d'autorité » (Lhoste, 2017, p. 41) [Exemple : (77-O27) « *c'est pas parce que sous l'eau. C'est normal (HP), puisque vous avez un enfouissement* », (81-O28b) « *Mais là, c'est lié [...] à l'état de roches au niveau des zones de subduction* »]. Donnée comme une solution, le métamorphisme de HP-BT reste ambigu pour les élèves, même avec les bouclages (voir ci-dessus) menés par l'enseignante visant à vérifier la mémorisation de ce concept en classe et à le valider davantage. Nous sommes arrivés à cette conclusion à partir de la question de reformulation clarification posée par l'élève Amina en (132-QRC39) « *Dans une zone de subduction basse température, haute pression ?* » ainsi que la question de relance posée par l'élève Mathis en (138-QR40) « *c'est quoi basse température* ». Par ces questions, les apprenants cherchent à relancer l'explication déjà donnée et validée avant par l'enseignante sur le concept du métamorphisme des zones de subduction. En posant ces questions, la classe tend selon nous vers un début de problématisation qui pourrait aboutir possiblement à la construction d'un savoir problématisé, raisonné.

Si nous suivons notre macrostructure en regardant la réponse à la question de reformulation clarification (132-QRC39) de l'élève Amina, nous pouvons dire que par la formulation de (133-R39a), l'enseignante valide encore sa réponse qui a été déjà donnée dès le début de macro-épisode (en 75-R26c). Cette réponse a reçu une

opposition de la part de l'élève Mathis, qui a déjà expliqué au début du macro-épisode la condition de basse température (BT) par le fait que la lithosphère océanique enfouie est loin du soleil. Cette fois-ci, l'élève formule l'objection (134, 136- O39a) « 134 : Dans une subduction, ça s'enfonce - 136 : alors le gradient géothermique est plus chaud », qui met au jour le problème du métamorphisme des zones de subduction qu'il considère ici de HP-HT. Pour répondre à cette objection de l'élève, l'enseignante formule alors l'objection (137-O39b) « Oui mais je l'ai expliqué : La croûte va se réchauffer, mais elle se réchauffe moins vite parce qu'elle est très froide ». L'argumentation de l'enseignante présentée dans cette objection, reste toujours non convaincante pour l'élève Mathis.

Ceci l'a poussé à poser la question de relance (138-QR40) « *C'est quoi basse température ?* » afin de relancer l'explication des conditions de basse température, caractéristiques du métamorphisme des zones de subduction. La réponse de l'enseignante (139-R40a) « *C'est des températures qui sont [...] la partie la plus faible dans le diagramme* » ne satisfait pas l'élève Mathis, qui a essayé à son tour d'explicitier son opposition par la formulation de l'objection (140-O40a) « *Mais c'est pas très froid* ». Cette réplique montre selon nous que l'élève explique le métamorphisme des zones de subduction en se plaçant dans un registre de sens commun où « la basse et la haute température » ne sont pas appréhendées de la même manière que l'enseignante.

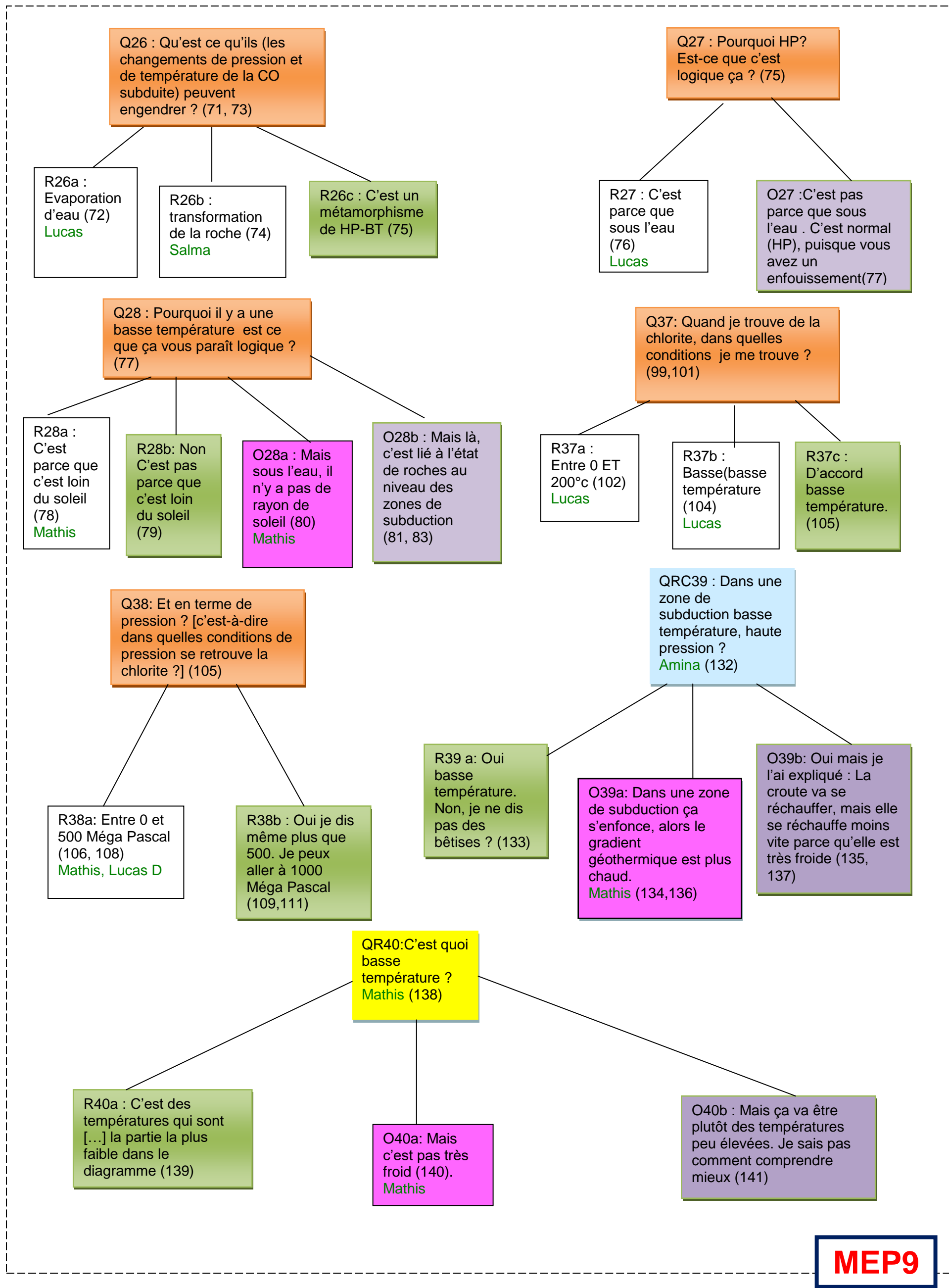
Pour répondre à cette objection (140-O40a) émise par l'élève Mathis, l'enseignante a formulé de nouveau l'objection (141-O40b) « *Mais ça va être plutôt des températures peu élevées. Je sais pas comment comprendre mieux* », marquant ainsi le rejet de l'énoncé de l'élève tout en répétant (avec modification) le contenu de sa réponse (R40a) [Réplique 139].

En conclusion, nous pouvons dire que dans ce macro-épisode, nous sommes devant un cours dialogué qui n'est pas dans sa forme classique (il présente certaines transformations par rapport à ce qui s'est déroulé dans le macro-épisode précédent) : Le MEP9 a fonctionné selon un régime de cours dialogué passant sporadiquement et d'une manière fugace à un régime favorable à la problématisation. En fait, nous pouvons remarquer comme le précisait Veyrunes (2017, p. 97) que dans ce cours dialogué « *la nature et la forme des questions de l'enseignante et des réponses des élèves peuvent être profondément modifiées : la proportion des questions fermées*

posées par l'enseignante diminue » et remplacée par des questions ouvertes [Exemple : 75-Q27 « pourquoi HP ? »], « *celle des commentaires faits par l'enseignante augmente* » [Exemple : (79-R28b) « Non. C'est pas parce que c'est loin du soleil », (105-R37c) « D'accord basse température »], « *celle des réponses courtes des élèves diminue* » (Nous voyons dans ce macro-épisode la présence surtout d'objections de l'élève Mathis montrant qu'un tout petit nombre d'élèves prennent davantage la parole). Nous pouvons mentionner aussi « *une proportion importante de feed-back de l'enseignante* » (ibid) qui s'observe dans notre macro-épisode à travers le bouclage de retour mis en place par la professeure pour vérifier et consolider la mémorisation des solutions données par elle-même auparavant.

Le pourcentage plus ou moins important des objections formulées (par l'enseignante et un élève) peut nous donner des indications sur la présence de controverses en classe qui sont normalement favorables à la construction d'un savoir raisonné. Néanmoins, ces moments de controverses n'ont pas permis la construction d'un savoir raisonné. En effet, face aux objections de l'élève, l'enseignante formule ses objections pour réfuter les propositions de l'apprenant et pour donner ensuite la réponse considérée selon elle comme « juste ». Sa logique est autre. Il s'agit d'une logique en Vrai/faux.

La formulation par les élèves de la question de reformulation clarification (132-QRC39) « *Dans une zone de subduction basse température, haute pression ?* » ainsi que la question de relance posée par l'élève Mathis en (138-QR40) « *c'est quoi basse température* » représentent selon nous une occasion pour relancer l'explication et discuter le savoir solution déjà donné par la professeure et qui reste apparemment insatisfaisant pour les lycéens. A travers ces questions, nous pensons que ces interventions d'élèves pourraient être propice à la constructions de raisons pesant sur les solutions envisagées. En suivant la suite de la macrostructure, nous pouvons voir que les réponses de l'enseignante et ses objections formulées en (137-O39b), en (139-R40a) et en (141-O40b), montrent qu'elle continue à présenter un « savoir solution » qui est différent d'un processus de problématisation.



La légende des macrostructures des macro-épisodes concordants











-  Question posée par l'enseignante
 -  Question posée par les élèves
 -  Réponse donnée par l'enseignante
 -  Réponse proposée par les élèves
 -  Objection formulée par l'enseignante
 -  Question de relance posée par les élèves
 -  Question de reformulation clarification posée par les élèves
 -  Affirmation émise par l'enseignante
 -  Objection formulée par les élèves
 -  Une première question qui va amener le locuteur à poser la deuxième question.
- X [n] Questions posées successivement n fois dans une même réplique pour vouloir poser la même question initiale.

Fig.24. Macrostructure du macro-épisode MEP9 qui aborde le problème du métamorphisme des zones de subduction en classe de terminale S.

Conclusion de l'analyse des macrostructures des macro-épisodes concordants

- D'après l'analyse des macrostructures des six macro-épisodes concordants identifiés dans notre corpus (voir le **tableau.6** qui récapitule les caractéristiques des macrostructures de ces macro-épisodes), nous pouvons conclure que tous ces macro-épisodes ont été marqués par une forte prise de parole du côté de l'enseignante par rapport à celle des élèves (la plupart des questions sont posées par l'enseignante, avec une proportion importante de réponses émises par elle-même, voir les cases « Q de la PR » et « RE de la PR » du **tableau. 6**). En effet, comme le précise Astolfi (2002), le dialogue qui a eu lieu tout au long de ces macro-épisodes concordants, est monologal, même s'il y a une alternance de la parole entre l'enseignante et les apprenants. En fait, dans ces macro-épisodes, les élèves ne font que « *compléter ce que l'enseignant a choisi de ne pas dire lui-même, afin de laisser les élèves le trouver* » (Astolfi, 2002, p. 18). Les préoccupations de l'enseignante sont alors d'inciter les élèves à trouver la réponse « vraie et juste » selon elle. Les questions successives qu'elle pose dans une même réplique et qui sont généralement des répétitions (avec modifications) de la même question principale, le prouvent très bien (voir la case « Q successives posées par la PR dans une même réplique pour vouloir poser la même question » du **tableau. 6**). Ainsi, nous remarquons que pour la plupart des macro-épisodes concordants, l'enseignante cherche à vérifier l'acquisition des élèves de certains concepts liés à la formation des chaînes de montagnes de collision (comme la subduction, la collision, les marges passives, etc...) qu'elle considère comme des prérequis qui sont déjà construits en Première S ou dans les chapitres précédents et qui n'ont pas besoin d'être mis en question. Des extraits comme « *Normalement, vous avez déjà des connaissances un peu en géologie* » (Réplique.1), « *Vous avez vu tout ça* » (Réplique. 7), « *ça, c'est votre chapitre 1* » (Réplique. 151), ou encore « *Tout ça, c'est dans le chapitre 1* » (Réplique. 163) le prouvent.

Les échanges qui ont eu lieu tout au long des macro-épisodes concordants sont marqués par une quasi-absence d'objections formulées par les élèves, la dominance de prise de parole par l'enseignante, le type et le rythme rapide des questions posées par elle, ainsi que les réponses courtes des élèves. Ces critères nous amènent à conclure que la classe a fonctionné durant ces macro-épisodes sur le registre du cours dialogué. Ce format pédagogique, au contraire du débat scientifique, réduit les

moments de négociations et de controverses en classe qui auraient pu peut-être avoir lieu et permettre possiblement la construction d'un savoir problématisé.

Donné comme solution, le savoir présenté par l'enseignante est considéré du point de vue des élèves comme étrange et reste plus au moins non convaincant pour eux. Les questions de relance et les questions de reformulation clarification posées par les apprenants le prouvent très bien. En fait, par ces questions, les élèves essaient de lever une certaine ambiguïté et/ ou de relancer l'explication de l'enseignante. Par ces interrogations, certains lycéens tendent vers l'inscription dans une enquête et la mise en place d'une problématisation qui leur permet non seulement de « savoir que » la collision par exemple, entraîne la formation des failles inverses et des nappes de charriage mais de savoir aussi ce que signifie des termes comme « nappes de charriage » ou de « failles inverses » et savoir pourquoi ces phénomènes se forment lors de la collision (MEP2). Les questionnements des élèves représentent pour nous les moments où une ouverture vers un processus de problématisation pourrait avoir lieu.

- Il est important de mentionner dans notre conclusion que nous avons pu distinguer à partir de l'analyse des macrostructures des macro-épisodes concordants, un macro-épisode qui est différent par rapport aux autres macro-épisodes étudiés. Il s'agit du MEP9 qui traite le thème du métamorphisme des zones de subduction. Dans ce macro-épisode, même si l'enseignante a donné au début la réponse recherchée (Il s'agit de 75-R26C « C'est un métamorphisme [...] de HP-BT), elle a essayé ensuite de poser les questions ouvertes (75-Q27) et (77-Q28) pour inciter les élèves à trouver les raisons qui qualifient le métamorphisme des zones de subduction par un métamorphisme de HP-BT. Ces questions encouragent l'explicitation des possibles explicatifs. Les objections formulées dans la suite du corpus (voir les cases « O de la PR » et « O des APP » du **tableau.6**), n'ont pas entraîné la construction d'un savoir raisonné. En fait, les objections détectées tout au long de ce macro-épisode sont formulées d'une part par un élève (Mathis) et d'autre part par l'enseignante et où cette dernière essaie d'émettre ces objections pour invalider les propos de l'élève et donner la solution recherchée (Ex : O39b « *Oui mais je l'ai expliqué : La croûte va se réchauffer, mais elle se réchauffe moins vite parce qu'elle est très froide* »).
- En ce qui concerne le thème de la subduction, qui représente le thème le plus

abordé dans notre corpus (voir l'analyse thématique, chapitre 6), nous pouvons remarquer clairement que dès le MEP1 [(réplique 1) Q1, (réplique 3) R1b, (réplique 7) R1c] (voir **annexe.4**) la subduction a été donnée comme solution. Ici (et tout au long de la séquence), l'enseignante ne fonctionne pas selon une logique de problématisation. Ce choix de donner la subduction comme solution, peut être expliqué par le fait que ce concept a été étudié en première S et par suite considéré par la professeure comme un prérequis qui ne nécessite pas une construction en classe de terminale S. Néanmoins, la question de relance posée par l'élève Lucas D (56-QR5) « *La subduction, c'est quoi ?* » montre selon nous que la subduction semble rester énigmatique pour l'apprenant ce qui le pousse à poser cette question afin d'essayer de comprendre la signification du concept de la subduction. La réponse (57-R5) de l'enseignante à cette question de relance n'a pas permis d'enlever le flou chez l'élève sur ce concept. Sa question de relance (166, 170-QR10) [Voir MEP2] le montre très bien « *[...] Ce genre de faille se forme quand il y a subduction ?* ».

Nous trouvons important de préciser ici que même si la subduction a été donnée comme solution, certains élèves comme l'élève Mathis reçoivent ce concept comme tel et réussissent ensuite à l'utiliser pour essayer cette fois-ci d'expliquer les conditions de pression et de température caractéristiques du métamorphisme des zones de subduction. Nous sommes arrivés à cette conclusion en regardant l'objection (134, 136-O39a) formulée par l'élève Mathis dans le MEP9: « *Dans une zone de subduction, ça s'enfonce* » « *alors le gradient géothermique est plus chaud* ».

Suite à l'analyse des macrostructures des macro-épisodes concordants de notre corpus, nous passons maintenant à l'étude des macrostructures des macro-épisodes discordants.

Tableau. 6. Tableau récapitulatif des caractéristiques des macrostructures des six macro-épisodes concordants identifiés en classe de terminale S.

MEP Et nomination	Q de la PR	Q des APPS	RE de la PR	RE des APPS	O de la PR	O des APPS	Q de relance des APPS	Q de reformulation clarification des APPS	Q successives posées par la PR dans une même réplique pour vouloir poser la même question	Bouclage Simple de la PR	Bouclage en retour de la PR	AF de la PR
MEP1 La subduction	4	0	5	5 réponses de longueur très courte	0	0	1 (QR5)	0	(R38) : 5 questions successives (R51) : 2 questions successives	1 : Q2 est reprise en Q4.	1 bouclage en retour : Q3 qui rétroagit sur Q2	0
MEP2 La collision	3	0	9	3 réponses de longueur très courte	0	0	2 (QR9) & (QR10)	0	(R1) : 3 questions successives (R5) : 2 questions successives. (R149) : 3 questions successives.	1 : Q7 est reprise en Q8.	0	0
MEP3 La marge passive	3	0	4	2 réponses de longueur très courte	0	0	0	1 (QRC14)	(R30) : 5 questions successives.	0	1 : (Q13) qui rétroagit sur (Q11).	0
MEP9 Le métamorphisme Des zones de subduction	5	0	6	7 réponses dont la longueur varie de 2 à 6 mots	4	3	1 : (QR40)	1 : (QRC39)	0	0	2 : (Q38) qui rétroagit sur (Q27). (Q37) qui rétroagit sur (Q27) et (Q28).	0
MEP11 Les failles dans le cadre de divergence et de convergence	4	1	8	3 réponses de longueur très courte	0	1	1 : (QR10)	1 : (QRC14)	(R38) : 5 questions successives (R149) : 3 questions successives	0	1 : (Q13) qui rétroagit sur (Q11).	0
MEP15 Le moteur de la subduction	4	0	6	6 réponses de longueur très courte	1 : (O51)	0	1 : (QR55)	2 : (QRC54) et (QRC56)	(R188) : 3 questions successives.	2 : (Q50) est reprise (avec modification) en (Q51) (Q50) est reprise en (Q53)	0	2 : (AF48) et (AF49)

MEP : macro-épisode ; Q : question ; RE : réponse ; O : objection ; AF : Affirmation ; PR : la professeure ; APPS : Les apprenants ; R : réplique.

CHAPITRE VIII. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION : ANALYSE DES MACROSTRUCTURES DES MACRO-ÉPISODES DISCORDANTS

Introduction

Dans le septième chapitre, nous avons mené l'analyse des macrostructures des macro-épisodes concordants. A travers cette analyse, nous avons pu identifier une très faible proportion d'objections formulées en classe. La quasi-absence d'objections produites par les élèves nous a amenée à conclure que la classe (à travers le choix de le l'enseignante) n'a pas privilégié la mise en place d'un débat scientifique qui permet aux apprenants de s'inscrire dans la construction de savoirs problématisés grâce aux moments d'argumentation et de controverses.

Les interventions qui ont eu lieu durant ces macro-épisodes entre la professeure et les élèves montrent que les préoccupations de la professeure ne sont pas la mise en place d'un processus de problématisation. Dans la majorité de ces macro-épisodes concordants, les préoccupations de la professeure sont plutôt d'inciter les lycéens à trouver la réponse « vraie et juste » selon elle et de la valider. En effet, nous constatons que pour la plupart de ces macro-épisodes, l'enseignante cherche à vérifier l'acquisition des élèves de certains concepts liés à la formation des chaînes de montagnes de collision qu'elle considère comme des prérequis qui ont déjà été étudiés en première S ou dans les chapitres précédents et qui ne demandent pas d'être mis en question. L'analyse des macrostructures des macro-épisodes concordants nous a amenée à comprendre que la classe a fonctionné durant ces macro-épisodes sur le registre du cours dialogué. Au contraire de cours accordant de l'importance au débat scientifique, ce format pédagogique réduit les moments de controverses et de négociations en classe qui auraient pu avoir lieu et entraîner possiblement la construction d'un savoir raisonné. La détection des questions de relance et de reformulation clarification posées par les élèves dans ces macro-épisodes nous a permis de déduire que certains savoirs

solution présentés par l'enseignante sont « non convaincants » pour les lycéens. Par leurs interrogations, ils cherchent à lever une ambiguïté ou/ et relancer l'explication de l'enseignante. A travers ses questions, la classe a tendance de s'engager vers un processus de problématisation en cherchant de construire un savoir raisonné.

Suite à l'analyse des macrostructures des macro-épisodes concordants, nous trouvons important de consacrer maintenant ce huitième chapitre à l'analyse des macrostructures des macro-épisodes discordants. L'objectif principal de cette analyse est de mieux comprendre le fonctionnement de la classe durant ces macro-épisodes et d'identifier la présence ou non de moments d'argumentation qui sont propices à la construction d'un savoir problématisé. Dans ce cadre, nous rappelons que ces macro-épisodes discordants signalent un désaccord thématique entre enseignante et élèves qui a eu lieu plusieurs fois durant le dialogue mené en classe. En fait, tout au long de la séquence étudiée, nous avons pu remarquer à plusieurs reprises que lorsque l'enseignante ouvre un dialogue sur un thème donné, les élèves ne s'engagent pas automatiquement dans ce dernier. Ils proposent en contrepartie d'entrer dans un dialogue fondé sur d'autres thèmes (voir l'analyse thématique menée dans **le chapitre. 6**).

1 Les macrostructures des macro-épisodes discordants : construction et analyse

Comme nous l'avons déjà évoqué avant, cette partie sera consacrée à la présentation et l'analyse des macrostructures des macro-épisodes discordants que nous avons pu identifier dans l'analyse thématique. Nous allons représenter dans cette partie les macrostructures de deux macro-épisodes discordants MEP4 et MEP8. Ces deux macro-épisodes présentent une organisation différente. En effet, MEP4 représente selon nous le prototype des macro-épisodes discordants. Il comporte une affirmation émise par l'enseignante, toutes les questions sont posées par les élèves et les réponses sont données par la professeure (voir **figure.25**). Nous précisons ici que ces questions émises par les lycéens orientent vers un thème différent de celui de l'enseignante. En ce qui concerne le MEP8, il est marqué par la présence d'objection que nous n'observons pas dans MEP4 (voir **figure.26**). Pour les sept autres macro-épisodes discordants, puisqu'ils présentent une organisation semblable à celle du MEP4, nous avons choisi de mettre leurs macrostructures correspondantes dans l'annexe 4.

- La macrostructure du MEP4 qui met en exergue le problème de l'orogénèse actuelle

Nous présentons dans le tableau ci-dessous (**Tableau.7**) l'extrait du corpus qui correspond au MEP4.

Nous précisons ici que les interventions du MEP4 ont eu lieu durant la deuxième séance de la séquence lorsque l'enseignante a utilisé le document de la **Fig.14 (chapitre 5)** « Fiche de travail sur l'histoire des Alpes (avec l'épisode de subduction) » afin de représenter aux élèves le scénario de la formation de chaînes de montagnes de collision.

Tableau. 7.Le macro-épisode
MEP4.

57	P : Je vous ai [...] reconstitué l'histoire des Alpes [...] Vous avez d'abord l'ouverture de l'océan avec les failles normales et les marges passives. Cet océan qui s'ouvre et s'agrandit, ensuite, vous avez la deuxième image avec la subduction et puis à la fin, on a la collision, due à une compression où vous allez avoir rencontre des deux masses océaniques et puis des nappes avec des complexes ophiolitiques que vous allez les trouver en surface. Alors, Mathis, vous avez une question.
58	Mathis : Dans les océans actuels [...] Est-ce qu'il y a des montagnes qui se forment à ce moment ?
59	P : Dans les océans actuels, au niveau des dorsales, dans les dorsales sous-marines, fin, les reliefs sous-marins, et à ce niveau-là, elle peut être à l'échelle de quelques centimètres par an.
60	Mathis : Mais dans ce cas au niveau continental je parle, il y a une montagne qui se forme à ce moment-là ?
61	P : Oui, c'est possible. Vous pouvez avoir effectivement la fermeture des océans une fois que la croûte soit très vieille, elle subduit et vous pouvez avoir une collision et formation d'une chaîne de montagne à ce moment-là.

En se basant sur les répliques du **tableau.7**, nous avons réussi à construire la macrostructure du MEP4. Elle est représentée par la **figure.25 (p. 166)**.

Cette macrostructure est marquée par :

La formulation par l'enseignante de l'affirmation (57-A15) « *Je vous ai reconstitué l'histoire des Alpes. Vous avez d'abord l'ouverture de l'océan [...] Ensuite, vous avez la subduction et puis [...], on a la collision* ». Cette affirmation est émise par la professeure pour décrire l'enchaînement d'épisodes successifs entraînant la formation des chaînes de montagnes de collision.

Toutes les questions posées dans ce macro-épisode, sont des questions

proposées par l'élève Mathis. Elles correspondent à la question (58-Q16) « *Dans les océans actuels, est ce qu'il y a des montagnes qui se forment à ce moment ?* » et (60-Q17) « *Dans ce cas au niveau continental je parle, il y a une montagne qui se forme à ce moment-là ?* ». Ce macro-épisode est marqué aussi par la présence d'un bouclage simple où la question est répétée (avec modification) dans un autre tour de parole. Nous parlons ici de la question (58-Q16) qui a été reprise avec modification par l'élève Mathis en (60-Q17).

Toutes les réponses à ces questions d'un élève viennent de l'enseignante. Elles correspondent à la réponse (59-R16) « *Dans les océans actuels, au niveau des dorsales, dans les dorsales sous-marines, fin, les reliefs sous-marins, et à ce niveau-là, elle peut être à l'échelle de quelques centimètres par an* » et (61-R17) « *Oui, c'est possible. Vous pouvez avoir effectivement la fermeture des océans une fois que la croûte soit très vieille, elle subduit et vous pouvez avoir une collision et formation d'une chaîne de montagne à ce moment-là* ».

Nous pouvons dire à ce niveau d'analyse que l'enseignante propose l'ensemble d'assertions formulées en (57-A15) dont l'objectif principal est de présenter aux apprenants la succession d'étapes entraînant la formation des chaînes de montagnes de collision. Face à cette affirmation (57-A15), nous pouvons remarquer d'après notre macrostructure que l'élève Mathis réagit en posant en contrepartie la question (58-Q16) « *Dans les océans actuels, est ce qu'il y a des montagnes qui se forment à ce moment ?* » pour s'interroger sur la formation de relief dans l'époque actuelle. L'élève ne cherche pas ici de savoir qu'il y a « tout d'abord » une ouverture d'un océan, « puis » fermeture de cet océan par subduction suivie par une collision. Ce qui intrigue l'apprenant ici c'est de savoir s'il y a une formation orogénique qui peut être observée actuellement. La réponse de l'enseignante à cette question ne satisfait pas les attentes de l'élève. Ceci pousse ce dernier à répéter sa question avec modification en (60-Q17) « *Dans ce cas au niveau continental je parle, il y a une montagne qui se forme à ce moment-là ?* », tout en insistant cette fois-ci de savoir s'il y a une remontée orogénique qui peut s'observer au niveau continental actuellement. La réponse (61-R17) de l'enseignante est marquée par la validation de la possibilité de la présence d'un relief qui se forme à l'état actuel « oui c'est possible » (Réplique 61). Elle est accompagnée directement par un retour à la présentation de la succession

d'épisodes qui peuvent aboutir à la formation des chaînes de montagnes de collision. Elle se centre plus précisément sur la fermeture océanique suivie par les épisodes de subduction et de collision : « *Vous pouvez avoir effectivement la fermeture des océans une fois que la croûte soit très vieille, elle subduit et vous pouvez avoir une collision et formation d'une chaîne de montagne à ce moment-là* » (Réplique 61).

Nous pouvons ainsi conclure et dire que pour ce macro-épisode discordant, la préoccupation primordiale de l'enseignante était de présenter la succession d'étapes entraînant la formation d'une chaîne de montagne de collision. Nous remarquons cela par l'affirmation qu'elle a formulée au début de ce macro-épisode, mais aussi par la réponse (61-R17) qu'elle a produit. Au cours de cette réponse, la professeure a réagi rapidement et succinctement à la question de l'élève Mathis sur l'orogénèse actuelle, tout en insistant dans sa réplique à reprendre le contenu déjà évoqué par elle-même dans (57-A15) sur le scénario de la formation d'une chaîne de montagne de collision. Nous pensons ici que l'enseignante essaye de fermer rapidement le dialogue avec l'élève sur l'orogénèse actuelle (c'est ce qui pose problème à l'apprenant). Elle se focalise sur l'étude du scénario de la formation d'une chaîne de montagne de collision qu'elle considère comme fondamentale puisqu'elle fait partie des connaissances visées dans le programme officiel de Terminale S.

A 15: Je vous ai reconstitué l'histoire des Alpes. Vous avez d'abord l'ouverture de l'océan. Ensuite, vous avez la subduction et puis, on a la collision (57)

Q16 : Dans les océans actuels, est ce qu'il y a des montagnes qui se forment à ce moment?
Mathis (58)

R 16 : Dans les océans actuels, au niveau des dorsales, [...] (la formation) les reliefs sous-marins [...] peut être à l'échelle de quelques cm/an (59)

Q17: Dans ce cas au niveau continental je parle, il y a une montagne qui se forme à ce moment là ? Mathis (60)

R 17: Oui c'est possible. Vous pouvez avoir [...] la fermeture des océans une fois que la CO soit [...] vieille, elle subduit et vous pouvez avoir collision et formation d'une chaîne de montagne à ce moment-là (61)

MEP4

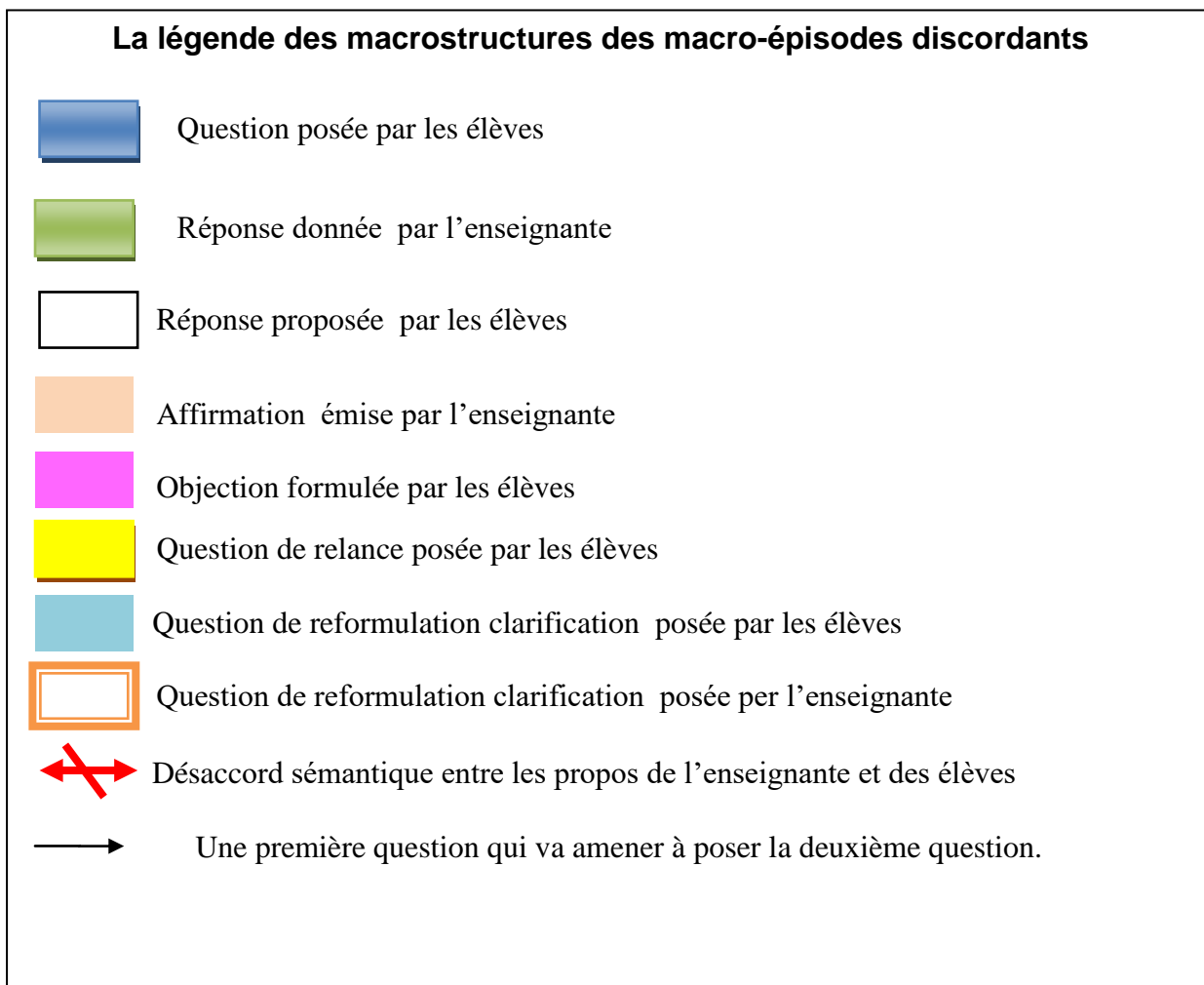


Fig.25. Macrostructure du MEP4 qui met en exergue le problème de l'orogénèse actuelle.

- **La macrostructure MEP8 qui met en exergue le problème de la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique**

Suite à l'analyse de la macrostructure du MEP4, nous passons maintenant à l'étude de la macrostructure du MEP8.

Nous représentons, dans **le tableau.8**, l'extrait du corpus correspondant au MEP8.

Les interventions du MEP8 ont eu lieu durant la deuxième séance de la séquence, lorsque l'enseignante présentait les documents « Le domaine de stabilité de quelques minéraux » et « l'isotherme de température dans une zone de subduction » de la **Fig.15 (chapitre 5)** dont l'objectif est de guider les élèves à identifier le métamorphisme de HP-BT caractéristique des zones de subduction.

Tableau. 8. Le macro-épisode MEP8.

91	P : [...] Quand que vous avez une subduction, vous allez avoir une roche de la croûte océanique, c'est quoi déjà, ces roches de la croûte océanique ?
92	Mathis : Basalte.
93	P : [...] En gros, vous avez votre basalte, votre gabbro, il va plonger, je vous ai dit les conditions : C'est la haute pression, basse température, et du coup, ces gabbros et ces basaltes ils subissent un métamorphisme : Les roches, elles vont se modifier quelque peu, et quand un gabbro est métamorphisé, j'appelle ça métagabbro et vous allez avoir des transformations minéralogiques. Oui ? [...]
94	Salma : Est-ce que on ne les trouve pas dans les chaînes ? ici ?
95	P : Alors, à la toute fin, à la toute fin, quand je continue entre mes deux chaînes, entre mes deux massifs continentaux, je vais retrouver ce métagabbro parfois en surface.
96	Salma : Mais ça se descend ?
97	P : [...] Il y a un mécanisme, on va alors parler rapidement parce que c'est pas trop programme. Il s'appelle l'obduction et vous allez avoir des petites écailles, des petits morceaux qui vont, si tu peux, se retrouver en surface, mais l'essentiel, l'essentiel de métagabbro, effectivement il va se plonger [...] Ben, par exemple, on voit le complexe ophiolitique, ça correspond à la croûte océanique qui se retrouve en surface, c'est parce que vous avez des petits bouts qui sont décollés. Simplement, lorsque je déprime il ya des petites écailles qui se trouvent en surface [...]
98	Lucas D : Et du coup, vous allez trouver ce métagabbro au niveau des Alpes ?
99	P : Ben, oui [...]

Nous rappelons ici que ce macro-épisode est considéré dans l'analyse thématique comme un macro-épisode discordant : En fait, nous pouvons voir que lorsque la professeure essaye dans les répliques 91 et 93 de présenter le thème du métamorphisme des zones de subduction, l'élève Salma n'interagit pas avec l'enseignante sur ce thème. Elle essaye par contre, à travers les questions émises dans les répliques 94 et 96 d'ouvrir un dialogue sur la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique.

Les répliques du tableau. 8 nous ont permis de construire la macrostructure du MEP8 (**Figure.26**).

D'après cette macrostructure, on peut identifier la présence de deux questions : l'une est posée par l'enseignante (91-Q34) «*C'est quoi [...] ces roches de la croûte océanique (qui s'enfouit quand il y a subduction ?)*²⁴ » et l'autre est proposée par

²⁴ : La partie mise entre deux parenthèses dans les tours de parole, est ajoutée par nous chercheure pour expliciter les répliques formulées par les interlocuteurs en classe.

l'élève Salma en (94-Q35) « *Est- ce qu'on ne les trouve pas (les roches métamorphiques) dans les chaînes ?* ».

Ce macro-épisode est marqué aussi par la formulation de la question de reformulation clarification (98-QRC36) par l'élève Lucas. D « *Et du coup, vous allez trouver ce métagabbro au niveau des Alpes ?* ».

En ce qui concerne les réponses proposées dans ce macro-épisode, elles sont de l'ordre de cinq : Quatre de ces cinq réponses sont émises par l'enseignante. Elles sont successivement (93-R34b) « *Ces gabbros et ces basaltes ils subissent un métamorphisme [...] Quand un gabbro est métamorphisé, j'appelle ça métagabbro* », (95-R35a) « *A la toute fin, quand je continue entre mes deux massifs continentaux, je vais retrouver ce métagabbro parfois en surface* », (97-R35b) « *Il y a un mécanisme [...] c'est pas trop programme. Il s'appelle l'obduction* », et (99-R36) « *Ben oui* ». La seule réponse proposée par les élèves est (92-R34a) « *Basalte* ».

Nous pouvons de même distinguer dans ce macro-épisode et contrairement au macro-épisode précédent, la formulation de l'objection (96-O35) par l'élève Salma « *Mais ça se descend ?* ». Cette question est considérée dans la macrostructure comme une objection parce qu'elle montre selon nous que l'élève est en train de "contester" la présence des roches métamorphiques d'origine océanique (qui se forment en "profondeur" lors de l'enfouissement de la lithosphère océanique par subduction) dans les chaînes de montagnes (autrement dit, dans une position plus élevée), qui a été déjà confirmée par l'enseignante.

Nous pouvons interpréter à ce niveau d'analyse, que par la question (91-Q34) émise par l'enseignante, cette dernière demande aux élèves d'identifier les roches qui construisent la « croute océanique » dont l'objectif principal est d'explicitier en (93-R34b) les transformations que subissent ces roches lors de la subduction (le métamorphisme). Donc, nous pouvons dire ici que la préoccupation principale de la professeure est d'étudier le métamorphisme de la lithosphère océanique subduite.

En revanche, par les questions (94-Q35) de l'élève Salma « *Est- ce qu'on ne les trouve pas (les roches métamorphiques) dans les chaînes ?* » et l'objection formulée en (96-O35) « *Mais ça se descend ?* », l'apprenante a réussi à détecter et formuler ce qui pose problème chez elle : il s'agit de la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique. En effet, l'élève questionne ici la position des

roches métamorphiques d'origine océanique qui se forment lors de l'enfouissement de la lithosphère océanique par subduction, et qui doivent par suite se retrouver en profondeur et non pas dans les sommets des chaînes de montagnes (d'où cette qualification de « position anormale »).

La réponse de l'enseignante à l'objection (96-O35) de l'élève Salma en (97-R35b) «*Il y a un mécanisme [...] c'est pas trop programme. Il s'appelle l'obduction* » peut-être interprétée ici par le fait que la professeure veut fermer rapidement le dialogue mené en classe sur la position perchée des roches métamorphiques d'origine océanique, vu qu'elle considère ce problème comme hors programme.

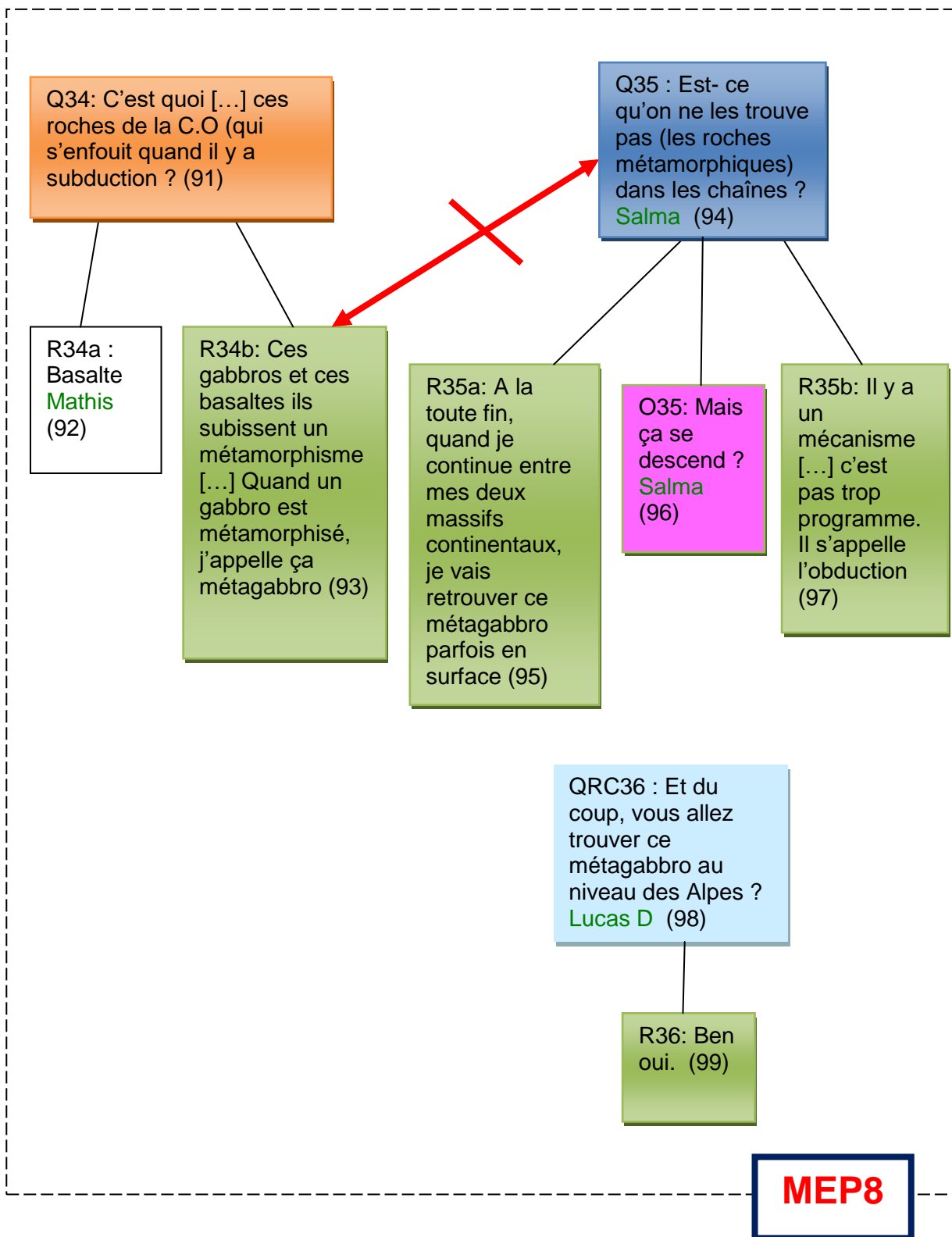


Fig.26. Macrostructure du MEP8 qui met en exergue le problème de la position anormale de roches métamorphiques d'origine océanique.

Conclusion de l'analyse des macrostructures des macro-épisodes discordants

D'après l'analyse des macrostructures des macro-épisodes discordants, nous remarquons que ces derniers, contrairement aux macro-épisodes concordants, sont marqués essentiellement par l'abondance des affirmations formulées par l'enseignante et des questions posées par les élèves (voir les cases « AF de PR » et « Q des APP » du **tableau. 9** qui récapitule les caractéristiques des macrostructures des dix macro-épisodes discordants identifiés dans notre étude). Pour les réponses présentées dans ces macro-épisodes, elles sont globalement proposées par la professeure (voir le **tableau. 9**).

Face aux affirmations de l'enseignante, qui ont été présentées en classe comme une succession d'assertions ayant un caractère « vrai », les apprenants posent en contrepartie des questions qui n'ont pas intégralement un lien direct avec ce que l'enseignante cherche à expliquer. Par ces questions, les apprenants réussissent à formuler pour la plupart des cas ce qui pose problème chez eux.

Nous pouvons remarquer de même que la plupart des macro-épisodes discordants sont de longueur très courte par rapport à celle des macro-épisodes concordants. En fait, ils sont généralement formés par une à deux affirmations avec deux questions et possiblement une objection et deux à trois réponses seulement. Nous interprétons cela par le fait que les problèmes posés par les élèves durant ces macro-épisodes, ne sont pas considérés par l'enseignante comme des objectifs prioritaires de la séance étudiée. Pour cela, la professeure essaye de fermer rapidement le dialogue avec les élèves sur les problèmes qu'ils ont posés parce qu'elle les considère comme hors programme ou qui vont être étudiés dans les chapitres suivants. Les répliques de la professeure « On va parler rapidement parce que c'est pas trop programme » [Réplique.97 (R35b)] ou « On verra le magmatisme des zones de subduction dans le chapitre 3 » [Réplique163 (R41)] le montrent très bien.

En étudiant les différentes questions posées par les élèves au cours de ces macro-épisodes, nous avons ainsi pu identifier plusieurs problèmes qui ont été mis en exergue par ceux-ci et qui sont géologiquement intéressants : En effet, les questions formulées par les lycéens ont permis à ces derniers de s'ouvrir vers des préoccupations géologiques fortes. Nous donnons ici à titre d'exemple le MEP4, où

les élèves ont essayé de faire le lien entre le passé et le présent pour comprendre la formation des chaînes de montagnes de collision. Les questions émises par les élèves dans ce macro-épisode dont des questions que ce sont posés les chercheurs et qui les ont conduits à mettre en jeu le principe méthodologique de l'actualisme. Ce principe représente un constituant crucial du registre explicatif qui est mobilisé dans les problèmes des sciences de la Terre. De cette façon, nous pouvons dire que les questions posées par les apprenants dans MEP4 représentent une porte d'entrée favorable pour la mise en place d'un processus de problématisation. De la même façon, à travers les questions posées en MEP8 l'élève Salma a réussi de questionner la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique. Ce sont des questions que se sont posés les chercheurs et les ont amenés à imaginer le phénomène de l'exhumation qui peut être défini comme étant la remontée des roches qui étaient initialement en profondeur vers la surface (des approfondissements seront faits dans le chapitre suivant au travers d'analyses épistémologico-langagières).

Tableau. 9. Tableau récapitulatif des caractéristiques des macrostructures des dix macro-épisodes discordants identifiés en classe de terminale S.

MEP et Nomination ²⁵	AF de la PR	Q de la PR	Q des APPS	RE de la PR	RE des APPS	O de la PR	O des APPS	Q de relance des APPS	Q de reformulation clarification des APPS	Q de reformulation clarification de la PR	Bouclage Simple de la PR
MEP4 L'orogénèse actuelle	1	0	2	2	0	0	0	0	0	0	1 bouclage simple : (Q16) est reprise en (Q17)
MEP5 Le devenir de l'eau	2	0	2	4	0	0	0	0	1	0	1 bouclage simple : (Q19) est reprise en (Q22)
MEP6 La formation de reliefs	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0
MEP7 La formation du vide	0	1	3	5	1	0	0	1	0	0	0
MEP8 La position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique	0	1	1	4	1	0	1	0	1	0	0
MEP10 Le devenir de la lithosphère océanique enfouie	0	1	1	4	2	0	0	0	0	0	0
MEP12 L'origine de l'eau océanique	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
MEP13 Les plaques tectoniques	1	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0
MEP14 Les failles dans le contexte de divergence et convergence	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0

MEP : macro-épisode ; PR : La professeure ; APPS : Les apprenants ; O : objection ; RE : Une réponse ; Q : Une question

²⁵ La nomination des macro-épisodes discordants se fait en fonction des problèmes posés par les élèves.

L'analyse macroscopique menée dans ces trois derniers chapitres nous a permis de détecter au sein des macro-épisodes concordants, la présence des questions de relance et des questions de reformulation clarification. Ces questions sont posées par les apprenants dont l'objectif principal est d'ouvrir « une enquête » en cherchant de relancer une explication déjà donnée auparavant par l'enseignante.

De même, les différentes questions posées par les élèves au cours des macro-épisodes discordants, nous ont aidée à identifier plusieurs problèmes qui ont été posés par eux-mêmes et qui sont géologiquement intéressants. Ces questions ont permis aux lycéens de s'ouvrir vers des préoccupations géologiques fortes : En effet, elles ont été déjà posées par les chercheurs et les ont conduits à découvrir des phénomènes géologiques importants (comme l'exhumation) et à mobiliser certains principes qui sont fondamentaux dans la construction des problèmes géologiques (c'est le cas du principe méthodologique de l'actualisme).

Ainsi, nous trouvons important de porter notre attention dans les deux chapitres suivants sur les interactions langagières des élèves et de l'enseignante afin de mener une analyse épistémologico-langagière qui va nous permettre de mieux identifier les problèmes pris en charge en classe : qu'est ce qui a aidé les élèves à détecter ces problèmes, ainsi que l'échelle d'étude où ils se situent et les difficultés qu'ils rencontrent.

CHAPITRE IX. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION: ANALYSE EPISTEMOLOGICO- LANGAGIERE DES MACRO-ÉPISODES CONCORDANTS

Introduction

Après l'analyse macroscopique que nous avons menée dans les chapitres précédents, nous cherchons dans ce chapitre et dans le chapitre suivant à faire une analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes concordants et discordants déjà présentés. Cette étude va nous permettre de comprendre davantage la séquence étudiée en identifiant les problèmes posés par les élèves, les registres explicatifs qu'ils mobilisent et les difficultés qu'ils expriment. Nous rappelons que nous avons choisi de mener cette analyse en nous référant aux travaux basés sur l'approche historico-culturelle de Vygotski (voir le chapitre 2 pour plus de détails) et qui par suite donnent une grande importance aux interactions sociales dans l'apprentissage. Parmi ces travaux, nous citons à titre d'exemple Schneeberger qui précise que « *considérant que l'activité langagière des élèves renseigne sur leur activité cognitive, nous étudions le contenu des échanges langagiers dans le but de repérer les processus en jeu dans l'élaboration du savoir* » (Schneeberger, 2008, p. 91) ou encore Lhoste qui indique que le langage est « *constitutif et participe pleinement à l'activité dont il est agent* » (Lhoste, 2017, p. 110).

Dans cette analyse épistémologico-langagière, nous essayerons tout d'abord de nous concentrer sur la manière dont les chercheurs construisent les problèmes scientifiques dont il est question dans chaque macro-épisode. Avec ces normes épistémologiques, nous allons nous focaliser ensuite sur les opérations logico-discursives et les indicateurs langagiers présents dans le discours en classe.

Pour mener cette analyse, nous ferons appel alors aux repères épistémologiques mis en valeur dans les chapitres 3 et 4 (relatifs aux savoirs scientifiques en jeu, à leur origine et à leur construction) et nous allons utiliser différents outils qui ont été précisés dans le chapitre 2. Nous tentons ainsi d'analyser la prise en charge énonciative en visant à identifier la présence ou non de différentes voix présentes

dans les productions langagières en classe et de comprendre si ces moments d'hétéroglossie (Bakhtine, 1978) sont orchestrés ou non. L'identification de différentes voix en classe nous donne des informations sur la construction des solutions possibles. Et leur orchestration ou non, peut nous informer sur les nécessités qui sont ou non construites. Nous ferons appel aussi aux différentes opérations logico-discursives proposées par Grize (1996) en nous focalisant surtout sur les reformulations qui peuvent être produites durant la séquence étudiée. Cela va nous permettre d'avoir des informations sur la dynamique cognitive en situation de classe. Les reformulations et les reprises-modifications détectées dans le discours marqueront les déplacements discursifs opérés par les locuteurs, et qui font sens en disant quelque chose de la construction cognitive des sujets à travers les repositionnements énonciatifs (François, 1993) : « *Les reformulations sont [...] le lieu de déplacement de la position du sujet, de l'élaboration de nouveaux points de vue qui intègrent des contraintes nouvelles, de l'enrichissement et de la modification des savoirs en jeu* » (Jaubert & Rebière, 2001, p. 108).

Parmi les opérations logico-discursives qui seront mises en évidence, nous citons :

-L'opération d'actualisation : L'actualisation peut être définie comme une série d'opérations que Guillaume la présente par ces termes : « *Pour étudier la langue dans des conditions qui se rapprocheraient le plus possible des conditions réelles de son emploi, il faudrait partir, comme le sujet parlant, de la langue à l'état virtuel et accomplir avec lui l'actualisation (la réalisation) du virtuel dont elle se compose* » (Guillaume 1929, p. 121).

-L'opération de référenciation : Nonnon pense qu'à travers l'activité de référenciation « *la parole s'articule à ce qui n'est pas elle, à l'extralinguistique, en construisant à travers un mode de présentation linguistique un "monde d'objets qui n'ont dans le langage que la propriété d'être mis en parole"* » (Nonnon, 2001-2002, p. 28).

Commençons tout d'abord par conduire l'analyse des macro-épisodes concordants (l'analyse des macro-épisodes discordants sera traitée dans le chapitre suivant).

1 Analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes concordants

Dans cette partie, nous allons mener une analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes concordants MEP15 et MEP9 (voir chapitre.7). Ces macro-épisodes

s'intéressent respectivement à l'étude du problème de moteur de la subduction et du problème de métamorphisme des zones de subduction. Nous avons choisi de nous limiter à l'analyse de ces deux macro-épisodes concordants marqués par une organisation différente : MEP9 est différent de MEP15 puisqu'il comporte un nombre important d'objections qui sont quasi absents en MEP15, voir l'analyse des macrostructures du **chapitre 7**).

Pour le reste des macro-épisodes concordants²⁶, ils ne vont pas être traités dans notre étude puisqu'ils ont la même structure que celle du MEP15.

- **L'analyse du MEP15 qui aborde le problème du moteur de la subduction**

De point de vue épistémologique, le macro-épisode MEP15 pose le problème du moteur de la subduction. Selon les chercheurs, l'isotherme 1300°C joue un rôle primordial dans l'explication de ce mécanisme. En effet, comme nous l'avons précisé dans le chapitre 3, cette isotherme est une « *limite thermique de part et d'autre de laquelle les péridotites changent de comportement, et non d'un changement de nature des roches* » (Jolivet, 2011, p. 24-25). Elle marque la limite entre le manteau lithosphérique formé par de la péridotite rigide avec le manteau asthénosphérique formé par de la péridotite ductile. Ainsi, « *sous l'axe de la dorsale, l'asthénosphère chaude qui atteint des températures voisines de 1300°C (ici le manteau partiellement fondu) est directement au contact de la croûte* » (Jolivet, 1997, p. 47).

En s'éloignant de la dorsale, l'isotherme 1300°C « *s'enfonce au sein du manteau, et donc la lithosphère s'épaissit au dépend de l'asthénosphère. Cet épaississement et la contraction thermique des matériaux de la lithosphère alourdissent celle-ci* » (ibid) la rendant plus dense et provoquant sa subduction

Suite à ces repères épistémologiques, nous entamons maintenant l'analyse épistémologico-langagière du MEP15, tout en essayant de nous focaliser sur les indicateurs langagiers et les différentes opérations logico-discursives présents dans ce macro-épisode et qui nous ont permis (avec les précisions épistémologiques présentées ci-dessus) d'identifier le problème du moteur de la subduction.

L'analyse du MEP15 est présentée dans **le tableau 10**: ce tableau montre d'un côté

²⁶ : Les macro-épisodes concordants qui ont une structure identique à celle du MEP15 ont un point commun : ils sont marqués par la présence d'une question de relance ou\ et de reformulation clarification émises par les élèves. Par ces questions, ces derniers cherchent à ouvrir une enquête sur un concept déjà expliqué avant par la professeure.

les interventions de l'enseignante et des élèves qui ont eu lieu durant ce macro-épisode, et il indique d'un autre côté les opérations logico-discursives mises en évidence et les indicateurs langagiers identifiés. Nous précisons ici que nous allons nous focaliser dans cette analyse (et dans l'analyse épistémologico-langagière de l'ensemble des macro-épisodes concordants et discordants) sur les indicateurs langagiers qui vont nous aider à avoir accès :

- Au processus de l'hétéroglossie (Est-ce qu'il y a différentes voix qui émergent dans le discours) et à l'orchestration ou non de cette hétéroglossie.
- A la manière dans laquelle les élèves (avec l'enseignante) ont pu ou non s'engager dans la construction d'un savoir raisonné (Est-ce qu'il y a des argumentations qui ont été formulées dans le discours et est-ce qu'elles sont ensuite débattues ou pas). Dans ce cadre, les reprises-modifications vont nous aider à étudier le positionnement énonciatif opéré par les élèves et l'enseignante et de son évolution tout au long du macro-épisode. C'est crucial pour comprendre les savoirs qui ont été construits ou non en classe : « *La construction des savoirs s'accompagne d'un ajustement progressif du positionnement énonciatif des élèves, positionnement révélateur d'un travail d'appropriation des pratiques (y compris langagières) de la communauté scientifique scolaire* » (Jaubert & Rebière, 2001, p. 104).

Tableau. 10. L'analyse du macro-épisode MEP15

	Interventions	Les opérations mises en évidence et les indicateurs langagiers
188-P	[...] <u>comme</u> la limite lithosphère-asthénosphère est une limite thermique [...] la baisse de température de la lithosphère là, <u>lorsqu'on</u> s'éloigne de la dorsale. [...] entraîne une augmentation de l'épaisseur du manteau lithosphérique. Alors, la croûte océanique est d'épaisseur constante [...] Je vais avoir au bilan lithosphère plus (+) partie supérieure du manteau supérieur. Tu vas avoir une épaisseur qui est plus épaisse [...] Et qu'est ce qui se passe s'il y a un matériel moins dense qui se retrouve au-dessus d'un matériel plus dense. Votre matériel qui	-Changement de l'objet de discours « <i>on s'éloigne de la dorsale</i> » par explication → « <i>une augmentation de l'épaisseur</i> » qui devient l'objet de discours. -Extension de l'objet de discours « <i>une augmentation de l'épaisseur</i> » par actualisation → « un matériel moins dense qui se retrouve au-dessus d'un matériel plus dense ». Les indicateurs langagiers : -« <i>comme</i> » : conjonction qui exprime la cause. L'enseignante

	est dessus il <u>va</u> , il <u>va</u> quoi faire ?	cherche ici à montrer la raison pour laquelle il y a augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale. -« lorsque » : conjonction qui marque la concomitance entre deux faits qui sont « <i>on s'éloigne de l'axe de la dorsale</i> » et « <i>une augmentation de l'épaisseur du manteau lithosphérique</i> ». « <i>il va , il va</i> » marque une finalité.
189-Lucie	Bouger	
190-P	Il va ?	
191-Lucas D	Se déplacer.	
192-P	Alors, il peut se déplacer. [...] Si vous mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire quoi ?	Reprise-modification de « <i>qu'est ce qui se passe s'il y a un matériel moins dense qui se retrouve au-dessus d'un matériel plus dense</i> » (R188) par actualisation → « <i>Si vous mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire quoi ?</i> » (R192).
193-Plusieurs élèves	Couler.	
194-P	Ils <u>ne vont pas</u> , hein, couler. <u>S'ils</u> sont <u>moins denses</u> , ils flottent. [...] <u>Si</u> j'ai une <u>lithosphère plus dense</u> que l'asthénosphère [...] Je vais avoir un enfoncement [...]	-« ne...pas » marque la négation. L'enseignante rejette ici la proposition des élèves en (R193). -« Si...Si » : conjonctions qui indiquent la condition : soit la densité de la lithosphère océanique est inférieure à celle de l'asthénosphère, soit elle est supérieure à celle de l'asthénosphère. La professeure donne ici la réponse à sa question initiale en (R188) et qui a été reposée avec modification en (R192).

[194-200] : Calcul de la densité de la lithosphère océanique au point 1 (près de l'axe de la dorsale)

200-P	<p>[...] si je calcule la densité [...] <u>près de l'axe de la dorsale</u>. Vous avez 3,06. Je vais comparer cette densité moyenne de la lithosphère à la densité connue de l'asthénosphère [...] c'est 3,25. Autrement dit, j'ai une valeur qui est <u>inférieure</u> à 3,25, à la densité qui est <u>en dessous</u> [...] Donc, à cet endroit-là au point numéro 1, votre lithosphère est ce qu'elle a tendance à flotter ou à s'enfoncer dans l'asthénosphère ?</p>	<p>Reprise-modification par actualisation de la question de l'enseignante en (R188) « <i>qu'est ce qui se passe s'il y a un matériel moins dense qui se retrouve au-dessus d'un matériel plus dense</i> » et (R192) « <i>Si vous mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire quoi ?</i> » par actualisation → « <i>au point numéro 1, votre lithosphère est -ce qu'elle a tendance à flotter ou à s'enfoncer dans l'asthénosphère ?</i> » (R200).</p> <p>Les indicateurs langagiers :</p> <p>-« <i>Près</i> » : préposition qui indique le peu de distance d'un lieu. -« <i>inférieure</i> » : adjectif qui marque un statut moins élevé. -« <i>Au-dessous</i> » : adverbe qui marque la position.</p> <p>Par ces marqueurs langagiers, l'enseignante demande aux élèves de préciser si près de l'axe de la dorsale (où la densité de la lithosphère océanique est inférieure de celle de l'asthénosphère) la lithosphère océanique a tendance à flotter ou à s'enfoncer.</p>
201-Lucas D	Flotter	Reprise de « flotter » (R200) → « Flotter » (R201)
202-P	Elle a tendance à flotter [...]	
203-Lucas D	<p><u>Est-ce que ça veut dire du coup</u>, au point 3, c'est <u>supérieur</u> de l'asthénosphère. Ce qui crée la solution. C'est ce qu'on cherche ?</p>	<p>Reprise-modification par actualisation « j'ai une lithosphère plus dense que l'asthénosphère [...] Je vais avoir un enfoncement » (R 194) → « au point 3, c'est supérieur de l'asthénosphère. Ce qui crée la solution » (R203).</p> <p>Les indicateurs langagiers :</p> <p>-« <i>Est ce que</i> » : formule interrogative qui s'emploie en tête de la phrase lorsque la question</p>

		<p>appelle à une réponse par oui ou non.</p> <ul style="list-style-type: none"> - « <i>du coup</i> » : marque la conséquence. -« au point » marque la position précise. -« supérieur » adjectif qui marque un statut plus élevé. . <p>Par ces termes, l'élève cherche à valider ce qu'il a compris du propos de l'enseignante en (R194).</p>
204-P	<p><i>Oui</i> .C'est ça. En fait, <i>si</i> vous avez au point 3 une densité moyenne qui est <i>supérieure</i> à 3,25. Ça veut dire que <i> votre lithosphère avec votre manteau lithosphérique + la croûte</i> ont tendance à s'enfoncer [...] C'est le moteur de la subduction[...]</p>	<p>Reprise-modification de « votre lithosphère »(R200) par ajout → « votre lithosphère avec votre manteau lithosphérique + la croûte ».</p> <p>Les indicateurs langagiers :</p> <ul style="list-style-type: none"> -« oui » : adverbe qui marque la confirmation par l'enseignante du propos de l'apprenant en (R203). -« si » : conjonction qui indique la condition (il s'agit ici de la densité de la lithosphère océanique qui est supérieure de celle de l'asthénosphère).

[204-206] : calcul de la densité de la lithosphère océanique au point 3 (loin de l'axe de la dorsale)

206-P	<p>j'obtiens une valeur autour de 3,26 [...] Cette densité moyenne si elle est 3,26, elle est [...] supérieure à la densité de l'asthénosphère, Alors ?.</p>	<p>Reprise-modification de « <i>une densité moyenne qui est supérieure[...] votre lithosphère avec votre manteau lithosphérique + la croûte ont tendance à s'enfoncer</i> » (R204) par actualisation → « <i>Cette densité moyenne [...] est supérieure à la densité de l'asthénosphère</i> »</p>
207-Lucas	<p>Elle s'enfonce.</p>	
208-P	<p>Et <i>du coup</i>, elle s'enfonce. [...] C'est le moteur de la subduction.[...] <i>il faut</i> que votre densité moyenne (de la lithosphère océanique), elle soit plus grande (que celle de l'asthénosphère) et ça s'explique <i>par le fait</i> que la température est plus froide quand je</p>	<p>-Reprise-modification de « <i>la baisse de température de la lithosphère [...] lorsqu'on s'éloigne de la dorsale. [...] entraine une augmentation de l'épaisseur du manteau lithosphérique</i> » (R188) par</p>

	<p>suis à distance de l'axe de la dorsale. Et du coup, la limite entre lithosphère-asthénosphère, <u>forcement</u>, elle va être plus profonde [...]</p>	<p>actualisation → « <i>la température est plus froide quand je suis à distance de l'axe de la dorsale. Et du coup, la limite entre lithosphère-asthénosphère, forcement, elle va être plus profonde</i> » (R208). - Reprise-modification de « <i>votre lithosphère avec votre manteau lithosphérique + la croûte ont tendance à s'enfoncer [...]</i> C'est le moteur de la subduction » (R204) par actualisation → « <i>elle s'enfonce [...]</i> C'est le moteur de la subduction » (R208). Les indicateurs langagiers : - « <i>du coup</i> » : marque la conséquence. - « <i>il faut</i> » : expression impersonnelle qui marque l'obligation. - « <i>par le fait que</i> » : locution adverbale qui introduit une explication. - « <i>forcement</i> » marque la nécessité. Dans cette réplique, la professeure reprend son propos initial formulé en (R188), en indiquant ici que l'augmentation de la densité de la lithosphère océanique par rapport à celle de l'asthénosphère en s'éloignant de l'axe de la dorsale, représente le moteur de la subduction. Elle insiste sur le fait que l'augmentation de la densité de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale, est due à la température qui diminue en s'éloignant de l'axe de la dorsale entraînant ainsi l'approfondissement de la limite lithosphère-asthénosphère.</p>
209-Lucas	<p><u>Pourquoi déjà</u> il y a plus de lithosphère, quand on s'éloigne de la dorsale ?</p>	<p>- « <i>Pourquoi</i> » : adverbe interrogatif. - « <i>déjà</i> » : adverbe utilisé dans une question demandant de</p>

		<p>rappeler ce qu'on a plus au moins oublié précédemment dans le discours (il s'agit ici de la cause de l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale)</p> <p>.</p> <p>Par cette question, l'élève relance l'explication de l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique qui a été déjà donnée par l'enseignante en (R188) « <i>comme la limite lithosphère-asthénosphère est une limite thermique [...] la baisse de température de la lithosphère là, lorsqu'on s'éloigne de la dorsale. [...] entraîne une augmentation de l'épaisseur</i> ».</p>
210-P	Ici ?	
211-Lucas	Oui.	
212-P	Alors, je reprends.	
213-Lucas	Parce que c'est poussé non ?	
214-P	[...] L'isotherme est la ligne où vous avez la même température partout. Là, l'isotherme c'est l'isotherme 1300° et si tu veux c'est la limite entre la lithosphère et l'asthénosphère.	Reprise-modification de « <i>la limite lithosphère-asthénosphère est une limite thermique</i> » (R188) par actualisation → « <i>L'isotherme est la ligne où vous avez la même température partout. [...] l'isotherme 1300° [...] c'est la limite entre la lithosphère et l'asthénosphère</i> ».
215-Lucas	<u>Ce qui fait</u> la limite c'est la température. C'est pas la différence des roches ?	<p>-« ce qui fait » : locution adverbiale, elle montre que ce qui suit dépend de ce qui lui précède.</p> <p>Par cette réplique, l'élève reformule ce qu'il a compris du propos de l'enseignante en (R214) en incitant cette dernière à donner davantage de précisions.</p>
216-P	Non . En fait, ici c'est du manteau, c'est la péridotite partout. En fait, simplement tout va avoir un comportement de roche différent <u>si je suis à moins 1300°</u> , je vais avoir un comportement plutôt rigide et cassant.	Reprise-modification de « <i>l'isotherme 1300° [...] c'est la limite entre la lithosphère et l'asthénosphère</i> » (R214) par explication → « <i>si je suis à moins 1300°, je vais avoir un</i>

	<u>Si je suis à 1300°</u> , en fait c'est la limite au niveau de laquelle mon matériel va devenir ductile, ou il va devenir élastique.	comportement plutôt rigide et cassant. <i>Si je suis à 1300°</i> , en fait c'est la limite au niveau de laquelle mon matériel va devenir ductile, ou il va devenir élastique » (R216).
217-Lucas	Oui. ²⁷	

Dès le début du macro-épisode, l'enseignante émet dans la réplique (R188)²⁸ l'affirmation « *comme la limite lithosphère-asthénosphère est une limite thermique [...] la baisse de température de la lithosphère là, lorsqu'on s'éloigne de la dorsale [...] entraîne une augmentation de l'épaisseur du manteau lithosphérique* ». Elle cherche ici à montrer aux élèves le lien entre l'éloignement de l'axe de la dorsale et l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère. La concomitance de ces deux phénomènes est marquée par l'usage de la conjonction « lorsque » qui marque la simultanéité des phénomènes.

L'utilisation par la professeure de la conjonction qui exprime la cause « comme », peut être expliquée par le fait que l'enseignante cherche à transmettre aux apprenants que la limite lithosphère – asthénosphère qui est une limite thermique, est à l'origine de l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale.

A la fin de cette intervention (R188), l'enseignante déplace le discours de l'épaisseur vers la densité de la lithosphère. L'usage des termes « *moins denses* » et « *plus denses* » dans sa question « Qu'est ce qui se passe s'il y a un matériel moins dense qui se retrouve au-dessus d'un matériel plus dense ? » (R188) le prouve.

Les propositions émises par les élèves pour répondre à cette question en (R189) « Bouger » et en (R191) « se déplacer », sont rejetées par l'enseignante. Sa phrase formulée en (R192) « *il peut se déplacer* » suivie par la présentation du modèle du glaçon le démontre. Par ce modèle ainsi que sa question posée dans la réplique (R192) « *Si vous mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire*

²⁷ : Nous avons choisi de commencer l'analyse du MEP15 à partir de la réplique 188. Nous n'avons pas intégré les tours de parole 185, 186 et 187. En effet, même si l'enseignante parlait en 185 et 186 du moteur de la subduction, l'interaction entre élève et enseignante était plutôt focalisée sur « la trace écrite ».

Les mots soulignés dans le tableau représentent les indicateurs langagiers identifiés dans le macro-épisode. Ils sont soulignés par nous chercheure.

²⁸ : (R+ numéro) ou encore Réplique+ numéro signifie le numéro du tour de parole formulé par l'enseignante ou les élèves en classe.

quoi ? », la professeure essaye d'aider les élèves à trouver cette fois-ci la "bonne" réponse à sa question de départ formulée dans la réplique (R188). Nous pensons que l'utilisation des adverbes de négation « ne ...pas » dans la réplique (R194), marque de nouveau une invalidation par l'enseignante de la proposition de solution qui a été émise par plusieurs élèves en (R193) « couler ». Suite à cette invalidation, la professeure donne cette fois-ci-là aux élèves la solution recherchée à sa question posée en (R192). Ainsi, elle précise aux élèves que « *S'ils sont moins denses, ils flottent. [...] Si j'ai une lithosphère plus dense que l'asthénosphère [...] Je vais avoir un enfoncement [...]* » (R194). De cette façon, le moteur de la subduction, est construit en classe comme un savoir solution, qui ne devrait plus être énigmatique pour les élèves. Néanmoins, même si le moteur de la subduction n'a pas été construit dans un contexte de problématisation, l'enseignante a invité les élèves à calculer la densité de la lithosphère océanique près de l'axe de la dorsale. Elle cherche ici à consolider ce savoir chez les élèves et vérifier s'ils ont bien compris ou non le mécanisme qui peut conduire à la subduction. Nous interprétons alors la question posée par la professeure en (R200) « *Au point numéro 1, votre lithosphère est-ce qu'elle a tendance à flotter ou à s'enfoncer dans l'asthénosphère ?* » comme une reformulation des questions déjà posées en (R188) et (R192) dont l'objectif est de vérifier si sa réponse donnée en (R194), a été bien acquise ou non par les apprenants.

Les réponses des élèves en (R201) « Flotter » et en (R207) « *Elle s'enfonce* » aux questions formulées par l'enseignante en (R200) et (R206), montrent selon nous que les apprenants ont accepté la solution donnée par l'enseignante en (R194) (effet de contrat didactique) et ont réussi à la réutiliser dans l'activité de calcul de la densité de la lithosphère océanique proposée par la professeure (voir **fig.19 du chapitre 5**). L'usage par l'élève du terme qui indique la conséquence « du coup » dans sa réplique (R203) « *[...] du coup, au point 3, c'est supérieur de l'asthénosphère. Ce qui crée la solution ? C'est ce qu'on cherche* » prouve clairement que l'élève a réussi à conclure d'après la solution donnée par l'enseignante en (R194), qu'au point 3 de la fiche du travail, c'est-à-dire loin de l'axe de la dorsale, la densité de la lithosphère augmente, elle est plus importante que celle de l'asthénosphère ce qui explique selon lui la subduction.

