



Université
virtuelle
de Tunis



I.S.E.F.C
de Tunis



UNIVERSITÉ DE NANTES

Université
de Nantes



U.F.R des
lettres et
langages

Année 2012

La problématisation dans la théorie de la tectonique des plaques et l'utilisation du temps, de l'espace et du fonctionnement

Par

Les élèves tunisiens de la troisième année sciences expérimentales

THÈSE DE DOCTORAT

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'université de Tunis et Docteur de l'université de Nantes
Discipline : sciences de l'éducation
Spécialité : didactique des sciences de la Terre

Maroua MEJRI OTHMANI

Le /06/2012

Directeurs de thèse

Christian ORANGE et Mahmoud DLALA

Jury

M. Mahmoud DLALA, Professeur, Université de TUNIS.

M. Christian ORANGE, Professeur, Université de NANTES.

Mme. Atef AZZOUNA, Professeur, Université de TUNIS.

Mme. Maryline COQUIDE, Professeur, Ecole normale supérieure de LYON.

Co-directeur

Directeur

Rapporteur

Rapporteur

Dédicace

Je dédie cette recherche à mes deux fils Louay et Koussay qui ont fait des sacrifices énormes malgré leur très jeune âge pour que je puisse me consacrer à cette recherche.

Je dédie aussi ce travail à mon mari Adel, qui m'a encouragée et qui m'a aidée énormément. Je n'oublie pas mes parents et mes deux sœurs qui m'ont encouragée et m'ont poussée à entamer cette recherche et à la terminer.

Je dédie cette recherche à mon pays la Tunisie et au peuple tunisien en espérant que cette recherche ajoute un plus à l'éducation des sciences de la Terre en Tunisie.

Remerciements

Dans ce parcours de recherche effectuée en cotutelle entre l'Université de Tunis et l'Université de Nantes, mes remerciements vont à Monsieur Christian Orange Professeur à l'université de Nantes et à Monsieur Mahmoud Dlala, Professeur de géologie à l'université de Tunis El Manar, mes deux directeurs de thèses qui ont accepté de diriger ce travail de thèse.

Merci à « l'unité de recherche UR 99/ 10-11 » et au C.R.E.N., les deux laboratoires qui constituent une source bibliographique riche et intéressante pour le fondement théorique de cette recherche. Je dois ma reconnaissance à l'IUFM des Pays de la Loire pour m'avoir facilité l'accès aux sources bibliographiques pour faire aboutir ce travail. Je remercie aussi le Ministère de l'Enseignement Supérieur Tunisien et l'Institut Français de Coopération pour le financement de ce travail qui a été assuré par des bourses d'études.

Je remercie particulièrement Madame Atef Azzouna, Professeur à l'université de Tunis et Mme Maryline Coquidé, Professeur à l'École normale supérieure de Lyon, qui ont accepté d'être les rapporteurs de ce travail et pour l'intérêt qu'elles ont porté à cette recherche.

Mes remerciements vont aussi au corps administratif de l'université de Nantes en particulier à Florence Moreaux et Joëlle Pottier pour leur disponibilité permanente.

Merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour que je puisse accomplir ce travail et en particulier Hanène Allaya, Madame Nabila Chaâbani et Chiraz Ben Kilani pour leur encouragement.

Mes remerciements vont également aux collègues qui m'ont « prêté » leurs classes afin que je complète mon corpus de données: Monsieur Slimeni El Guedri, mon professeur des SVT au lycée Iben Abi Dhiab la Manouba, aujourd'hui retraité et Madame Laïla Soltani, professeur des SVT au lycée de l'indépendance oued El Lil, ainsi que leurs élèves qui sans eux, cette recherche n'aurait pas existé.

Résumé

Ce travail de recherche porte sur la problématisation dans le cadre de la tectonique des plaques. Nous cherchons à voir les différentes utilisations de l'espace au cours de la problématisation de la répartition des faits géologiques à la surface du globe, les types de mécanismes construits au cours de la problématisation du moteur du mouvement des plaques et les différentes utilisations du temps au cours de la reconstitution de la naissance de l'Atlas Tunisien. L'analyse des productions des élèves orales et écrites est faite en référence au modèle théorique de la tectonique des plaques actuellement admis et à une réflexion épistémologique sur l'histoire des sciences de la Terre. Les résultats obtenus montrent une variabilité dans les figures d'espace et du temps rencontrées chez les élèves ainsi qu'une variabilité dans la modélisation du mécanisme moteur du mouvement des plaques. Certaines difficultés sont liées au rapport qu'entretiennent les élèves avec le temps et avec l'espace. Les difficultés liées à l'espace ont une influence sur la figure de temps choisie par l'élève et sur la nature du modèle proposé pour expliquer un mécanisme et inversement. Nous retenons que la problématisation en sciences de la Terre exige l'articulation du temps, de l'espace et d'un fonctionnement. Il est difficile de problématiser un phénomène géologique dans un cadre historique sans faire appel à une figure d'espace et à un fonctionnement. Nous proposons de problématiser le contenu géologique dans un cadre spatial, historique ou fonctionnaliste en tenant compte des effets provoqués par l'interférence des utilisations du temps de l'espace et du fonctionnement pour un problème donné.

Mots clés : problématisation- temps- espace- fonctionnement- débat scientifique-

la théorie de la tectonique des plaques- espaces de contraintes- difficultés- conception

ABSTRACT

This research task concerns the problematization in the context of plate tectonics. We seek to see the various uses of space during the problematization of the distribution of geological facts to the surface of the globe, the types of mechanisms built during the problematization of the engine of plate movement and the various uses of time during the reconstruction of the birth of the Tunisian Atlas. The analysis of the pupil's productions oral and written made in reference to the theoretical model of plate tectonics and a currently accepted epistemological reflection on the history of science of the Earth. The results show variability in the figures of space and time experienced by the pupil as well as variability in the modeling of the driving mechanism of plate movement. Some difficulties are bound to the relationship of pupils over time and with space. The difficulties bound to time have an influence on the shape of space chosen by the pupil and the nature of the proposed model to explain a mechanism and conversely. We hold that the problematization in Earth Sciences requires the joint of time, of space and of a functioning. It is difficult to problematize a geological phenomenon in a historical setting without using a figure of space and to a functioning. We suggest to problematize the geologic contents in a spatial, historic or functionalist frame by taking into account the effects caused by the interference of the uses of the time of the space and the functioning for a given problem.

Keywords: problematization- time- space- functioning- the theory of the plate tectonics - space of constraints- Difficulty -conception - scientific debate

Sommaire

	Pages
Sommaire	7
Table des figures	10
Table des dessins	13
Tables des tableaux	14
Introduction générale	15
Fondements théoriques	19
Chapitre 1 : Les sciences de la Terre entre temps, espace et mécanismes	20
Introduction	21
1. Géologie et sciences de la Terre	21
2. Les sciences de la Terre entre temps et espace	24
3. Les sciences de la Terre sciences de mécanismes	54
4. Les problèmes des sciences de la Terre	55
5. La géodynamique : une branche des sciences de la Terre	59
6. La théorie de la tectonique des plaques : pourquoi ce choix	60
7. Conclusion	61
Chapitre 2 : Problématisation dans les sciences de la Terre	63
Introduction	64
1. L'Épistémologie et la didactique des sciences de la Terre	65
2. Problématisation et modélisation dans les sciences de la Terre	69
3. conclusion	71
Chapitre 3 : Méthodologie de travail	72
Introduction	73
1. L'articulation de l'espace et du temps au fonctionnement en Sciences de la Terre	73
2. Les problèmes géologiques choisis	74
3. Les questions de recherche	77
4. Les hypothèses proposées	78
5. Méthodologie de recherche	78
Première étude : Le problème de la subdivision de la surface terrestre en plaques lithosphériques	81
Chapitre 4 : Les plaques lithosphériques et les limites de plaques	82
Introduction	83
1. Les plaques lithosphériques et les limites de plaques. (Le savoir scientifique actuel)	83
2. Réflexion épistémologique sur l'espace dans l'histoire de la construction du modèle plaquiste	86
3. L'utilisation de l'espace par les scientifiques actuels dans la compréhension des plaques lithosphériques et les limites de plaques	93
4. Problématisation de l'espace dans la notion des plaques lithosphériques et les limites de plaques par les scientifiques actuels	94
5. Conclusion	98
Chapitre 5 : Les plaques lithosphériques et les limites de plaques : Analyse didactique préliminaire des situations	99
Introduction	100

1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu	100
2. La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur	101
3. Analyse didactique préliminaire de la situation	104
4. Conclusion	106
Chapitre 6 : Les plaques lithosphériques et les limites de plaques : Explication des élèves et utilisation de l'espace	107
Introduction	108
1. le recueil des données	108
2. analyse des productions des élèves au cours de la problématisation	116
3 La compréhension de « l'espace » par les élèves (les plaques et leurs limites)	118
4 Conclusion générale de la première étude	153
Deuxième étude : Problème de mouvement des plaques (couple accréation subduction et courants de convection)	155
Chapitre 7 : Mouvements des plaques et courants de convection	156
Introduction	157
1. Les mouvements des plaques lithosphériques et les courants de convection. (Le savoir scientifique actuel)	157
2. La géologie fonctionnaliste dans l'histoire de la construction du modèle plaquiste	164
3. Problématisation fonctionnaliste du mouvement des plaques chez les scientifiques actuels	172
4. Conclusion	177
Chapitre 8 : Mouvement des plaques et couple accréation-subduction : Analyse didactique de la situation	179
Introduction	180
1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu	180
2. La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur	180
3. Analyse didactique préliminaire de la situation	181
4. Conclusion	185
Chapitre9 : Le mouvement des plaques : couplage (accréation –subduction) Explication des élèves et nécessité de l'équilibre lithosphérique	186
Introduction	187
1. Analyse et catégorisation des réponses des élèves au questionnaire	187
2. Le recueil des données	191
3. Analyse des productions des élèves	192
4. Conclusion	209
Chapitre 10 : Les courants de convections moteur du mouvement des plaques Analyse didactique de la situation	210
Introduction	211
1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu	211
2. la situation d'apprentissage et les objectifs du professeur	211
3. Analyse didactique préliminaire de la situation	212
4. Conclusion	215
Chapitre11 : Mouvements de plaques et courants de convection : Explication des élèves et nécessité des mécanismes	216
Introduction	217
1. Le recueil des données	217

2. Procédures d'analyse	217
3. Conclusion générale de la deuxième étude	235
Troisième étude : La reconstitution de l'histoire de la genèse d'une chaîne de collision intercontinentale (Cas de l'Atlas Tunisien)	237
Chapitre 12 : La formation d'une chaîne de marges: cas de l'Atlas Tunisien	238
Introduction	239
1. La compréhension de la formation d'une chaîne de montagne par les scientifiques actuels	240
2. Réflexion épistémologique sur le temps dans l'histoire de la formation des chaînes de montagnes au sens large	245
3. Problématisation du temps dans la formation de la chaîne de l'Atlas Tunisien par les scientifiques actuels	252
4. Conclusion	254
Chapitre 13 : La formation de l'Atlas Tunisien: Cadre didactique de la situation	255
Introduction	256
1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu	256
2. La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur	256
3. Analyse didactique préliminaire de la situation	257
4. Conclusion	260
Chapitre14 : La reconstitution de l'histoire de genèse de l'Atlas Tunisien: Explication des élèves et utilisation du temps	261
Introduction	262
1. Le recueil des données	262
2. Les productions des élèves	268
3. Conclusion générale de la troisième étude	294
Synthèse Chapitre15 : Articulation des trois études au sein d'une même théorie : La tectonique des plaques : mise en perspective	295
Introduction	296
1. La tectonique des plaques vue de trois angles différents	296
2. Les difficultés des élèves dans les utilisations du temps de l'espace et des mécanismes.	298
3. L'articulation du temps à l'espace et au fonctionnement dans la compréhension de la théorie de la tectonique des plaques	303
4. Conclusion	314
Conclusion générale	315
1. Les apports de notre recherche	315
2. Limites et prolongements de notre recherche	318
Bibliographie	320
Table des matières	327
Sommaire des annexes	335

Liste des figures

Figures	Pages
Figure 1.1 : Représentation schématique illustrant la multiplicité des figures d'espace suivant les conditions nécessaires de réalisation des phénomènes géologiques au niveau du globe Terrestre : conjonctures	33
Figure 2.1 Schéma modélisant l'articulation du temps à l'espace et au fonctionnement	74
Figure 4.1 la répartition des séismes et les limites des plaques actuelles extraite du livre introduction à la géologie (2000, p17)	84
Figure 4.2 la subdivision de la surface de la Terre en plaques lithosphérique extraite du livre la tectonique des plaques (2002, p56).	86
Figure 4.3 : L'espace des contraintes le cadre continentaliste chez les fixistes des années soixante (la subdivision de la surface de la Terre en continents)	96
Figure 4.4 : L'espace des contraintes chez les mobilistes des années soixante (la subdivision de la surface de la Terre en plaques)	97
Figure 5.1 : fiche d'activité pour la répartition des faits géologiques	102
Figure 5. 2 l'espace de contraintes dans la délimitation des plaques dans le contexte de la fiche d'activité	106
Figure 6.1 la première page du questionnaire distribué avant l'apprentissage	110
Figure 6.2 la deuxième page du questionnaire distribué avant l'apprentissage	111
Figure 6.3 Structure argumentative de l'épisode 1 sur la répartition des faits géologiques dans le premier débat (classe 1)	140
Figure 6.4: Le raisonnement adopté par les élèves dû à l'observation de la carte	142
Figure 6.5: Structure argumentative de l'épisode 1 sur la répartition des faits géologiques dans le deuxième débat (classe 2) : transcriptions du n°1 au n°28.	144
Figure 6.6 type 1 des espaces de contraintes construits au cours du premier épisode au premier débat : subdivision en continents	151
Figure 6.7 type 2 des espaces de contraintes construits au cours du premier épisode du premier débat : Notion de plaques lithosphériques	152
Figure 6.8 Les espaces de contraintes construits au cours du premier épisode du deuxième débat : Notion de plaques lithosphériques	152
Figure 7.1 L'espace des contraintes possibles construit chez les fixistes des années soixante (les continents sont inanimés).	173
Figure 7.2 L'espace de contraintes construit par les mobilistes des années soixante (le mouvement des plaques)	175
Figure 7.3. problème du mouvement des plaques : Espaces des contraintes des chercheurs	177

Figure 8.1 L'espace des contraintes possible pour le couple accréation subduction dans le contexte de la séance.	185
Figure 9.1 : Structure argumentative de l'épisode sur la nécessité de l'équilibre dynamique et le couple accréation- subduction dans la première classe	200
Figure 9.2 : Structure argumentative de l'épisode sur la nécessité de l'équilibre dynamique et le couple accréation- subduction dans la deuxième classe	203
Figure 9.3 l'espace de contraintes pour la catégorie1 (cas de Maïssa) pour le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre.	207
Figure 9.4 l'espace de contraintes pour la catégorie2 (cas d'Amira) pour le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre.	208
Figure 9.5 l'espace de contraintes pour la catégorie3 (cas de khaoula) pour le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre.	208
Figure 10.1 L'espace des contraintes possible pour les courants de convection dans le contexte de l'activité	214
Figure11.1 production du groupe 3'' (kelifi Amani) classe2 sur le moteur du mouvement des plaques	219
Figure11.2 production du groupe 1 (Hanen, omayma, Amira, Ameni, Amel) classe1 sur le moteur du mouvement des plaques	219
Figure11.3 production du groupe 2 (Abir, Wejden, Rihab) classe2 sur le moteur du mouvement des plaques	220
Figure11.4production du groupe 1' (Manel, maïssa et soumaya) classe 2sur le moteur du mouvement des plaques	220
Figure11.5production du groupe 4 (Takwa et Sabrine) classe1 sur le moteur du mouvement des plaques	221
Figure11.6production du groupe 3 (Kefka et Nahdi) classe1 sur le moteur du mouvement des plaques	222
Figure11.7 production du groupe 2 (Olfa, insaf et asma) classe1 sur le moteur du mouvement des plaques	223
Figure11.8 production du groupe 5 (Manel) classe2 sur le moteur du mouvement des plaques	223
Figure11.9 production du groupe 5' (Marwa et Khawla) classe2 sur le moteur du mouvement des plaques	224
Figure 11.10 Structure argumentative sur le moteur du mouvement des plaques dans la première classe	227
Figure 11.11 représentation de la trajectoire de ce débat au cours du temps	230

Figure 11.12 Structure argumentative sur le moteur du mouvement des plaques dans la deuxième classe	231
Figure 11.13 premier type de l'espace de contraintes dans la classe 1 pour le moteur du mouvement des plaques	233
Figure 11.14 'espace de contraintes dans la classe 2 pour le moteur du mouvement des plaques	234
Figure 11.15 Deuxième type de l'espace de contraintes dans la classe 1 pour le moteur du mouvement des plaques	235
Figure 12.1 disposition en arc des chaines de collision Extraite du livre les grandes structures géologiques (2000, p 224)	242
Figure 12.2. Espaces des contraintes des chercheurs dans le problème de la formation de l'Atlas magrébin	254
Figure 13.1 fiche d'activité pour la troisième étude	258
Figure 13.2 L'espace des contraintes pour la formation de l'Atlas tunisien dans le contexte de l'activité	259
Figure 14.1 le bord eurasiatique est complémentaire au bord africain avant la collision (production d'élèves)	270
Figure 14.2 le bord eurasiatique indéfini tracé à la règle ne change pas d'allure au cours du temps (production d'élèves)	271
Figure 14.3 le bord eurasiatique est personnalisé et change d'allure au cours du temps (production d'élèves)	272
Figure 14.4 la compression perpendiculaire au sens de la convergence et se trouve dans l'espace intercontinental (production d'élèves)	273
Figure 14.5 la compression perpendiculaire au sens de la convergence et touche au matériel eurasiatique (production d'élèves)	273
Figures 14.6 la compression est parallèle au sens de la convergence (production d'élèves)	274
Figure 14.7 prismes d'accrétion constituent une bande séparant les deux bords continentaux (production d'élèves)	275
Figure 14.8 les prismes d'accrétions se trouvent sur le bord eurasiatique (production d'élèves)	276
Figure 14.9 la plaque eurasiatique plonge sous la plaque africaine (production d'élèves)	277
Figure 14.10 subduction au niveau du bord africain au miocène supérieur (production d'élèves)	278
Figures 14.11 la subduction se bloque et on assiste à une collision intercontinentale (production d'élèves)	279
Figure 14.12 la subduction se bloque avant la collision intercontinentale (production d'élèves)	280
Figure 14.13 l'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas tunisien pour le cas 1 production n°17	284

Figure 14.14 L'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas tunisien pour le cas 2 production n°23	286
Figure 14.15 L'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas tunisien pour le cas 3 production n°24	288
Figure 14.16 Les deux bords ont la forme actuelle, leurs allures sont inchangées au cours du temps	289
Figure 14.17 L'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas tunisien pour le cas 4 production n°2	290
Figure 14.18 L'espace de contraintes pour la non variabilité du bord africain pour le cas 5 production n°16	292
Figure 14.19 Le bord eurasiatique ne ressemble pas à l'état actuel même lorsqu'il est engagé dans la subduction (production d'élèves)	293
Figure 14.20 L'espace de contraintes pour le blocage de la subduction pour le cas 6 production n°13	293