Par la question de relance posée dans la réplique (R209) « *Pourquoi déjà il y a plus de lithosphère quand on s'éloigne de la dorsale ?* », l'élève Lucas a réussi à relancer en classe la raison pour laquelle il y a une augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique qui a été donnée avant par l'enseignante dans la réplique (R.188), et qui reste en apparence ambiguë pour lui. Ce qui intéresse l'élève ici ce n'est pas de savoir que « *comme la limite lithosphère-asthénosphère est une limite thermique [...] la baisse de température de la lithosphère là, lorsqu'on s'éloigne de la dorsale. [...] entraîne une augmentation de l'épaisseur* » de la lithosphère océanique. En revanche, ce qui l'intrigue, c'est de savoir ce que signifie limite thermique et pourquoi elle est à l'origine de l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale.

L'usage par l'élève dans la réplique (R215) de la locution adverbiale « ce qui fait » suivie par la question « *la limite, c'est la température. C'est pas la différence des roches?* », montre selon nous que l'apprenant Lucas reformule ce qu'il a compris dans le propos présenté par l'enseignante en (R214) tout en l'incitant à donner plus de précisions sur la notion de limite thermique.

Par l'explication de l'enseignante en (R216) « *ici, c'est du manteau, c'est la péridotite partout [...] si je suis à moins 1300°C, je vais avoir un comportement cassant. Si je suis à 1300°C [...] mon matériel va devenir ductile* », cette dernière insiste sur le fait que la limite lithosphère-asthénosphère est une limite thermique, de part et d'autre de laquelle, il n'y a pas un changement de nature de roche (qui est de la péridotite) mais plutôt un changement de comportement de roches (ductile ou rigide). Cette réponse apparaît convaincante pour l'élève. L'usage de l'adverbe d'affirmation en (R217) «oui » le prouve.

En conclusion, nous pouvons dire que même si ce macro-épisode est considéré dans l'analyse thématique comme un macro-épisode concordant, marquant une conformité entre le thème proposé par l'enseignante et celui posé par les élèves (il s'agit dans ce macro-épisode du moteur de la subduction), nous pouvons remarquer que l'analyse épistémologico-langagière nous a permis de mettre en exergue une discordance entre le problème de l'enseignante et celui des élèves (le moteur de la subduction vs l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale). En fait, nous pouvons dire que tout au long de ce macro-épisode, la classe a fonctionné majoritairement sur le registre d'un cours dialogué, et où cours duquel l'enseignante privilégie la construction du moteur de la

subduction (plus explicitement, la densité de la lithosphère par rapport à celle de l'asthénosphère en s'éloignant de l'axe de la dorsale) comme un savoir solution tout en cherchant ensuite à le consolider à travers les reprises avec modification de sa question de départ (R188) ou encore par la proposition de l'activité de calcul de densité qui vise à vérifier si les élèves ont bien compris ou non la solution déjà donnée par elle-même auparavant. En revanche, par la question de relance posée par l'élève Lucas en (R209) « pourquoi déjà il y a plus de lithosphère quand on s'éloigne de la dorsale ? », ce dernier réussit à poser le problème de l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale. De cette façon, nous pouvons dire qu'à travers cette question de relance, la classe a tendance de s'engager vers un processus de problématisation, en cherchant de construire un savoir pourquoi. Nous précisons quand même que ce savoir problématisé n'a pas été construit en classe. En effet, la question de l'élève n'a pas été traitée dans la suite du macro-épisode en ouvrant possiblement à des moments d'argumentations durant lesquels les élèves proposent des explications possibles à l'augmentation de la lithosphère océanique.

Suite à l'analyse épistémologico-langagière du MEP15, nous passons maintenant à l'analyse du macro-épisode concordant MEP9.

- **L'analyse du MEP9 qui étudie le problème du métamorphisme des zones de subduction**

De point de vue épistémologique, le macro-épisode MEP9, pose le problème du métamorphisme des zones de subduction. Dans ce cadre, le phénomène du métamorphisme peut-être défini comme « *la transformation des roches à l'état solide par augmentation de la pression et de la température, en général lors de l'enfouissement (en subduction par exemple)* » (Jolivet, 2011, p. 62-63). Il rend nécessaire l'enfoncement de roches.

Nous précisons ici que les chercheurs font un focus sur des roches faites de minéraux qui se forment dans des conditions de haute pression et basse température (HP-BT). La présence de ces minéraux (comme le glaucophane, le pyroxène, etc...) rend nécessaire un métamorphisme de HP-BT que l'on associe à l'idée d'enfoncement à « grande » vitesse d'une plaque froide (froide car elle est éloignée de l'axe de la dorsale marqué par la remontée du magma chaud) le long du plan de

Benioff. Cela provoque nécessairement des réactions chimiques au niveau des roches enfouies à cause des variations importantes de la température et de la pression (Jolivet, 1997, p.97-98), entraînant alors des modifications des minéraux et l'apparition de nouvelles associations de minéraux. Puisque les roches de la plaque enfouie « *sont emmenées en profondeur rapidement, plus rapidement* » (ibid, p.100) qu'elles ne peuvent se réchauffer pour s'équilibrer avec le milieu environnant, les chercheurs parlaient de la nécessité de transformations de roches selon un gradient HP-BT.

Dans ce cadre, Jolivet précisait lors de nos échanges menés avec lui en 2021 (**voir annexe 2**) que lorsque les chercheurs parlent de HP-BT, ils font référence « *au gradient P/T et non aux valeurs absolues de la température et de la pression* ». On peut observer par exemple la formation de nouvelles associations de minéraux « *à 20 Kbar et à une température de 450°C. Cette température de 450°C est beaucoup plus basse que celle que l'on attendrait pour 20 kbar (~60 km d'enfouissement) qui devrait être à 800-900°C si on était à l'équilibre thermique* ».

Suite à ces précisions menées, nous présentons maintenant l'analyse épistémologico-langagière du MEP9 portant sur le problème du métamorphisme des zones de subduction.

L'analyse du MEP9 est présentée dans le **tableau.11**. Ce dernier comporte les interventions de l'enseignante et des lycéens qui ont eu lieu durant le macro-épisode ainsi que les opérations logico-discursives mises en évidence et les indicateurs langagiers identifiés dans chaque réplique.

Tableau. 11. L'analyse du macro-épisode MEP9

	<i>Interventions</i>	<i>Les opérations mises en évidence et les indicateurs langagiers</i>
71-P	[...] <u>lorsque</u> vous avez subduction, en fait votre croûte océanique, <u>elle va</u> s'enfoncer et du coup <u>elle va</u> avoir des changements de pression et de température [...] Qu'est-ce qu'ils peuvent engendrer ? On <u>a vu</u> ça dans le chapitre précédent.	-Extension de l'objet de discours par explication de « <i>lorsque vous avez subduction</i> » → « <i>des changements de pression et de température</i> » qui devient l'objet de discours. Les indicateurs langagiers : - « <i>Lorsque</i> » : conjonction de subordination qui sert à marquer

		<p>un lien de dépendance.</p> <ul style="list-style-type: none"> - « <i>Elle va s'enfoncer, Elle va avoir</i> » : marquent une finalité. - « <i>A vu</i> » : verbe voir au passé composé, qui renvoie à ce qui a été étudié avant.
72-Lucas	Evaporation de l'eau	L'élève propose une solution à la question de l'enseignante.
73-P	<u>Oui</u> , alors, <u>effectivement</u> vous pouvez avoir <u>modification de l'état de l'eau</u> , <u>mais</u> au niveau de la roche, si je la mets dans d'autres conditions de pression et de température ?	<ul style="list-style-type: none"> -Reprise-modification par parasyonymie de « <i>évaporation de l'eau</i> » (R.72) → « <i>modification de l'état de l'eau</i> » -Reformulation de la question en (R.71) « <i>Qu'est ce qu'ils peuvent engendrer ?</i> » → « <i>Si je la mets dans d'autres conditions de pression et de température ?</i> » <p>Les indicateurs langagiers :</p> <ul style="list-style-type: none"> - « <i>Oui [...] effectivement</i> » qui est accompagnée par « <i>mais</i> » marque la dissonance.
74-Salma	Transformation de la roche.	L'élève propose une deuxième solution à la question initiale posée en (R71).
75-P	[...] <u>Des transformations, soit de structure</u> , [...] <u>Mais, vous avez aussi parfois des transformations minéralogiques</u> [...] ça s'appelle <u>le métamorphisme</u> . Vous avez un métamorphisme caractéristique de la subduction. C'est <u>un métamorphisme dans les conditions de haute pression, basse température</u> . Alors, haute pression, <u>pourquoi</u> haute pression ? Est-ce que c'est logique ça ?	<ul style="list-style-type: none"> -Reprise-modification par actualisation de « <i>transformation de la roche</i> » (R.74) → « <i>des transformations, soit de structure, mais vous avez aussi parfois des transformations minéralogiques</i> ». -Reprise-modification par référenciation de « <i>transformations minéralogiques</i> » (R.75) → « <i>Métamorphisme</i> » (R.75) qui devient l'objet de discours. -Extension de l'objet de discours de « <i>métamorphisme</i> » (R.75) par ajout → « <i>métamorphisme de haute pression-basse température</i> » (R75). -Reprise-modification « <i>métamorphisme de haute pression basse température</i> » par actualisation → « <i>haute pression</i> » (R75) qui devient l'objet de discours. <p>Les indicateurs langagiers :</p>

		<p>- « <i>Soit ...mais aussi</i> » marque ici la présentation d'une alternative à la proposition de l'élève en (R74).</p> <p>- « <i>pourquoi</i> » marque l'interrogation : l'enseignante engage à ce niveau les élèves pour proposer les raisons pour lesquelles le métamorphisme des zones de subduction est qualifié de haute pression, basse température.</p>
76-Lucas	C'est <u>parce que</u> sous l'eau.	<p>« <i>Parce que</i> » : conjonction de subordination qui marque la cause.</p> <p>Par cette réplique(R76), l'élève présente la raison pour laquelle le métamorphisme des zones de subduction est qualifié de haute pression.</p>
77-P	<u>C'est pas</u> par ce que sous l'eau. <u>Mais</u> c'est par ce que votre croûte océanique elle s'enfonce, si elle s'enfonce, [...] Le matériel qui <u>va être</u> plus bas [...] <u>va</u> au-dessous [...] <u>va</u> forcément avoir une pression plus importante. C'est <u>haute pression</u> , c'est normal <u>puisque</u> vous avez un enfouissement. Après, <u>basse température</u> est ce que ça vous paraît logique comme ça basse température ? [...]	<p>-Actualisation de « <i>haute pression</i> » (R.75, R76) → « <i>Basse température</i> » (R77) qui devient l'objet de discours.</p> <p>Les indicateurs langagiers :</p> <p>« <i>C'est pas</i> » : marque la négation : Ici la professeure rejette la raison proposée par l'élève en (R76).</p> <p>« <i>Mais</i> » qui marque la dissonance, et qui est suivie par « <i>puisque</i> » qui marque la cause, montre que l'enseignante donne la raison pour laquelle le métamorphisme ses zones de subduction est marqué de haute pression.</p>
78-Mathis	C'est <u>parce que</u> c'est loin du soleil	<p>« <i>Parce que</i> » : conjonction de subordination qui marque la cause : L'élève propose ici une solution pour expliquer les conditions de basse température caractéristique du métamorphisme des zones de subduction.</p>
79-P	<u>Non, c'est pas</u> par ce que loin du soleil.	<p>« <i>Non</i> » et « <i>c'est pas</i> » : marque la négation.</p> <p>Dans cette réplique, la professeure rejette la proposition de l'élève en (R78).</p>

80- Mathis	<u>Mais</u> sous l'eau, <u>il n'y a pas de rayon de soleil</u> .	Reprise-modification de « <i>c'est loin de soleil</i> » (R78) par actualisation → « <i>sous l'eau, il n'y a pas de rayon de soleil</i> » (R80). Les indicateurs langagiers : « <i>Mais</i> » marque la dissonance. Cette réplique marque la mise en place d'une hétéroglossie entre le propos de l'enseignante et celui de l'élève.
81-P	<u>Oui c'est vrai</u> , sous l'eau, il n'y a pas de soleil, le soleil ne peut pas passer, <u>mais là</u> , c'est plutôt lié à l'état de la roche au niveau des zones de subduction. [...] Ma croûte [...] Là, à l'axe de la dorsale, c'est comment ? C'est très ? Là, à l'axe de la dorsale, c'est comment ? C'est très ?	-Reprise-modification de « <i>il n'y a pas de rayon de soleil</i> » (R80) par actualisation → « <i>il n'y a pas de soleil</i> » (R81). -Reprise-modification de « <i>il n'ya pas de soleil</i> » par actualisation → « <i>le soleil ne peut pas passer</i> » (R81). Les indicateurs langagiers : « <i>Oui c'est vrai ...mais là</i> » : marque la dissonance. Par ce propos, la professeure invalide le propos de l'élève en (R80).
82- Toute la classe	Chaud.	
83-P	C'est <u>très...chaud</u> . <u>Plus</u> je m'éloigne, <u>plus</u> votre croûte a eu de temps de refroidir, <u>parce qu'elle</u> est dans l'eau froide. Elle <u>va avoir</u> du temps à refroidir [...] Donc, je <u>vais</u> avoir <u>une croûte très froide</u> et du coup elle s'enfonce, ben, elle <u>va se réchauffer</u> , <u>mais</u> elle <u>va se réchauffer plus lentement</u> par rapport à ce qu'on pourrait imaginer.[...] <u>cette croûte océanique elle est anormalement froide</u> , elle <u>va</u> quand même se réchauffer, mais elle va mettre un petit peu de temps pour se réchauffer.	-Reprise-modification de « <i>elle va se réchauffer</i> » (R83) par actualisation → « <i>elle va se réchauffer plus lentement</i> »(R83). -Reprise-modification de « <i>Elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer</i> » (R83) par actualisation → « <i>elle va quand même se réchauffer, mais elle va mettre un petit peu de temps pour se réchauffer.</i> » (R83). -Reprise-modification de « <i>une croûte très froide</i> » (R83) par actualisation → « <i>cette croûte océanique elle est anormalement froide</i> » (R83). Les indicateurs langagiers : - « <i>très</i> » indique un degré superlatif (un degré élevé). Il est

		<p>utilisé par la professeure pour montrer que la température est très élevée au niveau de l'axe de la dorsale.</p> <ul style="list-style-type: none"> - « <i>Plus...Plus</i> » marque un lien de dépendance entre deux propositions. - « <i>parce que</i> » conjonction de subordination qui marque la cause. L'enseignante donne ici la solution à sa question en (R77) « <i>ça vous paraît logique comme ça basse température</i> ». - « <i>va avoir</i> », « <i>vais avoir</i> », « <i>du coup</i> », « <i>elle va</i> », « <i>mais elle va</i> » marquent la finalité (dans le sens de la focalisation sur ce qui tend vers une fin, vers un but).
--	--	--

[99- 131] Lecture de la pression et de la température sur un diagramme de pression et de température

132- Amina	Dans une zone de subduction, basse température/ haute pression ?	Reprise-modification des deux questions en (R75) « <i>Pourquoi haute pression ? Est-ce que c'est logique ça ?</i> » & en (R77) « <i>Après basse température, est-ce que ça vous paraît logique comme ça basse température ?</i> » → « <i>Dans une zone de subduction, basse température / haute pression ?</i> » (132) qui redevient l'objet de discours.
133-P	Oui, basse température [...] haute pression, basse température.	« <i>Oui</i> » qui marque la confirmation de la proposition de l'élève en (R132) par l'enseignante.
134- Mathis	Dans une subduction, ça s'enfonce	Reprise-modification de « <i>elle va s'enfoncer</i> » (R71) par actualisation → « <i>ça s'enfonce</i> » (R134).
135-P	Oui.	
136- Mathis	Alors, le gradient géothermique est plus chaud	<p>« <i>Alors</i> » marque la conséquence de la cause formulée en (R134).</p> <p>Les répliques (R134) et (R136) marquent selon nous l'hétéroglossie que s'installe de nouveau dans le discours en classe indiquant ainsi l'écart qui existe entre le raisonnement de l'élève et celui de l'enseignante</p>

		(Au contraire de l'enseignante qui qualifie le métamorphisme des zones de subduction de basse température, les élèves le qualifient de haute température puisque la lithosphère océanique subduite s'enfonce en profondeur (la température augmente avec la profondeur selon le gradient géothermique).
137-P	Oui, mais je l'ai expliqué [...] Plus je m'enfonce, plus c'est fait chaud. C'est vrai. Mais [...] ta croûte [...] elle se réchauffe moins vite que ce qu'on pourrait attendre, parce qu'elle est très froide. [...] Ce sont <u>déjà</u> , des températures chaudes, <u>mais</u> en terme géologique, la température est pas très élevée . [...]	-Reprise-modification de « <i>Elle va avoir du temps à refroidir [...]</i> Donc, je vais avoir une croûte très froide et du coup elle s'enfonce, ben, elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer » (R83) par actualisation → « <i>Plus je m'enfonce, plus c'est fait chaud [...]</i> Mais [...] ta croûte [...] elle se réchauffe moins vite que ce qu'on pourrait attendre, parce qu'elle est très froide » (R137). Les indicateurs langagiers : « <i>Déjà...mais</i> »: marque une précision ou plutôt une correction par rapport à ce qui a été énoncé.
138-Mathis	C'est quoi basse température ?	Reprise-modification de « <i>Après basse température, est ce que ça vous paraît logique comme ça basse température ?</i> » (R77) et « <i>Dans une zone de subduction, basse température / haute pression ?</i> » (R132) par actualisation → « <i>c'est quoi basse température ?</i> » (R138).
139-P	Ben, c'est des températures qui sont, qui sont à la partie de ton diagramme, qui sont la partie la plus faible dans ton diagramme. Ici, 0-200°C, ce sont des basses températures.	
140-Mathis	<u>Mais</u> c'est pas très froid.	« <i>Mais</i> » marque la dissonance .
141-P	Non, j'ai dit après que c'est pas super froid, <u>mais</u> ça va être <u>plutôt</u> des températures peu élevées. Je sais <u>pas comment</u> comprendre <u>mieux</u> . [...]	- « <i>Mais...plutôt</i> » marque l'introduction d'une rectification. La professeure insiste ici sur le choix de la deuxième proposition « <i>des températures peu élevées</i> » par

		<p>opposition à la première proposition « <i>c'est pas super froid</i> ».</p> <p>- « <i>pas comment...mieux</i> » marque que l'enseignante a conscience que les élèves n'arrivent pas à comprendre pourquoi c'est basse température. Mais elle n'arrive pas à les convaincre. L'épisode se ferme alors sans qu'il y ait une orchestration de l'hétéroglossie.</p>
--	--	--

Dès la première intervention (R71), l'enseignante cherche à orienter le discours vers le métamorphisme des zones de subduction. La conjonction « lorsque » accompagnée de « *vous avez subduction [...] des changements de pression et de température, qu'est-ce qu'ils peuvent engendrer ?* » le montre. Nous pensons que l'utilisation par l'enseignante en (R73) des adverbes « *oui [...] effectivement* » suivis par « *mais* » signifie un acte de rejet de la proposition de l'élève émise en (R72) « *évaporation de l'eau* ». Ici, nous pouvons interpréter l'utilisation de « *oui [...] effectivement* » qui précède le « *mais au niveau de la roche [...]* » par le fait que la proposition de l'élève, même si elle est scientifiquement acceptable, ne s'inscrit pas dans la logique scientifique de l'enquête mise en place sur le métamorphisme des zones de subduction, d'où l'explicitation de la professeure « *mais au niveau de la roche...* » qui vient préciser la question du départ posée par l'enseignante en (R71). Cette explicitation a permis de rendre l'objet de discours suffisamment focalisé (Rebière, 2000, p.240), c'est-à-dire qu'il y a eu une précision : « *des changements de pression et de température* » qui devient « *des changements de pression et température* » « *au niveau de la roche* ».

Si nous étudions maintenant la deuxième proposition de réponse à la question de l'enseignante « *Qu'est-ce qu'ils peuvent engendrer ?* » (R71) formulée en (R74) par l'élève Salma « *transformation de la roche* », nous pouvons dire que cet énoncé de l'élève est considéré comme imprécis par l'enseignante. L'utilisation de l'expression « *soit...mais* » en (R75) le montre très bien. En fait, l'enseignante explicite ici les deux possibilités de transformation de la roche tout en privilégiant la deuxième proposition. Le recours à l'expression « *mais...aussi* » suivie par la formulation du terme scientifique « *métamorphisme* » nous conduit à cette déduction.

A partir de cette intervention (R75), l'enseignante déplace l'objet de discours du

thème « *des changements de pression et de température* » vers le thème du « *métamorphisme* » qu'elle qualifie dans son intervention de « *haute pression-basse température* ». Nous pensons ici que les énoncés émis par les élèves en (R72) « *évaporation de l'eau* » et en (R74) « *transformation de la roche* », et qui sont considérés par la professeure comme non pertinents, ont poussé cette dernière à donner la solution « juste » : « *métamorphisme HP-BT* ».

Même si l'enseignante a donné elle-même la réponse recherchée à sa question de départ posée en (R71), elle a relancé ensuite le discours en invitant les élèves à proposer les raisons pour lesquelles le métamorphisme des zones de subduction est qualifié de haute pression et basse température. Les questions qui ont été posées par la professeure en (R75) « *pourquoi haute pression ? Est-ce que c'est logique ça ?* » et en (R77) « *Après basse température, est ce que ça vous paraît logique comme ça basse température ?* » le prouvent.

En suivant notre macro-épisode, nous pouvons remarquer que l'utilisation de l'expression « *c'est pas* » dans la réplique (R77) signifie selon nous un acte de rejet par la professeure de la solution proposée par l'élève Lucas pour expliquer les conditions de haute pression caractéristiques du métamorphisme des zones de subduction. Elle invalide à ce niveau la réponse de l'élève tout en essayant de fermer le discours en donnant elle-même la réponse recherchée. L'utilisation de la conjonction « *mais* » qui marque la dissonance suivie par la conjonction qui indique la cause « *parce que* » le justifie très bien.

De point de vue de la problématisation, nous pouvons dire que le discours n'a pas progressé en classe pour entraîner possiblement la construction d'un savoir raisonné. En fait, même si l'élève Lucas s'engage en (R76) à proposer une première solution possible à la question « *pourquoi haute pression ? Est-ce que c'est logique ça ?* », les élèves n'ont pas été amenés ni à critiquer cette première solution, ni à la confronter par la proposition d'autres solutions possibles. Par l'invalidation par l'enseignante de la solution proposée par l'élève suivie par la formulation de la solution recherchée, le dialogue s'est fermé sur les conditions de haute pression caractéristiques du métamorphisme des zones de subduction. En apparence, les élèves ont reçu et accepté cette solution et elle ne devrait plus être énigmatique pour eux.

En ce qui concerne les raisons pour lesquelles le métamorphisme est qualifié de

basse température, nous pouvons dire que la première proposition émise par l'élève Lucas en (R78) « *c'est parce que c'est loin du soleil* » reçoit un refus de la part de l'enseignante. L'utilisation du terme « *c'est pas parce que* » par la professeure en (R79) le prouve.

La première dissonance formulée dans ce macro-épisode par les élèves est observée dans l'intervention (R80). Elle se manifeste par l'usage de la conjonction « mais ». Ici, l'élève qui cherche à expliquer pourquoi le métamorphisme des zones de subduction est qualifié de basse température, se base sur des faits (le soleil est une source de chaleur & le soleil n'arrive pas au niveau des zones de subduction) et l'idée qui met en relation ces faits (c'est-à-dire puisque le soleil qui est une source de chaleur, n'arrive pas dans les zones de subduction, pour cela le métamorphisme des zones de subduction est qualifié de basse température).

Le « *oui, c'est vrai...mais là c'est plutôt* » formulé par la professeure en (R81) pour répondre à l'intervention (R80) de l'élève Mathis, marque un acte de refus (non catégorique) de la proposition de l'élève « *parce que c'est loin du soleil* ». Il apparaît que suite à la réplique de l'enseignante (R81), l'enquête s'est arrêtée. Ici, il n'y a pas d'autres alternatives à l'explication de l'élève, qui ont été construites en classe pour expliquer la basse température. En contrepartie, c'est l'enseignante qui a donné elle-même la solution recherchée en (R83) : « *Plus je m'éloigne, plus votre croûte a eu de temps de refroidir, parce qu'elle est dans l'eau froide. Elle va avoir du temps à refroidir [...] Donc, je vais avoir une croûte très froide et du coup elle s'enfonce, ben, elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer* ».

Néanmoins, par la question posée en (R132) « Dans une zone de subduction, basse température \ haute pression ? », l'élève Amina a réussi de rouvrir le dialogue sur la raison pour laquelle le métamorphisme est qualifié de basse température. Par l'usage de l'adverbe d'affirmation « oui » dans l'intervention (R133), la professeure confirme bien que dans une zone de subduction, le métamorphisme est qualifié de HP-BT. En revanche, cette confirmation a reçu une opposition par l'élève Mathis. En effet, l'énoncé émis par cet élève en (R134) « dans une zone de subduction, ça s'enfonce » et (R136) « Alors, le gradient géothermique est plus chaud », met à jour le problème du métamorphisme des zones de subduction qu'il considère de haute pression, haute température (au contraire des géologues qui le qualifient de haute pression, basse température) puisque pour lui durant la subduction, la lithosphère

océanique s'enfonce en profondeur. Même si l'enseignante reprend en (R137) le contenu déjà émis par elle-même en (R83) afin de réexpliquer les raisons pour lesquelles le métamorphisme est qualifié de basse température, l'intervention de l'élève Mathis en (R138) « *c'est quoi basse température ?* » montre que ce dernier ne peut pas accepter qu'il s'agit de « *basse température* ». Par cette question, il essaye de comprendre ce que signifie basse température. L'opposition de l'élève Mathis face à ce qui a été énoncé par l'enseignante peut se détecter plus explicitement en (R140) : « *Mais c'est pas très froid* ». La dissonance rencontrée dans cette réplique se manifeste par l'usage de la conjonction « mais ». Nous mentionnons ici que cette intervention de l'apprenant vient après que la professeure a précisé en (R139) « *0-200°C, ce sont des basses températures* ». Nous pensons que le raisonnement de l'élève s'inscrit dans l'échelle de température ambiante (où une basse température correspond à des gammes de températures telles qu'on les envisage dans la vie quotidienne) et non pas suivant l'échelle de température du globe (où 200°C représente une faible température).

La formulation par l'enseignante en (R141) de la phrase « *Je sais pas comment comprendre mieux* », peut-être interprétée par le fait que ce macro-épisode se ferme par l'enseignante sans qu'il y a eu vraiment orchestration de l'hétéroglossie qui peut être clairement détectée entre les énoncés de l'élève Mathis (R134, R136, R140) et les énoncés de la professeure (R133, R137, R139).

Par l'utilisation du terme « *ça va être plutôt* » (R141), l'enseignante invite les élèves à accepter la condition de basse température caractéristique des zones de subduction, sans les amener vraiment à entrer dans un travail argumentatif qui pourrait permettre des déplacements cognitifs, la mise en jeu d'un raisonnement plus complexe (une descente assez rapide de la lithosphère océanique « froide » qui freine son réchauffement) et par suite la construction du métamorphisme HP-BT comme un savoir raisonné.

Nous pouvons conclure et dire que la façon selon laquelle les élèves mobilisent les minéraux de HP-BT présents dans les roches, n'a pas entraîné la construction du métamorphisme de HP-BT comme une nécessité. Nous expliquons cela par les références qu'ils mobilisent durant le macro-épisode. Ainsi, nous pouvons penser qu'ils font référence à la vie quotidienne lorsqu'ils réfléchissent aux conditions de température (c'est la température ambiante et non pas celle de l'intérieur du globe).

Ils font appel aussi au gradient géothermique et non pas au gradient P/T de la plaque enfouie (la pression par rapport à la température de la lithosphère océanique subduite).

Conclusion de l'analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes concordants

L'analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes concordants nous a permis d'approfondir l'analyse des macrostructures. Elle a mis en exergue le fait que la classe a fonctionné majoritairement sur le registre du cours dialogué où l'enseignante privilégie la présentation d'un savoir solution (C'est le cas de métamorphisme de HP-BT, ou encore le moteur de la subduction). Néanmoins, par les questions de relance et de reformulation clarification posées par les élèves, ces derniers mettent en discussion ce qui est déjà présenté ou questionné. Cela marque selon nous la présence d'amorces possibles pour le développement d'une activité de problématisation en classe.

Il est important de préciser ici que les macro-épisodes étudiés ci-dessus sont considérés dans l'analyse thématique comme des macro-épisodes concordants marquant une conformité entre le thème posé par l'enseignante et celui proposé par les lycéens (exemples : le thème du moteur de la subduction en MEP15 et le thème du métamorphisme des zones de subduction en MEP9). Par contre, ils montrent d'après l'analyse épistémologico-langagière une discordance entre les problèmes posés par les élèves et ceux de la professeure. En effet dans MEP15, si l'enseignante pose le problème du moteur de la subduction (plus clairement, la densité de la lithosphère par rapport à celle de l'asthénosphère en s'éloignant de l'axe de la dorsale), les apprenants quant à eux, posent le problème de l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale (ils cherchent à savoir ce que signifie la limite thermique et pourquoi elle est à l'origine de l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale). Nous pouvons détecter aussi cette discordance dans MEP9. Au niveau de ce macro-épisode, nous remarquons que le problème de l'enseignante correspond au métamorphisme de haute pression- basse température (HP-BT). En ce qui concerne les apprenants, ils posent plutôt le problème du métamorphisme de haute pression- haute température (HP-HT). Nous pensons que les élèves font référence ici à la vie quotidienne lorsqu'ils réfléchissent aux conditions

de la température (c'est la température ambiante et non pas la température de l'intérieur du globe). Ils font appel aussi au gradient géothermique (la T° augmente avec la profondeur) pour comprendre le métamorphisme des zones de subduction sans tenir compte du gradient P/T de la plaque enfouie).

Nous présentons ainsi dans **le tableau. 12** une récapitulation des problèmes proposés par l'enseignante et ceux posés par les élève durant ces deux macro-épisodes concordants.

Tableau. 12. Tableau récapitulatif des problèmes proposés par l'enseignante et ceux posés par les élèves durant les macro-épisodes concordants étudiés

Numéro du macro-épisode concordant	Le problème de l'enseignante	Le problème des élèves
MEP15	Le moteur de la subduction	L'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale
MEP9	Le métamorphisme de haute pression- basse température	Le métamorphisme de haute pression- haute température

La légende:



Flèche indiquant la discordance entre le problème posé par l'enseignante et celui des élèves

L'analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes concordants a mis en lumière aussi l'écart entre le raisonnement des élèves et celui des scientifiques. Plus explicitement, si on prend le MEP9 (qui aborde le problème de métamorphisme des zones de subduction), on peut remarquer que les scientifiques réfléchissent selon le gradient P/T de la plaque enfouie, alors que les lycéens font référence, comme nous l'avons vu précédemment, au gradient géothermique pour comprendre le

métamorphisme des zones de subduction.

Suite à l'analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes concordants, nous allons consacrer le chapitre suivant à l'analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes discordants.

CHAPITRE X. LA FORMATION DES CHAINES DE MONTAGNES DE COLLISION: ANALYSE EPISTEMOLOGICO- LANGAGIERE DES MACRO-ÉPISODES DISCORDANTS

Introduction

Dans le neuvième chapitre, nous avons mené une analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes concordants. Cette analyse nous a permis de montrer que la classe a fonctionné sur le registre du cours dialogué, durant lequel l'enseignante a privilégié le savoir solution. Cependant, à travers les questions de reformulation clarification et les questions de relance, les lycéens ont réussi à discuter ce qui est déjà présenté par la professeure. Ces questionnements représentent selon nous des moments où une ouverture vers un processus de problématisation aurait pu avoir lieu. L'analyse épistémologico-langagière a mis en exergue aussi la discordance existante entre les problèmes posés par les élèves et ceux de la professeure (c'est le cas du problème de métamorphisme de HP-BT proposé par l'enseignante vs le problème de métamorphisme de HP-HT posé par les élèves [en MEP9]). De même, cette analyse a mis en lumière la présence d'un écart entre le raisonnement des lycéens et celui des scientifiques pour comprendre certains phénomènes géologiques liés à la formation des chaînes de montagnes de collision (c'est le cas de MEP9, où les élèves considèrent le métamorphisme des zones de subduction de HP-HT : en effet, ils font référence à la vie quotidienne lorsqu'ils réfléchissent aux conditions de température (c'est la température ambiante et non pas la température du globe).

Suite à l'analyse des macro-épisodes concordants, nous allons consacrer ce chapitre à l'analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes discordants.

1 Analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes discordants

Nous présentons dans cette section l'analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes discordants qui étudient les problèmes qui ne sont pas ceux sur lesquels la professeure engage le travail. Ils correspondent à MEP4, MEP5, MEP7, MEP8 et MEP10 (voir **tableau.3** du chapitre 6). Ce sont des macro-épisodes qui, du côté des élèves, abordent respectivement le problème de l'orogénèse actuelle, le problème de devenir de l'eau océanique, le problème du vide, le problème la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique, ainsi que le problème de la lithosphère océanique enfouie. Du côté de l'enseignante, ces macro-épisodes abordent le problème du scénario de la formation des chaînes de montagnes (dans MEP4 et MEP5), le problème du métamorphisme des zones de subduction (dans MEP7 et MEP8) et le problème de la collision (MEP10).

L'analyse des macro-épisodes discordants MEP6 (la formation de reliefs posée par les élèves), MEP12 (l'origine de l'eau océanique), MEP13 (les plaques tectoniques) et MEP14 (les failles dans le contexte de divergence et convergence), ne sera pas menée dans notre étude. En effet, durant ces macro-épisodes les élèves posent généralement une question à l'enseignante mais ils n'arrivent pas à formuler explicitement ou même à thématiser clairement ce qui leur pose problème. C'est le cas par exemple du MEP14 qui comporte la question de l'élève « *Est-ce que où je peux faire convergence ou divergence, j'ai des failles ?* » (R184) et la réponse de l'enseignante « *Chaque fois que vous avez un mouvement de plaques, effectivement, ça risque d'engendrer des failles* » (185).

- **L'analyse épistémologico-langagière du macro-épisode MEP4 qui étudie le problème de l'orogénèse actuelle (posé par les élèves)**

De point de vue épistémologique, le macro-épisode MEP4 pose le problème de la relation entre le passé et le présent (cette relation se manifeste par la transposition dans le présent ce que l'on sait se dérouler au passé et vice versa), pour comprendre les phénomènes géologiques (dont la formation des chaînes de montagnes de collision). Il met en exergue la mobilisation du principe méthodologique de l'actualisme. Ce principe se base sur le fait que « *le présent est la clef du passé, ou que les causes qui ont agi au long de l'histoire de la Terre ne diffèrent point*

essentiellement des causes actuelles » (Gohau, 1997, p. 140).

En s'inscrivant dans un cadre actualiste, les phénomènes à l'origine des changements géologiques passés (leurs causes géologiques) sont considérés comme existants auparavant et existent encore dans la nature actuelle (Orange Ravachol, 2003, p. 185). Dans le cadre du problème de l'orogénèse, il s'agit plus précisément d'un actualisme élaboré, mobilisant du temps long constructeur de phénomène (Orange Ravachol 2003).

Dans ce cadre, nous précisons que lors de l'entretien mené avec Jolivet, il nous dit que pour comprendre les chaînes de montagnes actives, les chercheurs font appel aux chaînes anciennes *« parce que les chaînes anciennes montrent, elles montrent des parties plus profondes qu'on peut pas observer dans les chaînes actives »* (Annexe 1, intervention 192). Il conclut en indiquant que les scientifiques font *« des allers-retours entre le présent et le passé en utilisant toujours le principe de l'actualisme »* (ibid). Il nous a informée aussi que même si *« On ne voit pas tout le scénario »* de la formation des chaînes de montagnes à l'état actuel, les mécanismes qui aboutissent à la formation des chaînes de montagnes comme *« le chevauchement frontal de l'Himalaya ou le chevauchement frontal de Taïwan... on le voit, on le voit en géophysique, on le voit sa géométrie et on mesure sa vitesse. La vitesse à laquelle se déplacent les unités les unes par rapport aux autres et on enregistre etc. Donc, on voit le processus à l'heure actuelle se faire »* (Annexe 1, intervention 196) par *« l'imagerie sismique qui permet de voir la profondeur, le profil sismique, la réflexion, la réfraction, la tomographie sismique, etc qui permet de faire les images de l'intérieur de la terre »* (ibid, intervention 198).

Suite à ces précisions épistémologiques, nous passons maintenant à l'étude des indicateurs langagiers et des différentes opérations logico-discursives présents dans le MEP4 et qui nous ont permis d'établir des relations avec ce problème d'ordre épistémologique (le problème de la mise en relation entre le passé et le présent pour expliquer la formation des chaînes de montagnes).

L'analyse épistémologico-langagière du macro-épisode MEP4 est présentée dans le **tableau.13** : Ce tableau indique d'un côté les interventions de l'enseignante et des élèves qui ont eu lieu durant ce macro-épisode MEP4, et il montre d'un autre côté les

opérations logico-discursives mises en évidence et les indicateurs langagiers identifiés pour mener notre analyse.

Tableau. 13. L'analyse du macro-épisode MEP4

	<i>Interventions</i>	<i>Les opérations mises en évidence et les indicateurs langagiers</i>
57-P	<p>Je vous ai [...] reconstitué l'histoire des Alpes [...] Vous avez <u>d'abord</u> l'ouverture de l'océan avec les failles normales et les marges passives [...] <u>Ensuite</u>, vous avez la deuxième image avec la subduction et <u>puis à la fin</u>, on a la collision [...]</p> <p>Alors, Mathis, vous avez une question.</p>	<p>-« <i>D'abord, ensuite, puis à la fin</i> » marquent la succession de séquences avec démarcation de chaque phénomène.</p> <p>Par cette réplique (R57), l'enseignante cherche à présenter le scénario de la formation des chaînes de montagnes.</p>
58-Mathis	<p>Dans les océans <u>actuels</u> [...] Est-ce qu'il y a des montagnes qui se forment <u>à ce moment</u> ?</p>	<p>Changement de l'objet de discours de « <i>je vous ai reconstitué l'histoire des Alpes</i> » (R57) vers « <i>il y a des montagnes qui se forment à ce moment</i> » (R58).</p> <p>-Il s'agit ici d'un changement de l'objet de discours de scénario des Alpes (ce sont des chaînes de montagnes qui se sont formées au passé) vers le scénario des chaînes de montagnes qui se forment au présent.</p> <p>Les indicateurs langagiers :</p> <p>-« <i>actuels</i> » : adjectif qui marque le moment présent.</p> <p>-« <i>ce moment</i> » : marque l'actuel.</p> <p>Par la question posée en (R58), l'élève pose le problème de l'orogénèse actuelle. Ici, l'élève est en train de ramener un problème du passé (la formation des Alpes) à un</p>

		<p>problème au présent (l'orogénèse actuelle) afin de comprendre la formation des chaînes de montagnes de collision.</p>
59-P	<p>Dans les océans actuels, au niveau des dorsales [...], fin, les reliefs sous-marins, et à ce niveau-là, elle (la chaîne de montagne sous marine) peut être à l'échelle de <u>quelques</u> centimètres par an.</p>	<p>-Reprise-modification de « <i>dans les océans actuels</i> » (R58) par ajout → « <i>dans les océans actuels, au niveau des dorsales</i> » (R59).</p> <p>- Reprise-modification de « <i>des montagnes</i> » (R58) par parasynonymie → « <i>les reliefs</i> » (R59).</p> <p>Remarque: « <i>On appelle parasynonyme un terme qui est presque synonyme d'un autre, c'est-à-dire qui présente une grande partie de traits pertinents en commun mais dont la distribution et/ou le registre d'emploi n'est pas exactement identique; ainsi bois et forêt sont des parasynonymes l'un de l'autre, la différence étant celle de "grandeur" (Dubois et al., 1994, p. 344)</i></p> <p>Les indicateurs langagiers : -« quelques » : adjectif indéfini pluriel qui marque une petite quantité.</p> <p>Par la réplique (R59), la professeure explique à l'élève qu'il y a une montagne sous marine qui peut se former à l'état actuel tout en indiquant que ce phénomène se fait de quelques centimètres par an.</p>
60-Mathis	<p>Mais dans ce cas <u>au niveau continental</u> je parle, il y a une montagne qui se forme à ce moment-là ?</p>	<p>-Reprise-modification de « <i>Dans les océans actuels</i> » (R58) par actualisation → « <i>au niveau continental</i> » (R60).</p>
61-P	<p>Oui, c'est possible. Vous pouvez avoir effectivement la fermeture des océans. <u>Une fois</u> que la croûte soit très vieille,</p>	<p>-« une fois que...et...et » marque la succession de séquences.</p>

	<p>elle subduit <u>et</u> vous pouvez avoir une collision <u>et</u> formation d'une chaîne de montagne à ce moment-là.</p>	<p>Par la réplique (R61), la professeure reprend avec modification son propos en (R57) afin de réexpliquer aux élèves le scénario de la formation d'une chaîne de montagne.</p>
--	--	---

Dès le début de ce macro-épisode, et à partir de l'affirmation émise par l'enseignante en (R57)²⁹, nous pouvons dire que pour expliquer la formation des Alpes, la professeure a eu recours à une mise en histoire simple linéaire faite de séquences qui s'enchaînent (avec interruption de chaque séquence). L'usage des connecteurs temporels « *d'abord... ensuite... et puis* » le prouve.

Par la question posée en (R58), l'élève Mathis fait déplacer l'objet de discours de la reconstitution de l'histoire des Alpes vers l'orogénèse actuelle. Plus explicitement, par la question (R58), l'élève fait changer l'objet de discours du scénario des Alpes qui sont des chaînes de montagnes qui se sont formées au passé vers le scénario des chaînes de montagnes qui se forment au présent. L'utilisation de l'adjectif qui marque le moment présent « actuels » ainsi que le terme « à ce moment » qui accompagne la question « *est ce qu'il y a des montagnes qui se forment* » le montre. La réponse de l'enseignante en (R59) « *[...] les reliefs sous-marins, et à ce niveau là, elle (la chaîne de montagne sous marine) peut être à l'échelle de quelques centimètres par an* » à la question de l'élève Mathis en (R58) ne satisfait pas l'élève ce qui lui pousse à répéter sa question posée en (R58), tout en modifiant cette fois-ci « les océans actuels » (R58) par « au niveau continental » (R60) à partir duquel il cherche à comprendre s'il y a formation d'une montagne à l'état actuel.

Par la question posée en (R58) et (R60), nous pensons que l'élève Mathis met en relation le passé (la formation des Alpes) et le présent (l'orogénèse actuelle) afin de comprendre le phénomène de la formation des chaînes de montagnes de collision et ses conditions de possibilité.

Il est important ici de préciser que même si en apparence, ce macro-épisode est qualifié dans l'analyse thématique de discordant signalant un désaccord entre le thème proposé par l'enseignante (scénario de la formation des Alpes) et celui posé par l'élève (l'orogénèse actuelle), nous pouvons dire suite à l'analyse épistémologico-

²⁹: (R+ numéro) ou encore Réplique+ numéro signifie le numéro du tour de parole formulé par l'enseignante ou les élèves en classe.

langagière, que par les questions posées par l'élève en (R58) et (R60), que celui-ci projette ici le scénario de la formation des Alpes (présenté par l'enseignante) dans le présent et nous pouvons penser que ce faisant il questionne la vraisemblance de ce scénario à l'état actuel. A travers la formulation de « *dans les océans actuels, au niveau des dorsales, fin, les reliefs sous-marins* » (R59), il nous semble que l'enseignante se situe sous la mer et qu'elle parle par suite de la formation des chaînes de montagnes sous marines. Par l'usage de l'adjectif indéfini qui marque une petite quantité « quelques » suivi par l'unité de mesure de vitesse « centimètre\`an », la professeure indique selon nous que la formation de relief sous marin est un phénomène qui nécessite un temps long pour se réaliser. Nous arrivons à cette interprétation par le fait que l'altitude moyenne d'une chaîne de montagnes sous marine est de quelques Km. Donc, pour atteindre une telle valeur tout en sachant que le relief se forme selon la professeure de quelques centimètres par an il faut du temps long.

La réponse de l'enseignante en (R61) à la question de l'apprenant posée en (R58), montre l'absence de prise en compte du monde dans lequel l'élève se positionne (où il établit une relation entre le passé et le présent), malgré l'usage des adverbes « oui » et « effectivement » qui marquent la validation du propos de l'élève « *Est-ce qu'il y a des montagnes qui se forment à ce moment ?* » .

Sur la question « [...] *Est-ce qu'il y a des montagnes qui se forment à ce moment ?* » posée par l'élève Mathis, Jolivet, l'expert que nous avons eu l'occasion d'interviewer, nous a précisé que « *Oui. Il y a des endroits où, si on se réfère aux chaînes de montagnes, il y a des endroits où il y a des chaînes de montagnes qui sont en formation aujourd'hui* » (Annexe 1, intervention 186) et parmi ces chaînes de montagnes, il nous a donné l'exemple de « *la chaîne de Taiwan* » (ibid) « *qui est une chaîne de montagne où on a le plateau continental, la marge chinoise qui passe en subduction sous l'arc insulaire des Philippines* » (ibid, intervention 188) tout en explicitant que « *dans l'espace géométriquement il y a les Philippines : c'est un arc insulaire, du volcanisme, de croûte continentale et de volcanisme par-dessus et à l'ouest de ça il y a la mer de la chine méridionale, c'est un bassin océanique entre les Philippines et l'Asie et si vous allez vers le nord la mer de Chine méridionale, ça se referme parce que la lithosphère, la partie océanique disparaît, et on passe en collision. De la marge chinoise et de l'arc insulaire et là, on voit se développer*

aujourd'hui la chaîne de montagne qui est très active, qui monte très très vite, avec des convergences de l'ordre de 8 cm\ an » (ibid).

Lors de notre entretien, Jolivet nous a indiqué l'exemple aussi de l'Himalaya « *qui est active avec une convergence plutôt de 5 cm\ an, tout en ajoutant qu'il y a « quand même sur les chevauchements principaux de l'Himalaya qui sont actifs aujourd'hui, sur lesquels il y a des grands séismes, il y aura plus de 2 cm\ an de convergence, des mouvements relatifs de chevauchements »* (Annexe 1, intervention 188).

L'analyse épistémologico-langagière du MEP4 a mis en exergue le problème de la relation entre le présent et le passé pour comprendre la formation des chaînes de montagnes de collision. Nous avons réussi à détecter ce problème à travers les questions posées par l'élève dans les répliques 58 et 60. Ces questions montrent que le lycéen essaye de transposer dans le présent (l'orogénèse actuelle) ce qui s'est déroulé au passé (la formation des Alpes) afin de comprendre la formation des chaînes de montagnes de collision.

Suite à l'analyse du MEP4, nous passons maintenant à l'analyse épistémologico-langagière du MEP7.

- **L'analyse du MEP7 qui met en étude le problème du vide (posé par les élèves)**

De point de vue épistémologique, le macro-épisode MEP7 pose le problème des mouvements des plaques tectoniques (responsables à la formation des chaînes de montagnes de collision). En effet, dans le cadre de la tectonique des plaques, les géologues articulent le fonctionnement de la Terre dans sa globalité à ce qui se passe plus localement. Partant de l'idée que le globe terrestre n'est pas en expansion, si les plaques s'agrandissent d'un côté (elles se renouvellent d'une façon continue au niveau des dorsales ; le magmatisme en atteste), il est nécessaire qu'elles disparaissent ailleurs : « *si l'on suppose constant le rayon terrestre, la croûte créée par l'expansion à partir des dorsales doit être détruite ailleurs »* (Hallam, 1976, p. 106). Concernant cette disparition, Hallam écrit qu' « *on sait depuis longtemps que l'activité tectonique à l'intérieur de la lithosphère se trouve confinée presque exclusivement dans une série de zones étroites »* (ibid, p. 108). Parmi ces zones actives, il en est une où les foyers des séismes s'alignent selon un plan incliné (plan de Wadati-Benioff) qui pourrait être associé à la figure d'enfoncement d'une plaque

sous une autre. Ainsi, la subduction qui correspond au plongement de plaques océaniques dans le manteau terrestre, en certaines zones du globe « *suivant des angles variables jusqu'au moins 700 km de profondeur* » (Nicolas, 1999, p. 191), est considérée alors « *comme complémentaire de l'accrétion où se crée la lithosphère océanique, et qui permet, en compensation de maintenir le globe terrestre dans ses dimensions supposées fixes* » (Aubouin, 2010, p. 1).

Dans ce cadre, nous précisons que lors de notre entretien avec Jolivet et suite à notre question « *dans la tectonique des plaques en fait c'est mieux [...] de la comprendre de point de vue global ?* » (Annexe 1, intervention 175), il nous a indiqué qu' « *Il faut comprendre l'ensemble des processus parce que les forces elles sont liées, il y a en gros deux types de forces : il y a ce qu'on appelle les forces de volume qui sont liées aux contrastes latéraux de densité. Par exemple, la lithosphère océanique est plus dense que la L. continentale. Ça descend [...] et du coup vous avez des forces de volume dans le manteau qui font que des endroits ça remonte et des endroits ça descend. C'est la convection [...] Et ensuite il y a des forces qui sont transmises dans la lithosphère : comme la lithosphère, elle est rigide, si on poussait d'un côté à la fois elle va être transmise de l'autre côté. Ça ce qu'on appelle les forces aux limites. Et donc vous avez deux : les forces des volumes et les forces aux limites qui jouent ensemble et il faut comprendre les deux pour comprendre comment fonctionnent les Alpes ou L'Himalaya ou les chaînes de Taïwan* » (Annexe 1, intervention 176).

Suite à ces précisions épistémologiques, nous passons maintenant à étudier les indicateurs langagiers ainsi que les différentes opérations logico-discursives présentes dans le MEP7 et qui nous ont permis d'identifier ce problème d'ordre épistémologique (le problème des mouvements des plaques).

L'analyse épistémologico-langagière du MEP7 est présentée dans le **tableau.14**: Ce tableau présente d'un côté les interventions de l'enseignante et des élèves qui ont eu lieu durant ce macro-épisode, et montre d'un autre côté les opérations logico-discursives mises en évidence et les indicateurs langagiers identifiés pour mener notre analyse.

Tableau. 14. L'analyse du macro-épisode MEP7

	Interventions	Les opérations mises en évidence et les indicateurs langagiers
81-P	[...] <u>là</u> c'est ma croûte océanique et <u>ici</u> j'ai la fosse. [...] Plus je m'éloigne de la dorsale, [...] en terme de température, elle est comment par rapport à l'axe de la dorsale [...] <u>A l'axe de la dorsale</u> , vous avez un magma qui arrive en surface. Là, à l'axe de la dorsale, c'est comment ? C'est très ? [L'enseignante parle en traçant un schéma sur le tableau présentant la lithosphère océanique entre l'axe de la dorsale et la zone des fosses]	-« Là » : adverbe qui marque un lieu loin. -« ici » : adverbe qui indique un lieu proche. -« à » : proposition qui marque le lieu précis.
82- Toute la classe	Chaud.	
83-P	C'est <u>très...chaud</u> . <u>Plus</u> je m'éloigne, <u>plus</u> votre croûte a eu de temps de refroidir, <u>parce qu'</u> elle est dans l'eau froide. Elle <u>va avoir</u> du temps à refroidir [...] Donc, je <u>vais</u> avoir <u>une croûte très froide</u> et du coup elle s'enfonce, ben, elle <u>va se réchauffer</u> , <u>mais elle va se réchauffer plus lentement</u> par rapport à ce qu'on pourrait imaginer [...] <u>cette croûte océanique elle est anormalement froide</u> , elle <u>va</u> quand même se réchauffer, mais elle va mettre un petit peu de temps pour se réchauffer.	-Reprise-modification de « <i>elle va se réchauffer</i> » (R83) par actualisation → « <i>elle va se réchauffer plus lentement</i> » (R83). -Reprise-modification de « <i>Elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer</i> » (R83) par actualisation → « <i>elle va quand même se réchauffer, mais elle va mettre un petit peu de temps pour se réchauffer.</i> » (R83). -Reprise-modification de « <i>une croûte très froide</i> » (R83) par actualisation → « <i>cette croûte océanique elle est anormalement froide</i> » (R83). Les indicateurs langagiers : -« <i>très</i> » indique un degré superlatif (un degré élevé). Il est utilisé par la professeure pour montrer que la température est très élevée au niveau de l'axe de la dorsale. -« <i>Plus...Plus</i> » marque un lien de dépendance entre deux propositions.

		<p>-« <i>parce que</i> » conjonction de subordination qui marque la cause.</p> <p>Par (R81) et (R83), l'enseignante explique aux élèves la raison pour laquelle le métamorphisme des zones de subduction est qualifié de basse température. Donc entre R81 et R83, la condition de basse température caractéristique du métamorphisme des zones de subduction représente l'objet de discours en classe.</p>
84- Lucas D	J'ai <u>pas</u> compris <u>déjà</u> les fosses ? On a vu ça tout à l'heure.	<p>Déplacement de l'objet de discours des conditions de basse température caractéristique du métamorphisme des zones de subduction « <i>elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer</i> » (R83) vers les fosses « <i>J'ai pas compris déjà les fosses ?</i> » (R85).</p> <p>Les indicateurs langagiers :</p> <p>-« pas » : adverbe qui marque la négation.</p> <p>-« déjà » : adverbe qui marque un fait précédent.</p> <p>Par la question posée en (R84), l'élève cherche à comprendre la notion de fosses, qui a déjà été évoquée dans le propos de l'enseignante en (R81).</p>
85-P	C'est <u>parce qu'il</u> y a convergence, donc vous avez votre croûte océanique qui est froide, [...] elle a tendance à s'enfoncer [...] Donc, ça commence à s'enfoncer, la croûte océanique elle se déplace <u>dans ce sens-là</u> [...] et quand elle plonge elle forme quoi ? Elle forme un creux et ce creux on appelle ça une fosse, on appelle ça une fosse océanique.	<p>-« parce que » marque la cause.</p> <p>-« dans ce sens-là » indique le sens du déplacement de la lithosphère qui va s'enfoncer dans l'asthénosphère.</p> <p>Par cette réplique, l'enseignante cherche à préciser à l'élève la notion de fosses. Pour le faire,</p>

		<p>elle lui montre le sens de déplacement de la lithosphère océanique jusqu'à son enfouissement qui entraîne la formation selon elle d'un creux, nommé fosse.</p> <p>.</p>
86-Lucas	<p>Dans ce cas, il va y avoir un vide <u>ici</u> ? (l'élève a montré par ces mains la zone entre l'axe de la dorsale et la zone de la fosse océanique).</p>	<p>Déplacement de l'objet de discours de la notion des fosses « J'ai pas compris déjà les fosses ? » (R84) vers la formation d'un vide « il va y avoir un vide ici ? » (R86).</p> <p>Les indicateurs langagiers :</p> <p>-« ici » marque la position</p> <p>Par la question posée en (R86), l'élève pose le problème du vide qu'il localise entre l'axe de la dorsale et la fosse.</p>
87-P	<p>Vous <u>avez vu</u> alors normalement <u>en Première S</u>, c'est le modèle du tapis roulant [...] <u>A chaque fois</u>, vous avez un mouvement de divergence, remontée du magma et du coup, le trou au milieu va être comblé par la remontée d'un nouveau basalte [...]</p>	<p>-« avez vu » : marque le passé (humain).</p> <p>-« en Première S » : marque un niveau scolaire inférieur.</p> <p>-« A chaque fois » : expression qui marque la répétition de deux faits simultanés (mouvement de divergence et remontée d'un nouveau basalte).</p> <p>Remarque : Cette simultanéité avait déjà été mise en jeu précédemment (entre la vitesse de la plaque plongeante et l'évolution de sa température), mais l'échelle spatiale n'est pas la même [il s'agit de la zone de subduction vs l'axe de la dorsale en (R87)]</p> <p>Par cette réplique (R87), l'enseignante montre à l'élève qu'il n'y a pas de vide qui se forme entre l'axe de la dorsale et la zone de subduction à cause du remplacement continu de la lithosphère subduite par une nouvelle lithosphère océanique</p>

		qui se forme au niveau de l'axe de la dorsale, tout en précisant que ce mécanisme (« tapis roulant ») est étudié déjà en première S et représente par suite un prérequis selon elle.
88-Lucas	Et puis, ça se déplace ? [l'élève pose cette question avec une intonation exclamative]	Reprise-modification de « <i>elle se déplace dans ce sens là</i> » (R85) par actualisation → « Et puis, ça se déplace ? » (R88). Par la question posée en (R88), l'élève essaye de contester le modèle proposé par l'enseignante en (R87) ou de le conjuguer à d'autres données.
89-P	Alors, oui [...] ça va se déplacer. Et au bout d'un moment, ça <u>va être</u> , en <u>bout de chaîne</u> si tu veux, cette partie-là, elle <u>va être</u> tellement dense, qu'il va tendance à plonger.	Reprise-modification de « <i>elle se déplace dans ce sens-là</i> » (R85) par actualisation → « <i>ça va se déplacer</i> » (R89). « va être, en bout de chaîne » marque une finalité.
90-Salma	Il y a rapport avec les plaques ?	Par la question posée en (R90), l'élève essaye de s'inscrire dans un cadre global qui lui permet peut-être de comprendre comment la lithosphère océanique subduite est remplacée continuellement par une nouvelle lithosphère océanique qui se forme au niveau de l'axe de la dorsale, empêchant ainsi la formation d'un vide.
91-P	Bien sûr, oui, oui. Oui, oui, oui bien sûr c'est au niveau de la tectonique des plaques, parce que vos plaques se déplacent, c'est ce qui a décrit Wegener en Première, je pense [...]	Reprise-modification de « modèle du tapis roulant » par référencement → « <i>la tectonique des plaques</i> » (R91). Remarque : l'enseignante parlait dans ce tour de parole de la tectonique des plaques tout en évoquant Wegener qui est le pionnier de la théorie de la dérive des continents (et non pas de la tectonique des plaques).

Par les tours de parole (R81) et (R83), la professeure cherche à préciser les raisons pour lesquelles le métamorphisme des zones de subduction est qualifié de Basse température. Pour cela, elle leur trace sur le tableau un schéma montrant la lithosphère océanique avec l'axe de la dorsale d'un côté et la zone des fosses d'un autre côté. L'usage des termes « *là, c'est la croûte océanique et ici j'ai la fosse* » (R81) et « *là, à l'axe de la dorsale* » (R81) le prouve. Elle vise par ce schéma à montrer aux élèves qu'en s'éloignant de l'axe de la dorsale (où la température est très élevée), la lithosphère océanique formée se refroidit. Donc, en s'enfonçant au niveau des fosses, elle se réchauffe lentement puisqu'elle est froide. D'où, la qualification du métamorphisme des zones de subduction par un métamorphisme de BT : « *Plus je m'éloigne, plus votre croûte a eu de temps de refroidir, parce qu'elle est dans l'eau froide. Elle va avoir du temps à refroidir [...] Donc, je vais avoir une croûte très froide et du coup elle s'enfonce, ben, elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer [...] cette croûte océanique elle est anormalement froide, elle va quand même se réchauffer, mais elle va mettre un petit peu de temps pour se réchauffer.* » (R83).

En formulant la question de la réplique (R86) « *Dans ce cas, il va y avoir un vide ici ?* », l'élève Lucas a fait déplacer la discussion du métamorphisme des zones de subduction vers la formation du vide. Ainsi, par cette question il exprimait le problème du vide, après que la professeure a précisé que « *votre croûte océanique qui est froide, [...] elle a tendance à s'enfoncer [...] et quand elle plonge elle forme quoi ? Elle forme un creux et ce creux on appelle ça une fosse* » (R85).

Le fait de mettre l'accent dans cette réplique sur le plongement de la lithosphère entraînant la formation d'une fosse, ainsi que la présentation par la professeure en (R81) de la lithosphère océanique en la positionnant entre l'axe de la dorsale et la fosse, ont probablement poussé l'élève à poser le problème du vide. De cette façon, même si ce macro-épisode est considéré dans l'analyse thématique comme discordant signalant un désaccord entre le thème introduit par l'enseignante et le thème posé par les apprenants, nous pensons à ce niveau d'analyse que les propos³⁰ ci-dessus de l'enseignante ont contribué dans la mise en exergue de ce problème en classe. Ainsi pour l'apprenant, l'enfouissement de la lithosphère océanique se conjuguerait à la formation d'un vide situé selon lui entre l'axe de la

³⁰ : L'enseignante met l'accent sur le plongement de la lithosphère océanique et elle présente aussi cette lithosphère océanique bornée entre l'axe de la dorsale et la fosse.

dorsale et la zone des fosses (l'élève dit « *ici* » et il a indiqué par ses mains la zone concernée). Le propos de l'élève montre la difficulté qu'il a à articuler deux processus synchrones qui sont l'enfoncement de la lithosphère océanique au niveau des zones de subduction et le remplacement de cette lithosphère qui a plongé par la formation continue d'une nouvelle lithosphère océanique (au niveau de l'axe de la dorsale). Nous pouvons dire ici que l'apprenant ne se saisit pas de la simultanéité de ces deux processus. Tout se passe comme s'il considérait la plaque comme un objet immuable permanent. La question posée par l'élève Lucas en (R88) « *Et puis, ça se déplace ?* » qui vient suite à la précision de l'enseignante « *A chaque fois, vous avez un mouvement de divergence, remontée du magma et du coup, le trou au milieu va être comblé par la remontée d'un nouveau basalte [...]* » (R87), peut être expliquée par le fait que l'élève cherche ici à contester le modèle proposé par l'enseignante en essayant d'expliquer l'existence de déplacement des plaques tout en insistant sur les possibles vides que ce mouvement peut entraîner. Cette question marque selon nous l'hétéroglossie qui s'installe dans le discours à cause de la tension qui existe entre le raisonnement de l'élève et celui de l'enseignante. En fait, si la professeure se place dans le cadre de la tectonique des plaques où la lithosphère subduite au niveau des fosses est remplacée continuellement par une nouvelle lithosphère océanique au niveau de la zone des dorsales, l'élève s'inscrit plutôt dans un contexte de dérive des plaques où la plaque se déplace et qui selon lui en bougeant, elle entraîne la formation d'un vide : son raisonnement « *met vraisemblablement en jeu du "mécanisme simple"* ». C'est « *un raisonnement séquentiel (post hoc) mobilisant de la causalité simple (une cause entraîne un effet : propter hoc)* » (Orange Ravachol, 2003, p. 65). Néanmoins, cette hétéroglossie qui se met en place dans le discours, n'a pas été traitée dans la suite du macro-épisode. En fait, les apprenants n'ont pas été amenés ni à critiquer, ni à confronter le raisonnement qui amène l'élève Lucas à supposer la formation d'un vide, en s'engageant dans la production d'autres explications possibles.

Par la question posée par l'élève Salma en (R90) « *Il y a rapport avec les plaques ?* », cette dernière cherche à faire le lien entre les répliques de l'enseignante en (R87) « *A chaque fois, vous avez un mouvement de divergence, remontée du magma et du coup, le trou au milieu va être comblé par la remontée d'un nouveau basalte [...]* » et en (R89) « *ça va se déplacer. Et au bout d'un moment, ça va être, en bout de chaîne si tu veux, cette partie-là, elle va être tellement dense, qu'il va*

tendance à plonger ». En posant cette question, l'élève Salma essaye de s'inscrire dans le cadre global de la tectonique des plaques qui lui permet peut-être d'expliquer l'enfoncement de la lithosphère océanique au niveau des zones de subduction et le remplacement de cette lithosphère océanique par la formation continue d'une nouvelle lithosphère océanique, empêchant ainsi la formation d'un vide entre la zone des fosses et l'axe de la dorsale.

Nous mentionnons ici que le problème du vide posé par l'élève a été étudié avant dans les travaux d'Orange Ravachol (2007), où les apprenants ont articulé « *le chevauchement des plaques à leur écartement dans d'autres zones du globe. Cet écartement se matérialise par un trou océanique qui fait immédiatement problème pour la classe* » (Orange Ravachol, 2007, p. 57). Dans cette étude et au contraire de notre travail, ce problème a été traité en classe jusqu'à ce que les lycéens « évacuent » le problème du trou. « *Leur réflexion s'appuie sur l'idée [...] que si les plaques convergent en certains endroits, elles s'écartent forcément en d'autres. Elle les porte à construire la nécessité d'un renouvellement des plaques et les engage dans une approche systémique du fonctionnement de la partie superficielle de la Terre : les plaques ne sont plus immuables* » (ibid, 2007, p. 66-67).

A la fin de cette analyse, nous précisons que lors de l'entretien que nous avons mené avec Jolivet, et suite à notre question « *j'ai remarqué parmi les élèves, [...] ils ont dit puisqu'il y a subduction, il va y avoir un vide parce qu'il va y avoir un enfouissement de la lithosphère océanique, donc il va y avoir un vide. Ici, ils ont oublié en fait qu'il y a formation continue d'une lithosphère océanique* » (Annexe 1, réplique 179), l'expert insistait « *Exactement, oui, il y a jamais de vide* » (ibid, intervention 180).

Suite à l'analyse épistémologico-langagière du MEP7, nous consacrons la partie suivante à l'analyse du MEP5.

- **L'analyse du MEP5 qui étudie le problème de devenir de l'eau océanique (posé par les élèves)**

Le macro-épisode MEP5 pose de point de vue épistémologique le problème de la vitesse de déplacement de la masse d'eau océanique par rapport à la vitesse de mouvement des plaques tectoniques. Sur ce point, Jolivet nous a précisé, que par

exemple lors de la subduction, « *L'eau, l'eau de l'océan, elle reste dans l'océan, elle ne descend pas dans la subduction sauf celle qui est contenue dans les sédiments* » (Annexe 1, intervention 135) : « *Les sédiments quand ils se déposent, ils sont gorgés d'eau* » (ibid, intervention 138), donc « *il y a de l'eau dedans beaucoup, et puis il y a aussi de l'eau dans la croûte océanique puisqu'au niveau des dorsales, il y a de l'eau qui circule dans les failles, etc... Donc, il y a de l'eau dans la croûte océanique. Il y a de l'eau dans le manteau supérieur qui transforme le manteau en Serpentine* » (ibid, intervention 139). « *Tout ça, il y a de l'eau là-dedans. Donc, originellement, c'est l'eau de l'océan mais c'est pas l'eau de l'océan qui circule aujourd'hui, c'est l'eau qui est piégée dans la croûte* » (ibid, intervention 141). « *Donc, cette eau, elle va descendre avec l'asthénosphère. Sinon, l'eau dans laquelle il y a les poissons, elle s'en fiche* » (ibid, intervention 143) « *de la subduction, elle circule avec des courants océaniques etc, et à des vitesses qui sont d'une grandeur supérieure à la subduction. Ce sont deux processus complètement indépendants* » (ibid, intervention 145), « *l'eau où on nage ne va pas dans la subduction* » (ibid, intervention 147). Il ajoutait que le mouvement de la masse océanique « *se fait à des vitesses rapides, [...] c'est les vitesses de bateau. Ça n'a rien à voir avec les mouvements des plaques les unes par rapport aux autres qui sont de quelques cm\ an* » (ibid, intervention 162).

Suite à ces précisions d'ordre épistémologique, nous présentons maintenant l'analyse épistémologico-langagière du MEP5, tout en essayant de nous focaliser sur les indicateurs langagiers et les différentes opérations logico-discursives présents dans ce macro-épisode et qui nous ont permis de mieux cerner le problème d'ordre épistémologique explicité ci-dessus (le problème de la vitesse de mouvement des masses de l'eau océanique par rapport à celle des plaques tectoniques).

L'analyse épistémologico-langagière du MEP5 est présentée dans le **tableau.15** : Ce tableau montre d'une part les interventions de la professeure et des lycéens qui ont eu lieu durant ce macro-épisode, et indique d'autre part les opérations logico-discursives mises en évidence et les indicateurs langagiers identifiés pour mener notre analyse.

Tableau. 15. L'analyse du macro-épisode MEP5

	Interventions	Les opérations mises en évidence et les indicateurs langagiers
61-P	[...] Vous <u>pouvez avoir</u> [...] la fermeture des océans <u>une fois que</u> la croûte soit très vieille, elle subduit <u>et</u> vous pouvez avoir une collision <u>et</u> formation d'une chaîne de montagne à ce moment-là.	-« une fois que...et...et... » marque la succession des séquences. Par cette réplique, l'enseignante cherche à présenter le scénario de la formation des Alpes.
62-Mathis	<u>Et du coup</u> , l'eau va changer, c'est-à-dire qu'elle va peut-être déborder sur les terres, non ?	Changement de l'objet de discours du « <i>la fermeture des océans une fois que la croûte soit très vieille, elle subduit et vous pouvez avoir une collision et formation d'une chaîne de montagne</i> » vers « <i>l'eau va changer, c'est-à-dire qu'elle va peut-être déborder</i> ». Les indicateurs langagiers : -« Et du coup » : c'est un terme qui marque la conséquence. L'usage de ce terme dans la question de l'apprenant, montre que ce dernier a réussi de poser le problème de devenir de l'eau océanique à partir de ce qui a été déjà proposé par l'enseignante en (R61).
63-P	Alors, <u>c'est pas</u> qu'elle déborde, <u>c'est que</u> vous allez avoir une répartition des océans qui va être différente. Et du coup, la carte sera pas la même que la carte <u>d'aujourd'hui</u> . Elle évolue <u>durant les temps géologiques</u> . Vous savez, Paris et New York qui s'éloignent petit à petit chaque année. On s'éloigne, je pense en moyenne de 1cm. C'est pas beaucoup, mais <u>sur l'échelle géologique</u> , vous allez avoir effectivement un éloignement des deux masses continentales [...]	-Reprise-modification de « <i>elle va peut-être déborder</i> » (R62) par actualisation → « <i>c'est pas qu'elle déborde</i> » (R63). -Reprise-modification de « <i>[...] une répartition des océans qui va être différente</i> » (R63) par explication → « <i>Elle évolue durant les temps géologiques</i> » (R63). Les indicateurs langagiers : -« C'est pas...» marque la négation. -« C'est que » indique une mise en relief de la deuxième partie de la phrase « <i>vous allez avoir une répartition des océans qui va être</i>

		<p><i>différente ».</i></p> <p>-« <i>aujourd'hui</i> » adverbe qui marque l'actuel.</p> <p>-« <i>durant les temps géologiques...sur l'échelle géologique</i> » marque un temps long.</p> <p>Par l'utilisation de ces termes, la professeure invalide la proposition de l'élève en (R62) tout en précisant selon nous que la répartition de l'eau océanique, évolue sur l'échelle des temps géologiques.</p>
--	--	---

67-P	<p>[...] T'as <u><i>d'abord</i></u> subduction, et <u><i>le terme ultime</i></u> de cette subduction, quand il n'y aura plus de croûte océanique, <u><i>à ce moment là</i></u>, les croûtes continentales qui <u><i>vont</i></u> se rencontrer et former un relief [...]</p>	<p>-Reprise –modification de « <i>Vous pouvez avoir [...] la fermeture des océans. Une fois que la croûte soit très vieille, elle subduit et vous pouvez avoir une collision et formation d'une chaîne de montagne à ce moment-là</i> » (R61) par actualisation →</p> <p>« <i>T'as d'abord subduction, et le terme ultime [...] quand il n'y aura plus de croûte océanique, à ce moment-là, les croûtes continentales qui vont se rencontrer et former un relief</i> » (R67).</p> <p>Les indicateurs langagiers :</p> <p>« <i>d'abord, quand, à ce moment-là</i> » marquent la succession d'épisodes aboutissant à la formation des chaînes de montagnes.</p> <p>Par l'usage de ces termes, la professeure représente de nouveau le scénario de la formation de chaîne de montagne.</p> <p>-« <i>vont</i> » marque la finalité.</p>
68-LucasD	Oui. Et du coup, l'océan va se fermer ?	Déplacement de l'objet de discours de nouveau du scénario

		<p>de la formation des chaînes de montagnes (R67) vers le devenir de l'eau océanique (R68).</p> <p>Par cette question, l'apprenant essaye de trouver une solution à ce problème .</p>
69-P	Et là oui, l'océan il aura complètement disparu, il se sera complètement fermé. Oui ?	
70-Amina	Et l'eau, elle va où ?	<p>Reprise-modification de « <i>l'eau va changer [...], elle va peut-être déborder sur les terres, non ?</i> » (R62) par actualisation → « <i>Et l'eau, elle va où ?</i> » (R70).</p> <p>Par cette question, l'élève relance de nouveau le problème de devenir de l'eau océanique qui a été déjà posé en (R62).</p>
71-P	<p>Alors, l'eau [...] <u>parce que</u> là vous avez une image à un endroit donné, mais il <u>faudra</u> avoir une image de vision plus globale à l'échelle du globe[...] ça se fait pas du jour au lendemain [...] mais tu vas avoir des nouvelles répartitions de masse d'eau. Je vais essayer de réfléchir <u>pour pouvoir</u> expliquer ça <u>mieux</u>, avec des schémas <u>peut-être</u> pour <u>mieux</u> comprendre [...]</p>	<p>Reprise-modification de « <i>vous allez avoir une répartition des océans qui va être différente [...] Elle évolue durant les temps géologiques</i> » (R63) par actualisation → « <i>ça se fait pas du jour au lendemain [...] mais tu vas avoir des nouvelles répartitions de masse d'eau</i> » (71).</p> <p>Les indicateurs langagiers :</p> <ul style="list-style-type: none"> -« parce que » conjonction de subordination qui marque la cause. -« <i>faudra</i> » marque l'obligation au futur. -« pour...mieux » exprime le but. -« peut-être » marque la possibilité. -« mieux » : adverbe qui veut dire d'une manière meilleure par rapport à l'explication menée en classe par l'enseignante. <p>Par l'utilisation de ces termes, l'enseignante reprend selon nous l'explication du devenir de l'eau océanique déjà formulée en (R63), tout en affirmant que le document support utilisé durant</p>

		la séance reste insuffisant pour expliquer le devenir de cette eau océanique.
--	--	---

Par la réplique (R61), l'enseignante représente aux élèves la succession d'épisodes aboutissant à la formation d'une chaîne de montagne de collision qui les enchaîne selon un temps séquentiel de mise en histoire. L'utilisation des « *une fois que...et...et* » le prouve.

Par la question posée en (R62), l'apprenant Mathis fait déplacer le discours du scénario de la formation d'une chaîne de montagne de collision vers le devenir de l'eau océanique qu'il pense « *qu'elle va déborder sur les terres* ». Nous précisons à ce niveau que même si nous avons considéré cet épisode dans l'analyse thématique comme discordant marquant l'opposition entre le thème proposé par la professeure et celui posé par l'élève, nous pensons à ce niveau d'analyse épistémologico-langagière, que le propos de l'enseignante « *vous pouvez avoir [...] la fermeture des océans* » (R61) qui vient avant que l'élève pose sa question en (R62), a permis ce dernier de détecter le problème de devenir de l'eau océanique. En fait, l'usage du terme qui marque la conséquence « *Et du coup* » suivi par « *l'eau va changer* » marque très bien que l'apprenant a réussi à poser sa question sur le devenir de l'eau océanique à partir de ce qui a été dit juste avant par l'enseignante.