Liste des dessins

Dessins	Pages
Dessin 9.1 premier type de dessin pour l'explication du maintien de l'équilibre dynamique	193
Dessin 9.2 deuxième type de dessin pour l'explication du maintien de l'équilibre dynamique	194
Dessin 9.3 troisième type de dessin pour l'explication du maintien de l'équilibre dynamique	195
Dessin 9.4 quatrième type de dessin pour l'explication du maintien de l'équilibre dynamique	196
Dessin 9.5 cinquième type de dessin pour l'explication du maintien de l'équilibre dynamique	197

Liste des tableaux

Liste des tableaux	pages
Tableau 1.1. La multiplicité des « espaces » dans le neptunisme et le plutonisme	39
Tableau 1.2 : la multiplicité des temps dans la controverse "gradualisme/ équilibres ponctués"	49
Tableau 5.1 Tableau résumant la tache et le résumé pour l'explication des répartitions des faits géologiques	103
Tableau 5.2 résumant les réponses souhaitées, et les idées déduites en rapport avec les répartitions des phénomènes géologiques à la surface du globe	104
Tableau 6.1: Récapitulation des catégories de réponses pour la question 4	113
Tableau 6.2 : Récapitulation des catégories de réponses pour la question 5	115
Tableau 6.3 : Croisement des catégories de réponses des questions 4 et 5	115
Tableau 6.4 Catégorisation des réponses à la question 1 de la fiche	120
Tableau 6.5 Catégorisation des réponses à la question 2 de la fiche	122
Tableau 6.6 Tableau de croisement des réponses à la question 1 et 2 de la fiche	123
Tableau 6.7 Tableau de croisement des variables de la question 3 de la fiche	128
Tableau 6.8 Tableau récapitulatif de l'analyse selon le mode de raisonnement adopté en vers « l'espace »	138
Tableau 9.1 tableau de la répartition des catégories après croisement des variables dans l'analyse de la première question du questionnaire	188
Tableau 9.2 tableau de la répartition des catégories après croisement des variables dans l'analyse de la troisième question du questionnaire	190
Tableau 9.3 tableau récapitulatif des différents types de dessin expliquant le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre	195
Tableau 9.4 tableau récapitulatif des conceptions dominantes au cour des discussions	207
Tableau 11.1 tableau récapitulatif des différentes catégories concernant le moteur du mouvement des plaques.	224
Tableau 12.1 La multiplicité des temps pour le problème de la formation des chaînes de montagnes du 18 ^{ème} au 20 ^{ème} siècle	250
Tableau 14.1 : Récapitulation des catégories de réponses pour la question 3 du questionnaire	264
Tableau 14.2 : Récapitulation des catégories de réponses pour la question 6 du questionnaire	266
Tableau 14.3 : croisement des catégories de réponses des questions 3 et 6	267
Tableau 14.4 : La répartition des productions selon l'emplacement des indicateurs dans la reconstitution de l'histoire de l'Atlas tunisien du miocène inférieur au miocène supérieur.	281
Tableau 14.5 des croisements de variables obtenues à partir des indicateurs utilisés dans la reconstitution de la naissance de l'Atlas Tunisien	282
Tableau 15.1 Tableau récapitulatif des différentes utilisations des figures d'espaces, de temps et les mécanismes fonctionnels utilisés par les quatre élèves et l'influence qu'imposent les figures d'espace sur la nature du fonctionnement et sur le temps utilisé	312

Introduction générale

Les sciences de la Terre s'intéressent à l'étude du globe Terrestre. Elles essaient de retracer son histoire en s'appuyant sur ce qu'apportent les traces conservées dans ses roches, de comprendre les mécanismes de ces phénomènes naturels et de prévoir si c'est possible ce qui peut arriver au futur. Les sciences de la Terre utilisent dans la compréhension des phénomènes naturels et dans l'essai de la reconstitution de l'histoire géologique: Le Temps (moteur de l'histoire), l'Espace (cadre des structures géologiques) et le fonctionnement (processus de déroulement), et comme les phénomènes prennent naissance dans un espace géologique donné suite à un mécanisme donné dans une période de l'histoire, l'étude des phénomènes nécessite de prendre en compte simultanément le temps, l'espace et le fonctionnement, édificateurs des structures géologiques. Ainsi, nous remarquons que dans cette discipline et au cours de la construction du savoir scientifique, les géologues et auxquels s'ajoutent plus tard les géophysiciens se sont heurtés à des problèmes de temps (tel que la discontinuité crétacé tertiaire, la formation des chaînes de montagnes, la naissance d'un océan...), à des problèmes d'espace (tel que la discordance stratigraphique, la répartition des séismes et des volcans, la complémentarité des formes des continents...) et à des problèmes de fonctionnement (tel que le fonctionnement d'une dorsale, le cycle sédimentaire, les courants de convection...); problèmes qui ont été étudiés selon différentes approches au cours de l'histoire jusqu'à la formulation du modèle de la tectonique des plaques qui a pu résoudre certains d'entre eux et qui a permis de répondre à un certain nombre de questions. Il est donc intéressant d'étudier dans le cadre de la didactique des sciences, la nature des relations qu'entretiennent les élèves avec le temps et l'espace au cours de la construction du savoir non pas en tant que concepts scientifiques puisque les élèves reconnaissent le temps, ils savent l'orienter sur une échelle en lui attribuant une origine, le subdiviser en périodes, le limiter en intervalles de durées. Il en est de même pour l'espace. Ils connaissent aussi qu'un processus enchaîne plusieurs variables pour aboutir à la réalisation d'un phénomène, d'un produit ou encore d'une action ; mais en tant qu'utilisation dans la résolution des problèmes géologiques.

La diversité des conceptions rencontrées dans l'histoire de la géologie nous a poussés à voir comment les élèves utilisent le temps, et l'espace au cours de la construction d'un savoir en géologie et quelles difficultés rencontrent-ils au cours de la problématisation.

Utilisent-ils le temps et l'espace de la même manière que les scientifiques rencontrés dans l'histoire ou bien autrement. C'est ce qui explique notre choix pour un travail de problématisation, comme thème de recherche dans le cadre didactique.

Néanmoins, nous ne pouvons pas traiter tous les problèmes en sciences de la Terre. Nous avons donc cherché à réunir ces trois types de problèmes au sein d'un même savoir scientifique qui articule le temps, l'espace et le fonctionnement. Ainsi l'élève se trouve dans le même cadre d'apprentissage du même savoir géologique. Pour cela, nous avons choisi la théorie de la tectonique des plaques comme cadre scientifique pour nos trois problèmes étudiés, elle représente l'exemple idéal dans les sciences de la Terre pour cette recherche en didactique dans la mesure où elle étudie un globe Terrestre en activité continue, son fonctionnement dans l'espace (en expliquant le maintien permanent de l'équilibre dynamique au sein d'un dynamisme continu) et les variations détectées au niveau de l'enveloppe externe de la Terre sur des milliers de kilomètres de surface (formation des océans, formations des chaînes de montagnes, disparition de la lithosphère, création du plancher océanique) ; et dans le Temps en essayant de retracer l'histoire du globe par l'explication des phénomènes tectoniques actuels et de les projeter dans le temps passé et futur. Le modèle théorique de la tectonique des plaques est un exemple intéressant pour une étude des problèmes de temps, d'espace et de fonctionnement en géodynamique en particulier et en sciences de la Terre en général dans un cadre dynamique actualiste.

Nous avons donc choisi la théorie de la tectonique des plaques car elle résout à la fois des problèmes de temps tel que le passé d'un océan, la naissance d'une chaîne de montagnes, la disposition actuelle des plaques lithosphériques et permet de relier l'actuel au passé de la planète. Ainsi que des problèmes d'espaces tel que la subdivision en plaques lithosphériques ; et des problèmes de fonctionnement tel que le mouvement des plaques, la subduction, le fonctionnement d'une dorsale et les courants de convection...

Nous avons choisi de nous limiter seulement à trois problèmes dans ce propos :

- Un problème d'espace : Celui de la subdivision de la surface du globe en plaques lithosphériques.
- Un problème de fonctionnement : Celui du mouvement des plaques dans le but de construire le concept des « courants de convection ».
- Un problème de temps : Celui de la formation d'une chaîne de montagnes.

Nous expliquons l'ordre de classement des trois problèmes dans notre recherche selon la logique suivante :

Nous avons choisi de commencer par un problème d'espace car à première vue, la répartition des séismes, des volcans et des chaînes de montagnes ainsi que la complémentarité des formes continentales soulèvent aussitôt une question lors de l'observation de la surface de la Terre, ainsi, c'est l'espace qui nous pousse à chercher des explications. La recherche d'une lecture explicative de l'espace, renvoie à chercher les mécanismes qui ont contribué à l'apparition de ces structures c'est-à-dire renvoie à un problème de fonctionnement ; et c'est pour cette raison que nous le traitons dans une deuxième étude après le problème de la subdivision en plaques lithosphériques. Connaissant les mécanismes moteurs nous pouvons donc essayer de reconstituer l'histoire d'une structure donnée tel que la naissance d'une chaîne de montagnes, en imaginant son passé et en arrivant jusqu'à son état actuel, cela nous renvoie à étudier l'utilisation du temps que nous traitons dans une troisième étude.

Notre recherche s'inscrit dans le cadre de la didactique des sciences, cela nous emmène à nous intéresser aux représentations des élèves (Astolfi 1992) et à faire un détour par l'histoire des sciences pour reconnaître les types de raisonnements possibles et les ruptures qui ont contribué à la construction du savoir, et qui ont marqué un écart entre le savoir et la pensée commune (Bachelard, 1938). Ainsi, le choix de ces trois problèmes a été fait suite à une lecture de l'histoire des sciences de la Terre et grâce à une réflexion épistémologique. Nous avons constaté que le concept « plaque lithosphérique » s'inscrit dans la plus grande révolution dans l'histoire des sciences de la Terre depuis le 18^{ème} siècle jusqu'à nos jours et qu'il a permis de substituer à la lecture géographique une nouvelle lecture de l'Espace : une lecture géologique ayant un champ d'observation et de description plus large. Il est donc nécessaire d'étudier l'utilisation de l'espace au cours de la construction de ce concept « plaque lithosphérique ».

La conservation de l'équilibre dynamique, l'état stationnaire en apparence du globe qui se cache derrière un dynamisme permanent, mène vers un problème de fonctionnement tel est le moteur du mouvement des plaques et les phénomènes responsables du couplage de l'accrétion et de la subduction et donc de la conservation de l'équilibre lithosphérique.

Les courants de convection représentent le modèle explicatif actuel à ce problème de fonctionnement. Elles expliquent aussi la formation des structures géologiques à la surface de la Terre et leur évolution au cours du temps. Les chaînes de montagnes, par leurs altitudes remarquables en font l'exemple type pour un problème de temps.

Il est très intéressant d'étudier la naissance des Alpes, des Pyrénées ou des Cordillères des Andes du fait qu'elles représentent les exemples les plus frappants à la surface de la Terre, mais nous avons choisi de limiter notre exemple à une chaîne locale, celle de l'Atlas Tunisien, dans la mesure où il est plus familier aux élèves Tunisiens, il fait partie de leur patrimoine culturel, il figure dans leur cours de géographie, donc il représente le bon exemple pour une étude didactique dans le cadre de l'étude des utilisations du temps.

Pour s'assurer du bon choix de nos problèmes de recherche, nous avons procédé par un diagnostique « pré recherche » à la lumière du quel nous avons fixé nos trois problèmes, il s'agit d'un questionnaire dont l'analyse confirme notre choix.

Nous commençons par le développement du cadre théorique dans les trois premiers chapitres. Nous expliquons d'abord la relation qu'entretiennent les sciences de la terre avec le temps, l'espace et les mécanismes, ensuite nous rappelons le cadre didactique de la problématisation et nous situons notre recherche par rapport aux travaux déjà fait dans ce cadre.

Nous organisons cette recherche en trois études faites sur les élèves de la troisième année sciences expérimentales. Une première étude concerne le problème de la subdivision de la surface de la terre en plaques lithosphériques et les relations qu'entretiennent les élèves avec « l'espace ». Une deuxième étude concerne le problème du mouvement des plaques et les modèles construits par les élèves dans ce propos. Une troisième étude concerne le problème de la reconstitution de la genèse de l'Atlas Tunisien les relations qu'entretiennent les élèves avec « le temps ».

Dans chacune de ces études nous présentons un aperçu sur le savoir scientifique actuel, une analyse a priori des situations d'enseignement suivie d'une analyse des productions des élèves.

Nous terminons par une synthèse des trois études dans laquelle nous comparons les résultats obtenus et nous analysons l'articulation du temps à l'espace et au fonctionnement et les effets que peut produire cette articulation sur le processus de la problématisation.

Fondements théoriques

Chapitre 1

Les sciences de la Terre entre temps, espace et mécanismes

Introduction

1. Géologie et sciences de la Terre
2. Les sciences de la Terre entre temps et espace
3. Les sciences de la Terre sciences de mécanismes
4. Les problèmes des sciences de la Terre
5. la géodynamique externe : une branche des sciences de la Terre
6. La tectonique des plaques : pourquoi ce choix
7. Conclusion

Introduction

Notre recherche s'inscrit dans le cadre de la didactique des sciences de la Terre. Elle étudie les problèmes des sciences de la Terre ainsi que la construction du savoir géologique dans deux perspectives différentes, épistémologique et didactique.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les caractéristiques des sciences de la Terre comme sciences historiques (étudie les variations des structures géologiques dans le temps et l'espace) et fonctionnalistes, ce qui justifie le choix de cette étude.

1. Géologie et sciences de la Terre

1.1 Place de la Géologie dans les programmes d'enseignement tunisiens au lycée

Dans les programmes d'enseignement tunisiens, les sciences de la Terre s'articulent aux sciences de la vie mais tout en occupant la deuxième position du point de vue de leur importance. En effet ces deux branches formaient auparavant, dans les programmes d'enseignements tunisiens, les sciences naturelles jusqu'à l'année 2002 où on a changé leur dénomination pour les appeler sciences de la vie et de la Terre (SVT). Les sciences de la Terre étaient marginalisées dans nos programmes d'enseignements dans tous les niveaux scolaires et c'est à partir de 2002 que les sciences de la Terre commencent à être enseignées sur le même pied d'égalité que les sciences de la vie mais pas à tous les niveaux : au collège (7^{ème} année de base) et au lycée (en 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} année) et nous espérons que les sciences de la Terre gagnent de la reconnaissance dans tous les programmes du lycée du 7^{ème} année de base au baccalauréat et qu'elles figurent dans l'épreuve de (SVT) du baccalauréat des sciences expérimentales dans les années qui viennent.

Ces deux sciences (de la vie et de la Terre) restent couplées dans l'enseignement secondaire avec des pourcentages de 2/3 ,1/3 mais on n'a envisagé leur séparation qu'à partir de la deuxième année de l'enseignement supérieur dans la mesure où on y trouve deux spécialités les sciences de la Vie (SV) et les sciences de la Terre (ST) complètement indépendantes.

1.2 Les sciences de la Terre se substituent à la Géologie

A. Foucault et J.F. Raoult, dans le dictionnaire de géologie définissent la géologie comme suit : « La géologie est la science qui comprend l'étude des parties de la Terre directement accessibles à l'observation, et l'élaboration des hypothèses qui permettent de reconstituer leurs histoire et d'expliquer leurs agencement. » (A. Foucault et J.F. Raoult 1984). Elle regroupe un ensemble de disciplines, nous citons, la pétrologie, la volcanologie, la sédimentologie, la stratigraphie, la tectonique, la paléontologie...

Depuis l'antiquité et jusqu'au 17^e siècle la géologie beigne dans un cadre pragmatique. En effet on s'est interrogé sur les phénomènes catastrophiques (les volcans ou les séismes, l'origine des minerais...) qui touchent de près l'humanité sur le plan de la sécurité et aussi sur le plan industriel et économique. Jusqu'à ce que, en 1807, une communauté de savants à Londres fonde « la Geological Society » ; la même chose a eu lieu en France 23 ans après : la fondation de « la Société Géologique » en 1830. Ces années représentent le virage qui a favorisé un passage d'une géologie ancienne vers une géologie moderne dont l'objet d'étude constitue la planète Terre. La naissance de la géologie moderne est donc rapide (1810 – 1830) et résulte, selon Ellenberger (1988, 1996), de 3 prises de conscience :

- l'immensité des temps géologiques
- la succession des faunes dans le temps
- l'existence d'une formation primitive originelle (les chaînes de montagnes primitives préexistantes).

Au 18^{ème} siècle la géologie représente la science qui cherche à reconstituer l'histoire de la Terre, elle avait une dimension historique. Mais à partir du 19^{ème} siècle, la géologie ne s'intéresse plus uniquement à l'étude du passé : elle cherche aussi à expliquer les phénomènes dynamiques qui se déroulent au niveau du globe terrestre et, joint ainsi à la dimension historique une dimension dynamique (Gohau, 1997. p 140). Elle a pour objectifs, d'un côté l'étude des phénomènes actuels, et, d'un autre côté, celle de l'histoire de la Terre (Gohau, 1987). On inscrit ainsi généralement les sciences de la Terre en tension entre deux pôles (D. Orange, 2003), « *le pôle fonctionnaliste qui renvoie vers les lois déterministes et qui s'intéresse à l'explication de la formation de la Terre (géologie dynamique), et le pôle historique (géologie historique) qui consiste, à rechercher dans les*

archives les événements inscrits dans la flèche du temps et marqués par la contingence (Laudan, 2002) ».

L'appellation des sciences de la Terre n'a pas été faite d'une manière aléatoire, au contraire il y a des précurseurs qui ont mené vers cette appellation. En effet le pluriel «Les sciences » renseigne sur une pluridisciplinarité qui agit dans le domaine des études de la planète Terre et qui met en jeu des méthodes très diverses, vu la complexité de l'objet d'étude. En effet, au 20^{ème} siècle, la géologie a étendu son champ d'investigation par l'application pratique d'autres disciplines dans les recherches actuelles. Dans ce cadre, nous signalons que l'application des méthodes des sciences physiques à l'étude de la Terre, de ses enveloppes liquide ou gazeuse, de son action à distance (champ magnétique, champ gravitationnel) a fait apparaître une nouvelle discipline : la géophysique (qui comprend la géodésie, la sismologie, la volcanologie la tectonophysique). Il en est de même pour l'application de la chimie dans l'étude des comportements chimiques des éléments dans les roches, les eaux et l'atmosphère qui a donné naissance à la géochimie. Nous nous trouvons ainsi dans le domaine d'une géologie « moderne » qui fait appel aux méthodes de détection, de mesures et d'application. Demounem et Astolfi (1996) confirment cette idée en révélant que le changement d'appellation correspond à une évolution des concepts et des techniques, dans la mesure où différentes sciences ont collaboré dans les années soixante pour contribuer à l'élaboration de la théorie de la tectonique des plaques qui vise à construire un modèle de la Terre et à définir le statut de notre planète dans l'Univers (Monchamp & Sauvageot-Skibine, 1995). La géologie devient ainsi Sciences de la Terre, synthèse complexe de différentes approches.

Cette pluridisciplinarité paraît explicable si nous regardons du côté de l'histoire. En effet, l'émergence de la géologie en France a été marquée par une approche naturaliste et historique. La géologie moderne a été liée à l'histoire naturelle. Elle a été adoptée par les naturalistes tel que Buffon (1707-1788) et Cuvier (1769-1832) qui se sont intéressés à l'histoire de la Terre, l'anatomie comparée et à la paléontologie, et qui ont constaté que l'évolution du système Terre est du type bio-géologique c'est-à-dire que l'évolution des êtres vivants se superpose à l'évolution des objets géologiques et suit le même chemin au cours du temps ; il existe ainsi une convergence d'ordre épistémologique entre les sciences de la Terre et les sciences de la vie, telle la nécessité d'aborder les problèmes sous un angle systémique (l'évolution de la planète est bio géologique) (Orange. C & Orange. D, 1995 ; Demounem & Astolfi, 1996).