Par l'utilisation de l'adverbe de négation « pas » dans la réplique (R63), la professeure invalide la proposition de l'élève Mathis formulée en (R62) « *[...] qu'elle va peut-être déborder sur les terres, non ?* », tout en indiquant que la répartition des eaux océaniques va être différente à l'échelle des temps géologiques « *[...] c'est que vous allez avoir une répartition des océans qui va être différente. Et du coup, la carte sera pas la même, que la carte d'aujourd'hui [...] Elles évoluent durant les temps géologiques* ». Vraisemblablement, les apprenants ont adopté cette solution qui n'est plus étrange pour eux. Mais, par la réplique (R68) de l'élève Lucas D « *oui. Et du coup, l'océan va se fermer ?* » et la réplique (R70) de l'élève Amina, « *Et l'eau, elle va où ?* » les apprenants ont réussi de relancer le dialogue sur le devenir de l'eau océanique en répétant avec modification la question déjà posée par l'apprenant Mathis en (R62). Par ces deux répliques (R68) et (R70), les apprenants montrent que la solution donnée par l'enseignante en (R63) sur le devenir de l'eau océanique reste ambiguë pour eux. Ceci leur a poussé de reposer de nouveau le problème de l'eau océanique. Nous pensons que le propos de l'enseignante sur la disparition de la

croûte océanique en (R67) « [...] *quand il n'y a aura plus de croûte océanique* » a aidé les élèves à remettre en question le problème de devenir de l'eau océanique. Nous arrivons à cette conclusion à partir du terme « *Et du coup* » utilisé par l'élève Lucas.D en (R68) avant de poser la question « l'océan va se fermer ? Ainsi, cette question de l'élève résulte d'une conséquence logique à partir de ce qui a été déjà dit dans l'intervention précédente de l'enseignante. Nous interprétons la réponse de l'enseignante en (R71) « [...] *ça se fait pas du jour au lendemain, mais tu vas avoir des nouvelles répartitions de masse d'eau* » à la question de l'élève Amina en (R70) comme une reprise (avec modification) du contenu déjà présenté par elle-même en (R63) « [...] *c'est que vous allez avoir une répartition des océans qui va être différente [...] Elles évoluent durant les temps géologiques [...] Je pense en moyenne 1cm/an [...]* ».

L'usage en (R71) du verbe falloir dans le futur simple « faudra » précédant la phrase « *avoir une image de vision plus globale à l'échelle du globe* », ainsi que l'utilisation du verbe aller au présent (vais) suivi du verbe essayer à l'infinitif (marquant ainsi le futur proche) dans la phrase « *Je vais essayer de réfléchir pour pouvoir mieux expliquer* » peuvent être interprétés par le fait que l'enseignante considère le document support utilisé dans ce macro-épisode « Fiche de travail sur l'histoire des Alpes (avec l'épisode de subduction) » (voir **Fig.14**), comme insuffisant pour expliquer aux élèves le devenir de l'eau océanique. Il s'agit en fait d'un support qui comporte les figures présentant l'ouverture océanique (où l'océan figure sur le schéma), la subduction et la collision à une échelle locale et non pas à une échelle globale. Ainsi, ce macro-épisode est terminé et l'explication de devenir de l'eau océanique reste toujours pour partie ambiguë pour les apprenants. L'usage par la professeure de la proposition « pour » accompagnée de l'adverbe qui veut dire d'une manière plus convenable « mieux » et « comprendre » prouve cela.

Nous pensons que dans ce macro-épisode, l'eau en question selon les élèves est celle de l'océan et non pas celle contenue dans les roches subduites. D'un événement local (Selon l'élève l'eau « *va peut-être déborder sur les terres* »), les apprenants semblent passer à travers les échanges de l'enseignante, à une échelle spatiale plus globale, avec un problème de déplacement de masse océanique qu'ils conjuguent dans une même échelle de temps au problème de la subduction.

Suite à l'analyse de MEP5, nous passons maintenant à l'analyse épistémologico-langagière du MEP8.

- **L'analyse du MEP8 qui étudie le problème de la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique (posé par les élèves)**

De point de vue épistémologique, le macro-épisode MEP8 pose le problème de l'exhumation des roches. Ce phénomène peut être défini comme étant la remontée des roches qui étaient initialement en profondeur vers la surface. Selon les géologues, ce phénomène explique par exemple la position perchée au sein des chaînes de montagnes, de roches métamorphiques d'origine océanique formées initialement en profondeur suite à l'enfoncement de la lithosphère océanique par subduction.

Dans ce cadre, Nous mentionnons ici que lorsque nous avons posé à Jolivet la question « *comment on peut trouver des roches métamorphiques normalement qui se sont formées ou des minéraux qui montrent un métamorphisme, dans des conditions de haute pression-basse température, qui se trouvent dans les sommets des Alpes ?* » (Annexe1, intervention 63), il nous a précisé que « *la majeure partie des ophiolites dans les Alpes par exemple si vous prenez le grand massif de l'Oisans ou le massif de Zermatt en suisse, sont des massifs, vous avez des roches ophiolitiques depuis les péridotites du manteau jusqu'aux basaltes et sédiments qui été posés par au-dessus qui elles sont métamorphiques et qui ont enregistré des conditions de haute pression- basse température : schiste bleu, éclogite* » (ibid, réplique 70), « *Voilà, donc elles sont descendues jusqu'à 60, 80, 100 Km de profondeur et qui sont remontées* » (ibid, réplique 72). Il précisait alors qu'il y a « *des roches océaniques qui sont passées en subduction et qui sont remontées* » (ibid, réplique 74), « *ça, ça pose le problème des raisons d'exhumation des roches qui ont passé en subduction* » (ibid, réplique 76). Pour expliciter le mécanisme d'exhumation il ajoutait que « *ce qu'on pense aujourd'hui dans la zone de subduction, que ce soit la lithosphère océanique ou la lithosphère continentale, alors la lithosphère elle va amener avec elle des sédiments, ou des roches magmatiques etc, elle va amener jusqu'à des profondeurs très variables selon les unités, jusqu'à ce que le différentiel de densité entre ces roches qui plongent et l'environnement, c'est-à-dire le manteau en gros, soit suffisamment faible pour que ces roches puissent continuer à rester attachées à la lithosphère, et il y a un moment où aux différentes raisons, le contact entre ces roches qui sont enfouies et la lithosphère qui descend va être fragilisé par, par exemple des fuites pour transformer la roche et la rend plus faible et du coup elles vont se détacher de la lithosphère qui plonge et comme elle sont plus légères,*

elles vont remonter dans l'interface entre deux plaques » (ibid, réplique 80), « ce qu'on appelle le canal de subduction » (ibid, réplique 82). « Donc, elles descendent avec la lithosphère jusqu'à un certain point, puis à un moment lorsqu'elles atteignent le pic de pression, elles vont se détacher et remonter » (ibid, réplique 84), « Voilà, on sait que ça existe, que ça fonctionne, on ne sait pas vraiment pourquoi, comment, il y a beaucoup d'articles là-dessus, beaucoup de travaux là-dessus » (ibid, réplique 86). Suite à ces précisions menées ci-dessus, nous présentons maintenant l'analyse épistémologico-langagière du MEP5, tout en essayant de nous focaliser sur les indicateurs langagiers et les différentes opérations logico-discursives présents dans ce macro-épisode et qui nous ont permis d'identifier le problème d'exhumation.

L'analyse épistémologico-langagière du MEP8 est présentée dans le **tableau.16** : Ce tableau montre d'une part les interventions de l'enseignante et des élèves qui ont eu lieu durant ce macro-épisode, et présente d'une autre part les opérations logico-discursives mises en évidence et les indicateurs langagiers identifiés pour faire notre analyse.

. Tableau. 16. L'analyse du macro-épisode MEP8

	Interventions	Les opérations mises en évidence et les indicateurs langagiers
91-P	[...] Quand que vous avez une subduction, vous allez avoir <u>une roche de la croûte océanique</u> , c'est quoi déjà, <u>ces roches de la croûte océanique</u> ?	Reprise-modification de « <u>une roche de la croûte océanique</u> » par actualisation → « <u>ces roches de la croûte océanique</u> ». « subduction » → « <u>ces roches de la croûte océanique</u> » qui deviennent l'objet de discours.
92-Mathis	Basalte.	Reprise-modification de « <u>ces roches de la croûte océanique</u> » (R91) par référenciation → « <u>basalte</u> » (R92).
93-P	[...] En gros, vous avez <u>votre basalte</u> , <u>votre gabbro</u> , il <u>va plonger</u> [...] C'est la <u>haute pression</u> , <u>basse température</u> , et du coup, ces gabbros et ces basaltes ils subissent <u>un métamorphisme</u> : Les roches,	-Reprise-modification de « <u>basalte</u> » (R92) par ajout → « <u>votre basalte</u> , <u>votre gabbro</u> » (R91). -Actualisation qui détermine

	elles vont se modifier quelque peu, et quand un gabbro est métamorphisé, j'appelle ça métagabbro [...]	l'angle de présentation de l'objet de discours : « ces roches de la croûte océanique » → « va plonger [...] C'est la haute pression, basse température ». -Reprise-modification de « va plonger [...] C'est la haute pression, basse température » par référenciation → « métamorphisme ».
94-Salma	Est-ce que on ne les trouve pas <u>dans</u> les chaînes ? <u>ici</u> ?	<i>Déplacement de l'objet de discours par l'élève Salma du « métamorphisme » (R93) vers « on ne le trouve pas dans les chaînes » (R94) qui devient le nouvel objet de discours.</i> Les indicateurs langagiers : -«dans... ici » : marque la position. Par la question posée en (R94), l'élève a pu probablement poser le problème de la localisation voire peut-être de la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique (formées suite à la subduction de la lithosphère océanique).
95-P	Alors_[...] quand je continue entre mes deux chaînes, entre mes deux massifs continentaux, je vais retrouver ce métagabbro parfois en surface.	Par la réplique (R95), l'enseignante explique qu'il est possible de trouver ces roches métamorphiques d'origine océanique en surface.
96-Salma	<u>Mais</u> ça se descend ?	-« Mais » marque la dissonance. La réplique de l'élève (R96) marque l' hétéroglossie qui s'installe dans le discours, indiquant ainsi la tension qui

		se crée entre le raisonnement de l'élève et celui de l'enseignante : Pour l'élève, puisque les roches métamorphiques d'origine océanique se forment suite au plongement de la lithosphère océanique par subduction, il est impossible de les trouver en surface. En revanche, le propos de l'enseignante montre la possibilité de la présence de ces roches en surface.
97-P	[...] Il y a un <u>mécanisme</u> , on va alors parler rapidement parce que c'est pas trop programme. Il s'appelle l'obduction et vous allez avoir des petites écailles, des petits morceaux qui vont, si tu peux, se retrouver en surface, [...] par exemple, on voit le complexe ophiolitique, ça correspond à la croûte océanique qui se retrouve en surface, c'est <u>parce que</u> vous avez des petits bouts qui sont décollés. Simplement, lorsque je déprime il y a des petites écailles qui se trouvent en surface [...]	Reprise-modification de « <i>je vais retrouver ce métagabbro parfois en surface</i> » (R95) par explication → « <i>la croûte océanique qui se retrouve en surface, c'est parce que vous avez des petits bouts qui sont décollés</i> » (R97). -Reprise-modification de « <i>un mécanisme..pas trop programme</i> » (R97) par référenciation → « <i>l'obduction</i> » (R97).
98-Lucas D	Et du coup, vous allez trouver ce métagabbro au niveau des Alpes ?	Reprise-modification de « <i>on ne les trouve pas dans les chaînes ?</i> » (R94) par actualisation → « <i>vous allez trouver ce métagabbro au niveau des Alpes ?</i> » (R98).
99-P	Ben, oui [...]	

Par l'intervention (91) et l'intervention (93), l'enseignante cherche à présenter aux élèves le mécanisme de métamorphisme des zones de subduction. L'usage de la conjonction de subordination qui marque un lien de dépendance « *Quand* » dans son intervention « *Quand vous avez une subduction, vous allez avoir une roche de la croûte océanique [...]* » (R91) « *[...] vous avez votre basalte, votre gabbro, il va plonger [...]* C'est la haute pression, basse température [...] ils subissent un métamorphisme » (R93) le prouve.

Par la question posée en (R94) « *Est- ce qu'on ne les trouve pas dans les chaînes ?* », l'élève Salma semble déplacer le discours du métamorphisme des

zones de subduction vers la position de ces roches métamorphiques dans les chaînes. En formulant alors cette intervention et surtout celle émise en (R96) « Mais ça se descend ? », l'élève Salma a réussi selon nous de détecter le problème de la position anormale des minéraux des roches métamorphiques d'origine océanique.

Nous pensons que l'utilisation de l'adverbe de négation « ne pas » dans la question (R94) ne signifie pas un acte de rejeter ou nier une idée, mais elle indique plutôt que l'élève veut vérifier un fait dont elle avait déjà connaissance. Nous émettons l'hypothèse que l'apprenante a réussi de poser le problème de la position perchée des minéraux des roches métamorphiques d'origine océanique en faisant le lien avec la notion d'ophiolites, qui a été déjà étudiée en classe durant la première séance et dont aucun élève n'a posé précédemment la question de la position anormale des ophiolites dans les Alpes : « *On va trouver alors une série des roches qui témoigne la présence d'un océan. Cette série de roches [...] des gabbros, des basaltes et en dessus, je vais avoir des sédiments [...] Cette série de roches, ça a un nom [...] On appelle ça une ophiolite* » (Réplique 20 de l'enseignante, séance 1) ; « *On vous parle de gabbro et même de métagabbro. Alors, les métagabbros se sont des gabbros qui ont subi quoi ?* » (Réplique 17 de l'enseignante, séance 1), « *un métamorphisme* » (Réplique 19 de l'enseignante, séance 1).

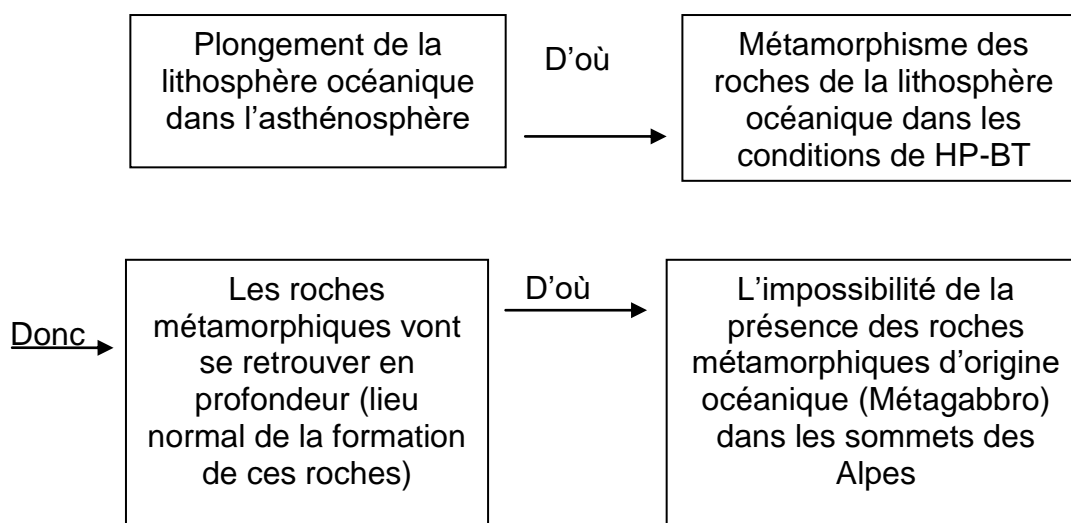
La réplique de l'élève Salma en (R94) « *Est-ce que on ne les trouve pas dans les chaînes ? ici ?* » suivie par celle émise en (R96) « *Mais ça se descend ?* », marquent selon nous l'hétéroglossie qui se met en place dans le discours indiquant ainsi la tension qui existe entre le raisonnement de l'élève et celui de l'enseignante. L'usage de la conjonction qui marque la dissonance « *mais* » le prouve.

La parole de l'élève montre ici que cette dernière ne peut pas prendre en charge les deux énoncés suivants :

-Plongement des roches de la lithosphère océanique dans l'asthénosphère par subduction, entraînant leur métamorphisme (Le gabbro devient Métagabbro).

-La présence de roches métamorphiques d'origine océanique (ex : le métagabbro) dans les sommets des chaînes de montagnes.

Ainsi, l'élève Salma a construit tout d'abord son raisonnement suivant le modèle suivant :



En revanche, nous pouvons remarquer que cette hétéroglossie n'a pas été traitée dans la suite du macro-épisode où les élèves auraient pu être invités à proposer des solutions possibles à ce problème et les argumenter en utilisant leurs acquis individuels et collectifs.

Dans la réplique (R97), l'enseignante donne la solution du problème de la position perchée des minéraux des roches métamorphiques d'origine océanique dans les chaînes de montagnes en précisant que lors de la collision, il y a « *des petits bouts* » de « *la croûte océanique* » « *qui sont décollés* », « *il y a des petites écailles qui se trouvent en surface* » (R97). Par la réponse formulée par l'enseignante, cette dernière cherche à fermer rapidement le dialogue mené en classe sur la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique vu qu'elle considère ce problème comme hors programme. L'usage de la phrase « [...] *Il y a un mécanisme, on va alors parler rapidement parce que c'est pas trop programme* » (R97) le montre très bien.

Suite à l'analyse de MEP8, nous consacrons la partie suivante à l'analyse épistémologico-langagière du MEP10.

- **L'analyse du MEP10 qui étudie le problème du devenir de la lithosphère océanique enfouie (posé par les élèves)**

D'un point de vue épistémologique, le macro-épisode MEP10 pose le problème du devenir de la lithosphère océanique enfouie. Il met en lumière le phénomène du magmatisme des zones de subduction. Ce phénomène résulte de la déshydratation des roches de la lithosphère océanique subduite, qui depuis leur formation au niveau

de l'axe de la dorsale jusqu'à leur arrivée dans la zone de subduction, vont incorporer de l'eau issue de l'océan. La libération d'eau entraîne la fusion partielle des péridotites du manteau provoquant ainsi la génération du magma. Plus explicitement, « *Dans des conditions de haute pression et basse température, les minéraux hydratés des basaltes et des gabbros de la croûte océanique (faciès « Schiste Vert ») et ceux des sédiments portés par la plaque (silice, carbonates, argiles) se transforment en assemblages plus denses et se déshydratent progressivement. [...] Les vitesses de déshydratation sont élevées jusqu'à la déstabilisation des amphiboles [...] La libération de fluides de la plaque plongeante est à l'origine de la fusion partielle dans le coin de manteau et du magmatisme d'arc. Hattori et Guillot (2003) proposent aussi l'implication de la serpentine comme génératrice du magmatisme d'arc de par sa grande teneur en eau* » (Bezacier, 2011, p. 17-19).

Suite à ces précisions épistémologiques, nous passons maintenant à l'analyse épistémologico-langagière du MEP10, tout en essayant de nous focaliser sur les indicateurs langagiers et les différentes opérations logico-discursives présents dans ce macro-épisode et qui nous ont permis d'identifier le problème de magmatisme

L'analyse épistémologico-langagière du MEP10 est présentée dans le tableau ci-dessous : Ce tableau présente d'un côté les interventions de l'enseignante et des élèves qui ont eu lieu durant ce macro-épisode, et indique d'un autre côté les opérations logico-discursives mises en évidence et les indicateurs langagiers identifiés pour faire notre analyse.

Tableau. 17. L'analyse du macro-épisode MEP10

	<i>Interventions</i>	<i>Les opérations mises en évidence et les indicateurs langagiers</i>
149-P	Au bout d'un moment, si je continue à avoir <u>convergence</u> , là j'ai un contact entre <u>deux lithosphères</u> [...] qui vont être de <u>même densité</u> et du coup [...]le mouvement ne va pas continuer avec l'enfoncement de la croûte, de la lithosphère continentale sous une autre lithosphère continentale. C'est pas	« <i>convergence...entre deux lithosphères de même densité</i> » est l'objet de discours. Par la réplique (R149),

	possible.[...] Qu'est ce qui va se passer ? [...] Qu'est ce qui se passe ? Vous allez avoir des failles. [...] Ces failles qui témoignent d'une convergence. On appelle ça faille ?	l'enseignante cherche à expliquer aux élèves les indices de collision.
150-Lucas	Faille inverse.	
151-P	Faille inverse. D'accord [...] Du coup, quand je raccourcis, ça c'est votre chapitre 1. Qu'est ce qui se passe ?	
152-Salma	Epaississement.	
153-P	Epaississement de la croûte et mon Moho et bien va, si vous voulez, plus profond. Je vais avoir un épaississement crustal. J'ai ce qu'on appelle un phénomène de collision. [...]Oui ?	
154-LucasD	Nous, nous avons vu que le Moho qui est en dessous, il est plus bas ?	Reprise-modification de « <i>mon Moho va...plus profond</i> » (R154) par actualisation → « <i>le Moho... il est plus bas</i> » (R154).
155-P	Alors, en fait si tu as empilement de matériel, tu vas avoir du coup plus de matériel. D'accord ?	Reprise-modification de « <i>épaississement crustal</i> » (R153) par actualisation → « <i>empilement de matériel</i> » (R155).
156-Lucas D	D'accord.	
157-P	Et du coup, ça va tendance à s'enfoncer dans l'asthénosphère. [...] Je ne sais pas si t'as vu le petit modèle que je t'avais montré avec les bouchons. Non ?	Reprise-modification de « <i>je vais avoir un épaississement crustal</i> » (R 153) par explication → « <i>ça va tendance à s'enfoncer dans l'asthénosphère</i> » (R157).
158-Lucas D	Non.	
159-P	Tu te souviens avec des bouchons des bouts de bois et quand si je mets un bout de bois dessus, j'empile du matériel [...] et je vais avoir un enfoncement du Moho.	
160-Lucas D	Et du coup, ça s'enfonce plus au niveau du Moho ?	Reprise-modification de « <i>le Moho qui est en dessous, il est plus bas ?</i> » (R154) par actualisation → « <i>ça s'enfonce au niveau du Moho ?</i> » (R160).
161-P	Bien sûr oui [...] Là, je comprime, je raccourcis, j'empile les matériaux, et du	

	coup mon Moho sera plus profond. Oui ?	
162-Salma	Et elle demeure seule ou pas la lithosphère océanique ?	<p>Changement de l'objet de discours par l'élève Salma du « <i>convergence...entre deux lithosphères de même densité</i> » (R149) vers « <i>elle demeure seule ou pas la lithosphère océanique</i> » (R162).</p> <p>Par la question posée en (R162), l'élève a réussi de poser le problème du devenir de la lithosphère océanique subduite.</p>
163-P	Alors cette lithosphère océanique qui s'enfuit, donc je vais avoir un métamorphisme [...] ça va fondre et ça va se retrouver dans le manteau [...]et va aussi créer <u>des choses</u> au niveau continental, <u>on verra</u> le magmatisme des zones de subduction <u>dans le chapitre3 [...]</u>	<p>-« <i>des choses</i> » : marque l'ensemble des phénomènes présentés par l'enseignante d'une manière vague.</p> <p>-« <i>verra</i> » : indique l'action au futur.</p> <p>Par l'usage de ces termes, l'enseignante essaye de répondre rapidement à la question de l'élève en (R162) sans entrer dans les détails des phénomènes qui expliquent le devenir de la lithosphère océanique subduite, puisque ce problème sera étudié dans le chapitre suivant.</p>

De la réplique (R149) jusqu'à la réplique (R161), l'enseignante cherche à présenter aux élèves les indices de collision (les failles inverses, l'empilement des matériaux, l'épaississement crustal, l'augmentation de la profondeur du Moho). Par sa question émise en (R149), la professeure demande en fait aux apprenants de donner des propositions sur les mouvements géologiques et les types de structures qui accompagnent la rencontre de deux croûtes lithosphériques : « *Au bout d'un moment, si je continue à avoir convergence, là j'ai un contact entre deux lithosphères [...]* Qu'est ce qui va se passer ? ».

Parmi les indices de collision proposés par les apprenants, nous citons les « *failles inverses* » (R150) et « *l'épaississement* » (R152).

Par son intervention en (R162), l'élève Salma fait déplacer le discours des indices de

collision vers le devenir de la lithosphère océanique enfouie. En posant alors la question « *Et elle demeure seule ou pas la lithosphère océanique ?* », l'élève Salma réussit à orienter les échanges vers le problème du devenir de la lithosphère océanique subduite. Ce problème est exprimé par l'apprenante après que la professeure a expliqué aux apprenants un autre indice de collision qui est la notion de racine crustale : « *si tu as empilement de matériel, tu vas avoir du coup plus de matériel* » (R155) ; « *Et du coup, ça va tendance à s'enfoncer dans l'asthénosphère* » (R157) & « *je raccourcis, j'empile les matériaux, et du coup mon Moho sera plus profond* » (R161).

Nous pensons que le fait d'évoquer l'épaississement en profondeur de la croûte continentale (racine crustale) par l'enseignante en (R155), (R157), (R159), et (R161), a inspiré l'élève pour poser le problème de devenir de la lithosphère océanique subduite en profondeur (dans l'asthénosphère).

Même si l'élève aboutit à poser le problème de devenir de la lithosphère océanique enfouie, en formulant la question en (R162), nous remarquons que le discours n'a pas évolué dans la suite du macro-épisode entraînant possiblement la construction d'un savoir problématisé en invitant les élèves à proposer des solutions possibles à ce problème. En revanche, par son propos en (R163) « *cette lithosphère océanique qui s'enfouit, donc je vais avoir un métamorphisme [...] ça va fondre et ça va se retrouver dans le manteau [...] et va aussi créer des choses au niveau continental, on verra le magmatisme des zones de subduction dans le chapitre3 [...]* » , l'enseignante donne rapidement et d'une façon générale la réponse recherchée à ce problème, tout en essayant de fermer le dialogue sur le devenir de la lithosphère océanique enfouie parce que ce problème sera traité dans un autre chapitre selon le programme officiel.

Conclusion de l'analyse épistémologico-langagière des macro-épisodes discordants

D'après l'analyse épistémologico-langagière menée ci-dessus, nous avons réussi à préciser les problèmes qui ont été posés par les élèves tout au long de ces macro-épisodes discordants. Ces problèmes sont respectivement le problème de l'orogénèse actuelle, le problème du vide, le problème de devenir de l'eau océanique, le problème de la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique, et le problème de devenir de la lithosphère enfouie.

Cette analyse nous a permis de comprendre que les questions posées par les apprenants durant ces macro-épisodes, et qui sont considérées dans l'analyse thématique comme étant en désaccord avec ce qui est proposé par l'enseignante, représentent plutôt une tentative par les lycéens de discuter la vraisemblance des modèles présentés par la professeure. C'est le cas par exemple de MEP4, où les élèves essaient de vérifier la vraisemblance du scénario des Alpes en projetant ce modèle au présent. C'est le cas aussi dans MEP8, où l'élève cherche à vérifier la plausibilité du modèle postulant la présence des roches métamorphiques d'origine océanique dans les chaînes de montagnes.


D'après l'analyse épistémologico-langagière, nous avons pu comprendre alors que certains propos formulés par l'enseignante dans les différents macro-épisodes discordants, ont aidé les élèves à poser les problèmes identifiés ci-dessus. Ainsi, si on prend à titre d'exemple MEP5, nous pouvons dire que le fait que l'enseignante parle « de la fermeture des océans » dans la réplique 61, a aidé selon nous l'élève à détecter le problème du devenir de l'eau océanique (voir **tableau. 18**). Nous pouvons arriver à la même déduction dans MEP7. En effet, dans ce macro-épisode, l'enseignante trace le schéma montrant la lithosphère océanique entre l'axe de la dorsale et la zone des fosses dont l'objectif est de présenter le métamorphisme des zones de subduction. Nous pensons que cela a aidé l'apprenant à poser le problème « du vide » situé entre l'axe de la dorsale et la zone des fosses.

Dans ce cadre, nous présentons dans **le tableau. 18** une récapitulation indiquant les problèmes de l'enseignante et ceux des élèves. Nous essayons aussi de présenter le contenu formulé par la professeure et qui a aidé les apprenants à poser chaque problème dans les différents macro-épisodes étudiés.

Tableau. 18. Tableau récapitulatif des problèmes de l'enseignante, les problèmes des élèves et indiquant ce qui a aidé les apprenants à poser leurs problèmes

Numéro du macro-épisode discordant	Le problème de l'enseignante accompagné de son propos qui a aidé les élèves à poser chaque problème	Le problème des élèves
MEP4	Scénario des Alpes (L'enseignante pose ici le problème du scenario de la formation des chaînes de montagnes dans le passé)	L'orogénèse actuelle (plus clairement, l'élève pose le problème du scenario de la formation des chaînes de montagnes dans le présent)
MEP7	Le métamorphisme des zones de subduction (L'enseignante trace le schéma montrant la lithosphère océanique entre l'axe de la dorsale et la zone des fosses afin de présenter le métamorphisme des zones de subduction)	Le « vide » entre l' axe de la dorsale et la zone des fosses
MEP5	Le scénario de la formation des chaînes de montagnes de collision (L'enseignante parle ici de la fermeture des océans comme une étape du scénario)	Le devenir de l' eau océanique
MEP8	Le métamorphisme des zones de subduction (L'enseignante parle du basalte et du gabbro de la lithosphère océanique, qui subissent un métamorphisme lors de la subduction . Nous mettons	La position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique

	l'hypothèse que ce propos a aidé une élève à faire le lien avec les ophiolites (formés par le basalte, le gabbro) présents dans les chaînes de montagnes.	
MEP10	La collision (L'enseignante évoque l'épaississement en profondeur de la croûte continentale comme indice de la collision)	Le devenir de la lithosphère océanique enfouie

La légende:	
	Flèche indiquant que le propos de l'enseignante a aidé les élèves à détecter le problème posé
[Texte]	Résumé du propos de l'enseignante, qui a aidé selon nous les élèves à détecter le problème posé

L'analyse menée a fait émerger de même l'écart présent entre le raisonnement des élèves et celui des scientifiques pour expliquer les phénomènes géologiques. Nous pouvons remarquer cet écart en MEP7 (qui étudie le problème du vide). En effet, dans ce macro-épisode l'élève s'inscrit selon nous dans un contexte de dérive des plaques où la plaque se déplace et qui selon lui en se déplaçant, elle provoque la formation du vide. Néanmoins, les scientifiques s'inscrivent plutôt dans le cadre de la tectonique des plaques, où la lithosphère subduite au niveau de zones de subduction est remplacée d'une façon continue par une nouvelle lithosphère océanique qui se forme au niveau de l'axe de la dorsale. Cet écart entre le raisonnement des lycéens et des scientifiques, peut s'observer aussi en MEP5 (qui met en exergue le problème de devenir de l'eau océanique). Dans ce macro-épisode, nous pensons que pour les élèves l'eau en question est celle de l'océan et non pas celle qui se trouve dans les roches subduites. Les apprenants conjuguent ici le problème du déplacement de la

masse océanique dans une même échelle du temps que le problème de la subduction. Nous précisons à ce niveau qu'au contraire des élèves, les scientifiques considèrent que les courants océaniques se déplacent selon une vitesse rapide par rapport à la vitesse de déplacement des plaques tectoniques qui se fait de « quelques cm/ an ».

Suite à l'analyse macroscopique et l'analyse microscopique réalisées dans ce travail, nous pensons qu'il est propice maintenant de soumettre nos résultats obtenus dans les chapitres 6,7, 8, 9 et 10 à la discussion.

CHAPITRE XI. DISCUSSION DES RESULTATS

Introduction

Notre étude vise à comprendre comment les lycéens de Terminale scientifique peuvent s'engager dans la construction du savoir scientifique de la formation des chaînes de montagnes de collision pendant une séquence ordinaire consacrée à l'étude du thème « la convergence lithosphérique : contexte de formation des chaînes de montagnes ». Suite aux résultats obtenus dans les cinq chapitres précédents, nous essayons dans ce chapitre de faire émerger les apports de l'analyse de cette recherche aux travaux sur la problématisation. Dans un premier temps, nous cherchons à mettre en exergue le potentiel du cours dialogué lorsque se présentent des ouvertures pouvant engager de la problématisation. Puis nous montrons l'apport de l'analyse épistémologico-langagière. Ce faisant, nous étudions l'écart entre le raisonnement des élèves et celui des scientifiques dans l'explication de la formation des chaînes de montagnes de collision, tout en essayant d'expliciter les difficultés rencontrées chez les apprenants dans la construction de ce phénomène.

1 Le potentiel du cours dialogué lorsqu'il s'ouvre sur la problématisation (Fig. 27)

Pour les différents macro-épisodes identifiés dans notre étude (voir **chapitre 6**), nous avons remarqué que la classe de Terminale scientifique étudiée a fonctionné majoritairement sur le registre d'un cours dialogué, qui réduit généralement les moments de négociations et de controverses en classe, et par suite ne permet pas la mise en place d'une problématisation.

Le cours dialogué mené dans cette classe semble représenter selon nous le format pédagogique le plus compatible avec les préoccupations de l'enseignante. En fait, la mise en place d'un cours dialogué aide la professeure à présenter un contenu ou encore à vérifier l'acquisition et la mémorisation de certains concepts liés à la formation des chaînes de montagnes de collision (exemple : la collision, la subduction, les marges passives, etc...) qui sont considérés par elle comme des

prérequis déjà construits en première S ou dans les chapitres précédents.

Même si la classe a fonctionné selon un cours dialogué, au cours duquel l'enseignante a privilégié la présentation ou l'orientation vers un savoir solution, l'analyse du corpus que nous avons constitué nous a permis d'identifier et de distinguer dans les macro-épisodes concordants et discordants un ensemble de questions formulées par les élèves. Ce sont des questions de relance (QR), des questions de reformulation clarification (QRC), et des questions (Q) qui ouvrent vers des préoccupations géologiques fortes. A travers ces questions, les élèves essaient de relancer l'explication de certains concepts déjà étudiés ou présentés auparavant (c'est le cas du métamorphisme des zones de subduction, et de l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique) ou encore de poser des problèmes qui les intriguent (**Figure.27**). Parmi ces problèmes, nous pouvons citer : l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale, le métamorphisme de haute pression - haute température, l'orogénèse actuelle, la formation « du vide », le devenir de l'eau océanique, la position anormale de roches d'origine océanique au sein d'une chaîne de montagne, le devenir de la lithosphère océanique enfouie.

A partir de ce qui est précisé ci-dessus, nous pouvons dire que nous sommes devant un cours dialogué qui pourrait s'orienter vers un débat scientifique (entendu dans le sens de la problématisation) encourageant normalement la formulation d'argumentations et d'objections en classe. D'ailleurs, nous pouvons observer clairement ces moments de controverses dans le macro-épisode MEP9.

Ainsi, même si le cours dialogué a été fortement discuté par plusieurs auteurs comme Stevens (cité par Hoetker et Ahlbrand, 1969), à cause du « *a) temps de paroles de l'enseignant qui est largement dominant par rapport à celui des élèves (60 à 70%) et la faible place laissée à leurs commentaires ; b) la forte tension nerveuse occasionnée par le rythme rapide des questions ; c) la survalorisation du rôle de la mémoire et des compétences de bas niveau en raison de la prédominance des questions fermées* » (Veyrunes, 2017, p. 97), notre étude montre cependant la présence d'amorces possibles pour le développement d'une activité de problématisation. En effet, les questions de relance (QR), les questions de reformulation clarification (QRC), ainsi que les questions (Q) posées par les lycéens tout au long de ce cours dialogué, représentent pour nous des moments où une bifurcation vers un processus de problématisation serait possible. Par ces questions,

les élèves essayent de discuter ou de questionner la solution déjà donnée (Exemple : le métamorphisme de haute pression - basse température, l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale) ou encore de formuler ce qui pose problème pour eux (c'est le cas de la formation « du vide », l'orogénèse actuelle, etc...). C'est lors de la formulation de ces questions, que les lycéens avec l'aide de l'enseignante auraient pu possiblement ouvrir un débat scientifique en classe (**Figure.27**), où ils auraient pu être invités dans un premier temps à proposer et travailler sur des solutions possibles aux questions (QR, QRC, Q) de leurs collègues, et dans un deuxième temps de discuter ces possibles explicatifs. Dans cet éventuel débat, les lycéens auraient pu ensuite argumenter sur le caractère de nécessité ou d'impossibilité des solutions proposées.

La tendance de ce cours dialogué à s'ouvrir sur un débat qui favorise possiblement l'installation d'un processus de problématisation, peut-être expliquée par la présence d'un ensemble de conditions en classe (Wells, 2009) qui ont permis l'émergence de cette tendance. Parmi ces conditions, nous pouvons identifier :

- Le remplacement des questions fermées de l'enseignante (qui demandent généralement une réponse factuelle et courte) par des questions ouvertes afin de laisser la place aux apprenants pour proposer les solutions possibles et de les engager ensuite à construire possiblement des nécessités. On observe cela clairement dans les macro-épisodes MEP9 (qui porte sur le métamorphisme des zones de subduction) où toutes les questions posées par l'enseignante sont ouvertes³¹ et MEP15 (sur le moteur de la subduction) qui montre que trois des quatre questions posées par la professeure sont ouvertes³².

- Le nombre moindre de réponses courtes des apprenants (ibid) et leur remplacement par des réponses argumentées (MEP9).

- La présence d'un climat de classe qui favorise et encourage les élèves à prendre la parole et poser les questions, qui les amènent ainsi à ouvrir tout au long de ce cours dialogué une enquête sur certains concepts liés à la formation des chaînes de

³¹ : Dans notre étude, une question ouverte c'est une interrogation à laquelle il n'y a pas qu'une sorte de réponses qui peut être acceptée. Plus explicitement, c'est une question qui laisse, à celui qui va répondre, la possibilité de proposer librement sa réponse sans qu'il soit influencé par des réponses prédéfinies (comme oui ou non).

³² : Nous pensons que dans MEP9 et MEP15, l'enseignante a favorisé davantage la prise de parole par les élèves, parce que le métamorphisme de **HP-BT** et le moteur de subduction ne font pas partie des prérequis des élèves. Ils vont être étudiés et par suite construits pour la première fois en Terminale S

montagnes de collision. Si le cours dialogué propre à la séquence que nous avons étudiée montre la présence d'amorces possibles pour le développement d'une activité de problématisation, il est important de préciser ici que ce processus ne s'est pas poursuivi en classe. Nous expliquons cela par le fait que l'enseignante n'a pas fait le choix de la logique de problématisation. Ainsi, les questions posées par les élèves [comme « *Pourquoi déjà il y a plus de lithosphère, quand on s'éloigne de la dorsale ?* » (émise dans MEP15, Réplique 209), « *C'est quoi basse température ?* » (formulée dans MEP9, Réplique 138), ou encore « *Dans ce cas, il va y avoir un vide ici ?* » (émise dans MEP7, Réplique 86)], n'ont pas été travaillées dans la suite de la séquence. Les apprenants n'ont pas été invités à donner des solutions possibles aux questions de leurs collègues et de confronter ces différentes solutions en ouvrant possiblement une zone proximale de développement en classe (**Figure.27**). Il est important ici de préciser que la zone proximale de développement est un concept central dans les travaux de Vygotski. Ce dernier postule que l'apprentissage précède le développement des fonctions psychiques supérieures. Dans ce lien entre apprentissage et développement, Vygotski voit que « *L'apprentissage donne [...] naissance, réveille et anime chez l'enfant toute une série de processus de développement internes qui, à un moment donné, ne lui sont accessibles que dans le cadre de la communication avec l'adulte et de la collaboration avec les camarades, mais qui, une fois intériorisés, deviendront une conquête propre de l'enfant* » (Schneuwly & Bronckart, 1990, p. 112). Ainsi, la différence entre ce que l'enfant est capable de réaliser en autonomie et de ce qu'il réussit à réaliser avec l'aide de l'adulte qui définit la zone proximale de développement. Dans notre étude, nous pensons que les questions de relance, les questions de reformulation clarification, et les questions que les élèves réussissent à les poser sans ou avec un peu de soutien, représentent pour nous la zone d'autonomie [où les lycéens peuvent faire une tâche d'apprentissage sans ou avec un minimum d'aide]. Les élèves auront pu être invités ensuite à proposer, dans une activité collective et avec la direction de l'enseignante, des solutions possibles à ces questions posées, de les travailler et de les discuter en classe. La différence entre les questions que les élèves ont réussi de les poser et l'éventuelle activité collective qui aurait pu avoir lieu, définie selon nous la zone proximale de développement indiquée dans notre texte et dans la **figure. 27**.

Nous faisons l'hypothèse que le format de cours dialogué que nous observons dans la séquence étudiée est un format pédagogique qui permet de répondre à une

préoccupation classique d'un enseignant de Terminale S : gagner du temps pour s'assurer de finir le programme dans une classe à examen (faire que les élèves s'approprient des savoirs et des démarches conduisant à leur réussite à cet examen). Ainsi, face aux questions posées par les élèves soit sur un concept considéré par la professeure comme un prérequis [c'est le cas du métamorphisme et de la collision où l'enseignante disait respectivement en MEP9 « *Ces changements de température, qu'est ce qu'ils peuvent engendrer ? On a vu ça dans le chapitre précédent* », et en MEP2 « *Vous l'avez vu dans le chapitre 1* »] soit sur un concept qui ne fait pas partie des connaissances visées dans le programme officiel [C'est le cas du concept de l'exhumation où la professeure précisait en MEP8 qu' « *Il y a un mécanisme, on va alors parler rapidement parce que c'est pas trop programme* »], l'enseignante essaye dans ce cas de donner la réponse recherchée, en fermant rapidement le dialogue et en se focalisant plutôt sur les connaissances ciblées par le programme.

Nous présentons dans la **figure. 27** une récapitulation où nous plaçons en regard la situation scolaire qui a été étudiée dans notre travail et ce qui aurait pu avoir lieu en classe. Dans cette figure, nous mettons en lumière les questions de relance, les questions de reformulation clarification et les questions que les élèves ont pu se poser tout au long du cours dialogué tenu en classe. Nous avons essayé aussi de montrer que ces questions posées représentent des amorces possibles pour la mise en place d'un débat scientifique qui aurait pu probablement avoir lieu en classe.

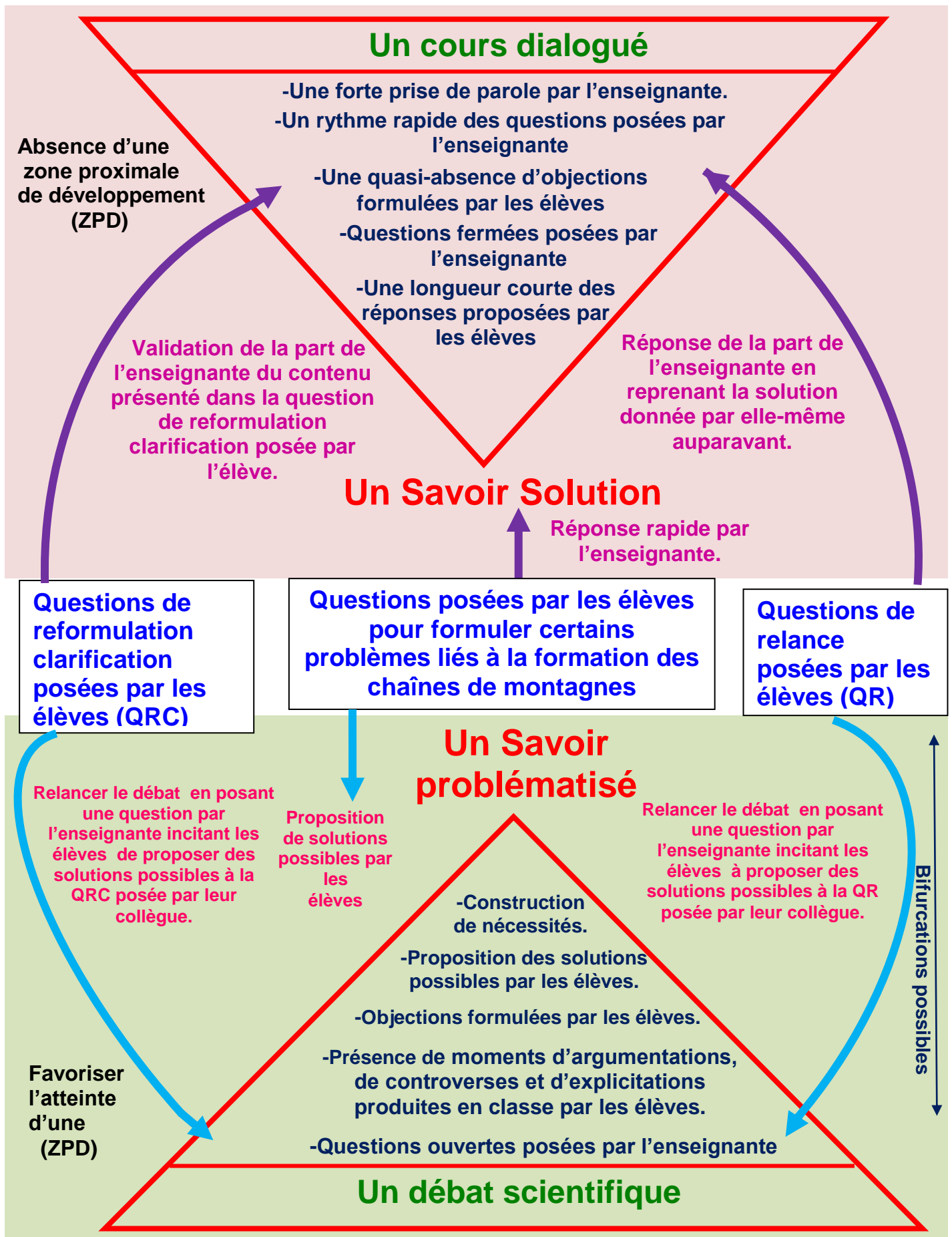


Fig.27. Schéma expliquant la situation scolaire qui a été étudiée dans notre travail et ce qui aurait pu avoir lieu en classe.

Pour mieux comprendre ce qui a aidé les élèves à poser les questions - les questions de relance et les questions de reformulation clarification (qui marquent la présence de possibles bifurcations vers un processus de problématisation) - nous avons essayé de faire un focus sur les modalités d'intervention de l'enseignante et leur incidence sur la tendance des élèves à poser ces questionnements. Ainsi, nous avons pu identifier dans notre étude trois pistes possibles qui ont permis l'émergence de ces amorces :

La piste1 : la présentation par l'enseignante d'un concept « principal » en le mettant en relation avec un ou d'autres concepts « secondaires » proposés aux apprenants comme des savoirs solutions .

Dans certains macro-épisodes étudiés, nous pouvons voir que l'enseignante présentait aux lycéens un concept que nous nommons ici de « principal ». Il est identifié de principal parce qu'il représente selon nous le but d'apprentissage défini par l'enseignante dans un macro-épisode donné. En effet, dans un nombre de macro-épisodes (ex : MEP15, MEP1, MEP2) la professeure présente aux apprenants un concept lié à la formation des chaînes de montagnes de collision comme un savoir solution, tout en insistant ensuite de le consolider. Elle essaye de lui donner plus de consistance à travers des reprises-modifications de certaines questions déjà posées sur ce concept ou à travers la proposition d'activités qui visent à vérifier si les élèves ont bien compris ou non la solution donnée par elle-même. Par ces activités, nous pensons que ce concept proposé aux élèves présente pour l'enseignante la connaissance que les élèves auront normalement acquise quand l'enseignement du macro-épisode sera terminé. Il est important de préciser ici que lorsque la professeure présente ce concept principal, elle le met en relation avec un ou d'autres concepts qu'on nomme ici de « secondaires ». Nous les identifions de secondaires car ils ne représentent pas, d'après nous, la connaissance visée déterminée par l'enseignante. Ce sont des sous-catégories du concept principal : ils sont évoqués par la professeure car ils aident les élèves à comprendre ce concept « principal ». Ils sont présentés durant le macro-épisode comme des savoirs solutions (sans savoir pourquoi ce concept il est tel qu'il est et pourquoi il ne peut pas être autrement) [nous rappelons que l'enseignante n'est pas sur la logique d'une problématisation]. Le fait que l'enseignante évoque dans son propos ce concept secondaire (pour vouloir

présenter le concept principal) pousse probablement les élèves à le questionner. Nous donnons dans ce cadre le cas de MEP15, où l'enseignante cherche tout au long de ce macro-épisode à présenter aux apprenants le moteur de la subduction (plus explicitement, il s'agit de l'augmentation de la densité de la lithosphère océanique en s'éloignant de l'axe de la dorsale). Le moteur de la subduction représente selon nous le but d'apprentissage défini par l'enseignante dans ce macro-épisode. Nous arrivons à cette déduction en remarquant que même si le moteur de la subduction a été proposé par la professeure comme un savoir solution, cette dernière a invité ensuite les apprenants à faire une activité de calcul de la densité de la lithosphère océanique (près et en s'éloignant de l'axe de la dorsale) afin de vérifier si les élèves ont compris ou pas cette solution donnée.

Pour que les lycéens arrivent à comprendre l'augmentation de la densité de la lithosphère océanique (le moteur de la subduction), l'enseignante met en relation ce concept principal (pour elle) avec l'épaisseur de la lithosphère océanique qui augmente en s'éloignant de l'axe de la dorsale (puisque selon elle « la limite lithosphère- asthénosphère est une limite thermique »). Nous pensons que des concepts comme la limite thermique ou l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique sont des concepts secondaires qui aident les élèves à comprendre le moteur de la subduction mais ne représentent pas en eux-mêmes l'objectif d'apprentissage défini par la professeure. Ils sont présentés par l'enseignante comme des « savoirs solutions » (sans que les élèves sachent ce que signifie limite thermique et pourquoi l'épaisseur de la lithosphère océanique augmente en s'éloignant de l'axe de la dorsale). Ceci pousse probablement les apprenants à poser des questions comme la question de relance « *Pourquoi déjà il y a plus de lithosphère, quand on s'éloigne de la dorsale ?* » (Réplique 209) dont l'objectif est de chercher les raisons pour lesquelles il y a une augmentation de l'épaisseur de cette lithosphère océanique lorsqu'elle s'éloigne de l'axe de la dorsale.

La piste 2 : La présentation par l'enseignante d'un concept lié à la formation des chaînes de montagnes de collision comme un savoir solution, qui est suivie par la formulation des questions invitant les élèves à donner les raisons pour lesquelles la solution donnée, elle est telle qu'elle est. Ces questions posées par la professeure peuvent servir la problématisation : elles ouvrent la porte à des possibles explicatifs.

La confrontation de la ou des solutions possibles proposées par les élèves avec ce qui a été présenté par l'enseignante marque dans ces macro-épisodes l'écart entre le raisonnement des élèves et de l'enseignante pour expliquer le concept géologique étudié. Cet écart a poussé les apprenants à questionner la solution donnée par la professeure.

Cette deuxième piste s'observe très bien en MEP9, où l'enseignante présente le métamorphisme de haute pression- basse température comme un savoir solution, puis elle essaye de poser les questions « (...) pourquoi haute pression ? Est-ce que c'est logique ça ? » (Réplique 75) et « [...] Après, basse température est ce que ça vous paraît logique comme ça basse température ? » (Réplique 77) pour inviter les apprenants à donner les raisons pour lesquelles le métamorphisme des zones de subduction est qualifié de haute pression- basse température. Ces questions ouvrent selon nous la porte aux élèves de proposer des solutions possibles pour expliquer le métamorphisme de haute pression- basse température.

Dans la suite du macro-épisode, nous avons pu observer l'écart entre le raisonnement des élèves et celui de l'enseignante pour expliquer le métamorphisme des zones de subduction. En fait, si la professeure le qualifie de haute pression- basse température, les lycéens quant à eux le considèrent de haute pression- haute température (voir la partie suivante pour plus de détails. Voir aussi ce qui a été travaillé précédemment dans **le chapitre 9**). Cette différence entre le raisonnement de la professeure et des élèves a poussé ces derniers de formuler les questions « dans une zone de subduction, basse température, haute pression ? » (Réplique 132) et « c'est quoi basse température ? » (Réplique 138). A travers ces interrogations, les lycéens ont réussi de rouvrir le dialogue sur les raisons pour lesquelles le métamorphisme des zones de subduction est qualifié de haute pression- basse température. Ce sont ces questions qui marquent l'existence d'amorces possibles pour l'installation d'une problématisation.

La piste 3 : la présentation par l'enseignante d'un concept lié à la formation des chaînes de montagnes de collision comme un savoir solution. Et le propos formulé par la professeure pour vouloir présenter aux apprenants ce savoir, inspire ces derniers à poser des questions qui ouvrent vers des préoccupations géologiques

fortes. Nous citons dans ce cadre le macro-épisode MEP4 où l'enseignante présente aux élèves le scénario des Alpes qui sont des chaînes de montagnes formées dans le passé. Ceci inspire un élève à poser le problème de l'orogénèse actuelle (le scénario de la formation des chaînes de montagnes au présent) : à travers sa question émise dans la réplique 58 « *Dans les océans actuels [...] est ce qu'il y a des montagnes qui se forment à ce moment ?* », il cherche à vérifier la vraisemblance du modèle du scénario de la formation des Alpes à l'état actuel.

2 Les apports de l'analyse épistémologico-langagière dans la compréhension des macro-épisodes concordants et discordants

L'analyse thématique menée dans notre étude nous a permis de distinguer deux types de macro-épisodes : les premiers correspondent aux macro-épisodes concordants qui marquent une cohérence entre les thèmes introduits par l'enseignante et les thèmes proposés par les élèves. Les seconds, que nous avons nommés des macro-épisodes discordants, indiquent la présence de désaccord entre le thème présenté par la professeure et celui proposé par les apprenants.

Néanmoins, en affinant nos analyses par la mise en place d'une analyse épistémologico-langagière, nous avons pu détecter la limite de l'analyse thématique réalisée au début du chapitre 6. En fait, l'analyse épistémologico-langagière nous a permis d'identifier dans certains macro-épisodes concordants un écart (et donc une discordance) entre le raisonnement de l'enseignante et celui des élèves. Si nous prenons par exemple le cas de MEP9, nous pouvons détecter clairement l'écart entre le raisonnement de l'enseignante et le raisonnement émis par l'élève sur le concept du métamorphisme des zones de subduction. En effet, si l'enseignante qualifie le métamorphisme des zones de subduction de haute pression- basse température, les apprenants quant à eux, le qualifient de haute température- haute pression (voir la section suivante pour plus de détails).

De même pour les macro-épisodes discordants, l'analyse épistémologico-langagière nous a permis de comprendre que les questions posées par les élèves et qui apparaissent selon l'analyse thématique en désaccord avec ce qui a été posé par l'enseignante, représentent plutôt des essais par les élèves de discuter la vraisemblance des modèles proposés par la professeure. Nous pouvons donner à titre d'exemple le MEP4 (qui porte sur l'orogénèse actuelle) où l'apprenant pose sa

question en (R58) afin de tester la plausibilité du scénario de la formation des Alpes proposé par la professeure en essayant de le projeter au présent.

Nous pouvons alors conclure d'un point de vue méthodologique que l'analyse thématique est insuffisante pour comprendre le fonctionnement de la classe. L'analyse épistémologico-langagière nous paraît par suite indispensable pour comprendre comment les lycéens se sont engagés dans la construction du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision.

Dans ce cadre, nous pouvons dire qu'à travers l'analyse épistémologico-langagière de certains macro-épisodes étudiés dans notre travail et plus précisément dans MEP9 (qui porte sur le métamorphisme des zones de subduction), nous avons pu détecter des moments d'hétéroglossie observables entre le propos de l'enseignante et celui de l'élève. En effet, la professeure qualifie le métamorphisme des zones de subduction de basse température. Dans son raisonnement, elle relie le réchauffement moindre de la plaque à sa température de début d'enfoncement relativement basse et à sa vitesse d'enfoncement relativement rapide : selon elle, « *Plus je m'éloigne, plus votre croûte a eu de temps de refroidir, parce qu'elle est dans l'eau froide. Elle va avoir du temps à refroidir [...] Donc, je vais avoir une croûte très froide et du coup elle s'enfonce, ben, elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement* par rapport à ce qu'on pourrait imaginer » (R83). Néanmoins, l'élève quant à lui, considère le métamorphisme des zones de subduction de haute température. Son raisonnement se base sur le fait que plus la plaque s'enfonce en profondeur, plus elle se réchauffe à cause du gradient géothermique : vu que « dans une zone de subduction, ça s'enfonce » (R134) « Alors, le gradient géothermique est plus chaud » (R136).

La présence de différentes voix dans le discours (entre l'enseignante qui a donné la solution recherchée et l'élève qui, par son propos, résiste face à cette solution) indique selon nous que la classe essaye à ce niveau de proposer des solutions possibles au problème de métamorphisme des zones de subduction. En effet, si on prend le propos de l'élève, nous pouvons remarquer que ce dernier s'appuie sur un ensemble de faits qui sont « l'enfoncement de la lithosphère océanique subduite en profondeur » et « l'augmentation de la température avec la profondeur (le gradient géothermique) » et mobilise l'idée qui fait le lien entre ces deux faits : puisque la lithosphère océanique subduite (qui va subir un métamorphisme) s'enfonce en profondeur et vu que la température augmente avec la profondeur, le

métamorphisme des zones de subduction est qualifié par le lycéen de haute température.

A ce stade, nous pensons que dans ce macro-épisode la classe (à travers l'élève) a tendance à construire le problème de métamorphisme des zones de subduction : c'est ce qu'on a nommé dans la partie théorique (**chapitre1**) le premier dédoublement qui caractérise le processus de problématisation. C'est le dédoublement considéré par Bachelard comme un dédoublement des faits et des idées : ce dédoublement articule une dialectique des références (les données du problème) et d'inférences (les hypothèses, les suggestions) (Fabre, 2009, p. 27). Ce premier dédoublement relève du champ de l'assertorique (ce qui se passe comme cela et peut se passer autrement). L'analyse épistémologico-langagière nous permet de conclure aussi que ce MEP9 est terminé sans qu'il y a eu vraiment une orchestration de l'hétéroglossie. En effet, on est devant une situation où les propositions de solutions possibles émises dans le premier dédoublement, n'ont pas été examinées dans leurs fondements dans la suite du macro-épisode. Ceci n'a pas permis alors de construire un savoir scientifique apodictique raisonné.

Pour le reste des macro-épisodes identifiés dans ce travail, nous pensons que les élèves ont pu à plusieurs fois détecter et formuler des problèmes qui sont scientifiquement intéressants [les explicitations épistémologiques menées au début de l'analyse épistémologico-langagière de chaque macro-épisode le prouvent. Dans ce cadre, nous pouvons parler de MEP4 (qui met en exergue le problème de l'orogénèse actuelle posée par un lycéen) où un élève essaye, à travers ces questions, de faire le lien entre le passé et le présent pour comprendre la formation des chaînes de montagnes de collision. Ces questions ont été déjà posées par les chercheurs et les ont amenés à mobiliser le principe méthodologique d'actualisme]. Du point de vue problématisation, nous pouvons dire à ce niveau que la classe a réussi à mettre en place la première dimension dans le processus de traitement des problèmes. Elle correspond à la position des problèmes qui intriguent les lycéens. Fabre parlait de ce processus en indiquant que « *poser le problème, c'est identifier un manque, une désadaptation dans l'expérience existentielle, professionnelle, intellectuelle. Il faut bien savoir qu'il y a problème pour que ce problème puisse être traité* » (Fabre, 2017, p. 15). Parmi les problèmes identifiés par les élèves, nous pouvons citer à titre d'exemple le problème de la position anormale des roches

métamorphiques d'origine océanique posé par l'élève en MEP8 suite à sa question formulée en (R94) : « *Est-ce que on ne les (les roches métamorphiques d'origine océanique)*³³ *trouve pas dans les chaînes ? Ici ?* ».

L'analyse épistémologico-langagière des différents macro-épisodes identifiés dans notre travail (à part MEP9) montre par contre que face aux différents problèmes posés par les lycéens, l'enseignante donne à chaque fois la solution recherchée (elle n'est pas sur la logique de la problématisation) sans que les élèves soient amenés à proposer des solutions possibles à ces problèmes posés, ni d'argumenter sur le caractère de nécessité ou d'impossibilité des éventuelles solutions proposées. De cette façon, nous pouvons dire que la classe n'a pas vraiment pu durant ces macro-épisodes construire les problèmes déjà pointés par les lycéens.

3 Les difficultés des élèves

Tout au long de notre séquence, nous avons essayé de caractériser les raisonnements des élèves et de les comparer avec ceux des scientifiques. Ceci nous amène à identifier la présence de différences (et de fausses ressemblances) entre les raisonnements des élèves et des scientifiques. Le raisonnement des lycéens montre selon nous que les représentations ou encore les constructions mentales que les élèves élaborent en réponse à certains problèmes géologiques se posent sur un fond de pensée commune qui est en rupture avec la pensée scientifique (Bachelard, 1938). Ces représentations initiales des élèves représentent un obstacle à l'apprentissage des savoirs scientifiques et empêchent les lycéens d'entrer dans une culture scientifique.

Nous donnons dans ce qui suit une idée des raisonnements des élèves qui émergent dans notre étude en les comparant à chaque fois avec les raisonnements des scientifiques pour expliquer les phénomènes géologiques.

a- Les différences entre les raisonnements des élèves et des scientifiques

Les écarts entre les raisonnements des élèves et ceux des scientifiques peuvent s'observer à plusieurs occasions dans notre corpus :

-Les lycéens qualifient le métamorphisme des zones de subduction de haute pression- haute température (au contraire des géologues qui le qualifient de haute

³³ : La partie mise entre deux parenthèses dans les tours de parole, est ajoutée par nous chercheure pour expliciter les répliques formulées par les interlocuteurs en classe.

pression- basse température). Pour eux, l'enfoncement de la lithosphère océanique se fait dans le cadre d'une augmentation de pression et de température (gradient géothermique) qui peut atteindre des valeurs de l'ordre de 200°C ou plus. Ils considèrent cette température de très élevée (haute température) puisqu'ils raisonnent à l'échelle de la température ambiante (ils font référence à la vie quotidienne lorsqu'ils réfléchissent aux conditions de la température) et non pas à l'échelle de la température du globe terrestre. Par contre, les scientifiques qualifient le métamorphisme des zones de subduction de haute pression- basse température en faisant « référence au gradient P/T » de la plaque enfouie (Jolivet, entretien 2). Selon eux, la lithosphère océanique très froide va s'enfoncer lors de la subduction, très rapidement en profondeur ce qui fait qu'elle ne peut pas se réchauffer très vite.

-Nous pouvons identifier une autre différence qui existe entre le raisonnement des élèves et des scientifiques au niveau du macro-épisode MEP5 qui étudie le problème du devenir de l'eau océanique. En fait, pour les apprenants l'eau en question correspond bien à l'eau océanique et non pas celle qui se trouve dans les roches subduites. Les élèves conjuguent dans ce macro-épisode le problème du déplacement de la masse océanique dans une même échelle du temps que le problème de la subduction. Nous mentionnons ici (comme déjà précisé) que contrairement aux apprenants, les scientifiques considèrent que les courants océaniques se déplacent selon une vitesse rapide par rapport à la vitesse de déplacement des plaques tectoniques qui se fait de « quelques cm/ an.

-Nous détectons aussi l'écart entre le raisonnement des scientifiques et celui des élèves dans le MEP7 qui met en exergue le problème du vide. Cet écart peut être expliqué par le fait que le registre explicatif mis en jeu par les premiers s'inscrit dans le cadre global de la tectonique des plaques où la lithosphère océanique enfouie au niveau des zones de subduction est remplacée continuellement par une nouvelle lithosphère océanique formée au niveau des zones de dorsales. Quant aux seconds, ils se placent dans un contexte de dérive des plaques où les plaques se déplacent et en se déplaçant, ils vont former un vide. Nous signalons ici que le problème du vide posé par l'élève a été étudié avant dans les travaux d'Orange Ravachol (2007), où les apprenants ont articulé « *le chevauchement des plaques à leur écartement dans d'autres zones du globe. Cet écartement se matérialise par un trou océanique qui fait*

immédiatement problème pour la classe » (Orange Ravachol, 2007, p. 57). Dans cette étude et au contraire de notre travail, ce problème a été traité en classe jusqu'à ce que les lycéens « évacuent » le problème du trou. « *Leur réflexion s'appuie sur l'idée [...] que si les plaques convergent en certains endroits, elles s'écartent forcément en d'autres. Elle les porte à construire la nécessité d'un renouvellement des plaques et les engage dans une approche systémique du fonctionnement de la partie superficielle de la Terre : les plaques ne sont plus immuables* » (ibid, 2007, p. 66-67).

b- Les fausses ressemblances

Pour certains macro-épisodes de notre corpus, le raisonnement des lycéens marque une certaine ressemblance avec le raisonnement des scientifiques. En fait, nous pouvons détecter cette ressemblance au niveau du macro-épisode MEP4 où un élève questionne ce qui se passe dans la nature actuelle afin de discuter la vraisemblance du modèle du scénario de la formation des Alpes en cherchant à savoir si ce processus est à l'œuvre à l'état actuel. Ainsi, à travers les questions « *Dans les océans actuels, est ce qu'il y a des montagnes qui se forment à ce moment ?* » (R58) et « *Dans ce cas au niveau continental je parle, il y a une montagne qui se forme à ce moment-là ?* » (R60), nous pensons que l'élève projette le scénario de la formation des Alpes dans le présent, mais il n'arrive pas encore à mobiliser le principe méthodologique de l'actualisme³⁴ que les chercheurs utilisent pour expliquer les phénomènes géologiques.

Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la discussion des résultats obtenus dans ce travail. Ainsi, nous avons essayé tout d'abord de mettre en lumière le potentiel du cours dialogué mené en classe lorsqu'il tente de s'ouvrir sur une problématisation. En effet, pour les différents macro-épisodes identifiés dans notre étude, nous avons pu remarquer que la classe a fonctionné majoritairement sur le registre du cours

³⁴ : Le principe méthodologique d'actualisme se base sur le fait que « *le présent est la clef du passé, ou que les causes qui ont agi au long de l'histoire de la Terre ne diffèrent point essentiellement des causes actuelles* » (Gohau, 1997, p. 140). En les inscrivant dans un cadre actualiste, les phénomènes à l'origine des changements géologiques passés (leurs causes géologiques) sont considérés comme existants auparavant et existants encore dans la nature actuelle (Orange Ravachol, 2003, p. 185).

dialogué qui réduit généralement les moments d'argumentation. Néanmoins, l'analyse de notre séquence nous a permis de distinguer dans les macro-épisodes concordants et discordants, un ensemble de questions formulées par les élèves. A travers ces questions [les questions de relance, les questions de reformulation clarification, et les questions], les lycéens essaient de relancer l'explication de certains concepts déjà étudiés ou présentés auparavant (C'est le cas de métamorphisme des zones de subduction, l'augmentation de l'épaisseur de la lithosphère océanique) ou encore de poser des problèmes qui les intriguent et qui sont scientifiquement intéressants. Parmi ces problèmes, nous citons le métamorphisme de haute pression- haute température, la formation du vide, la position anormale des roches métamorphiques d'origine océanique. A partir de ce qui est précisé ci-dessus, nous pouvons dire que ces questions marquent selon nous la présence d'amorces possibles pour le développement d'une activité de problématisation.

Nous avons essayé aussi dans ce chapitre de présenter les apports de l'analyse épistémologico-langagière dans la compréhension des macro-épisodes concordants et discordants. En effet, à travers cette analyse nous avons pu détecter des limites de l'analyse thématique réalisée dans le chapitre. 6 : l'analyse épistémologico-langagière nous a permis d'identifier dans les macro-épisodes concordants (qui marquent une cohérence entre les thèmes introduits par l'enseignante et les thèmes proposés par les apprenants) un écart entre le raisonnement de la professeure et celui des élèves. Nous pouvons citer ici le cas de MEP9, où on peut observer clairement cet écart entre le raisonnement de l'enseignante et celui des lycéens pour expliquer le métamorphisme des zones de subduction : si l'enseignante qualifie le métamorphisme des zones de subduction de basse température, l'élève quant à lui, considère le métamorphisme des zones de subduction de haute température (voir la deuxième section de ce chapitre pour plus de précisions). De même, pour les macro-épisodes discordants, l'analyse épistémologico-langagière nous a permis de comprendre que les questions posées par les élèves et qui apparaissent selon l'analyse thématique en désaccord avec ce qui a été posé par l'enseignante, représentent plutôt des essais par les élèves de discuter la vraisemblance des modèles proposés par la professeure. C'est le cas de MEP4 où l'élève pose sa question en (R58) « *Dans les océans actuels [...] Est-ce qu'il y a des montagnes qui*

se forment à ce moment ? » et (R60) « Mais dans ce cas au niveau continental je parle, il y a une montagne qui se forme à ce moment-là ? » afin de tester la plausibilité du scénario de la formation des Alpes proposé par l'enseignante en essayant de le projeter au présent. De cette façon, nous avons pu conclure et dire que l'analyse épistémologico-langagière est indispensable pour comprendre comment les lycéens se sont engagés dans la construction du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision. Dans ce cadre, nous pouvons dire qu'à travers l'analyse épistémologico-langagière de certains macro-épisodes étudiés dans notre travail, et plus explicitement au niveau de MEP9, nous pouvons identifier la présence des moments d'hétéroglossie détectés entre le propos de l'enseignante et celui des lycéens : en effet, comme nous l'avons vu avant, si la professeure qualifie le métamorphisme des zones de subduction de haute pression- basse température, les apprenants quant à eux le considèrent de haute pression- haute température. La présence des différentes voix dans le discours entre la professeure (qui a donné la solution recherchée) et l'apprenant (qui résiste face à cette solution) montre selon nous que la classe essaye à ce niveau de proposer des solutions possibles au problème de métamorphisme des zones de subduction : c'est ce qu'on a nommé dans le chapitre 1 le premier dédoublement qui caractérise le processus de problématisation. C'est le dédoublement que Bachelard le considère comme un dédoublement des faits et des idées. Ce premier dédoublement relève de l'assertorique. Dans la suite de ce macro-épisode, l'analyse épistémologico-langagière nous a permis de conclure que ce MEP9 est terminé sans qu'il y a eu une orchestration de l'hétéroglossie. Les possibles explicatifs proposés dans le premier dédoublement n'ont pas été examinés dans leurs fondements dans la suite du macro-épisode. Ceci n'a pas permis de construire un savoir scientifique raisonné apodictique.

Pour les autres macro-épisodes identifiés dans notre étude, nous pensons que les élèves ont pu à plusieurs reprises poser des problèmes qui sont scientifiquement intéressants. De point de vue problématisation, nous pouvons dire à ce niveau que certains élèves ont réussi à mettre en place la première dimension dans le processus de traitement des problèmes. Elle correspond à la position des problèmes qui intriguent les lycéens (Fabre, 2017). Dans la partie finale de ce chapitre, nous avons fait un focus sur les raisonnements des élèves tout en essayant de les

comparer avec ceux des scientifiques. Ceci nous a permis d'identifier la présence de différences et de fausses ressemblances entre les raisonnements des apprenants et ceux des scientifiques. Le raisonnement des lycéens montre selon nous que les constructions mentales que les apprenants élaborent en réponse à certains problèmes géologiques se basent sur un fond de pensée commune qui est en rupture avec la pensée scientifique (Bachelard, 1938). Ces représentations initiales des élèves présentent un obstacle à l'apprentissage des savoirs scientifiques et empêchent les apprenants d'entrer dans une culture scientifique.

CONCLUSION GENERALE

Introduction

Nous avons commencé notre étude avec l'objectif principal de comprendre comment des élèves de Terminale S, peuvent s'engager dans la construction de la formation des chaînes de montagnes de collision lors des échanges observés durant une séquence ordinaire. Nous avons entamé notre travail dans l'esprit d'identifier le potentiel de ces séquences ordinaires lorsqu'elles sont étudiées dans le cadre de la problématisation. Nous avons voulu comprendre plus explicitement si des séquences ordinaires permettent ou non l'identification de certains moments où les élèves s'engagent dans un processus de problématisation. Et si nous avons pu identifier ces moments potentiels de problématisation, nous avons voulu comprendre ce qui a aidé les élèves à s'engager dans une enquête qui pourrait possiblement évoluer vers le travail et la construction de problèmes. Nous avons envisagé de comprendre de même si la construction de problème de la formation de chaînes de montagnes de collision a eu lieu vraiment en classe. Et si non, nous avons cherché à comprendre ce qui a empêché les lycéens à construire ce problème.

A la fin de notre étude, nous allons représenter dans cette dernière partie les apports, mais aussi les perspectives de notre recherche.

1 Les apports de notre étude

L'analyse menée dans cette recherche a permis de faire émerger un certain potentiel de la séquence ordinaire, étudiée dans le cadre de l'apprentissage par problématisation. En fait, même si la classe a fonctionné majoritairement sur le registre d'un cours dialogué, qui privilégie le savoir solution et réduit généralement les moments de controverses en classe (moments qui sont favorables à la mise en place de problématisation). Néanmoins, l'analyse de notre corpus, nous a permis de distinguer un ensemble de questions posées par les lycéens que nous avons nommées dans notre étude par les questions de relance et les questions de reformulation clarification. Par ces questions, les élèves cherchent à relancer une explication déjà donnée auparavant dans le discours de l'enseignante. Nous avons pu détecter aussi des questions formulées par les apprenants et par lesquelles ils réussissent à poser les problèmes qui les intriguent en lien avec le phénomène de la

formation des chaînes de montagnes de collision. Ainsi, par les questions des lycéens, la classe a tendance à s'orienter vers un processus de problématisation en mettant en discussion ce qui est présenté ou questionné. La détection de ces moments potentiels dans le corpus étudié peut être expliquée par la présence d'un ensemble de conditions qui ont favorisé l'émergence des questions posées par les lycéens. Parmi ces conditions, nous pouvons distinguer le remplacement, dans certains macro-épisodes, des questions fermées de la professeure [ce sont des questions qui ne laissent pas, à celui qui va répondre, la possibilité de proposer librement sa réponse sans qu'il soit influencé par des réponses prédéfinies] par des questions ouvertes. Dans ce cadre, nous pouvons citer les questions ouvertes formulées par la professeure en MEP9 comme « *Qu'est ce qu'ils peuvent engendrer ?* » (71), « *haute pression, pourquoi haute pression ?* » (75), ou encore « *pourquoi il y a une basse température ?* » (77). Nous pouvons détecter aussi ces questions ouvertes dans MEP15 [Exemple « *votre matériel qui est au dessus il va, il va quoi faire ?* » (188) ou encore « *si vous mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire quoi ?* » (192)]. Parmi les autres conditions qui ont favorisé selon nous l'émergence de ces amorces possibles pour le développement d'une problématisation, nous pouvons identifier dans certains macro-épisodes la diminution des réponses courtes formulées par les élèves et leur remplacement par des propositions argumentées (ex : « *dans une subduction, ça s'enfoncé* » (134) « *Alors, le gradient géothermique est plus chaud* » (136) émises par un apprenant en MEP9], ainsi que la présence d'un climat de classe qui encourage quelques élèves à prendre la parole et poser les questions qui les amènent à ouvrir une enquête sur certains concepts liés à la formation des chaînes de montagnes de collision.

Pour mieux comprendre ce qui a aidé certains élèves à poser les questions précisées ci-dessus, nous avons essayé de nous concentrer sur les modalités d'intervention de la professeure et leur effet sur la tendance des apprenants à émettre ces interrogations. Nous avons pu alors identifier dans notre travail trois pistes possibles qui ont permis l'émergence de ces questions.

La première piste: la présentation par la professeure d'un concept « principal » (il représente selon nous le but d'apprentissage défini par l'enseignante dans un macro-épisode donné) et le mettre en relation avec un ou d'autres concepts « secondaires » proposés aux élèves comme des savoirs solutions [nous rappelons ici que l'enseignante n'est pas sur la logique d'une problématisation]. Le fait que la

professeure parle dans son propos du concept secondaire (pour vouloir aider les élèves à comprendre le concept principal) pousse probablement les élèves à questionner ce dernier (c'est le cas de MEP15, voir chapitre 11).

La deuxième piste : pour certains macro-épisodes, nous avons pu remarquer la présentation par l'enseignante d'un concept lié à la formation des chaînes de montagnes de collision comme un savoir solution. La présentation de ce savoir en classe est suivi par la formulation par la professeure des questions invitant les élèves à donner les raisons pour lesquelles la solution donnée, elle est ce qu'elle est. Ces questions formulées par la professeure peuvent servir la problématisation : elles ouvrent la porte à des possibles explicatifs. La confrontation de la ou des solutions possibles proposées par les élèves avec ce qui a été présenté par l'enseignante met en lumière dans ces macro-épisodes l'écart entre le raisonnement des élèves et de l'enseignante pour expliquer le concept géologique étudié. Cet écart pousse les apprenants de questionner la solution donnée par la professeure (c'est le cas de MEP9, voir chapitre 11).

La troisième piste : la présentation par l'enseignante d'un concept lié à la formation des chaînes de montagnes de collision comme un savoir solution. Et le propos formulé (ou le schéma tracé) par la professeure pour vouloir présenter aux apprenants ce savoir, inspire ces derniers à poser des questions qui ouvrent vers des préoccupations géologiques fortes. Cette piste est observée par exemple en MEP8 (qui porte sur le problème « du vide » posé par les élèves) : durant ce macro-épisode, l'enseignante trace le schéma montrant la lithosphère océanique entre l'axe de la dorsale et la zone des fosses afin de présenter aux élèves le métamorphisme des zones de subduction. Nous pensons que cela a aidé un apprenant à poser le problème « du vide » situé entre l'axe de la dorsale et la zone des fosses.

Notre analyse montre la présence d'un écart entre le raisonnement des élèves et celui des scientifiques. Nous pouvons détecter à titre d'exemple cet écart dans MEP9 où les élèves qualifient le métamorphisme de zones de subduction de haute pression- haute température. Nous pensons que les élèves font référence ici à la vie quotidienne lorsqu'ils réfléchissent aux conditions de la température (c'est la température ambiante et non pas la température interne du globe). Ils font appel aussi au gradient géothermique (la T° augmente avec la profondeur) pour comprendre le métamorphisme des zones de subduction. Quant aux scientifiques, ils

le qualifient de haute pression- basse température. En effet, ils associent ce métamorphisme des zones de subduction à l'idée d'enfoncement à « grande » vitesse d'une plaque froide (car elle est éloignée de l'axe de la dorsale marqué par la remontée du magma chaud) le long du plan de Benioff. Cela provoque nécessairement des réactions chimiques au niveau des roches enfouies à cause des variations importantes de la température et de la pression (Jolivet, 1997, p.97-98), entraînant alors l'apparition de nouvelles associations de minéraux. Puisque les roches de la plaque enfouie « sont emmenées en profondeur rapidement, plus rapidement » (ibid, p.100) qu'elles ne peuvent se réchauffer pour s'équilibrer avec le milieu environnant, les chercheurs en arrivent à penser des transformations de roches selon un gradient haute pression - basse température.

Nous pouvons détecter de même cet écart entre le raisonnement des élèves et celui des scientifiques dans MEP5 qui étudie le problème du devenir de l'eau océanique (posé par les élèves). En fait, pour les apprenants l'eau en question correspond bien à l'eau océanique et non pas celle qui se trouve dans les roches subduites (voir les chapitre 10 et 11 pour plus de détails).

La différence entre le raisonnement des élèves et des scientifiques, peut s'observer aussi dans le MEP7, qui étudie le problème « du vide » situé entre l'axe de la dorsale et la zone des fosses. Dans ce macro-épisode, les élèves pensent la formation des chaînes de montagnes en s'inscrivant dans le contexte des dérives des plaques où les plaques bougent et en se translatent, entraînant selon eux « un vide ». Contrairement aux apprenants, Les scientifiques quant à eux, s'inscrivent dans le cadre de la tectonique des plaques où la plaque subduite au niveau des zones de subduction est remplacée en continu par une nouvelle lithosphère océanique produite au niveau des zones des dorsales.

Suite à la précision des apports de notre recherche, nous allons maintenant passer à expliciter les limites et les perspectives de notre étude.

2 Limites et perspectives de notre recherche

Notre étude s'inscrit dans le cadre de l'apprentissage par problématisation en sciences de la Terre. Nous avons pu montrer la présence de moments potentiels de problématisation détectés lors des échanges observés durant une séquence ordinaire. Il sera intéressant de prolonger notre recherche tout en essayant d'utiliser

les zones potentielles de problématisation identifiées dans cette séquence ordinaire pour préparer une séquence forcée sur le problème de la formation des chaînes de montagnes de collision.

Par cette étude, nous viserons à mener une analyse épistémologico-langagière des débats en classe (en faisant un focus sur les moments argumentatifs). Cette analyse nous permettra cette fois-ci de comprendre comment les élèves peuvent construire de manière raisonnée le problème de la formation des chaînes de montagnes. Nous essaierons alors de détecter les moments d'hétéroglossie présents dans le débat (ceci nous donne une idée sur les possibles explicatifs proposés par les lycéens), de voir comment ces différentes voix sont orchestrées en classe (cette orchestration peut nous informer sur les nécessités construites), d'étudier l'ajustement du positionnement énonciatif des apprenants et comment se fait la secondarisation de leur discours tout au long de la séquence forcée.

Avec ces approfondissements que nous prévoyons de mener, il sera intéressant de ne pas se limiter seulement à la problématisation en sciences de la Terre. Il nous paraît important de poursuivre des études sur des problèmes qui s'inscrivent dans les « éducations à ». Notre intérêt vient du fait que nos recherches sont menées jusqu'à aujourd'hui sur la problématisation en sciences de la Terre. Cette dernière vise « *la construction des problèmes "froids" et la production de savoirs apodictiques stabilisés dans la communauté scientifique* » (Doussot et al., 2022, p. 186). En tant que chercheuse en sciences de l'éducation, nous posons alors les questions suivantes : quelle est la différence entre la construction de ces problèmes « froids » et travailler des problèmes « d'éducation à », qui sont considérés, quant à eux, comme des « *problèmes "chauds" tant chez les chercheurs que dans la société, parce que centrés sur l'Homme et son devenir (problèmes anthropisés), soumis à des points de vue variés, et porteurs d'incertitude* » (ibid, p. 186- 187), Quels sont les liens entre les problèmes de sciences de la Terre et ces problèmes anthropisés, et quels sont les outils que le chercheur en didactique peut utiliser pour étudier des séquences consacrées à l'étude des questions « d'éducation à ».

Dans ce cadre, les programmes de 2019, nous permettront d'étudier et de comprendre la spécificité de la construction des problèmes dans les « Education au développement durable » par exemple. En fait, nous pouvons trouver dans le programme de seconde SVT, tout un thème consacré aux « *enjeux contemporains de la planète* ». Parmi les sections qui composent ce thème, nous pouvons trouver

« Agrosystèmes et développement durable » : « L'augmentation de la population mondiale (près de 8 milliards d'habitants en 2018) pose des défis majeurs, à la fois quantitatifs et qualitatifs, notamment en termes d'alimentation. La compréhension de cet enjeu par les élèves, futurs citoyens, est au cœur de cette thématique : on étudie les caractéristiques des agrosystèmes et identifie les conditions d'une production durable à long terme, notamment grâce à la préservation des sols agricoles et des ressources aquatiques » (MEN, 2019, p. 10-11). Le programme de 2019, prend en compte aussi des thèmes liés à « l'éducation à la sexualité ». Nous parlons ici du programme de seconde, SVT où on peut trouver dans le thème « Corps humain et santé », toute une section consacrée au « cerveau, plaisir, sexualité ». Dans la partie « capacités », nous pouvons lire « Identifier les structures cérébrales qui participent aux processus de récompense à partir de documents et données médicales et expérimentales ; Différencier à partir de la confrontation de données biologiques et de représentations sociales, ce qui relève :

- de l'identité sexuelle, des rôles en tant qu'individus sexués et de leurs stéréotypes dans la société, qui relèvent de l'espace social ;
- de l'orientation sexuelle qui relève de l'intimité des personnes. - Effectuer des comparaisons évolutives avec les comportements reproducteurs des autres mammifères. » (M.E.N, 2019, p.13).

Les perspectives sont nombreuses et beaucoup de travail nous attend dans le sillage de travaux déjà entrepris par des didacticiens.

Bibliographie

- Astolfi, J.-P. (1986). Les langages et l'élaboration de la pensée scientifique. *Le français aujourd'hui*, n° 74, p. 51-57.
- Astolfi, J.-P., Peterfalvi, B., & Vérin, A. (1991). *Compétences méthodologiques en sciences expérimentales*. Paris : INRP
- Astolfi, J.-P. (2002). L'œil, la main, la tête. *Cahier pédagogique*, (409), p. 15-18.
- Aubouin, J. (2010). Subduction. Dans *Universalis*. Encyclopedia Universalis : E.U. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/subduction/>
- Aubuisson de Voisins, J.-F. (1803). *Mémoire sur les basaltes de la Saxe. Accompagné d'observations sur l'origine des basaltes en général. Classe des sciences physiques et mathématiques de l'Institut national*, an XI-1803, Paris, Courcier.
- Aubuisson de Voisins, J.-F. (d') (1819). *Traité de géognosie ou Exposé des connaissances actuelles sur la constitution physique et minéralogique du globe terrestre*, 2 Vol., F.G. Levrault, Paris, Strasbourg.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : PUF.
- Bachelard, G. (1949/ 1998). *Le rationalisme appliqué*. Paris : PUF.
- Bakhtine, M. (1952-1953, paru en 1979, tr. fçse 1984). *Esthétique de la création verbale*. Paris, Gallimard.
- Bakhtine, M. (1978). *Esthétique et création du roman*. Paris : Gallimard.
- Bakhtine, M. (1984). *Esthétique de la création verbale*. Paris : Gallimard.
- Barthes, R. (1984). *Le bruissement de la langue*. Paris : Éd. du Seuil.
- Bezacier, L. (2011). *Propriétés élastiques des minéraux hydratés : Applications à l'anisotropie sismique dans les zones de subduction*. Thèse de doctorat en sciences de la Terre, Ecole normale supérieure de Lyon.
- Borzeix, A. (2001). Le travail et sa sociologie à l'épreuve du langage. In A. Borzeix, A., & Fraenkel, B (dir). *Langage et Travail. Communication, cognition, action*. Paris : CNRS, p. 55-87.
- Bouchardon, J.-L. (2013). De la dérive des continents à la tectonique des plaques. Aperçu épistémologique de la géologie entre deux paradigmes. *EMSE : Axe Processus Naturels*, p. 1-37.
- Bronckart, J.-P. (1985). *Le fonctionnement des discours. Un modèle psychologique et une méthode d'analyse*. Paris : Delachaux et Niestlé.

- Bronckart, J.-P. (1996). *Activité langagière, textes et discours*. Paris : Delachaux et Niestlé.
- Bronckart, J.-P. (2007). Les sciences du langage sont des sciences de l'esprit. In F. Neveu & S. Pétilion (éd). *Sciences du langage et sciences de l'homme* (p.47-63). Limoges : Lambert Lucas.
- Chalak, H. (2014). Difficultés de construction de savoirs et de textes problématisés en sciences de la Terre et pratiques enseignantes : étude d'une séquence ordinaire portant sur le magmatisme. *Education et Didactique, Vol 8. N°3*, p. 55-80. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/educationdidactique/2063> , consulté le 30 avril 2022.
- Collingwood, R. (1938). *An autobiography*. Oxford, Oxford University Press.
- Coseriu, E. (2001). *L'homme et son langage*. Louvain : Paris : Sterling, Virginia : Editions Peeters.
- Delamétherie, J-C. (1802). Idées de Werner sur quelques points de la géognosie. *Journal de physique, de chimie, d'histoire naturelle et des arts*, T. 55, p. 443-450.
- Deparis, V. (2011a). La découverte de la convection mantellique. *Planet-Terre*, École normale supérieure de Lyon. Disponible sur : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/histoire-convection.xml>
- Deparis, V. (2011b). Histoire de la théorie de la tectonique des plaques. *Planet-Terre*, École normale supérieure de Lyon.
- Deparis, V., & Thomas P. (2011). La dérive des continents de Wegener. *Planet-Terre*, École normale supérieure de Lyon. Disponible sur : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/derive-continents-wegener.xml>
- Dewey, J. (1967/1993). *Logique, La théorie de l'enquête*. Paris : PUF.
- Dousot, S., Hersant, M., Lhoste, Y., & Orange-Ravachol, D. (2023). *Le cadre de l'apprentissage par problématisation. Apports aux recherches en didactique*. Presses Universitaires de Rennes (PUR).
- Dubois, J., Giacomo, M., Guespin, L., Marcellesi, C., Marcellesi, J-P., & Mével, J-P. (1994). *Dictionnaire de linguistique et des sciences du langage*. Larousse. Paris.
- Ducancel, G. (1980). Rôle de la communication orale et écrite des élèves dans les activités d'éveil scientifiques à l'école élémentaire. *Repères, n° 58*, p. 2-5.
- Durand-Delga, M. (2006). Trois essais de tectonique globale avant la lettre, par Léonce Élie de Beaumont, Eduard Suess et Alfred Wegener. *Travaux du comité*

français d'histoire de la géologie (COFRHIGÉO) TROISIÈME SÉRIE, t. XX, n° 5, p. 75- 103. Disponible sur :
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00906975/document>

Fabre, M. (1999). *Situations-problèmes et savoir scolaire*. Paris : PUF.

Fabre, M. (2006). La philosophie des problèmes de Gilles Deleuze. *Séminaire Problématisation*. Document interne, CREN, université de Nantes.

Fabre, M. (2007). Des savoirs scolaires sans problèmes et sans enjeux. La faute à qui ? *Revue française de pédagogie*, (161), p. 69-78.

Fabre, M. (2009). *Philosophie et pédagogie du problème*. Paris : Vrin.

Fabre, M. (2017). *Qu'est ce que problématiser ?* Paris : Vrin

Fabre, M., & Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *Aster*, n°24, p. 37-57. Disponible sur Internet :
<http://ife.ens-lyon.fr/publications/edition-electronique/aster/RA024-03.pdf>
(consulté le 04 mars 2022)

Fisher, S. (1999). *Enonciation : Manières et territoires*. Paris : Ophrys.

Forsyth, D.W., & Uyeda, S. (1977). On the relative importance of the driving forces of plate motion. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc*, 43, p. 163- 200.

François, F. (1989). *Langage et pensée : dialogue et mouvement discursif chez Vygotski et Bakhtine*. *Enfance*, vol. 42, n° 1-2, p. 39-48.

François, F. (1993). *Pratiques de l'oral : dialogue, jeu et variations des figures du sens*. Paris : Nathan.

Gallay, A. (1995). L'ethnoarchéologie entre sciences et histoire : une réflexion sur le développement des sciences de la nature. In: Delaigue, Marie-Christine (Ed.). *Ethno-archéologie méditerranéenne : finalités, démarches et résultats*. Madrid : Casa de Velázquez, 1995. p. 17-27.

Garcia, R. (1973). L'explication en physique. In *L'explication dans les sciences*. Paris : Flammarion.

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 XVIIè et XVIIIè 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.

Gohau, G. (2010). *Histoire de la Tectonique. Des spéculations sur les montagnes à*

la tectonique des plaques, Vuibert/ADAPT-SNES.

Grize, J.-B. (1982). *De la logique à l'argumentation*. Genève : Librairie Droz.

Grize J.-B. (1990). *Logique et langage*, Paris, Ophrys.

Grize, J.-B. (1996). *Logique naturelle et communication*. Paris : PUF.

Guillaume, G. (1929). *Temps et Verbe*, Paris, Champion.

Hall, J. (1815). On the Vertical Position and Convolutions of Certain Strata, and Their Relation with Granite , *Trans. Roy. Soc. Edinburgh, VII*, p. 79-108.

Hallam, A. (1976). *Une révolution dans les sciences de la Terre. De la dérive des continents à la tectonique des plaques*, Editions du Seuil.

Hattori, K. et Guillot, S. (2003). Volcanic fronts form as a consequence of serpentinite dehydration in the forearc mantle wedge. *Geology*, 31(6), p. 525–528.

Hoetker, J., & Ahlbrand, W. (1969). The persistence of the recitation. *American Educational Research Journal*, vol. VI, n°2, 1969, p.145-167.

Jacoby, W. R. (1970). Instability in the Upper Mantle and Global Plate Movements. *J. Geophys. Res.*, (29), p. 5671–5680.

Jacoby, W. R. (1981). Convection Experiments and the Driving Mechanism. *Geol. Rundschau*, 70, p. 207–230.

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. (2001). Pratiques de reformulation et construction des savoirs. *ASTER-écrire pour comprendre les sciences*, (33), p. 81-110.

Jaubert, M., & Rebière, M. (2005). Émergence d'un concept en didactique du français : la secondarisation. *Actes du colloque épistémologie des didactiques des disciplines*, Bordeaux, mai 2005 (actes sur cédérom).

Jaubert, M., & Rebière, M. (2012). Communauté discursives disciplinaires scolaires et constructions de savoirs : l'hypothèse énonciative. Texte disponible sur Forumlecture.ch

https://www.leseforum.ch/myUploadData/files/2012_3_Jaubert_Rebiere_Bernier.pdf

Jeffreys, H. (1978). in Frankel H, *Arthur Holmes and continental drift*. The British

Journal for the History of Science, 11, 38, 130-149.

Jolivet, L. (1997). *La déformation des continents*. Paris : HERMANN.

Jolivet, L. (2011). *Comment poussent les montagnes ?* Paris : Le Pommier.

Kerbrat-Orecchioni, C. (1998). *Les interactions verbales, tome 1*. Paris : Armand Colin.

Lévy, F. (2009). *Deux aspects de l'influence des continents sur le manteau terrestre: Initiation de la subduction- Effet thermique des racines continentales*. Thèse de doctorat en géophysique, université Paris 7- Denis Diderot, disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01357539/document> , consulté le 16 mars 2022)

Lhoste, Y. (2008). *Problématisation, activités langagières et apprentissage dans les sciences de la vie. Étude de quelques débats scientifiques dans la classe dans deux thèmes biologiques : nutrition et évolution*. Thèse de doctorat en sciences de l'éducation, université de Nantes. (Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00376892/document> , consulté le 19 Janvier 2022)

Lhoste, Y. (2017). *Epistémologie et didactique des SVT*. Bordeaux : Presses universitaires de Bordeaux.

Martinand, J.-L. (1992). Présentation. In J.-L. Martinand (éd.). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 7-22.

Martinand, J.-L. (1994). Quels enseignements peut-on tirer des travaux sur la modélisation dans la perspective du développement de curriculum ? Notes pour la recherche. In J.-L. Martinand (coord). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 115-125

Martinand, J.-L. (1996). Introduction à la modélisation. In *Actes du séminaire de didactique des disciplines technologiques* (Cachan 1994-95), p. 126-138.

Mercier, A. (2008). Pour une lecture anthropologique du programme didactique. *Éducation et didactique*, 2, p.7-40.

Merleau-Ponty, M. (1968). Résumés de cours. *Collège de France 1952-1960*. Paris : Gallimard.

Meyer, M. (1979). *Découverte et justification en sciences*. Paris : Klincksieck.

Meyer, M. (1991). Pour une critique de l'ontologie. *Bruxelles, Editions de l'université de Bruxelles*.

Nicolas, A. (1999). *Les montagnes sous la mer*. Orléans : BRGM.

Nonnon, E. (2002). Des situations problèmes pour la verbalisation. Difficultés à dire et travail de l'énonciation. *Repères*, (24-25), p.23-57.

- Orange, C. (1994). Les modèles de la mise en relation au fonctionnement. In J.-L. Martinand (éd.) *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- Orange, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF.
- Orange, C. (2000). *Idées et raisons : Construction de problèmes, débats et apprentissages scientifiques en sciences de la vie et de la Terre*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches en sciences de l'Éducation non publié, université de Nantes, Nantes.
- Orange, C. (2002). Apprentissages scientifiques et problématisation. *Les Sciences de l'éducation-Pour l'ère nouvelle*, vol.35, n°1, 2002, p. 25-42. CERSE-Université de Caen.
- Orange, C. (2003). Débat scientifique dans la classe, problématisation et argumentation. Le cas d'un débat sur la nutrition au cours moyen. *Aster*, (37),p. 83-107.
- Orange, C. (2010). Situations forcées, recherches didactiques et développement du métier d'enseignant. *Recherches en Education*, HS N°2, p. 73-85. Disponible sur: <http://www.recherches-en-education.net/IMG/pdf/REE-HS-no2.pdf>, consulté le 16 janvier 2022.
- 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. *Actes des cinquièmes rencontres scientifiques de l'ARDIST. Montpellier : LIRDEF*, p. 305-312.
- Orange, C., & Orange Ravachol, D. (2017). Problématisations scientifiques fonctionnalistes et historiques en éducation relative à l'environnement et au développement durable : le cas de l'évolution climatique, *REVUE DES HEP*, n° 22, p. 12-31.
- Orange Ravachol, D. (2003). *Utilisation du temps et explications en sciences de la Terre par les élèves de lycée : étude dans quelques problèmes géologiques*. Thèse de doctorat, université de Nantes, Nantes. Disponible sur : <https://theses.hal.science/tel-00480254/document>
- Orange Ravachol, D. (2005). Problématisation fonctionnaliste et problématisation historique en sciences de la Terre chez les chercheurs et chez les lycéens. *Aster*, n° 40, p. 177-204
- Orange Ravachol, D. (2007). Des mises en histoire aux savoirs scientifiques : le cas de lycéens confrontés à quelques problèmes de tectonique des plaques. *Aster*, n° 44, p. 41-68.
- Orange Ravachol, D. (2010a). *Problématisation fonctionnaliste et historique dans la construction de savoirs et les apprentissages en sciences de la terre et de la vie. Entre continuité phénoménale et discontinuité événementielle*. Mémoire

d'Habilitation à diriger des recherches. Nantes : Université de Nantes.

Orange Ravachol, D. (2010b). Efforts de problématisation et choix en situation : cas d'enseignants expérimentés et moins expérimentés. Quelle place pour la problématisation ? In M. Fabre, Dias de Carvalho & Y. Lhoste, Eds. *Expérience de problématisation en éducation, Aspects philosophiques, sociologiques et didactiques*. Porto : Edições Afrontamento. p. 135-155.

Popper, K.R. (1991). *La connaissance objective*. Paris : Aubier.

Retif, P. (2017). *De la cartographie dans l'histoire de la géologie des granites*. Thèse de doctorat en histoire de la géologie, université de Nantes, Nantes.

Ricoeur, P. (1983). *Temps et récit : 1. L'intrigue et le récit historique*. Paris : Éd. du Seuil.

Savaton, P. (2011). Histoire des sciences et enseignement du modèle de la tectonique des plaques. *RDST*, n°3, p. 107-126. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/rdst/394>

Savaton, P. (2016). Le temps fondateur de la géologie. *Revue Romantisme*, n°174, p. 29-39. Disponible sur : <https://www.cairn.info/revue-romantisme-2016-4-page-29.htm>

Savaton, P. (2019). La catastrophe dans les discours géologiques de Georges Cuvier et Léonce Élie de Beaumont. *Cahiers FRANÇOIS VIÈTE*, Série III – N° 7, p. 45-69

Schneeberger, P. (2008). Travail langagier et construction de savoirs en sciences. *Les Dossiers des Sciences de l'Éducation*, n° 20, p. 91-106.

Schneuwly, B., & Bronckart, J-P. (1990). *Vygotsky aujourd'hui*, Textes de base en psychologie, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel et Paris.

Touret, J. (2007). Élie de Beaumont (1798-1874), des systèmes de montagnes au réseau pentagonal. *Travaux du comité français d'histoire de la géologie (COFRHIGÉO) Troisième série, t. XXI, n° 4*, p.127-155. Disponible sur : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00910742/document>

Turcotte, D.L., & Oxburgh, E.R. (1967). Finite amplitude convective cells and continental drift. *J. Fluid Mech*, 28, p. 29-42.

Vergnioux, A. (2003). *L'explication dans les sciences*. Paris : Bruxelles : De Boeck.

Veyrunes, P. (2017). *La classe : hier, aujourd'hui et demain ?* Presses universitaires du Midi, université Toulouse.

Veyrunes, P., & Saury, J. (2009). Stabilité et auto-organisation de l'activité collective en classe : exemple d'un cours dialogué à l'école primaire. *Revue française de*

pédagogie, n° 169, p.67-76.

Vion, R. (2000). *La communication verbale :Analyse des interactions*. Hachette Université Linguistique.

Volochinov, V-N. (1929\1977). *Le Marxisme et la philosophie du langage*. Paris : Éd. de Minuit.

Vygotski, L.S. (1934/1985). *Pensée et langage*. Paris : Editions sociales.

Wegener, A. (1928). *La genèse des continents et des océans*. réédition, Paris, C. Bourgeois, 1990.

Wells, G. (2009). Community Dialogue: The bridge between individual and Society. *Language Arts*, vol. 86, n° 4, pp. 290-301.

Werner, A G. (1788). In Neue Entdeckung. *Intelligenz-Blattes der Allgem. Literatur Zeitung*, n°57.

Wittgenstein, L. (1953\1961). *Investigations philosophiques*, Paris, Gallimard.

Young, D A. (2003). *Mind over Magma : The Story of Igneous Petrology*. Princeton University Press, Woodstock.

Programmes et textes officiels :

M.EN. (2010). 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.*, n° 9, 30 septembre 2010.

M.EN. (2011). Programme de l'enseignement spécifique et de spécialité de SVT en classe terminale de la série scientifique. *B.O.E.N.*, n° 8, 13 octobre 2011.

M.EN. (2019). Programme de l'enseignement de sciences de la vie et de la Terre de la classe de seconde générale et technologique. *B.O.E.N.* spécial. n°1, 22 janvier 2019.

Table des annexes

Annexe 1. La transcription de l'entretien avec Laurent Jolivet, professeur à Sorbonne université, chercheur à l'institut des sciences de la Terre de Paris (ISTeP). Entretien enregistré le 25 novembre 2019.	273
Annexe 2. Les échanges menés avec Laurent Jolivet, sur le métamorphisme des zones de subduction. Le courriel a été envoyé le 05 décembre 2021.	293
Annexe 3. La transcription de la séance observée juste avant la séquence observée	295
Annexe 4. La suite des macrostructures des macro-épisodes identifiés dans notre étude	300
Annexe 5. La transcription de la première séance de la séquence étudiée	344
Annexe 6. La transcription de la deuxième séance de la séquence étudiée	355
Annexe 7. La transcription de la troisième séance de la séquence étudiée	366
Annexe 8. La transcription de la quatrième séance de la séquence étudiée	378

Annexe 1. La transcription de l'entretien avec Laurent Jolivet, professeur à Sorbonne université, chercheur à l'institut des sciences de la Terre de Paris (ISTeP). Entretien enregistré le 25 novembre 2019.

1	ME : Bonjour Monsieur Laurent, merci beaucoup d'accepter de collaborer avec nous et consacrer un peu de votre temps pour qu'on puisse échanger sur quelques points.
2	LJ : Allez-y
3	ME : Si on commence par la subduction. En fait, comment la communauté scientifique actuelle explique-t-elle en fait la subduction, à nos jours ?
4	LJ : Oui. Ça, c'est une question qui demande un long développement, mais depuis la fin des années soixante, les observations montrent la réalité de la subduction. Donc, c'est la répartition des séismes à la surface de la Terre, c'est la répartition des séismes en profondeur. C'est ce qu'on sait des mouvements au moment des séismes, ce qu'on appelle les mécanismes au foyer qui montrent que c'est la compression, et
5	ME : D'accord.
6	LJ : Et puis, on a tout le calcul cinématique à la surface du globe montrant que, si on suppose... On est d'accord avec ça aujourd'hui, c'est-à-dire, le volume de la Terre ne change pas.
7	ME : D'accord.
8	LJ : Au cours du temps, puisqu'on a de l'expansion des fonds océaniques le long des dorsales, il faut que cette nouvelle lithosphère qui est fabriquée disparaisse quelque part, et il se trouve que, toutes les données montrent que c'est bien au niveau des zones de subduction, donc maintenant, on arrive à voir la subduction, à voir la lithosphère en subduction avec toutes les méthodes de la sismologie, la tomographie sismique, etc... Donc, on est certain de la réalité de la subduction. D'accord. Et ensuite, on connaît les vitesses de subduction actuelles. Donc, on est capable de les mesurer avec les informations au niveau des océans, des anomalies magmatiques qui donnent des vitesses d'ouverture au niveau des dorsales et lorsqu'on fait des calculs sur... en gros, qui disent que la surface de la Terre ne change pas. On arrive à déterminer partout la vitesse de subduction.
9	ME : D'accord. On peut calculer cette vitesse par quels moyens ? On peut dire, des moyens sismiques ?
10	LJ : Il y a deux choses : Il y a d'une part, on peut les calculer et par les calculs c'est , on connaît indépendamment les vitesses de formation de la lithosphère océanique au dorsale. Ça, c'est très connu et c'est la seule chose ou le seul endroit où, on a des données indépendantes sur les vitesses.
11	ME : D'accord.
12	LJ : On parle de la tectonique des plaques comme elle était établie fin des années 60. Après, il y a des données nouvelles aujourd'hui. Et donc, comme

	on connaît les vitesses aux dorsales, on connaît en gros, la quantité de lithosphère nouvelle formée par tout, et en faisant, c'est un peu technique mais en faisant la somme des vecteurs rotations de chaque plaque les unes par rapport aux autres, il y a au total 12 plaques.
13	ME : Oui.
14	LJ : Chaque plaque par rapport à ses voisines, donc, on peut déterminer un vecteur rotation de cette plaque par rapport à toutes ses voisines.
15	ME : OK.
16	LJ : Et comme on est en géométrie sphérique, que la surface ne change pas. Si on fait la somme de tous ces vecteurs on devrait tomber sur 0.
17	ME : D'accord.
18	LJ : tout ce qui est formé à la dorsale, va disparaître en subduction. C'est ça ce que ça veut dire. Voilà, et donc quand on additionne tous ces vecteurs, c'est là que ça va... devient un peu technique. Ça va une grosse matrice.
19	ME : Eh...
20	LJ : On inverse cette matrice, et on arrive à déterminer tous les mouvements partout. Dans cette matrice il y a une chose connue, la vitesse par exemple aux dorsales ; il y a des choses inconnues, c'est les vitesses dans les zones de subduction et on arrive en inversant cette matrice à connaître la vitesse partout. Voilà. Donc, ça, c'est ce qu'on connaît fin les années 60, qui a été précisé après, jusqu'à une vingtaine d'années, et puis, aujourd'hui, on a d'autres données qui sont acquises grâce aux satellites.
21	ME : D'accord.
22	LJ : La géodésie spatiale, le GPS qui montre que...Et avec le GPS, on peut mesurer directement les vitesses de subduction. Quand on a des îles par exemple sur les plaques océaniques sur lesquelles on peut déposer des GPS, on peut mesurer directement la vitesse de rapprochement entre par exemple l'île de Hawaï et le Japon.
23	ME : OK
24	LJ : entre le Galápagos et l'Amérique de sud. Donc, on connaît parfaitement la géométrie des zones de subduction, on connaît très bien les vitesses de subduction, et ça on peut remonter dans le temps jusqu'à ce qu'on a plus d'informations sur la vitesse d'ouverture, c'est-à-dire il n'y a plus de lithosphère océanique de cet âge là, avant disant 180, 200 millions d'années. C'est-très indirect, mais pour les périodes jusqu'à on remonte à 180, 200 millions d'années, on a les informations directes sur les vitesses de subduction et leurs directions, etc.
25	ME : D'accord. Et si par exemple on calcule l'âge d'une lithosphère océanique ancienne et avec une lithosphère continentale ancienne, on va remarquer par exemple, c'est-à-dire vu qu'il y a subduction donc l'âge est un peu jeune d'une lithosphère océanique, c'est ça ?
26	LJ : Pas forcément, la lithosphère océanique elle est, si on est près de la dorsale

27	ME : Oui.
28	LJ : La lithosphère océanique va être jeune. Si on s'éloigne de la dorsale, la lithosphère océanique qui arrive dans les zones de subduction est très âgée.
29	ME : Oui, mais parce qu'il y a une de la subduction, la lithosphère la plus âgée, on peut dire du globe, elle va être enfouie normalement, donc...
30	LJ : Oui ?
31	ME : Donc si on la compare avec une lithosphère continentale très ancienne aussi, on va remarquer que l'âge de la lithosphère continentale, il est plus âgé. C'est ça ?
32	LJ : Non, la lithosphère continentale, elle peut être plus âgée que la lithosphère océanique, mais ce qui compte, c'est pas vraiment l'âge, c'est la densité. Parce que ce qui gouverne la subduction grosso modo, c'est la densité entre la plaque qui plonge et
33	ME : L'asthénosphère.
34	LJ : L'asthénosphère, et donc si vous mettez deux plaques en présence l'une de l'autre, qu'elles convergent, vous allez faire déplacer la plus dense sous la plus légère.
35	ME : Oui.
36	LJ : Et donc la lithosphère continentale, elle comprend une croûte continentale plus dense parce qu'elle est faite de Granite, de Gneiss, de sédiments, etc.
37	ME : Oui
38	LJ : Alors que la lithosphère océanique, elle est faite que des roches ultra
39	ME : basiques
40	LJ : ultrabasiques, plus denses, plus elle est âgée la lithosphère océanique. Ça c'est vrai aussi pour la lithosphère continentale, plus elle est âgée, plus elle est dense. Elle a le temps de refroidir, de s'épaissir, se contracter, parce qu'elle est plus froide.
41	ME : Donc le mécanisme d'initiation de subduction, c'est donc une instabilité gravitationnelle due à, donc la différence de la densité ? C'est ça ?
42	LJ : Alors, il y a sans doute deux choses différentes : D'abord, elle n'est pas résolu la question d'initiation de la subduction. Il avère qu'il y a deux mécanismes possibles, la plus simple est celle qui est plus facile à modéliser, maintenant on fait des modèles numériques de l'ensemble du globe où on voit se créer les zones de subduction, des dorsales, etc. C'est effectivement, le moteur principal de la subduction c'est la densité de la lithosphère, c'est une instabilité gravitaire, donc la lithosphère la plus dense passe en subduction, c'est la conviction en fait.
43	ME : Oui
44	LJ : Mais il peut y avoir effectivement parce que la configuration des plaques est plus complexe, On va avoir des endroits où la lithosphère qui va subduire, subductée, elle va pousser pour passer en subduction, c'est pas le poids de la lithosphère mais qu'on pousse dans les cotés.
45	ME : Des forces.

46	LJ : Des forces horizontales qui sont transmises dans la lithosphère qui force la subduction.
47	ME : OK.
48	LJ : Elle n'est pas spontanée, mais elle est forcée. ET là, il y a toute une discussion dans la communauté, à savoir quelle est la part de l'une ou de l'autre. C'est pas tout à fait clair.
49	ME : D'accord. C'est encore en discussion cette partie.
50	LJ : Oui.
51	ME : Si on passe M.Laurent à... Donc, dans certaines chaînes de montagnes, on peut donc trouver des ophiolites qui se trouvent dans les sommets par exemple des Alpes. En fait, comment peut-on expliquer la présence de ces ophiolites, cette position atypique normalement parce que cet assemblage, il ressemble à la composition d'une lithosphère océanique. Donc, on peut dire que c'est une position atypique ou anormale donc.
52	ME : Oui, ça, c'est une question importante aussi. Donc, il y a deux cas un peu différents. Si vous prenez la plus grande nappe ophiolitique au monde, elle se situe en Oman sur la péninsule arabique, et là, on a sur une surface qui aussi grande que les Alpes Franco-italiennes. On a un morceau de croûte océanique avec un petit peu du manteau posés sur la lithosphère continentale. Ce processus qui, vient contre intuitif, qui amène de la lithosphère continentale sur la lithosphère océanique, c'est ce qu'on appelle l'obduction. C'est l'opposé de la subduction.
53	ME : Oui.
54	LJ : Donc les mécanismes de cette . On sait que c'est une réalité, voilà, elle s'est arrivée plusieurs fois dans l'histoire de la terre. Ça arrive à des moments particuliers par exemple fin du crétacé, voilà vers 100, 80 millions d'années, dans la Téthys, il y a eu un événement majeur d'obduction. Il y a en a à d'autres périodes de l'histoire de la Terre. On ne sait pas exactement encore les causes.
55	ME : le mécanisme.
56	LJ : On pense cette fois que c'est lié à la subduction forcée de la lithosphère continentale sous la lithosphère océanique, c'est-à-dire à l'envers.
57	ME : ok .
58	LJ : C'est sans doute lié à des périodes où les mouvements des plaques sont plus rapides.
59	ME : D'accord. C'est la subduction forcée de la lithosphère continentale sous
60	LJ : sous la lithosphère océanique, et on retrouve des roches métamorphiques très caractéristiques de la subduction.
61	ME : Oui.
62	LJ : C'est-à-dire des roches de haute pression- basse température : des schistes bleus, des éclogites, sous cette nappe ophiolitique obductée. On est sûre de ça.
63	ME : Oui et donc, en fait comment on peut trouver des roches métamorphiques

	normalement qui se sont formées ou des minéraux qui montrent un métamorphisme, dans des conditions de haute pression-basse température, qui se trouvent dans les sommets des Alpes ? c'est dû oui au charriage, donc à l'obduction Mais c'est-à-dire normalement la lithosphère, elle est déjà, elle s'est enfoncée, donc la subduction de la lithosphère continentale qui a entraîné donc la présence de ces minéraux métamorphiques on peut dire dans les sommets des Alpes ? parce que la lithosphère, elle est déjà enfouie dans l'asthénosphère.
64	LJ : Donc, oui, c'est une question, je vais la traiter après, parce que j'avais commencé tout d'abord. Si vous prenez l'oman, vous avez la lithosphère océanique de la croute qui est posée sur la croute continentale, et cette lithosphère océanique elle n'est pas métamorphique.
65	ME : D'accord.
66	LJ : Elle n'est jamais été en profondeur.
67	ME : D'accord.
68	LJ : par contre les roches continentales qui sont au dessous, on va trouver des unités qui sont elles métamorphiques. On reviendra à ça après. Ensuite, il y a d'autres contextes. Si on prend les Alpes occidentales françaises, il y a des ophiolites qui sont sur des surfaces très petites comme le chenailait par exemple dans la région de Briançon qui ressemblent un peu aux ophiolites qui ont été obductés dans la région d'Oman sauf que c'est tout petit, ça fait quelques Km carré. Voilà et c'est peu métamorphique aussi.
69	ME : OK.
70	LJ : Mais la majeure partie des ophiolites dans les Alpes par exemple si vous prenez le grand massif de l'Oisans ou le massif de Zermatt en suisse, sont des massifs, vous avez des roches ophiolitiques depuis les péridotites du manteau jusqu'aux basaltes et sédiments qui été posés par au dessus qui elles sont métamorphiques et qui ont enregistré des conditions de haute pression- basse température : schiste bleu, éclogite.
71	ME : Oui.
72	LJ : Voilà, donc elles sont descendues jusqu'à 60, 80, 100 Km de profondeur et qui sont remontées. Donc, ce n'est pas le même mécanisme de tout de mise en place des ophiolites sur les sommets actuels.
73	ME : D'accord.
74	LJ : Il y a l'obduction et puis il y a des roches océaniques qui sont passées en subduction et qui sont remontées.
75	ME : D'accord.
76	LJ : ça, ça pose le problème des raisons d'exhumation des roches qui ont passé en subduction.
77	ME : D'accord.
78	LJ : ça va. Alors on commence à comprendre un petit peu. Pour les roches océaniques des Alpes, mais aussi pour les roches continentales des Alpes. Comme les roches de Briançonnais par exemple qui ont descendu à grande

	profondeur jusqu'à 100 Km de profondeur et qui sont remontées, c'est valable aussi pour les roches métamorphiques de HP-BT qui sont sous les ophiolites d'Oman. D'accord ?
79	ME : Oui.
80	LJ : Alors, ce qu'on pense aujourd'hui, dans la zone de subduction, que ce soit la lithosphère océanique ou la lithosphère continentale, alors la lithosphère elle va amener avec elle des sédiments, ou des roches magmatiques etc, elle va amener jusqu'à des profondeurs très variables selon les unités, jusqu'à ce que le différentiel de densité entre ces roches qui plongent et l'environnement, c'est-à-dire le manteau en gros, soit suffisamment faible pour que ces roches puissent continuer à rester attaché à la lithosphère, et il y a un moment où aux différentes raisons, le contact entre ces roches qui sont enfouies et la lithosphère qui descend va être fragilisée par, par exemple des fuites pour transformer la roche et la rend plus faible et du coup elles vont se détacher de la lithosphère qui plonge et comme elle sont plus légères, elles vont remonter dans l'interface entre deux plaques.
81	ME : D'accord.
82	LJ : Ce qu'on appelle le canal de subduction.
83	ME : OK.
84	LJ : Donc, elles descendent avec la lithosphère jusqu'à un certain point, puis à un moment lorsqu'elles atteignent le pic de pression, elles vont se détacher et remonter. Ce qui va donner dans le schéma de pression-température la partie retour vers la surface. Ça s'appelle le schéma rétrograde.
85	ME : Ok.
86	LJ : Voilà, on sait que ça existe, que ça fonctionne, on ne sait pas vraiment pourquoi, comment, il y a beaucoup d'articles là-dessus, beaucoup de travaux là-dessus. On fait partie des équipes qui ont beaucoup travaillé là-dessus. Il ya dans le monde entier des gens qui travaillent sur cette question. En gros, c'est ce que je vous ai raconté, ça descend et puis un moment il ya des processus métamorphiques, des fuites, etc qui font que ça va se détacher et remonter en surface et c'est comme ça dans le Mont Vuso que ça descend jusqu'à 80 km de profondeur et remonter. C'est comme ça dans le massif de Dora-Maira dans les Alpes Franco-italiennes descendent à 100 Km et remonter. Voilà.
87	ME : D'accord.
88	LJ : Donc il y a un chemin dans le canal de subduction où les roches descendent, se détachent et remontent.
89	ME : Oui.
90	LJ : ça va ?
91	ME : Oui. Ça va. En fait, Mr. Laurent pour lire d'autres articles ou références, vous pouvez me conseiller de lire quelques articles ?
92	LJ : Vous lisez l'anglais en géologie.
93	ME : Oui. Français, anglais, oui, c'est pas un problème.
94	LJ : Alors, vous pouvez lire un article qui a sorti en 2009. AGARD sur les roches

	océaniques métamorphiques dans la subduction. Il y a pas mal. Essayez de rester dans la région des Alpes, il y a un article très bien, qui a sorti dans les années 2015 de LIANG à Geology sur les profils sismiques dans les Alpes qui posent ce genre de questions. Sinon, j'ai écrit un article en 2003 sur les chaînes méditerranéennes et ces histoires dans les chaînes méditerranéennes.
95	ME : D'accord.
96	LJ : C'est en American geology science. Essayez de trouver des articles synthétiques quoi. Vous pouvez me rappeler de toute façon pour vous donner d'autres références.
97	ME: D'accord. Merci. Donc Mr. Laurent le mécanisme d'obduction , c'est un mécanisme qui ne se fait pas d'un jour à un lendemain. Ça se fait, ça prend du temps
98	LJ: ça prend du temps. Oui, mais à l'échelle géologique, c'est pas si long que ça. D'accord. L'obduction lorsque c'est passé en Oman, ça doit durer 10, 20 millions d'années pas plus. Dans l'histoire d'une chaîne de montagne, c'est pas long.
99	ME : Ok. Donc, dans la nature actuelle c'est pas facile de déterminer dans une telle zone du globe par exemple qu'il y a des indices de terrain qui nous indique vraiment à cette zone là, Il ya obduction, un charriage qui est en train de se réaliser ?
100	LJ : Alors non, parmi les difficultés c'est que justement on ne connaît pas des zones actuellement en obduction aujourd'hui vraisemblablement on n'a pas de zones actuellement en obduction. Vraisemblablement on n'a pas aujourd'hui on n'a pas. Par contre, pour faire l'obduction, il faut déformer la lithosphère océanique pour qu'elle se casse et que cette lithosphère océanique aille sur la L. continentale. Et ça, on connaît des zones de déformations de la lithosphère océanique et en particulier au sud de l'Inde aujourd'hui. On a des déformations, des grands plis qui sont à l'échelle de la centaine de Km de la lithosphère et associés à ces grands plis on a pleins de failles inverses à l'intérieur de la croûte. Tout ça c'est une zone compressive assez large qui fait peut-être 1000 Km de large au sud de l'Inde qui permet aujourd'hui de séparer la plaque indienne et la plaque australienne. C'est la déformation compressive répartie dans l'espace par une limite des plaques, c'est une limite pas très nette et on se dit peut-être un jour il y aura une zone de subduction et qu'elle commencera peut-être par l'obduction. C'est ce qu'on peut dire. On n'a pas d'exemple actuel d'obduction active reconnue.
102	ME : Et pour savoir qu'il y a obduction ou pas, parce qu'il y a la présence des ophiolites. On ne peut pas les trouver dans toutes les chaînes de montagnes, dans certaines chaînes ?
103	LJ : Dans beaucoup de chaînes de montagnes, il y a des ophiolites, mais il y a des chaînes de montagnes où il n'y a pas d'ophiolites comme les Pyrénées par exemple
104	ME : D'accord.

105	LJ : ou l'Atlas dans le nord d'Afrique. L'Atlas, il n'y a pas d'ophiolites non plus. Ces chaînes sont juste des chaînes intracontinentales dans lesquelles avant il y a avait un rift, il est plus avancé en Pyrénées. Mais aussi en Atlas, il y a un rift et ce rift s'est refermé. On a des roches de rift dans la chaîne, mais on n'a pas d'ophiolites parce qu'il n'y a pas d'océanisation. Voilà, il n'y a pas d'ophiolites dans toutes les chaînes de montagnes mais il y en a dans beaucoup de chaînes de montagnes.
106	ME : Et donc dans les chaînes où il n'y a pas d'ophiolites normalement, la lithosphère océanique elle est complètement enfouie dans l'asthénosphère?
107	LJ : Non. Non, ça veut dire qu'il y a jamais d'océan entre les deux continents, entre les deux morceaux, dans les Pyrénées, par exemple, il n'y a jamais d'océan entre l'Ibérie et l'Europe. Il y a eu juste un rift continental. On peut avoir un peu de manteau, mais il n'y a pas de croûte océanique et le rift n'est pas très large.
108	ME : D'accord.
109	LJ : En général, quand il ya eu un océan, on retrouve toujours des morceaux d'ophiolites en plus au moins de grande quantité, mais on retrouve toujours.
110	ME : OK.
111	LJ : Dans l'Himalaya par exemple
112	ME : Donc, pour avoir un charriage des unités de lithosphère océanique, en fait c'est pas seulement dans le cas de nappe charriage de collision (je veux dire chaîne de montagne de collision).
113	LJ : ça commence par l'obduction, c'est ce qu'on voit en Oman, mais cette obduction, elle n'existe pas toujours dans les Alpes, on n'a pas de grandes nappes ophiolitiques obductées parce que tous les ophiolites sont métamorphiques, c'est à dire qu'elles sont toutes enfouies en profondeur dans la subduction. Donc, c'est des morceaux qui remontent mais ce n'est pas une grande nappe immense comme celle d'Oman où c'est gigantesque, où on peut cartographier le Moho par exemple.
114	ME : Donc la différence des nappes de charriage c'est dû à la force, à la rapidité que la lithosphère va s'enfouir ou pas dans l'asthénosphère ?
115	LJ : Alors, il faut faire attention, dans les chaînes de montagnes, il y a des nappes de charriage qui correspondent à la partie océanique : la nappe ophiolitique va être obductée, ou les roches qui remontent de la zone de subduction, vont être charriées. Et aussi il y a des nappes de charriage dans la croûte continentale. Dans les Alpes par exemple, le Briançonnais est charrié sur le Dauphinois, etc. Donc, il y a des grandes nappes de charriage qui sont dans le continent. En Himalaya, c'est caricatural, vous avez d'immenses nappes de charriage avec des contacts qui font des milliers de Km de long, qui amènent des unités crustales les unes sur les autres, avec des centaines de Km de déplacement, le long de ces failles inverses, en contact de charriage, les grands chevauchements.
116	ME : Oui.

117	LJ : Voilà, c'est lié au fait qu'une fois la collision est faite , l'océan a disparu, la marge continentale qui passe en subduction. Alors, c'est d'abord la partie amincie de la marge continentale puis la partie la plus épaisse, et ça c'est de plus en plus difficile à faire parce que la L.C est
118	ME : légère
119	LJ : légère. Donc, quand elle est mince, il y a beaucoup de manteau et peu de croûte continentale, elle est encore dense. Comme ça, ça s'enfouie facilement, mais quand elle est plus épaisse, c'est plus difficile parce qu'il y a toute cette épaisseur de croûte continentale qui est légère. Voilà. Ça va faire que les unités crustales vont refuser de subduire. Pas de refuser, elles vont commencer à subduire même des fois beaucoup. Et une fois elles vont se détacher et ça ce qui va épaissir la croûte parce que vous mettez des unités crustales les unes sur les autres, ça qui va faire le relief, le relief c'est pas l'obduction, c'est le fait que tu mets des roches crustales les unes sur les autres et donc vous épaississez la croûte qui elle , elle est légère et ça vous fait un relief.
120	ME : D'accord.
121	LJ : Voilà, par exemple si vous prenez les Alpes à l'éocène, la croûte continentale avait commencé à s'enfouir en subduction mais il n'y avait pas beaucoup de relief, peut être un peu, c'est pas une chaîne de montagne très élevée, et c'est à partir de moment où vous allez faire les grandes chevauchements par exemple faire chevaucher le Mont Blanc ou l'Oisans sur l'avant pays, que vous allez créer les grands reliefs, ça, c'est vers 30 millions d'années à peu près. Ça, c'est un relief d'une chaîne de montagne, c'est pas la fermeture de l'océan qui fait le relief de l'Himalaya. Le relief de l'Himalaya, c'est l'épaississement de la croûte.
122	ME : Oui.
123	LJ : A ce moment, il n'y a pas beaucoup de relief . A l'Himalaya, on peut y avoir beaucoup parce qu'il y a une marge active avant mais dans les Alpes, non, il n'y a pas ça. Il y a peu de volcanisme dans les Alpes donc, vous avez une marge passive qui passe d'une marge active mais sans doute pas beaucoup de reliefs et à partir du moment où vous commencez à épaissir , la croûte continentale, c'est là que vous allez faire
124	ME : le relief
125	LJ : le relief.
126	ME : oui
127	LJ : Donc la chaîne de montagne
128	ME : D'accord. On passe alors à une autre question. En fait, la communauté scientifique, elle n'a pas trouvé par exemple...Donc il n'y a pas des scientifiques qui n'ont pas accepté vraiment la notion de charriage. Est-ce que, parce que je pense que c'est pas une notion facile à. Est-ce qu'il y a alors des contradictions dans la communauté scientifique concernant ce point là.
129	LJ : Il y en a eu au départ, c'est-à-dire la fin de 19 ème siècle, début 20 ème

	siècle, certains collègues n'étaient pas d'accord avec ça, mais aujourd'hui tout le monde a accepté cette notion là, et il n'y a pas de discussion là-dessus, il y a des nappes qui sont découvertes, des nappes redécouvertes. Donc, oui le charriage est largement accepté par la communauté.
130	ME : D'accord, et pourquoi au début ils n'ont pas accepté cette notion ?
131	LJ : Parce que, c'était un peu intuitivement, c'est comme si les processus se déroulent à grande échelle, on ne les voit pas très bien, il y a la végétation etc. Il faut un gros travail pour les mettre en évidence, il faut dessiner, il faut cartographier les zones. Bon, ça prend du temps, c'est difficile. Il faut accepter l'idée que mécaniquement c'est possible. On sait que c'est possible, mais au départ, les failles ont été plutôt des failles verticales et petit à petit les gens ont accepté, les ont modélisé très bien, il n'y a plus de problème mécanique.
132	ME : D'accord.
133	LJ : C'est une révolution à la fin du 19 ^{ème} siècle, la découverte de ces grandes nappes de charriage dans 1884-1885. C'était déjà une révolution énorme dans les sciences de la Terre, il y avait la tectonique des plaques, mais c'est autre chose, mais conceptuellement, ça été très très important.
134	ME : D'accord. Alors, j'ai remarqué pendant ma présence en classe, qu'il y a beaucoup d'élèves qui ont posé cette question. En fait, concernant par exemple ,emmm. Donc, lorsqu' 'on a une subduction, il y a l'océan qui va disparaître, ils ont toujours posé la question de « l'eau, elle va où ? » donc la destinée de l'eau
135	LJ : L'eau, l'eau de l'océan, elle reste dans l'océan, elle ne descend pas dans la subduction sauf celle qui est contenue dans les sédiments.
136	ME : D'accord.
137	LJ : Les sédiments quand ils se déposent, ils sont gorgés d'eau
138	ME : D'accord.
139	LJ : Donc, il y a de l'eau dedans beaucoup, et puis il y a aussi de l'eau dans la croûte océanique puisqu'au niveau des dorsales, il y a de l'eau qui circule dans les failles, etc... Donc, il y a de l'eau dans la croûte océanique. Il y a de l'eau dans le manteau supérieur qui transforme le manteau en Serpentine.
140	ME : Oui
141	LJ : Tout ça, il y a de l'eau là dedans Donc, originellement, c'est l'eau de l'océan mais c'est pas l'eau de l'océan qui circule aujourd'hui, c'est l'eau qui est piégée dans la croûte
142	ME : oui
143	LJ : Donc, cette eau, elle va descendre avec l'asthénosphère. Sinon, l'eau dans laquelle il y a les poissons, elles s'enfichent
144	ME : Oui.
145	LJ : de la subduction, elles circulent avec des courants océaniques etc, et à des vitesses qui sont d'une grandeur supérieure à la subduction. Ce sont deux processus complètement indépendants.
146	ME : Donc

147	LJ : L'eau où on nage ne va pas dans la subduction
148	ME : Et donc une fois que l'eau qui est dans les sédiments et dans la croûte océanique descend dans la subduction, elle va être soumise à la pression et la température. Elles vont se métamorphiser et cette eau va être
149	ME : Déshydrater
150	LJ : tout d'abord contenue dans les minéraux puis elle va sortir
151	ME : oui
152	LE : Elle va sortir par exemple vers 120 Km, 130 Km de profondeur, elle va sortir et elle va aider à la fusion du manteau de la plaque supérieure et la plaque qui passe par-dessus et c'est ça qui va donner le magmatisme, etc...
153	ME : Et donc, en fait, la distribution de l'eau dans le globe, elle ne varie pas selon le mouvement tectonique ? Par exemple lorsqu'il y a aussi formation d'une lithosphère océanique, aussi, ils ont posé la même question. Mais l'eau elle vient d'où ?
154	LJ : Ah, l'eau, elle vient dès la formation de la terre au départ, les éléments se sont arrangés, la terre était très très chaude, dès l'agglomération des éléments qui viennent du système solaire qui est en formation, pour former les planètes, les éléments les plus denses vont aller au milieu, les plus légères à l'extérieur. Il se trouve que l'eau c'est une molécule très stable et donc que vous allez avoir de l'eau dans la partie externe de cette planète en formation. Et puis, il y a de l'eau qui va être amenée pendant cette histoire par les comètes. Les comètes, c'est beaucoup de glace autour d'un noyau rocheux parfois. Donc, ces comètes vont amener de l'eau.
155	ME : D'accord
156	LJ : Et donc tout ça fait que vous avez une planète avec un noyau très dense et puis un manteau moins dense et puis une croûte encore moins dense et puis après la croûte il y a l'eau voilà. Une partie dans l'océan, une partie sur le continent, et une partie dans l'atmosphère.
157	ME : D'accord. Et donc le volume de l'eau, il reste toujours en fait stable dans le globe terrestre. En fait, même s'il y a une évaporation ça reste
158	LJ : Oui, dans les premiers âges de la terre, le volume de la terre augmentait parce qu'on formait la planète et aussi la quantité d'eau augmentait, c'est peut-être dans les premiers millions d'années premières et même avant, mais aujourd'hui depuis plusieurs millions d'années le volume de la terre est à peu près stable, la quantité d'eau elle va à peu près constante et donc, il y a une partie qui va être évaporée dans l'atmosphère, une partie dans les océans, une partie sur les continents, et une partie dans la croûte
159	ME : Et donc lorsqu'il y a un mouvement tectonique, les plaques donc, elles se déplacent donc l'eau elle va se déplacer donc, ehhh. Autrement, l'eau elle va aller vers d'autres régions du globe ?
160	LJ : Quand l'océan existe et se renferme, évidemment l'eau, elle, il faut qu'elle aille ailleurs. C'est ça .
161	ME : oui

162	LJ : Voilà, mais encore une fois, les mouvements de l'eau c'est quelque chose qui se fait à des vitesses rapides, les courants c'est les vitesses de bateau. Ça n'a rien à voir avec les mouvements des plaques les unes par rapport aux autres qui sont de quelques cm/an. Mais ce qui est important c'est de comprendre que l'histoire, ce qui va varier c'est pas tellement les déplacements horizontaux de l'eau mais plutôt c'est la hauteur de l'eau par rapport aux continents. Le niveau marin.
163	ME : D'accord.
164	LJ : Par exemple si vous prenez le volcan d'Hawaï aujourd'hui et puis vous savez qu'il existe une ligne de volcans qui parte d'Hawaï et va jusqu'au nord pacifique mais ce sont des volcans sous marins qui remontent jusqu'à 80 millions d'années [...] Elle est constituée dans des volcans éteints qui sont de plus en plus profonds parce que le lithosphère océanique au début quand elle est jeune elle est légère et par suite à fur et à mesure qu'elle s'éloigne de la dorsale elle s'approfondit puisqu'elle est plus dense donc les volcans qui étaient là, sont loin du point chaud qui est plus actif et en plus ils sont emportés par la lithosphère qui est plus dense, donc ils subsident, ils s'enfoncent sous le niveau de mer. Là le niveau de la mer augmente par rapport à l'île. En fait, c'est l'île qui s'enfonce
165	ME : D'accord.
166	LJ : Par ailleurs, si de manière générale, l'activité du globe est plus importante à certaines périodes, les points chauds sont plus actifs par exemple à certaines périodes donc la dorsale fonctionne plus vite. L'âge moyen de la lithosphère océanique est plus faible puisqu'on fabrique la lithosphère océanique plus rapidement et donc on subducte plus, donc l'âge moyen est plus jeune. Ça va ça ?
167	ME : Oui, parce qu'il y a subduction qui
168	LJ : C'est ça, la dynamique, donc la lithosphère elle se renouvelle rapidement, elle disparaît rapidement et donc l'âge moyen de la lithosphère à la surface du globe à cette époque là est plus faible et donc si cette lithosphère est plus faible elle est en moyenne moins dense.
169	ME : Oui
170	LJ : Donc, elle est plus élevée sur l'asthénosphère. Ce qui fait que l'eau qui est au dessus il faut qu'elle trouve sa place, donc elle va déborder sur les continents.
171	ME: D'accord
172	LJ : Les océans vont être en moyenne moins profonds et donc l'eau elle va déborder sur les continents, ce qui fait le niveau marin va monter d'une façon très importante. Par exemple, il y a 80 millions d'années, il est à peu près 200 m au dessus de ce qui est aujourd'hui. Et puis, il y a pleins de processus qui font que, ben voilà, les niveaux marins varient au cours du temps, les processus tectoniques de longue échelle de temps à l'échelle de 10, 20, 30 ,100, 200 millions d'années qui sont liés à l'activité interne du globe.

173	ME : OK
174	LJ : En gros c'est la hauteur de la lithosphère qui varie en fonction de son âge, de sa thermicité, etc
175	ME : Ehh. D'accord... Oui, dans la tectonique des plaques en fait c'est mieux de comprendre le mécanisme de formation d'une chaîne de montagne, de la comprendre de point de vue global ?
176	LJ : oui
177	ME : c'est-à-dire par exemple, on peut pas comprendre la subduction à part, la collision à part et
178	LJ : Oui bien sûr. Il faut comprendre l'ensemble des processus parce que les forces elles sont liées, il y a en gros deux types de forces : il y a ce qu'on appelle les forces de volume qui sont liées aux contrastes latéraux de densité. Par exemple, la lithosphère océanique est plus dense que la L. continentale. Ça descend. Si vous avez un panache chaud dans le manteau ; les plus légers soit à Hawaï, sous, les marquises etc. Sous l'Afrique de sud c'est plus léger et du coup vous avez des forces de volume dans le manteau qui font que des endroits ça remonte et des endroits ça descend. C'est la convection ça. Ok ? Et ensuite il y a des forces qui sont transmises dans la lithosphère : comme la lithosphère, elle est rigide, si on poussait d'un côté à la fois elle va être transmise de l'autre côté. Ça ce qu'on appelle les forces aux limites. Et donc vous avez deux : les forces des volumes et les forces aux limites qui jouent ensemble et il faut comprendre les deux pour comprendre comment fonctionnent les Alpes ou L'Himalaya ou les chaînes de Taïwan , etc. Il faut comprendre ce qui se passe dans la croûte, dans la lithosphère, quels sont les forces qui s'appliquent aux limites du système horizontalement. Donc soit c'est compressif, soit c'est extensif. Ici dans les chaînes de montagnes, c'est compressif et ce qui se passe en profondeur aussi, c'est-à-dire comment le manteau convecte en dessous.
179	ME : D'accord. Oui. Et donc, en fait pour par exemple j'ai remarqué parmi les élèves, ils ont expliqué la subduction à part, ils ont dit puisqu'il y a subduction, il va y avoir un vide parce qu'il va y avoir un enfouissement de la lithosphère océanique, donc il va y avoir un vide. Ici, ils ont oublié en fait qu'il y a formation continue d'une lithosphère océanique
180	LJ : Exactement oui. Il y a jamais de vide
181	ME : Oui, donc il y a toujours formation continue d'une lithosphère océanique
182	LJ : Oui. En fait, la tectonique des plaques c'est juste ce qu'on voit à la surface de laprofonde. Voilà et donc quand la couche supérieure froide est rigide elle est en plus le fait que deux plaques rigides se rencontrent dans une zone de subduction, il y a de la compression qui est induite par la rencontre de deux plaques rigides, pour que l'une passe sur l'autre, au niveau de contact il y a le frottement et c'est ce qui donne les grands séismes par exemple.
183	ME : D'accord.
184	LJ : Même au contact d'une plaque océanique et une plaque continentale

	comme sous le Japon, sous Sumatra, etc. Vous avez des frottements forts ce qui donne de très très grands séismes de subduction de magnitude 9
185	ME : D'accord, et donc à notre échelle actuelle, par exemple pour expliquer les zones de subduction, est ce que c'est facile de trouver des indices actuels où on peut faire une comparaison avec ce qui s'est passé anciennement ?
186	LJ : Oui. Il y a des endroits où, si on se réfère aux chaînes de montagnes, il y a des endroits où il y a des chaînes de montagnes qui sont en formation aujourd'hui et parmi les plus beaux exemples la chaîne de Taïwan.
187	ME : D'accord.
188	LJ : qui est une chaîne de montagne où on a le plateau continental, la marge chinoise qui passe en subduction sous l'arc insulaire des Philippines. Si vous voyez dans l'espace géométriquement il y a les Philippines : c'est un arc insulaire, du volcanisme, de croûte continentale et de volcanisme par dessus et à l'ouest de ça il y a la mer de la chine méridionale, c'est un bassin océanique entre les Philippines et l'Asie et si vous allez vers le nord la mer de Chine méridionale, ça se referme parce que la lithosphère, la partie océanique disparaît, et on passe en collision. De la marge chinoise et de l'arc insulaire et là, on voit se développait aujourd'hui la chaîne de montagne qui est très active, qui monte très très vite, avec des convergences de l'ordre de 8 cm/an. C'est énorme pour une chaîne de montagne. Donc, des mouvements relatifs de l'ordre de 8 cm/an pour étudier ce qui se passe aujourd'hui. Il a aussi l'Himalaya bien sûr qui est active avec une convergence plutôt de 5 cm/an mais il y a comme même sur les chevauchements principaux de l'Himalaya qui sont actifs aujourd'hui, sur lesquels il y a des grands séismes, il y aura plus de 2 cm/an de convergence, des mouvements relatifs de chevauchements. C'est pour étudier la formation des chaînes de montagnes aujourd'hui.
189	ME : Et pour étudier en fait, c'est-à-dire les chercheurs, ils utilisent des, ehhs. Parce que donc à ces zones là il y a beaucoup de séismes normalement. Donc, c'est par les séismes que vous pouvez déterminer ou détecter ces zones de subduction ?
190	LJ : Il y a les séismes d'une part, oui ça c'est sûr. Mais, il y a aussi toutes les études de terrain qui montrent que tous les sédiments très récents quaternaires sont un peu en déformation. Donc, il y a à la fois du terrain et puis il y a l'enregistrement des séismes. Tout ce que l'on sait sur les séismes aujourd'hui. Donc, c'est ce que, il y a une discipline qui s'appelle la sismotectonique qui fait le lien entre les séismes et ce qu'on voit sur le terrain, les failles qu'on peut étudier sur le terrain, comment elles fonctionnent, à quelle vitesse, quelle géométrie elles ont ?ça pour comprendre le mécanisme, et ça aussi pour avoir une idée par exemple de la récurrence de séismes sur les grandes failles, si c'est tous les 10 ans, tous les mille ans, ce qui est un processus très important, loin de prévoir le séisme, de comprendre là où c'est dangereux. Par exemple, le séisme du Japon de 2011, les collègues qui travaillaient sur la région pensaient qu'on dépasserait jamais 8,5 ou quelque chose comme ça, parce

	<p>que les séismes connus, les plus forts étaient de cet ordre là et en fait c'est avéré qu'il y a un séisme supérieur à 9 ;9,1. La différence entre 8,5 et 9,1 c'est gigantesque. Donc, ils ont raté les informations géologiques pourtant étaient publics, publiées, montrant qu'il y avait déjà eu de très très grands de celui qui a eu lieu en 2011, qui a dû leur montrer que voilà, c'est possible d'avoir des séismes avec des temps de récurrence sans doute très grands de 500 ans ou on sait pas. Et voilà, le travail, il est un peu oublié, ce qui fait qu'ils ont par exemple mal démissionné la centrale de Fukushima, elle était très basse en altitudes. Ils auront dû la monter quelques dizaines de mètres. Alors cette discipline là est très très importante.</p>
191	<p>ME : Oui. Et donc en fait, on peut utiliser l'actuel, pour en fait ehhs. Par exemple, je prends l'exemple de la paléontologie, pour comprendre ce qui s'est passé, ou pour comprendre le milieu d'un tel fossile, en fait on fait la comparaison avec un animal qui a une morphologie qui lui ressemble. Est-ce qu'en tectonique, dans les chaînes de montagnes est ce qu'on peut faire cette comparaison pour comprendre ce qui</p>
192	<p>LJ : Oui. Bien sûr. Oui bien sûr , pour comprendre les Alpes on revient aux chaînes, on regarde bien sur les Alpes mais aussi les chaînes qui se forment aujourd'hui parce qu'on a accès au vitesse. Voilà, mais pour comprendre les chaînes actives aujourd'hui, on regarde aussi les chaînes anciennes parce que les chaînes anciennes montrent, elles montrent des parties plus profondes qu'on peut pas observer dans les chaînes actives. Donc, on fait des allers-retours entre le présent et le passé en utilisant toujours le principe de l'actualisme.</p>
193	<p>ME : Oui.</p>
194	<p>LJ : Voilà</p>
195	<p>ME : Et donc, il y a aussi des mécanismes... En fait c'est-à-dire l'actuel ne peut expliquer en fait, parce qu'il faut du temps. Par exemple le charriage aujourd'hui, on ne peut pas voir tout le scénario par exemple du charriage.</p>
196	<p>LJ : On ne voit pas tout le scénario, mais on voit par exemple si on prend le chevauchement frontal de l'Himalaya ou le chevauchement frontal de Taïwan, et bien on le voit, on le voit en géophysique, on le voit sa géométrie et on mesure sa vitesse. La vitesse à laquelle où se déplacent les unités les unes par rapport aux autres et on enregistre etc. Donc, on voit le processus à l'heure actuelle se faire.</p>
197	<p>ME : Donc il y a des outils qui ont facilité le travail c'est ça ?</p>
198	<p>LJ : C'est le séisme, le GPS et toute l'imagerie sismique qui permet de voir la profondeur, le profil sismique, la réflexion, la réfraction, la tomographie sismique, etc qui permet de faire les images de l'intérieur de la terre.</p>
199	<p>ME : Et sur terrain, la présence par exemple des failles inverses, des chevauchements c'est ça qui facilite, qui permet</p>
200	<p>LJ : Oui, oui bien sûr, les grands charriages étaient découverts sur le terrain, c'est en Provence que ça était mis en évidence la première fois. Ce n'était pas</p>

	des grands charriages mais le concept c'était mis dans ce cadre là. Après dans les Alpes, voilà les, je crois en 1910 Pierre Termier est allé en Autriche. C'est un géologue français à l'école de mines, il est allé en Autriche en excursion géologique avec des collègues autrichiens. Ils ont montré, qu'en Autriche, les alpes autrichiennes, dans une partie de l'Autriche il a dit, mais ces roches, je l'ai même dans les Alpes occidentales ce qu'on appelle les schistes lustrés. Il a regardé la carte et il a dit ça veut dire que toutes les Alpes ce qu'on voit là c'est une fenêtre, c'est une grande faille inverse qui fait que toutes les Alpes orientales sont posées sur ces roches et il a découvert la grande fenêtre de Tauern. L'Autriche en fait c'est un trou à travers un gigantesque chevauchement et ça a été décrypté après mais au départ ce sont des constations de terrain.
201	ME : Et donc comme au niveau des zones de subduction certainement il y a aussi au niveau du globe maintenant des régions où il va y avoir ouverture d'une lithosphère océanique et donc quels sont les indices qui peuvent nous aider à découvrir qu'il y a ouverture d'un océan qui se
202	LJ : Alors tous les endroits où la lithosphère océanique se forme. Ce sont les dorsales : la dorsale médio-atlantique donc au milieu de l'Atlantique, au milieu de l'océan pacifique, au milieu de l'océan indien, etc. Donc ça c'est bien connu. On a le rift lui-même, les anomalies de part et d'autre qui permettent de mesurer la vitesse et qui montraient la réalité de l'expansion au fond océanique. Il y a des endroits qui sont plutôt dans les continents dans lesquels on n'a pas encore de lithosphère océanique mais où il y a un rift intracontinental. Par exemple le rift est africain. L'Afrique se sépare aujourd'hui en deux avec ce grand rift Kenya, la Tanzanie, etc. La partie orientale et la partie occidentale et au milieu il y a ce rift qui se forme. On mesure très bien aujourd'hui les vitesses d'ouverture, elles ne sont pas très rapides. Elles sont inférieures à 1 cm/an. Voilà, est ce que ça évoluera un jour à
203	ME : un océan ?
204	LJ : un océan, on ne sait pas.
205	ME : D'accord. En fait, emmm. Une question que j'ai oubliée concernant le passage d'un mouvement à un autre parce qu'il y a une subduction et au même temps. C'est-à-dire il y a au même temps un mouvement de convergence et au même temps un mouvement de divergence, c'est-à-dire il y a un synchronisme entre deux mouvements qui
206	LJ : oui,oui. Les choses se font au même temps. Vous ouvrez un océan par exemple au milieu du pacifique, vous créez de la lithosphère océanique ; mais au même temps cette lithosphère océanique elle disparaît sous les Alpes à l'est ou sous le Japon ou l'Himalaya à l'ouest.
207	ME : D'accord. Ca, c'est deux mécanismes synchrones pour garder le globe terrestre stable, c'est ça ?
208	LJ : Oui c'est ça. La surface terrestre est la même. Comme votre tasse de café le matin par exemple, vous avez la convection, des endroits ça remonte et des

	endroits ça descend et tout ça participe au refroidissement de votre café. Là c'est pareil. Ici la différence, dans la terre il y a un chauffage à l'intérieur ce qu'il n'y a pas dans la tasse de café. Du coup, elle se refroidit très lentement.
209	ME : Et pour passer de la subduction à la collision M. Laurent comment on peut passer d'une subduction à une collision, c'est par le blocage de la subduction continentale ?
210	LJ : C'est le fait qu'au début, vous subduisez de la lithosphère océanique et après la marge continentale qui arrive, elle entre dans la zone de subduction et là elle va entrer dans la zone de subduction et elle va passer en collision. La collision, c'est jamais qu'un type particulier de subduction. C'est une subduction à laquelle vous amenez de la L.C et du coup, vous avez deux plaques continentales en contact, et au niveau du contact, vous avez ce qu'on a dit tout à l'heure, ces roches qui entrent en subduction et qui remontent et qui s'épaississent et qui forment le relief.
211	ME : c'est tout simplement un résultat on peut dire de la subduction. Oui. Donc, en fait, dans une chaîne de montagne on peut trouver des indices comme...C'est-à-dire des indices de divergence et des indices de convergence. Par exemple, des failles normales mais au même temps des failles inverses. Donc, comment les scientifiques ont pu faire la chronologie du scénario de la formation d'une chaîne de montagne ?
212	LJ : Alors, il y a tout d'abord. Il y a plusieurs épisodes. Ah, il y a toutes les failles normales qui sont liées à la formation d'une marge passive avant. Avant la collision, vous avez une marge passive, vous avez déchirure du continent, vous allez faire un océan sur les bords, vous avez enregistrement de rifting. Vous avez des marges passives, donc vous avez les failles normales qui sont plus actives à ce moment là mais elles existent. Sur le terrain, après, vous allez les trouver dans les chaînes de montagnes. Dans les Alpes, on les retrouve dans les parties les plus déformées. On les retrouvait dans le mont d'Oisans. Vous avez de très grandes failles normales et donc, on les voit, on amène nos élèves sur terrain, il y a beaucoup qui vont voir ces failles normales. Ce sont des failles très spectaculaires. Ensuite, vous voyez sur terrain que ces failles sont déformées ultérieurement, elles sont découpées par des failles inverses ou elles sont plissées parce qu'on est en compression. Donc, vous savez ce qui vient avant, ce qui vient après. Et puis ensuite dans les chaînes de montagnes, il peut arriver à un moment donné dans les conditions aux limites on va pousser moins fort ou alors par exemple si vous prenez le plateau de Tibet, le plateau de Tibet, ça fait presque 5000m et donc pourquoi il ne dépasse pas 5000m et donc c'est parce que quand vous épaississez la croûte continentale, vous créez là une surcharge.
213	ME : Ehh
214	LJ : Et donc cette croûte continentale qui est épaisse, elle va s'étaler, parce qu'à côté, il y a de la topographie plus basse... La croûte continentale elle va tendance à couler. Ça, c'est les forces de volume dont on a parlé tout à l'heure.