D'un autre côté, dans la majorité des pays anglophones les sciences de la Terre sont considérées comme dérivées des sciences physiques et sont ainsi orientées vers le pôle fonctionnaliste. En effet certains physiciens tels que Newton (1642–1727) et Kelvin (1824-1907), ont participé à l'évolution de la géologie moderne par les méthodes de la physique. Ils ont discuté l'âge de la Terre. Les objets géologiques peuvent donc être étudiés à l'aide des outils conceptuels de la physique.

1.3. Conclusion

Le développement des sciences de l'univers au 20^{ème} siècle et l'intégration de plusieurs disciplines : la chimie, la physique, les mathématiques... dans la recherche en géologie, ainsi que l'utilisation de l'outil informatique contribue à l'évolution des problématiques de la géologie et l'apparition du modèle de la tectonique des plaques.

L'interdisciplinarité engendre la possibilité de désigner la géologie par un nouveau nom : les sciences de la Terre, un terme plus récent mais qui permet à cette science de garder ses deux dimensions : historique et fonctionnaliste. Nous retenons également les rapports complexes que la discipline entretient avec le « temps » et « l'espace » et que nous développerons dans la suite de notre travail.

2. Les sciences de la Terre entre temps et espace

Les sciences de la Terre, le temps et l'espace sont en relation étroite. Trois relations relient les sciences de la Terre à «L'espace » d'une part et au « temps » d'autre part formant un triangle, si on ose les schématiser. L'étude des ces trois relations (temps – sciences de la Terre, espace – sciences de la Terre et temps – espace pour un même phénomène géologique) est intéressante pour deux raisons :

- La première est que les sciences de la Terre sont des sciences qui cernent leurs objets d'étude dans le temps et dans l'espace dans la mesure où elles permettent d'étudier les objets géologiques selon deux approches, une historique et une fonctionnaliste. Et de ce fait il est nécessaire d'étudier les relations qui existent entre les sciences de la Terre et le temps et les sciences de la Terre et l'espace.

- La deuxième est qu'en nous référant à ce que trace l'histoire de la géologie, nous avons remarqué que certaines difficultés rencontrées par les chercheurs au cours de la construction du savoir géologique, sont dues à des problèmes de temps et / ou d'espace, et que nous qualifierons dans le reste du travail par «des problèmes de temps» et « des problèmes d'espace».

2.1 Les rapports entre temps et espace

Il existe des rapports importants entre « temps » et « espace » en sciences de la Terre. La taille des structures géologiques rencontrées sur le terrain peut renseigner sur les temps de réalisation des phénomènes géologiques. Nous citons comme exemples la hauteur des chaînes de montagnes, l'épaisseur des couches sédimentaires....

L'un des facteurs qui est intervenu dans l'évolution des sciences de la Terre est le rapport entre « le temps » et « l'espace » évoqué par Kant (1781). Dans le cadre des sciences de la Terre, le rapport entre « temps » et « espace » apparaît dans l'étude des objets géologiques à différentes échelles c'est-à-dire à l'échelle macroscopique comme à l'échelle microscopique. En effet Orange, Beorchia, Ducroq, & Orange, 1999 mentionnent que l'observation microscopique de différentes lames minces d'un même ensemble pétrographique montre que les minéraux appartenant à une même série (donc répartis dans l'espace) renseignent sur les réactions de transformations minéralogiques dans le temps à l'échelle microscopique. De même, Savaton (1995) souligne que la carte géologique permet une représentation simultanée du temps et de l'espace (une image de l'espace donné à un temps donné). Mais il faut signaler que l'idée précédente (la taille des structures géologiques rencontrées sur le terrain, peut renseigner sur les temps de réalisation des phénomènes géologiques) n'est pas toujours vraie puisque certaines structures de faibles dimensions comme des lamines argileuses, des dépôts des fonds nécessitent plus de temps pour leurs réalisation que certains structures de grandes dimensions formées suite à des événements de courte durée parfois de l'ordre de quelques minutes comme les glissements de terrain. Si le temps géologique est déterminé grâce à une lecture de l'espace, cela confirme que l'étude didactique de la relation « temps – espace » dans le cadre des sciences de la Terre est intéressante par recours à l'actualisme.

2.1.1 Les sciences de la Terre et l'espace

L'étude de la Terre est une étude dans un espace en trois dimensions, puisqu'elle s'intéresse aux objets géologiques qui ont du volume. La représentation spatiale des reliefs et des structures géologiques en volume est une condition nécessaire à la compréhension de la géologie.

La représentation tridimensionnelle des structures géologiques, permet d'identifier les structures qu'elles renferment : strates, plis, failles.... Elle permet aussi de reconstituer leurs histoires en donnant un ordre chronologique aux événements qui ont contribué à leurs formations (comme pour la déformation des couches sédimentaires, la déformation vient après que les couches se sont déposées) et permet de retrouver les mécanismes de leurs formations en précisant les conditions nécessaires pour leurs réalisations.

2.1.1.1 Le rapport des sciences de la Terre au réel

Ce rapport constitue une véritable difficulté pour toutes les sciences, en effet le déroulement des phénomènes géologiques, sur des milliers de kilomètres, que ce soit à la surface ou en profondeur conduit à l'inaccessibilité des objets étudiés. Et malgré qu'on a recours aujourd'hui à des méthodes (tel que la télédétection) permettant l'observation de ce qui se passe en profondeur (l'exemple de la dorsale), cela reste encore difficile et indirect même si ces méthodes mises en œuvre ont permis des progrès considérables.

Les phénomènes géologiques sont inaccessibles à l'observation compte tenu de la lenteur des étapes de leur réalisation (les transformations que subit une roche) et de l'immensité du temps géologique dans lequel se déroulent les événements géologiques qui les rend souvent imperceptibles directement à l'échelle de la vie humaine. Seule l'imagination permet d'interpréter ces phénomènes en reculant sur la flèche du temps géologique, en convoquant le temps long et en utilisant les traces de l'actuel pour reconstituer le passé.

2.1.1.2 L'échelle : une lecture du réel grâce à un changement de variable

Dans un cadre temporel, les sciences de la Terre s'intéressent à des phénomènes qui peuvent être de courte durée (un séisme) et à d'autres qui nécessitent des millions d'années pour leur réalisation (la naissance d'une chaîne de montagne). L'immensité du temps géologique et la lenteur de la vitesse de réalisation de certains phénomènes par rapport au temps humain fait que le phénomène peut être vu dans un cadre statique alors que, en dehors de l'échelle du temps humain, il est au contraire dynamique. La lecture dans deux échelles temporelles qui diffèrent par l'unité de mesure et par le rythme d'écoulement du temps et qui ne peuvent pas ainsi être superposables ; constitue une difficulté dans l'observation et l'interprétation des phénomènes géologiques.

Dans un cadre spatial, les sciences de la Terre s'intéressent à des objets dont les dimensions sont de l'ordre du micromètre (un minéral) et à d'autres qui s'étalent sur des milliers de kilomètres (une plaque lithosphérique) (Demounem & Astolfi, 1996). L'immensité de l'espace global, et l'étendue de la structure géologique sur des milliers de kilomètres fait que la variation de la structure d'un point à un autre n'est pas facilement détectable et une uniformité de structure apparaît si on se déplace sur des kilomètres alors que la variation existe sur des milliers de kilomètres.

Ainsi le concept géologique est construit selon l'échelle de lecture spatiale ou temporelle qu'on met en œuvre, c'est-à-dire que l'on peut observer au niveau d'une surface bien déterminée un chevauchement, qui, lorsqu'il prend de l'ampleur sur une surface plus grande, sera qualifié de nappes de charriages. Donc d'une échelle de lecture à une autre on peut assister à un changement conceptuel car le temps et l'espace ne sont pas vu et lu de la même façon. En effet Raab et Frodeman (2002) annoncent que les concepts utilisés en géologie sont construits en fonction de nos capacités sensori-motrices sur l'expérience du temps et de l'espace.

2.1.1.3 « l'espace » réel et « l'espace » de conjoncture

La notion d'espace que nous allons traiter dans les lignes qui viennent, ne représente pas l'espace en tant que portion de lieu, un espace ordinaire auquel on peut attribuer des coordonnées, que l'on peut subdiviser, limiter, encadrer, découper car cette notion d'espace ne représente pas un problème pour les élèves. Mais ce que nous désignons ici par « espace de réalisation possible » c'est l'ensemble des conditions nécessaires, et des circonstances réunies qui, lorsqu'ils se réunissent permettent, de définir un espace possible de réalisation géologique et qui peut définir à son tour un espace réel physique.

Si nous prenons l'exemple de l'espace sédimentaire, on peut le définir comme étant l'espace résultant d'un faisceau de circonstances et de conditions de réalisation qui lorsqu'ils se réunissent, permettent d'obtenir comme résultat un objet géologique : les roches sédimentaires et qui sont : l'érosion, le transport, la sédimentation selon des lois définies, la diagenèse, et surtout le temps géologique. Il en est de même pour les profondeurs : cet espace physique réel ne représente pas obligatoirement par exemple un espace magmatique. Pour nous, l'espace magmatique est l'ensemble des circonstances et les conditions nécessaires permettant la réalisation d'un phénomène géologique magmatique, et qui peuvent se réunir dans un lieu autre que l'espace physique réel souterrain cela peut être dans un laboratoire. Donc ce que nous voulons dire par « espace » n'est plus strictement lié au terrain réel mais il représente une forme de conjoncture.

Le lecteur pourrait se demander pourquoi nous parlons de conjoncture dans la géologie et dans le problème d'espace. Nous répondons par le fait que l'espace physique réel réunit un ensemble d'éléments nécessaires pour la réalisation d'un phénomène géologique et non pas pour la réalisation d'un autre, donc à titre d'exemple, la diagenèse ne peut se dérouler dans un bassin sédimentaire que parce que cet espace physique réel réunit les circonstances et les facteurs nécessaires pour ce phénomène et qui ne sont pas possibles pour l'édifice d'une roche magmatique. Ainsi notre conceptualisation de l'espace réel physique n'est en réalité qu'une conceptualisation d'une conjoncture donnée par rapport à d'autres. Et la conception que font les élèves par exemple de la formation d'une chaîne de montagnes par accumulation des dépôts sédimentaires montre que les élèves raisonnent par rapport à un espace réel physique sédimentaire car ils mobilisent une conjoncture « sédimentaire » ce qui nous permet de dire que la mobilisation d'un espace réel à la place d'un autre au cours de la construction du savoir est strictement liée à la conjoncture que voit l'élève ou le

chercheur et qui définit un espace réel bien déterminé à la place d'un autre et que le passage d'une conception d'un espace réel donné vers un autre espace réel donné n'est en fait qu'un passage d'une conjoncture donnée vers une autre.

Donc notre lecture de l'espace réel physique n'est en réalité que le résultat de la conjoncture mobilisée au moment de la construction de l'espace en tant que notion.

2.1.1.4. La notion d'espace est inscrite dans le vocabulaire géologique

En examinant les noms des structures géologiques, nous remarquons qu'ils portent en eux même un renseignement sur l'espace de réalisation. L'utilisation des expressions comme : la disposition, la stratification, la déformation, le plissement, la cassure, le décrochement, le chevauchement, le recouvrement..., nécessite obligatoirement un cadre spatial. En effet, les formations stratigraphiques renseignent sur une disposition particulière des couches dans l'espace réel physique (horizontale), les structures tectoniques telles que les plis informent sur une déformation d'une surface (d'un état initial horizontal à un état final ou transitoire oblique ou renversé), les failles racontent une cassure affectant une strate donnée (entraînant un déplacement de compartiment), les nappes de charriage renseignent sur un chevauchement de grande amplitude (les chevauchements représentent un recouvrement de terrain par d'autres couches allochtones) etc...

Ce sont les transformations (qui affectent le matériel géologiques) qui représentent **des indicateurs d'espace** à la surface de la Terre (ou encore nous pouvons le qualifier **d'espace de surface** (relief)) et des profondeurs (ou **espace souterrain**) ainsi que des indicateurs pour la conjoncture qui a permis leur naissance. Nous distinguons ainsi deux types d'espaces qui se superposent : **un espace de surface et un espace souterrain.**

2.1.1.5. Les roches indicatrices d'espace

Les roches, par leurs natures représentent aussi des indicateurs d'espace sur le terrain : en effets nous distinguons dans la nature trois ensembles de roches : sédimentaires, magmatiques et métamorphiques qui nous permettent suivant la même logique de définir trois situations résultant d'un faisceau de circonstances et d'événements ou encore trois conjonctures :

2.1.1.5.1 L'espace sédimentaire – conjoncture sédimentaire

Il s'agit d'un espace bien déterminé, dans lequel on assiste à la formation des roches sédimentaires, et il est le résultat de la réunion des conditions de réalisation qui lui sont propres.

En effet, la formation de la majorité des roches sédimentaires, nécessite pour sa réalisation : l'érosion, le transport, la sédimentation et la diagenèse ; qui nécessite à son tour obligatoirement, un bassin sédimentaire et ne peut pas se réaliser dans un espace autre qu'un bassin. Les conditions de cet espace se retrouvent à la surface. **L'espace sédimentaire fait partie donc de l'espace de surface.** L'espace sédimentaire peut être subdivisé en sous espaces en tenant toujours compte des conditions de réalisation nécessaires pour chacune des étapes qui contribuent à l'édification des roches sédimentaires, c'est-à-dire nous pouvons définir :

- un espace d'érosion, défini par les conditions nécessaires pour une érosion : une roche préexistante, et des facteurs d'érosion (vent, eau, température...) Il se limite ainsi à la partie superficielle du sol, en contact direct avec les facteurs climatiques.
- un deuxième espace pour le transport, qui est défini par la nécessité d'existence de matériel résultant de l'érosion, et des facteurs de transport et dont la limite de cet espace est le bassin de dépôt. Il s'emboîte dans l'espace de l'érosion et fait partie de ce dernier.
- un troisième espace de sédimentation, qui nécessite la présence d'un bassin sédimentaire, les règles physicochimiques de précipitation et du matériel résultant de l'érosion déposée selon les lois de la gravité.
- un quatrième espace de diagenèse, qui est défini par les conditions nécessaires pour la formation d'une roche sédimentaire à partir du matériel déposé : une certaine profondeur, des conditions de pression et de température et un ciment permettant la liaison des particules.

2.1.15.2 L'espace magmatique- conjoncture magmatique

C'est un espace résultant d'un faisceau de circonstances pour l'édification de roches magmatiques : Il peut être subdivisé à son tour en sous espaces :

- Un espace de fusion : défini par les conditions de fusion du matériel magmatique et qui nécessite de ce fait une profondeur et une température bien définies grâce auxquelles le matériel en fusion ne peut subir aucune cristallisation et garde son état fluide.
- Un espace de cristallisation fractionnée: défini par les conditions de cristallisation (à des moments successifs dans un magma qui se refroidit lorsque la température décroît).

Cet espace magmatique est différent de l'espace sédimentaire et donc il ne fait pas partie de l'espace de surface, mais fait plutôt partie de l'espace souterrain, du fait qu'il nécessite des conditions de pression et de température qui n'existent pas dans l'espace de surface. L'espace magmatique est différent de l'espace sédimentaire mais il peut parfois le **recouper** par le biais d'un **espace volcanique** : nécessité de communication avec la surface externe du globe là où se fait la cristallisation finale des laves.

2.1.1.5.3 L'espace métamorphique- conjoncture métamorphique

Une roche métamorphique est une roche issue de transformation d'une roche préexistante à l'état solide suite à des variations de pression et de température. Il s'agit d'une transformation minéralogique, pétrographique et texturale. Une roche métamorphique nécessite pour son existence donc au moins un double espace : celui de sa roche originelle et celui dans lequel se fait la transformation. Ce caractère de transition des roches, entre roches originelles et roches néoformées appelées métamorphiques, se retrouve dans la notion « d'espace ». En effet l'espace métamorphique est le résultat de l'intersection ou plutôt le recoupement d'un espace originel qui peut être sédimentaire par l'espace qui favorise la néoformation de la roche (qui peut être magmatique dans le cas du métamorphisme de contact ou bien un espace d'enfouissement au niveau de la base des séries sédimentaires dans le cas du métamorphisme général).

Selon la définition par laquelle nous avons défini « l'espace » comme conjoncture résultante d'un faisceau de circonstances géologiques et temporelles données, nous rappelons que tous ces espaces ne représentent donc pas des espaces géométriques, ou encore des portions de lieux réel liées au terrain mais des espaces si on peut dire de réalisations possibles, c'est-à-dire, se sont les espaces dans lesquelles raisonne le chercheur ou l'élève et où il conçoit la possibilité de réalisation d'un phénomène géologique ou d'un

autre grâce à la réunion des conditions nécessaires et des circonstances et défini à la lumière de la conjoncture mobilisée, un espace réel physique.

2.1.1.6 Un espace de conjoncture tectonique

Si nous poursuivons notre raisonnement suivant la même logique nous pouvons attribuer à l'ensemble des phénomènes tectoniques, « **un espace de conjoncture tectonique** », dans lequel se réunissent les circonstances ainsi que les conditions nécessaires pour engendrer une subduction, une expansion, une orogénèse, une collision etc. Dans l'espace tectonique s'inscrit la notion de « plaque » (et par conséquent la notion de « limite de plaque ») qui est de nature lithosphérique, et qui : d'une part présente des manifestations dans sa partie continentale (espace continental) et dont certaines peuvent apparaître en surface (dans l'espace de surface) et parmi lesquelles nous pouvons citer la formation des chaînes de montagnes, certains séismes et certains volcans, et d'autre part elle présente des manifestations en profondeur (dans l'espace souterrain) dont certaines peuvent apparaître dans sa partie océanique (espace océanique) et parmi lesquelles nous citons l'expansion océanique, la formation d'une dorsale, les fosses océaniques... Dans certains cas, l'intersection, des deux parties lithosphère continentale et lithosphère océanique, favorise le phénomène de subduction (au cours duquel la lithosphère océanique disparaît sous la lithosphère continentale).

L'espace tectonique représente ainsi un espace plus large dans lequel s'inscrivent l'espace continental et l'espace océanique ainsi que l'espace de surface et l'espace souterrain non seulement superposés mais en interférence continue.