	<p>C'est dû au sur-épaississement ce qui fait que la chaîne de montagne va se former, va monter, monter et elle va atteindre un maximum d'altitude à peu près 5000 m. A près, il y a des pics plus élevés comme plus 8000 m à l'Himalaya mais la moyenne c'est 5000 m. Même chose dans les cordillères des Andes à peu près 5000 m. Vous ne pouvez pas dépasser cette altitude moyenne. Et si vous avez des conditions aux limites sur les bords qui font que la chaîne de montagne, que la croûte peut s'étaler. Par exemple dans la collision entre l'Asie et l'Inde, l'Inde monte vers le nord par rapport à l'Asie, donc c'est la compression mais puisqu'il y a de la place à l'Est, l'Est c'est l'océan pacifique ou l'océan indien, ben la croûte continentale de Tibet elle peut fluer vers l'Est</p>
215	ME : D'accord.
116	LJ : Et donc le Tibet, il augmente de taille comme ça, il augmente de taille parce que les chevauchements migrent vers le nord et vers le sud et latéralement vous avez aussi la croûte qui s'étale avec des chevauchements sur les bords, mais au milieu vous avez les failles normales
217	ME : D'accord
218	LJ : Et donc, ça c'est une façon de faire les failles normales dans une chaîne de montagne. On les a datées, on sait bien comment ce sont formées presque il y a 15 millions d'années ou quelque chose comme ça peut-être même avant parce que le plateau de Tibet il est déjà là. Autre façon dans les Alpes, qui ne sont pas de tout si hautes. Dans les Alpes franco-italiennes, elles sont aujourd'hui essentiellement en extension et tous les séismes de la région de Besançon etc sont des séismes en failles normales. Et ici il y a une discussion dans la communauté des géologues alpins à savoir si c'est lié à un écroulement de la chaîne parce que dans les conditions aux limites il y a moins de compression ça s'étale ou parce que c'est la vraie
219	ME : divergence
220	LJ : Bien. Et ça c'est pas très clair encore dans la communauté. Si vous prenez les Apennins. Vous savez ehh c'est quoi les Apennins, c'est sur toute la chaîne de montagne qui « range » la péninsule italienne. Les grands séismes des Apennins, ce sont des séismes importants où on parle beaucoup à la télé. Vous êtes au sommet de la chaîne de montagne et ces séismes sont tous en failles normales. C'est l'extension. Et là, on sait à peu près pourquoi. C'est parce que la chaîne de montagne qui s'est formée jusqu'à il y a environ disant 30 millions d'années, aujourd'hui la subduction a tendance de reculer comme ça.
221	Ah d'accord.
222	LJ : Ça continue à subduire et la subduction recule et là vous êtes dans un domaine qui est plutôt en extension. Vous écroulez la chaîne de montagne, vous continuez à fabriquer dans une zone de subduction et vous écroulez derrière
223	ME : D'accord

224	LJ : Et c'est ce qui se passe en Grèce, et un peu partout en méditerranée. Et donc le calendrier, savoir ce qui est avant, ce qui est après se voit très très bien sur terrain. On voit quelles sont les formations qui déforment ce qui est avant pour qu'on peut dire d'abord c'est l'extension, après c'est la compression. C'est un très grand travail d'observation, ça dure des années [...]
225	ME : Donc pour avoir la chronologie c'est tout d'abord en fait sur le terrain pour avoir les observations. D'accord. Et pour former une chaîne de montagne à notre échelle, on ne peut pas voir tout le scénario d'une formation d'une chaîne de montagne, c'est-à-dire, par exemple depuis l'ouverture d'océan jusqu'à la formation d'un relief. C'est pas en fait possible
226	LJ : Ah, non. On peut pas avoir à l'échelle humaine toute l'histoire d'une chaîne de montagne.
227	ME : Oui. Parce que j'ai remarqué que beaucoup d'élèves, ils ont posé la question, par exemple au niveau de l'océan, est ce qu'il y a vraiment une formation d'une chaîne de montagne qui est en train de se réaliser, parce que c'est pas facile à l'échelle humaine de voir ce phénomène là.
228	LJ : Comme je vous ai dit tout à l'heure, on a toutes les observations qui permettent de voir comment est constituée une chaîne de montagne sur terrain et par la géophysique. Et puis on voit aujourd'hui à quelle vitesse ça se produit sur 10 ans, 20 ans voilà par la géodésie, le GPS pour voir à quelle vitesse ça se produit. Et ensuite, nous allons voir les chaînes de montagnes les plus anciennes pour voir qu'est ce qui s'est produit au passé et c'est le contraire qu'est ce qui s'est produit en profondeur, comment au cours du temps par exemple dans les chaînes les plus actives, on a toute l'histoire à partir presque 80 millions d'années par exemple. On est capable de décrire ce qui est enregistré dans les roches, l'évolution pression-température, les bassins sédimentaires, etc... et on arrive à reconstituer cette histoire. Mais c'est reconstitué. Evidemment, il faudrait des millions de géologues pour décrire l'ensemble [...]
229	ME : Donc à la fin, pour revenir au charriage. En fait, le charriage il n'y a pas un seul type de charriage ou deee. C'est-à-dire l'obduction. Lorsqu'on a parlé de l'obduction, il y a beaucoup de façons pour que l'obduction se fait.
230	LJ : Disons que, ehh. L'obduction vraie ça se passe toujours à peu près de la même façon. On n'a pas tout compris mais ce qui peut être différent ce que je vous ai dit tout à l'heure, il y a des fois l'obduction vraiment, et parfois il y a des roches de l'océan qui descendent et qui remontent, ça ce n'est pas l'obduction c'est la subduction.
231	ME : Donc l'obduction couramment, c'est le cas par exemple d'Oman
232	LJ : Pardon, j'ai pas
233	ME : Oman
234	LJ : Oui, oui
235	ME : oui, et pour les autres, les roches se sont métamorphosées et après il va y avoir une remontée de

236	LJ : Elles sont métamorphisées pendant que la plaque descend, et à un moment donné comme vous l'avez dit maintenant, elles se détachent et elles remontent dans le canal de subduction dans cet espace entre les deux plaques.
237	ME : D'accord.
238	LJ : Merci cher Laurent pour ces réponses. Merci beaucoup pour ces éclaircissements de beaucoup de questions.
239	LJ : Ben écoutez, merci d'avoir penser à moi et s'il y a d'autres questions n'hésitez pas.
240	ME : Merci beaucoup.
241	LJ : Au revoir
242	ME : Au revoir

Annexe 2. Les échanges menés avec Laurent Jolivet, sur le métamorphisme des zones de subduction. Le courriel a été envoyé le 05 décembre 2021.

Notre courriel envoyé à Laurent Jolivet pour souhaiter des précisions concernant le métamorphisme des zones de subduction :

« Bonjour Monsieur Jolivet.

Je suis Maroua Eltaief, doctorante en sciences de l'éducation: Didactique des SVT à l'université de Bordeaux. J'ai eu l'honneur durant l'année 2019 de faire un entretien avec vous sur quelques concepts liés à la formation des chaînes de montagnes. Je vous remercie vivement pour votre aide puisque cet entretien m'a beaucoup aidée dans l'analyse du débat enregistré en classe.

Et puisque je suis dans la phase finale de l'analyse de mon corpus, j'ai remarqué qu'il y a une question, je n'ai pas eu l'occasion de la poser lors de notre entretien, mais qui est très remarquable dans le discours des élèves. Pour cela, j'ai l'honneur de solliciter de votre bienveillance de bien vouloir accepter de répondre à cette question afin de mieux comprendre le raisonnement des élèves et celui des scientifiques. **La question est la suivante:** Durant la séance, lorsque l'enseignante expliquait aux élèves le métamorphisme des zones de subduction, elle insistait sur le fait que ce métamorphisme est qualifié de haute pression-**basse température**. Mais les élèves n'acceptent pas qu'il s'agit de basse température (pour eux une basse température correspond à une température négative [-3° C, etc...]) . Et même si l'enseignante expliquait que: "*Plus je m'éloigne (de l'axe de la dorsale), plus votre croûte a eu de temps de refroidir, parce qu'elle est dans l'eau froide. Elle va avoir du temps à refroidir [...] Donc, je vais avoir une croûte très froide et du coup elle s'enfonce, ben, elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer*», les élèves n'arrivent pas à accepter qu'il s'agit de basse température.

Pour cela, je vous serai reconnaissante de bien vouloir m'expliquer **pourquoi les scientifiques qualifient-ils le métamorphisme des zones de subduction par un métamorphisme de haute pression-basse température.**

Espérant que vous donnerez suite à ce courriel, je vous prie de bien vouloir agréer monsieur, l'expression de mes salutations distinguées. Bien cordialement. Maroua Eltaief. »

La réponse de Laurent Jolivet à notre courriel :

« Bonjour

Quand on écrit haute pression-basse température (HP-BT) on fait référence au gradient P/T et non aux valeurs absolues de la température et de la pression. Par exemple, si on a dans une roche une paragenèse minérale équilibrée à 20 kbar et 450°C, cette température de 450°C est beaucoup plus basse que celle que l'on attendrait pour 20 kbar (~60 km d'enfouissement) qui devrait être à 800-900°C si on était à l'équilibre thermique. C'est parce que la subduction emmène en profondeur des unités tectoniques froides plus vite qu'elles ne peuvent se réchauffer que le gradient est froid.

On ne peut donc pas séparer la pression et la température. De même que l'on parle d'un gradient HP-BT, on peut parler dans le cas d'un gradient chaud HT-BP, cela ne donne pas d'idée des valeurs absolues de la température et de la pression. Pour une même température, par exemple 500°C, on sera sur un gradient HP-BT si la pression est de 20 kbar et sur un gradient HT-BP si la pression est de 5 kbar. C'est la pente de la courbe qui est décrite par HP-BT ou HT-BP.

J'espère avoir répondu à votre question qui est fondamentale.

Je vous souhaite toute la réussite dans votre parcours doctoral.

cordialement

Laurent Jolivet »

Annexe 3. La transcription de la séance observée juste avant la séquence observée

1	<p>P : Alors, aujourd’hui, vous allez redéterminer la profondeur de Moho. Vous savez d’après le cours que plus l’altitude est importante, plus, qu’est ce qui se passe pour le Moho ?</p> <p>-Plus l’altitude est importante, plus le Moho est profond. Ça vous allez le redémontrer aujourd’hui. Donc, ça, vous allez le redémontrer aujourd’hui. Donc, ça, vous allez le redémontrer en calculant la profondeur de Moho à différentes altitudes et à différentes Stations.</p> <p>Je vous ai mis le principe à utiliser. Vous avez les sismogrammes que vous allez les étudier à différentes stations. Je vous ai mis le principe à utiliser. Vous avez les sismogrammes que vous allez les étudier à différentes stations de l’Isère. Ces séismes, vous savez que ces ondes sismiques sont propageables à partir d’un foyer.</p> <p>Vous, donc, à la surface du globe, vous avez ici et à la zone de rupture des roches ici, en profondeur, vous avez les ondes P ou appelées Pg. Ce sont les ondes premières qui sont enregistrées en Premier dans cette station ici.</p> <p>-Donc, lorsque vous savez que dans un sismogramme, vous allez avoir des ondes qui arrivent en deuxième, ce sont les ondes ?</p>
2	<p>Élèves : Ondes S</p>
3	<p>P : Ondes S et bien entre ces ondes P et ces ondes S, vous allez avoir ici un train d’ondes ici qui correspond, si vous voulez au ondes P qui se sont réfléchies sur le Moho. et qui sont reçues ici. On les appelle les ondes PMP. Ce sont des ondes P qui arrivent jusqu’à la limite croûte de Moho.</p> <p>Le Moho va agir comme un miroir, il va y avoir réflexion et du coup des ondes des PMP sont forcément, vont arriver avant, après, ou au même temps que les ondes Pg ?</p>
4	<p>Élèves (Toute la classe) : Un tout petit après.</p>
5	<p>P : Un tout petit après. Alors, pas beaucoup, ça va être des petites millisecondes. Il va y avoir un tout petit décalage entre les ondes P et les ondes PMP. Ces ondes PMP, vous devez les positionner sur votre tracé de sismogramme grâce au logiciel Sismolog.</p> <p>Sismolog est sympa. Alors, le logiciel Sismolog, vous donne la réponse pour les ondes P et les ondes S. Vous allez placer un trait rouge pour les ondes P et un trait bleu pour les ondes S.</p> <p>Vous allez pouvoir déterminer où se place les ondes PMP. Parfois le tracé n’est très net. Vous allez faire quoi ? Vous allez tout simplement agrandir pour mieux regarder le tracé et vous identifier le pic que vous trouvez entre les ondes P et les ondes S, et vous avez ces ondes PMP. Alors, vous avez chaque fois que vous</p>

	<p>posez votre curseur sur le logiciel en haut, ici, à droite, vous allez avoir le temps impliqué.</p> <p>Vous avez le devoir d'indiquer en vous plaçant sur les ondes P, vous avez le temps qui correspond aux ondes P. Quand vous placez les ondes S, vous avez le temps qui correspond aux ondes S, et quand vous positionnez le clic sur les ondes PMP, vous avez le temps qui correspond aux ondes PmP. Ça va ? Alors, à l'aide de ces sismogrammes à étudier, vous allez compléter le petit tableau qui est indiqué dans la fiche.</p> <p>Vous avez dans le tableau trois stations : RSL, OG04, et SURF. Vous allez faire le décalage entre les ondes P et PMP. Autrement dit, vous allez faire une soustraction. Ça va ?</p> <p>Vous avez les distances par rapport à l'épicentre qui sont indiquées dans le logiciel.</p> <p>L'épicentre, je ne sais pas, si vous souvenez, c'est ? C'est quoi Mathis ?</p>
6	Mathis : Cest...
7	<p>P : Si vous avez un dégât à la surface, c'est le point à la verticale du foyer qui se trouve à la surface. Vous allez du coup avoir des distances entre l'épicentre et la station d'enregistrement et qui sont indiquées dans le document et ça correspond à 135,8 Km.</p> <p>La profondeur du foyer, c'est la profondeur du point F, donnée en Km.</p> <p>Il y a un calcul qui va vous permettre de trouver la profondeur de Moho.</p> <p>C'est ça, ce qu'on cherche. Nous, ce qu'on cherche, c'est cette profondeur ici.</p> <p>D'accord, pour la trouver, vous avez un document qui présente le calcul à effectuer. Vous allez trouver dans le document. La profondeur de Moho qui est notée H (la profondeur H). Il y a un calcul super compliquée. Si je regarde là dedans, vous avez des indications sous forme de V, dans le cadre, elle correspond à la vitesse moyenne des ondes P dans la croûte en Km s^{-1}. Ça vous n'allez pas la compter, vous avez la valeur donnée, elle est de 6,25 Km s^{-1}. Vous avez une feuille de calcul Excel, dans laquelle la vitesse moyenne des ondes sera déjà indiquée (la vitesse, après, elle peut varier.)</p> <p>Pour les δt, ça correspond au décalage dedans. Vous, vous allez avoir une feuille de calcul sur le bureau de PC.</p> <p>Vous allez juste reprendre cette fiche de calcul, compléter les données que vous allez trouver dans votre tableau pour chaque station, et la feuille de calcul, va calculer toute seule la profondeur de Moho. Vous recopierez la valeur de la profondeur de Moho par la feuille de calcul. Ça c'est pas grande chose ; c'est très vite fait.</p>
8	Mathis : Nous allons calculer le décalage ?
9	<p>P : Oui, le décalage en secondes, vous avez la distance épacentrale et la profondeur du foyer et vous allez trouver la profondeur de Moho.</p> <p>-Alors, une fois que vous avez vos trois profondeurs, vous allez du coup réfléchir un peu en fonction d'altitude, ici, ce sont les altitudes de chaque station. Ça, c'est pareil, ce sont des altitudes qui sont présentes dans le logiciel. Vous cliquez sur la</p>

	<p>station, vous allez avoir l'altitude qui correspond à la carte.</p> <p>Vous mettez la profondeur correspondante. Alors l'année précédente, on a fait un TP plus complet , j'ai demandé à vos camarades de tracer un graphique de la profondeur de Moho, en fonction de l'altitude, pour pouvoir conclure, ce qu'on veut montrer, ce qu'on veut redémontrer, c'est que :Plus l'altitude est élevée, plus le Moho est profond. D'accord ?</p> <p>L'année précédente, ils ont fait ce graphique. Là, je ne vais pas travailler le graphique. Vous savez pour tracer un graphique, il y a trois points. Si vous voulez, à la maison, vous pouvez le tracer.</p> <p>Je passe pas beaucoup de temps là-dessus, parce qu'il y a une deuxième partie. Ça va tout ça ?</p> <p>Alors, on passe à la deuxième partie. Je vous demande de retrouver les mêmes minéraux que le Granite.</p> <p>Vous avez quoi dans le Granite ?</p>
10	Amina : De la péridotite.
11	P : Alors la péridotite, c'est quoi ?
12	Mathis : c'est une roche du manteau.
13	P : C'est une roche du manteau. C'est pas un minéral. On verra qu'elle est riche en Olivine, elle est de couleur un peu verte. Alors, c'est pas ça du tout, mais ça ressemble un peu. Je pense, vous avez confondu, parce qu'elle se termine de la même façon.
14	Lucas : Les micas.
15	P : Alors les micas.
16	Lucas : Les feldspaths.
17	P : oui les feldspaths.
18	Lucas : Quartz.
19	P : Micas, Feldspaths, Quartz. Dans les micas, on a deux types : des micas noirs et des micas blancs. Le mica noir, vous avez un synonyme : c'est la Biotite. D'accord ? Ces minéraux, alors qui se trouvent dans le Granite, sont comment ?
20	Adil : En désordre.
21	P : En désordre, ils sont mis n'importe comment, et là, dans le Gneiss, ils sont comment ?
22	Adil : Organisés ?
23	<p>P : Voilà, vous avez tout, les micas sont orientés préférentiellement, vont être alignés.</p> <p>Cette différence de structure, par ce que ces roches sont métamorphiques.</p> <p>Dans les polycopies, je vais vous donner la définition de métamorphisme.</p> <p>Je vous ai dit à part les transformations structurales. Alors, à part les transformations structurales, vous pouvez avoir des transformations ?</p>
24	Adil : Changement de température.
25	P : Changement de température.
26	Adil : Changement de pression.
27	P : Changement de pression. Et du coup, vous allez avoir des minéraux qui vont ?

28	Adil : Qui réagissent ensemble.
29	<p>P : Qui peuvent réagir ensemble, il y a des nouveaux minéraux qui vont arriver : Là dans votre Gneiss, je vais vous demander de mettre en évidence un minéral un peu particulier qui s'appelle l'Amphibole verte, autrement appelée Hornblende. Vous allez la distinguer en LPNA, de la Biotite parce que l'Hornblende, comme le nom l'indique est verte, alors que la Biotite est marron. Ça va ? Alors je résume ; En gros, prenez deux photos, une photo de Gneiss en LP et une photo de Gneiss en LPA. Vous avez à chaque fois Quatre légendes à indiquer : Feldspath, Biotite, Amphibole verte. J'ai oublié un truc : Le Quartz.</p> <p>Vous avez deux images avec votre légende, un titre sur le document, c'est ça ce je ramasse.</p> <p>Je ramasse ça et je ramasse bien sûr votre présentation concernant la profondeur de Moho, avec les tracés du sismogramme et le tableau.</p>
30	Mathis : Ça à faire sur ordi ?
31	<p>P : A faire sur ordi, tous les deux. Ça va ? Puis, vous faites votre tableau soit sur Excel, soit sur votre document Word, pour que je puisse savoir votre calcul de décalage, pour savoir s'il y a une erreur ou non...Si vous mettez la profondeur de Moho de façon brute, je ne saurai pas si vous trompez, s'il ya une erreur. Le jour de l'examen, ils vous demandent de mettre le détail. Là, je vous ai pas mis pour aller plus vite. Il est évident que le tableau, vous serez capables de le faire tous seuls. Ici, je l'ai donné. D'accord ?</p> <p>Le jour de l'examen, on vous ne donne pas de tableau. Ils vous demandent de déterminer à l'aide de la méthode, ils vous décrivent la méthode de la profondeur de Moho, et c'est tout. Et vous savez, et on a vu ça en classe, rechercher les ondes PMP, calculer le décalage et vous avez la fiche Excel, elle est donnée à l'examen.</p> <p>Ma conclusion alors concernant le Gneiss, qu'est ce que vous allez voir en ce Gneiss ? Qu'est ce que vous allez voir en ce Gneiss, comparé au Granite.</p> <p>Pour le Granite, j'ai pas vous demandé de prendre des photos parce que vous allez manquer du temps si je vous demande 4 photos.</p> <p>Ça n'entre pas dans le laps du temps. En fait, c'est une comparaison : Le Granite comme témoin. Il y a des uns qui ont déjà observé le Granite, Vendredi blocage ; Si vous êtes vraiment curieux, vous pouvez voir une lame après, si vous avez terminé avant.</p> <p>Alors, dans ce granite, vous avez Feldspaths, Quartz, Plagioclase.</p>
32	Mathis : On va avoir les mêmes minéraux sauf que dans le Gneiss, ça va être structuré.
33	<p>P : Ça va être structuré, exactement les mêmes minéraux. Ça veut dire que c'est bien le Granite est le même que le Gneiss, comme disait Mathis. Ensuite, vous avez beaucoup d'Amphibole verte dans le Gneiss qui témoigne d'une augmentation de température. Une augmentation de température. Ça vous fait penser à quoi ?</p>

34	Adil : A un changement de conditions de température et de pression.
35	P : A un changement de conditions de température et de pression. Voilà, la profondeur peut-être qui change, peut être un raccourcissement et un épaissement crustal. Ça va ? Alors pour ceux qui veulent les échantillons en macro, vous avez le droit de prendre des photos pour avoir les images chez vous. Ils ne sont pas très beaux. Ils sont un peu altérés. Vous avez ici le Granite, avec les minéraux désorganisés et ici, vous avez votre Gneiss avec les foliations visibles avec alternance de bandes sombres brillantes. Ce sont les micas noirs et des zones un peu blanches altérées avec les Quartz et les Feldspaths. Ça va ? Allez alors. Si vous n'avez pas le logiciel Sismolog sur votre ordi, vous m'appellez, j'ai ma clé, je viens de le chercher. A la fin du TP, vous mettez tout dans ma petite clé, que je viens de vous donner. Alors, vous pouvez y aller.
36	Rachel et Salma : Est-ce que c'est ici les ondes PMP ?
37	P : Pour déterminer les ondes PMP, on détermine tout d'abord les ondes P et S sur le sismogramme. Alors où sont les ondes Pet S ?
38	Salma : Les ondes P c'est ici et les ondes S, c'est ici.
39	P : Alors les ondes PMP se situent entre les deux. C'est ici, ça correspond à un pic.
40	Maxime : Quelle est la différence entre LPA et LPNA ?
41	P : LP c'est la lumière polarisée non analysée. En langage simple, ça veut dire, j'ai un seul filtre. D'accord ? Là par exemple, j'ai un seul filtre, je suis en LPNA. Je dis en LP ou LPNA. Et puis, si j'ajoute l'analyseur, je parle de LPA. Ça va changer les couleurs.
42	Maxime : Madame, on commence par LPA ou LPNA.
43	P : On commence toujours par LP.
44	Maxime : C'est-à-dire un seul filtre.
45	P : Oui.
46	Mathis : Madame, s'il vous plait, vous pouvez venir voir la lame ?
47	P : Alors, le minéral ici marron, c'est quoi ici ? On l'appelle mica noir.
48	Mathis : La Biotite.
49	P : Et le vert ici ?
50	Mathis : Amphiii... Biote.
51	P : Non. Amphibole verte : Hornblende et ici le blanc, on ne peut pas distinguer. C'est pas très clair. Est-ce que c'est du Feldspath ou du Quartz. C'est bien alors, puisque vous avez encore du temps, vous écrivez une phrase qui montre que le Gneiss vient du Granite et qu'il a subi une élévation de température. D'accord ?

Annexe 4. La suite des macrostructures des macro-épisodes identifiés dans notre étude

Nous présentons dans l'**annexe.4**, les macrostructures des macro-épisodes qui n'ont pas été étudiées dans les chapitre VI et VII.

➤ La suite des macrostructures des macro-épisodes concordants

Dans cette partie, nous proposons d'étudier les macrostructures des macro-épisodes MEP1, MEP2, MEP3, et MEP11.

▪ Pour la macrostructure du MEP1 qui aborde le thème de la subduction

Avant d'analyser la macrostructure du MEP1, nous présentons dans le tableau ci-dessous (**Tableau.19**) la partie du corpus qui correspond à ce macro-épisode. Les interactions entre enseignante et élèves du MEP1, ont eu lieu durant la première séance et le tout début de la deuxième séance. Concernant la première séance, l'enseignante s'est basée sur le document de la **Fig. 13** « Fiche de travail sur les traces d'un domaine océanique » afin d'étudier les traces d'un domaine océanique. Elle s'est focalisée essentiellement sur le travail des notions d'ophiolites et de marges passives.

Concernant le tout début de la deuxième séance, la professeure présentait le document de la **Fig. 14** « Fiche de travail sur l'histoire des Alpes (avec l'épisode de subduction) ». Ceci va lui permettre de présenter aux élèves le scénario de la formation des Alpes.

Tableau. 19. Le macro-épisode MEP1

1	P [...] vous voyez deux plaques qui n'ont pas la même densité, vous avez une qui va faire quoi ? qui va passer en dessous. Et ça a un nom. Ça s'appelle ?
2	Louis : La subduction.
3	P : La subduction. Alors cette subduction, on va parler beaucoup [...]
7	P : P : quand j'ai convergence. [...] Le mouvement de convergence lithosphérique peut conduire, donc [...] à l'enfoncement dans le manteau d'une plaque sous une autre et ça s'appelle la subduction [...]

38	<p>P : [...]on a dit que notre océan va disparaître. Est-ce que vous savez dans quel contexte cet océan disparaît ? A quel niveau [...]disparition de la croûte océanique. Est-ce que vous savez ça ? Quand ça converge ? Du coup, au niveau de quelle zone ?</p> <p>Un contact entre croûte océanique et croûte continentale, vous avez convergence. Vous allez avoir des failles, et ça s'enfuit. Ça s'appelle la subduction.</p>
----	--

47	P : [...] on a dit en gros qu'il y a ouverture d'océan puis, cet océan il s'est élargi et puis aujourd'hui, est ce qu'on trouve encore un océan ?
48	Mathis : Non.
49	P : Non, donc cet océan qu'est ce qu'il a dû faire ?
50	Lucas D : se fermer.
51	P : Il a dû se fermer, il a dû se disparaître, et vous savez que la fermeture d'un océan, ça se passe dans un contexte de ? Dans quel contexte géodynamique ?
52	Mathis : La collision.
53	P : Alors, la collision est le terme ultime [...], c'est lorsque tes deux lithosphères continentales vont se rencontrer.
54	Lucas : La subduction.
55	P : Avant la collision, vous avez la subduction.
56	Lucas D : La subduction, c'est quoi ?
57	P : Alors, la subduction, c'est quand votre plaque océanique elle passe dans le manteau, elle va s'enfoncer sous la plaque continentale [...]

A partir des interventions enseignante-élèves du **tableau.19**, nous avons réussi à construire la macrostructure du MEP1. Cette macrostructure est représentée par la **Fig. 28**.

Ce macro-épisode est caractérisé par :

Une dominance de prise de parole par l'enseignante. En fait, toutes les questions de ce macro-épisode sont émises par l'enseignante. Elles sont de l'ordre de quatre. Ce sont respectivement Q1, Q2, Q3, et Q4. D'un autre côté, sur un total de dix réponses émises durant ce macro-épisode, cinq réponses sont données par l'enseignante (R1b, R1c, R2, R4b, R5). Il est important de préciser ici que 4 de ces 5 réponses représentent des réponses à des questions déjà posées par l'enseignante (Q1-R1b et R1c ; Q2-R2 ; Q4-R4b).

D'autre part, la macrostructure de ce macro-épisode MEP1 montre de même l'existence d'un rythme très rapide des questions posées par l'enseignante. En regardant notre corpus, nous pouvons remarquer ce rythme accéléré dans la réplique 38 (Q2) où l'enseignante a posé 4 questions successives dont l'objectif est de trouver une réponse à la question principale « Est-ce que vous savez dans quel

contexte cet océan disparaît ?». Ces 4 questions posées successivement sont respectivement : « A quel niveau il y a mort de la croûte océanique, pas mort, disparition de la croute océanique ? », « Est-ce que vous savez ça ? », « Quand ça converge ? » et « Du coup, au niveau de quelle zone ? ». Ce rythme rapide de questions posées par l'enseignante peut être détecté aussi dans la réplique 51 (Q4) où l'enseignante pose la question « Vous savez que la fermeture d'un océan, ça passe dans un contexte de ? » suivie directement par la question « Dans quel contexte géodynamique ? ».

Pour les questions posées par l'enseignante tout au long de ce macro-épisode, nous pouvons distinguer clairement des bouclages simples où la question 38-Q2 « Est-ce que vous savez dans quel contexte cet océan disparaît ? » est reprise en 51-Q4 « Dans quel contexte géodynamique? ».

De même, nous pouvons identifier aussi des bouclages en retour où les questions qui sont posées provoquent un retour sur une question déjà traitée en la modifiant : Nous pouvons citer ici l'exemple du bouclage observé dans la question (Q3) « Est-ce qu'on trouve encore un océan ? » (Répliques 47,49) qui rétroagit sur la question (Q2) « Est-ce que vous savez dans quel contexte cet océan disparaît ? » (Réplique 38).

En ce qui concerne les interventions des élèves, nous pouvons remarquer aussi que les cinq réponses données par les élèves ont une longueur très courte [Une longueur moyenne de 2 mots : la subduction (R1a), la collision (R4a)].

Nous pouvons signaler aussi l'absence totale d'objections qui ont pu être formulées par les élèves tout au long de ce macro-épisode.

Par l'absence totale d'objections formulées en classe, les questions fermées posées par l'enseignante, le rythme rapide des questions émises par la professeure, ainsi que la longueur courte de réponses des élèves, nous pouvons dire que le dispositif pédagogique mis en place tout au long de ce macro-épisode ne correspond pas à un débat qui normalement permet la mise en place des moments d'argumentations et de controverses en classe. Par contre, nous pensons que la classe a fonctionné sur le registre d'un cours dialogué puisque les caractéristiques des échanges présentées ci-dessus coïncident avec celles indiquées par Veyrunes et Saury (2009) et Veyrunes (2017) pour caractériser le cours dialogué. Ce format pédagogique mis en place permet à l'enseignante la vérification de l'acquisition et la mémorisation (Veyrunes, 2017, p. 96) du concept de subduction par les élèves, qui est considéré

par elle comme un prérequis. Nous remarquons cela lorsqu'elle disait dans la réplique 1 « Normalement, vous avez déjà des connaissances un peu en géologie ». La reprise (avec modification) par l'enseignante de la question Q2 « Est-ce que vous savez dans quel contexte cet océan disparaît ? » en Q4 « *Dans quel contexte géodynamique (l'océan se ferme) ?* » ainsi que la question Q3 « *Est-ce qu'on trouve encore un océan ?* » posée par la professeure et qui provoque un retour sur la question Q2 « Est-ce que vous savez dans quel contexte cet océan disparaît ? », consolide notre hypothèse. En fait, ces bouclages simples ou de retour, montrent davantage que l'enseignante cherche à vérifier et confirmer l'appropriation par les élèves du concept de la subduction, qui selon elle, il est déjà construit et qui n'a pas besoin d'être mis en question en classe.

En revanche, la question de relance (QR5) posée par l'élève Lucas. D « la subduction, c'est quoi ? » montre bien que, le concept de subduction n'a pas été construit en Première S. Par cette question, l'élève essaye de relancer l'explication de la subduction déjà donnée par l'enseignante, mais qui reste apparemment floue pour lui.

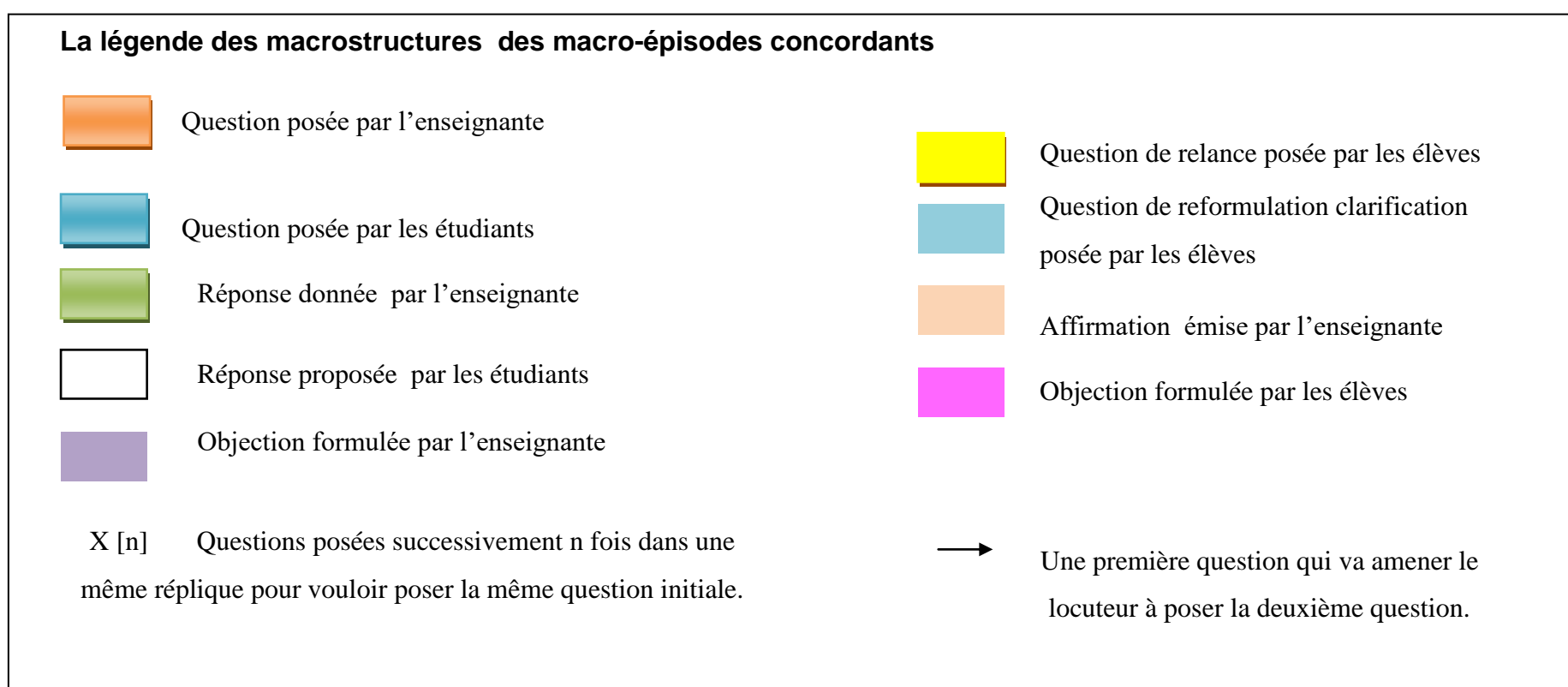
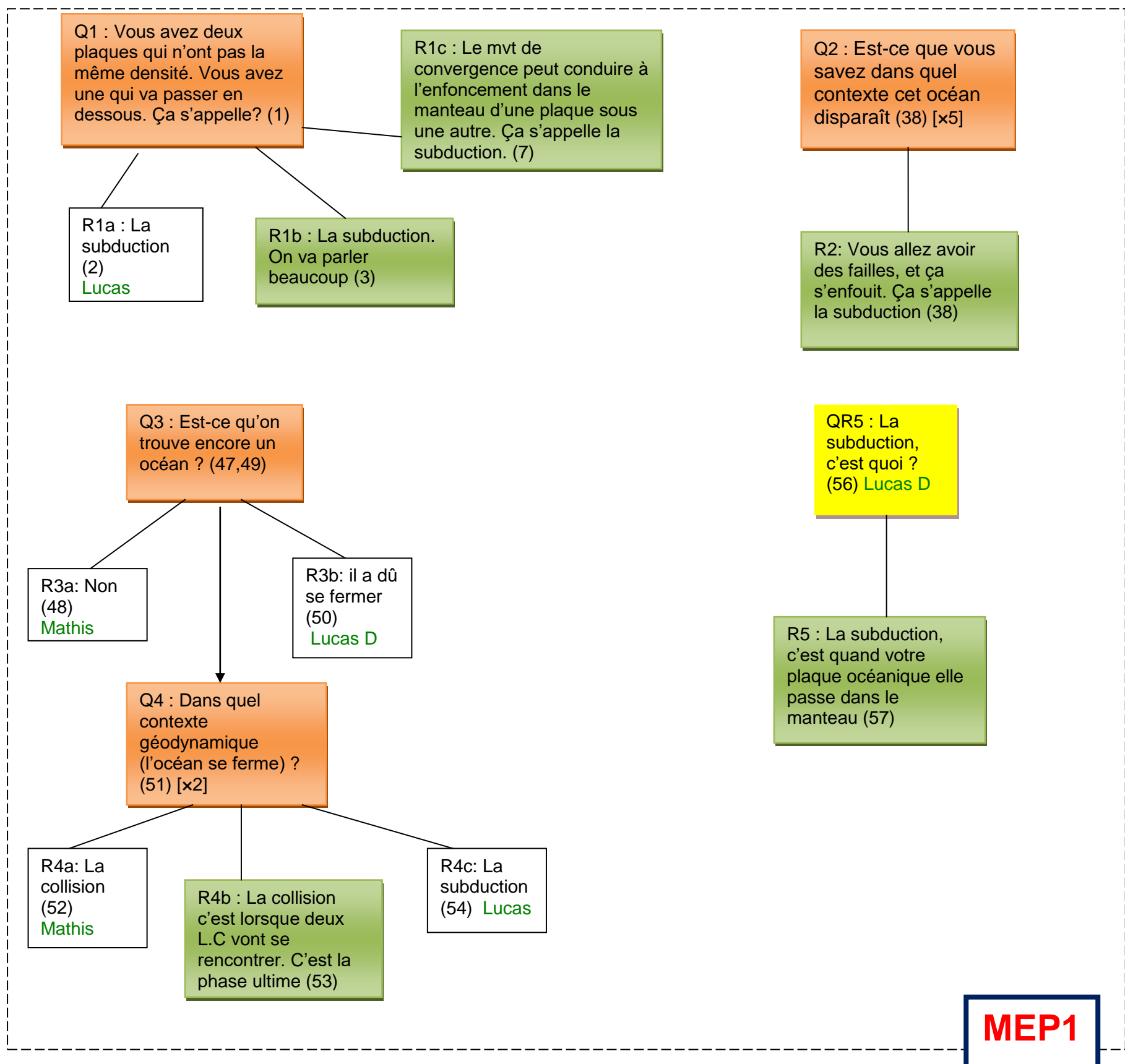


Fig.28. Macrostructure du MEP1 qui aborde le thème de la subduction en classe de terminale S.

- Pour la macrostructure du macro-épisode MEP2 qui aborde le thème de collision

Nous présentons dans le **tableau.20**, la partie du corpus qui correspond au MEP.2. Les interactions du MEP2, ont eu lieu durant la première séance et une partie de la deuxième et la troisième séance. Concernant la première séance, l'enseignante s'est basée sur le document de la **Fig. 13** « Fiche de travail sur les traces d'un domaine océanique » afin d'étudier les traces d'un domaine océanique. Elle s'est focalisée essentiellement sur le travail des notions d'ophiolites et de marges passives. Concernant le début de la deuxième séance, la professeure proposait le document de la **Fig. 14** « Fiche de travail sur l'histoire des Alpes (avec l'épisode de subduction) ». Ceci va lui permettre de présenter aux élèves le scénario de la formation des Alpes. Pour la troisième séance, l'enseignante utilisait le document de la **Fig. 17** « Fiche de travail sur le scénario de formation des Alpes », afin de présenter une récapitulation sur les différentes étapes de la formation des chaînes de montagnes de collision.

Tableau. 20. Le macro-épisode MEP2

1	P [...] Si vous avez deux plaques qui se rapprochent, convergence, c'est bien rapprochement. Alors, soit vos deux plaques de la même densité, elles se rapprochent, elles se cognent, on appelle ça ? Vous savez ou pas ? Quand, vous avez deux plaques de la même densité, deux plaques continentales qui se rapprochent, on appelle ça ? [...]
5	P : [...] Quand vous avez collision, vous avez ça dans le chapitre 1, vous avez du coup un raccourcissement horizontal et qu'est ce qui se passe pour la croûte ? Elle va subir un ?
6	Lucas : un épaississement.
7	P : Un épaississement, avec tous les indices que vous avez vu : les failles inverses [...] vous l'avez vu dans le chapitre 1 : [...] cette rencontre de deux plaques continentales qui conduit à un raccourcissement, à un empilement de terrain, donc à la formation d'une chaîne de montagnes (voir chapitre 1). Vous avez vu tout ça. Ça va ? donc ça c'est le cas de la collision.
57	P : [...] Et puis à la fin, on a la collision, due à une compression où vous allez avoir rencontre des deux masses océaniques et puis des nappes avec des complexes ophiolitiques que vous allez les trouver en surface [...].

149	P : Au bout d'un moment, si je continue à avoir convergence, là j'ai un contact entre deux lithosphères[...] qui vont être de même densité et du coup [...]le mouvement ne va pas continuer avec l'enfoncement de la croûte, de la lithosphère continentale sous une autre lithosphère continentale. C'est pas possible.[...] Qu'est ce qui va se passer ? [...] Qu'est ce qui se passe ? Vous allez avoir des failles. [...] Ces failles qui témoignent d'une convergence. On appelle ça faille ?
150	Lucas :Faille inverse.
151	P : Faille inverse. D'accord. C'est très bien. Vous avez des failles inverses qui vont se former. Du coup, quand je raccourcis, ça c'est votre chapitre 1. Qu'est ce qui se passe ?
152	Salma :Epaississement.
153	P : Epaississement de la croûte et mon Moho et bien va, si vous voulez, plus profond. Je vais avoir un épaississement crustal. J'ai ce qu'on appelle un phénomène de collision. [...] On observe un épaississement de cette croûte et une formation de relief. Autrement dit, la chaîne de montagne. Oui ?
154	Lucas D : Nous, nous avons vu que le Moho qui est en dessous, il est plus bas ?
155	P : Alors, en fait si tu as empilement de matériel, tu vas avoir du coup plus de matériel. D'accord ?
156	Lucas D : D'accord.
157	P : Et du coup, ça va tendance à s'enfoncer dans l'asthénosphère. [...] Je ne sais pas si t'as vu le petit modèle que je t'avais montré avec les bouchons. Non ?
158	Lucas D : Non.
159	P : Tu te souviens avec des bouchons des bouts de bois et quand si je mets un bout de bois dessus, j'empile du matériel [...] et je vais avoir un enfoncement du Moho.
160	Lucas D : Et du coup, ça s'enfonce plus au niveau du Moho ?
161	P : Bien sûr oui [...] Là, je comprime, je raccourcis, j'empile les matériaux, et du coup mon Moho sera plus profond. Oui ?

163	P : [...] Donc, quand j'ai parlé de la collision, c'est le terme si vous voulez ultime de cette subduction. C'est ce qui se passe après la subduction. Et ça tout ce qu'on a vu dans le chapitre 1 avec les failles inverses, les plis, les chevauchements, les nappes de charriage, l'empilement des matériaux, l'épaississement crustal. Tout ça, c'est dans le chapitre 1. Donc, c'est les indices de la collision dans le chapitre1[...]
164	Amina : C'est quoi une nappe de charriage ?
165	P : Alors une nappe de charriage, ça correspond si tu veux au transport d'un certain nombre de matériel sur une très longue distance le long d'une faille inverse presque horizontale, c'est sur plusieurs Km tu vas avoir des déplacements de matériaux suivant la ligne de failles mais sur plusieurs Km [...]
166	Lucas D : Et faille inverse c'est quoi ? Est-ce que ?
167	P : Alors, faille inverse c'est quand il y a compression et du coup tu vas avoir ton bloc supérieur qui va tendance à remonter par rapport au bloc inférieur [...]

168	Lucas D : Le bloc inférieur qui est collé à la lithosphère océanique ?
169	P : Pas forcément. En fait, t'as une faille qui se forme. D'accord, je l'ai fait dans ce sens là, mais j'aurais pu faire dans l'autre sens. Là, j'ai fait une faille.
170	Lucas D : Ce genre de faille se forme quand il y a subduction ?
171	P : Oui par exemple quand il y a subduction et quand ma collision et quand on a collision. Là il y a collision, c'est ça surtout qui fait apparaître les failles inverses. Ce sont les indices de collision [...]
185	P : [...]Troisième étape : collision continentale, donc vous pouvez mettre, toujours c'est la convergence.. [...] Cette fois-ci entre deux croûtes continentales. L'épaississement de la croûte, donc, ce qu'on a dit précédemment épaississement crustal avec présence d'une racine crustale. [...]

En se basant sur les répliques de l'enseignante et des élèves du **tableau .20**, nous avons réussi de construire la macrostructure du MEP2. Cette macrostructure est représentée par la **figure.29**.

Comme le macro-épisode MEP1, ce macro-épisode est marqué par une forte prise de parole de la part de l'enseignante : En fait, les trois questions (Q6 jusqu'à Q8) posées sont toutes proposées par la professeure. La question (1-Q6) « [...] *On appelle ça ?* » est une question fermée. Les questions (5-Q7) « *Qu'est ce qui se passe pour la croûte?* » et (149-Q8) « [...] *Qu'est ce qui va se passer ?* » sont par contre des questions ouvertes. De même, nous pouvons distinguer 9 réponses qui ont été données par l'enseignante sur un ensemble de 12 réponses émises en classe. Ce sont respectivement R6, R7b, R7c, R8a, R8c, R8e, R8f, R9, R10. 7de ces 9 réponses sont des réponses à des questions posées déjà par l'enseignante (Q6-R6 ; Q7-R7b & R7c ; Q8-R8a, R8c, R8e & R8f). Nous mentionnons ici que (163-R8f) « *Les failles inverses, les plis, les chevauchements, les nappes de charriage, l'empilement des matériaux, l'épaississement crustal. C'est [...] la collision* » est une reprise avec modification de (153-R8e) « *épaississement de la croûte et mon Moho et bien, va, si vous voulez, plus profond. Je vais avoir un épaississement crustal. J'ai ce qu'on appelle un phénomène de collision* ».

D'autre part, nous pouvons remarquer que l'enseignante pose ses questions avec un rythme très rapide. En fait, nous pouvons citer le cas de la réplique¹ (Q6) où l'enseignante pose dans une même réplique trois questions successives dont deux de ces trois questions sont des auto-reprises avec modification de la question principale « *vos deux plaques de la même densité, elles se rapprochent, elles se*

cognent, on appelle ça ? » (Réplique1). Ces deux questions posées par l'enseignante sont respectivement « Vous savez ou pas ? » et « Quand vous avez deux plaques de la même densité, deux plaques continentales qui se rapprochent, on appelle ça ? » (Réplique1).

Ce rythme rapide dans les questions posées, peut être détecté aussi dans Q8 (*Réplique 149*), où l'enseignante pose dans une même réplique trois questions successives dont deux de ces questions est une auto-reprise avec modification de la question principale « *Si je continue à converger et que toutes ont la même densité [...] Qu'est ce qui va passer ?* ». Ces deux questions sont respectivement : « *Qu'est ce qui se passe ?* » et « *on appelle ça faille ?* ».

Ces questions successives émises par l'enseignante pour vouloir demander la même question principale, peuvent s'observer aussi dans la réplique 5 (Q7) où l'enseignante a posé la question « *Qu'est ce qui se passe pour la croûte ?* » suivie directement par la question « *Elle va subir un ?* ».

D'autre part, tout au long du macro-épisode MEP2, nous pouvons identifier la présence d'un bouclage simple où la question (Q7) « *Quand vous avez collision (rencontre de deux plaques continentales) vous avez un raccourcissement horizontal. Qu'est ce qui se passe pour la croûte ?* » est reprise en (Q8) « *Si je continue à avoir convergence, là j'ai contact entre deux L.C. Qu'est ce qui va passer ?* ».

Pour les interventions des élèves, nous remarquons l'absence complète d'objections formulées par les élèves. Nous pouvons signaler aussi la longueur courte de leurs réponses tout au long du macro-épisode MEPII. Ces réponses peuvent atteindre une longueur maximale de deux mots. C'est le cas de (R7a) « un épaississement » ou encore (R8b) « Faille inverse ».

Les interventions des élèves sont marquées aussi par la présence de deux questions de relance (164-QR9) « *C'est quoi une nappe de charriage ?* » et (166, 170-QR10) « *Faille inverse c'est quoi ? Ce genre de faille se forme quand il y a subduction ?* », posées respectivement par les élèves Amina et Lucas.D.

A partir de ces différentes observations qu'on a pu signaler dans notre macro-épisode, nous pouvons interpréter l'absence d'objections formulées par les élèves, la faible prise en compte de leur point de vue par l'enseignante, le rythme rapide des questions posées ainsi que la longueur courte des réponses des apprenants, par le fait que la classe n'a pas mis en place un débat qui favorise la construction des

savoirs problématisés. En fait, l'enseignante se préoccupe essentiellement dans ce macro-épisode de vérifier l'acquisition du concept de collision et de ses indices qui est considéré par elle comme déjà construit auparavant et qui n'a pas besoin d'être mis en question. L'identification dans les répliques de l'enseignante des phrases comme « Vous avez vu tout ça » (Réplique 7), « ça, c'est votre chapitre 1 » (Réplique 151) ou encore « Tout ça, c'est dans le chapitre 1 » (Réplique 163) renforce encore notre interprétation ci-dessus.

Par les questions successives posées par l'enseignante dans une même réplique, la professeure incite les élèves à réagir à la question principale, en la reprenant comme telle ou en la reformulant. Elle veut ici écouter la réaction des apprenants pour vérifier tout d'abord l'acquisition du concept de la collision par les élèves et le valider ensuite. Le bouclage simple observable au niveau de la question (Q8) qui représente une reprise de la question (Q7) ainsi que la reprise (avec modification) de la réponse de l'enseignante (R8e) en (R8f) montrent davantage que l'enseignante cherche à valider et consolider le concept de collision et ses indices en classe. L'évidence non questionnée du concept de la collision amène l'enseignante à éviter les moments de négociations et de s'inscrire sur le registre du cours dialogué qui favorise la production des assertions qui relèvent du vrai et du juste (orange-Ravachol, 2010). Ce savoir solution reste ambigu pour les apprenants. Les deux questions de relance (QR9) et (QR10) le montrent très bien. En fait, ce qui intéresse les élèves ici c'est pas de savoir que la collision entraîne la formation des failles inverses et des nappes de charriage, mais plutôt de savoir qu'est ce que ça signifie des termes comme « nappe de charriage » ou « faille inverse » et savoir pourquoi ces phénomènes se forment lors de la collision. Par ces deux questions, la classe s'oriente vers la mise en place d'une problématisation qui pourrait possiblement construire un savoir raisonné.

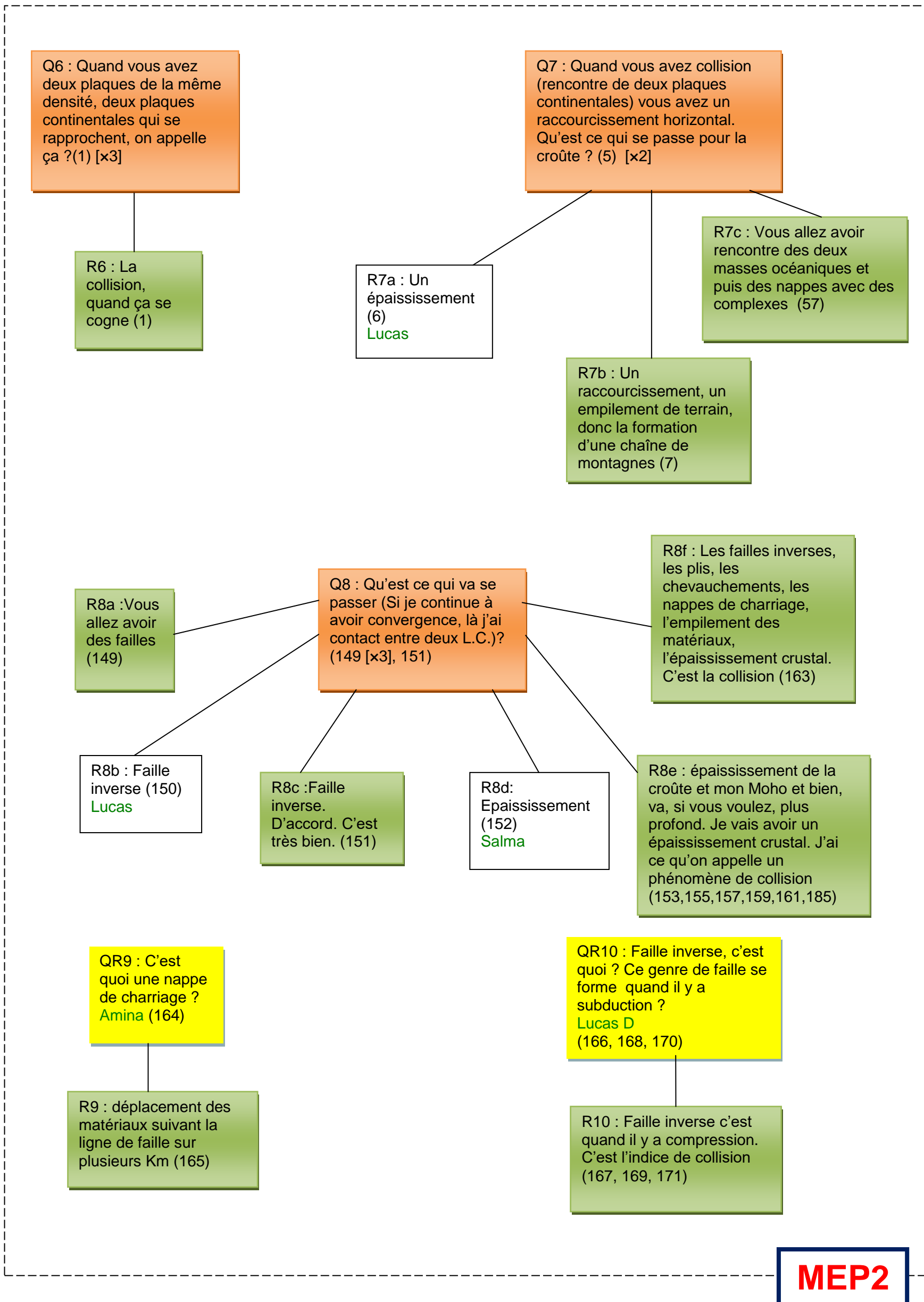


Fig.29. Macrostructure du macro-épisode ME2 qui aborde le thème de la collision en classe de terminale S.

▪ Pour la macrostructure du MEP3 qui s'occupe du thème de la « marge passive »

Nous présentons dans le **tableau. 21**, la partie du corpus qui représente le macro-épisode MEP3.

Les interactions du MEP3, ont eu lieu durant la première séance de la séquence. Concernant cette séance, l'enseignante s'est basée sur le document de la **Fig.13** « Fiche de travail sur les traces d'un domaine océanique » afin d'étudier les traces d'un domaine océanique. Elle s'est concentrée essentiellement sur le travail des notions d'ophiolites et de marges passives.

Tableau. 21. Le macro-épisode MEP3.

30	<p>P : [...] Alors, s'il y a un ancien océan à la place des Alpes, cet océan a dû se former forcément, et du coup, vous avez dû certainement avoir des anciennes marges passives.</p> <p>Est-ce que vous savez qu'est ce qu'une marge passive ?</p> <p>En fait, c'est la limite entre le continent et l'océan ; Vous avez une zone de transition qui est la marge passive à l'opposition de la marge active.</p> <p>[...] Vous avez des failles, d'accord, et cette zone s'appelle la marge passive</p> <p>[...] Vous avez vu ça normalement ça en Première cette marge passive. Elle se forme dans quel contexte ? Quand j'ai formation d'un océan, ça se forme dans quel contexte ? Convergence, divergence ? Ça se rapproche ? ça, fin, les plaques se rapprochent ou s'éloignent ?</p>
31	<p>Constance : Elles s'éloignent.</p>
32	<p>P : Quand je forme un océan, elles s'éloignent ; J'ai un contexte de divergence. Du coup, je vais avoir ma croûte qui va être fracturée, et ces failles, elles sont, qui témoignent de divergence. On appelle ça des failles normales.</p> <p>[...] Donc, je continue à amincir ma croûte, et là vous connaissez, vous avez fait en Première S, vous allez avoir du coup émission de magma. Ce magma qui arrive au contact de l'eau [...] C'est le plancher océanique qui se forme. Donc, mon océan alpin s'est formé à ce moment là et là, dans les bordures, la liaison entre mon océan et mon continent. Ce que j'appelle ?</p>
33	<p>Luca D : La marge passive.</p>
34	<p>P : Est-ce que ça vous met dans la tête, qu'est ce que la marge passive ? oui ? Ben, donc, je vais maintenant voir dans les Alpes, rechercher les indices de cette marge passive [...] vous avez des failles avec des failles normales, et vous avez les blocs basculés, des blocs basculés qui témoignent de cette marge passive [...]</p>
35	<p>Lucas : Et du coup, la marge passive, c'est des anciennes failles normales ?</p>
36	<p>P : Oui, exactement. Ce sont des anciennes failles normales, des failles normales très vieilles, mais que je peux les retrouver dans certaines zones de mon massif actuel.</p> <p>[...] ça, c'est de la 1^{ère} S [...]</p>

Les échanges du **tableau.21** nous ont permis de construire la macrostructure du macro-épisode MEP3. Cette macrostructure est représentée par la **Figure.30**.

Ce macro-épisode est marqué par une forte prise de parole de l'enseignante. En effet, toutes les questions qui ont été posées dans ce macro-épisode sont proposées par l'enseignante. Il s'agit ici de la question (30-Q11) « Est-ce que vous savez qu'est ce qu'une marge passive ? », la question (30-Q12) « Elle (la marge passive) se forme dans quel contexte ? » et la question (32-Q13) « la liaison entre océan et continent, ce que j'appelle ? ». Toutes ces questions sont des questions fermées qui ne peuvent être répondues qu'avec un mot ou une phrase très courte. C'est le cas de la question (Q11) : « Est-ce que vous savez [...] ? », la question (30-Q12) « Dans quel contexte [...] ? » et la question (Q13) « [...] Ce que j'appelle ? »

De la même façon, nous identifions dans ce macro-épisode quatre réponses qui ont été données par l'enseignante sur un total de six réponses présentées en classe. Ces quatre réponses sont : (30-R11) « C'est la limite entre le continent et l'océan », (R12b) « J'ai un contexte de divergence. Je vais avoir des failles normales », (34-R13b) « Vous avez les failles normales et les blocs basculés qui témoignent de cette marge passive » et (36-R14) « Oui, exactement. Ça témoigne d'une ancienne marge passive ». Nous mentionnons ici que trois de ces quatre réponses représentent des réponses à des questions déjà posées par l'enseignante (Q11-R11 ; Q12-R12b ; Q13-R13b).

D'autre part, nous pouvons remarquer le rythme rapide des questions posées par l'enseignante. En fait, si on étudie la réplique 30 (Q12), on voit que l'enseignante a posé quatre questions successives qui sont généralement soit des auto-reprises (avec modification), de la question principale « *Elle (la marge passive) se forme dans quel contexte ?* ». Ces quatre questions sont respectivement : « *Quand j'ai formation d'un océan, ça se forme dans quel contexte ?* » ; « *Convergence, divergence ?* » ; « *ça se rapproche ?* » et « *Fin, les plaques se rapprochent ou s'éloignent ?* ».

Pour les différentes questions posées par l'enseignante, nous remarquons la présence d'un bouclage en retour où la question posée entraîne un retour sur une ancienne question déjà traitée en la modifiant. Dans notre macro-épisode, nous parlons de la question (32-Q13) « La liaison entre mon océan et mon continent, ce que

j'appelle ? » qui rétroagit sur la question (30-Q11) « Est-ce que vous savez qu'est ce qu'une marge passive ? ».

Pour les interventions des élèves, nous pouvons distinguer cette fois-ci une nouvelle catégorie de questions qu'on a nommée au début de cette section les questions de reformulation clarification. Dans notre macro-épisode MEP3, la question de reformulation clarification correspond à la (35-QRC14) « *Et du coup, la marge passive c'est des anciennes failles normales ?* ».

En ce qui concerne les deux réponses proposées par les élèves dans ce macro-épisode, elles sont caractérisées par une longueur courte. On parle ici de deux à trois mots au maximum [(R12a) « *Elles s'éloignent* » et (R13a) « *la marge passive* »]. L'absence d'objections, la forte prise de parole par l'enseignante, la nature (Les questions fermées) et le rythme rapide des questions posées par l'enseignante ainsi que la longueur courte des réponses des élèves, indiquent que la classe a fonctionné tout au long de ce macro-épisode sur le registre du cours dialogué (Veyrunes, 2017 ; Veyrunes & Saury, 2009).

Considérées comme des prérequis, l'enseignante considère les indices de la marge passive comme déjà construits en première S et n'ont pas besoin d'être mis en question. Nous remarquons cela lorsqu'elle disait dans la réplique 30 « *vous avez vu ça, normalement ça en Première cette marge passive* » et dans la réplique 36 « *ça c'est de la première S* ». Par contre, elle cherche à vérifier l'acquisition du concept de marge passive et ses indices tout en essayant de lui donner de la consistance durant les échanges avec les apprenants. C'est ainsi, par les questions posées, l'enseignante cherche au départ de trouver la bonne réponse du côté des élèves :

-Si l'un des élèves réagit et propose une réponse qui satisfait les attentes de l'enseignante, cette dernière valide la réponse de l'élève avec la possibilité de l'explicitier et de la détailler. C'est le cas de la réponse de l'enseignante (32-R12b) « *J'ai un contexte de divergence. Du coup, je vais avoir ma croûte qui va être fracturée, et ces failles, elles sont, qui témoignent de divergence. On appelle ça des failles normales* » qui vient valider la réponse (31-R12a) de l'élève Constance « *Elles s'éloignent* » ou encore le cas de la réponse (34-R13b) de l'enseignante « *Vous avez [...] des failles normales et [...] des blocs basculés qui témoignent de cette marge passive* » qui vient confirmer la solution proposée par l'élève Lucas. D en (33-R13a) « *la marge passive* ».

-Si les élèves ne réagissent pas à la question de l'enseignante, cette dernière donne

elle-même la réponse. Et pour vérifier que cette réponse est mémorisée par les élèves, elle pose une autre question qui entraîne un retour sur l'ancienne question qui n'a pas été répondue par les apprenants. Ce cas est représenté dans le macro-épisode MEP3 au niveau de la question (32-Q13) « La liaison entre mon océan et mon continent, ce que j'appelle ? ». Cette question a été posée par l'enseignante pour vérifier si sa réponse (R11)³⁵ « *c'est la limite entre le continent et l'océan* » a été bien mémorisée ou non par les élèves.

D'autre part, par la question de reformulation clarification (35-QRC14) émise par l'élève Lucas, ce dernier essaye de lever une certaine ambiguïté et vérifier s'il a bien compris ou non l'énoncé de la professeure sur le concept de la marge passive et ses indices.

³⁵ : La réponse (R11) est donnée par l'enseignante suite à la non réaction des élèves à sa question (Q11) « *Est-ce que vous savez qu'est ce qu'une marge passive ?* ».

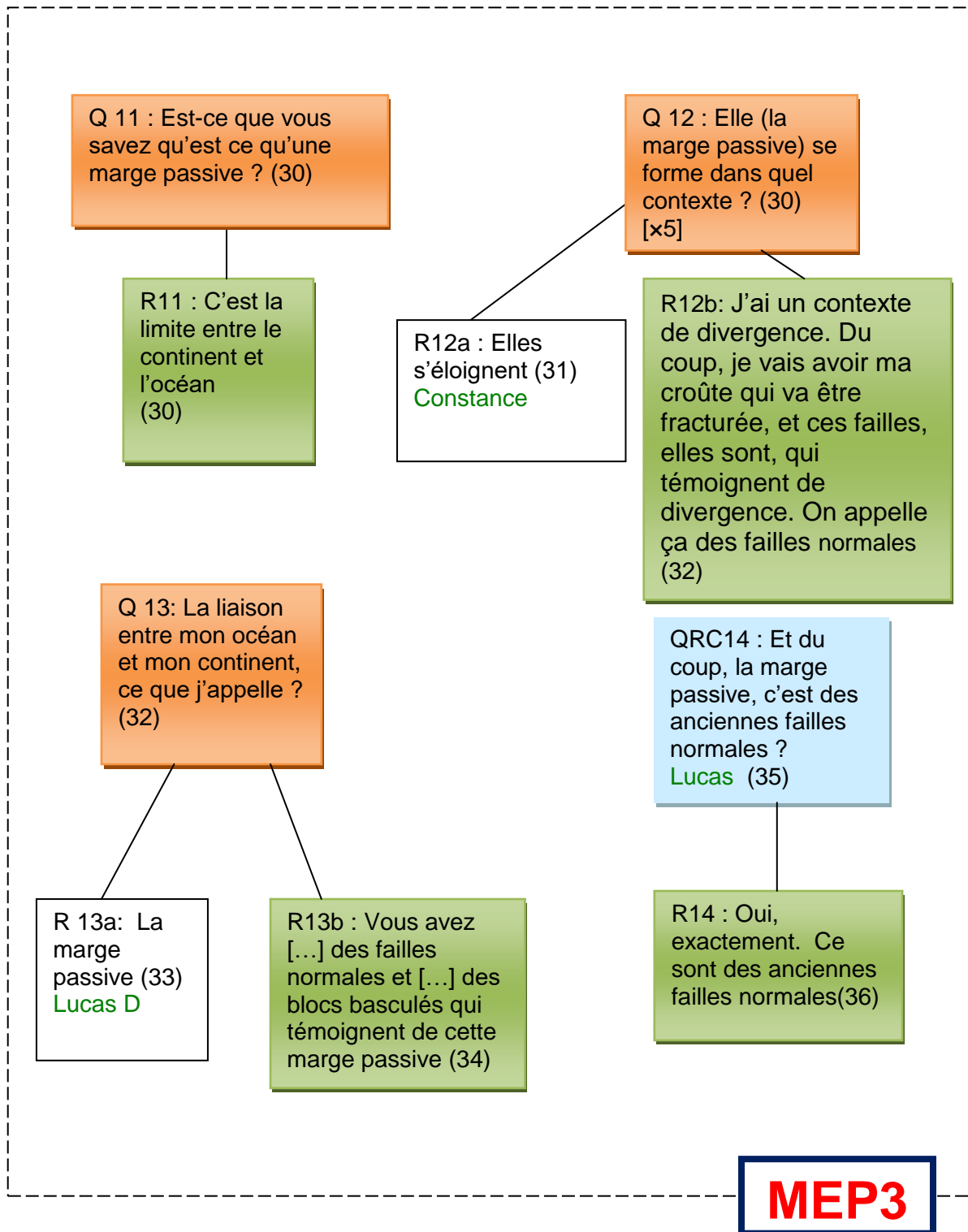


Fig.30. Macrostructure du macro-épisode MEP3 qui aborde le thème de la marge passive en classe de terminale S.

▪ Pour la macrostructure du MEP11 qui étudie le thème des failles dans le contexte de divergence et de convergence

Nous exposons dans le **tableau. 22** l'extrait du corpus qui correspond au macro-épisode MEP11.

Les interactions du MEP11, ont eu lieu durant la première séance, et une partie la troisième séance. Concernant la première séance, l'enseignante utilisait le document de la **Fig.13** « Fiche de travail sur les traces d'un domaine océanique » afin d'étudier les traces d'un domaine océanique. Elle s'est focalisée essentiellement sur le travail des notions d'ophiolites et de marges passives. Concernant la troisième séance, l'enseignante exploitait le document de la **Fig. 17** « Fiche de travail sur le scénario de formation des Alpes » afin de présenter une récapitulation sur les différentes étapes de la formation des chaînes de montagnes de collision.

Tableau. 22. Le macro-épisode MEP11

30	<p>P : [...] Alors, s'il y a un ancien océan à la place des Alpes, cet océan a dû se former forcément, et du coup, vous avez dû certainement avoir des anciennes marges passives.</p> <p>Est-ce que vous savez qu'est ce qu'une marge passive ?</p> <p>En fait, c'est la limite entre le continent et l'océan ; Vous avez une zone de transition qui est la marge passive à l'opposition de la marge active.</p> <p>[...] Vous avez des failles, d'accord, et cette zone s'appelle la marge passive</p> <p>[...] Vous avez vu ça normalement ça en Première cette marge passive. Elle se forme dans quel contexte ? Quand j'ai formation d'un océan, ça se forme dans quel contexte ? Convergence, divergence ? Ça se rapproche ? ça, fin, les plaques se rapprochent ou s'éloignent ?</p>
31	<p>Constance : Elles s'éloignent.</p>
32	<p>P : Quand je forme un océan, elles s'éloignent ; J'ai un contexte de divergence. Du coup, je vais avoir ma croûte qui va être fracturée, et ces failles, elles sont, qui témoignent de divergence. On appelle ça des failles ? Normales.</p> <p>[...] Donc, je continue à amincir ma croûte, et là vous connaissez, vous avez fait en Première S, vous allez avoir du coup émission de magma. Ce magma qui arrive au contact de l'eau [...] C'est le plancher océanique qui se forme. Donc, mon océan alpin s'est formé à ce moment là et là, dans les bordures, la liaison entre mon océan et mon continent. Ce que j'appelle ?</p>
33	<p>Luca D : La marge passive.</p>
34	<p>P : Est-ce que ça vous met dans la tête, qu'est ce que la marge passive ? oui ? Ben, donc, je vais maintenant voir dans les Alpes, rechercher les indices de cette marge passive [...] vous avez des failles avec des failles normales, et vous avez les blocs basculés, des blocs basculés qui témoignent de cette marge passive [...]</p>

35	Lucas : Et du coup, la marge passive, c'est des anciennes failles normales ?
36	P : Oui, exactement. Ce sont des anciennes failles normales, des failles normales très vieilles, mais que je peux les retrouver dans certaines zones de mon massif actuel. [...] ça, c'est de la 1 ^{ère} S [...]

149	P : Au bout d'un moment, si je continue à avoir convergence, là j'ai un contact entre deux lithosphères[...] qui vont être de même densité et du coup [...]le mouvement ne va pas continuer avec l'enfoncement de la croûte, de la lithosphère continentale sous une autre lithosphère continentale. C'est pas possible.[...] Qu'est ce qui va se passer ? [...] Qu'est ce qui se passe ? Vous allez avoir des failles. [...] Ces failles qui témoignent d'une convergence. On appelle ça faille ?
150	Lucas :Faille inverse.
151	P : Faille inverse. D'accord. C'est très bien. Vous avez des failles inverses qui vont se former. Du coup, quand je raccourcis, ça c'est votre chapitre 1. Qu'est ce qui se passe ?

166	Lucas D : Et faille inverse c'est quoi ? Est-ce que ?
167	P : Alors, faille inverse c'est quand il y a compression et du coup tu vas avoir ton bloc supérieur qui va tendance à remonter par rapport au bloc inférieur [...]
168	Lucas D : Le bloc inférieur qui est collé à la lithosphère océanique ?
169	P : Pas forcément. En fait, t'as une faille qui se forme. D'accord, je l'ai fait dans ce sens là, mais j'aurais pu faire dans l'autre sens. Là, j'ai fait une faille.
170	Lucas D : Ce genre de faille se forme quand il y a subduction ?
171	P : Oui par exemple quand il y a subduction et quand ma collision et quand on a collision. Là il y a collision, c'est ça surtout qui fait apparaître les failles inverses. Ce sont les indices de collision [...]

184	Amina : Madame, là est ce que où je peux faire convergence ou divergence, j'ai des failles ?
185	P : Ain, chaque fois que vous avez mouvement de plaques, effectivement ça risque d'engendrer des failles [...] Alors après[...] en zone de subduction, vous allez avoir énormément de foyers sismiques tout le long de votre plongée de la croûte océanique. Et du coup, vous allez avoir une forte activité. C'est pour cela, on appellera une marge active. C'est parce que au niveau de cette marge il y a beaucoup d'activité sismique et volcanique

En se basant sur les répliques du **tableau.22**, nous avons pu construire la macrostructure du MEP11 (voir **figure.31**).

Les échanges qui ont eu lieu en classe durant ce macro-épisode sont marqués par une forte prise de parole de la part de l'enseignante. En effet, nous pouvons

distinguer quatre questions qui sont toutes posées par l'enseignante. Ce sont respectivement (Q11) «*Est-ce que vous savez qu'est ce qu'une marge passive ?* », (Q12) «*Elle (la marge passive) se forme dans quel contexte ?* », (Q13) «*La liaison entre océan et continent, ce que j'appelle?* », et (Q8) «*Si je continue à avoir convergence, là j'ai contact entre deux L.C [...] Qu'est ce qui va se passer ? On appelle ça [...] ?* ». Toutes ces questions sont fermées qui ne peuvent être répondues que par un mot ou une phrase courte.

D'autre part, nous remarquons que sur onze réponses, huit réponses sont proposées par la professeure. Nous mentionnons ici que cinq de ces huit réponses sont des réponses à des questions déjà posées par l'enseignante : On parle ici de Q11-R11, Q12-R12b, Q13-R13b, Q8-R8a & R8C.

En ce qui concerne les différentes questions posées par l'enseignante, nous pouvons distinguer :

-Un bouclage en retour où la question (Q13) «*La liaison entre océan et continent, ce que j'appelle?* » entraîne un retour sur la question (Q11) «*Est-ce que vous savez qu'est ce qu'une marge passive ?* ».

Pour les interventions des élèves, nous pouvons distinguer la présence d'une question de reformulation clarification. Elle correspond à (QRC14) «*Et du coup, la marge passive, c'est des anciennes failles normales ?* » posée par l'élève Lucas. Nous pouvons identifier aussi une question formulée par l'élève. On parle ici de (Q42) «*Est-ce que où je peux faire convergence ou divergence, j'ai des failles ?* » posée par l'élève Amina.

Ce macro- épisode est marqué aussi par la présence de la question de relance (QR10) «*Faille inverse, c'est quoi ? Ce genre de failles se forme quand il y a subduction ?*» qui a été posée par l'élève Lucas.D.

Si on regarde les réponses données par les élèves, nous remarquons qu'elles sont caractérisées par une longueur très courte. On parle ici de deux mots [Exemple : (R8b) «*Faille inverse* »] à trois mots [Exemple : (R13a) «*La marge passive* »].

Ce macro-épisode est marqué aussi par l'absence complète d'objections formulées en classe. Cette absence indique que la classe n'a pas privilégié la mise en place d'un débat qui normalement permet aux élèves de construire un savoir problématisé grâce aux moments de controverses. Comme les macrostructures des autres macro-épisodes concordants étudiées ci-dessus, nous privilégions l'hypothèse que la classe a fonctionné tout au long de ce macro-épisode, sur le registre d'un cours dialogué

caractérisé par « *le temps de parole de l'enseignante qui est largement dominant par rapport à celui des élèves* » (Veyrunes, 2017, p. 97) [Presque toutes les questions sont posées par l'enseignante(à part Q42) et pour un total de onze réponses, huit réponses sont posées par l'enseignante], et « *la faible place laissée à leurs commentaires* » (ibid), ainsi que « *la prédominance des questions fermées* » et « *le rythme rapide des questions* » (ibid) . Ce rythme rapide peut s'observer dans la réplique 30, où l'enseignante a posé quatre questions successives qui sont généralement des autoreprises (avec modification) de la question principale « *Elle se forme dans quel contexte ?* ». Ces quatre questions successives sont « *Quand j'ai formation d'un océan, ça se forme dans quel contexte ?* », « *Convergence, divergence ?* », « *ça se rapproche ?* » et « *ça fin, les plaques se rapprochent ou s'éloignent ?* ».

Durant ce macro-épisode, l'enseignante considère le concept de failles normales et inverses dans le cadre de la divergence et la convergence, comme des prérequis qui ont été déjà construits en première S ou dans le chapitre précédent et qui n'ont pas besoin d'être mis en question. Nous arrivons à cette conclusion en regardant ce qu'elle disait dans les répliques 30 « *Vous avez vu ça normalement ça en Première cette marge passive* », la réplique 36 « *Ce sont des anciennes failles normales [...] ça, c'est la première S [...]* » et la réplique 151 « *Faille inverse [...] ça c'est votre chapitre1 [...]* ».

La professeure essaye par contre de vérifier l'acquisition de ce concept et de le valider tout au long de ce macro-épisode. Elle cherche trouver la réponse « juste » et de la valider. Ainsi si les élèves réagissent à la question posée par l'enseignante en proposant une réponse qui satisfait ses attentes, cette dernière va la valider explicitement, avec la possibilité de la détailler. C'est le cas de la réponse (R12b) « *J'ai un contexte de divergence. Je vais avoir des failles normales* » qui vient valider la réponse de l'élève Constance (R12a) « *Elles s'éloignent* » ou encore (R13b) « *Vous avez les failles normales et les blocs basculés qui témoignent de cette marge passive* » qui vient confirmer la réponse de Lucas.D (R13a) « *la marge passive* ».

Si les élèves n'ont pas réagi à la question de l'enseignante, cette dernière donne elle-même la réponse recherchée. En revanche, pour vérifier si les élèves arrivent ou non à acquérir cette réponse, elle essaye de poser une autre question qui entraîne un retour sur une question déjà posée en la modifiant. Dans notre macro-épisode, nous donnons l'exemple de la question (Q13) « *La liaison entre océan et continent,*

ce que j'appelle ? » qui entraîne un retour sur la question (Q11) « *Est-ce que ce que vous savez qu'est ce qu'une marge passive ?* ».

Donné comme une solution, le concept de failles normales et inverses dans le contexte de divergence et de convergence reste flou pour les élèves. Les questions de reformulation clarification (QRC14) et (Q42) « *Est-ce que où je peux faire convergence ou divergence, j'ai des failles ?* », ainsi que la question de relance (QR10) le montrent très bien. En fait, les élèves Lucas et Amina posent les questions de reformulation clarification (QRC14) « *Et du coup, la marge passive, c'est des anciennes failles normales ?* » et (Q42) « *Est-ce que où je peux faire convergence ou divergence, j'ai des failles ?* », afin de lever une ambiguïté et avoir plus de précisions en lien avec le concept de failles normales et de failles inverses. Par la question de relance (QR10) « *Faille inverse, c'est quoi ? (166). Ce genre de failles se forme quand il y a subduction ? (170)* », l'élève Lucas.D essaye de relancer l'explication du concept de faille inverse qui a été déjà mentionné durant les échanges entre élèves et enseignante. En fait, après « la bonne réponse » donnée par l'élève Lucas en (R8b) « *Faille inverse* » et sa validation par l'enseignante en (R8c) « *Faille inverse. D'accord. C'est très bien* », le concept de faille inverse et sa formation dans le contexte de divergence reste ambigu pour l'élève Lucas. D. Ici, ce qui est important pour lui, ce n'est pas de savoir seulement que les failles inverses se forment lorsqu'il y a convergence, mais de savoir ce que veut dire « faille inverse » et savoir pourquoi ces failles inverses se forment dans le contexte de convergence. Par la question de reformulation clarification (QRC14), la question (Q42) et la question de relance (QR10), les élèves ont tendance à mettre en place une problématisation qui entraîne peut-être à la construction d'un savoir raisonné. En revanche, si on regarde les réponses proposées à ces questions, nous remarquons qu'elles représentent des validations par l'enseignante du contenu indiqué par les élèves : On parle ici de (R14) « *Oui exactement. Ce sont des anciennes failles normales* » et (R42) « *Chaque fois que vous avez un mouvement de plaques, effectivement ça risque d'engendrer des failles* ». Elles peuvent être aussi une reformulation de ce qui a été déjà dit par l'enseignante : On parle ici de (R10) « *Faille inverse c'est quand il y a compression [167]. Ce sont les indices de collision [171]* » qui représente une reformulation du contenu produit en Q8-R8c.

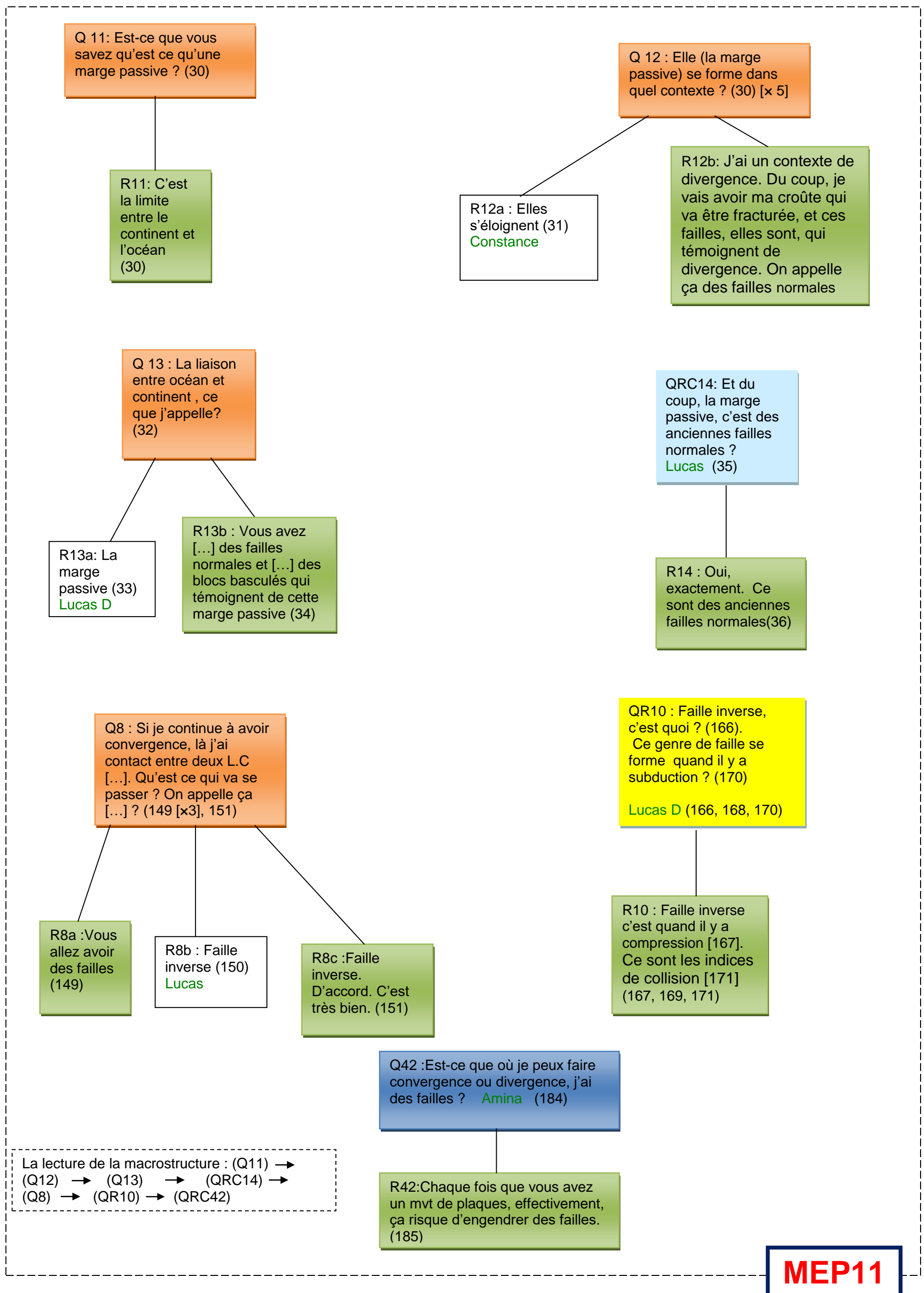


Fig.31. Macrostructure du macro-épisode MEP11 qui aborde le thème des failles dans le cadre de divergence et de convergence en classe de terminale S.

➤ **La suite des macrostructures des macro-épisodes discordants**

Nous allons étudier dans cette partie les macrostructures des macro-épisodes discordants qui n'ont pas été étudiés dans le chapitre VII. Il s'agit d'analyser les macrostructures des MEP5, MEP6, MEP7, MEP10, MEP12, MEP13, et MEP14.

- **Pour la macrostructure du MEP5 qui met en exergue le problème du devenir de l'eau océanique**

Nous présentons dans le **tableau.23**, l'extrait du corpus qui correspond au MEP5 : Les interactions du MEP5, ont eu lieu au cours de la deuxième séance de la séquence. Durant ces moments de la séance, la professeure s'est servie du document de la **Fig. 14** « Fiche de travail sur l'histoire des Alpes (avec l'épisode de subduction) afin de présenter aux élèves le scénario de la formation des Alpes.

Tableau. 23. Le macro-épisode MEP5

61	P : [...] Vous pouvez avoir [...] la fermeture des océans une fois que la croûte soit très vieille, elle subduit et vous pouvez avoir une collision et formation d'une chaîne de montagne à ce moment là.
62	Mathis : Et du coup, l'eau va changer, c'est-à-dire qu'elle va peut-être déborder sur les terres, non ?
63	P : Alors, c'est pas qu'elle déborde, c'est que vous allez avoir une répartition des océans qui va être différente. Et du coup, la carte sera pas la même que la carte d'aujourd'hui. Elle évolue durant les temps géologiques. On avait pas toujours la même position. Vous savez, Paris et New York qui s'éloignent petit à petit chaque année On s'éloigne, je pense en moyenne de 1cm. C'est pas beaucoup, mais sur l'échelle géologique, vous allez avoir effectivement un éloignement des deux masses continentales, parce que l'océan va continuer à s'ouvrir [...]

67	P [...] T'as d'abord subduction, et le terme ultime de cette subduction, quand il n'y aura plus de croûte océanique, à ce moment là, les croûtes continentales qui vont se rencontrer et former un relief [...]
68	Lucas D : Oui. Et du coup, l'océan va se fermer ?
69	P : Et là oui, l'océan il aura complètement disparu, il se sera complètement fermé. Oui ?
70	Amina : Et l'eau, elle va où ?
71	P : Alors, l'eau. C'est une bonne question, parce que là vous avez une image à un endroit donné, mais il faudra avoir une image de vision plus globale à

l'échelle du globe[...] ça se fait pas du jour au lendemain, évidemment, mais tu vas avoir des nouvelles répartitions de masse d'eau. Je vais essayer de réfléchir pour pouvoir expliquer ça mieux, avec des schémas peut-être pour mieux comprendre [...]
--

A partir des interventions enseignante-élèves du **tableau. 23** nous avons pu construire la macrostructure correspondante dans la **figure.32**.

Cette macrostructure est caractérisée par :

La présence de deux affirmations qui ont été formulées par l'enseignante. Elles correspondent à (A18) « *Vous pouvez avoir la fermeture des océans, la croûte subduit et vous pouvez avoir une collision et formation d'une chaîne de montagne* » et (A20) « *T'as d'abord subduction. Et le terme ultime de cette subduction quand il n'y aura plus de CO [...] les CC qui vont se rencontrer et former un relief* ».

Toutes les questions posées dans ce macro-épisode sont émises par les élèves. Elles sont respectivement (Q19) « *Et l'eau va changer, c'est-à-dire qu'elle va peut-être déborder sur les terres ?* » et (Q22) « *Et l'eau elle va où ?* ». A partir de ces questions posées, nous pouvons distinguer alors la présence d'un bouclage simple où la question (Q19) est reprise avec modification en (Q22).

Ce macro-épisode est marqué aussi par la formulation de la question de reformulation clarification par l'élève Lucas. D en (QRC 21) « *Et du coup, l'océan va se fermer ?* ».

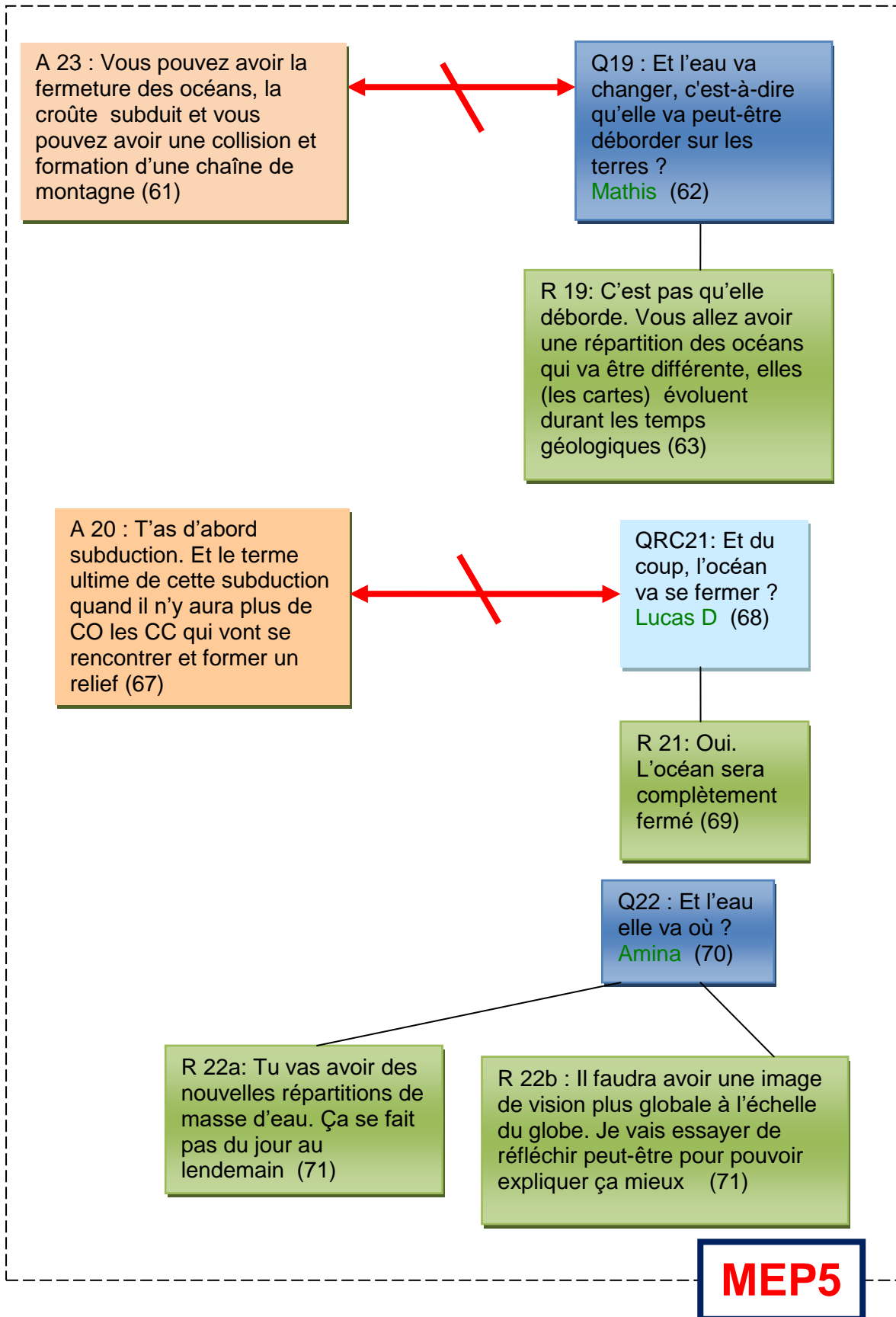
Toutes les réponses de ce macro-épisode sont proposées par l'enseignante. Elles sont respectivement (R19) « *C'est pas qu'elle déborde. Vous allez avoir une répartition des océans qui va être différente, elles (les cartes) évoluent durant les temps géologiques* », (R21) « *Oui. L'océan sera complètement fermé* », (R39a) « *Tu vas avoir des nouvelles répartitions de masse d'eau. Ça se fait pas du jour au lendemain* », et (R22b) « *Il faudra avoir une image de vision plus globale à l'échelle du globe. Je vais essayer de réfléchir peut-être pour pouvoir expliquer ça mieux* ».

Nous pouvons interpréter à ce niveau d'analyse que la préoccupation essentielle de l'enseignante est de décrire la succession d'épisodes qui vont entraîner la formation des chaînes de montagnes de collision. Elle a produit en (A18) et (A20) des énoncés qui sont organisés sous forme d'assertions considérées comme vraies et qui sont connectées entre elles par des marqueurs temporels comme « d'abord », « le terme ultime », « une fois que », « à ce moment là ». Face à ces affirmations, les élèves posent des questions, non pas sur le scénario de la formation des

chaînes de montagnes. A travers les questions (Q19) « *Et l'eau va changer, c'est-à-dire qu'elle va peut-être déborder sur les terres ?* » et (Q22) « *Et l'eau elle va où ?* », les apprenants s'interrogent plutôt sur la destinée de l'eau océanique après la fermeture de l'océan, qui représente une énigme pour eux et leur exige à entrer dans une « enquête ».

La question de reformulation clarification (QRC21) « *Et du coup, l'océan va se fermer ?* » montre davantage que ce qui pose problème chez les apprenants c'est le devenir de l'eau océanique. En fait, par cette question de reformulation clarification, l'élève cherche à valider ce qu'il a compris dans les propos de l'enseignante en (A20) sur la fermeture océanique³⁶ dont l'objectif principal est de reposer le problème du devenir de l'eau de l'océan fermé.

³⁶ : Il est important ici de préciser que même si l'enseignante évoque en (A20) la fermeture océanique, elle la présentait dans une logique d'accumulation pour présenter aux élèves la succession d'épisodes aboutissant à la formation des chaînes de montagnes de collision et non pas pour mettre en exergue le problème de devenir de l'eau océanique (ce qui est le cas des apprenants)



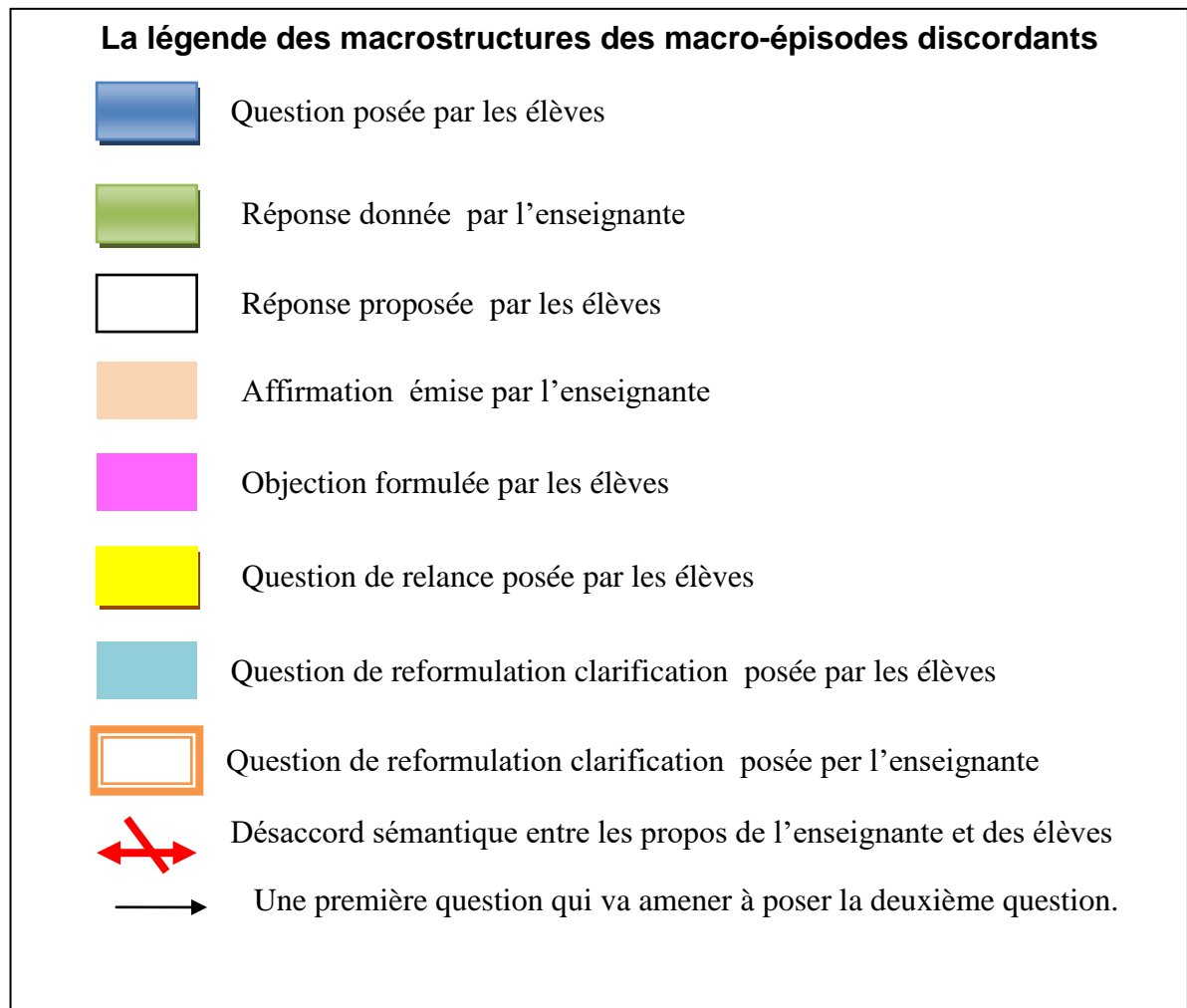


Fig.32. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP5 qui met en exergue le problème du devenir de l'eau océanique

▪ **La macrostructure du MEP6 qui s'intéresse à l'étude de la formation de relief (le passage d'un mouvement d'une descente à une remontée)**

Nous indiquons dans le **tableau.24** la partie du corpus qui correspond au MEP6. Les interactions du MEP6, ont eu lieu pendant la deuxième séance de la séquence. Durant cette période de la séance, la professeure utilisait le document de la **Fig. 14** «Fiche de travail sur l'histoire des Alpes (avec l'épisode de subduction) » afin de présenter aux élèves le scénario de la formation des Alpes.

Tableau. 24. Le macro-épisode MEP6.

61	P : [...] Vous pouvez avoir [...] la fermeture des océans une fois que la croûte soit très vieille, elle subduit et vous pouvez avoir une collision et formation d'une chaîne de montagne à ce moment là.
64	Lucas D : Le fait qu'il y a subduction, ça fait que ça remonte et que ça descend. Benn, la plaque
65	P : Oui ta plaque elle subduit, et du coup comment qu'il y a des chaînes de montagnes, c'est ça ?
66	Lucas D : Oui.
67	P : Alors, c'est parce qu'en fait, la subduction c'est pas la seule étape, la subduction se poursuivra jusqu'à qu'il n'y a plus de croûte océanique, jusqu'à ce que toute la croûte océanique est subduite. Et du coup, tu as deux masses continentales, ben, qui se rapprochent et quand elles se cognent. Là, tu va avoir la collision avec création de relief [...]

A partir des échanges enseignante- professeure du **tableau.24**, nous avons pu construire la macrostructure du MEP6 dans la **figure.33**.

Pour ce macro-épisode, nous pouvons remarquer la présence de l'affirmation (A23) qui a été émise par l'enseignante pour présenter les étapes successives de la formation d'une chaîne de montagne de collision.

La seule question détectée par l'élève Lucas.D, elle correspond à la question (Q24) « *Le fait qu'il y a subduction, ça fait que ça remonte et que ça descend, Ben ?* ». Ce macro-épisode comporte aussi une question de reformulation clarification(QRC25) émise par la professeure « *ta plaque elle subduit, et du coup comment qu'il y a des chaînes de montagnes, c'est ça ?* », en reformulant ce qu'elle a compris de la question (Q24) de l'élève Lucas. D.

En ce qui concerne les réponses du macro-épisode (MEP6) elles sont présentées par l'élève Lucas.D en (R25a) « *oui* » et par l'enseignante en (R25b) « *c'est parce que, la subduction c'est pas la seule étape, elle se poursuivra, jusqu'à ce que toute la C.O est subduite. Et du coup, tu as deux masses continentales, ben, qui se rapprochent et quand elles se cognent. Là, tu vas avoir la collision avec création de relief* ».

Nous pouvons interpréter à ce niveau d'analyse que la formulation de l'affirmation (A23) par l'enseignante montre que cette dernière se focalise sur la présentation de l'enchaînement chronologique (« une fois », « à ce moment là ») de la formation d'une chaîne de montagne de collision. En revanche, par la question (Q24), l'élève Lucas.D pose le problème de la formation de reliefs. Il essaye ici de savoir comment se fait le passage d'un mouvement de descente qui se manifeste par la subduction de la lithosphère océanique à un mouvement de remontée dû à la collision des unités lithosphériques. Ce qui intrigue l'élève, ce n'est pas de savoir l'épisode qui suit la subduction et qui va entraîner la formation de relief. L'élève cherche plutôt à comprendre le processus permettant le passage d'une subduction (un mouvement de descente) à une collision (mouvement de remontée).

La question de reformulation clarification (QRC25) « *ta plaque elle subduit, et du coup comment qu'il y a des chaînes de montagnes, c'est ça ?* » posée par l'enseignante suite à la question formulée par l'élève Lucas.D en (Q24), montre selon nous que la professeure ne peut pas prendre en charge directement la question de l'élève (Q24). Elle demande pour cela des clarifications du propos de l'apprenant qui paraît ambigu de son côté.

Par la réponse (R25b) de l'enseignante, nous pouvons remarquer que la professeure se focalise davantage sur la présentation d'étapes successives permettant la formation des chaînes de montagnes de collision. Des extraits comme « [...] *la subduction c'est pas la seule étape* » « *elle se poursuivra* », « *quand elles se cognent. Là, tu va avoir la collision* » (R25b) le montrent très bien.

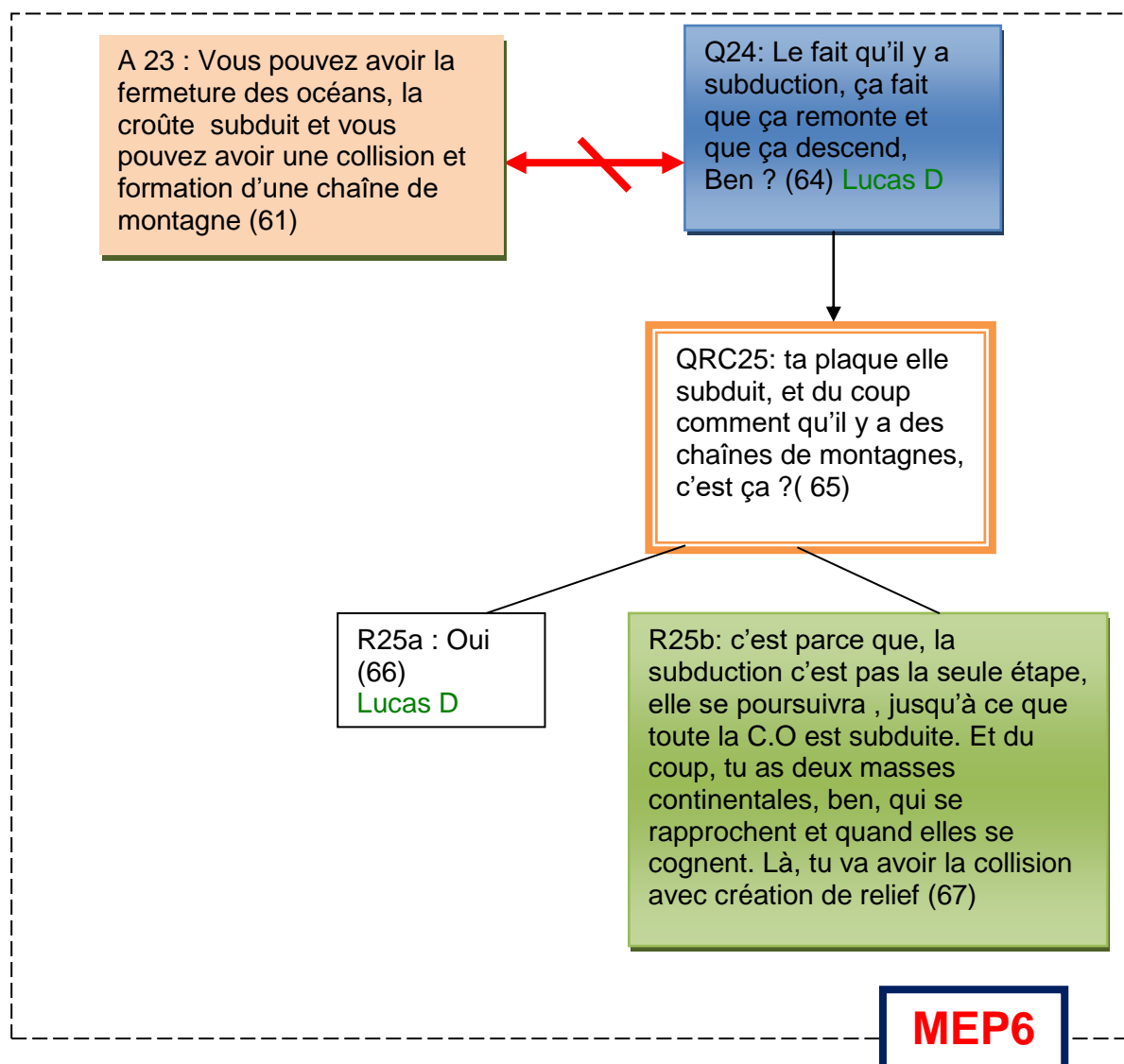


Fig.33. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP6 qui aborde la formation de relief.

- **Pour la macrostructure du MEP7 qui met en exergue le problème du vide**

Nous présentons dans le **tableau.25** la partie du corpus qui correspond au MEP6. Les échanges de MEP7 ont été enregistrés durant la deuxième séance de la séquence. Ces échanges ont eu lieu suite à la présentation par l'enseignante d'un dessin sur le tableau représentant la lithosphère océanique bornée entre l'axe de la dorsale et la fosse. Par ce schéma tracé, elle voulait montrer aux élèves que plus on s'éloigne de l'axe de la dorsale, plus la lithosphère océanique devient froide. Cela va aider les apprenants à comprendre les raisons pour lesquelles le métamorphisme des zones de subduction est qualifié de HP-BT.

Tableau. 25. Le macro-épisode MEP7.

81	P : [...] là c'est la croûte océanique et ici j'ai la fosse. [...] Plus je m'éloigne de la dorsale, plus ma croûte, elle est vieille, elle est dense, et en terme de température, elle est comment par rapport à l'axe de la dorsale [...] A l'axe de la dorsale, vous avez un magma qui arrive en surface. Là, à l'axe de la dorsale, c'est comment ? C'est très ?
82	Toue la classe : Chaud.
83	P : C'est très...chaud. Plus je m'éloigne, plus votre croûte a eu de temps de refroidir, parce qu'elle est dans l'eau froide. Elle va avoir du temps à refroidir [...] Donc, je vais avoir une croûte très froide et du coup elle s'enfonce, ben, elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer.[...] cette croûte océanique elle est anormalement froide, elle va comme même se réchauffer, mais elle va mettre un petit peu de temps pour se réchauffer.
84	Lucas D : J'ai pas compris déjà les fosses ? On a vu ça tout à l'heure.
85	P : C'est parce qu'il y a convergence, donc vous avez votre croûte océanique qui est froide, qui est dense. Du coup, elle est très dense qu'elle a tendance à s'enfoncer[...] Donc, ça commence à s'enfoncer, la croûte océanique elle se déplace dans ce sens là [...] Et du coup, la croûte océanique, elle va avoir tendance à plonger en dessous, et quand elle plonge elle forme quoi ? Elle forme un creux et ce creux on appelle ça une fosse, on appelle ça une fosse océanique.
86	Lucas : Dans ce cas, il va y avoir un vide ici ?
87	P : Vous avez vu alors normalement en Première S, c'est le modèle du tapis roulant [...] A chaque fois, vous avez un mouvement de divergence, remontée du magma et du coup, le trou au milieu va être comblé par la remontée d'un nouveau basalte [...]
88	Lucas : Et puis, ça se déplace ?
89	P : Alors, oui [...] ça va se déplacer. Et au bout d'un moment, ça va être, en bout de chaîne si tu veux, cette partie là, elle va être tellement dense, qu'il va tendance à plonger.
90	Salma : Il y a rapport avec les plaques ?
91	P : Bien sûr , oui, oui. Oui, oui, oui bien sûr c'est au niveau de la tectonique des plaques, parce que vos plaques se déplacent, c'est ce qui a décrit Wegener en Première, je pense [...]

En se basant sur les échanges enseignante- professeure du **tableau.25**, nous avons réussi à construire la macrostructure du MEP7 dans la **figure.34**.

D'après la macrostructure, nous pouvons distinguer :

Quatre questions dont trois de ces questions sont émises par les élèves. Elles sont respectivement (Q31) « *Dans ce cas, il va y avoir un vide ici ?* », (Q32) « *Et puis ça se déplace ?* », et (Q33) « *Est-ce qu'il y a un rapport avec le plaques ?* ». La seule

question posée par l'enseignante est (Q29) « *Je vais avoir la CO et ici j'ai la fosse. En terme de température là, à l'axe de la dorsale, c'est comment ?* ».

Nous pouvons identifier aussi dans ce macro-épisode la présence d'une question de relance s qui a été formulée par l'élève Lucas.D en (QR30) « *J'ai pas compris déjà les fosses ?* ».

Pour les réponses de ce macro-épisode, elles sont de l'ordre de six. Cinq de ces six réponses sont des réponses de l'enseignante. Elles correspondent à (R29b) « *Très chaud. En s'éloignant de l'axe de la dorsale, la CO va se refroidir. Elle s'enfonce dans les zones de subduction. Elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer* », (R30) « *La croûte océanique qui est froide, qui est dense, elle a tendance à s'enfoncer. C'est la subduction. Et quand la C.O plonge, elle forme un creux. On appelle ça fosse* », (R31) « *C'est le modèle du tapis roulant. Vous avez un MVT de divergence, remontée du magma, et du coup, le trou au milieu va être comblé par des nouveaux magmas qui arrivent* », (R32) « *Il aura des petites failles, et ça va se déplacer. Au bout d'un moment, la lithosphère océanique va être tellement dense, qu'elle va tendance à plonger* » et (R33) « *Bien sûr , oui, oui. Oui, oui, oui bien sûr c'est au niveau de la tectonique des plaques, parce que vos plaques se déplacent, c'est ce qui a décrit Wegener en Première* ».

Pour la réponse des élèves, elle correspond à la réponse (R29a) proposée par toute la classe « *chaud* ».

Alors, pour guider les élèves à trouver les raisons pour lesquelles le métamorphisme des zones de subduction est qualifié du métamorphisme de basse température, l'enseignante a posé la question (Q29) « *Je vais avoir la CO et ici j'ai la fosse. En terme de température là, à l'axe de la dorsale, c'est comment ?* ». En se basant sur la réponse de toute la classe « *chaud* » (R29a), la professeure explicite ainsi en (R29b) les raisons pour lesquelles les conditions de température caractérisant les zones de subduction sont qualifiées de basse température : « *Très chaud. En s'éloignant de l'axe de la dorsale, la CO va se refroidir. Elle s'enfonce dans les zones de subduction. Elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer* ». Face à ce propos présenté par la professeure, l'élève Lucas D formule en contrepartie la question de relance (QR30) pour s'interroger sur la notion des fosses, évoquée avant dans ce macro-épisode par l'enseignante et plus précisément au niveau de la (Q29). Il est tout de même important de préciser ici que

lorsque l'enseignante parlait des fosses, elle voulait indiquer les zones de subduction, qui est le lieu où la lithosphère subduite subit un métamorphisme de HP-BT.

Nous voyons de même que par la question (Q31) « *Dans ce cas, il va y avoir un vide ici ?* », l'élève pose le problème d'un vide entre l'axe de la dorsale et la zone de subduction. Ce problème est exprimé par l'élève Lucas après que l'enseignante a précisé en (R30) que « *La croûte océanique qui est froide, qui est dense, elle a tendance à s'enfoncer. C'est la subduction. Et quand la C.O plonge, elle forme un creux. On appelle ça fosse* ».

Nous pouvons remarquer aussi que suite à la réponse de l'enseignante à cette question (Q31) en (R31) « *C'est le modèle du tapis roulant. Vous avez un MVT de divergence, remontée du magma, et du coup, le trou au milieu va être comblé par des nouveaux magmas qui arrivent* », l'élève Salma essaye par sa question (Q33) « *Est-ce qu'il y a un rapport avec le plaques ?* », d'interroger la descente de la lithosphère océanique et la formation d'une nouvelle lithosphère qui comble ce plongement dans un cadre global. C'est le cadre de la tectonique des plaques englobant.

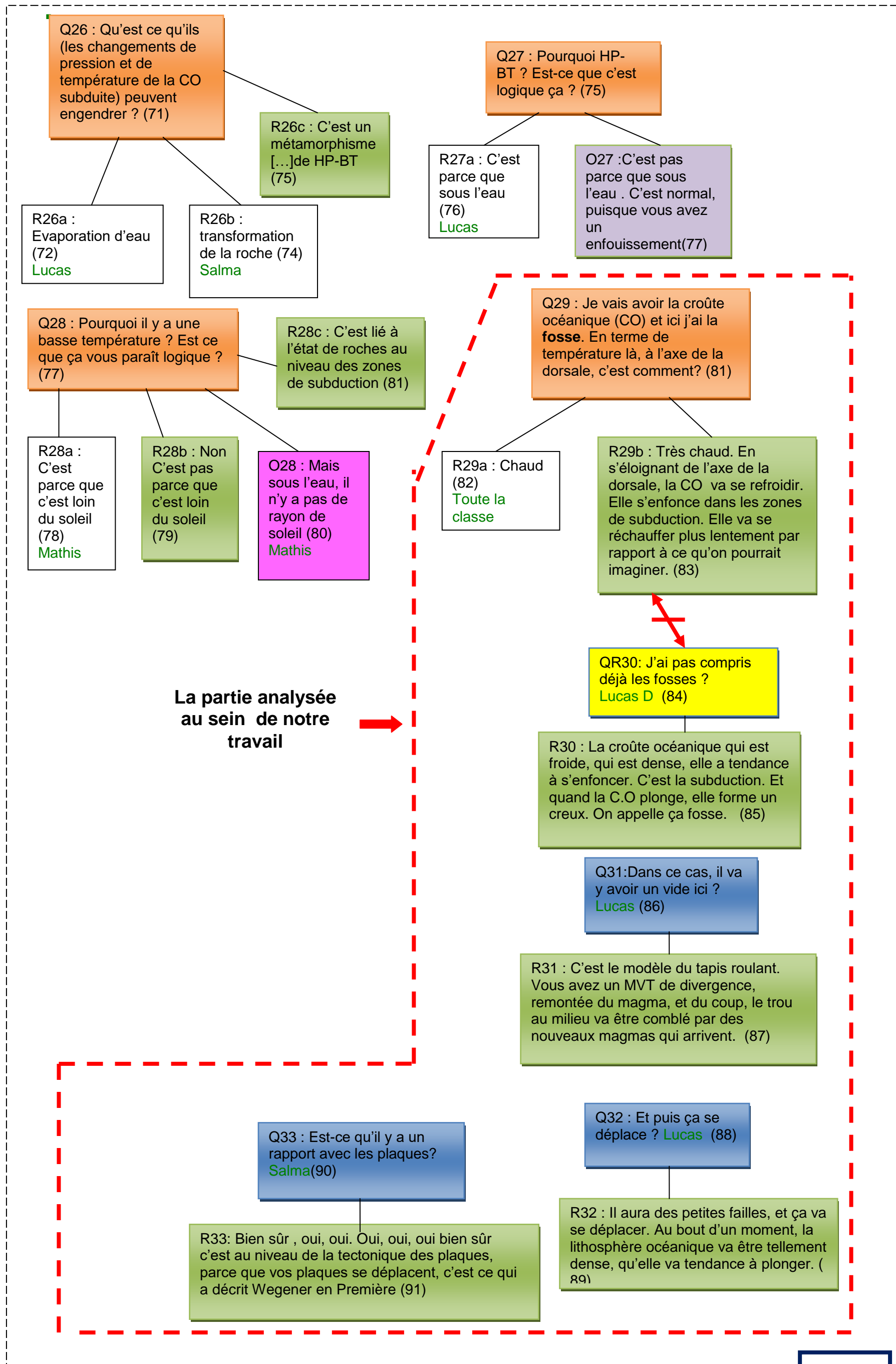


Fig.34. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP7 qui met en exergue le problème du vide

- Pour la macrostructure du MEP10 qui met en exergue le problème du devenir de la lithosphère océanique enfouie

Nous représentons dans le **tableau.26** l'extrait du corpus qui correspond au MEP10.

Les interactions du MEP10, ont eu lieu au cours de la troisième séance. Durant cette séance, l'enseignante s'est basée sur le document de la **Fig. 17** « Fiche de travail sur le scénario de formation des Alpes » afin de faire une récapitulation des différentes étapes de la formation des chaînes de montagnes de collision.

Tableau. 26. Le macro-épisode MEP10.

149	P : Au bout d'un moment, si je continue à avoir convergence, là j'ai un contact entre deux lithosphères[...] qui vont être de même densité et du coup [...]le mouvement ne va pas continuer avec l'enfoncement de la croûte, de la lithosphère continentale sous une autre lithosphère continentale. C'est pas possible.[...] Qu'est ce qui va se passer ? [...] Qu'est ce qui se passe ? Vous allez avoir des failles. [...] Ces failles qui témoignent d'une convergence. On appelle ça faille ?
150	Lucas :Faille inverse.
151	P : Faille inverse. D'accord. C'est très bien. Vous avez des failles inverses qui vont se former. Du coup, quand je raccourcis, ça c'est votre chapitre 1. Qu'est ce qui se passe ?
152	Salma :Epaississement.
153	P : Epaississement de la croûte et mon Moho et bien va, si vous voulez, plus profond. Je vais avoir un épaississement crustal. J'ai ce qu'on appelle un phénomène de collision. [...] On observe un épaississement de cette croûte et une formation de relief. Autrement dit, la chaîne de montagne. Oui ?
154	Lucas D : Nous, nous avons vu que le Moho qui est en dessous, il est plus bas ?
155	P : Alors, en fait si tu as empilement de matériel, tu vas avoir du coup plus de matériel. D'accord ?
156	Lucas D : D'accord.
157	P : Et du coup, ça va tendance à s'enfoncer dans l'asthénosphère. [...] Je ne sais pas si t'as vu le petit modèle que je t'avais montré avec les bouchons. Non ?
158	Lucas D : Non.
159	P : Tu te souviens avec des bouchons des bouts de bois et quand si je mets un bout de bois dessus, j'empile du matériel [...] et je vais avoir un enfoncement du Moho.
160	Lucas D : Et du coup, ça s'enfonçe plus au niveau du Moho ?
161	P : Bien sûr oui [...] Là, je comprime, je raccourcis, j'empile les matériaux, et du coup mon Moho sera plus profond. Oui ?
162	Salma : Et elle demeure seule ou pas la lithosphère océanique ?
163	P : Alors cette lithosphère océanique qui s'enfouit, donc je vais avoir un

métamorphisme [...] ça va fondre et ça va se retrouver dans le manteau [...] ça va fondre et ça déshydrate et va aussi créer des choses au niveau continental, on verra le magmatisme des zones de subduction dans le chapitre3 [...]

En se basant sur les répliques du **tableau.26**, nous avons pu construire la macrostructure du MEP10 (**figure.35**).

Ce macro-épisode comporte deux questions : Elles sont respectivement les questions (Q8) posée par l'enseignante « *Si je continue à avoir convergence, là j'ai contact entre deux L.C. Qu'est ce qui va se passer ?* » & la question (Q41) « *Et elle demeure seule ou pas la lithosphère océanique enfouie ?* » qui est émise par l'élève Salma.

Pour les réponses données dans ce macro-épisode, elles sont de l'ordre de six. Quatre de ces six réponses sont posées par l'enseignante. Elles correspondent à (R8a) « *Vous allez avoir des failles* », (R8c) « *Faille inverse. D'accord. C'est très bien* », (R8e) « *Faille inverse, épaissement de la croûte, empilement du matériel et formation de relief. Le Moho devient plus profond. C'est la collision* » et (R41) « *Ça (lithosphère océanique) va fondre. Ça va créer des choses au niveau continental. On verra le magmatisme des zones de subduction dans le chapitre 3* ».

Pour les réponses produites par les élèves, elles correspondent à (R8b) « *Faille inverse* », et (R8d) « *Epaississement* ».

Il est important de préciser ici que la question (Q8) et les réponses correspondantes ont été déjà étudiées avant dans le macro-épisode (MEP2) qui aborde le thème de la collision. Il s'agit d'éléments partagés en commun entre les macro-épisodes MEP2 et MEP10.

Par la question (Q8) émise par l'enseignante, cette dernière demande aux élèves de donner des propositions sur les structures / ou les mouvements géologiques qui accompagnent la rencontre de deux croûtes lithosphériques. Plus explicitement, dans cette partie du macro-épisode, la professeure pose la question (Q8) pour guider les apprenants à trouver les indices de la collision.

Parmi les réponses proposées par les élèves sur cette question, nous citons les réponses (R8b) de l'élève Lucas « *Faille inverse* » et (R8d) de l'élève Salma « *Epaississement* ».

En revanche, suite à l'explicitation présentée par l'enseignante en (R8e) « *Faille*

inverse, épaissement de la croûte, empilement du matériel et formation de relief. Le Moho devient plus profond. C'est la collision », l'élève Salma pose la question (Q41) « Et elle demeure seule ou pas la lithosphère océanique enfouie ? ». Par cette question, l'élève a réussi à formuler ce qui pose problème chez elle : Il s'agit ici du problème de devenir de la lithosphère subduite. L'intervention (R41) « Ça (lithosphère océanique) va fondre. Ça va créer des choses au niveau continental. On verra le magmatisme des zones de subduction dans le chapitre 3 » produite par la professeure pour répondre à la question de l'élève Salma, peut être interprétée par le fait que la professeure considère le problème du devenir de la croûte océanique enfouie comme un problème qui sera travaillé dans le chapitre suivant. D'où son orientation vers la fermeture rapide du dialogue avec les apprenants sur ce problème qui ne fait pas partie des problèmes à travailler dans le chapitre étudié selon le programme [(R50) :« [...] On verra le magmatisme des zones de subduction dans le chapitre 3 »].

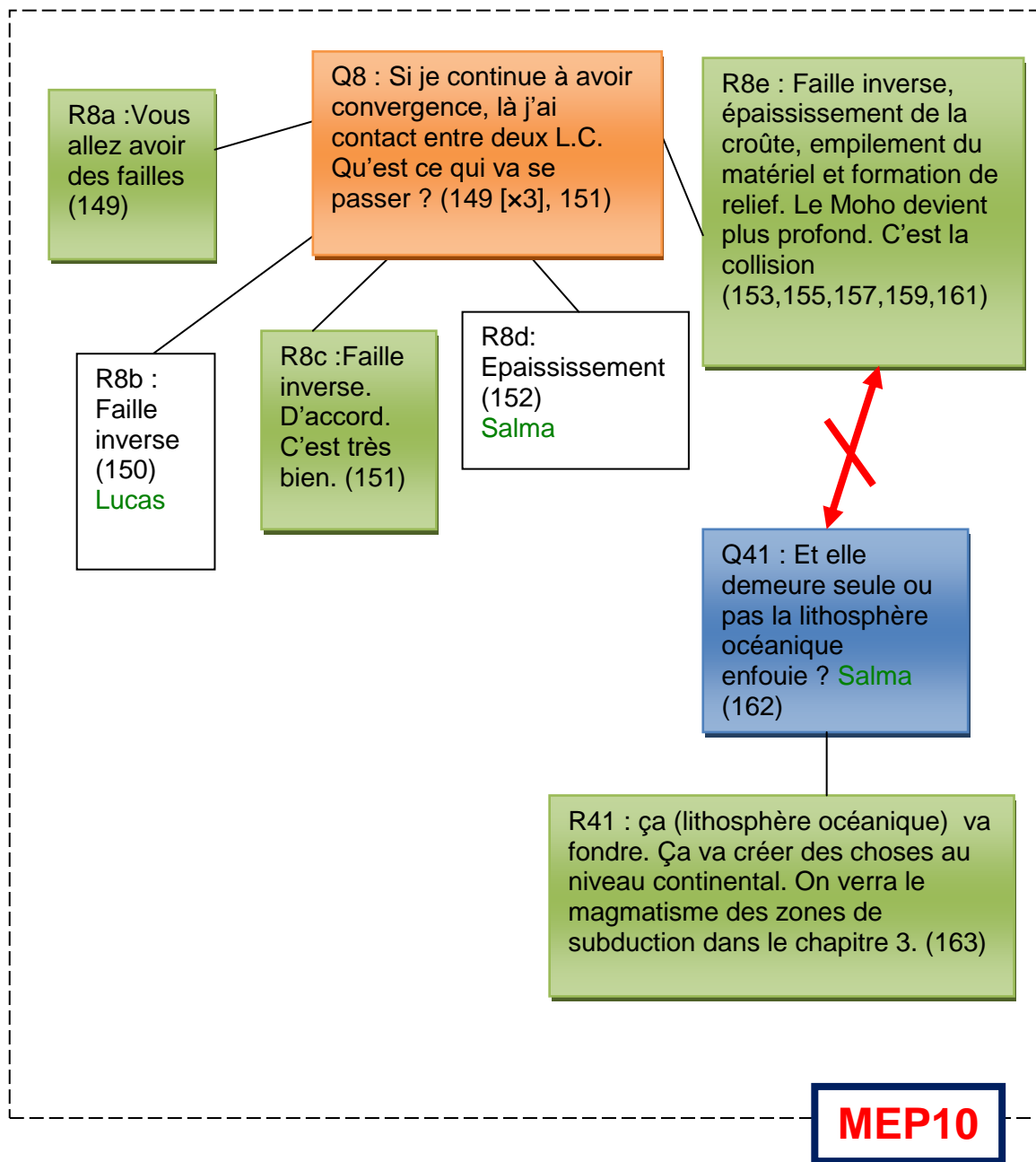


Fig.35. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP10 met en exergue le problème du devenir de la lithosphère océanique enfouie

- Pour la macrostructure du MEP12 qui met en exergue le problème de l'origine de l'eau

Nous représentons dans le **tableau.27** la partie du corpus qui correspond au macro-épisode discordant MEP12.

Comme MEP10, les interactions du MEP12, ont eu lieu durant la troisième séance. Au cours de cette séance, l'enseignante utilisait le document de la **Fig. 17** « Fiche de travail sur le scénario de formation des Alpes » afin de faire une récapitulation des différentes étapes de la formation des chaînes de montagnes de collision.

Tableau. 27. Le macro-épisode MEP12.

173	P : [...] Au départ tout est stable et puis je vais avoir un premier mouvement avec si vous voulez séparation de ma plaque, elle va subir une divergence des deux blocs [...] Du coup ma croûte continentale. Elle va s'amincir, c'est ce qu'on appelle un rifting [...] et si je continue à étirer, ben, mon fossé d'effondrement, il va donner lieu à, si vous voulez à la remontée de matériel qui est en dessous et puis on va avoir l'apparition de la croûte océanique avec le début de la formation de l'océan. Ça c'est l'histoire au départ [...] Je continue l'histoire [...]
174	Salma : Juste l'eau de l'océan, je ne comprends pas comment il arrivait là ?
175	P : [...] Comme tu as un fossé d'effondrement, tu as un relief négatif. Ben, le creux si tu veux est comblé par les eaux de pluies et donc ça va faire une grande masse d'eau au fur et à mesure du temps. Ça se fait progressivement, ça fait pas d'un jour au lendemain et comme ça un océan qui arrive, non ça prend des millions et des millions d'années. C'est très long.

En se référant aux échanges entre l'enseignante et les élèves, nous avons pu construire la macrostructure du MEP12. Elle est représentée par la **figure.36**.

Dans cette macrostructure, nous pouvons identifier d'un côté l'affirmation formulée par l'enseignante en (A43) « *Je vais avoir [...] divergence [...] Ma C.C elle va s'amincir. C'est ce qu'on appelle un rifting [...] Et puis on va avoir l'apparition de la croûte océanique avec le début de la formation de l'océan* ». Par cette affirmation, la professeure représente encore la succession chronologique d'étapes qui aboutissent à la formation des chaînes de montagnes de collision (« Au départ », « puis », etc.. [Réplique 173]. Elle parlait ici essentiellement de l'ouverture océanique. On peut détecter dans ce macro-épisode la présence d'un autre côté de la question (Q44) « *Juste l'eau de l'océan, je ne comprends pas comment il arrivait là ?* » qui a été émise par l'élève Salma. Ce qui intrigue l'élève ici ce n'est pas la compréhension

du mécanisme de l'ouverture océanique, mais plutôt la recherche d'une explication au problème de l'origine de l'eau de l'océan formé.

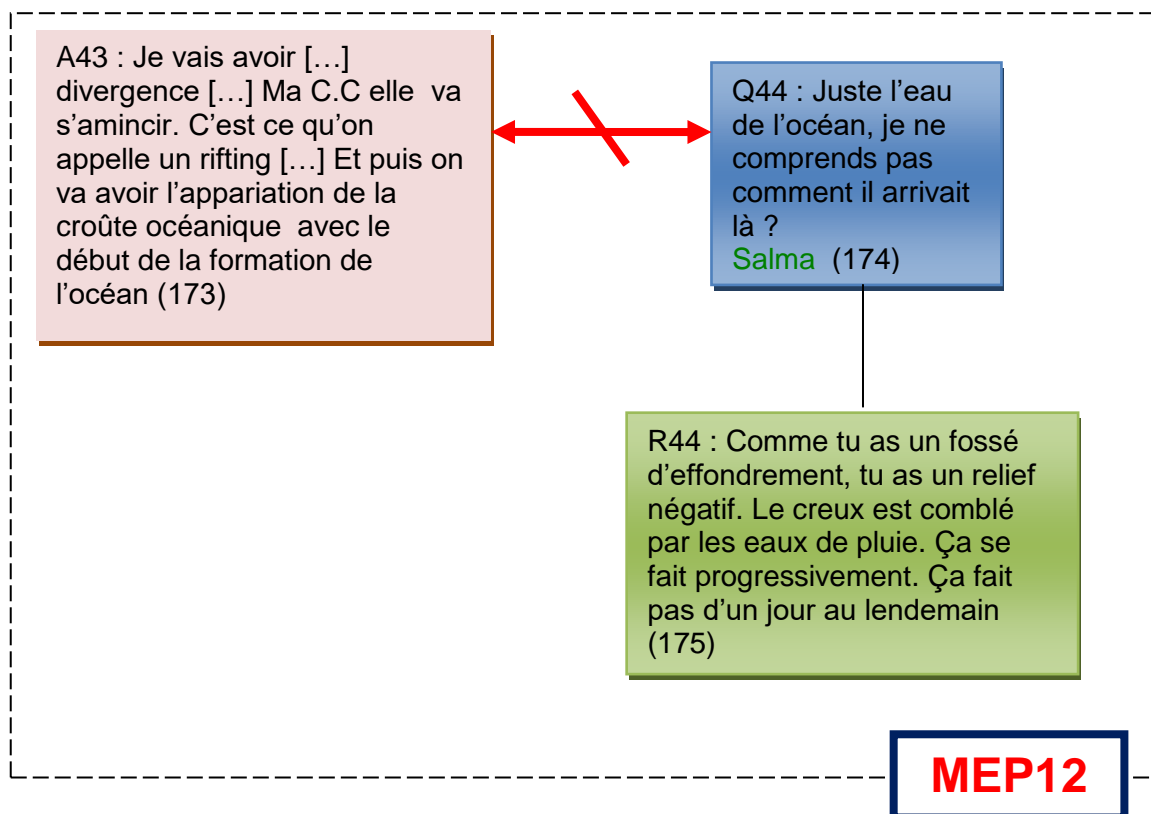


Fig.36. Macrostructure de l'épisode discordant MEP12 qui met en exergue le problème de l'origine de l'eau.

- Pour la macrostructure du MEP13 qui aborde le thème des plaques tectoniques

Nous représentons dans le **tableau.28**, la partie de la séquence qui correspond au MEP13.

Les interactions du MEP13, ont eu lieu durant la troisième séance. Au cours de cette séance, l'enseignante utilisait le document de la **Fig. 17** « Fiche de travail sur le scénario de formation des Alpes » afin de faire une récapitulation des différentes étapes de la formation des chaînes de montagnes de collision.

Tableau. 28. Le macro-épisode MEP13

173	P : [...] Au départ tout est stable et puis je vais avoir un premier mouvement avec si vous voulez séparation de mer plaque, elle va subir une divergence des deux blocs [...] Du coup ma croûte continentale. Elle va s'amincir, c'est ce qu'on appelle un rifting [...] et si je continue à étirer, ben, mon fossé
-----	---

	d'effondrement, il va donner lieu à, si vous voulez à la remontée de matériel qui est en dessous et puis on va avoir l'apparition de la croûte océanique avec le début de la formation de l'océan. Ça c'est l'histoire au départ [...] Je continue l'histoire [...]
--	---

176	Lucas : C'est quoi ces traits ?
177	P : Ben, c'est le fait que vous avez les plaques [...] qui sont des plaques lithosphériques qui sont rigides et cassantes, elles reposent sur l'asthénosphère qui est plus ductile, qui est plus élastique. Du coup, c'est pas stable, ça bouge et il y a des endroits où il y a convergence et il y a et d'autres endroits où vous avez divergence. [...] C'est divisé en une douzaine de plaques [...] Si celle là bouge par là, tu vois, tu vas avoir des divergences et des convergences dans des zones ou autres. C'est pas très stable, ça bouge.
178	Lucas D : Je pense que c'est des croûtes continentales. Fin, ce ne sont que des lithosphères continentales.
179	P : Oui.
180	Lucas D : Mais pourquoi la lithosphère océanique ?
181	P : Après sur tes plaques, tu peux avoir des plaques mixtes. Sur une plaque, tu peux avoir un bout de continent et un bout d'océan sur la même plaque. Je suis pas ? Si, je suis claire ? En fait, il faudra un document avec des plaques. Est-ce que j'ai ça ?
182	Lucas D : Juste on dit...
183	P : Oui, mais j'aurais bien comme même...Il sera bien que vous puissiez voir ce que ça donne à grande échelle. Il faut que je trouve un document avec les cartes des plaques. Parce que ça, on fait ça en quatrième. [...] Bon, je reprends mon fil de l'histoire [...]

A partir des répliques du **tableau. 28**, nous avons réussi à construire la macrostructure du MEP13 (**figure.37**).

Cette macrostructure est marquée par la présence de l'affirmation (A43) «*Je vais avoir [...] divergence [...] Ma C.C elle va s'amincir. C'est ce qu'on appelle un rifting [...] Et puis on va avoir l'apparition de la croûte océanique avec le début de la formation de l'océan* ». Comme nous l'avons vu dans le macro-épisode précédent, par cette affirmation l'enseignante essaye de présenter les étapes successives qui aboutissent à la formation des chaînes de montagnes de collision.

Nous pouvons distinguer aussi dans ce macro-épisode l'émission de deux questions par l'élève Lucas. Elles sont successivement (Q45) «*C'est quoi ces traits ?* » et (Q46) «*Ce ne sont que des L.C. Mais pourquoi la lithosphère océanique ?* ». Par ces deux questions, l'élève essaye d'intégrer le scénario de la formation d'une chaîne de montagne dans un cadre global. Nous pensons que la fiche de travail proposée par l'enseignante sur le scénario de la formation des Alpes (voir **fig.17**), et qui comporte les cartes des continents avec les traits montrant leur déplacement, a

aidé l'élève à poser les questions (Q45) et (Q46).

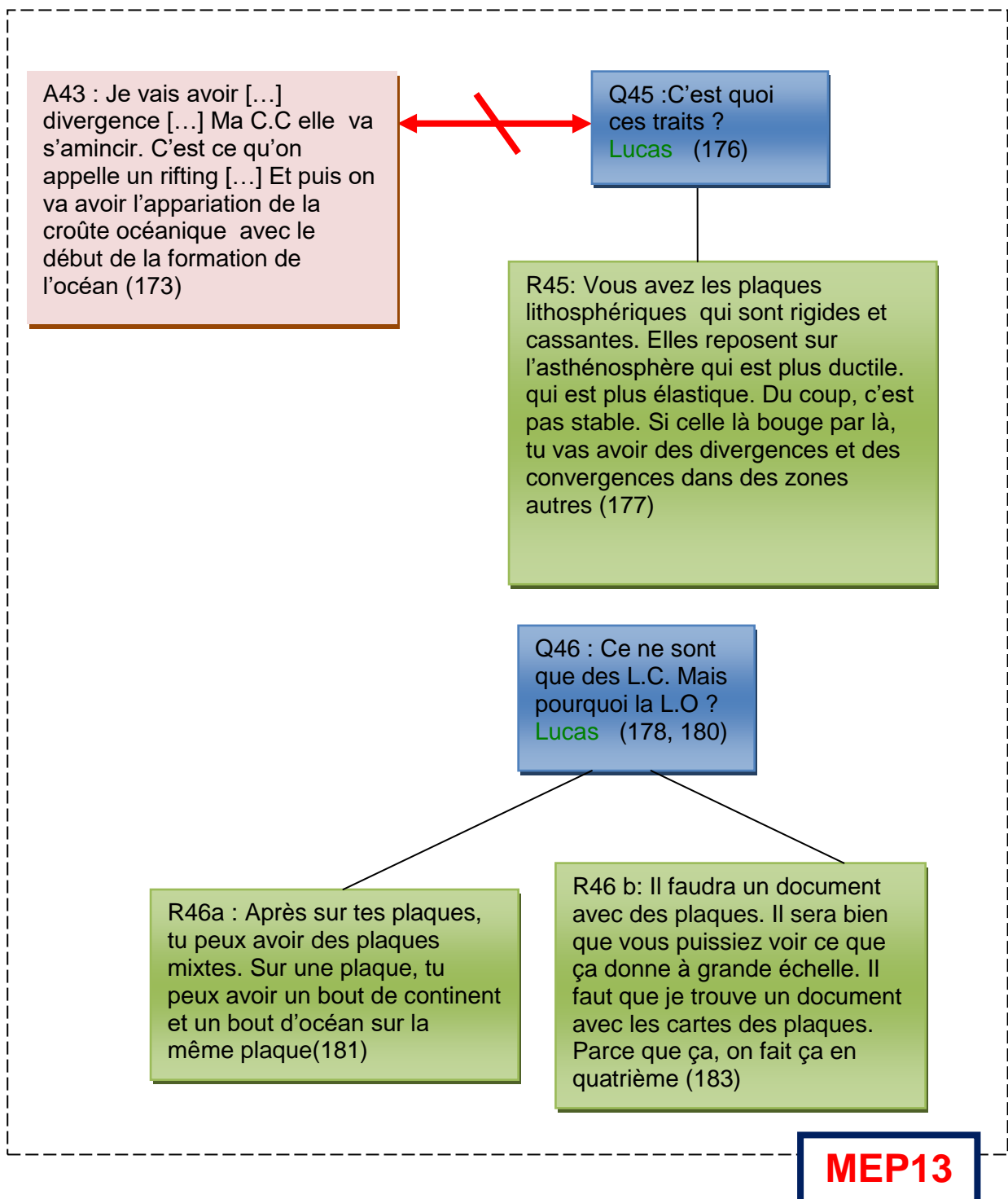


Fig.37. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP13 qui aborde le thème des plaques tectoniques.

- Pour la macrostructure du MEP14 qui aborde « les failles dans le contexte de convergence et de divergence »

Nous représentons dans le **tableau.29** la partie du corpus qui correspond au MEP14. Nous précisons ici que les interactions du MEP14, ont eu lieu au à la fin de la séance 3. Pour cette séance, la professeure s’est outillée du document de la **Fig. 17** « Fiche de travail sur le scénario de formation des Alpes» dont l’objectif est de faire une récapitulation des différentes étapes de la formation des chaînes de montagnes de collision.

Tableau. 29. Le macro-épisode MEP14.

183	P : je reprends mon fil de l’histoire [...] Là, vous avez ouverture de l’océan alpin. [...] On sait qu’il va y avoir subduction, qu’il va disparaître [...] Je vais avoir subduction dans ce schéma-ci, jusqu’à collision avec formation de mon relief et formation de la chaîne de montagne. Mes deux plaques finissent par se cogner entre elles pour former le relief [...]
184	Amina : Madame, là est ce que où je peux faire convergence ou divergence, j’ai des failles ?
185	P : Ain, chaque fois que vous avez mouvement de plaques, effectivement ça risque d’engendrer des failles [...] Alors après[...] en zone de subduction, vous allez avoir énormément de foyers sismiques tout le long de votre plongée de la croûte océanique. Et du coup, vous allez avoir une forte activité. C’est pour cela, on appellera une marge active. C’est parce que au niveau de cette marge il y a beaucoup d’activité sismique et volcanique

A partir des échanges du **tableau.29**, nous avons pu construire la macrostructure du MEP14. Elle correspond à la **figure.38**.

Nous pouvons identifier dans cette macrostructure la présence de l’affirmation (A47) qui a été formulée par l’enseignante « *Vous avez ouverture de l’océan alpin. On sait qu’il va avoir subduction, qu’il va disparaître. Voyez elle (la plaque) a convergé, je vais avoir subduction jusqu’à collision avec formation de mon relief* ».

Ce macro-épisode comporte aussi une seule question. Il s’agit ici de la question (Q42) qui a été posée par l’élève Amina « *Est-ce que où je peux faire convergence ou divergence, j’ai des failles ?* ».

L’unique réponse de ce macro-épisode est produite par l’enseignante. Elle correspond à la réponse (R42) « *Chaque fois que vous avez un mvt de plaques, effectivement, ça risque d’engendrer des failles* ».

Nous remarquons à ce niveau d’analyse que par l’affirmation (A47), l’enseignante

reprend pour une nouvelle fois la présentation d'épisodes successifs qui entraînent la formation des chaînes de montagnes de collision. Cette fois-ci elle a remplacé dans son discours la croûte océanique et la croûte continentale (voir l'affirmation A43 du macro-épisode MEP12 et MEP13) par « la plaque ». On explique cela par le fait que l'enseignante a voulu expliquer la formation d'une chaîne de montagne de collision dans un cadre global surtout que ce sujet a été évoqué précédemment dans le macro-épisode MEP13 en (Q45) « *C'est quoi ces traits ?* » et (Q46b) « *Il faudra un document avec des plaques. Il sera bien que vous puissiez voir ce que ça donne à grande échelle* ».

Face à ces assertions présentées dans l'affirmation (A47), l'élève Amina a réagi en posant en contrepartie la question (Q42) « *Est-ce que où je peux faire convergence ou divergence, j'ai des failles ?* ». Par cette question, il nous paraît que l'apprenante cherche plutôt à comprendre la signification de « failles » et comment elles puissent se former dans le cadre de la divergence ou de convergence.

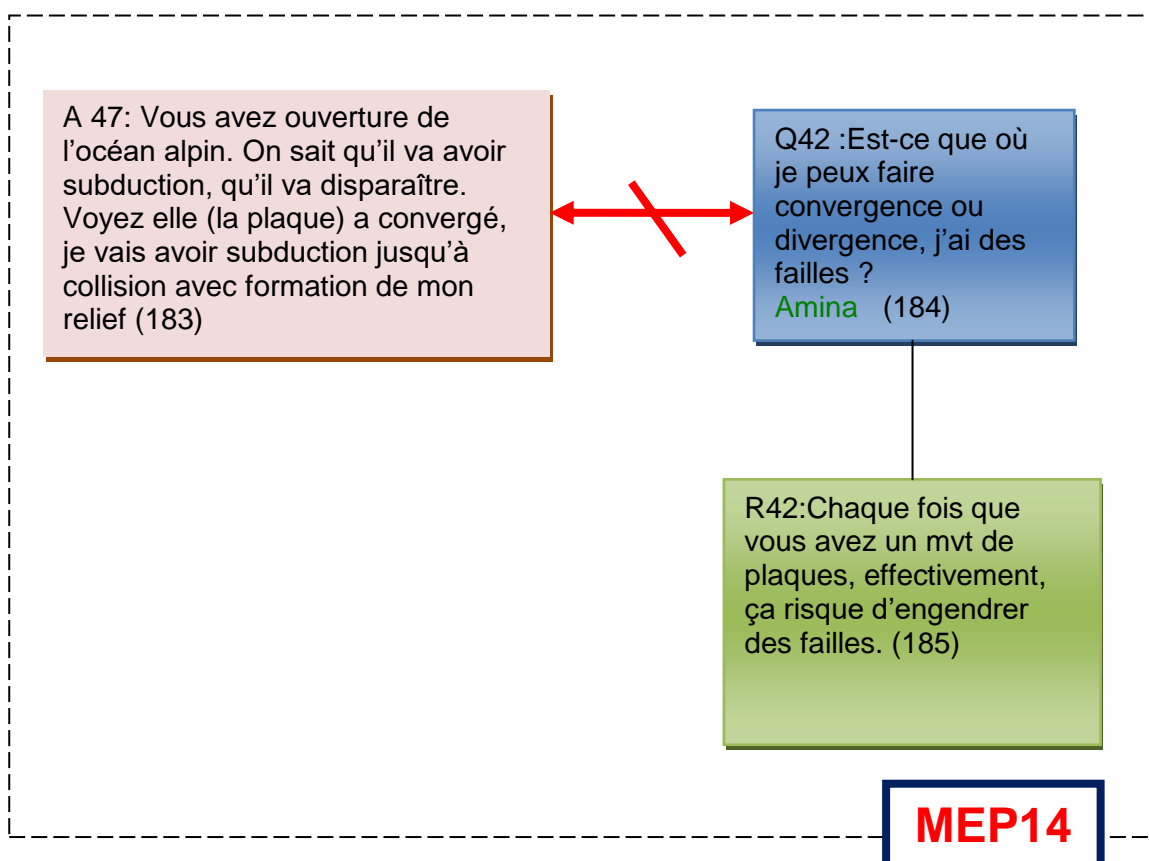


Fig.38. Macrostructure du macro-épisode discordant MEP14 qui aborde les failles dans le contexte de convergence et de divergence.

Annexe 5. La transcription de la première séance de la séquence étudiée

La première séance de notre séquence a eu lieu le 07 janvier 2019 (de 11h à 12h) en classe de Terminale S (32 élèves, Lycée kernanec marcq en baroeul). Cette séance a été consacrée à l'étude de la convergence lithosphérique et formation des chaînes de montagnes : Les traces d'un ancien domaine océanique.