Nous pouvons dire que ces différentes figures d'espace s'emboîtent et se recoupent. Et nous pouvons les résumer dans le schéma suivant :

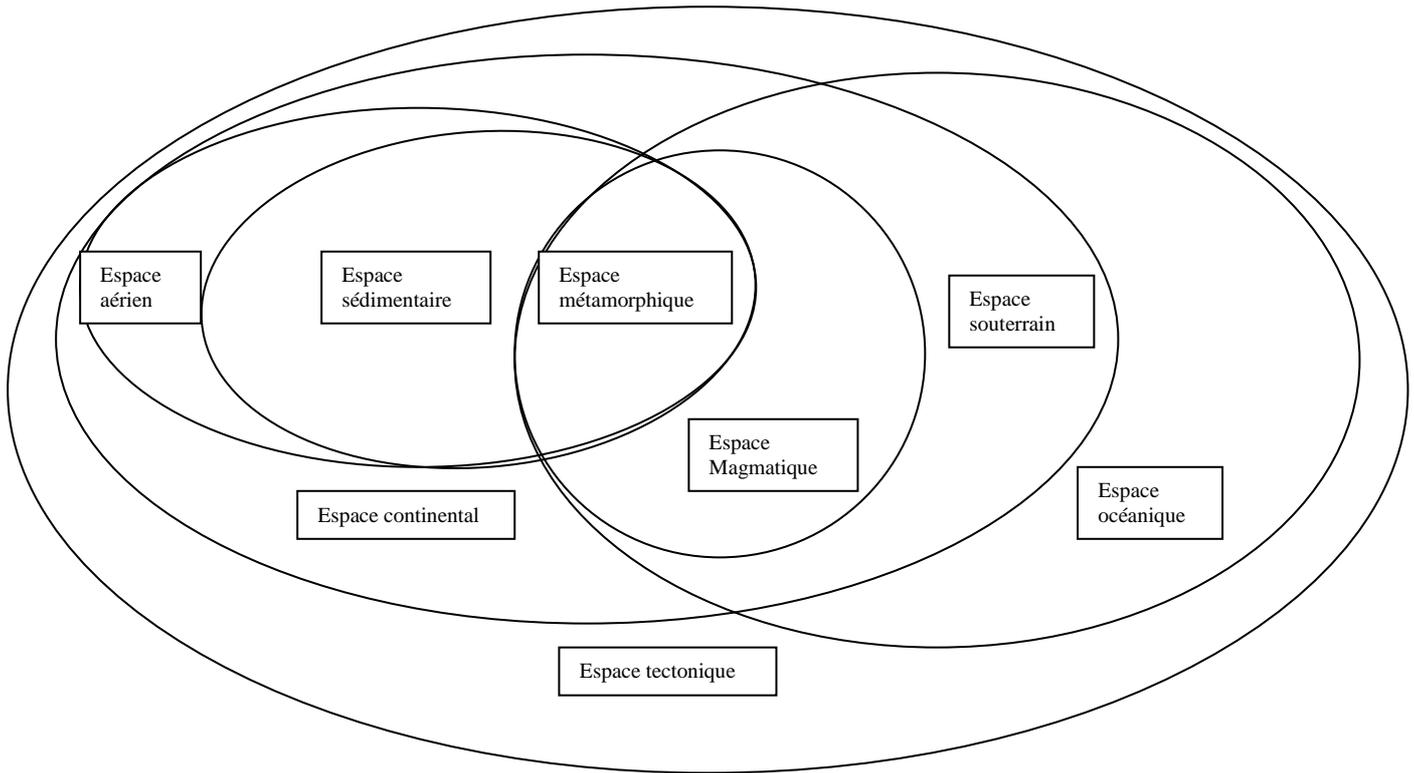


Figure1.1 : Représentation schématique illustrant la multiplicité des figures d'espace suivant les conditions nécessaires de réalisation des phénomènes géologiques au niveau du globe Terrestre : conjonctures

Nous allons utiliser ces figures d'espace dans la suite de notre travail dans l'interprétation des raisonnements des élèves face à un problème d'espace, celui de la subdivision de la surface de la Terre en plaques lithosphériques, et dans l'explication de leur recours à un espace donné et non pas à d'autres.

2.1.2 L'utilisation de l'outil « espace »

L'observation des structures géologiques à la surface et la « lecture » de l'espace de surface aide à construire une image mentale de ce qui est invisible et inaccessible en profondeur c'est-à-dire l'espace souterrain: donc aide à modéliser les structures en profondeur et permet d'imaginer les conditions nécessaires et les processus qui ont contribué à l'obtention de telle ou telle structure géologique à la surface. Le déchiffrement du relief visible en surface traduit donc indirectement la disposition invisible des terrains en profondeur : « la lecture du reliefs n'est donc pas en géologie une fin en soit, elle est un outil de production d'une information structurale caché. » (P. Savaton, 1998).

Une structure géologique telles que les chaînes de montagnes est caractérisée par des coordonnées spatiales (x, y, z) qui n'indiquent pas seulement sa disposition spatiale dans l'espace de surface, mais donnent aussi quelques renseignements sur le temps qu'a mis cette chaîne pour atteindre une altitude bien déterminée au cours de sa formation.

En effet, dans les modèles actuellement admis, cette disposition particulière des couches dans l'espace de surface nécessite pour sa réalisation des conditions particulières c'est-à-dire par exemple, la présence de matériel sédimentaire renseigne sur une sédimentation dans un temps donné, la présence d'ophiolites en surface renseigne sur des contraintes tectoniques qui ont soulevé les couches déjà formées en les plissant et en faisant remonter ces roches en surface etc...

Nous trouvons ainsi que l'espace de surface (dans lequel se trouve le relief) apporte trois types de renseignements :

- 1) l'espace de surface permet de reconstituer (géométriquement ou mentalement) l'espace souterrain en s'appuyant sur la disposition spatiale d'un objet géologique en tant que trace résultante en surface.
- 2) l'espace de surface renseigne sur les conditions nécessaires de réalisation de l'objet géologique en s'appuyant sur la forme tridimensionnelle et les structures qu'elle renferme (la stratification renseigne sur la nécessité de la sédimentation et les structures plissées renseignent sur la nécessité des contraintes tectoniques).
- 3) l'espace de surface informe sur le temps, dans la mesure où la disposition des couches rend compte d'une chronologie relative des événements : un processus sédimentaire selon des plans horizontaux, une inclinaison de ces couches témoigne sur une déformation qui est obligatoirement postérieure au dépôt, un déplacement d'un compartiment par rapport à un deuxième présentant les mêmes informations précédentes témoigne sur la survenue d'une contrainte tectonique qui a provoqué une cassure ou une faille et qui est obligatoirement postérieure à l'inclinaison donc au plissement. Il y a donc trois événements qui se succèdent : un événement sédimentaire, un premier événement tectonique entraînant le plissement des couches déjà formées et un deuxième événement tectonique entraînant les failles aux niveaux des plis formés. La disposition spatiale des structures géologique traduit ainsi l'histoire des terrains. En effet la

stratigraphie présente des principes qui illustrent l'étroite liaison entre le temps et l'espace et qu'on ne peut pas raisonner l'espace en dehors du cadre temporel ni raisonner le temps en dehors du cadre spatial. Ces principes sont : le principe de continuité et le principe de superposition. Le temps et l'espace sont donc intimement liés l'un à l'autre.

L'espace géologique installe donc **un rapport à l'espace lui même** (l'espace de surface permet une reconstitution de l'espace souterrain), **un rapport au temps** (l'espace permet une reconstitution de l'histoire) **et un rapport au fonctionnement** (l'espace permet de reconstituer les conditions nécessaires de réalisation et les processus de formations).

En récapitulation

Suite à cette réflexion faite sur « l'espace » et sa relation avec les sciences de la Terre, nous pouvons admettre **une multiplicité d'espaces** dans l'explication en géologie, c'est-à-dire nous identifions plusieurs « figures d'espaces » qui sont en relation avec les structures et les phénomènes géologiques qu'ils soient simples ou complexes. Nous expliquons la multiplicité des figures d'espace par **la « conjoncture »** dans la mesure où ce sont certaines circonstances et conditions de réalisation mobilisées qui lorsqu'ils sont réunies, conduisent à l'utilisation par le chercheur ou par l'élève d'une figure d'espace ou d'une autre. En effet l'espace n'est pas le même dans tout les phénomènes géologiques étudiés, et d'un problème géologique à un autre, la figure d'espace change : d'une érosion à une sédimentation à une subduction, la conjoncture de l'espace change et donc l'espace réel change.

Nous allons donc voir dans l'histoire des sciences s'il existe différentes conjonctures résultant de différents faisceaux de circonstances et d'événements se traduisant par une multiplicité de figures d'espaces.

2.2. La notion d'espace dans l'histoire des sciences de la Terre

En parcourant l'histoire des sciences nous remarquons que les géologues s'intéressent à l'histoire de la Terre et à son explication par rapport à l'actuel ; ils s'intéressent à étudier le système Terre dans le temps : présente-t-il un état évolutif dans le temps ou bien un état stationnaire ? Et si le système Terre est un système évolutif, évolue-t-il au sein d'un état

constant en apparence ou dans un contexte directionnaliste ? Les phénomènes géologiques se répètent dans le temps de la même manière et selon les mêmes lois ou bien il existe une variation au cours du temps ? Mais en arrière plan, dans leur traçage de l'histoire de la Terre, peu importe les contextes et les conceptions, les géologues évoquent l'espace sans vraiment le mettre en valeur depuis les premières théories explicatives au début du 17^{ème} siècle. Les critiques et les réflexions faites sur l'histoire des sciences de la Terre se concentrent sur les problèmes de temps au détriment des problèmes d'espaces, alors qu'une réflexion sur ces derniers paraît intéressante voir même nécessaire dans un cadre géologique qui trouve sa légitimité dans la notion d'espace.

Dans ce qui suit nous allons essayer d'illustrer la multiplicité des figures d'espace dans les explications en géologie de la fin du 18^{ème} siècle et du début du 19^{ème} siècle pour les deux principaux fondateurs de la géologie moderne, James Hutton (1726-1797) et Abraham Gottlob Werner (1749-1817) qui présentent les deux théories concurrentes qui s'intéressent à la Terre.

2.2.1 La notion d'espace géologique dans le neptunisme

Au 18^{ème} siècle, les géologues ont essayé de trouver des explications pour la formation des roches crustales qui se présentent à la surface de la Terre sous différents types. Cette variété faisait apparaître un courant explicatif : c'est le neptunisme.

Selon la théorie neptuniste, les roches crustales (même les granites et les basaltes) se sont formées par précipitation chimique et mécanique au sein d'un océan primordial en retrait progressif. En se référant à Ellenberger (1997, p270) nous citons les épisodes de formation de ces roches tels que les proposent Werner :

- Dans un premier épisode, on assiste à la formation des granites grâce à une précipitation chimique suivie de bas en haut de gneiss et des schistes. Ces roches ne présentent pas de fossiles. Elles apparaissent à la surface de la Terre suite au retrait de l'océan formant les montagnes primitives.
- Dans un deuxième épisode, on assiste à la formation des grauwackes au dessus des schistes, présentant des formes fossilisées qui témoignent de l'apparition de la vie sur Terre et du changement environnemental (refroidissement des eaux).

Le retrait de l'océan fait apparaître les montagnes de transition qui suivent les irrégularités des montagnes primitives.

- Dans un troisième épisode on assiste à la formation des roches sédimentaires riches en fossiles.
- Dans un quatrième épisode les continents acquièrent une taille importante et émergent à la surface, pour subir l'effet de l'érosion continentale et contribuer à la formation d'un dépôt de nature détritique.

On peut noter que la thèse neptuniste renvoie la formation des granites, des basaltes et des montagnes à des phénomènes de précipitations successifs dans un bassin et nie complètement la présence de mouvements responsables de l'orogénèse.

Werner considère, de ce fait, la formation des chaînes de montagnes ainsi que les roches magmatiques comme étant un processus qui se déroule uniquement à la surface de la Terre c'est-à-dire nécessitant une seule conjoncture spatiale : un espace « sédimentaire » défini par ses conditions de réalisations (érosion, précipitation...) et donc un espace qui est à la fois amagmatique et atectonique.

2.2.2 La notion d'espace géologique dans le plutonisme

Hutton (1726-1797) est le fondateur du plutonisme. Il attribue au feu central le rôle principal dans l'édifice des granites par fusion des sédiments.

Selon la théorie plutoniste, la chaleur souterraine représente l'agent responsable de la diagenèse (fusion des grains et soudure lors du refroidissement du matériel fondu), l'injection de granite à l'état liquide dans les couches provoque le soulèvement des strates déjà formées et leur refoulement latéral (Gohau, 1990, p. 273) ces couches seront érodées par l'action de l'eau, ainsi se fait la formation des chaînes de montagnes. Pour Hutton la chaleur soulève les strates et l'eau les érode, il envisage de ce fait un mécanisme cyclique qui maintient l'état de la planète Terre, et ne permet pas sa ruine. Ce mécanisme cyclique est formé par la succession des étapes suivantes :

- un premier épisode caractérisé par la destruction du relief sous l'action de l'eau.
- Un deuxième épisode caractérisé par le dépôt en strates des matériaux obtenus par l'érosion dans un bassin océanique.
- Un troisième épisode caractérisé par la fusion des strates inférieures dans le bassin sous l'effet de l'échauffement qui est provoqué par le surpoids des strates supérieures.

Un bombement est alors à l'origine des reliefs à la place de l'océan. Et le cycle recommence de nouveau.

On peut noter que la thèse plutoniste renvoie la formation des strates à un phénomène sédimentaire, la formation des granites à des origines plutoniques et explique la formation des chaînes de montagnes par le soulèvement des couches « une sorte de dynamisme tectonique ».

Ainsi, Hutton mobilise une multiplicité d'espaces en proposant le modèle cyclique. Il part d'un « espace sédimentaire » dans lequel se déroule la formation des roches en strates, passe ensuite à « un espace magmatique » qui permet l'édifice des granites et termine par un espace plus large qui permet le recoupement des deux espaces précédents (sédimentaire et magmatique) : c'est l'embryon de « l'espace tectonique » dans le quel s'inscrit l'apparition des montagnes par le soulèvement des strates déjà formées et leur intrusion par du matériel granitique.

Hutton apporte de la nouveauté par rapport à la théorie neptuniste en raisonnant dans un cadre spatial plus étendu que celui de Werner car il a pu mobiliser un nouveau type de conjoncture spatiale. D'un espace limité à « l'espace superficiel » ou encore « un espace de surface » (phénomènes se déroulant uniquement à la surface pour les neptunistes) Hutton creuse dans un espace plus profond (siège de la chaleur souterraine) et passe d'une unicité d'espace (l'espace géologique réduit uniquement à l'espace sédimentaire chez Werner) vers une variabilité d'espaces (à l'espace sédimentaire s'ajoute l'espace magmatique et l'espace des contraintes permettant le soulèvement des couches) qui s'entrecoupent.

2.2.3 Conclusion

La mise en comparaison du neptunisme et du plutonisme permet de rendre compte de la multiplicité des utilisations des conjonctures d'espace et donc des figures de « l'espace réel » dans deux problèmes géologiques : la formation des chaînes de montagnes d'un côté et des roches crustales de l'autre, que le tableau suivant tente de résumer.

La notion d'espace dans :	Le neptunisme	Le plutonisme
La formation des chaînes de montagnes	Processus de formation : processus atectonique précipitations successifs	Processus de formation : Soulèvement des strates
	Cadre spatial de formation : espace de surface sédimentaire	Cadre spatial de formation : entrecoupement de l'espace de surface sédimentaire et de l'espace souterrain tectonique
La formation des roches crustales	Processus de formation : processus amagmatique précipitation chimique et mécanique dans un océan primordial	Processus de formation : processus magmatique Fusion du matériel sous l'effet de la chaleur centrale
	Cadre spatial de formation : espace de surface sédimentaire	Cadre spatial de formation : espace souterrain magmatique
Résultat de la relation processus de formation espace	Un mécanisme linéaire	Un mécanisme cyclique

Tableau 1.1. La multiplicité des « espaces » dans le neptunisme et le plutonisme

2.3. Les sciences de la Terre et le Temps

Nous devons rappeler que dans cette partie nous avons pris comme référence le travail de recherche réalisé par D. Orange Ravachol (2003) sur la relation entre les sciences de la terre et la multiplicité des figures de temps.

Selon Montangero (1996), le travail du géologue consiste à lier les phénomènes géologiques à la flèche du temps il essaye de situer un phénomène dans l'histoire de la Terre cela donne à la géologie en tant que science, le caractère historique (Frodeman, 1995 ; Dodick & Orion, 2003b). En s'intéressant par exemple à la paléontologie, ou à la stratigraphie, les sciences de la Terre se réfèrent aux traces conservées dans les roches et les strates pour essayer de retracer une histoire de la planète Terre (Gohau, 2003). Un objet, un événement ou un phénomène géologique n'est ainsi étudié, que s'il est situé dans le temps et dans l'espace, c'est-à-dire ayant des coordonnées spatio-temporelles, mais aussi en le considérant dans son passé pour comprendre son état actuel et son futur

possible. En effet les fossiles, les traces d'activité animale et la nature physique de certaines roches (détritiques, évaporitiques ou carbonatées) renseignent sur la nature des milieux d'une époque donnée (terrestre ou aquatique) et sur les conditions climatiques de l'époque (température, humidité, luminosité..). Ces indicateurs de faciès représentent ainsi des **indicateurs sur des événements ou des phénomènes répartis dans le temps** et permettent de situer les causes responsables de telle stratification ou de telles traces dans le Temps. Nous pouvons qualifier ces sciences, de sciences historiques (D. Orange Ravachol 2003).

Depuis le 18^{ème} siècle et jusqu'à l'heure actuelle les chercheurs essayent de construire une histoire de la Terre. La reconstitution de l'histoire de la Terre repose sur les traces conservées dans ses roches. Mais nous remarquons que malgré le recours aux mêmes traces géologiques, l'histoire est tracée dans différentes versions temporelles, c'est-à-dire pour certains, cette histoire s'inscrit dans un temps sagittal, alors que pour d'autres, elle s'inscrit dans un temps cyclique. La multiplicité des figures du temps n'a pas donc pour cause les traces, parce que ces dernières étaient toujours les mêmes. A quoi est donc due cette multiplicité ?

D. Orange Ravachol. (2003), souligne très clairement le rapport des sciences de la Terre au temps. Elle évoque « les figures de temps » et leurs relations avec les systèmes naturels qu'ils soient simples ou complexes. En effet le temps n'est pas le même dans tous les systèmes étudiés et avec toutes les explications proposées : de l'explication d'un fonctionnement d'une dorsale, au retraçage du passé d'un océan, la figure du temps mise en jeu, change.

Rudwick (1997, p 122) souligne l'évolution de la géologie comme science en termes de figures de temps mises en jeu. Nous retrouvons cette même idée chez Gould (1999).

Dans cette partie nous nous référons au travail de recherche effectué par D. Orange Ravachol (2003, chapitre1) sur la multiplicité des figures de temps qui caractérisent la géologie en tant que science historique. Elle insiste sur la complexité du temps, qui dépend des types de systèmes que l'on étudie ainsi qu'aux types d'explications que l'on construit (explications déterministes ou non) et elle insiste sur le fait « *qu'il ne peut pas être réduit à un axe de coordonnées simple et neutre* ».

D. Orange Ravachol renvoie la diversité et la complexité des utilisations du temps dans les explications au fait que les sciences de la Terre « *se définissent entre un pôle*

fonctionnaliste et un pôle historique ».

D. Orange Ravachol (2003. p, 35) illustre la multiplicité des temps dans les explications en géologie, en comparant d'une part le plutonisme au neptunisme et d'autre part le gradualisme à l'équilibre ponctué. Elle affirme que la multiplicité des temps participe dans la construction des savoirs géologiques et elle accompagne l'histoire de la recherche en géologie. Elle met l'accent sur le recours à deux figures de temps mis en jeu au cours de l'histoire (18^{ème} siècle) : le temps cyclique contre le temps sagittal. Son travail est très intéressant dans la mesure où il représente une référence dans le domaine de l'épistémologie, il s'agit d'une étude détaillée sur le rapport au temps dans les sciences de la Terre, ce qui nous a amenés à considérer sa réflexion sur le temps dans le cadre d'une géologie historique, comme base pour notre étude des problèmes historiques. Nous allons montrer combien les "figures du temps" sont multiples dans les sciences de la Terre. Nous développerons quelques exemples comparatifs illustrant la multiplicité des figures de temps : le neptunisme contre le plutonisme le gradualisme contre l'équilibre ponctué et le catastrophisme contre l'actualisme que nous allons prendre comme référence pour notre étude didactique.

2.3.1 Le neptunisme contre le plutonisme

Le Temps de l'antiquité est cyclique, en effet pour Aristote il y a «un certain cercle du temps», pour les stoïciens, l'univers est consumé périodiquement par le feu qui l'a engendré et renaît de ses cendres. Mais plus tard, différentes conceptions du temps géologique se sont succédées ou ont même coexisté, selon les explications variées qui sont données des structures géologiques ou encore de l'évolution des êtres vivants. Entre le 17^{ème} et le 19^{ème} siècle deux conceptions majeures du temps se sont opposé (Gould, 1990). Ces conceptions opposent un temps vu comme une flèche linéaire (temps sagittal) à un temps caractérisé par la répétition périodique des mêmes états et événements (temps cyclique). Temps sagittal et temps cyclique constituent ainsi deux systèmes opposants qui ont permis d'interpréter les objets géologiques dans le cadre de la géologie moderne.

Certains chercheurs du 17^{ème} siècle comme Burnet et Sténon (Gould ,1990) ont supposé qu'il est possible que les deux systèmes temps coexistent simultanément, si l'histoire de la Terre est décrite comme une répétition de cycles (temps cyclique) qui se succèdent dans le temps (temps sagittal). Pour cela il faut que le temps cyclique soit plus court que le temps sagittal et que la somme des temps cycliques constitue le temps sagittal.

Pour D. Orange Ravachol, pour pouvoir aborder la dimension historique de notre planète il est nécessaire d'admettre la simultanéité des aspects cyclique et sagittal du temps. Dans le temps sagittal on peut identifier les changements que subit la planète alors que dans le temps cyclique on identifie les régularités qui en sont à l'origine et qui en constituent les marqueurs temporels.

2.3.1.1 Le neptunisme et le temps sagittal

Le sous-sol de l'Europe moyenne est composé d'un socle de roches cristallines recouvertes d'une couverture sédimentaire. L'émersion des massifs cristallins de la couverture plissée, contribue à l'apparition de roches de différentes natures. La distinction de ces unités cristallines et sédimentaires, renvoie vers plusieurs suppositions. En effet plusieurs chercheurs tel que le minéralogiste allemand J.G. Lehmann (1719-1767), l'italien L. Moro (1687-1764) et B. Maillet (1659-1738) ont supposé qu'il existe deux catégories de montagnes : des montagnes primitives cristallines et des montagnes secondaires plus basses et plus douces, sédimentaires composées de bancs horizontaux fossilifères. C'est sur cette description que s'appuie la conception neptunienne atectonique et amagmatique.

Cette conception neptunienne suppose que toutes les roches soient sédimentaires du fait que les niveaux supérieurs sont fossilifères donc la base pourrait l'être aussi, mais il existe toutefois des niveaux cristallins. En effet ces chercheurs notent de bas en haut la présence de granite, gneiss, micaschistes, sables calcaires... Et constatent que la cristallinité des terrains diminue à mesure qu'on monte vers la surface, d'où la supposition de Werner un passionné défenseur du neptunisme (Gohau, 1987), que les montagnes sont au début cristallines par précipitation des matières en solution, et qu'au cours du temps ces montagnes se sont dégagées par l'abaissement des eaux de l'océan primitif ou « initial » Ellenberger (1994, p. 270). Ce phénomène a produit le début de l'érosion continentale et par conséquent les premiers sédiments détritiques, ainsi s'explique la perte régulière de la cristallinité des dépôts.

Cet océan primitif va donc contenir « des matières en solution » qui successivement vont se précipiter soit par évaporation ou par pénétration dans des cavités souterraines. Les roches cristallines forment donc les montagnes primitives alors que la genèse des roches sédimentaires se déroule au fond de l'océan primitif, et ces roches peuvent couvrir le socle cristallin.

Cette conception directionnaliste du temps montre un schéma linéaire continu (qui permet d'associer à chaque époque son dépôt) pour la formation des chaînes de montagnes, qui est irréversible dans le temps (du fait que le granite est le marqueur d'une unique époque). Le temps est orienté et descriptif. Il s'agit d'un temps historique sagittal.

Les conditions de formations sont celles du modèle sédimentaire (des épisodes de précipitation dans un bassin) et nient l'intervention tectonique (atectonique), la formation des chaînes de montagnes se déroulent dans un état stationnaire et nécessite un mouvement de bas en haut. L'espace de formation de ces chaînes est ainsi un espace sédimentaire défini par ses conditions nécessaires de formation.

Le neptunisme s'inscrit donc dans une histoire sagittale progressive, maintenant achevée.

2.3.1.2 Le plutonisme et le temps cyclique

Selon Ellenberger (1994) à la même époque que Werner, la thèse plutoniste est formulée par J. Hutton (1726-1797) en 1788, dans sa *Theory of the Earth*, permet de faire triompher le concept du temps cyclique. Il y annonce que le sol provient de la dégradation des roches et il est constamment entraîné par l'érosion vers la mer. Mais, si ce mouvement n'est pas compensé par une « réparation » des continents, les reliefs s'atténueront jusqu'à leur disparition et c'est ce qui fait la faiblesse de la thèse neptunienne. C'est le cycle géologique qui est exprimé par Hutton et qui représente la nouveauté par rapport à la thèse neptunienne.

D'après Hutton les couches solides formées au fond de l'eau après transport, ont au départ la forme d'un sol meuble. Il existe alors un agent qui contribue à leur consolidation par cimentation des particules libres : c'est la diagenèse (une première phase sédimentaire).

Selon Hutton, cette diagenèse se fait soit par des solutions aqueuses soit par l'effet de la chaleur et de la fusion. Il propose d'éliminer les actions aqueuses car la consolidation ne peut pas se faire par l'intermédiaire des substances insolubles dans l'eau. Le feu reste donc le seul agent possible par la fusion partielle du sédiment et contribuant à le consolider par solidification subséquente lors du refroidissement. Hutton essaye de chercher les autres effets possibles de la chaleur. Il a remarqué la présence des fractures, dislocations, courbures dans les strates et il a constaté qu'elles ont été soulevées (une deuxième phase de nature tectonique est mise en jeu), et ces déformations ne s'expliquent que par l'action de la chaleur.

Il avance la thèse que les strates sont injectées de laves souterraines qui n'ont pas fait éruption. La nouveauté est dans le rôle que jouent ces laves (une troisième phase de nature plutonique). Il a entrepris des observations sur le granite et il a vu que le granite s'est introduit dans les terrains à l'état fluide. Hutton a montré que le granite qu'il observait est postérieur aux schistes alpins. Il conclut que cette superposition comprend deux cycles dont le second a soulevé les couches déjà formées sans les plisser : une thèse dynamique tectonique qui explique la formation des montagnes (Ellenberger, 1994, p.308), contrairement à la thèse neptunienne stationnaire qui écarte les mouvements tectoniques. Pour Hutton, la diagenèse, le métamorphisme et le magmatisme ne sont que des degrés d'une même action du feu souterrain sur les sédiments. Hutton s'oppose ainsi à la thèse neptunienne sagittale, il va au bout de son raisonnement en attribuant l'origine de la chaleur à un mécanisme « cyclique ».

Cette conception constitue une piste pour le concept de l'immensité des temps géologiques, mais cache l'aspect historique des sciences de la Terre. En effet, si l'histoire de la Terre est constituée par la répétition d'événements identiques, dès que les premiers événements ont eu lieu, l'histoire est déjà finie et commence à se répéter.

Le temps cyclique n'est plus donc orienté il ne présente ni origine ni fin et donc il n'est plus historique, car les cycles écartent le problème d'une origine et d'une fin. Par contre il est producteur et réversible, dans la mesure où il permet la restauration du relief par ses épisodes au sein d'un enchaînement cyclique. Le temps cyclique offre ainsi à la Terre une stabilité dynamique en dehors du cadre temporel ayant un début et une fin.

D'après B. Dubois et G. Gohau (1997. p17) « le cycle Huttonien offre toutes les caractéristiques d'un cycle astronomique ». Il représente une transposition de l'ordre cosmique de Newton dans la durée Terrestre. A la révolution des planètes dans l'infinité de l'espace correspond une révolution des états de la Terre dans l'infinité du temps.

Avec un temps cyclique, les phénomènes qui s'enchaînent se sont produits dans le passé mais ils continuent à se réaliser dans l'actuel de la même manière. Hutton rompt avec le temps sagittal, directionnel, non producteur, neptunien, au profit du temps cyclique.

Au 19^{ème} siècle, Lyell fonde son système sur l'uniformitarisme. L'état physique de la Terre ainsi que les lois qui expliquent les événements actuels et passés sont uniformes. La Terre est engagée dans une évolution cyclique de destruction et de rénovation qui la maintienne dans un état globalement uniforme.

Pour Hutton comme pour Lyell, la Terre garde globalement la même physionomie. Ils abandonnent ainsi l'histoire de la Terre (Gohau, 2003 ; Rudwick, 2005).

2.3.1.3 La révolution huttonienne et le temps profond

La découverte du « temps profond » est une révolution scientifique (Dodick & Orion, 2003b ; Rudwick, 2005), à prendre au sens de Kuhn (1962), elle constitue une rupture dans l'évolution des idées dans les sciences de la Terre c'est-à-dire un changement de paradigme, (Gould 1990). Selon Gould (1990), l'investissement de Hutton et Lyell dans l'idée de temporalité cyclique a contribué à la découverte du « temps profond ». L'immensité des temps géologiques constitue ainsi le cadre essentiel dans lequel se déroulent les cycles Terrestres.

La découverte de ce concept ouvre un vaste champ d'investigation à la géologie et permet de renoncer au catastrophisme comme seul système explicatif des transformations géologiques observées et de prendre en compte l'intervention de phénomènes imperceptibles à l'échelle d'une vie humaine, mais dont l'action est conséquente sur de très grandes durées. Les objets géologiques peuvent ainsi être interprétés comme résultant d'une histoire.

En récapitulation

Le temps sagittal et le temps cyclique représentent les deux figures majeures qui montrent la multiplicité du temps. Mais dans certains cas ces deux figures de temps présentent des lacunes lorsqu'on les utilise pour situer certains phénomènes et événements, en effet Les discordances étudiées par Hutton situent temporellement les mouvements orogéniques et marquent les limites entre cycles. Mais le problème de la datation précise des couches demeure.

Ainsi, pour reconstituer le passé, deux attitudes sont possibles :

- Soit on considère un élément à caractère constant mais répétitif (périodique) en dissimulant ce qui se modifie et c'est l'aspect cyclique de l'histoire qui l'emporte.
- Soit on considère un élément à caractère variable qui change régulièrement dans un sens défini. Et c'est l'aspect linéaire de l'histoire qui l'emporte.

Il existe ainsi une difficulté claire à joindre dans un même raisonnement le phénomène cyclique à la transformation (Gohau, 1995). Selon De Rosnay (1975), pour comprendre la dimension historique de la Terre, il faut analyser les cycles géologiques dans un temps sagittal, et se détacher de l'aspect cyclique de ces derniers.

Les discordances stratigraphiques, l'absence de certaines formes de vie supposées intermédiaires entre les espèces de faune et de flore, ont fait que certaines tentatives de recherche de temps prennent naissance dans le but de trouver des explications aux lacunes rencontrées dans le traçage de l'histoire de la Terre. La tentative qui a marqué l'histoire des sciences est le darwinisme. Cette théorie a contribué à la naissance de nouvelles figures de temps. En effet certains chercheurs comme E. Mayer, se rangent à l'idée d'évolution graduelle des êtres vivants nous parlons dans ce cas de gradualisme alors que d'autres comme Eldredge et Gould proposent une évolution véritablement "saltatoire" et nous parlons dans ce cas des équilibres ponctués. En quoi ces deux approches illustrent-elles la "multiplicité" des temps?

2.3.2 Gradualisme contre équilibres ponctués (fin du 20^e siècle)

2.3.2.1 Le gradualisme

La diversité, la complexité et l'existence de certaines ressemblances entre les espèces vivantes ont incité les biologistes à trouver des explications au réel observable. Lamarck en tant que zoologiste a envisagé l'idée de l'évolution, cette idée a été développée plus tard par Darwin au 19^{ème} siècle dans sa publication « l'origine des espèces ». Darwin apporte par rapport à Lamarck deux nouveautés : « la sélection naturelle » en tant que mécanisme responsable de l'évolution des espèces et l'intervention du hasard dans l'histoire des êtres vivants.

Dans leur *"lutte pour l'existence"* (conditions de l'environnement, compétition vitale, réussite de la reproduction), il y a *"conservation des différences ou des variations individuelles favorables"* et *"élimination des variations nuisibles"* (Darwin, 1983 (1886), p.86). Ce que qualifie Darwin par "Hasard" des variations, est lié aux "nécessités" imposées par le milieu. C'est graduellement, grâce aux modifications répétées associées à la sélection par le milieu des plus favorables, que les espèces présentent des modifications. Elles produisent des variétés qui progressivement, mènent à de nouvelles espèces.

Selon Darwin, le gradualisme nécessite ainsi :

- un mécanisme permettant la variation et la perpétuant de génération en génération. (Darwin manquait à ce sujet d'arguments forts mais plus tard des recherches sur les gènes et leur transmission, conforteront la théorie de la sélection naturelle (M. Blanc, 1990, p. 63)).
- L'existence de formes « intermédiaires » expliquant la transition entre les espèces.
- La nécessité de l'**immensité des temps géologiques** permettant aux transformations de se réaliser et de conduire à une diversité du vivant.

La théorie de l'évolution se base sur les modifications **aléatoires** s'effectuant chez les êtres vivants, sous l'effet de l'action du milieu conduisant à une sélection naturelle. L'histoire du vivant est orientée vers le plus complexe. Le temps long est sagittal et continu.

2.3.2.2 Les équilibres ponctués

Cournot (1801-1877) a travaillé sur le hasard et son importance dans les analyses scientifiques. Pour ce chercheur mathématicien, il est plus logique de chercher à comprendre les raisons qui ont fait qu'un fait aura lieu à un moment donné de l'histoire. Ces raisons permettent de comprendre le pourquoi du déroulement des phénomènes. C'est la première graine de la contingence. Avec la géologie moderne au 18^{ème} siècle, le rôle de la contingence dans l'étude des traces du passé et la reconstitution de l'histoire a pris de l'importance (Gohau, 2003 ; Gould 1990), et son importance s'accroît avec le darwinisme au 19^{ème} siècle. En effet, Darwin mettait en jeu le hasard comme élément essentiel intervenant dans l'évolution des espèces, le paléontologue américain S.J. Gould (1941-2002) défend le rôle capital de la contingence : *" pour comprendre les événements et tendances générales de l'histoire de la vie, nous devons dépasser les principes de la théorie de l'évolution et examiner d'un point de vue paléontologique les structures contingentes de l'histoire de la vie, la seule version réelle qui se soit développée sur notre planète, parmi des millions d'autres qui auraient été possibles"* (Gould, 1994, p. 92). En effet, le passé ne se déduit pas du présent si l'on ne considère pas le rôle de la contingence selon le géologue suisse Gressly (Gohau, 1989). Sans remettre en cause la théorie générale de l'évolution, Gould se base sur des données paléontologiques et dégage certains aspects et mécanismes, qui sont délicats quand ils sont considérés dans un contexte gradualiste.

En effet, Gould met en doute la tendance prévisible et continue vers la complexité que présume le darwinisme, lorsqu'il montre que les études de la faune cambrienne dénombrent des formes d'une incroyable diversité et complexité. Il ajoute que le gradualisme n'est pas détectable dans les roches (Gould, 1982, p. 208) : il remet ainsi en cause l'évolution graduelle des espèces dont le mécanisme principale, est la sélection naturelle et il propose une évolution saltatoire discontinue des espèces. Il oppose au gradualisme la théorie des équilibres ponctués (D. Orange Ravachol, 2003). Allègre (2002) confirme cette idée. Il souligne que certains évènements se succèdent selon des modes variés à des rythmes divers, selon des échelles de temps différentes ce qui permet l'expression de la contingence de l'histoire géologique. L'histoire n'est donc qu'une histoire parmi une multitude de possibilités. Ainsi nous pouvons conclure dans le cadre des sciences de la Terre historiques, que les objets ne peuvent pas être véritablement compris qu'à travers leur histoire. La prise en compte de cette dimension a de grandes conséquences d'un point de vue épistémologique.

En récapitulation

Il existe une multiplicité de temps selon l'objet d'étude. En effet, l'étude d'un événement d'ordre écologique s'incarne dans un temps qui permet de tracer l'histoire des espèces vivantes or ce temps est moins court que le temps géologique et il est inclus dans ce dernier. L'évolution d'une espèce donnée dans le temps, paraît à l'échelle du temps humain parfois un peu longue alors que cette même évolution si nous la prenons dans le temps géologique elle devient rapide. Nous sommes ainsi en présence de deux figures de temps : un temps écologique (dans le gradualisme) et un temps profond géologique (dans les équilibres ponctués) (D. Ravachol.2003). Cette multiplicité de temps est expliquée par la lecture de l'histoire du vivant dans deux échelles de temps différents. L'articulation de ces différentes figures de temps est très délicate. En effet *"Tout le problème est de parvenir à transposer un temps dans l'autre et à rendre compte des inéluctables distorsions correspondantes"* (de Riquès 2002, p. 28). Le tableau suivant illustre la multiplicité des temps dans la controverse "gradualisme/ équilibres ponctués".

L'évolution des espèces	Le gradualisme	Les équilibres ponctués
Le temps	Sagittal, long	Sagittal, long,
l'échelle de lecture du temps	écologique	Géologique (temps Profond)
L'évolution dans le temps	Continue, graduelle	Discontinue, saltatoire
Guidée par	Le hasard	La contingence

Tableau1.2 : la multiplicité des temps dans la controverse "gradualisme/ équilibres ponctués"

Ce qui reste à voir dans les problèmes de temps, c'est que dans la plupart des cas; des problèmes actuels rappellent des problèmes qui ont déjà existé et dont le fonctionnement a été déchiffré. Faut-il donc résoudre les problèmes actuels dans un cadre historique pour comprendre le fonctionnement futur de ces derniers, faut-il se détacher de la géologie historique et se retourner vers une géologie fonctionnaliste, ou bien faut-il trouver un moyen de lier les deux géologies historique et fonctionnaliste, pour pouvoir comprendre l'actuel ? D'où la nécessité d'un nouvel angle de lecture : l'actualisme.