1	<p>P : Bien, Chuttt. Allez, s'il vous plaît, Mathis. Bien. Donc dans ce chapitre, on va essayer de comprendre comment les chaînes de montagnes peuvent se former. D'accord ? En sachant que ces chaînes de montagnes, elles sont bien en domaine continentale, elles sont constituées des roches de la croûte continentale, de Granite, de Gneiss. Ce domaine continental Gabin, vous l'avez étudié au cours du chapitre 1, d'accord ? Vous avez vu les caractéristiques de ce domaine continental et on va en gros voir comment ces chaînes de montagnes peuvent se former. Alors avant toute chose, je vous montre une petite carte, en vous vous rappelez les grandes chaînes de montagnes qu'on peut trouver actuellement. Donc, vous avez par exemple la cordillère des Andes qui se trouve ici. Si je regarde à quelle zone, au niveau tectonique ça peut correspondre. On voyait qu'on est dans une zone ici. Vous avez la plaque Nazca et la plaque sud Américaine qui ont tendance à se rencontrer, à converger. ça veut dire qu'elles se rapprochent. Tout ça, c'est la même chose : se rapprocher, converger, c'est la même chose. Si je regarde ici ma chaîne de montagne, elle est rocheuse, vous voyez cette plaque ici, est la plaque Nord-Américaine qui a tendance à se rapprocher. On est toujours dans le domaine de convergence. Si je prends un exemple comme les Alpes. Vous avez aussi un contexte de convergence. Si je prends l'Himalaya, si vous avez les plaque eurasiatique et indo-australienne qui ont tendance à se rapprocher. Vous avez toujours un contexte de convergence. Donc on va voir comment ces plaques convergent et comment elles peuvent donner lieu aux chaînes de montagnes actuelles d'où le titre. Donc le titre, vous avez la convergence lithosphérique avec les plaques lithosphériques qui vont se rapprocher et la formation des chaînes de montagnes. Chutt. Ça va ? je vous laisse alors écrire chapitre deux. Vous avez bien l'écran, ça va ? Oui. Donc, la convergence lithosphérique et la formation des chaînes de montagnes. Oui ? Vas-y. Ça va ? Alors, convergence lithosphérique, normalement, vous avez déjà des connaissances un peu en géologie, ça peut correspondre à deux contextes. Est-ce que vous savez quels sont les contextes de convergence de deux plaques. Si vous avez deux plaques qui se rapprochent, convergence, c'est bien rapprochement. Alors, soit vos deux plaques de la même densité, elles se rapprochent, elles se cognent, on appelle ça ? Vous savez ou pas ? Quand, vous avez deux plaques de la même densité,</p>
---	--

	deux plaques continentales qui se rapprochent, on appelle ça ? La collision, la collision, quand ça se cogne. D'accord ? Soit, vous voyez deux plaques qui n'ont pas la même densité, vous avez une qui va faire quoi ? qui va passer en dessous. Et ça a un nom. Ça s'appelle ?
2	Louis : La subduction.
3	P : La subduction. Alors cette subduction, on va parler beaucoup, vous avez un chapitre trois qui va être complètement, si vous voulez, sur ce thème là, sur la subduction, et tout ce qui est associé. C'est bon Mathis, on est prêt ?
4	Mathis : Toujours.
5	P : Alors, vous avez deux contextes : soit, vous avez la collision (contexte de collision) ou alors, un contexte de subduction. Alors, on verra que tout ça est lié et on va détailler toutes ces étapes là. C'est bon ? Vous êtes prêts ou pas ? Prêts ? Donc, vous pouvez écrire en introduction les chaînes de montagnes, se forment quand il y a convergence de deux plaques lithosphériques ça va ? Le mouvement de convergence peut conduire, et là, vous allez faire deux tirets, donc le mouvement de convergence peut conduire à la rencontre de deux plaques continentales ? Entre parenthèses, vous écrivez collision. Quand vous avez collision, vous avez ça dans le chapitre 1, vous avez du coup un raccourcissement horizontal et qu'est ce qui se passe pour la croûte ? Elle va subir un ?
6	Lucas : un épaississement.
7	P : Un épaississement, avec tous les indices que vous avez vu : les failles inverses, tous ça, vous l'avez vu dans le chapitre 1 : Vous avez un raccourcissement de la croûte et du coup, elle va s'épaissir, du coup, j'ai une altitude plus importante, et mon Moho va tendance à être plus profond. Tout ça, vous l'avez vu. D'accord ? Alors, on en parlera, mais c'est pas le cœur du chapitre. Donc, vous pouvez noter : qui conduit à un raccourcissement, cette rencontre de deux plaques continentales qui conduit à un raccourcissement, à un empilement de terrain, donc à la formation d'une chaîne de montagnes (voir chapitre 1). Vous avez vu tout ça. Ça va ? donc ça c'est le cas de la collision. Après, quand j'ai convergence, je peux avoir subduction, donc c'est deuxièmement, vous pouvez mettre...C'est toujours, le même début de la phrase : Le mouvement de convergence lithosphérique peut conduire, donc deuxième tiret : à l'enfoncement dans le manteau d'une plaque sous une autre et ça s'appelle la subduction. Alors, la subduction, vous verrez, qu'elle peut se faire entre deux plaques océaniques ou entre une plaque océanique et une plaque continentale. Nous, nous étudierons essentiellement la subduction entre une plaque océanique et une plaque continentale, dans ce chapitre. Ça va ? Ok ? Alors ce qu'on va faire c'est qu'on va étudier une chaîne de montagne que vous connaissez bien, une chaîne de montagne que vous

	<p>pouvez la trouver en France, on va alors s'appuyer énormément sur les Alpes. Ce qui est valable pour l'Himalaya ou autre type de montagnes dans l'ensemble.</p> <p>Le scénario va être globalement identique, globalement.</p> <p>Alors ces alpes, on va les étudier évidemment. L'idéal est sortir sur le Terrain et aller une semaine dans les Alpes pour aller voir un petit peu qu'est ce qu'on peut trouver comme indices. Là, on va travailler au niveau vidéo ou autre.</p> <p>Alors, dans ces Alpes, on va rechercher des indices et on va essayer de retracer cette histoire des Alpes et on va essayer de voir s'il y a des indices de convergence, autrement dit, on va chercher des indices de collision, mais on peut chercher des indices de subduction. Pourquoi pas ?</p> <p>On va voir si on a des indices qui témoignent d'une subduction et qui témoignent d'une collision. Oui ou non, et on va essayer de mettre tout ça dans l'ordre après. Ça va ? On s'en va alors dans les actes. On est parti. Alors, vous pouvez noter la question, le problème : Peut-on prouver dans les chaînes de montagnes des indices de subduction et des indices de collision. Donc, dans un premier lieu, on va reconstituer l'histoire des chaînes de montagnes et l'exemple qui est pris ici dans les documents, les roches étudiées etc...ça va être l'exemple des Alpes. Or ces Alpes ne sont pas présentes qu'en France ou en Suisse etc, vous allez les voir dans les cartes, c'est une chaîne de montagne assez récente. Vous êtes peut-être aller au Mont Blanc, ou vous promènerez en dans cette région là.</p> <p>Alors, reconstituer l'histoire des chaînes de montagnes grâce à des indices. Ça va ? Alors, je vous présente à l'écran une image. C'est une photographie ici d'un massif qui est présent dans les Alpes qui s'appelle massif de Chenaillet. Vous allez retrouver des photos à la page 148-149 de votre livre. Dans ce massif, je vais avoir trois grandes parties. D'accord ? avec trois grands types de roches. Là, l'écran n'est pas de bonne qualité, vous ne voyez pas grande chose de votre place.</p> <p>Je vous ai mis un document où, on a souligné les différentes unités et à côté, on vous a mis à quoi ça correspond. Alors, dans ce massif de Chenaillet, si je me promène, je vais avoir un premier type de roches qui se trouve tout en haut, au niveau de la partie la plus haute, constituée de basalte en coussins. Ce sont des choses que vous connaissez. Vous avez étudié ça en Première.</p> <p>Où je peux trouver ce type de roches ? Est-ce que ça vous paraît logique de trouver ça tout en haut d'une chaîne de montagne ?</p>
8	Lucas : C'est une roche volcanique
9	P : C'est une roche volcanique, c'est vrai
10	Mathis : C'est dans les océans.
11	P : C'est formée au niveau des dorsales, donc au niveau océanique et vous souvenez pourquoi ces basaltes ont la forme de coussins ?
12	Lucas : remontée de magma.
13	P : C'est une remontée de magma qui est en contact avec quoi ?
14	Lucas : L'eau froide.

15	P : Avec l'eau froide et du coup ce basalte, si vous voulez, est formé par sorte de petites boules. On appelle ça Pillow lavas et ces basaltes en coussins qu'on les trouve au fond de l'océan, et si vous promenez dans les Alpes au niveau du massif de Chenaillet tout en haut, vous trouvez des basaltes en coussins et ces basaltes en coussins se sont formés tout au fond de l'océan. Autrement dit, cette,...Fin, la présence de ce type de roches, qu'est ce qui vous permet de dire finalement ? Oui...
16	Lucas : Il y avait de l'eau ici.
17	P : Oui peut être à cet endroit, il y avait un océan. Alors, effectivement, il y avait un océan qui existait, on appelait ça l'océan Alpin. Aujourd'hui quand vous allez dans les Alpes, c'est pas pour vous baigner dans la mer, il n' y a plus cet océan Alpin. Cet océan alpin, il a disparu. D'accord, on verra en gros pourquoi il y a un océan à cet endroit et du coup, s'il y a un océan, il a dû se former cet océan, donc il y aura un contexte de formation océanique, on verra que vous avez eu un contexte de divergence qui a eu lieu tout au départ. Cet océan s'est formé, il n'est plus là, il a dû disparaître et aujourd'hui on a une chaîne de montagne. Ça va ? Si je regarde juste au dessus des basaltes en coussins, j'ai une deuxième couche de roches et là, on vous parle de Gabbros et même de métagabbros. Alors les métagabbros se sont des gabbros qui ont subi quoi ? A votre avis, Méta,ça vous fait penser à quoi ?
18	Emma : Métamorphisme.
19	P : Métamorphisme, donc, ce sont des Gabbros qui ont été métamorphisés et qui ont subi une modification de pression et de température. Vous allez les étudier au TP Jeudi et ces gabbros, eux aussi sont formés dans un contexte océanique en formation d'océan. Ces gabbros, c'est la même composition que les basaltes. Simplement, ils ont une structure différente puisqu'ils sont cristallisés en profondeur, ils ont une texture qui est différente de la texture des basaltes. Les basaltes, ils ont une texture microlitique. Vous souvenez avec le microlite, le verre...OK ? et en dessous, vous avez ici la péridotite serpentinisée . Alors, péridotite, ce sont des roches, qu'on trouve où ? Est-ce que vous souvenez de ça ? Est-ce que des roches de la croûte ?
	Un moment de silence (pas de répliques)
20	P : Non. Ce sont des roches du manteau serpentinisées. Vous verrez, on l'appelle comme ça parce qu'elle ressemble à une peau de serpent, parce qu'elle subit des modifications. Alors,, on verra ça prochainement. On va trouver alors une série de roches qui témoigne la présence d'un océan. Cette série de roches, si je vais de bas en haut, j'ai de péridotites qui correspondent au manteau supérieur, des gabbros, des basaltes et au dessus, je vais avoir des sédiments. Ces basaltes, j'ai deux sous-unités : j'ai les basaltes d'abord qui sont en filons et ceux qui sont en surface, ce sont les basaltes en coussin, ce sont les basaltes qui sont en contact direct avec l'eau froide. Ça va ? Cette série de roches, ça a un nom. Lorsqu'on retrouve ça en pleine chaîne de montagne et

	<p>on trouve ces roches dans cet ordre là, on appelle ça une ophiolite, o p h i o l i t e. C'est ce que vous avez dans le premier document de votre poly. Vous avez le document là en couleur dans le livre. Vous allez avoir ces caractéristiques. Ces ophiolites, caractéristiques d'un ancien domaine océanique et on va le retrouver dans plusieurs chaînes de montagnes. On pouvait retrouver ça dans le livre. Ça va ? Donc, ça c'est la trace d'un océan passé ancien. Vous allez pouvoir mettre grand un.</p> <p>Grand un : Des traces d'un domaine océanique. Et vous pouvez mettre : On retrouve dans certaines chaînes de montagnes ou dans certains niveaux là, dans le Chenaillet, on va trouver ce type de roches, des roches regroupées sous le nom d'ophiolites, et je vais détailler ça, il faut connaître ça, les ophiolites c'est vraiment quelque chose à connaître (Voir document 1 de poly). Vous l'avez en couleur page 160. Ça va ? A connaître, vous allez écrire, de la base vers le sommet, on trouve : des péridotites serpentinisées, c'est-à-dire qui ont un aspect de peau de serpent et ça est dû à une hydratation de ces roches qui ont été un peu modifiées, donc on trouve des péridotites serpentinisées , c'est-à-dire qui ont un aspect de peau de serpent et ça est dû en fait, à une hydratation de ces roches qui ont été un peu modifiées, donc on trouve des péridotites serpentinisées. Je sais alors, que c'est indiqué dans le document, mais il faut que vous sachiez interpréter, en fait, ce type de roches. Vous mettez entre parenthèses donc, roches du manteau</p>
21	Mathis : Hydratées
22	P : Roches du manteau transformées
23	Mathis : Madame, dans quel ordre, du haut vers le bas ou ?
24	P : De la base vers le sommet, donc les péridotites. C'est ce que je trouve à la base des ophiolites. Donc, en bas ici et après, je remonterai. Donc, ce sont des roches du manteau transformées par hydratation importante.
25	Mathis : Les roches du manteau ?
26	P : Donc les roches du manteau transformées par hydratation importante. Les roches du manteau transformées par hydratation importante. (Répétition). Donc, juste au dessus, je trouve des Gabbros et des basaltes. Ces deux types de roches correspondent
27	Lucas D : C'est quoi ?
28	P : Donc, ces deux types de roches correspondent
29	Lucas D : Non, quels sont ?
30	P : Donc le Gabbros et puis le basalte. D'abord, vous avez des basaltes en filons et après, vous avez des basaltes en pillow lavas, en coussins. Ces deux roches correspondent à de la croûte océanique. Ça va ? et au dessus de ces basaltes, je vais trouver des sédiments, des roches sédimentaires. Alors, ces roches sédimentaires, je vais les étudier un peu plus précisément, je vais vous montrer à quoi ça ressemble et finalement ça va nous donner un indice de cet océan ancien. Alors, ces roches sédimentaires, si on les étudie de plus près, en fait, on va trouver des roches qu'on appelle radiolarites. Alors, ça, c'est ce qu'on peut voir à l'œil nu, c'est une roche sédimentaire, caractéristique des

hauts fonds marins, qui va se trouver normalement sous la mer, sous l'océan. Pourquoi, on appelle ça des radiolarites ? C'est parce que ces roches, elles sont constituées d'exosquelettes, de petits organismes qu'on appelle des radiolaires. Alors les radiolaires, ce sont des tous petits organismes mais qu'on peut les trouver dans les océans. On peut les observer au microscope et voir les exosquelettes. Ça, cet aspect-ci. Ça ce sont des radiolaires et cette partie dure elle peut se déposer, s'accumuler, et être à l'origine d'une roche qu'on appelle « radiolarites ». Donc, alors si on retrouve des radiolarites, des roches issus de ces organismes marins, alors que c'est forcément ces sédiments ou ces roches sédimentaires, ce son formées en milieu océanique, donc c'est un témoin de plus. Vous avez bien le Gabbro, le basalte, la croûte océanique, et en plus, on a des sédiments marins, et en plus, on a des sédiments marins de grands fonds qui se trouvent à la surface de ces ophiolites. Donc, ça confirme si vous voulez. Ça va ? Donc, vous pouvez noter : vous avez noté le Gabbro, le basalte. Voilà. Vous pouvez noter dernier tiret : Les roches sédimentaires du grand fond marin, comme les radiolarites, comme ça se prononce, comme les radiolarites.

Donc, vous pouvez noter : Ces ophiolites, correspondent au plancher d'un océan disparu. Donc, ces ophiolites, correspondent au plancher d'un océan disparu. Et vous pouvez mettre que cette ancienne lithosphère océanique et du coup cette ancienne lithosphère océanique a été portée en altitude. Elle s'est retrouvée en surface tout en haut d'une chaîne de montagne. On va voir comment. Donc, elle a été portée en altitude. Alors, juste pour voir bien les basaltes en pillow lavas. Quand on se promène dans le massif de Chenaillet. On va vraiment à la montagne, vous voyez une sorte de pierres qui forment pleines, pleines de petites boules. On voit bien sur l'image. Ça, c'est les caractéristiques des ophiolites. Si vous allez promener de là, vous pouvez les regarder. Ça va pour l'instant ? C'est bon ?

Alors, s'il y a un ancien océan à la place des Alpes, cet océan a dû se former forcément, et du coup, vous avez dû certainement avoir des anciennes marges passives.

Est-ce que vous savez qu'est ce qu'une marge passive ? Ce n'est pas trop ?

En fait, c'est la limite entre le continent et l'océan ; Vous avez une zone de transition qui est la marge passive à l'opposition de la marge active.

Si je vous montre à quoi ça correspond. Voilà, vous avez ici le domaine continental, ici le domaine océanique avec la croûte océanique et vous avez ici, si vous voulez, une zone. Vous avez des failles, d'accord, et cette zone s'appelle la marge passive. C'est au niveau des côtes, quand vous allez bouger, je sais pas moi, dans l'océan atlantique, le début des plages, ça sera la marge passive .ça va ? Alors s'il y a un ancien océan forcément, il y a des bordures d'océan, il y a des anciennes marges passives peut-être , qu'on peut être retrouver dans les Alpes. Vous avez vu ça normalement ça en Première cette marge passive. Elle se forme dans quel contexte ? Quand j'ai formation d'un océan, ça se forme dans quel contexte ? Convergence, divergence ? Ça se rapproche ? ça, fin, les plaques se rapprochent ou s'éloignent ?

31	Constance : Elles s'éloignent.
32	<p>P : Quand je forme un océan, elles s'éloignent ; J'ai un contexte de divergence. Du coup, je vais avoir ma croûte qui va être fracturée, et ces failles, elles sont, qui témoignent de divergence. On appelle ça des failles ? Normales. Vous vous souvenez des petits schémas avec les failles inverses, elles témoignent d'un raccourcissement, d'une convergence, et les failles normales d'une divergence. Je vais vous rappeler tout ça en images.</p> <p>Je vais plus expliquer. Alors, je vous remontre la formation d'un océan. Opp, alors, donc voilà. Donc, là, vous avez le schéma du globe, vous montre en surface comment ça se passe lorsqu'il y a divergence. Ça va ? Vous êtes prêts ? Allez, on est parti. Donc, on fait un zoom pour voir un petit peu ce qui se passe. A ce niveau là, l'océan n'est pas formé mais il va, si vous voulez commencer à se former.</p> <p>Vous allez du coup avoir le rift, c'est-à-dire le fossé d'effondrement qui va être comblé par de l'eau. Ça va ? Cette vidéo, je vous donnerai les...Fin, le titre, vous pouvez le regarder sur youtube , après à la maison. Donc, je continue à amincir ma croûte, et là vous connaissez, vous avez fait en Première S, vous allez avoir du coup émission de magma. Ce magma qui arrive au contact de l'eau va se solidifier et vous allez retrouver des Gabbros et des Basaltes. C'est le plancher océanique qui se forme. Donc, mon océan alpin s'est formé à ce moment là et là, dans les bordures, la liaison entre mon océan et mon continent. Ce que j'appelle ?</p>
33	Luca D : La marge passive.
34	<p>P : Est-ce que ça vous met dans la tête, qu'est ce que la marge passive ? oui ? Ben, donc, je vais maintenant voir dans les Alpes, rechercher les indices de cette marge passive, je m'en vais dans les Alpes, et bien tombé(e). Ce que je vais trouver : ce type de structure. Ce document, vous avez un document qui est équivalent, qui est présent dans votre livre et qui va se retrouver à la page 151. On vous montre une coupe géologique dans la région de Bourg d'Oisans, avec des séries sédimentaires et cette marge passive qui va être présente dans les Alpes. Là, vous avez des failles avec des failles normales, et vous avez les blocs basculés, des blocs basculés qui témoignent de cette marge passive. C'est ce que je vais vous montrer, la présence de marge passive dans mon massif des Alpes. Je vais retrouver en fait, cette partie là qui témoigne de l'ouverture de l'océan passé. Vous comprenez ? On va essayer donc de retrouver les failles normales, ces choses là dans le massif des Alpes après. Ça va ?</p> <p>Par suite, vous avez utilisé des maquettes, Sismolog. Vous avez travaillé tout ça en 1 ère S. Donc, je continue, voilà : La distension se poursuit, la croûte océanique, la croûte océanique se forme, d'accord. Votre croûte océanique s'éloigne de l'axe de la dorsale, d'accord, elle vieillit. Plus je m'éloigne de l'axe, plus la croûte océanique est vieille. Plus je suis proche de l'axe, plus la croûte est jeune. Ça va ?</p> <p>Voilà, là, vous avez la formation de l'océan avec la marge passive.</p>

	<p>Quand j'ai ce type de structure, quand je trouve ce type de structure, je peux dire, et ça, c'est bien correspond à la marge d'un océan, aux bordures de l'océan. Donc, s'il y a une bordure d'océan, forcément il y a un ancien océan. Je sais déjà, parce que j'ai vu les ophiolites, mais je confirme. Je continue, si vous voulez, aller à la recherche de mes petits indices. Oui ?</p>
35	<p>Lucas : Et du coup, la marge passive, c'est des anciennes failles normales ?</p>
36	<p>P : Oui, exactement. Ce sont des anciennes failles normales, des failles normales très vieilles, mais que je peux les retrouver dans certaines zones de mon massif actuel.</p> <p>Ahh, t'as raison. Tu vas pas trouver que des failles normales, vous verrez, on trouvera des failles inverses parce qu'il n'y a pas eu que formation d'un océan. Il y a un moment où il y a eu comme même une collision, c'est le terme ultime. Si vous voulez, c'est la fin du scénario et donc on aura des failles inverses aussi dans les massifs actuels. Vous pouvez trouver les deux types de failles. Quand vous avez des failles normales avec des blocs basculés, forcément, c'est une marge passive, qui témoigne d'une ancienne marge passive. Ça va ?</p> <p>Alors, dans votre poly, je vous ai mis un document qui ressemble à ça, où on voit comment ça passe la formation de marge passive. D'accord ? En gros, on fait un zoom, au niveau de la zone qui est en train de se fissurer, en contexte de divergence, et je vous ai mis, une petite animation pour vous expliquer ce document. Donc, c'est document 2 de votre poly. Ça va ? Pour vous expliquer comment ça se passe, alors je vous présente ça. Donc au départ, vous avez un contexte stable, d'accord, avec le domaine continental et vous avez ici cette surface, cette petite ligne jaune, ça correspond aux sédiments, les sédiments, avant le rifting, on appelle ça des sédiments anté-rift, ça veut dire qu'ils étaient là au départ. Jusque là, ça va, rien n'est passé. Maintenant, j'ai un contexte de divergence, extension, je vais avoir des failles, comment ? Normales qui vont se former, du coup, il va y avoir des blocs qui tombaient, qui basculaient. D'accord ? J'ai des blocs basculés. Je vous ai mis les petits schémas, les blocs supérieurs qui vont tomber plus bas que les blocs inférieurs. On appelle ça blocs basculés, alors je vous montre, qu'est ce que ça va donner. Vous allez du coup avoir... Voyez vos blocs supérieurs, pfff, qui vont tomber par rapport aux blocs à côté. Ça, les blocs basculés, c'est ce qu'on appelle blocs basculés.</p> <p>Alors, si les blocs basculent, je vais avoir des dépôts sédimentaires qui vont se former au même temps. C'est ce qui est en orange sur le document. Ça va ? Et ces dépôts sédimentaires qui se font au même temps, on appelle ça des sédiments syn-rifts, se font pendant la période de rifting, pendant que mes blocs basculent. Ben, ça continue à se déposer, ça va pas s'arrêter. Ça va toujours ? Il faut que ma période de rifting est passée, vous avez ici les flèches qui indiquent le mouvement des blocs. Votre bloc sup qui va basculer. Vous allez avoir donc le nouveau de la mer indiqué ici, et du coup, vous avez encore des sédiments qui vont se déposer sauf que cette fois-ci ces dépôts vont se déposer comme ça, au dessus de ce qui se trouve au dessous et ces sédiments se sont formés après la période de rifting. On appelle ça des</p>

	<p>sédiments post-rift. Alors, ils apparaissent ici à l'écran, violet.</p> <p>Adil, est ce que ça va ? ça va, vous n'êtes pas perdu ? Là, vous avez les sédiments post-rift et lorsque j'ai ce type de structure, ça, ça fait penser à une marge passive, aux bordures d'un ancien océan. Ça va ?ça, c'est de la 1^{ère} S. vous avez le document final, si vous voulez revoir les différentes étapes, vous avez une vidéo sur youtube qui s'appelle Marge passive. Vous tapez « les marges passives » sur youtube, vous allez trouver la vidéo là-dessus. Ça va ? et il y a une prof qui vous réexplique ce que je dis en oral, au même temps Ok. Dans votre bouquin, vous trouverez cette marge passive avec les failles normales. Ça, vous devez être capables de les reconnaître dans un exercice, sur un document, dans une photo.</p> <p>Vous avez des questions, où on peut y aller par les traces écrites ? C'est bon ? Ok, on y va. Donc, vous pouvez noter :</p> <p>C'est B : On va faire une petite phrase de transition. Alors, vous notez :</p> <p>S'il y avait un ancien domaine océanique, on doit retrouver les traces des marges de cet ancien océan. Donc, s'il y a un ancien océan, forcément, vous allez trouver les traces de tes anciennes marges. C'est le grand B. Donc, B : Les traces d'une ancienne marge passive. Les rappels, je les ai faits, vous pouvez les trouver sur youtube,si vous voulez et document 2 de poly.</p> <p>Le document qui est en tableau, c'est le document B page 151 de votre livre, j'ai pas l'imprimé évidemment, et vous allez retrouver vos fameuses failles normales, vos blocs basculés, les sédiments anté-rift, syn-rift et post-rift, et donc je retrouve bien la marge passive de l'océan. D'accord ? Là, il vous dit dans quelle région, vous la trouvez, dans la région de Bourg d' Oisans. Et vous allez avoir des séries sédimentaires qui témoignent de cette activité de cette marge passive. Alors, vous avez le socle qui apparaît en rose, et puis, vous allez avoir différentes roches de différents âges, du Trias au Jurassique avec justement ces failles qui sont des failles normales et ça ce que je vais noter. On trouve ça dans la région de Grenoble.</p>
37	<p>Maxime : Quel document ?</p>
38	<p>P : C'est écrit dans le tableau, doc 1B, page 151 et pour les rappels de 1S de votre poly, c'est le document 2 de votre poly.</p> <p>Alors, je vous ai rajouté par rapport au cours de l'année dernière, j'ai rajouté un document...Vous puissiez bien comprendre le rapport entre tout ça, c'est la synthèse de tout ce que je viens de dire, c'est le document 3, ça fait parti toujours des rappels. C'est un peu redondant, mais il était bien fait, alors,je vous ai mis du coup, le contexte avec le rifting, l'océan qui s'ouvre. Je vous fait ici un cadre pour vous montrer la marge passive avec un zoom et le schéma de marge passive avec toute la légende. Donc, il est ici en noir et blanc, mais vous pouvez le trouver en couleur sur le site du prof SVT 71, ce fameux prof qui a mis un site internet. Il y a des documents, certains documents sont intéressants, qui sont bien faits. Il a mis aussi en ligne des vidéos qui vous permettent de comprendre certains éléments de géologie. Prof 71, vous tapez ça sur internet, vous allez trouver les documents en couleur. Il n'y a rien de</p>

nouveau, sauf que vous avez tous les documents qui sont mis en relation. Ça va ? Ok ? Alors, je reprends ma trace écrite. Donc, vous pouvez indiquer dans la région de Grenoble, on peut trouver des failles normales découpant le socle en blocs. Ça va ? Donc, ces failles témoignent d'un mouvement de quoi ? de divergence. Dans votre tête, il doit être clair : faille normale = divergence, ça doit être automatique et faille inverse = convergence. D'accord ? C'est pas parce qu'on est dans une chaîne de montagne, qu'on va trouver que des failles inverses, il peut y avoir des failles normales avec des blocs basculés. Ça va ? Donc, ces failles normales témoignent d'un mouvement de divergence. Les blocs ont basculé au cours de l'ouverture d'un rift. Ce rift a été envahi par la mer. Des sédiments recouvrent les blocs basculés. Ce rift a été envahi par la mer. Des sédiments recouvrent les blocs basculés. Cela correspond à une ancienne marge continentale passive, entre parenthèse, vous pouvez mettre, trace de l'ouverture d'un ancien océan. Alors, comme même, on va donner une définition de la marge passive parce que vous devez être capables de la définir dans un exercice de type 2B, par exemple, pour mettre dans une synthèse, dans cette marge passive, par opposition aux marges actives, ce sont des zones où il n'y a pas beaucoup de sismicité, mais comme même, vous avez des failles normales, et c'est la limite entre le domaine continental et le domaine océanique. Donc, vous allez devoir noter : marge passive = limite continent-océan, donc dans votre livre à la page 150, on vous donne une définition plus complète. Il vous dit, c'est une zone située en bordures de continents qui marque la transition entre la lithosphère continentale et la lithosphère océanique à l'intérieur d'une même plaque. Donc, puisqu'on est dans la même plaque, il n'y a pas de sismicité très importante comme au niveau d'une marge active, comme quand vous avez subduction par exemple. Donc, vous pouvez noter : cette marge, fin, cette zone, n'a pas une grande sismicité. Il n'y a pas beaucoup de sismicité. Il y a quelques failles normales. Cette zone ne présente, ou présente peu de sismicité et c'est pour cela, on dit passive. Ça va ? Alors, je résume ce qu'on vient de voir, avant de vous laisser partir .

Finalement, pour reconstituer le scénario de formation des chaînes des Alpes, on a découvert quoi ? On sait quoi ?

1-Qu'il y a un ancien océan Alpin. & 2- Forcement, que cet océan a dû se former. Donc, on trouve des anciennes marges et on a vu aujourd'hui que cet océan disparaît. Alors, vous notez. Ce que vous devez retenir de la séance d'aujourd'hui : Les chaînes de montagnes, je généralise, j'ai travaillé sur des documents à partir des Alpes. Alors les chaînes de montagnes présentent ça, c'est un bilan à connaître, on bouge. Donc, les chaînes de montagnes présentent souvent les traces d'un domaine océanique disparu, entre parenthèse ophiolites, et d'anciennes marges continentales passives.

Alors, avant de ranger, on a dit que notre océan va disparaître. Est-ce que vous savez dans quel contexte cet océan disparaît ? A quel niveau il y a mort de la croûte océanique, pas mort, disparition de la croûte océanique. Est-ce que vous savez ça ? Quand ça converge ? Du coup, au niveau de quelle zone ?

<p>Un contact entre croûte océanique et croûte continentale, vous avez convergence. Vous allez avoir des failles, et ça s'enfuit. Ça s'appelle la subduction. On verra Jeudi, est ce qu'il y a des traces de la subduction dans les Alpes. Vous allez étudier des roches, des minéraux, et vous allez prendre des images comme celles de la dernière fois. Ça va, Vous avez tout compris ?</p>
--

Annexe 6. La transcription de la deuxième séance de la séquence étudiée

La deuxième séance de notre séquence a eu lieu le 10 janvier 2019 (de 10h à 12h) en classe de Terminale S (32 élèves, Lycée kernanec marcq en baroeul). Cette séance de travaux pratiques a été consacrée à l'étude de la formation des chaînes de montagnes-
Un exemple : Les Alpes.

39	<p>P : Ok, du coup, avant de commencer le TP d'aujourd'hui qui n'est pas très long, on a traîné un petit peu avec l'autre groupe. Vous avez bien du temps pour faire le TP , si vous avez fini avant, je vous donnerai un petit travail à faire toujours sur le même thème, sur le thème de la subduction. Le TP d'aujourd'hui va être noté, évalué.</p> <p>Donc, je vous redonne quelques indications sur les erreurs à ne pas faire parce que c'est le même genre que la dernière fois, c'est des observations des minéraux, etc. Donc, quand vous avez vos présentations dans le bac, n'oubliez pas de mettre le titre, par exemple, ici ce sont des sismogrammes. Il y a certains qui me mettent imprim écran sans. Je vais voir ce qui se passe. Ok.</p> <p>Donc, voilà, quelques erreurs à ne pas faire. Ne pas oublier mettre le titre. Si vous avez une observation microscopique, vous indiquez le titre, le grossissement et comment vous observez. Ici, là, en géologie, vous avez deux types d'observations : lumière polarisée analysée et lumière polarisée non analysée. Donc, précisez.</p> <p>J'ai vu parfois certaines copies de vos camarades, un peu originales, de style observation avec un filtre polarisant, non analysant. des choses un petit peu spécial. Donc soyez simples dans votre titre en lumière polarisée non analysée ou en lumière polarisée analysée. Ça va ? Donc, la légende, je rappelle parce que j'ai un binôme, je pense dans l'autre groupe, Mathiis...J'ai un binôme qui croise systématiquement les flèches. Les flèches doivent être horizontales, parallèles. Vous évitez de mettre des flèches dans tous les sens. Tout à l'heure, j'ai une production avec des flèches un peu croisées.</p> <p>Essayez de faire en sorte que les flèches soient précises, avec pas de grosses flèches qu'on ne voit pas très bien, en dépend de tel ou tel minéral.</p> <p>Pour la conclusion, là, j'avais pas forcément noter la conclusion, mais je vous rappelle : c'est. On sait que. Pardon, Pardon. On observe que, on sait que, donc, on déduit que.</p> <p>Vous avez trois parties.</p> <p>Alors aujourd'hui, on va faire le TP de la formation des chaînes de montagnes. Vous avez tous les poly ? Oui ? Non ?ça, c'est la première feuille, et vous allez voir ressortir une feuille simple ou une demi feuille. On va faire la stratégie. Alors, je vais vous décrire et je vais vous donner les indications et je vais vous rappeler ce qu'on a vu Lundi pour introduire le TP d'aujourd'hui.</p> <p>Alors, qu'est ce que vous avez vu Lundi concernant les Alpes. On a tout juste commencé le chapitre. Qu'est ce que vous avez vu ? Oui ?</p>
40	<p>Amina:Il y a les traces d'un domaine océanique.</p>

41	P : Il y a les traces d'un domaine océanique.
42	Lucas : Il y avait des structures spéciales, les aph
43	P : Il y avait des structures spéciales. Oui. Ça commence par O, c'est donc ophiolites. C'est les séries de roches qui témoignent de la présence d'un océan passé et puis vous avez un deuxième indice qui indique qu'il y a un domaine océanique, c'est la présence ?
44	Mathis : Des basaltes.
45	P : Oui, effectivement dans les ophiolites, on va trouver des basaltes. On va trouver quoi d'autre comme type de roches ? Oui ?
46	Lucas D : Des dépôts de sédiments.
47	P : Alors, oui des sédiments de haut fond avec les petites radiolarites, fin, les roches les radiolarites, donc qui témoignent de la présence d'organismes marins. Tout ça, ce sont des traces d'un océan passé. Et puis, vous avez dans un deuxième temps, après ces ophiolites, nous avons vu les marges passives avec les blocs basculés et les failles normales. Donc, on a dit en gros qu'il y a ouverture d'océan puis, cet océan il s'est élargi et puis aujourd'hui, est ce qu'on trouve encore un océan ?
48	Mathis : Non.
49	P : Non, donc cet océan qu'est ce qu'il a dû faire ?
50	Lucas D : se fermer.
51	P : Il a dû se fermer, il a dû se disparaître, et vous savez que la fermeture d'un océan, ça se passe dans un contexte de ? Dans quel contexte géodynamique ?
52	Mathis : La collision.
53	P : Alors, la collision est le terme ultime si tu veux, c'est le terme ultime, c'est lorsque tes deux lithosphères continentales vont se rencontrer.
54	Lucas : La subduction.
55	P : Avant la collision, vous avez la subduction.
56	Lucas D : La subduction, c'est quoi ?
57	P : Alors, la subduction, c'est quand votre plaque océanique elle passe dans le manteau, elle va s'enfoncer sous la plaque continentale et ça correspond à ce petit schéma que vous avez ici. Donc, je vous ai reconstitué, mais de façon simplifiée, on verra un peu précis avec les cartes des Alpes associées, reconstitué l'histoire des Alpes. Alors, je vais vous montrer ça juste après. Vous avez d'abord l'ouverture de l'océan avec les failles normales et les marges passives. Cet océan qui s'ouvre et s'agrandit, ensuite, vous avez la deuxième image avec la subduction et puis à la fin, on a la collision, due à une compression où vous allez avoir rencontre des deux masses océaniques et puis des nappes avec des complexes ophiolitiques que vous allez les trouver en surface. Alors, Mathis, vous avez une question.
58	Mathis : Dans les océans actuels, je parle dans les océans super-profonds, est-ce qu'il y a des montagnes qui se forment à ce moment ?
59	P : Dans les océans actuels, au niveau des dorsales, dans les dorsales sous marines, fin, les reliefs sous marins, et à ce niveau là, elle peut être à l'échelle

	de quelques centimètres par an.
60	Mathis : Mais dans ce cas au niveau continental je parle, il y a une montagne qui se forme à ce moment là ?
61	P : Oui, c'est possible. Vous pouvez avoir effectivement la fermeture des océans une fois que la croûte soit très vieille, elle subduit et vous pouvez avoir une collision et formation d'une chaîne de montagne à ce moment là. Chuttt Alors, je récapitule. vous pouvez avoir la fermeture des océans une fois que la croûte soit très vieille, elle subduit et vous pouvez avoir une collision et formation d'une chaîne de montagne à ce moment là.
62	Mathis : Et du coup, l'eau va changer, c'est-à-dire qu'elle va peut-être déborder sur les terres, non ?
63	P : Alors, c'est pas qu'elle déborde, c'est que vous allez avoir une répartition des océans qui va être différente. Et du coup, la carte sera pas la même que la carte d'aujourd'hui. En fait, les cartes qui sont représentées sur [...] elles évoluent durant les temps géologiques. On avait pas toujours la même position, en fait, des continents aux mêmes endroits. Là, la carte qu'on apprenait là actuellement, c'est la situation actuelle, sachant que ça évolue chaque fois de quelques centimètres. Vous savez, Paris et New York qui s'éloignent petit à petit chaque année .On s'éloigne, je pense en moyenne de 1cm . C'est pas beaucoup, mais sur l'échelle géologique, vous allez avoir effectivement un éloignement des deux masses continentales, parce que l'océan va continuer à s'ouvrir. Un jour, peut être, s'il se fermera avec les mouvements des plaques. Ça va ? Donc, on verra, je vous montrerai des cartes des Alpes. Vous verrez, qu'il y a les cartes anciennes, je crois qu'il y a des cartes. il y a -140 millions d'années, -80 millions d'années. Vous allez voir comment ça se fait qu'elles se séparent. Fin, qu'il y a divergence et pourquoi après, vous avez convergence. On va voir. Oui ?
64	Lucas D : Le fait qu'il y a subduction, ça fait que ça remonte et que ça descend. Benn, la plaque
65	P : Oui ta plaque elle subduit, et du coup comment qu'il y a des chaînes de montagnes, c'est ça ?
66	Lucas D : Oui.
67	P : Alors, c'est parce qu'en fait, la subduction c'est pas la seule étape, la subduction se poursuivra jusqu'à qu'il n'y a plus de croûte océanique, jusqu'à ce que toute la croûte océanique est subduite. Et du coup, tu as deux masses continentales, ben, qui se rapprochent et quand elles se cognent. Là, tu va avoir la collision avec création de relief, c'est parce que c'est l'étape suivante en fait. T'as d'abord subduction, et le terme ultime de cette subduction, quand il n'y aura plus de croûte océanique, à ce moment là, les croûtes continentales qui vont se rencontrer et former un relief avec ce qu'on a vu dans le chapitre 1, raccourcissement et épaissement crustal.
68	Lucas D : Oui. Et du coup, l'océan va se fermer ?
69	P : Et là oui, l'océan il aura complètement disparu, il se sera complètement fermé. Oui ?

70	Amina : Et l'eau, elle va où ?
71	<p>P : Alors, l'eau. C'est une bonne question, parce que là vous avez une image à un endroit donné, mais il faudra avoir une image de vision plus globale à l'échelle du globe. En fait, votre eau ben, je sais pas , comment toute cette masse d'eau elle va où d'un coup ? ça se fait pas du jour au lendemain, évidemment, mais tu vas avoir des nouvelles répartitions de masse d'eau. Je vais essayer de réfléchir pour pouvoir expliquer ça mieux, avec des schémas peut-être pour mieux comprendre.</p> <p>Alors, là aujourd'hui en fait, ce qu'on va faire c'est assez simple, c'est qu'on veut prouver à un moment donné, c'est l'image numéro 2, on veut prouver que vous avez subduction au niveau de l'océan alpin et vous avez eu fermeture de cet océan alpin.</p> <p>On veut prouver ça en observant les Alpes actuelles. Alors, pour concevoir votre stratégie, il faut comme même que je vous donne quelques éléments pour que vous puissiez faire le travail comme il faut.</p> <p>Alors, la première chose à noter, c'est ce que je vous ai noté en gras, c'est que lorsque vous avez subduction, en fait votre croûte océanique, elle va s'enfoncer et du coup elle va avoir des changements de pression et de température. Ces changements de pression et de température, qu'est ce qu'ils peuvent engendrer ? On a vu ça dans le chapitre précédent.</p>
72	Lucas : Evaporation de l'eau.
73	P : Oui, alors, effectivement vous pouvez avoir modification de l'état de l'eau, mais au niveau de la roche, si je la mets dans d'autres conditions de pression et de température
74	Salma : Transformation de la roche.
75	<p>P : Transformation de la roche, alors des transformations, soit de structure, soit des transformations. Alors, j'ai pas , le granite il se transforme en Gneiss, vous avez des transformations de structure avec apparition des minéraux mieux organisés, si vous voulez.</p> <p>Mais, vous avez aussi parfois des transformations minéralogiques. D'accord, ça s'appelle le métamorphisme. Vous avez un métamorphisme caractéristique de la subduction. C'est un métamorphisme dans les conditions de haute pression, basse température. Alors, haute pression, pourquoi haute pression ? Est-ce que c'est logique ça ?</p>
76	Lucas : C'est par ce que sous l'eau.
77	<p>P : C'est pas par ce que sous l'eau. Mais c'est par ce que votre croûte océanique elle s'enfonce, si elle s'enfonce, beh, le matériel qui va être plus bas, si vous voulez, va au dessous de toutes les couches de roches, va forcément avoir une pression plus importante. C'est haute pression, c'est normal puisque vous avez un enfouissement. Après, basse température est ce que ça vous paraît logique comme ça basse température ?</p> <p>Ben, non. Pour vous ça ne vous paraît pas logique. Alors, je vais vous expliquer. Pourquoi, il y a une basse température. Si vous prenez</p>

78	Mathis : C'est par ce que c'est loin du soleil.
79	P : Non, c'est par ce que loin du soleil.
80	Mathis : Mais sous l'eau, il n'y a pas de rayon de soleil.
81	P : Oui c'est vrai, sous l'eau, il n'y a pas de soleil, le soleil ne peut pas passer, mais là, c'est plutôt lié à l'état de la roche au niveau des zones de subduction. Et vous avez un document qui vous montre en gros, ce que donne en termes de température. C'est le document deux, il s'appelle « isothermes de température dans une zone de subduction » Une isotherme, c'est si vous voulez, une ligne où tous les points qui la constitue, tous les points de la ligne sont à la même température, je prends une zone de subduction, j'ai une plaque, une croûte, comme ça qui plonge. D'accord ? Je vais avoir ma croûte continentale qui est ici ; là c'est la croûte océanique et ici j'ai la fosse. Ben, alors effectivement, il y a ici de l'eau, j'ai pas fait les failles normales, je fais quelque chose de simple. Si je fais l'isotherme de température admettant qu'à ce niveau là, je suis à 400°. D'accord ? Et bien, plus je m'éloigne. La dorsale, elle est au milieu de l'océan. Plus je m'éloigne de la dorsale, plus ma croûte, elle est vieille, elle est dense, et en terme de température, elle est comment par rapport à l'axe de la dorsale. A l'axe de la dorsale, vous avez un magma qui arrive en surface. Là, à l'axe de la dorsale, c'est comment ? C'est très ?
82	Toute la classe : Chaud.
83	P : C'est très...chaud. Plus je m'éloigne, plus votre croûte a eu de temps de refroidir, parce qu'elle est dans l'eau froide. Elle va avoir du temps à refroidir. Plus je vais vers cette partie là, en fait, plus la croûte est âgée, plus elle a le temps de refroidir par rapport à sa formation. Donc, je vais avoir une croûte très froide et du coup elle s'enfonce, ben, elle va se réchauffer, mais elle va se réchauffer plus lentement par rapport à ce qu'on pourrait imaginer et du coup, si je vous trace l'isotherme avec 400°. Cet isotherme, en fait, pour avoir 400°, il faut que je m'enfonce d'avantage pour ensuite je vais avoir remontée ici de l'isotherme dans la croûte. Alors, vous avez toutes les isothermes qui ont, si vous voulez, une zone voilà de fléchissement, qui vous montre que cette croûte océanique elle est anormalement froide, elle va comme même se réchauffer, mais elle va mettre un petit peu de temps pour se réchauffer. De ce fait là, dans les diagrammes quand je vais d'une subduction, je me situe toujours dans les conditions de très haute pression mais de température peu si haute que ça. On va parler de basse température. Après, c'est pas des températures négatives. N'oubliez pas que c'est quelque chose de super froid, mais moins chaud que ce qu'on peut attendre. Ça va ? Vous comprenez mieux ? Donc, pour vous, subduction c'est associée à un métamorphisme de Haute pression et Basse température. Oui ?
84	Lucas D : J'ai pas compris déjà les fosses ? On a vu ça tout à l'heure.
85	P : C'est parce qu'il y a convergence, donc vous avez votre croûte océanique qui est froide, qui est dense. Du coup, elle est très dense qu'elle a tendance à s'enfoncer, on appelle ça la subduction. Donc, ça commence à s'enfoncer, la croûte océanique elle se déplace dans ce sens là. Alors si vous avez votre

	dorsale, avec une divergence. D'accord et là vous avez votre croûte continentale. Ça va ? Alors, vous avez divergence au niveau de la dorsale. Ça va ? La dorsale, au milieu de l'océan, là voilà, vous avez, t'as raison, convergence au niveau de la zone de subduction. Si je fais se rencontrer deux matériaux qui ont deux densités différentes avec une croûte continentale, vous avez une densité d'environ 2,7 en moyenne. Là, vous avez une densité qui est beaucoup plus importante 3,3. Du coup, quand je cogne ces deux masses, elles ne sont pas de même densité. Et du coup, la croûte océanique, elle va avoir tendance à plonger en dessous, et quand elle plonge elle forme quoi ? Elle forme un creux et ce creux on appelle ça une fosse, on appelle ça une fosse océanique. Vous avez un relief négatif ici.
86	Lucas : Dans ce cas, il va y avoir un vide ici ?
87	P : Vous avez vu alors normalement en Première S, c'est le modèle du tapis roulant. Vous avez à chaque fois, où vous avez votre magma, vous avez votre magma ici, votre magma d'origine basaltique va remonter ici en surface parce que vous avez un amincissement, parce que je suis dans une zone de divergence. Quand il arrive dans l'axe de la dorsale, il est au contact de l'eau très froide. Du coup, il va cristalliser dans l'eau. Ça vous fait des basaltes en pillow lavas, mais le mouvement continue, le mouvement de divergence, et à chaque fois, vous avez un mouvement de divergence, remontée du magma et du coup, le trou au milieu va être comblé par la remontée d'un nouveau basalte. Et donc, ça relève du tapis roulant. Vous allez avoir ici votre magma initial qui va cristalliser, avec vos basaltes et vos gabbros en profondeur. Ils vont se retrouver petit à petit décalés et puis le trou va être comblé par des nouveaux magmas qui arrivent. Oui ?
88	Lucas : Et puis, ça se déplace ?
89	P : Alors, oui il aura des failles, vous avez des petites failles, ça se déplace comme même, c'est pas de grande sismicité, vous avez des petites failles et ça va se déplacer. Et au bout d'un moment, ça va être, en bout de chaîne si tu veux, cette partie là, elle va être tellement dense, qu'il va tendance à plonger.
90	Salma : Il y a rapport avec les plaques ?
91	P : Bien sûr , oui, oui. Oui, oui, oui bien sûr c'est au niveau de la tectonique des plaques, parce que vos plaques se déplacent, c'est ce qui a décrit Wegener en Première, je pense. Voilà, oui. Bon, tout ça pour vous dire, quand que vous avez une subduction, vous allez avoir une roche de la croûte océanique, c'est quoi déjà, ces roches de la croûte océanique ?
92	Mathis : Basalte.
93	P : Basalte et en dessous ? Gabbro, d'accord ? En gros, vous avez votre basalte, votre gabbro, il va plonger, je vous ai dit les conditions : C'est la haute pression, basse température, et du coup, ces gabbros et ces basaltes ils subissent un métamorphisme : Les roches, elles vont se modifier quelque peu, et quand un gabbro est métamorphisé, j'appelle ça métagabbro et vous allez avoir des transformations, des transformations minéralogiques. Oui. ?

94	Salma : Est-ce que on ne les trouve pas dans les chaînes ? ici ?
95	P : Alors, à la toute fin, à la toute fin, quand je continue entre mes deux chaînes, entre mes deux massifs continentaux, je vais retrouver ce métagabbro parfois en surface.
96	Salma : Mais ça se descend ?
97	P : Mais, quand vous allez avoir. C'est vrai, c'est une très bonne question. En fait, quand vous allez avoir un rapprochement, vous allez avoir la fin de la subduction et il y a un mécanisme, on va alors parler rapidement parce que c'est pas trop programme. Il s'appelle l'obduction et vous allez avoir des petites écailles, des petits morceaux qui vont, si tu peux, se retrouver en surface, mais l'essentiel, l'essentiel de Métagabbro, effectivement, il va se plonger, il va se retrouver dans le manteau, il va finir par fondre, mais il y aura des petites traces, ça sera pas, ehm, l'ensemble de la croûte qui monte en surface. Alors, je vous montrerai des schémas, on voit peut-être , sur les petits schémas du document 1. Ben, par exemple, on voit le complexe ophiolitique, ça correspond à la croûte océanique qui se retrouve en surface, c'est parce que vous avez des petits bouts qui sont décollés. Simplement, lorsque je déprime il y a des petites écailles qui se trouvent en surface. Mais l'essentiel il partit en dessous, en profondeur. Ça va ? Oui ?
98	Lucas D : Et du coup, vous allez trouver ce métagabbro au niveau des Alpes ?
99	P : Ben, oui, parce que vous avez étudié ce métagabbro et je reviens parce que je ne vais pas tout dévoiler. Vous avez en plus ici, un diagramme de pression et de température qui vous montre quels sont les minéraux que je vais trouver dans les différents domaines. Alors, regardez la chlorite, c'est un petit minéral vert. Est-ce que vous le voyez tous sur le diagramme ?
100	Toute la classe : Oui.
101	P : En haut, ça va ? Vous l'avez trouvé ? Alors, quand je trouve de la chlorite, dans quelles conditions je me trouve ?
102	Lucas : Entre 0 et 200 °C.
103	P : En terme de température et de... Alors, vous m'avez dit entre 0 et 200° même entre 0 et 400°C, on peut le trouver. Oui, c'est une température qui est plutôt ?
104	Lucas : Basse.
105	P : Basse. D'accord basse température et en terme de pression ?
106	Mathis : Entre 0 et 500.
107	P : Entre 0, alors, en terme de pression la pression c'est Pression en Méga Pascal, c'est l'unité méga Pascal.
108	Lucas D : 500.
109	P : Combien, oui je dis même plus que 500. Regardez la même échelle ici ?
110	Mathis : Ben, pour la chlorite.
111	P : Oui, mais la chlorite, elle va ,elleee. Si on fera un exercice, on vous met le nom de minéral et il est présent jusqu'à la ligne en pointiers, jusqu'à la limite de son domaine de stabilité. Donc, c'est l'ensemble du, du, du carré si vous voulez, de la zone délimitée par les lignes, c'est pas des lignes, par les domaines. D'accord ? ça va jusqu'à 500 voire 1000. Effectivement, si je me trouve à une

	pression, à une température plus importante. Si je me trouve à une température de 400°, je peux aller à 1000 Méga Pascal, c'est vrai. Ben, voilà. Ça va ? Oui .
112	Lucas D : Où on peut trouver le métagabbro sur le diagramme ?
113	P : Alors, là, est ce que je vais trouver le métagabbro dans mon diagramme ?
114	Mathis : Non.
115	P : Non pourquoi ?
116	Lucas : Parce que, c'est après une certaine pression.
117	P : Non, mais c'est quoi le métagabbro ? Est-ce que c'est un minéral ?
118	Lucas et Mathis : Non, c'est une roche.
119	P : C'est une roche. Les minéraux, c'est ce qui constitue les roches. D'accord, la roche c'est l'objet en, en [...]A l'intérieur de cette roche, vous avez des minéraux, et ça c'est un diagramme avec les minéraux, d'accord ? Métagabbro, vous ne verrez pas. Par contre, vous verrez, je sais pas , Plagioclase : chose que vous trouvez dans le métagabbro. Ça va ?
120	Lucas D : Mais c'est écrit ici Solidus Gabbro, sur la ligne, la ligne.
121	P : C'est vrai, vous avez une ligne, je suis d'accord. C'est écrit solidus Gabbro. Est-ce que vous le voyez ?
122	Mathis : Oui.
123	P : Oui. Alors, cette ligne là, en fait elle signifie c'est la limite de séparation si vous voulez du domaine où la roche est solide et où la roche est liquide, ça veut dire quand je franchis ce domaine là, et bien j'ai une fusion. Je vais avoir passage de l'état solide à l'état liquide. Et du coup, mes minéraux je ne vais pas les trouver. C'est vrai qu'ils ont mis le nom de la roche dans le solidus, mais sinon c'est des minéraux qui vont être mis dans les diagrammes. Ça va ? Donc, vous allez retrouver des diagrammes dans une zone de subduction. Vous allez retrouver Haute pression\ basse température. Donc, vous cherchez quelle est la partie, quels sont les minéraux qui vous intéressent. Voilà, je vous laisse faire. Ce que je vais vous demander , c'est noté en gras. Vous allez proposer une stratégie de résolution. Vous avez 10 min pour faire ça. Donc allez , chacun sa feuille.
124	Mathis : Madame.
125	P : Et vous dites les trois étapes, c'est ça ce que vous demandez ? Alors, ça vous apprenez par cœur. Vous avez votre fiche technique, mais au moment de l'examen, vous avez trois choses à vous dire. Un, vous allez dire :
126	Lucas :Ce qu'on recherche.
127	P : Voilà, ce qu'on veut faire. Ce qu'on cherche. Deux, vous allez dire
128	Maxime : Comment.
129	P : Comment vous allez faire, avec quel outil ? Et trois. Ce qu'on attend : Oui ?
130	Lucas D : Dans la stratégie, on ne cite pas les minéraux.
131	P : Alors, vous avez le matériel disponible. Alors, on vous dit que vous avez deux roches trouvées dans les Alpes qui sont proposées en échantillons macroscopiques et en lames. Vous avez les fiches techniques et vous allez dire ce que vous allez faire, ce que vous cherchez. Le jour de l'examen, le matériel est disponible, il est mis sur votre table, parfois il manque des choses.

	D'accord ? Parfois il y a des choses à réclamer. Ça peut arriver, ce sont des petites choses. Donc, j'arrête de bavarder. Vous y allez. Vous avez 10 min.
132	Amina : Dans une zone de subduction, basse température \ haute pression ?
133	P : Oui, basse température. Non, je ne dis pas de bêtises, haute pression, basse température.
134	Mathis : Dans une subduction, ça s'enfonce.
135	P : Oui.
136	Mathis : Alors, le gradient géothermique est plus chaud.
137	P : Oui, mais je l'ai expliqué : C'est vrai, t'as raison, je vais voir le gradient géothermique. Plus je m'enfonce, plus c'est fait chaud. C'est vrai. Mais, si tu veux, il va y avoir une température. Ta croûte, va se réchauffer en 100 %, mais elle se réchauffe moins vite que ce qu'on pourrait attendre, parce qu'elle est très froide. Globalement, dans les diagrammes, tu vas comme même dans des zones de température pas très élevées. Quand je dis des températures pas très élevées, 200°C. C'est déjà chaud 0à 200°C. Ce sont déjà, des températures chaudes, mais en terme géologique, la température est pas très élevée : basse température , haute pression. Non, mais je suis d'accord avec toi, plus tu t'enfonces, plus ça fait plus chaud [...] Mais là tu peux pas réfléchir comme ça. Tu vas dire dans ta tête : température basse, haute pression. C'est ça qu'il faut que tu trouves. C'est du cours. Subduction. J'a dis des bêtises. Non. C'est haute pression, base température.
138	Mathis : c'est quoi basse température ?
139	P : Ben, c'est des températures qui sont, qui sont à la partie de ton diagramme, qui sont la partie la plus faible dans ton diagramme. Ici, 0-200°C, ce sont des basses températures.
140	Mathis : mais c'est pas très froid.
141	P : Non, j'ai dit après que c'est pas super froid, mais ça va être plutôt des températures peu élevées. Je sais pas comment comprendre mieux. Voilà, allez, je ramasse. On corrige, je vous donne quelques indications et puis je vous laisse travailler tous seuls. Alors, qu'est ce que j'attendais ? Première étape, qu'est ce que vous voulez montrer ?
142	Lucas D : Qu'il y a une phase de subduction dans les Alpes.
143	P : Voilà, que les Alpes ont subi une subduction et que vous voyez des traces. Comment je fais de façon concrète ? Oui .
144	Lucas D : On expose des roches trouvées dans les Alpes, et grâce à des lames fines, on les analyse grâce au microscope analysant. S'il y a tels minéraux, on les trouve j'ai pas, en basse pression. Non. En haute pression , basse température.
145	P : OK
146	Mathis : comme Jadéite.
147	Luccas D : Comme la Jadéite et le grenat.
148	P : Magnifique. Voilà, donc, vous avez une roche, vous allez l'étudier. Vous allez chercher la Jadéite et glaucophane et du coup pour les résultats que vous attendez, vous attendez à les trouver ces minéraux. Quand vous ferrez votre

conclusion, j'ai observé tels tels minéraux, or je sais qu'ils correspondent à une zone de Haute pression\ basse température, et du coup, c'est la subduction. Donc, j'en déduis qu'il y a bien de la subduction. Ça va bien ? Vous avez tout pour bien faire . Avant de passer à la suite, je vous donnerai la fiche protocole, je vous ai détaillé quels sont les minéraux que vous allez trouver, dans quelles roches et comment je voudrais qu'ils soient, comment ils sont mis en évidence ? Je vous donne le document 2. Cette fiche là, vous l'avez le jour de l'examen. Alors, vous allez faire deux étapes : Première étape : vous allez observer à l'œil nu les deux roches : le métagabbro qui est ici, c'est un gabbro qui est un peu enfoui, qui a subi un métamorphisme. Dans ce métagabbro, vous allez voir si vous avez de la chance, suivant la roche, vous allez voir si vous avez de la chance, suivant la roche, vous allez voir le plagioclase qui va être en blanc, le glaucophane qui va être en bleu et le pyroxène en foncé. Si la roche est très très belle, essayez de la montrer à votre voisin. C'est pas évident. Cette partie n'est pas notée, mais je vous montre les roches, essayez de prendre des photos. Ensuite, vous allez avoir une deuxième roche, c'est l'éclogite. C'est aussi une roche métamorphique qui témoigne de la subduction et vous allez chercher le Grenat dessus et la Jadéite. Alors la Jadéite c'est de couleur verte. Le Grenat c'est rose, rouge. Alors, je vous ai mis la fiche technique avec la planche, pour cela vous avez dans les classeurs, dans la salle à côté. Vous voyez, les grenats, ça fait des petits minéraux globuleux rosés, en fonction de la roche. Vous allez les voir bien et prendre des photos. Ensuite, vous allez les passer à la microscopie. Alors, en microscopie, on va vous demander d'identifier le grenat dans l'éclogite. C'est ce que je vous demande, puis l'éclogite c'est l'association grenat - Jadéite. Alors, la Jadéite n'est pas facile à connaître, mais quand vous allez identifier, vous passez en LPA, donc lumière polarisée analysée. Vous allez en tournant les filtres, à certain moment, votre minéral devient tout noir avec des petites inclusions colorées, mais qui va devenir noir. Ça c'est caractéristique du grenat. D'accord ? La Jadéite donc, c'est un peu le pyroxène qui est vert clair. Le vert est pas toujours très beau dans le pyroxène. Vous allez voir des petits, des sortes de, des petites stries. Ces stries sont plutôt parallèles, comparées du grenat, où c'est un peu tout, dans tous les sens. Vous allez avoir comme même une orientation des stries dans la Jadéite. Ça, c'est pour l'éclogite.

Pour la lame où vous allez devoir identifier du glaucophane, alors je vous montre ça. Vous allez avoir des minéraux qui sont bleutés en lumière polarisée. Donc, ça se voit tout de suite, de premier coup d'œil et vous allez avoir identifié aussi du Pyroxène. Et en fait, ce que je vous demande dans le protocole, si vous pouvez, c'est pas toujours possible. Ça dépend de la lame, si vous pouvez, je vous demande d'identifier un glaucophane qui borde un pyroxène. Donc, un pyroxène bordé par un glaucophane qu'on le retrouve avec un plagioclase. Dans votre livre, vous avez un document qui vous montre ça. En fait, votre pyroxène, je vais le refaire au dessous. Mon pyroxène, c'est un minéral. Avant de subir le métamorphisme, il est en contact de plagioclase tout autour, d'accord ? C'est ce qui correspond à mon minéral A et mon minéral B.

Au départ, je n'ai que le minéral A et à mon minéral B. Au départ, je n'ai que le minéral A et le minéral B, qui sont en contact. Quand je change les conditions de pression, je vais avoir A et B qui vont réagir ensemble et qui vont donner un nouveau minéral qui va se mettre ici en bordures. Et ce minéral, ça va être le glaucophane. Alors, vous allez voir sur certaines lames, vous avez du glaucophane tout autour. Si vous trouvez ce type d'images, ben, c'est bien de prendre en photos. Donc, un pyroxène bordé de glaucophane avec le plagioclase de l'autre côté, le tout pour montrer un peu comment se fait la réaction qui va se naître.

Je vous reprendrai ça en cours. Mais, essayez de montrer voilà, vraiment le glaucophane qui borde le pyroxène. Après, il y a certaines lames, c'est pas évident. Comme tout à l'heure il y a des lames où le glaucophane est partout, et vous n'allez pas avoir un seul pyroxène bien individualisé avec une auréole. Mais, parfois, je vous montrerai, j'ai un binôme, je pense Gabin. On voit très bien en fait, sur la lame, ça saute aux yeux, il y a, il a fait mise au point, et il a tombé tout de suite sur un beau minéral.

Voilà, je pense que cette fois ci, j'ai rien oublié. Vous prenez les images. Voilà. Allez.

Annexe 7. La transcription de la troisième séance de la séquence étudiée

La troisième séance de notre séquence a eu lieu le 10 janvier 2019 (de 13h à 14h) en classe de Terminale S (32 élèves, Lycée kernanec marcq en baroeul). Cette séance a été consacrée à l'étude de la formation des chaînes de montagnes- Un exemple : Les Alpes (suite).

149 **P** : Donc, ok, c'est bon. Allez on y va. Chutt. C'est bon ? Vous êtes prêts ? Alors, je reprends ce qu'on a vu ce matin en TP. Vous avez écrit les traces d'une ancienne subduction. On voulait mettre en évidence qu'il y a eu un épisode de subduction au cours de la formation des Alpes. D'accord ? Je vous reparle de la stratégie de ce matin rapidement. On avait dit qu'une zone de subduction, elle est caractérisée par un métamorphisme de basse température, haute pression. J'ai passé beaucoup de temps à expliquer. Et vous avez certains minéraux qui se forment dans ces conditions là, qui apparaissent lorsqu'on soumet la roche à de haute pression et à des basses températures.

Vous avez ici le document 4, c'est un diagramme donc pression\ température et si je regarde dans ce diagramme, si je suis là, dans une zone de subduction. Suivez. Vous suivez ? Dans cette partie –ci du diagramme, c'est-à-dire les températures peu élevées et une pression supérieure à 0,5 GPa . Et donc, je trouve des minéraux particuliers et les minéraux que vous avez étudiés ce matin sont le Glaucophane et la Jadéite que vous avez pu trouver ainsi que le Grenat pour l'éclogite. Vous irez voir votre TP ; Nous avons tout dit ce matin. Vous joindrez une correction que j'agraferai avec des minéraux qui sont caractéristiques de la haute pression\ base température. Vous pouvez les trouver dans certaines roches des Alpes qui témoignent du coup d'une subduction. Alors sur ce document là, par rapport à celui que vous avez le matin, vous avez trois minéraux qui apparaissent : l'andalousite, le disthène et la sillimanite avec des domaines de stabilité qui sont séparés par des traits. Ces minéraux, vous les trouvez très souvent dans le diagramme. Ce sont des minéraux marqueurs qui vous permettent de savoir par exemple, quand il y a une très haute température, je vais avoir plutôt de la sillimanite, si j'ai une pression assez importante, je vais trouver plutôt de disthène, et l'andalousite. Elle témoigne d'une condition de température moyenne avec une pression basse. Ces trois minéraux qui nous ne l'étudierons pas forcément en TP mais qui sont souvent présents dans les diagrammes.

Pour le diagramme, je pense que vous avez compris ce matin, vous avez des lignes qui délimitent les domaines de stabilité. Si je prends ici l'exemple de Glaucophane. En fait, le Glaucophane, il peut être présent dans tout ce cadre – ci, d'accord ? Au niveau des conditions pressions, températures, on va à peu près entre, j'ai pas, entre 50° et jusqu'à 500° et au niveau des conditions de pression, de 0,4 GPa à 1 à 1,2 GPa maximum. D'accord ? C'est vraiment dans le cadre délimité par les barres. Ça va ? Voilà, vous avez étudié deux roches, les métagabbros et puis les éclogites et on va essayer un petit peu de comprendre

comment ces minéraux sont apparus et puis, je vais vous parler de la notion de faciès métamorphique. On va donner des noms de faciès en fonction des minéraux qu'on peut retrouver dans les roches. Donc, au niveau de la trace écrite. Ça va ? Est-ce que vous avez des questions sur ce que je viens de dire ou c'est clair pour tous. Donc, tout ça, on l'a vu ce matin. Vous avez vu ça essentiellement ce matin.

Il y a des questions ou pas ?

Ok, au niveau de la trace écrite, vous avez quoi à noter ? Dans les montagnes, on trouve des roches, métamorphiques. Vous avez comme exemple le métagabbro, l'éclogite et il y a d'autres, on les verra dans des exercices, témoignant de conditions de haute pression\ basse température. Vous mettez bien voir TP, parce que vous avez tout ce qu'il faut dans le TP de ce matin. Ça va ? donc, on va répéter souvent dans ce chapitre Métamorphisme de haute pression\ basse température. Vous pouvez noter HB\ BT, ça vous évitera chaque fois de réécrire les 4 mots entiers. Donc un tel métamorphisme, ça vient un métamorphisme de haute pression\ basse température, ne s'observe que dans les contextes de subduction. C'est vraiment caractéristique. Donc, un tel métamorphisme haute pression\ basse température ne s'observe que dans les contextes de subduction. Alors, vous pouvez mettre les minéraux, les minéraux qui témoignent de ces conditions sont par exemple, et ça à connaître dans le TP, par exemple le glaucophane, la Jadéite et le Quar. Pardon, et le Grenat. Ça va ? Alors, donc ces minéraux, nous allons les trouver essentiellement dans les métagabbros et les éclogites. Les métagabbros, on va comme même donner leur définition. Vous avez expliqué tout à l'heure qu'en fait, il s'agit du Gabbro qui subit un enfouissement. Alors, si je vous montre celui observé en TP, c'est celui-ci, c'est un métagabbro à Glaucophane. Vous voyez alors le pyroxène, un plagioclase, donc qui était avant jointif au pyroxène. Puis, vous avez un nouveau minéral qui apparaît sous forme d'auréole, sous forme de couronne qui s'appelle le Glaucophane. Ce document là, vous l'avez dans votre livre. Je vous ai indiqué la référence ce matin. Je peux vous redonner la page si vous voulez. Donc, vous avez ça. Je vous donnerai la page. On regardera, vous avez exactement la même image. Donc, ce métagabbro, c'est une roche, c'est un gabbro, le gabbro ça provient de la croûte océanique, c'est ce qu'on trouve à la base de la croûte océanique, qui a subi un enfouissement, du coup, qui a subi, si vous voulez, des transformations, biométamorphisme, avec l'apparition de nouveaux minéraux. Vous avez des métagabbros à Hornblende, des métagabbros à Glaucophane et vous avez observé aussi, des éclogites. Alors, les éclogites, elles sont caractérisées notamment par un nouveau minéral qui est le Grenat. Vous avez vu le matin, qui a une forme hexagonale, qui s'atteint en LPA. Tout ça, vous l'avez vu ce matin. On retrouve du glaucophane dans certains endroits de l'éclogite et la Jadéite. C'est un minéral aussi qui témoigne d'un enfouissement. Alors ces images, vous l'avez pris ce matin et que vous avez annoté. Donc, le métagabbro, vous avez noté la définition, Métagabbro : Gabbro qui a subi un métamorphisme. On appelle métagabbro, Gabbro qui a subi un métamorphisme. Donc, c'est au début d'enfouissement, si vous voulez, que j'ai

un métagabbro, il commence à s'enfouir et j'ai un métagabbro. S'il continue à s'enfouir, cette fois si, ça devient généralement une éclogite. Donc, l'éclogite, elle témoigne des conditions de pressions un peu plus importantes. On verra avec les schémas dans le chapitre suivant. Donc, les éclogites, vous pouvez noter : éclogite = Roche dont la composition est proche des gabbros, ces roches comportent des minéraux comme les grenats. Et ce sont des roches métamorphiques. Alors, avant d'aller plus loin, je vais vous expliquer qu'est ce qu'un faciès métamorphique. Ça fait partie du programme. Egalement, vous verrez qu'on va classer les roches suivant leur faciès, c'est-à-dire leur apparence, leur composition en minéraux.

Alors, ce document là, vous l'avez dans votre poly. Je pense que c'est le document 5. C'est le document 5, il s'appelle les faciès métamorphique et vous voyez que ce document c'est un diagramme pression, température. Donc, ici, vous avez la pression en MPa avec la correspondance par rapport à la profondeur et puis en abscisse, vous allez avoir la température. Vous avez donc les domaines qui sont délimités par des lignes, dans ce domaine-ci, dans cette première case, vous allez retrouver des minéraux comme le glaucophane, plus le Grenat, plus un minéral que vous n'avez pas vu ce matin, mais qui s'appelle l'épidote. C'est un minéral qui existe. En tout cas, si j'ai Glaucophane et grenat et épidote, et bien je vais me situer dans une partie du diagramme et toutes les roches qui entreront dans cette partie du diagramme. On va dire que ce sont des roches qui ont un faciès Schiste bleu. Ça veut dire qu'elles ont des minéraux caractéristiques de ce domaine là. Ça va ? Vous voyez ce que je viens de dire ? Non ? Beuff. En fait, vous avez une roche. Dans cette roche vous allez trouver tels ou tels minéraux. Vous allez lister ces minéraux. D'accord ? Si j'ai une association par exemple, Glaucophane+ Grenat+ Epidote. C'est un minéral que ne vous connaissez pas. Vous faites la liste avec ces trois minéraux, et bien à partir du moment que vous avez cette association là, vous allez être sûres et certains que vous vous retrouvez dans cette partie là du diagramme. D'accord ? Dans ces conditions de pression et de température. Autrement dit, ces conditions de pressions, assez importantes parce qu'elles sont au-delà de 600 MPa ou de 500 MPa. Et par contre, la température, ce sera des températures modérées, et bien je vais donner le nom de ces roches. Je vais dire que cette roche, elle appartient au faciès type Schiste bleu. Ça veut dire qu'elles sont trouvées dans un domaine, elles se sont formées dans un domaine de pression et de température qui correspond à cette zone là. Alors pourquoi schiste bleu, schiste bleu parce que bleu en fait, ça donne la couleur bleu de Glaucophane. Alors, on retrouve de Glaucophane en grande quantité avec un tout petit peu de grenat et d'épidote ? ça des schistes bleus. Ça va ? Alors, de la même façon, vous allez avoir une zone ici qu'on va appeler Schiste vert. Alors schiste vert ce sont des roches dans lesquelles on va avoir l'association de la chlorite et de l'actinote, les minéraux sont de couleur, fin, la chlorite, elle est verte, d'où le nom du faciès schiste vert. Vous avez ensuite un faciès Amphibolite, qui est ici, c'est lorsque je vais avoir des amphiboles de type hornblende, associés avec le Plagioclase et puis j'ai un faciès qui se trouve tout en bas du graphique. C'est le

faciès d'Éclogites et vous voyez c'est le nom de la roche qu'on a étudié ce matin. Ce sont des roches dans lesquelles, je vais retrouver l'association Jadéite+ Grenat.

En fait, ces éclogites ne sont ni plus ni moins que d'un ancien métagabbro qui est enfoui plus profondément avec des nouveaux minéraux. On aurait pu l'appeler le méta méta gabbro si vous voulez. Vous voyez, on donne le nom d'éclogite parce qu'il appartient au faciès éclogite. Je vais avoir des minéraux, des nouveaux minéraux caractéristiques. Et bien, ça ce qu'on appelle faciès métamorphique. Pour définir ce que c'est une association particulière de minéraux qui vont témoigner des conditions de pression et de température et qui vont paraître de ranger le roche dans telle ou telle partie du diagramme. Ça va ? Donc, au niveau de la trace écrite, vous pouvez noter : on appelle faciès métamorphique et vous écrivez la petite définition qui est ici : une association particulière de minéraux qui témoigne de conditions de pression et de température. Voir document 5.

Donc un exemple de faciès : le faciès schiste vert. Vous avez des documents colorés. Après à la maison, vous pouvez colorier le faciès schiste vert en vert. Vous allez voir c'est un domaine assez tendu. Ce faciès schiste vert, lui, il est caractérisé par la présence de chlorite et d'actinote et je vous ai mis entre parenthèses c'est un faciès où les pressions ne sont pas très élevées. Je vais avoir une basse pression et une température pas très élevée également. Vous pouvez écrire basse température. On n'est pas dans cette partie du graphique. On est plutôt dans la première partie de température. Il faut vraiment aller plus profondément pour changer de faciès. Nous dans le cours, on va parler essentiellement du faciès schiste vert, schiste bleu, éclogite.