2.3.3 l'actualisme contre le catastrophisme

2.3.3.1 L'actualisme

Gohau (1987a, p.265) écrit que l'actualisme, ou principe des causes actuelles (de Luc, 1790), ou doctrine uniformitarienne (Whewell, 1832) "*consiste à postuler que les phénomènes anciens obéissent à des lois de même nature et de même intensité que les phénomènes actuels. Il s'oppose traditionnellement au catastrophisme (Whewell) pour qui les phénomènes passés ont eu, soit au début des temps géologiques, soit périodiquement, une plus grande ampleur.*"

Dans cet énoncé Gohau, parle de lois : dans un écrit plus récent (Gohau, 1997, p. 140) il parle de causes géologiques : « *le présent est la clé du passé, où les causes qui ont agi au long de l'histoire de la Terre ne diffèrent point essentiellement des causes géologiques actuelles (érosion, transport, sédimentation, métamorphisme, volcanisme, plissement et soulèvement des montagnes). La doctrine correspondante se nomme actualisme*". (D. Orange Ravachol, 2003, p.44)

D. Orange Ravachol (2003, p.44) résume **l'actualisme** en tant qu'**un principe méthodologique** aidant à reconstituer le passé de la Terre jusqu'à son état actuel, de la manière suivante:« *les phénomènes à l'origine des changements géologiques passés (leurs causes géologiques) ont existé et existent encore dans la nature actuelle. Ces phénomènes sont de même nature que les phénomènes agissant aujourd'hui ("Principe des causes actuelles" équivaut à "principe des causes agissant aujourd'hui") mais également de même intensité (Principe d'uniformité). C'est pourquoi l'actualisme est encore nommé uniformitarisme.* »

Cette relation existante entre le passé et l'actuel crée une certaine continuité dans l'exercice des causes. Et comme les effets produits par les causes actuelles ne se produisent par instantanément ou dans l'immédiat mais plutôt prennent du temps pour se réaliser (nous pouvons identifier une érosion, voir un dépôt sédimentaire dans un bassin mais nous ne pouvons pas suivre la diagenèse à l'échelle du temps humain tout simplement parce qu'elle nécessite un temps de réalisation plus étendu que le temps à l'échelle de l'homme), l'obtention des changements à l'état actuel ne peut être expliquée que par une sommation d'une infinité de petits changements sur des durées immenses et dont le fruit est la structure, l'objet ou le phénomène géologique actuel.

L'actualisme réclame ainsi un continuisme, additionné d'un gradualisme, nécessitant un temps long. Or des difficultés d'application du principe d'uniformitarisme, peuvent se présenter si des traces anciennes évoquent des discontinuités, on essaye alors de rechercher des preuves de l'existence de formations intermédiaires qui permettent de justifier le gradualisme ou encore, se détourner de son emploi.

Pour D. Orange Ravachol (2003b), l'actualisme est un principe méthodologique qui participe à la reconstitution de l'histoire de la Terre. Elle précise que, *lorsque celui-ci est en échec – car il ne permet pas d'expliquer les traces observées – il est alors possible de faire appel au catastrophisme raisonné qui mobilise des causes anciennes de natures différentes ou des causes actuelles de plus grande intensité.* L'actualisme est donc un concept qui constitue un principe fondateur du géologique historique et du raisonnement diachronique dans cette discipline.

Dans l'histoire des sciences, nous remarquons que l'utilisation du principe méthodologique de l'actualisme est influencée par l'idée que l'on se fait de l'évolution de la Terre au cours des temps géologiques: une première qui suppose que la Terre reste globalement

inchangée c'est la **conception stationnariste** de Lyell (1797-1875) ; une deuxième qui admet qu'elle évolue et change : c'est **la conception directionnaliste**, qu'on rencontre chez E. de Beaumont (1798-1874).

Selon (Canguilhem, 1983, pp. 165-167), *les méthodes sont étroitement liées à leur contexte d'utilisation*. Ainsi, le principe de l'actualisme ne sera pas utilisé de la même manière selon la conception qu'on se fait de l'évolution de la Terre il est intéressant donc de voir comment s'articule l'actualisme aux deux contextes stationnariste et directionnaliste.

2.3.3.1.1 : L'actualisme dans un contexte stationnariste

Pour que l'état de la Terre reste inchangé, alors que les reliefs subissent des destructions par l'érosion d'une façon continue, Hutton propose un mécanisme de régénération de ces reliefs (soulèvement des couches sous l'effet de la chaleur souterraine) et ancre ainsi le système Terre dans une évolution cyclique qui permet le maintien de l'équilibre dynamique et formée d'une succession de cycles identiques qui se poursuivent depuis le passé jusqu'à l'actuel et pour toujours (Gould, 1990, p. 134). Par ce système cyclique, Hutton met en œuvre de l'actualisme méthodologique, exclut les causes extraordinaires mais convoque le temps long. Les causes actuelles s'exercent et continuent à s'exercer, le système Terre est donc en équilibre dynamique. La Terre dans ce contexte stationnariste est sans histoire.

Pour Lyell (1797-1875), les causes qui ont agi au passé continuent à agir jusqu'à présent (actualisme) et sont de deux types : des causes aqueuses dévastatrices et des causes ignées régénératrices (Gould, 1990, p. 234). Ces deux types de causes fonctionnent dans une évolution cyclique pour maintenir la stabilité de la Terre, car à la différence de Hutton, Lyell considère que la Terre, dans son état stationnaire, subit des changements graduels et locaux qui sont imperceptibles à l'échelle du globe. En tout point de la surface Terrestre les cycles se produisent simultanément de la même manière (uniformité du rythme) qu'il explique par l'uniformité des lois de la nature et des modes opératoires (Gohau, 1999, p. 20). L'état de la Terre paraît donc stationnaire et le temps long n'a plus de valeur historique.

Pour ces deux actualistes le temps est effacé car les phénomènes géologiques sont raisonnés dans un système cyclique qui écarte le temps mais aussi les phénomènes se

déroulent dans le passé et dans l'actuel de la même façon. Il s'agit donc pour Hutton d'« un actualisme méthodologique » à la différence de Lyell.

D. Orange Ravachol (2003.p, 47) annonce que dans un état inchangé du globe Terrestre c'est-à-dire, dans un contexte stationnariste, chaque être vivant fossile possède un équivalent actuel : *« Si on projette ce présent dans le passé, nous reconstituons un environnement ancien avec l'espèce en question. Nous faisons usage d'un actualisme qui consiste en une mise en correspondance simple entre une entité passée et une entité actuelle qui se ressemblent beaucoup »*. C'est **un actualisme méthodologique de 1er niveau**, car **de simple analogie**. Ce type d'actualisme nie le temps dans la mesure où la projection de l'actuel dans le passé ne prend pas en considération s'il s'agit d'un passé proche ou lointain. Mais si l'équivalent actuel n'existe pas ou il est moins immédiat (dans la mesure où une diagenèse par exemple nécessite du temps pour que les grains libres au sein d'une matrice puissent adhérer et la structure passe d'un état mou à un état compacté) il faut faire appel à un deuxième type de raisonnement : **un actualisme qui nécessite du temps long** permettant la réalisation de certains phénomènes ne pouvant pas se réaliser dans l'immédiat. **C'est l'actualisme de deuxième niveau.**

2.3.3.1.2 : L'actualisme dans un contexte directionnaliste

Un deuxième modèle de l'évolution de la Terre vient coexister avec le modèle stationnariste : c'est le modèle directionnaliste qui suppose que « la Terre évolue et change par accumulation des effets des causes géologiques ». Dans le modèle directionnaliste le temps est orienté et il est irréversible.

Certains adeptes de ce modèle surtout **les neptunistes** comme Werner (1749- 1817), de Dolomieu (1750- 1801) et De Luc (1727-1817) supposent que la Terre a évolué jusqu'à son état actuel, qui représente l'achèvement de cette évolution : Il s'agit d'un **directionnalisme régressif**. Dans un tel cadre théorique, les conditions anciennes ne ressemblent pas aux conditions actuelles et donc les causes géologiques du passé ne peuvent en aucun cas être identiques aux causes géologiques actuelles. L'explication par des causes géologiques possibles fait qu'on raisonne en dehors du cadre catastrophiste mais la variabilité des causes géologiques dans le temps entre le passé et l'actuel fait qu'on

raisonne aussi en dehors de l'actualisme, qui n'est plus applicable dans un tel contexte. Selon Gohau (1997, p. 145) un tel raisonnement est **non actualiste- non catastrophiste**.

Pour d'autres comme Elie de Beaumont (1798- 1874), La Terre continue à évoluer, dans un système d'alternance entre périodes calmes et périodes révolutionnaires qui existaient au passé mais qui peuvent se reproduire dans le futur comme effets aux mêmes causes géologiques du passé : la Terre se refroidit lentement et son volume se rétrécit se traduisant en surface par des mouvements de réajustements des blocs crustaux engendrant des chaînes de montagnes.

Ce raisonnement **s'appuie sur l'actualisme dans un directionnalisme progressif**. Mais il ajoute à son actualisme un catastrophisme qui vient expliquer ce que l'actualisme n'arrive par à l'expliquer par analogie au présent, ce que D. Orange qualifie (2003, p. 53) de catastrophisme de deuxième niveau.

2.3.3.2 Le catastrophisme

Comme nous l'avons déjà dit dans le paragraphe précédent, *"Tout le problème est de parvenir à transposer un temps dans l'autre et à rendre compte des inéluctables distorsions correspondantes"* (de Riqlès 2002, p. 28), ce qui explique la multiplicité des figures de temps. Cette difficulté paraît claire lorsque l'immensité du temps géologique masque le déroulement des processus dans le temps, et la lecture des événements et des phénomènes dans l'échelle du temps humain fait donc que, les géologues se heurtent à une stabilité actuelle apparente, qui ne témoigne sur aucune cause possible (par analogie aux causes actuelles) pour expliquer les structures géologiques. La solution la plus facile, est donc de courir à des catastrophes, ou des crises naturelles, ou des causes extraterrestres, qui permettent de résoudre le problème, par exemple pour l'extinction des dinosaures on propose un bombardement météoritique.

Le catastrophisme est donc la solution idéale, la plus confortable pour un problème géologique, dont les causes ne peuvent pas être déduites par analogie à l'actuel. On trouve le catastrophisme chez Cuvier, pour qui, l'histoire de la Terre présente des catastrophes qui détruisent périodiquement les faunes et la survenue périodique de cataclysmes qui viennent corriger à chaque fois. La thèse catastrophiste s'accorde ainsi d'un temps cyclique.

D. Orange Ravachol (2003., p58), définit deux types de catastrophisme de la même manière qu'elle la fait pour l'actualisme méthodologique:

- *un catastrophisme de 1er niveau qui met en jeu une cause brutale, qui est soit une cause actuelle plus forte, soit une cause sans équivalent actuel.*

- *un catastrophisme de 2è niveau, raisonné, qui cherche à s'inclure dans de l'actualisme de 2è niveau. Les "catastrophes" sont alors vues comme des nécessités (l'actualisme est insuffisant).*

2.4 Conclusion

En géologie, la question du rapport au temps est donc complexe et peut rendre difficile la compréhension des objets géologiques qui ont, parfois constitué de véritables *obstacles épistémologiques* au sens de G. Bachelard (1938) dans l'histoire de la géologie. Nous essayerons donc de voir comment ces difficultés et obstacles se traduisent dans le cadre de l'enseignement des sciences de la Terre et de mieux connaître certaines utilisations du temps par les élèves.

3. sciences de la Terre, sciences de mécanismes

Les sciences de la Terre sont des sciences historiques dans la mesure où elles s'intéressent à la reconstitution de l'évolution de la planète Terre depuis sa formation et jusqu'à son état actuel. Néanmoins, les sciences de la Terre sont aussi des sciences fonctionnalistes telles que les qualifie D. Orange Ravachol (2003, p. 27) dans la mesure où elles s'intéressent au fonctionnement actuel du système Terre et cherchent à trouver des explications aux phénomènes naturels se produisant au niveau du globe, dans un cadre de la dynamique globale, tels que le magmatisme, les séismes, la sédimentation, le métamorphisme, la subduction, l'expansion océanique, le mouvement des plaques, la formation des chaînes de montagnes... et aux causes qui sont responsables de leurs genèses et aux causes qui interviennent dans leurs évolutions une fois formés à la surface de la Terre.

Dans un cadre fonctionnaliste, les géologues parlent de « causes » qui sont à l'origine des phénomènes naturels et les conditions nécessaires contribuant à la réalisation de ces phénomènes naturels et essayent d'établir le fonctionnement de chaque phénomène, qui

devrait être le même si les mêmes conditions se présentent. Ce type de raisonnement a changé quand la notion de contingence a été prise en considération dans l'élaboration d'un phénomène naturel.

Pour Gould, les causes de la nature ne suffisent pas à elles seules pour produire un événement naturel, il ajoute à ces dernières le rôle **de la contingence**. Il écrit que « *On peut expliquer un évènement après qu'il s'est produit, mais étant donné le rôle de la contingence, il est impossible qu'il se répète même en prenant le même point de départ.* » (Gould, 1991, p. 309). Gould parle ainsi des possibilités de réalisation qui dépendent d'un ensemble de conditions nécessaires et affirme que la simple variation d'une condition ou d'un paramètre peut rendre un événement ou d'un phénomène géologique irréalisable. Il nie aussi par son raisonnement la possibilité de la répétition d'un même phénomène avec les mêmes caractéristiques puisque les conditions de réalisation ne peuvent en aucun cas être les mêmes dans le temps ni dans l'espace.

Si la contingence est nécessaire pour la réalisation d'un phénomène ou d'un événement géologique, le problème acquiert un aspect fonctionnaliste : quel enchaînement possible peut-on conserver dans l'explication d'un phénomène géologique dans une multitude de possibilités ?

4. Les problèmes des sciences de la Terre

Notre étude s'inscrit dans le cadre de la didactique des sciences de la Terre. Nous cherchons à étudier la problématisation des élèves dans le cadre de la géodynamique et plus précisément la tectonique des plaques. De ce fait, il est nécessaire de préciser certains problèmes auxquels s'affrontent les chercheurs actuels et ceux dans l'histoire de la géologie au cours de la construction des savoirs géologiques jusqu'à la formulation du modèle de la tectonique des plaques. Pour ce travail, nous nous sommes basés sur l'histoire des sciences en nous limitant aux théories explicatives de l'histoire du globe Terrestre, ainsi qu'au modèle théorique actuel de la tectonique des plaques en tant que savoir savant actuel.

Avant d'entamer une étude sur les explications et les types de raisonnements des élèves face à des problèmes géologiques, il est nécessaire de passer d'abord par une mise au point sur les problèmes actuels des sciences de la Terre, qui préoccupent les géologues ainsi que les géophysiciens.

En effet, les problèmes géologiques sont des problèmes qui étudient des objets non expérimentables en laboratoire : des chaînes de montagnes, des séismes, des volcans, des bassins sédimentaires, des plis, des failles, des nappes de charriage.... Ainsi que des phénomènes non contrôlables ni dans le temps (car le fonctionnement de ces systèmes nécessite un temps géologique différent du temps à l'échelle de l'homme et donc leur contrôle est difficile et il nécessite une projection dans un cadre temporelle plus large que celui de la petite histoire) ni dans l'espace (car ces phénomènes se déroulent sur des surfaces très grandes et à des profondeurs de milliers de kilomètres c'est-à-dire, dans des espaces non accessibles à l'homme et le fonctionnement est déduit à partir de ce qui est observable à la surface de la Terre) : l'expansion océanique, la subduction, la collision, la sédimentation, l'orogénèse....

4.1 Les problèmes spatiaux des sciences de la Terre

En se référant à l'histoire des sciences, nous pouvons signaler quelques problèmes d'espace qui ont fait disputer les différentes thèses géologiques. Parmi les problèmes auxquels les géologues ont fait face depuis qu'ils ont commencé à chercher une explication à la structure externe du globe Terrestre on trouve celui de la similitude de limites continentales, la naissance des océans et la formation des chaînes de montagnes, etc.

En regardant dans l'histoire des sciences de la Terre nous remarquons que la formation des chaînes de montagnes représente un point de controverses entre deux thèses : la thèse plutoniste et la thèse neptuniste. En effet les neptunistes renvoient l'orogénèse à un phénomène sédimentaire (précipitations successives) se déroulant dans un espace de surface, sédimentaire alors que les plutonistes l'expliquent par un système qui rassemble des phénomènes de différentes natures (des phénomènes sédimentaires, suivies de phénomènes tectoniques) de déroulant dans l'espace de surface et dans l'espace souterrain.

Pour les neptunistes il est difficile de raisonner dans un espace autre que l'espace sédimentaire parce qu'il est difficile d'expliquer une structure observable à la surface de la Terre par des contraintes tectoniques qui prennent naissance dans l'espace souterrain c'est ce qui pose le problème qui ne peut se résoudre que si on raisonne dans un espace de surface. L'orogénèse constitue donc un problème d'espace à un moment donné de l'histoire.

La notion de « plaque » constitue une solution pour un problème d'espace à un moment donné de l'histoire, non résolu dans un cadre continentaliste celui de l'explication de la similitude des bords continentaux à la surface de la planète et du fonctionnement du système Terre. Pendant une grande période de l'histoire des sciences de la Terre, les géologues essayaient de résoudre le problème suivant : comment expliquer la similitude des bords continentaux ? Ils proposaient le concept de « continent », dans la thèse de la dérive continentale, cela pourrait s'expliquer par le fait que les géologues raisonnaient les explications géologiques dans un « espace continental » et non pas dans un « espace tectonique » plus large (voir précédemment) non accessible et donc non perceptible à l'échelle de l'Homme, par manque de données empiriques ce qui rend le passage conceptuel d'une conjoncture spatiale à une autre difficile à admettre.

4.2. Les problèmes historiques des sciences de la Terre

Les sciences de la Terre, dans un cadre historique, se proposent de reconstituer le passé de globe Terrestre, en retraçant la succession des événements qui ont marqué la planète Terre depuis sa formation, il y a environ 4,5 milliards d'années jusqu' au temps actuel, et tentent de rédiger son histoire, ainsi que l'histoire de la vie sur Terre. Une partie de ces événements est enregistrée dans les strates sédimentaires et elle est donc du ressort de la stratigraphie et de la paléontologie qui ne cesse de faire « parler » les fossiles. Une autre partie concerne les phénomènes d'origine tectonique comme l'évolution des magmas, les épisodes volcaniques, et elle est donc du ressort de la volcanologie. Une troisième partie se ramène aux phases successives des déformations de l'écorce Terrestre, à la chronologie des phases orogéniques (périodes au cours desquelles les chaînes de montagnes se sont formées) et elle est donc du ressort de la tectonique globale.

Ces reconstitutions dans le temps nécessitent de disposer d'une échelle chronologique universelle qui permet de situer les événements successifs sur la flèche du temps : c'est l'échelle des temps géologiques.

Les limites des différentes périodes correspondent à des événements importants à l'échelle de la planète et qui peuvent parfois avoir le statut de problèmes historiques pour les géologues sur la flèche du temps géologique dont l'explication est difficile (une discontinuité stratigraphique, l'extinction des dinosaures...) ou bien dans le cadre d'une

lecture particulière de l'histoire de la Terre (une lecture catastrophiste, actualiste, directionnaliste ou stationnariste).

4.3. Les problèmes fonctionnalistes des sciences de la Terre

Ce sont les problèmes qui s'intéressent au fonctionnement actuel de la planète Terre ainsi que les fonctionnements des différents phénomènes géologiques qui s'y produisent et dont la variation de chacun contribue au maintien de l'équilibre du système Terre. Les problèmes fonctionnalistes sont donc des problèmes qui cherchent à comprendre comment l'équilibre global peut être maintenu au sein d'un dynamisme permanent ? En effet, les recherches actuelles se concentrent sur l'étude de la dynamique du globe Terrestre ainsi que les enveloppes internes et externes, depuis l'atmosphère jusqu'au noyau, en se basant sur différentes techniques : la télédétection satellitaire, l'exploration des fonds océaniques, la simulation informatique, l'analyse chimique...

Ces problèmes fonctionnalistes sont étudiés dans un cadre actualiste et permettent non seulement de projeter le fonctionnement du globe Terrestre dans le passé du temps géologique dans le but de retracer l'histoire de la Terre, mais aussi permettent de prévoir le fonctionnement futur de la planète.

4.4 Conclusion

Il est vrai que nous distinguons trois types de problèmes, mais ils ne sont pas indépendants l'un de l'autre, au contraire, ils se relient.

Les problèmes fonctionnalistes nécessitent une prise en compte du temps et de l'espace et projettent ainsi les sciences de la Terre dans une dimension historique et une dimension spatiale.

Les problèmes spatiaux ont une dimension fonctionnaliste, en cherchant à expliquer la formation des structures géologiques en trois dimensions et projettent aussi les sciences de la Terre dans une dimension historique, en essayant de retrouver une chronologie aux événements.

La géologie fonctionnaliste, permet de raisonner les phénomènes et les événements dans un temps humain actuel du fait qu'elle permet une explication des phénomènes actuels qui sont entrain de se réaliser à une vitesse faible sur des distances ou des profondeurs minimales, mais en même temps elle permet de projeter le fonctionnement de ces

phénomènes dans un temps géologique long grâce à une sommation temporelle des petites variations enregistrées et permet ainsi par le biais de l'extrapolation de retracer l'histoire, d'expliquer l'actuel et de prévoir le futur de la planète Terre. De même, elle permet de prévoir et modéliser l'aspect futur du globe grâce à une sommation spatiale des petites variations enregistrées dans le paysage.

5. La géodynamique : une branche des sciences de la Terre

En examinant l'histoire des sciences de la Terre, nous remarquons que ces dernières ont connu une évolution au cours de l'histoire. En effet, au 18^{ème} siècle la géologie cherchait à reconstituer l'histoire de la Terre, elle ne se basait que sur son pôle historique, qui prend comme objet d'étude les traces conservées dans les strates sédimentaires pour retracer l'histoire de la Terre ainsi que les événements qui l'ont marqué en reculant sur la flèche du temps.

À partir du 19^{ème} siècle, elle joint à la dimension historique, une dimension dynamique (Gohau, 1997. p 140) qui prend comme objet d'études les phénomènes géologiques se déroulant à la surface Terrestre pour comprendre le fonctionnement du globe Terrestre en tant que système physique. Et les sciences de la Terre basculent ainsi vers un pôle fonctionnaliste. La géologie peut donc acquérir à côté d'un aspect descriptif et narrateur de l'histoire des phénomènes qui sont à l'origine de l'état actuel du globe, un aspect fonctionnaliste du système Terrestre.

Au 20^{ème} siècle, la géologie a étendu son champ d'investigation par le recours à l'interdisciplinarité (l'application pratique d'autres disciplines dans les recherches actuelles). En effet, nous signalons que l'application des méthodes des sciences physiques à l'étude de la Terre, de ses enveloppes liquide ou gazeuse, de son action à distance (champ magnétique, champ gravitationnel) a fait apparaître une nouvelle discipline : la géophysique (qui comprend la géodésie, la sismologie, la volcanologie la tectonophysique). Il en est de même pour l'application de la chimie dans l'étude des comportements chimiques des éléments dans les roches, les eaux et l'atmosphère qui a donné naissance à la géochimie. Nous nous trouvons ainsi dans le domaine des sciences de la Terre qui font appel aux méthodes de détection, de mesures et d'application. La géologie fonctionnaliste acquière ainsi, un aspect mécanique et expérimental qui la rapproche de certaines disciplines de la physique comme la mécanique des solides.

L'analyse du fonctionnement actuel de la planète permet de mettre en évidence un certain nombre de phénomènes dont l'ensemble constitue la géodynamique ou dynamique de la Terre, qui se subdivise elle-même en géodynamique externe et géodynamique interne.

La géodynamique externe s'étend à tous les phénomènes dont les causes et les empreintes essentielles touchent à la partie superficielle du globe, aux frontières de la lithosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère.

La géodynamique interne s'étend à des phénomènes profonds. C'est l'étude des déformations des matériaux Terrestres, et des grandes structures observées grâce à la géodésie spatiale qui est du ressort de la géologie structurale ou tectonique.

6. La théorie de la tectonique des plaques : pourquoi ce choix ?

Nous avons choisi d'orienter notre recherche dans le cadre de la tectonique des plaques pour plusieurs raisons que nous citons :

1. La tectonique des plaques est la théorie qui a révolutionné les sciences de la Terre dans les années soixante. Elle constitue un « nouveau paradigme » qui unifie la totalité de la communauté scientifique de nos jours et a réuni les spécialistes de tous les domaines des sciences de la Terre et même des disciplines qui interfèrent avec les sciences de la Terre.
2. Elle est née comme une théorie cinématique des mouvements à grandes échelles à la surface du globe. Mais elle est bien plus qu'une simple théorie cinématique. Elle met d'abord en évidence les échanges de matière entre l'intérieur et l'extérieur de la planète et la nécessité de l'existence de courants de convection dans le manteau. Elle représente ainsi, le modèle le plus solidement étayé aujourd'hui qui permet une explication scientifique et logique de la dynamique globale du fait qu'il est en étroite relation avec les différents phénomènes géologiques. Elle permet ainsi une compréhension entièrement renouvelée de la surface du globe en lui redonnant son unité et en révélant une Terre en plein dynamisme, en pleine évolution.
3. De point de vue didactique, et sur le plan de la problématisation en sciences de la Terre, elle représente l'exemple type qui réunit à la fois des problèmes de temps, d'espace et de fonctionnement au sein d'un même modèle théorique.

7 Conclusion

Suite à cette réflexion faite sur la notion d'espace et sa relation avec les sciences de la Terre, nous pouvons admettre **une multiplicité d'espace** dans l'explication en géologie, c'est-à-dire nous identifions plusieurs « figures d'espace » qui sont en relation avec les structures et les phénomènes géologiques qu'ils soient simples ou complexes. Nous expliquons la multiplicité des figures d'espace par les situations résultant d'un faisceau de circonstances et des conditions de réalisation qu'on qualifie de **la « conjoncture »** qui conduisent et oriente l'élève ou le chercheur vers telle ou telle figure d'espace. En effet l'espace n'est pas le même dans tous les phénomènes géologiques étudiés, et d'un problème géologique à un autre, la figure d'espace change : d'une érosion à une sédimentation à une subduction, la conjoncture de l'espace change et donc l'espace réel change.

La mise en comparaison du neptunisme et du plutonisme permet de rendre compte de la multiplicité des utilisations des conjonctures d'espace et donc des figures de « l'espace réel » dans deux problèmes géologiques : la formation des chaînes de montagnes d'un côté et des roches crustales de l'autre. Ce qui reste à vérifier ultérieurement dans la partie didactique si la mobilisation d'un espace réel à la place d'un autre au cours de la construction du savoir est strictement lié à la conjoncture que voit l'élève et qui permet de définir un espace réel bien déterminé et s'il est vrai que notre lecture de l'espace réel physique n'est en réalité que le résultat de la conjoncture mobilisée dans nos représentations au moment de la construction de l'espace en tant que notion.

Nous avons vu du côté de l'histoire des sciences aussi qu'il existe une multiplicité de figures de temps. Cette multiplicité est expliquée par la lecture de l'histoire dans deux échelles de temps différentes : l'échelle du temps géologique et celle du temps humain.

L'articulation de ces différentes figures de temps est très délicate pour le chercheur. En effet *"Tout le problème est de parvenir à transposer un temps dans l'autre et à rendre compte des inéluctables distorsions correspondantes"* (de Riquès 2002, p. 28).

La réflexion que nous venons de faire dans ce premier chapitre sur la relation qu'entretiennent les sciences de la Terre avec le temps, l'espace et le fonctionnement montre bien qu'il existe un nombre important de difficultés liées à ces trois concepts dans ce domaine. Ces difficultés rencontrées par les chercheurs au cours de la construction du savoir tout au long de l'histoire des sciences de la Terre, sont intéressantes pour une étude

didactique qui s'intéresse aux difficultés que rencontrent les élèves au cours de la construction du même savoir. Ce chapitre servira donc comme référence théorique pour notre étude didactique.

Chapitre 2

Problématisation et modélisation dans les sciences de la Terre

Introduction

1. L'Épistémologie et la didactique des sciences de la Terre
2. Problématisation et modélisation dans les sciences de la Terre
3. Conclusion

Introduction

Dans le chapitre 1, la réflexion faite sur l'histoire des sciences a montré qu'il existe une multiplicité de figures de temps et d'espace ainsi qu'une multiplicité de formes de fonctionnement chez les scientifiques malgré que les objets d'études sont toujours les mêmes. Ceci prouve qu'il existe différentes interprétations liées à ces trois concepts au cours de la construction du savoir. La diversité des conceptions rencontrées dans l'histoire de la géologie nous a poussé à voir quels types de raisonnement mobilisent les élèves face à des phénomènes géologiques qui ont constitué au cours de l'histoire des sciences des problèmes de temps, d'espace et de fonctionnement en d'autre terme comment utilisent-ils le temps, l'espace et le fonctionnement et quelles difficultés rencontrent ils au cours de la problématisation ? Les utilisent-ils de la même manière que les scientifiques rencontrés dans l'histoire lors de la résolution d'un problème ou bien autrement, c'est ce qui explique notre choix pour un travail de problématisation, comme thème de recherche dans le cadre didactique.

La mise en place de situation problèmes nécessite un nombre de conditions qu'il faut prendre en compte pour inciter les élèves à s'engager dans la recherche d'une solution à un problème donné. Certains travaux antérieurs ont été faits dans ce cadre. Notre recherche nous conduit donc à explorer différents cadres théoriques d'épistémologie et de didactique des sciences de la Terre. Nous allons nous intéresser en particulier aux rapports que la discipline entretient avec le temps, l'espace et le fonctionnement. Certaines études nous donnent des idées sur les difficultés rencontrées par les élèves dans la discipline pour construire un registre empirique et nous précisent l'importance de la modélisation dans le travail du scientifique ainsi que celui de l'élève.

Nous allons nous intéresser dans ce travail de recherche à la problématisation dans le cadre d'une théorie géologique la tectonique des plaques. Dans le cadre didactique, étudier la problématisation d'un savoir, nécessite un passage par une étude épistémologique de ce savoir il est donc nécessaire de mettre l'accent sur le lien qui existe entre épistémologie et didactique. Quel lien existe entre l'épistémologie et la didactique ? Que veut-on dire par situations problèmes ? Existe-t-il un lien entre la problématisation et la modélisation ?

1. L'Épistémologie et la didactique des sciences de la Terre

Astolfi et Develay (1989) et Artigue (1991), ont discuté les liens qui existent entre l'épistémologie et la didactique d'une même discipline et affirment que si nous voulons comprendre l'enseignement de cette dernière il faut passer par la compréhension des méthodes de cette science. Dans ce chapitre, nous allons donc nous intéresser à l'épistémologie et à la didactique des sciences de la Terre en général et de la tectonique des plaques en particulier.

D'un point de vue épistémologique, nous allons expliquer les rapports que les sciences de la Terre entretiennent avec le temps et l'espace et les obstacles épistémologiques qui sont liés à ces rapports. Nous allons aussi nous intéresser à la modélisation dans les sciences de la Terre.

Quelles sont les difficultés et les obstacles rencontrés par les élèves dans l'enseignement de la théorie de la tectonique des plaques ? Quelle est la place des modèles dans le cadre tectonique ?

Nous allons passer à l'analyse de productions faites au sein d'un travail de groupe à côté des débats qui vont nous permettre d'identifier les types de raisonnements émergeant au cours de la résolution de problèmes.

1.1 L'épistémologie et la construction de situations problèmes

L'histoire des sciences de la Terre n'a pas été écrite par les épistémologues mais plutôt par certains géologues (Ellenberger, Gohau, 1990) qui ont mis en valeur les deux variables qui cordonnent les phénomènes de la géologie : le temps géologique et l'espace globale. Ces deux variables ont permis de retracer l'histoire de la Terre.

L'étude épistémologique des sciences de la Terre, permet de caractériser les méthodes adoptées par les géologues au cours de la recherche pour construire un processus ou retracer une histoire ou encore prévoir un phénomène donné. De l'autre côté, l'étude didactique des sciences de la Terre permet de caractériser les stratégies que mettent en œuvre les élèves au cours de la construction d'un concept donné. Pour comprendre la démarche suivie par l'élève, il est nécessaire de passer par ce qu'apporte l'épistémologie, même si dans la première il s'agit d'une recherche alors que dans la deuxième il s'agit d'un apprentissage.

Il existe ainsi une relation entre l'épistémologie d'une discipline et sa didactique. Plusieurs auteurs tels qu'Astolfi et Develay (1989 p. 24) confirment cette idée et affirment que « *la didactique est à regarder du côté de l'épistémologie contemporaine si les principes sur lesquels elle s'appuie pour proposer un enseignement des sciences expérimentales ont quelque validité.* ». Artigue (1991) dans ce même contexte annonce que « *l'analyse épistémologique est nécessaire au didacticien* ». En effet, l'analyse des conceptions des chercheurs qui se sont succédés au cours de l'histoire peut également nous aider à interpréter des conceptions d'élèves, elle permet aussi de poursuivre les obstacles épistémologiques qui peuvent réapparaître. Cette analyse nous permet de comprendre les étapes de la construction du savoir et donc nous permet aussi de suivre la reconstruction par l'élève du savoir enseigné.

1.2 Temps, espace et obstacles dans l'apprentissage des sciences de la Terre

1.2.1 Des obstacles épistémologiques aux obstacles didactiques

Dans le cadre d'une situation d'apprentissage l'élève possède des connaissances empiriques préexistantes qu'il mobilise au cours de la construction d'une solution au problème à résoudre. Ces connaissances empiriques préexistantes interviennent dans la construction de conceptions. Certaines de ces conceptions résistent à l'apprentissage d'un nouveau savoir, elles constituent alors des obstacles. L'analyse historique de certaines résistances montre que ces dernières peuvent se répéter dans le temps et réapparaître chez les élèves. Ainsi, « *L'identification des conceptions historiquement rencontrées peut nous aider à interpréter certaines réponses d'élèves, à comprendre leur cohérence* ». Artigue (1991 p. 277).

G. Bachelard (1938) propose le concept d'*obstacle épistémologique*. Ce concept permet de caractériser la rupture théorique qui sépare la pensée commune de la pensée scientifique. En sciences, les obstacles constituent des précurseurs pour le progrès intellectuel. Canguilhem reprend les idées de Bachelard et montre qu'en sciences, l'erreur est un passage obligé. Le franchissement d'obstacle nécessite une identification de la connaissance erronée et son rejet doit faire partie intégrante de la connaissance nouvelle. Ainsi ce processus diffère d'une simple correction d'erreur ou de l'accommodation de Piaget.

1.2.1.1 Les obstacles liés à la perception de l'espace

Sanchez (2007), évoque les rapports qu'entretiennent les élèves avec l'espace et énumère un nombre de causes qui ont favorisé l'apparition de ces obstacles en se référant à un certains nombres d'auteurs :

- Savaton (1998) affirme que l'apprentissage de l'aspect tridimensionnel des objets ne figure pas d'une manière renforcée dans les programmes d'enseignement secondaire en France dans les années 90. Savaton donne l'exemple des travaux de réalisation de coupes à partir d'une carte géologique. Il annonce que cet exercice conduit à passer d'une représentation à deux dimensions (la carte) à une autre représentation à deux dimensions (la coupe) pour mener l'élève à se construire une vision tridimensionnelle du sous-sol. Ceci se rencontre aussi dans les programmes tunisiens même aujourd'hui (en 2011), on continue de travailler de la même manière les coupes géologiques avec les élèves: cette façon de passer d'une représentation à deux dimensions à une autre à deux dimensions peut ne pas être adéquate à la construction d'une image en trois dimensions et constitue une difficulté pour la perception de l'espace.
- Pitburn et *al* (2002) : affirment que les élèves trouvent des difficultés à relier les échelles d'observation d'espace mises en jeu ils donnent l'exemple du minéral, la roche, l'affleurement ou le paysage jusqu'à la lithosphère. Ils ont donc du mal à distinguer les différents niveaux d'observation à les relier entre eux et à changer de référentiel d'observation. Pitburn et *al* (2002) différencient deux grands types d'aptitudes pour le raisonnement spatial en géologie. La première constitue l'aptitude à percevoir des structures tridimensionnelles ou à s'orienter par rapport à ces structures. La seconde constitue l'aptitude à manipuler ou transformer mentalement des structures tridimensionnelles.

Le passage à un raisonnement géologique nécessite le franchissement d'obstacles qui consiste à acquérir la capacité de passer d'une information sur l'objet géologique en 2D vers une représentation en 3D qui est censée évoluer dans la quatrième dimension : le temps. En effet Dodick et Orion (2003a) insistent sur l'importance de la corrélation entre aptitude à la visualisation spatiale et capacité à prendre en compte la dimension temporelle dans le raisonnement.

1.2.1.2 Les obstacles liés à la perception du temps

D'après Allain, 1995, Monchamp et Sauvageot- Skibine, 1995, le fixisme représente l'obstacle le plus important dans la compréhension des phénomènes géologiques. Cet obstacle est dû à la difficulté de percevoir le **dynamisme des processus géologiques**. Et si nous parlons de dynamisme cela veut dire une variation en fonction du temps. Or cette variation est pour la plupart des phénomènes géologiques, excepté le volcanisme et les séismes, pas directement accessible pour l'élève car elle se réalise sur une échelle temporelle plus large que l'échelle humaine, ce qui rend l'état dynamique non perceptible ; et c'est l'état fixe et stationnaire qui prend sa place. Ainsi l'obstacle fixiste n'est en réalité qu'un obstacle lié à la difficulté de percevoir **l'immensité du temps géologique**. C'est dans ce cadre, que C. Orange (1995) et D. Orange (1995) mettent l'accent sur la problématisation du temps en vue de dépasser le fixisme en géologie.

D. Orange Ravachol, 2003b montre que les élèves sont capables d'appliquer un actualisme de premier niveau, (actualisme d'analogie), en transposant vers le passé une structure géologique observable actuellement par simple analogie mais dans ce cas le temps n'est qu'un repère chronologique, et n'est pas producteur de phénomènes comme dans le cas de **l'actualisme de second niveau**, ou le recours au temps long permet d'envisager les causes qui sont responsables de la réalisation d'un événement ou de l'édifice d'un objet géologique. La difficulté à mobiliser du temps long représente pour D. Orange Ravachol un obstacle.

Savaton propose qu'une solution pour franchir cet obstacle est de réduire les temps géologiques à des durées plus courtes et plus proches de l'expérience humaine (Savaton, 1998) comme par exemple, ramener la durée de l'histoire de la Terre à une année. Mais il ajoute que cette solution présente des inconvénients dans la mesure où elle ne permet pas de vraiment valoriser le temps géologique dans la tête de l'élève par **la simple transposition des événements dans le temps humain**.

Vale Dias (2002), dans ses propos nous mène vers une autre voie pour franchir cet obstacle par rapport au temps et cela en évoquant la nécessité de la construction du **raisonnement diachronique** (*Montangero (1996) définit le raisonnement diachronique comme la capacité à se représenter des transformations au cours du temps.*) qui permet de

s'interroger sur l'évolution passée et future des objets pour comprendre les transformations dans le temps.