On va parler de ces trois faciès là quand on parle de subduction. Ma croûte quand elle va commencer à subduire, je vais avoir mon gabbro qui va devenir un métagabbro à schiste bleu, fin à schiste vert puis à schiste bleu et éclogite. Donc, ça on le reverra en chapitre 2. Vous allez avoir votre croûte qui va subduire, vous avez vos gabbros et vos basaltes. Ils vont transformés en métagabbro, d'abord à schiste vert puis à schiste bleu, puis éclogite. Vous verrez qu'un certain moment qu'ils vont finir par fondre en s'enfonçant, il n'y aura plus de croûte. D'accord ça ? On parle de faciès. Ça va pour la définition de faciès ? Donc, comme exemple, après vous avez comme deuxième exemple schiste bleu, les pressions sont un peu élevées. On peut dire que c'est de moyenne pression. La température et pas très élevée. Et l'éclogite c'est caractéristique des domaines de haute pression. Tout en bas dans le graphique, l'éclogite. Je sais que c'est en profondeur importante et pression importante. Voyez les profondeurs, c'est entre 48, à partir de 48 Km de profondeur là voilà, ça va pour le faciès ? Alors, j'ai d'autres documents qui sont simplifiés où vous n'avez pas le détail avec tous les minéraux. Vous avez des couleurs qui vous permettent de voir mieux ce qui se passe. Faciès à schiste vert, à schiste bleu, et éclogite. Si j'augmente ma pression en restant à température assez faible comme c'est au subduction je vais passer tout d'abord, par un faciès à schiste vert, puis schiste bleu puis par le faciès à éclogite. D'accord ? Vous avez

d'autres contextes que le subduction. Vous avez d'autres contextes, où vous allez avoir une augmentation de la température très très forte, dans ce cas là, on va passer de faciès à schiste vert à l'amphibolite. Ça va ? pour la notion de faciès ? Donc, on parlera très souvent des différents types de roches, ok. Ce matin en TP, j'avais expliqué pourquoi la zone de subduction est caractérisée par une basse température et je vous ai remis les documents avec les isothermes dans les poly, je pense que c'est le document 6 qui vous permet de revoir que au niveau de l'enfoncement de la croûte océanique, je vais avoir mes isothermes qui vont être, si vous voulez, qui vont suivre l'enfoncement de la croûte et donc il va falloir qu'elles suivent plus profondément pour trouver la même température. Autrement dit, la croûte froide, elle s'enfonce, elle prend plus de temps à se réchauffer d'où le type de conditions avec les basses températures et une haute pression. Tout ça, on a expliqué ça. Ça va ? Juste pour toi Constance, la croûte océanique elle est vieille, elle est âgée, elle est dense, et elle est froide parce que je suis très loin de l'axe de la dorsale, et du coup, quand elle va s'enfoncer dans un matériel plus chaud, elle va se réchauffer, mais elle va mettre du temps à se réchauffer, et c'est pour cela, en termes d'isothermes, en fait, ici, il y a une courbure. Tu vois, elle se réchauffait, mais elle prend du temps à se réchauffer. Du coup, j'ai une température qui est pas si grande que ça par rapport à ce que je crois. Donc, c'est pour ça, on parle de métamorphisme haute pression\ basse température. Ça va ? oui ? tu n'es pas perdue ? Bon très bien. On va suivre, vous pouvez noter :

Après subduction, là, vous avez compris, on a trouvé des indices de subductions. J'ai pas dit clairement, mais vous l'avez dit en TP. Vous avez bien un moment de subduction lors de l'histoire de la formation des Alpes. J'ai pas mis précisément dans la trace écrite. Donc, une fois que vous avez subduction. Alors après subduction de la lithosphère océanique, alors qu'est ce qui va se passer une fois que j'ai subduction. Alors ça c'est le document que vous avez juste après, je pense qui vous permet de comprendre un peu qu'est ce qui se passe. C'est le document 8. Vous avez votre lithosphère océanique qui a subduit, qui a plongé. Si on regarde, du coup, cette lithosphère océanique, elle est reliée à la croûte continentale par une ancienne marge passive. Cette croûte continentale, voyez, elle va être légèrement importée par le mouvement. Elle va un petit peu importée et donc vous allez avoir un petit bout de la croûte continentale, de la lithosphère continentale qui va plonger un tout petit peu également. On parle de subduction de lithosphère continentale. Mais, au bout d'un moment, si je continue à avoir convergence, là j'ai un contact entre deux lithosphères, deux croûtes ici qui vont être de même densité et du coup vous n'allez pas avoir le mouvement, le mouvement ne va pas continuer avec l'enfoncement de la croûte, de la lithosphère continentale sous une autre lithosphère continentale. C'est pas possible. Si je continue à converger et que toutes ont la même densité. Là je vais plus parler de convergence. Qu'est ce qui va se passer. Regardez mon schéma 3. Qu'est ce qui se passe ? Vous allez avoir des failles. Ça va se casser. Ces failles qui témoignent d'une convergence. On appelle ça faille ?

150	Lucas :Faille inverse.
151	P : Faille inverse. D'accord. C'est très bien. Vous avez des failles inverses qui vont se former. Du coup, quand je raccourcis, ça c'est votre chapitre 1. Qu'est ce qui se passe ?
152	Salma :Épaississement.
153	P : Épaississement de la croûte et mon Moho et bien va, si vous voulez, plus profond. Je vais avoir un épaississement crustal. J'ai ce qu'on appelle un phénomène de collision. Ça va ?ça ce qui va se passer après la subduction de la lithosphère océanique, nous allons observer une subduction de la lithosphère continentale. Alors, c'est en moindre mesure, mais ça va se faire comme même, subduction de lithosphère continentale puis la croûte continentale fragmente. Il faut mettre entre parenthèses failles inverses. On observe un épaississement de cette croûte et une formation de relief. Autrement dit, la chaîne de montagne. Oui ?
154	Lucas D : Nous, nous avons vu que le Moho qui est en dessous, il est plus bas ?
155	P : Alors, en fait si tu as empilement de matériel, tu vas avoir du coup plus de matériel. D'accord ?
156	Lucas D : D'accord.
157	P : Et du coup, ça va tendance à s'enfoncer dans l'asthénosphère. En fait, il va s'enfoncer parce que ...Je ne sais pas si t'as vu le petit modèle que je t'avais montré avec les bouchons. Non ?
158	Lucas D : Non.
159	P : Tu te souviens avec des bouchons des bouts de bois et quand si je mets un bout de bois dessus, j'empile du matériel, et ça va tendance à, fin, je vais rompre l'équilibre isostatique et je vais avoir un enfoncement du Moho.
160	Lucas D : Et du coup, ça s'enfonce plus au niveau du Moho ?
161	P : Bien sûr oui. Vous allez avoir enfoncement et si je supprime du matériel. Ça, on verra dans le chapitre 4, quand on fera l'érosion, là tout va remonter, ça sera juste. Là, je comprime, je raccourcis, j'empile les matériaux, et du coup mon Moho sera plus profond. Oui ?
162	Salma : Et elle demeure seule ou pas la lithosphère océanique ?
163	P : Alors cette lithosphère océanique qui s'enfouit, donc je vais avoir un métamorphisme, un métagabbro à schiste vert, à schiste bleu, éclogite et puis à une certaine profondeur ça va franchir le solidus et je vais avoir une fonte, ça va fondre et ça va se retrouver dans le manteau en fait, donc elle va disparaître. Si vous voulez, c'est le lieu de la mort de la lithosphère océanique. Ça disparaît à cet endroit là, donc ça s'enfonce puis ça va fondre complètement. Donc, on verra, ça va fondre et ça déshydrate et va aussi créer des choses au niveau continental, on verra le magmatisme des zones de subduction dans le chapitre3 ; ça va ? Donc là, vous avez un peu toutes les clés en main pour comprendre un petit peu le scénario de cette chaîne de montagne. Donc, quand j'ai parlé de la collision, c'est le terme si vous voulez ultime de cette subduction.

	<p>C'est ce qui se passe après la subduction. Et ça tout ce qu'on a vu dans le chapitre 1 avec les failles inverses, les plis, les chevauchements, les nappes de charriage, l'empilement des matériaux, l'épaississement crustal. Tout ça, c'est dans le chapitre 1. Donc, c'est les indices de la collision dans le chapitre 1. Ça s'appelait, c'était le grand 3 : les indices de l'épaississement crustal, et vous aviez les indices tectoniques, grand 1 page 130, 131. Vous avez tout dans le chapitre 1. Ça va ? Donc c'est pas la peine de noter ça, je vous ai mis ça. Donc, vous avez maintenant tout compris. On va reconstituer l'histoire de la formation d'une chaîne de montagne. Ça va ? Moi, je vous parlais des Alpes parce que c'est l'exemple qu'on a pris et du coup, je vais vous montrer les schémas qui correspondent à la formation des Alpes et les cartes associées pour vous puissiez bien comprendre comment ça se passe en réalité et les cartes, fin, sont modifiées au cours du temps.</p> <p>Oui ?</p>
164	Amina : C'est quoi une nappe de charriage ?
165	P : Alors une nappe de charriage, ça correspond si tu veux au transport d'un certain nombre de matériel sur une très longue distance le long d'une faille inverse presque horizontale, c'est sur plusieurs Km tu vas avoir des déplacements de matériaux suivant la ligne de failles mais sur plusieurs Km, on appelle ça une nappe de charriage parce qu'il y a plein de matériel qui est charrié. Ça correspond au quatrième schéma de chapitre 1. Qu'on avait vu, ils vont bien ensemble ces deux chapitres. Ça je ne sais pas si tu te souviens ce document-ci. Voilà, ça c'est la nappe de charriage. Ça va ? Oui ?
166	Lucas D : Et faille inverse c'est quoi ? Est-ce que ?
167	P : Alors, faille inverse c'est quand il y a compression et du coup tu vas avoir ton bloc supérieur qui va tendance à remonter par rapport au bloc inférieur. Donc, si je vous refais ça pour simplifier
168	Lucas D : Le bloc inférieur qui est collé à la lithosphère océanique ?
169	P : Pas forcément. En fait, t'as une faille qui se forme. D'accord, je l'ai fait dans ce sens là, mais j'aurais pu faire dans l'autre sens. Là, j'ai fait une faille.
170	Lucas D : Ce genre de faille se forme quand il y a subduction ?
171	<p>P : Oui par exemple quand il y a subduction et quand ma collision et quand on a collision. Là il y a collision, c'est ça surtout qui fait apparaître les failles inverses. Ce sont les indices de collision, les failles inverses. C'est quand tu as deux croûtes continentales se cognent, du coup au bout d'un moment, à force de comprimer, ça va finir par se casser. Donc faille inverse qui résulte d'une compression. Du coup, tu vas voir ce bloc là qui va remonter, et lui, plutôt redescendre. Ce bloc là c'est le bloc supérieur et ici c'est le bloc inférieur. Du coup comme résultat, tu vas avoir un décalage qui s'est fait et ça s'appelle faille inverse.</p> <p>Parce que c'est ton bloc supérieur qui montait par rapport à l'autre bloc. Dans ce type de faille, si vous trouvez des failles inverses dans les Alpes c'est qu'a eu collision. Donc dans les Alpes, je vais trouver pleins d'indices différents qui permettent de constituer l'ensemble de l'histoire. Ça va ? Alors, si je prends</p>

	<p>justement les Alpes aujourd'hui ce document là, je vous donnerai, je l'utiliserai comme document bilan. Voyez , il y a pleins d'indices différents. Donc, vous verrez sur ce document, je l'ai mis en couleur, vous avez une couleur qui vous permet de retrouver les témoins d'un ancien océan. Une couleur qui vous permet de retrouver les traces de la subduction, l'étape 2 après ouverture de l'océan, il y a subduction et puis les témoins de l'ancienne collision. Donc l'ancien océan s'est formé lors d'une extension avec une marge passive. Vous avez des blocs basculés, des sédiments marins, des radiolarites, qui témoignent de cette ancienne marge passive et je retrouve des roches en surface qui s'appellent les ophiolites. Gabbro, ben basalte et Gabbro avec la péridotite en dessous. Ça c'est le témoigne d'un océan. Ensuite, je vais trouver des roches métamorphiques, métagabbro, éclogite. Ces roches métamorphiques, elles témoignent d'une ancienne subduction haute pression\ basse température. Et puis, ensuite je vais trouver ben, des indices qui permettent de, ben , dire qu'il y a collision. Je vais trouver déjà de relief, une altitude de plus importante, je vais trouver des plis, des failles inverses. Je vais trouver des granites, et notamment des granites qui ont subi une fusion, fin, qui ont franchi le solidus. Donc, des granites d'anatexie qui témoignent d'une collision. Vous avez une augmentation de l'épaississement de la croûte et une racine crustale, puisque votre Moho est plus profond. Tout ce qui est en violet, ça vous permet de dire qu'il y a eu une ancienne collision. Ça va ? Et bien avant tout, ça on va constituer l'histoire des Alpes. Alors je vous ai fait un document que je vais vous distribuer, c'est celui là, je vais distribuer pas aujourd'hui, parce que tout simplement le secrétariat est fermé entre midi et 1 h. Et je voudrai le tirer en couleur, c'est plus difficile à comprendre donc ce schéma vous l'aurez demain. Donc, vous mettez grand 2 le scénario type des étapes de la formation d'une chaîne de montagne. on ne voit plus une chaîne de montagne parce que mon document un peu plus gros, donc, de chaîne de montagne, exemple les Alpes. Cela c'est les Alpes que j'ai pris en exemple. Donc, le scénario type des étapes de formations d'une chaîne de montagne c'est la dessus vos camarades sont tombés en synthèse.</p>
172	<p>Amina : Est-ce que c'est possible qu'on met deux fois, fin deux années de suite le même ?</p>
173	<p>P : C'est possible, on peut jamais prévoir. Alors, on vous a mis les parties où vous avez des continents et en bleu les parties où vous avez l'océan. Donc, avec les couleurs ce ne sont pas mal pour bien visualiser.</p> <p>Alors au tout départ, on est à une époque ou on est à 245 Ma. Au niveau de la croûte, vous voyez que la croûte n'est pas la même que celle actuelle, l'Amérique du nord a été collée à l'Afrique. D'ailleurs, il n'avait pas. On distinguait pas l'Amérique de l'Afrique. Vous avez un seul et même continent et ce méga continent vous savez certainement, il s'appelle la Pangée. Pangée, c'est toutes les Terres. Pan en grec c'est tout et gée correspond à la terre, au géosphère. Alors, tout été collé. Ça va ?</p> <p>Et puis, je suis dans ce contexte là, j'ai la croûte continentale des granites qui sont présents, qui s'installent, se reposent sur un manteau avec le Moho qui est</p>

	<p>la limite entre le rouge et le vert. Donc vous avez des sédiments. Au départ tout est stable et puis je vais avoir un premier mouvement avec si vous voulez séparation de mer plaque, elle va subir une divergence des deux blocs. Et du coup, cette divergence, on voit ici, vous allez avoir un étirement, du coup ma croûte continentale. Elle va s'amincir, c'est ce qu'on appelle un rifting, le rifting. Et il va y avoir formation d'un rift, d'un fossé d'effondrement, et si je continue à étirer, ben, mon fossé d'effondrement, il va donner lieu à, si vous voulez à la remontée de matériel qui est en dessous et puis on va avoir l'apparition de la croûte océanique avec le début de la formation de l'océan. Ça c'est l'histoire au départ. Alors, ce schéma 3 correspond à cette carte-ci.</p> <p>Vous voyez, qu'on a tellement étiré que finalement que vous avez la croûte océanique qui apparaît avec de l'eau. Donc, vous avez l'océan alpin. Vous allez me dire que c'est pas si grand océan mais comme-même un océan. Ça va ?</p> <p>Donc, ça se passe en -140Ma.</p> <p>Vous voyez qu'il y a beaucoup de temps entre le point de départ et puis cette histoire fin cette étape numéro 3.</p> <p>Donc, là j'ai créé mon océan, je retrouve les blocs basculés avec le rifting qui a eu lieu avant. Donc, là j'avais rifting, ouverture de l'océan. Je continue l'histoire, alors vous regardez la carte qui se trouve ici. Oui ?</p>
174	Salma : Juste l'eau de l'océan, je ne comprends pas comment il arrivait là ?
175	P : L'eau qui arrivait ici. En fait, comme tu as un fossé d'effondrement, tu as un relief négatif. Ben, le creux si tu veux est comblé par les eaux de pluies et donc ça va faire une grande masse d'eau au fur et à mesure du temps. Ça se fait progressivement, ça fait pas d'un jour au lendemain et comme ça un océan qui arrive, non ça prend des millions et des millions d'années. C'est très long. Oui ?
176	Lucas : C'est quoi ces traits ?
177	P : Ben, c'est le fait que vous avez les plaques, vous avez une dizaine de plaques qui sont à la surface du globe et ces plaques qui sont des plaques lithosphériques qui sont rigides et cassantes, elles reposent sur l'asthénosphère qui est plus ductile, qui est plus élastique. Du coup, c'est pas stable, ça bouge et il y a des endroits où il y a convergence et il y a et d'autres endroits où vous avez divergence. Le fait que ça bouge d'un côté, forcément ça peut converger, si tu fais le globe terrestre. Le globe terrestre ici, là les plaques. D'accord ? C'est divisé en une douzaine de plaques en 3D, forcément en 2D. Si celle là bouge par là, tu vois, tu vas avoir des divergences et des convergences dans des zones ou autres. C'est pas très stable, ça bouge.
178	Lucas D : Je pense que c'est des croûtes continentales. Fin, ce ne sont que des lithosphères continentales.
179	P : Oui.
180	Lucas D : Mais pourquoi la lithosphère océanique ?
181	P : Après sur tes plaques, tu peux avoir des plaques mixtes. Sur une plaque, tu peux avoir un bout de continent et un bout d'océan sur la même plaque. Je suis pas ? Si, je suis claire ?
	En fait, il faudra un document avec des plaques. Est-ce que j'ai ça ?

182	Lucas D : Juste on dit...
183	P : Oui, mais j'aurais bien comme même...Il sera bien que vous puissiez voir ce que ça donne à grande échelle. Il faut que je trouve un document avec les cartes des plaques. Parce que ça, on fait ça en quatrième. Vous avez des plaques lithosphériques. Vous avez des plaques constituées seulement de continents, et vous avez d'autres qui sont mixtes. J'essaye de trouver un document pour la prochaine fois, pour montrer les plaques. Bon, je reprends mon fil de l'histoire. Vous êtes ici. D'accord, là. Vous avez ouverture de l'océan alpin. Regardez très bien cet océan Alpin. En fait, on sait qu'il va y avoir subduction, qu'il va disparaître. Ça veut dire qu'il y est convergence. Regardez ce qui se passe. En fait, là au même temps que vous avez ouverture de l'océan alpin, vous avez ouverture de ce grand océan qui est l'Atlantique. Et cette plaque là, cette plaque là, la plaque africaine, au lieu d'aller dans ce côté là. En fait, ce qu'elle va faire, c'est sur l'autre diapo, elle va tendance à tourner mais dans ce sens là, à converger mais comme ça. Je sais pas si vous voyez bien et regardez ce qui se passe. Voyez, elle a convergé comme ceci et du coup là je vais avoir subduction dans ce schéma-ci, jusqu'à collision avec formation de mon relief et formation de la chaîne de montagne. Mes deux plaques finissent par se cogner entre elles pour former le relief. Ça va ? Bon, ça c'est le scénario. Donc ce document je vous donnerai sous forme de poly colorée. Ça va ? ça vous devez être capables de le reconstituer, en fait l'histoire d'une chaîne de montagne. Après, il y a des documents qui sont un peu plus succincts dans votre poly de TP, tout à l'heure. Ça va ?
184	Amina : Madame, là est ce que où je peux faire convergence ou divergence, j'ai des failles ?
185	P : Ain, chaque fois que vous avez mouvement de plaques, effectivement ça risque d'engendrer des failles et à partir du moment où vous avez fracture, vous allez avoir un foyer sismique et vous allez avoir des ondes sismiques. Alors, après en période, en zone de subduction, vous allez avoir énormément de foyers sismiques tout le long de votre plongée de la croûte océanique. Et du coup, vous allez avoir une forte activité. C'est pour cela, on appellera une marge active. C'est parce que au niveau de cette marge il y a beaucoup d'activité sismique et volcanique. Ça va ? Ok. Au niveau de la trace écrite, vous pouvez noter. Donc, c'est dans le grand II. On distingue trois grandes étapes : Petit un : Première étape c'est au tableau. L'expansion océanique, donc je vais maintenant plus vite. Le rifting qui est à l'origine de l'ouverture de l'océan, l'ouverture de l'océan, l'expansion océanique. Ça va ? Petit deux : la fermeture océanique. Vous pouvez mettre à ce moment là, il y a convergence lithosphérique et subduction puis collision continentale. Troisième étape : collision continentale, donc vous pouvez mettre, toujours c'est la convergence. J'ai pas remis, mais c'est toujours la convergence, cette fois-ci entre deux croûtes continentales. L'épaississement de la croûte, donc, ce qu'on a dit ce qu'on a dit précédemment épaississement crustal avec présence d'une

racine crustale. Donc, vous pouvez mettre : on constate la présence d'indices pour chaque étape et je vous donnerai la poly avec les trois couleurs. Tout ce que je vous ai dit précédemment, ben, les indices qui permettent de dire qu'il y a expansion océanique, les indices qui permettent de dire qu'il y a eu subduction et les indices qui nous permettent de dire qu'il y a eu collision avec le scénario de la formation de Alpes sous forme de poly colorées. Vous mettez voir poly.

Alors, si je revois sur le diagramme pression\ température, on voyait que vos roches qui vont s'enfouir, vont suivre ce domaine là de haute pression\ basse température et vont passer du coup dans le faciès schiste bleu, puis élogite. Vous avez d'autres types de gradients métamorphiques qu'on peut observer également.

Ok, il nous reste à voir dans ce cours là, la partie sur l'origine de la subduction. Pourquoi votre croûte tout d'un coup commence à entrer en subduction, donc ce qu'on appelle le moteur de la subduction. Alors, vous laissez de place pour coller vos poly. Vous avez deux poly à quatre à coller. Je ne sais pas après si vous arrivez un cahier ou un portefeuille. Il y a deux poly à quatre, plus une demi page avec les trois couleurs. Je vous donnerai demain. Donc, vous pouvez noter ensuite comment expliquer la subduction. Comment expliquer pourquoi la croûte s'enfonce finalement et ça va être le grand quatre. Non, c'est grand trois. On va expliquer ça dans le grand trois. Alors moteur de subduction.

La question que les scientifiques se sont posés, en fait la lithosphère, elle est toujours normalement en équilibre sur l'asthénosphère. Comment ça se fait là tout à coup elle va plonger. C'est comme même surprenant. Donc, vous avez déjà une idée de la raison. En fait, par rapport à la densité et la nature de cette croûte océanique au niveau des zones de subduction qui va être responsable de la subduction. On fera des exercices là-dessus. Ça va ? Donc, il faut noter déjà tout ce que je dis. Vous pouvez noter : Au cours de son vieillissement, la lithosphère océanique s'hydrate, et se refroidit. Elle s'hydrate parce que vous avez des petites fissures, en fait, dans la lithosphère et puis vous avez des blocs qui s'infiltraient et du coup, si vous voulez hydrater la roche tout simplement. Alors, donc elle se refroidit à cause de cette hydratation notamment, mais aussi parce qu'elle s'éloigne de l'axe de la dorsale. Plus la lithosphère océanique est agée, et plus la température est faible. Voilà, la limite lithosphère-asthénosphère c'est une limite...En fait, c'est une isotherme, c'est une limite e température, c'est l'isotherme 1300°. D'accord, cette isotherme 1300° du coup elle va se situer à une profondeur différente, en fonction de l'endroit où je me trouve par rapport à l'axe de la dorsale. Là en rose, si je creuse un petit peu, je vais être limite à 1300° parce qu'il fait très chaud à ce niveau là, parce que vous avez remontée du magma. Plus je m'éloigne, plus la lithosphère refroidit, plus je creuse plus profondément pour arriver à 1300°. Donc, je vais avoir mon lithosphère qui va être plus épaisse si vous voulez, plus je m'éloigne de l'axe de la dorsale. C'est pour cela, si vous voulez qu'on représente, ici vous avez l'asthénosphère : partie ductile et ici la partie rigide. La séparation entre l'asthénosphère et la lithosphère c'est bien une limite thermique. Attention, on parlera rare de séparation asthénosphère-lithosphère et la séparation croûte-

manteau.

Vous savez que la séparation croûte-manteau, c'est la séparation, c'est le Moho. D'accord ? C'est une différence de nature. Votre croûte océanique là c'est Gabbro, basalte. Le manteau c'est la péridotite. Là la croûte, elle est en violet, c'est ce que je vous mets le tout début de chapitre. La lithosphère c'est le violet plus le vert clair. Et en dessous, vous avez l'asthénosphère. Ça va ? Je vous reparlerai demain. Voilà ça va ?

A demain.

Annexe 8. La transcription de la quatrième séance de la séquence étudiée

La quatrième séance de notre séquence a eu lieu le 11 janvier 2019 (de 16h à 15.30h) en classe de Terminale S (32 élèves, Lycée kernanec marcq en baroeul). Cette séance a été consacrée à l'étude de la formation des chaînes de montagnes- Un exemple : Les Alpes (suite).

186	<p>P : Ok, allez, on est parti(s). Donc vous avez trouvé en entrant dans la salle les poly couleurs que je vous ai promis hier avec les scénarios de la formation des chaînes de montagnes. Chutt. Allez s'il vous plaît, vous allez trouver le poly bilan avec les trois couleurs, les différents indices, et vous avez un poly comme ceci en noir et blanc sur le moteur de la subduction.</p> <p>Alors, on y va pour l'exploitation de ce document. Je reprends ce qu'on a vu hier. C'est bon, chutt, s'il vous plaît. Alexis c'est bon, on se dépêche, c'est déjà 25. Donc hier, vous avez la limite entre la lithosphère et l'asthénosphère, ici en vert clair avec un bout de croûte, un bout de manteau supérieur et l'asthénosphère qui se trouve en dessous. Cette limite c'est une limite thermique. Autrement dit cette limite c'est la limite 1300°, l'isotherme 1300°. Renaud ? Plus je m'éloigne de l'axe de la dorsale, plus cette lithosphère est froide, plus elle est vieille. Et du coup, plus ma limite thermique elle va être profonde pour obtenir 1300°C. Je vais être obligée si vous voulez de creuser si vous voulez plus profondément. Je vais avoir la limite lithosphère-asthénosphère qui va être plus profonde au point numéro 3 qu'au point numéro 1. D'accord ? Vous allez voir que plus elle est épaisse cette lithosphère, elle va tendance à subduire, à s'enfoncer.</p> <p>Pour avoir des calculs, on va voir quand cette lithosphère ne flotte plus sur l'asthénosphère. Mais quand elle va tendance effectivement à s'enfoncer dans l'asthénosphère. Donc, concernant la trace écrite, je pense que j'ai pas le temps de vous faire noter. Je vais déjà vous noter ce que je viens de dire. Vous avez écrit quoi comme phrase hier ?</p>
187	<p>Constance : Plus on s'éloigne de la dorsale, plus la lithosphère est âgée.</p>
188	<p>P : D'accord, vous pouvez noter : comme la limite lithosphère-asthénosphère est une limite thermique. Donc comme la limite lithosphère-asthénosphère est une limite thermique. Entre parenthèses, 1300°, la baisse de température de la lithosphère là, lorsqu'on s'éloigne de la dorsale. On va pas tout répéter. Donc, cette baisse de température entraine une augmentation de l'épaisseur du manteau lithosphérique.</p> <p>Alors, la croûte océanique est d'épaisseur constante. Voyez ici, la partie violet, la même épaisseur partout, mais si j'ai une augmentation de l'épaisseur du manteau lithosphérique, je vais avoir au bilan lithosphère+ partie supérieure du manteau supérieur. Tu vas avoir une épaisseur qui est plus épaisse. Ça va ? Donc, vous pouvez noter : la lithosphère océanique est constituée d'une croûte océanique environ 6Km, associée à du manteau lithosphérique dont l'épaisseur augmente quand on s'éloigne de la dorsale. Ça va ? Donc tant que</p>

	<p>votre densité moyenne de cette lithosphère, c'est-à-dire croûte + manteau lithosphérique. Tant que cette densité moyenne, elle est inférieure à la densité de l'asthénosphère. Qu'est ce qui se passe s'il y a un matériel moins dense qui se retrouve au dessus d'un matériel plus dense. Votre matériel qui est dessus il va, il va quoi faire ?</p>
189	Lucie : Bouger.
190	P : Il va ?
191	Lucas D :Se déplacer.
192	P : Alors, il peut se déplacer. Si vous avez un matériel moins dense au dessus d'un matériel plus dense. Si vous mettez du glaçon à la surface de l'eau, c'est vos glaçons, vont faire quoi ?
193	Plusieurs élèves (au même temps) : Couler.
194	<p>P : Ils ne vont pas, ein, couler. S'ils sont moins denses, ils flottent. Si vous prenez votre bassine, vous ferrez l'expérience à la maison. Prenez une bassine, vous mettez de l'eau. Au dessus, vous mettez des glaçons. S'ils sont moins denses, ils vont flotter. Si vous mettez du matériel plus dense, ça va couler. Si j'ai une lithosphère plus dense que l'asthénosphère. Qu'est ce qui va se passer, si je dépasse 3,25. Je vais avoir un enfoncement, une subsidence. On va essayer de faire des calculs. Voir au point 1, votre lithosphère elle flotte au dessus de l'asthénosphère. Et voir au point 3, si votre lithosphère est plus dense en moyenne ou moins dense que l'asthénosphère.</p> <p>Alors, pour regarder la densité, vous avez plusieurs données. Il y a dans ce document, vous avez la densité de la croûte, ici, on vous met 2,9. Je vous dis 2,7 toujours. Non, 2,9 parce qu'on est au niveau de la croûte océanique, elle est plus dense que la croûte continentale. C'est bon ? Vous avez la densité du manteau lithosphérique est de 3,3 et vous avez une épaisseur du manteau et de la croûte qui n'est pas identique, la croûte est moins épaisse que le manteau lithosphérique, comment puis-je faire pour mesurer une densité moyenne au niveau numéro1 ici sur le document. Il va falloir que je rende compte de deux facteurs. Quels sont les deux facteurs que je vais rendre compte ? Je vais calculer une densité moyenne ici de toute cette colonne ici la colonne 1.</p>
195	Lucas D : Celui du manteau lithosphérique et celui de la croûte lithosphérique.
196	P : Oui, je vais rendre compte la densité de chaque partie puis.
197	Lucas D : On divise par deux.
198	P : Est-ce qu'on divise par deux ? Est-ce que je fais la moyenne comme ça ? densité de la croûte+ densité du manteau lithosphérique divisé par deux.
199	Maxime : Non, c'est pas ça. Leur hauteur qu'on rend compte.
200	<p>P : Oui. Vous devez avoir deux critères qui sont pris en compte. Vous avez la densité de chaque partie et puis vous avez la densité de chaque partie et puis l'épaisseur de chaque partie. Vous comprenez ? Donc, au niveau du calcul, si je calcule la densité moyenne de ce point numéro 1. Si j'admets que vous avez au niveau du point numéro 1. Voyez, dans la fiche ici de l'exercice. On va dire que la croûte océanique mesure à peu près 6 Km de profondeur. Je vais multiplier ce chiffre avec la densité, donc 6 Km x la densité indiquée 2,9. Je vais</p>

	<p>additionnée l'épaisseur du manteau lithosphérique présent au niveau de ce point 1. Si j'avais ce manteau il faut à peu près 4Km d'épaisseur ici sur la première colonne. Je vais avoir 4 Km x la densité du manteau lithosphérique 3,3.</p> <p>3,3 si je prends comme hypothèse. Ici, j'ai 6Km pour la partie bleu et ici 4 km pour la partie vert clair. Voilà, ajoutez dans votre document, c'est le document qui est en noir et blanc. Ça va ? Je vais obtenir une valeur de 30,6. D'accord ? Pour un total d'épaisseur 6+10, c'est-à-dire une épaisseur totale de 16 Km. Ça va ? Donc, en densité moyenne cette lithosphère au point numéro, je vais avoir 30,6 divisé par 10. Et donc, vous avez 3,06. Je vais comparer cette densité moyenne de la lithosphère à la densité connue de l'asthénosphère. La densité connue de l'asthénosphère c'est 3,25. Autrement dit, j'ai une valeur qui est inférieure à 3,25, à la densité qui est en dessous, à la densité qui est en vert foncé. Donc, à cet endroit là au point numéro 1, votre lithosphère est ce qu'elle a tendance à flotter ou à s'enfoncer dans l'asthénosphère ?</p>
201	Lucas D : Flotter.
202	P : Elle a tendance à flotter. D'accord ? Il ya un équilibre isostatique qui existe. Elle est en équilibre. Elle flotte au dessus, elle est en équilibre. Donc, cette densité moyenne de la lithosphère, c'est au point numéro 1. Elle est inférieure à la densité moyenne de l'asthénosphère. Si je vous remets les valeurs, vous avez 3,06 est inférieure à 3,25. Et donc, au point numéro 1 vous avez un équilibre isostatique. Vous n'avez pas de subsidence. Elle est. Il n y a pas d'enfoncement. Votre lithosphère, elle flotte au dessus de l'asthénosphère. Ça, c'est des petits calculs que vous devez être capables de refaire dans ce cadre là. Vous pouvez répondre au QCM à partir de ces activités là. Ça va ? On peut faire le calcul au point numéro 2 et au point numéro 3. On calcule au point numéro 2, ça va être exactement la même chose sauf que vous allez avoir des épaisseurs qui vont être différentes. Oui ?
203	Lucas D : Est-ce que ça veut dire du coup, au point 3, c'est supérieur de l'asthénosphère. Ce qui crée la solution. C'est ce qu'on cherche ?
204	P : Oui .C'est ça. En fait, si vous avez au point 3 une densité moyenne qui est supérieure à 3,25. Ça veut dire que votre lithosphère avec votre manteau lithosphérique + la croûte ont tendance à s'enfoncer, et ça ce qui explique la subduction. C'est le moteur de la subduction. Vous comprenez le rapport avec ce qu'on vient de voir ? Effectivement, si ça commence à s'enfoncer, ça va expliquer votre plaque océanique elle plonge au dessous de la plaque continentale. Et du coup, les roches basalte, Gabbro vont s'enfoncer, ils vont subir un métamorphisme, métagabbro, etc...ça va ? Donc, c'est ça le rapport avec les cours. Donc, on va faire le calcul au point numéro 3. Ça, c'est le point numéro. Alors, sur le document, on ne voit pas bien, si c'est indiqué ici. On voit les distances 6 Km l'épaisseur, plus (+) 60 Km de manteau lithosphérique. Alors, si je fais le calcul. C'est la même chose. Ein $(60 \times 2,9) + (60 \times 3,3)$. Alors, le calcul donne la valeur de, de. Ein, je pense j'ai pas noté les détails, je pense que vous avez une calculette. Et ça je dois le deviser sur quoi pour avoir le

	résultat final.
205	Lucie : 66.
206	P : Sur 66. Sur l'épaisseur maximale, j'obtiens une valeur autour de 3,26. Ça, ça correspond à la densité moyenne de la lithosphère au point numéro 3. Cette densité moyenne si elle est 3,26, elle est donc supérieure. Alors ?
207	Lucas : Elle s'enfonce.
208	P : Et du coup, elle s'enfonce. Du coup, il y a subsidence. D'accord ? Vous avez une densité moyenne de la lithosphère au point numéro 3 qui est supérieure à la densité moyenne de l'asthénosphère. Et dans ce cas là, je vais avoir du coup subsidence de ma lithosphère océanique et comme elle s'enfonce, si vous voulez, c'est ça qui va expliquer la subduction. C'est le moteur de la subduction. C'est pour ça vous avez enfoncement, c'est pas magique, ça s'enfonce. Du coup, il faut que votre densité moyenne, elle soit plus grande et ça s'explique par le fait que la température est plus froide quand je suis à distance de l'axe de la dorsale. Et du coup, la limite entre lithosphère-asthénosphère, forcément, elle va être plus profonde. Ça va ? ça, vous devez savoir le point 2. Vous pouvez faire le calcul, il n'y a pas des données précises des valeurs, mais, on peut faire le même type de calcul. Une fois vous avez fait l'exercice, vous allez être capables de faire 10 fois le calcul avec d'autres valeurs. Ça va ? Vous êtes pas perdus ? Oui ?
209	Lucas : Pourquoi déjà il y a plus de lithosphère, quand on s'éloigne de la dorsale ?
210	P : Ici ?
211	Lucas : Oui.
212	P : Alors, je reprends.
213	Lucas : Parce que c'est poussé non ?
214	P : Alors, c'est poussé effectivement, vous allez avoir remontée du magma. Ici à chaque fois vous avez décalage .D'accord ? ça se pousse comme ça. Ça, c'est le modèle du tapis roulant. Vous avez une maquette l'année dernière. Je peux vous montrer une vidéo si vous voulez. En tout cas, plus je m'éloigne, plus c'est froid. C'est vrai ce coté là, c'est vrai aussi ce coté là, parce que le schéma n'est que d'un coté, mais c'est vrai ce coté là. C'est symétrique si vous voulez. Et donc, du coup plus c'est étroit, plus mon isotherme elle va être profonde. L'isotherme est la ligne où vous avez la même température partout. Là, l'isotherme c'est l'isotherme 1300° et si tu veux c'est la limite entre la lithosphère et l'asthénosphère.
215	Lucas : Ce qui fait la limite c'est la température. C'est pas la différence des roches ?
216	P : Non . En fait, ici c'est du manteau, c'est la péridotite partout. En fait, simplement tout va avoir un comportement de roche différent si je suis à moins 1300°, je vais avoir un comportement plutôt rigide et cassant. Si je suis à 1300°, en fait c'est la limite au niveau de laquelle mon matériel va devenir ductile, ou il va devenir élastique.
217	Lucas : Oui.

218	<p>P : Donc, vous pouvez noter : En tant que la densité de la lithosphère océanique est inférieure à celle de l'asthénosphère, elle flotte sur l'asthénosphère. On dit qu'elle est en équilibre isostatique. Ça va ? si ? Alors, vous n'êtes pas obligé de copier chaque fois, vous notez petit d lithosphère. Ein. Si la densité de la lithosphère dépasse à celle de l'asthénosphère. Si la densité de la lithosphère dépasse à celle de l'asthénosphère, l'équilibre isostatique est rompu, la lithosphère s'enfonce, on parle de subsidence. C'est ce phénomène qui est le principal moteur de la subduction. Ça va ? Alors ça explique qu'au niveau de l'âge de la croûte océanique, vous pouvez pas trouver la croûte océanique qui date deux milliards d'années, parce que à un moment forcément, c'est trop lourd et ça réalise la subsidence. Vous allez avoir plongement et du coup, disparition de la croûte. Ça explique que votre âge de la croûte océanique, de lithosphère océanique n'excédera pas 200 millions d'années. Ça va ? Donc, je vous ai mis ces documents là, pour que vous puissiez comprendre. Vous avez toutes les densités moyennes sans que vous ayez de calcul à effectuer, mais au départ, j'ai une densité moyenne de 3,2. C'est en équilibre. Ici, c'est en équilibre, c'est 3,20. Là, c'est juste c'est égal. Et à partir de 3,25, je vais avoir. Ça va amorcer pour la subduction. Ça va finir par subduire. Du coup, vos gabbros vont subir des transformations. Ça va ? Alors, avant de terminer, vous avez un document je pense c'est le 6 que j'ai pas exploité dans le cours. Je viens de parler tout de suite. C'est le 7. C'est ce document –ci. J'entendrai au moment du magmatisme, mais cette croûte une fois qu'elle va subduire, vous avez un relief négatif ici qui est la fosse. Les roches vont subir des modifications, le métamorphisme. Vous avez ici au début, quand la subduction s'amorce, cette croûte océanique elle va s'hydrater et du coup, en s'hydratant, cette croûte va subir des modifications de minéraux, et je vais être dans le faciès schiste vert. C'est pour cela, vous avez petits points verts ici.</p> <p>Quand je plonge sous la croûte continentale, je vais avoir du coup l'apparition de minéraux comme le Glaucophane. Je vais passer dans une situation de schiste bleu. Vous avez une élévation de la température. Vous avez déshydratation de la roche et je vais passer dans un faciès à Eclogite, c'est les petits points rouges que vous avez ici sur le document. Ce document là, je ne vais pas le faire en couleur parce que tout simplement, il est dans votre livre, vous le retrouvez, le document là dans le livre et on verra que cette plongée va être à l'origine d'un magmatisme et ça c'est mon chapitre 3 que je commencerai Lundi après Bac Blanc. Ça va ? Alors, j'ai terminé mon chapitre 2, je vais vous donner très rapidement une date de DS sur le chapitre 1 et 2. Pour le Samedi, est ce que vous avez des trous après le bac blanc ?</p>
221	<p>Toute la casse : Non.</p>
222	<p>P : Non, pas de trous. Alors, je vais être obligée de faire ça Vendredi sur le chrono de SVT. Donc, vous allez prendre votre agenda, Vendredi 25 Janvier DS Chapitre 1 et 2 géologie. Oui ?</p>
223	<p>Amina : Est-ce que s'il vous plait on peut le mettre bien Lundi.</p>

224	P : Oui, Lundi 28, du coup.
225	Amina : Parce qu'on a DS Physique.
226	P : Ok, on va changer alors. On va le mettre au 28 Janvier. Opp. Il faut le dire quand vous êtes comme ça, on n'est pas trois jours près. C'est juste, moi j'ai le weekend pour corriger mais je préfère que vous réussissiez plutôt que ce soit la catastrophe. Donc le 28. Vous avez noté ?
227	Toute la classe : Oui.
228	P : Alors, on va pas traîner, on va faire les exercices distribuées, les exo. On y va. Donc, vous avez une carte, on vous précise il s'agit de massif de l'Arize. Cette carte elle comporte plusieurs roches, roches A, B, C, D, E et F. Vous avez une carte équivalente dans votre livre de cette région de Pyrénées. On vous dit c'est une chaîne de montagne récente. On observe différentes roches, témoins des phénomènes tectoniques (collision, etc). Ils vous demandent de répondre à un QCM à partir des documents. Vous avez alors une carte et un diagramme pression-température, avec la transformation des minéraux associés. Alors avant de regarder le QCM, on va regarder un peu la carte et qu'est ce qu'on peut vous dire ? Vous avez donc les roches A : ce sont schiste à chlorite. Alors, le schiste. Ronand et Alexis. En fait, ce sont des roches qu'on n'a pas bien étudié du schiste, je pense. En fait, les schistes ce sont des roches qui comportent une schistosité, ça veut dire qu'elles ont un aspect un peu en feuillets. Et ce sont des roches du coup métamorphiques. Alors ça, vous pouvez le noter dans le document. C'est à connaître. C'est une roche qu'on la retrouve souvent dans les documents, dans les exercices. C'est une roche métamorphique : schiste, micaschiste, tout ça c'est des roches qui proviennent de la transformation de roches qui proviennent de la transformation de roches initiales et qui ont subi un changement de pression et de température. Donc, il vous dit schiste à chlorite, ça veut dire que dans ces roches là, on va trouver des minéraux qui s'appellent les chlorites. Si vous regardez votre diagramme le document 2, vous verrez que la chlorite c'est un minéral de basse température. Ça va ? Je vous mets le diagramme à l'écran, je me placerai dans cette partie là du diagramme pour la roche A. J'ai des conditions avec une température peu élevée. Ça va ? Pour tout le monde ça ? Si je prends maintenant petit b en gris foncé Micaschiste à biotite et muscovite. ça doit pas vous faire peur tous ces mots micaschiste c'est un schiste qui comporte beaucoup de mica, c'est une roche métamorphique et il vous dit, dans cette roche, on peut retrouver des minéraux : la biotite, vous la connaissez. C'est un mica noir & la muscovite c'est un mica blanc. Alors, je vois, c'est indiqué ici. Vous voyez ? Autrement dit, j'ai une température un peu plus élevée, fin, un métamorphisme avec une température un peu plus élevée pour cette roche là. Et si je regarde le document, il vous dit qu'il y a premier type de réaction qui va se produire : c'est que le chlorite va se transformer en Biotite. Si j'augmente cette température, je franchis la limite ici, la limite avec le trait. C'est cette limite quand je vais vers la roche B. ça va toujours ? Alors ensuite j'ai une roche C, et il vous dit cette fois-ci que j'ai la biotite, la muscovite

	<p>et j'ai un tout petit nouveau. J'ai l'andalousite. Alors l'andalousite elle est ici. Si vous placez ma lettre dans le diagramme, je vais placer la lettre C quelque part ici. Ça va ? J'ai petit d Gneiss. Ça vous le connaissez, Gneiss. Oui, qu'est ce qu'il y a Lucas ?</p>
229	<p>Lucas : Par rapport à la muscovite, c'est écrit micaschiste à muscovite. C'est où la muscovite ?</p>
230	<p>P : Alors la muscovite</p>
231	<p>Lucas : C'est le suivant ?</p>
232	<p>P : Donc muscovite, il vous indique ici muscovite. Donc, vous allez regarder muscovite avant cette limite là, c'est, c'est, on va retrouver la muscovite ici partout. Mais puisqu'il y a de la biotite, je suis forcément dans cette zone ici. D'accord ?</p> <p>Bon, en tout cas j'ai franchi la limite chlorite-biotite. Après j'ai l'andalousite. Donc, j'ai encore augmentation de la température. Ensuite, j'ai du Gneiss. Sillimanite. Alors, la sillimanite elle est ici. Autrement, je déplace comme ça mon diagramme. D'accord ?</p> <p>Sillimanite. Et la roche E, on vous dit c'est un mélange de Gneiss avec du granite et ça vous connaissez la définition. C'est quoi ça, un mélange de Gneiss avec du granite ? ça s'appelle comment d'après votre cours ? ça commence par un M. Un migmatite. Vous n'avez pas encore révisé parce que vous avez Bac Blanc. Une migmatite, ça témoigne d'une fusion partielle. L'autre fois, je vais franchir le solidus et on a une fusion partielle pour avoir une recristallisation, je vais avoir des roches mélangées qui s'appellent des migmatites.</p> <p>Après j'ai une roche un peu spéciale. La roche F qui s'appelle le granite de Bousсенac. Alors, c'est une roche magmatique. Ça va ? A l'aide de ces documents, ils vous posent des questions. On vous dit : la roche qui témoigne d'un franchissement de la courbe d'anatexie. Alors, il y a beaucoup de mots. Anatexie ça veut dire quoi ? C'est quoi comme synonyme. J'ai pas si je l'ai utilisée dans le cours. Je pense que oui, mai j'ai du doute. Ehhh. Anatexie, vous pouvez mettre en rouge sur le document, ça fait partie de vos connaissances, égale fusion partielle. Alors, si je vous traduis Anatexie égale fusion partielle. Quelle est la roche qui témoigne, ben, d'une fusion partielle ?</p> <p>Vous notez dans la légende, einn, est ce que c'est la roche A,B,C,E ?</p>
233	<p>Salma : E.</p>
	<p>P : C'est la roche E. J'ai franchi ma limite ici. Je ne vois plus. J'ai franchi le solidus, c'est la limite entre solide et liquide et c'est bien la roche E qui fallait choisir. Voyez que la difficulté dans ce sujet, c'est un exercice de type 1,2,3 sur 3 points, la grande difficulté c'est le vocabulaire : Anatexie , si vous savez que c'est fusion partielle , forcément vous comprenez. D'accord ? ça vous le retrouvez. Ein. Anatexie égale fusion partielle.</p> <p>Ensuite, on vous dit, sachant que la roche grand D n'a pas subi de fusion partielle, autrement dit, elle est avant ou après ce solidus ? Est-ce qu'elle est à gauche ou à droite du solidus ?</p>

234	Lucas : A gauche.
235	<p>P : A gauche. Alors, vous avez la partie solide et à droite vous avez la partie liquide. Donc, ça se trouve forcément avant ce franchissement. Une zone qui n'a pas subi de fusion partielle, c'est la roche D. On vous propose 4 solutions pour ces conditions. Est-ce qu'elle est formée au même temps à une température de 600° et une profondeur de 15 km. Ou alors à 600 Km et une pression 0,2 GPa. Alors, il vous met des pièges parce qu'on change l'unité. Vous avez une flèche ici avec la pression en Giga Pascal. A coté vous avez les chiffres qui correspondent 0,2 ; 0,6 ; 1 ; 1,4 . De l'autre coté, vous avez des chiffres qui correspondent à des profondeurs en Km 15,35, 45 ; Vous voyez 1 Giga Pascal, ça correspond presque à 35 Km. Ça va ? Vous comprenez à ce qu'on pense ? Ou alors associer à une température 680° et pression 0,2 GPa ou de température 700° et pression 0,6.</p> <p>Je vous laisse essayer de positionner votre roche D d'après les minéraux. Essayez de trouver la bonne solution soit par élimination des mauvaises solutions ou soit par. Fin, on trouvera. Essayez de chercher deux minutes.</p> <p>Vous testez ein les roches. On vous dit comme même que la roche D, elle a de la sillimanite et des feldspaths potassiques. Donc, vous avez le droit d'utiliser vos minéraux et elle est avant la limite solide-liquide. Vous allez me colorier sur votre diagramme la partie qui correspond.</p> <p>Est-ce qu'il y a quelqu'un qui peut me montrer où ça se trouve ? Va y, vient.</p>
236	Lucas D : Au tableau ?
237	P : Oui. Tu montres juste par ton doigt le secteur.
238	Lucas D : En fait, on colore ce secteur. Il vous dit qu'il y a sillimanite.
239	P : Alors touche pas, tu fais juste par ton doigt, mais si tu touches ça donne la prochaine.
240	Lucas D : Et il y a de feldspaths mais c'est liquide. Du coup, on doit regarder. N'est-ce-pas ? Je sais pas comment dire.
241	P : Alors ces feldspaths potassiques. Mais tu dois encore... On vous dit, je crois, c'est roche solide. N'est-ce-pas ? Elle n'a pas subi fusion partielle.
242	Lucas D : Zutt. C'est bien du coup, t'as la première. C'est 600° et 15Km. Donc, c'est ça ta sillimanite.
243	<p>P : Oui. Donc, montre-moi juste la zone concernée.</p> <p>[L'élève montre la zone concernée] J'ai pas vu.</p>
244	Lucas D : Eh ?
245	<p>P : J'ai pas vu, hhh.</p> <p>[L'élève remontre la zone concernée]. Oui voilà. Est-ce que vous avez compris ou pas ? Oui ? Alors je vous remontre. Je vous remontre. Merci, c'est gentil.</p> <p>Alors, vous avez ici la limite muscovite + Quartz, on vous dit ici, donne feldspath potassique+ silicate d'alumine. Donc, je suis forcément dans cette zone ici. Mais je veux être avant le solidus. Le solidus, c'est les petits pointillés ici. D'accord ? Je me retrouvais quelques part ici. D'accord ? En fait, il faudra que je . Il faut que vous coloriez dans votre truc., vous coloriez le solidus. Ça va forcément se trouver avant le solidus, dans quelque part ici. Je veux ma</p>

	<p>sillimanite. Il faut alors que je me retrouve après cette limite là, dans ce triangle ici et je me retrouvais avant le solidus. Le solidus, il passe là en gros. Et je veux du feldspath. Donc, je me retrouve après cette ligne là. D'accord ?</p> <p>En gros, il n'y a pas beaucoup de solutions, ma place est bien précise dans le diagramme. Vous comprenez ? Je me retrouvais avec de la sillimanite, de feldspath, et avant le solidus je me retrouvais quelque part, quelque part ici. Et bien ça, j'ai des températures qui sont supérieures à 650°. D'accord ? Entre 600 et ici. Et au niveau pression, ma pression elle doit être avant si vous voulez, avant cette ligne là. Si je regarde, elle doit être vers 15 Km maximum. Oui ?</p>
246	Lucas : Donc la réponse 3.
247	P : Alors, j'ai pas regardé les propositions, je voulais juste expliquer la position. Alors, est ce que la 1 et la 2 sont possibles ?
248	Plusieurs élèves au même temps : Non.
249	P : Non, parce que la température indiquée est trop faible, 600 est trop faible. Je suis au dessus. Ça va ? Après, j'ai pas, si j'ai des stylos je vais colorier ce truc . Si normalement il y a une possibilité de faire ça. Je tente ma chance. Non, si je fais ça, voyez, vous êtes au dessus de feldspaths, au dessous de solidus. Donc c'est ici . Je me suis entrain de faire n'importe quoi. Voyez, c'est cette partie là que je voudrai colorier. C'est rigollot, mais pour vous montrer, c'est cette partie là. D'accord ? Alors la a et la b ne marchent pas. Vous avez choisi la c ou la d ?
250	Maxime : La c.
251	P : La c, donc 0,6 et GPa c'est trop grand. Donc, quand vous avez ce type d'exercices, ne cochez pas par hasard, vous réfléchissez et vous essayez de retrouver pile la bonne zone dans le diagramme. Oui ?
252	Guerlain : [...]
253	P : Quoi ?
254	Guerlain : On peut recommencer l'expérience ?
255	P : Oui, je recommence. Einn, du coup j'ai un truc bizarre ici, mais c'est pas grave. Alors, on te dit dans le document, c'est la roche D. ça va ? Donc, je veux dans la roche D, je veux de sillimanite, et je veux de feldspath potassique. Ça va ça ?
256	Guerlain : Oui .
257	P : Je veux donc de la sillimanite, je vais la trouver toute ici. Je peux la colorier en ligne jaune par exemple. Ça va ? Je veux de feldspath potassique. Du feldspath potassique, je vais le retrouver tout ici. Donc, j'avais deux. Donc, forcément je vais me retrouver quelque part ici.
258	Guerlain :Ça va .
259	P : Ça va, mais il te dit attention, je dois être avant le solidus.
260	Guerlain : Oui.
	P : Le solidus, c'est les petits pointillés là. Donc, je vais me retrouver ici. Si je vais le colorier, je vais essayer de le faire, si je vais colorier, je vais colorier tout ça. D'accord ? Et après, je lis mes températures et mes pressions qui sont possibles, il n'y a qu'une seule possibilité. Oui.

261	Amina : Et si ça dépasse 0,2 [...], Fin,ehh.
262	<p>P : Là, c'est pas possible, je vais choisir 0,2. C'est par élimination. Est-ce que ça va ? Oui ? Est-ce que vous avez compris ces histoires ? C'est important ça parce que dans toutes les dates de Géo, vous avez des diagrammes pression\ température dans tous les sujets. Si vous avez compris une fois comment ça marche, vous savez le faire. Ça va ? On continue. Du nord vers le sud, sur votre carte, donc le nord il est ici, donc forcément le sud, il est de l'autre côté. On vous dit, est ce que la succession de roches témoigne d'une augmentation de température, d'une augmentation de pression et d'une diminution de température ou d'une diminution de pression et d'une augmentation de température.</p> <p>Alors pour répondre à cette question, en gros vous avez les points A,B,C, D, E à aligner dans votre diagramme pression\ température et de voir globalement c'est la température qui augmente, c'est la pression qui augmente ou est ce qu'il y a diminution de température ou diminution de pression.</p> <p>On y va. Vous avez déjà fait le boulot pour la roche D. La roche E, elle se trouve plus au sud. On a dit, elle témoigne d'une fusion partielle, donc elle est de l'autre côté. Donc là je vais avoir E, fin D, E. Si je place les points A ;B ;C ;D. Je vous ai dit la A, j'ai la chlorite ; la B, j'ai la biotite ; la C, j'ai l'andalousite ; la D, je me retrouve ici. J'ai feldspath potassique et la E. Donc, qu'est ce qui se passe ? Vous avez essentiellement une ?</p>
263	Lucas + Lucas D + Mathis : Augmentation de température.
264	P : Augmentation de température. Si j'avais une augmentation de pression, quel minéral apparaîtra dans mes roches ? Le ? j'ai entendu
265	Gabin : Le disthène.
266	P : Le disthène, c'est toi, c'est bien Gabin. Regardez, on n'a jamais disthène. Ça veut dire qu'on est toujours au dessus. Donc on a une pression qui n'est pas si élevée, donc ça va être surtout augmentation de température dans le cas des Pyrénées, ici dans le massif de l'Arize. Ça va ? Voyez, on exploite le cours mais c'est beaucoup de documents.
267	Lucas D : Est-ce que lorsqu'on a déjà parlé hier de lithosphère, c'est, c'est que haute pression, basse température observées ?
268	P : Alors quand on avait parlé. C'est bien ça. Quand on a parlé , écoutez, c'est super intéressant ce qu'il a posé comme question Lucas. Il dit mais hier quand on a parlé de subduction, on a dit haute pression- basse température, et là vous parlez d'augmentation de température. C'est vrai, alors mais vous n'avez pas que de la subduction dans une formation de chaîne de montagne. Vous avez quoi d'autre comme étape ? Vous avez une ouverture d'océan, deux une subduction et trois ?
269	Lucas D : Collision.
270	P : Collision. D'accord, alors collision c'est encore un autre métamorphisme. Vous comprenez ? Voilà, ça le témoin plutôt d'une collision. C'est une chaîne de montagne récente. Mais c'est une très bonne question. Est-ce que ça va avec cet exercice là ? Ben, vous allez gagner trois points sur

	les 16 déjà, rien qu'on faisant ça. Oui ?
271	Amina : Madame, si on aurait mis une diminution de pression. Est-ce que ta fusion est inachevée ?
272	P : Alors, diminution de pression, et une augmentation de température, c'est ça ? C'est ça ce que vous voulez dire ?
273	Amina : Oui.
274	P : La D. Alors je réfléchis. Diminution de pression. En fait, elle est déjà faible au départ la pression dans la roche D, l'andalousite, alors c'est déjà la pression basse. Tu vas pas encore avoir diminution de pression, elle est déjà basse la pression. Alors, on y va pour le massif central. Ça va bientôt sonner. Ce que je vous propose, le massif central, vous regardez à la maison. Là il y a bac blanc, je vous laisse tranquilles ce weekend parce que ce weekend est terrible pour vous. Vous avez bac blanc semaine prochaine, je vous souhaite bon courage. Ça va aller et le weekend suivant après le bac blanc, vous réalisez ça. Vous essayez de voir si vous savez faire, vous déterminez des indices. D'accord ? Au revoir.

INDEX

INDEX NOMINUM

A

Ahlbrand, 241, 267
Astolfi, 32, 159, 264
Aubouin, 45, 264
Aubuisson de Voisins, 58, 62, 264

B

Bachelard, 20, 21, 22, 23, 98, 264
Bakhtine, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 264, 266
Barthes, 33, 264
Borzeix, 33, 264
Bronckart, 37, 38, 264, 265

C

Chalak, 98, 265
Collingwood, 20, 21, 265
Coseriu, 33, 265

D

Delamétherie, 58, 265
Deparis, 45, 74, 77, 86, 87, 265
Dewey, 21, 22, 23, 127, 265
Ducancel, 32, 265
Durand-Delga, 67, 72, 79, 265

F

Fabre, 18, 21, 22, 23, 24, 108, 111, 127, 131, 132, 133, 134,
1, 266, 270
Fisher, 33, 266
Forsyth, 46, 266
François, 33, 34, 36, 266

G

Gallay, 57, 66, 266
Garcia, 24, 25, 266
Gohau, 28, 29, 57, 59, 60, 62, 63, 65, 66, 67, 71, 72, 73, 74,
266
Grize, 33, 39, 267

H

Hall, 63, 267
Hallam, 40, 42, 44, 77, 79, 83, 85, 267
hétéroglossie, 35, 39, 194, 195, 196, 200, 218, 228, 230,
231
Hoetker, 241, 267

J

Jacoby, 45, 267

Jaubert, 33, 34, 35, 37, 267

Jeffreys, 82, 86, 267

Jolivet, 5, 17, 18, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51,
53, 54, 180, 191, 210, 211, 212, 226, 253, 261, 268, 273,
293, 294

K

Kerbrat-Orecchioni, 108, 123, 268

L

Lévy, 46, 268

Lhoste, 5, 16, 17, 18, 21, 24, 32, 33, 40, 111, 132, 1, 268,
270

M

Martinand, 25, 26, 27, 268, 269

Mercier, 15, 93, 97, 268

Merleau-Ponty, 33, 268

Meyer, 21, 34, 36, 268

N

Nicolas, 48, 49, 268

Nonnon, 33, 268

O

Orange, 5, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 28, 29, 30,
31, 38, 40, 43, 47, 49, 51, 58, 59, 64, 69, 70, 73, 93, 94,
95, 96, 97, 98, 108, 111, 131, 132, 134, 266, 269, 270

Orange Ravachol, 5, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 24, 27, 28, 29,
30, 31, 38, 40, 43, 49, 51, 58, 59, 64, 69, 70, 73, 94, 95,
97, 269, 270

Oxburgh, 45, 270

P

Peterfalvi, 32, 264

Popper, 37, 270

R

Rebière, 33, 34, 35, 37, 197, 267

Retif, 60, 270

Ricoeur, 270

S

Saury, 139, 270, 302, 313

Savaton, 57, 66, 67, 78, 270

Schneeberger, 32, 270

T

Thomas, 74, 77, 265
Touret, 66, 67, 68, 71, 270
Turcotte, 45, 270

U

Uyeda, 46, 266

V

Vergnioux, 25, 270
Vérin, 32, 264
Veyrunes, 139, 143, 1, 241, 270, 302, 313, 319

Vion, 143, 271
Volochnov, 271
Vygotski, 32, 266, 271

W

Wegener, 3, 58, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 92, 216,
265, 271, 330, 331, 360
Wells, 271
Werner, 57, 58, 60, 265, 271
Wittgenstein, 33, 271

Y

Young, 60, 61, 271

INDEX RERUM

A

accrétion, 44, 45, 53, 54
activité, 16, 20, 21, 24, 27, 31, 32, 33, 34, 35, 38, 40, 44, 71,
82, 83, 87, 90, 98, 109, 188, 270, 284, 317, 342, 351, 375
actualisme, 20, 28, 29, 30, 31, 39, 48, 49, 51, 54, 69, 70,
96, 206, 287
actualisme de premier niveau, 29
apodicticité, 21
apodictique, 22, 23, 31, 38
apprentissage, 20, 21, 31, 32, 33, 38, 39, 93, 94, 96, 98,
108, 109, 267, 268, 269
approche historico-culturelle, 32
argumentations, 34, 99, 131, 241, 302
assertions, 21, 134, 142, 166, 174, 309, 323, 343
assertorique, 22, 23

C

catastrophisme, 31, 69, 70
charriage, 48, 49, 54, 72, 73, 74, 77, 97, 119, 160, 276, 279,
280, 281, 282, 287, 291, 306, 307, 308, 309, 371, 372
collision, 16, 17, 39, 40, 41, 42, 43, 47, 51, 52, 53, 54, 56,
90, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 104, 108, 109, 111, 114, 118,
119, 120, 122, 124, 131, 134, 135, 159, 160, 162, 165,
166, 167, 207, 208, 210, 221, 222, 224, 225, 231, 232,
233, 234, 240, 243, 258, 259, 262, 280, 281, 285, 286,
289, 301, 302, 305, 306, 307, 308, 309, 316, 317, 322,
323, 327, 328, 334, 335, 338, 339, 340, 342, 344, 345,
351, 356, 357, 371, 372, 375, 383, 387
concept, 16, 17, 36, 88, 90, 143, 151, 1, 161, 267, 302, 309,
313, 319, 320
condition de possibilité, 61, 65, 72
contexte, 16, 35, 36, 40, 42, 47, 50, 53, 54, 90, 95, 96, 112,
119, 122, 125, 176, 188, 205, 218, 253, 261, 301, 302,
303, 304, 311, 312, 313, 315, 316, 318, 319, 320, 321,
342, 344, 345, 347, 348, 350, 351, 352, 356, 373
contraintes, 21, 22, 24, 26, 27, 31, 38, 39, 43, 44, 45, 47,
48, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 59, 64, 68, 70, 75, 76, 79, 80,
84, 85, 88, 99
controverses, 32, 34, 59, 60, 76, 88, 98, 131, 1, 160, 240,
241, 258, 302, 318
cours dialogué, 139, 143, 144, 1, 159, 189, 240, 241, 242,
243, 258, 270, 302, 309, 313, 318

D

débat, 16, 93, 94, 97, 98, 108, 127, 143, 159, 241, 269, 293,
302, 308, 318
décontextualisation- recontextualisation, 96
développent, 23, 99
dialectique, 22, 23
dialogique, 34, 35, 36
difficultés, 6, 16, 17, 18, 49, 55, 56, 90, 93, 94, 97, 109, 111,
177, 178, 240, 252, 279

E

empirique, 25, 26, 27, 29
exhumation, 42, 50, 54, 97, 226, 277
explication, 16, 24, 25, 29, 30, 31, 46, 48, 53, 54, 55, 56, 57,
59, 61, 62, 63, 69, 84, 90, 97, 134, 144, 1, 160, 177, 181,
184, 185, 186, 189, 191, 199, 221, 223, 225, 229, 233,
240, 241, 258, 266, 270, 303, 320, 339
explicitation, 16, 18, 54, 93, 118, 197, 335

F

faits, 3, 21, 22, 23, 25, 26, 1, 181, 199, 215, 351, 352
formation des chaînes de montagnes, 16, 17, 40, 41, 42,
43, 47, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 58, 59, 61, 62, 63, 64, 66,
67, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 83, 84,
85, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 108, 109, 114,
118, 131, 134, 135, 159, 165, 166, 167, 206, 207, 222,
240, 243, 258, 259, 261, 262, 286, 293, 305, 316, 323,
328, 334, 338, 339, 340, 342, 343, 344, 355, 366, 378

G

genre, 36, 37, 38, 161, 278, 307, 308, 317, 318, 320, 355,
372

H

hétéroglossie, 35, 39, 194, 195, 196, 200, 218, 228, 230,
231
histoire des sciences, 17, 56, 88, 90, 109

I

idées, 17, 22, 23, 25, 33, 56, 61, 71, 73, 78, 83, 109
impossible, 60, 86, 90
interactions, 16, 27, 31, 32, 37, 136, 143, 177, 268, 271,
300, 305, 311, 316, 322, 326, 334, 338, 339, 342

J

juste, 98, 134, 143, 151, 152, 159, 198, 224, 280, 285, 295,
296, 309, 319, 320, 347, 348, 355, 356, 366, 371, 382,
383, 385, 386

L

l'actualisme de deuxième niveau, 29, 30, 49, 54
langage, 16, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 264, 265, 267,
271, 299
le concept, 1, 249, 258, 287, 303, 309, 314, 319, 320

M

métamorphisme, 50, 51, 54, 120, 147, 148, 151, 152, 151,
1, 160, 161, 162, 169, 170, 171, 180, 190, 192, 193, 197,
198, 199, 213, 214, 217, 226, 227, 228, 229, 230, 234,
235, 249, 252, 260, 276, 293, 297, 329, 331, 334, 358,
359, 360, 363, 366, 371, 380, 382, 383, 387
mise en texte, 269
modèle, 17, 25, 27, 43, 51, 56, 57, 61, 64, 66, 71, 72, 76,
77, 81, 82, 83, 86, 88, 90, 95, 187, 215, 216, 218, 230,
233, 254, 264, 270, 306, 330, 331, 332, 334, 360, 371,
381
modélisation, 17, 24, 26, 27, 40, 57, 58, 59, 61, 64, 68, 70,
72, 74, 76, 79, 82, 84, 85, 268, 269

N

nécessaire, 22, 30, 49, 50, 51, 53, 54, 65, 67, 69, 70, 84,
190
nécessité, 21, 23, 30, 44, 45, 46, 47, 50, 52, 53, 54, 59, 64,
68, 69, 75, 80, 84, 98, 1, 184, 191
nécessités, 17, 18, 22, 23, 27, 31, 38, 42, 43, 47, 51, 52, 54,
56, 59, 64, 68, 69, 84, 88, 93, 99, 109, 111, 1, 242
négociations, 160, 240, 309

O

obstacles, 59, 64, 65, 71, 72, 81, 86, 88, 89, 90, 109, 266

P

phénomène, 29, 30, 42, 44, 48, 49, 52, 54, 56, 59, 61, 62,
66, 67, 68, 88, 93, 95, 96, 99, 108, 109, 1, 207, 208, 210,
233, 291, 306, 334, 371, 382
pratiques langagières, 16, 31, 32, 36, 37
principe, 20, 23, 28, 29, 31, 206, 287, 295
problématique, 22, 38
problématisation, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 28,
31, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 42, 43, 52, 57, 58, 61, 63, 66,

68, 72, 74, 79, 84, 86, 93, 94, 98, 108, 109, 142, 144, 1,
160, 161, 188, 198, 240, 258, 261, 262, 269, 270, 309,
320
problème, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 35, 36,
40, 43, 49, 56, 58, 64, 68, 69, 70, 75, 78, 79, 80, 84, 93,
94, 95, 96, 97, 103, 108, 109, 127, 133, 165, 167, 169,
171, 172, 174, 180, 190, 199, 205, 207, 211, 215, 217,
219, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 228, 230, 231, 234,
235, 253, 258, 261, 262, 266, 277, 278, 282, 322, 324,
328, 329, 332, 334, 336, 338, 339, 345
problèmes, 5, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 24, 25, 28, 31, 32, 37,
38, 43, 47, 53, 94, 98, 108, 109, 111, 174, 176, 177, 178,
241, 258, 262, 266, 268, 269, 336

R

raisonnement, 18, 23, 109, 195, 200, 218, 228, 230, 240,
249, 253, 254, 260, 293
reformulations, 33, 34, 39, 307
registre des modèles, 26, 27
registre empirique, 25
registre explicatif, 27, 28, 43, 54, 56, 68, 84, 253
reprise-modification, 182, 183, 184, 186, 192, 194, 195,
196, 208, 213, 216, 221, 223, 227, 229, 233
ruptures, 17, 56, 61, 109

S

savoir, 15, 17, 20, 21, 23, 31, 32, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41,
42, 52, 57, 58, 61, 63, 66, 68, 72, 74, 79, 84, 98, 109, 127,
142, 143, 144, 152, 1, 160, 166, 188, 198, 200, 235, 241,
258, 266, 276, 279, 290, 291, 298, 309, 318, 320, 328,
366, 381
savoir raisonné, 23, 309, 320
savoirs, 15, 21, 24, 25, 27, 32, 96, 98, 131, 135, 265, 266,
267, 269, 270, 309
savoirs solutions, 21
secondarisation, 38, 267
séquence ordinaire, 16, 17, 94, 97, 98, 258, 261, 265
signification, 33, 36, 161, 343
situations, 15, 16, 20, 31, 38, 93, 94, 95, 97, 98, 268
subduction, 41, 42, 45, 47, 49, 50, 54, 90, 95, 96, 97, 101,
102, 103, 104, 106, 107, 113, 112, 114, 118, 119, 120,
122, 124, 125, 126, 135, 136, 137, 138, 143, 144, 147,
148, 149, 150, 152, 151, 1, 159, 160, 161, 162, 165, 166,
169, 170, 171, 174, 180, 184, 187, 188, 191, 192, 193,
194, 195, 196, 197, 198, 199, 207, 210, 213, 214, 217,
218, 219, 222, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 234, 235,
249, 252, 253, 260, 268, 273, 274, 275, 276, 277, 278,
279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 288, 289, 290,
291, 292, 293, 294, 300, 301, 302, 303, 305, 306, 307,
308, 317, 318, 320, 322, 323, 326, 327, 328, 329, 331,
334, 335, 336, 342, 345, 352, 355, 356, 357, 358, 359,
360, 361, 362, 363, 366, 371, 372, 375, 378, 380, 381,
382, 387

V

vrai, 134, 148, 149, 174, 194, 196, 199, 275, 309, 346, 359,
361, 362, 363, 381, 387

Titre : Pratiques des savoirs, pratiques langagières et problématisation en sciences de la terre : le cas du problème de la formation des chaînes de montagnes de collision en terminale scientifique

Résumé :

Notre recherche s'intéresse à la problématisation en sciences de la Terre. Elle vise à comprendre comment les élèves de terminale scientifique peuvent s'engager dans la construction du concept de la formation des chaînes de montagnes de collision lors d'un débat scientifique observé pendant une séquence ordinaire, consacrée à l'étude du thème « la convergence lithosphérique : contexte de formation des chaînes de montagnes ». Cela nous donnera des informations cruciales sur le potentiel de ces séquences ordinaires lorsqu'elles sont étudiées dans le cadre de la problématisation. Ainsi, nous présentons dans un premier temps la manière dont les scientifiques (actuels et dans les cadres théoriques anciens) expliquent ce concept en nous inscrivant dans le cadre de la problématisation (Orange, 2000 ; Orange Ravachol, 2010 ; Lhoste, 2017). Ces repères épistémologiques vont nous permettre de mener dans un deuxième temps une analyse épistémologico-langagière du débat enregistré. Cette analyse va nous aider à déterminer les nécessités qui sont ou non construites par les apprenants, les registres explicatifs qu'ils mobilisent et dégager certaines difficultés rencontrées chez eux dans la construction de ce problème. Ce faisant, nous repérons et discutons les problèmes qui sont vraiment posés par les élèves.

Mots clés : Problématisation, séquence ordinaire, pratiques des savoirs, pratiques langagières, la formation des chaînes de montagnes, Terminale S

Title : Knowledge practices, language practices, and problematization in earth sciences: the case of the problem of mountain chain formation in terminal scientific class

Abstract :

Our research concerns the problematization of Earth sciences. It aims to understand how students in their last year of scientific high school courses can get involved in building a concept of how mountain ranges were formed by collision during a scientific debate observed during an ordinary sequence that studies "Lithospheric Convergence: Context of How Mountain Ranges Were Formed".

This will give us crucial information on the potential these ordinary sequences have when they are given in the framework of problematization. We thus will begin by presenting the way scientists (current ones as well as those with ancient theories) explain this concept following a problematization framework (Orange, 2000; Orange Ravachol, 2010; Lhoste, 2017).

This epistemological information will then allow us to carry out an epistemological and language analysis of the debate recorded. This analysis will help us determine necessities, whether or not learners have expressed them, explanatory registers used, and the difficulties that they are encountering in the construction of this problem. By doing this, we'll identify and discuss the problems that students are actually concerned about.

Keywords : Problematization, ordinary sequence, Knowledge practices, language practices, the problem of mountain chain formation, terminal scientific class