Si nous résumons ce qui précède, nous trouvons que la conceptualisation du temps géologique nécessite la mise en jeu de différents éléments : la prise en compte du dynamisme des processus géologiques, l'application d'un actualisme de second niveau et la mobilisation d'un raisonnement diachronique. Selon Dodick et Orion (2003a), pour qu'un raisonnement diachronique puisse être construit, il faut que les trois règles caractéristiques de ce raisonnement soient présentes :

- le *concept* de transformation qui se résume dans le principe d'actualisme.
- le *concept* de l'organisation temporelle qui se résume dans les principes stratigraphiques.
- le *concept* des liens inter-phases qui consiste à appliquer un raisonnement causal et le principe d'actualisme expliquant les relations entre les événements qui se sont succédés.
- *Le concept*, de « synthèse dynamique » Montangero (1996) correspond, au résultat de la mise en synthèse des trois précédents pour le géologue.

2. Problématisation et modélisation dans les sciences de la Terre

2.1 Les modèles, au cœur des résolutions des problèmes

Au cours de la résolution d'un problème donné nous pouvons trouver au sein d'une même classe, une multitude de systèmes explicatifs qui se différencient les uns des autres. Cette variabilité dans les types d'explications proposés nous pousse à étudier les différents registres sur lesquels se sont basés les élèves pour construire tel ou tel modèle explicatif.

Selon les enchaînements suivis dans le processus de l'élaboration d'une explication, au cours de la résolution d'un problème donné, il se forme des nécessités construites par le chercheur ou par l'élève. Ces nécessités définissent des conditions de possibilité des solutions élaborées formant ce que C. Orange. (1999) qualifie d'espace de contraintes.

En se référant aux travaux de Martinand (1992, 1995), Orange C. caractérise l'activité d'explication- modélisation en sciences de la vie et de la Terre comme une mise en tension entre deux registres :

- un registre empirique dont les éléments correspondent aux faits pris en compte dans l'explication.
- un registre des modèles, mettant en jeu des modèles explicatifs en relation avec les faits et les phénomènes et qui cherchent à les rendre en compte.

Aux deux registres précédents, s'ajoute le registre explicatif qui correspond aux références explicatives et implicites de celui qui propose un modèle (C. Orange, 2000, P.25) et qui permet la mise en relation et la construction des deux registres précédents.

Pour modéliser C. Orange (1997), suppose que l'élève devrait pouvoir maîtriser le problème de la mise en concordance des faits, c'est-à-dire au cours de l'activité l'élève mobilise des références explicatives pour construire un modèle du réel. La modélisation n'est pas donc une simple mise en relation des différents registres pour trouver une solution ; elle nécessite une mise en tension de ces différents registres qui conduit à la problématisation. Il s'agit d'identifier à partir des contraintes empiriques significatives pour le problème, les conditions de possibilité du modèle (ses nécessités). Le modèle est alors une solution réalisant les nécessités C. Orange (2000).

Pour être sûr que les éléments des différents registres sont adéquats pour pouvoir étudier la relation qui existe entre les trois registres (registre empirique, registre des modèles et registre explicatif), il est nécessaire de cerner le problème étudié dans son contexte scientifique c'est-à-dire qu'il faut préciser son niveau de formulation. Ainsi, certains concepts qui sont construits et donc qui font partie du registre des modèles, dans un cadre particulier peuvent devenir des éléments du registre empirique dans un autre contexte.

Hallon (2004) a considéré les modèles comme intermédiaires entre deux registres il annonce que : *«La connaissance scientifique résulte de transactions entre un registre empirique constitué de réalités physiques et le registre rationnel du scientifique. Cette dialectique continue se traduit par la construction de modèles provisoires dont la validité est mise à l'épreuve de données empiriques recueillies à cette fin. Ces tests permettent de choisir entre l'acceptation, la modification ou le rejet du modèle élaboré. Selon ce point de vue, une hypothèse de recherche apparaît comme une assertion sur une relation entre un modèle et le registre (Halloun utilise le terme de champ) empirique qu'il est censé expliquer (Giere, 1988 cité par Halloun, 2004 p. 30). ».*

Ainsi la modélisation va servir dans la résolution des problèmes en permettant deux types d'activités : « *Des activités d'exploration qui consistent à utiliser des modèles conceptuels pour décrire, expliquer, prédire le comportement des systèmes physiques et des activités de création qui consistent à imaginer de nouvelles manière de concevoir ces systèmes et prévoir l'existence de nouveaux aspects du réel (Halloun, 2004 p. 155). Il s'agit, selon ce point de vue, d'une part d'enseigner les modèles fondamentaux des théories de la physique et d'autre part de placer les élèves dans un contexte rationnel, leur permettant de se construire un registre empirique, qui favorise la compréhension des lois de la théorie en jeu ainsi que l'appropriation d'éléments nécessaires à la construction de modèles plus complexes (Halloun, 2004 p. 140).* » (Sanchez, 2007).

Lhoste (2006 p. 83) définit les deux registres comme suit : « *le registre empirique contient des objets, des phénomènes et des expériences quotidiennes. Il contient les éléments que l'on peut vérifier par une observation, une mesure. Les éléments du registre empirique correspondent à « ce qu'il y a à expliquer » et nous pouvons dire qu'ils ne sont pas constitués une fois pour toutes. [...] Le registre du modèle est lui aussi construit par l'élève. Il contient les éléments liés à une organisation et/ou à un fonctionnement plus ou moins imaginé. Ces éléments constituent les tentatives de solutions proposées pour expliquer les éléments du registre empirique* ».

3. Conclusion

Ces différents auteurs présentent un accord sur la fonction jouée par le modèle dans la résolution d'un problème : un intermédiaire entre un réel à expliquer et une théorie explicative. Les activités dans la classe font intervenir deux types de registres : un registre empirique et un registre des modèles. La construction d'un concept donné au cours d'une activité en classe nécessite d'établir un lien (une mise en tension) entre ces deux registres qui obéit à des nécessités.

Chapitre 3

Méthodologie de recherche

Introduction

1. L'articulation de l'espace et du temps au fonctionnement en Sciences de la Terre
2. Les problèmes géologiques choisis
3. Les questions de recherche
4. Les hypothèses proposées
5. Méthodologie de recherche

Introduction

L'étude théorique faite dans les deux chapitres précédents nous permet de retenir quelques problèmes des sciences de la Terre du point de vue de l'utilisation du temps, de l'espace et du fonctionnement. Nous allons présenter les problèmes géologiques choisis ainsi que la méthodologie de notre travail.

1. L'articulation de l'espace et du temps au fonctionnement en Sciences de la Terre

Dans l'étude théorique, et en se référant à D. Orange Ravachol (2003) sur la complexité du temps, nous avons constaté qu'il existe une articulation entre la géologie historique, qui essaye de reconstituer l'histoire de la Terre et la géologie fonctionnaliste qui essaye d'expliquer le fonctionnement actuel de la planète grâce à l'actualisme au quel s'ajoute l'effet de la contingence. Nous avons aussi constaté qu'il existe une articulation entre l'espace et le fonctionnement : le fonctionnement des phénomènes réclame des conditions nécessaires de l'espace de réalisation (des nécessités portant sur les modèles de fonctionnement des phénomènes) et que nous avons qualifié de conjoncture spatiale. Ceci nous mène à dire qu'aucun fonctionnement géologique ne peut être étudié en dehors du cadre temporel et /ou spatial, tout est influencé par l'effet du temps et obéit aux lois physiques et aux conditions de l'espace. Nous pouvons modéliser cette articulation par un schéma en triangle qui présente les types de relations suivantes :

1. L'espace impose des conditions de réalisation pour un fonctionnement donné.
2. Le fonctionnement suggère des nécessités sur le temps (par exemple le temps long).
3. Le temps agit dans l'espace et le change.
4. L'espace par ses empreintes (structures géologiques) renseigne sur le temps.
5. Le temps reconstitue l'histoire d'un fonctionnement (l'exemple de l'orogénèse).
6. Le fonctionnement agit sur l'espace pour maintenir son équilibre (comme dans le cas du couple expansion - subduction) ou bien pour le changer (comme par exemple le cas de la naissance d'un océan ou d'une chaîne de montagne).

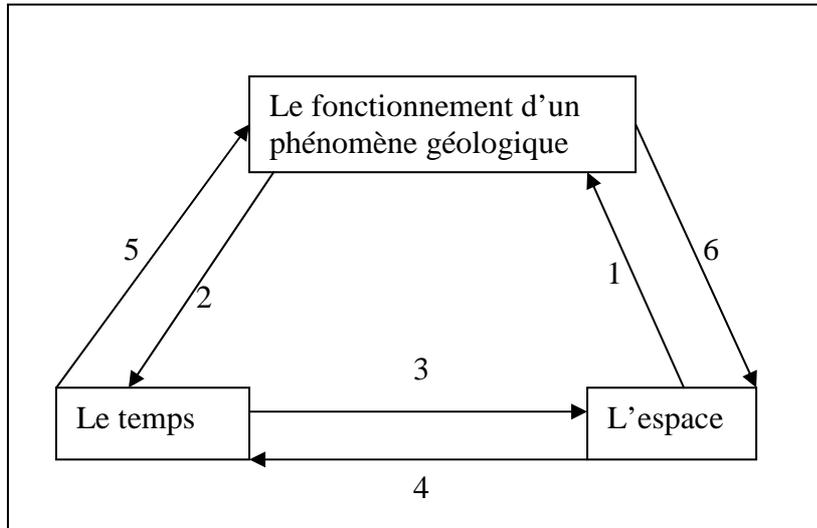


Figure 2.1 Schéma modélisant l'articulation du temps à l'espace et au fonctionnement

Ceci nous pousse à nous demander s'il est possible de résoudre un problème de fonctionnement sans tenir compte de l'influence des nécessités de l'espace et du temps et inversement. Autrement dit étudier un problème de temps à lui seul permet-il d'avoir les mêmes résultats que de l'étudier en tenant compte de l'effet de l'espace et du fonctionnement en tant que nécessités? Existe-il une différence entre « une problématisation faisant appel à un seul élément (temps ou espace ou fonctionnement) » et « la problématisation faisant appel aux trois éléments mis en réseau (interférence entre temps, espace et fonctionnement) » ? Nous essayerons de répondre à ces questions dans le dernier chapitre, dans le quel nous assemblerons les différentes analyses faites séparément dans les trois problèmes étudiées pour quatre élèves.

2. Les problèmes géologiques choisis

Nous avons choisi trois types de problèmes : un problème d'espace celui de la subdivision en plaques lithosphériques, un problème de fonctionnement celui du mouvement des plaques et un problème de temps celui de la naissance d'une chaîne de collision (l'exemple de l'Atlas tunisien). Le choix de ces trois problèmes a été fait pour les raisons suivantes :

2.1 Des problèmes liés à une même théorie : la tectonique des plaques

Les problèmes que nous allons étudier s'intègrent au cadre de la théorie de la tectonique des plaques, la théorie qui explique actuellement l'état du système Terre.

Cette théorie a permis d'expliquer l'évolution du système Terre du côté de l'espace, du temps et aussi son fonctionnement, donc elle réunit les trois piliers essentiels des sciences de la Terre (le temps, l'espace et le fonctionnement) Nous supposons que l'étude de trois problèmes faisant partie d'un même cadre théorique celui de la tectonique des plaques crée une cohérence dans la progression de la situation d'enseignement - apprentissage du moins pour l'élève. C'est-à-dire l'élève progresse naturellement d'un problème vers un autre même si le premier représente un problème d'espace, le deuxième de fonctionnement et le troisième de temps.

2.2 Des problèmes dont l'un explique l'autre

Dans le premier chapitre nous avons montré qu'il existe différentes conjonctures d'espace et différentes figures de temps, nous avons aussi montré que la géologie historique est liée à la géologie fonctionnaliste. En se référant à ce chapitre, nous supposons que le problème d'espace ne peut pas être traité indépendamment des deux autres problèmes celui du temps et celui du fonctionnement car dans l'explication de l'évolution de l'espace on fait intervenir le temps et inversement.

2.2.1 Un problème d'espace : La subdivision en plaques lithosphériques

Le programme de la troisième année sciences expérimentales demande d'étudier la subdivision de la lithosphère en plaques mobiles, il lie cette subdivision à l'expansion et à la subduction qui sont deux phénomènes prouvant l'existence de plaques lithosphériques mobiles (le manuel scolaire p.311). Il s'agit ainsi d'un problème d'espace dans la mesure où on passe d'une lecture géographique de la surface du globe terrestre qui permet la subdivision en océans et continents vers une lecture géologique qui permet de réunir au sein d'une même entité spatiale (la plaque), océan et continent. Nous allons donc pousser les élèves à résoudre un problème géologique celui de la subdivision de la surface du globe en plaques lithosphériques en début du chapitre en étudiant la répartition des faits géologiques à la surface du globe. Ce problème permet d'avoir une idée sur l'utilisation de l'espace mais ce problème fait appel aussi au fonctionnement lorsqu'on s'intéresse au mouvement des plaques. Nous avons donc choisi de traiter la mobilité des plaques comme un problème de fonctionnement.

2.2.2 Un problème de fonctionnement : Le mouvement des plaques

Dans le programme de la troisième année sciences expérimentales, l'étude de la théorie de la tectonique des plaques commence par une présentation de la structure de la dorsale médio atlantique, puis par l'étude du fonctionnement de cette dorsale pour arriver à prouver l'existence d'une expansion océanique (le manuel scolaire p 302-303-304-305). Ensuite on passe à l'étude des fosses océaniques et leur fonctionnement pour prouver l'existence d'un phénomène de subduction. L'étude de la mobilité des plaques nécessite de mettre en jeu implicitement la notion de l'équilibre dynamique globale ainsi que la liaison simultanée du fonctionnement d'une dorsale au cours de l'expansion océanique au fonctionnement d'une fosse au cours de la subduction. Ce problème de fonctionnement touche donc :

- au temps cyclique (en couplant l'expansion à la subduction) mais aussi au temps sagittal long du fait que le mouvement des plaques se fait à une vitesse de quelques cm par an.
- A l'espace puisque l'équilibre lithosphérique nécessite une perte d'espace d'un côté et la création d'un nouvel espace d'un autre côté.

Les élèves problématiseront les mécanismes moteurs des phénomènes géologiques (Dans le cadre d'une géologie fonctionnaliste, interprétatrice) en focalisant la situation problème sur le couplage des deux phénomènes : la subduction et l'accrétion pour le maintien de l'équilibre dynamique, et le mécanisme moteur du mouvement des plaques.

2.2.3 Un problème de temps : La naissance d'une chaîne de collision intercontinentale : l'exemple de l'Atlas Tunisien

Le programme de troisième année sciences expérimentales demande d'étudier l'exemple de l'orogénèse de l'Atlas Tunisien en tant que phénomène explicable par la théorie de la tectonique des plaques (le manuel scolaire p.319). L'histoire d'une chaîne de collision, fait intervenir d'une part le mouvement des plaques, leur rapprochement, l'affrontement des parties continentales, la formation des structures de compression et donc implicitement le moteur de mouvement (courant de convection) qui est responsable de ces déformations à la surface (donc le fonctionnement d'une collision) et d'autre part elle fait appel au temps sagittal et au temps long. Ainsi au sein d'un problème de temps, l'espace et le fonctionnement s'imposent.

Dans le cadre d'une géologie historique actualiste, narratrice, mais aussi qui articule le temps au fonctionnement) nous allons étudier la reconstitution de l'histoire de la formation d'une chaîne de montagnes : (l'exemple de l'Atlas Tunisien). Pour ce faire nous allons placer des élèves de troisième année secondaire dans des situations problèmes bien choisis en référence au cadre théorique au sein d'un travail de groupe, récolter leurs productions écrites textes (et /ou) dessins, les interpréter, faire ressortir les utilisations de temps que proposent les élèves, les analyser par rapport à l'histoire d'une part et au modèle actuel d'autre part et dégager les difficultés rencontrés par ces derniers lors de construction de problèmes.

2.2.4 Conclusion

Le choix de ces quelques problèmes géologiques se justifie donc dans leur rapport aux utilisations du temps de l'espace et du fonctionnement, il est difficile de traiter un problème géologique sans recours à la géologie historique et à la géologie fonctionnaliste. Au sein d'un même problème la géologie historique s'articule à la géologie fonctionnaliste et dans le passage d'un problème à l'autre cette articulation s'impose d'avantage.

3. Les questions de recherche

- 1) Quelles sont les difficultés que rencontrent les élèves au cours de la résolution d'un problème d'espace, un problème de temps et un problème de fonctionnement ?
- 2) Quelles relations entretiennent les élèves avec l'espace le temps et le fonctionnement au cours de la problématisation d'un savoir géologique ?
- 3) Ceci nous pousse à se demander s'il est possible de résoudre un problème de fonctionnement sans tenir compte de l'influence des nécessités de l'espace et du temps et inversement. Autrement dit étudier un problème de temps à lui seul permet-il d'avoir les mêmes résultats que de l'étudier en tenant compte de l'effet de l'espace et du fonctionnement en tant que nécessités? Existe-il une différence entre « une problématisation par l'utilisation du temps sans tenir compte de l'influence du cadre spatial et fonctionnel » et « la problématisation en réseau (en tenant compte de l'interférence entre temps, espace et fonctionnement) » ?

4. Les hypothèses proposées

- 1) Les élèves rencontrent des difficultés liées à la lecture de l'espace et à l'appropriation du temps géologique dans la reconstitution de l'histoire ainsi que des difficultés dans la modélisation des mécanismes.
- 2) La problématisation d'un phénomène géologique nécessite l'utilisation du temps de l'espace et du fonctionnement non seulement réunis mais qui interfèrent et dont l'interférence influe le choix d'une figure de temps et/ou d'espace et le choix d'un mécanisme explicatif donné.

5. Méthodologie de recherche

Chaque problème géologique sera traité selon la même démarche : d'abord un état du savoir actuel suivi d'une étude épistémologique; puis une analyse préliminaire dans le cadre de l'activité proposée ensuite une analyse des productions des élèves avant l'apprentissage comme diagnostique pour les conceptions et en fin une analyse des productions des élèves au cours de la résolution des problèmes.

5.1 un questionnaire de diagnostique (pré- apprentissage)

Pour les trois problèmes de recherche, avant de proposer les situations problèmes, nous allons distribuer aux élèves un questionnaire avant même d'entamer la première séance du cours sur la théorie de la tectonique des plaques pour connaître quels types de préconceptions possèdent-ils sur la théorie de la tectonique des plaques, et sur les notions telles que : plaque lithosphérique, mouvement des plaques, l'équilibre lithosphérique, subduction, collision. Et quels types d'expressions lexicologiques avancent-ils pour répondre et argumenter et quels modèles explicatifs proposent-ils pour expliquer un fonctionnement, quelles relations entretiennent-ils avec le temps et l'espace.

Ce questionnaire est composé de six questions réparties sur les trois problèmes d'étude mais implicitement. Deux questions pour chaque problème. Nous analysons chaque question indépendamment puis nous croisons les résultats obtenus des deux questions pour faire sortir des catégories de conceptions.

Ces conceptions vont servir pour voir s'il existe une évolution des conceptions ou un changement conceptuel au cours de la résolution de problème et de déterminer l'écart entre les préconceptions et les conceptions nouvelles si elles existent au cours de la

problématisation. Ensuite nous allons proposer des situations problèmes qui vont être appliquées en classe et qui permettront de détecter les difficultés que rencontrent les élèves au cours de la résolution de problèmes et de déterminer la cohérence dans le modèle proposé si elle existe.

5.2 Une approche par la problématisation

Selon Bachelard (1938), les problèmes sont construits dans l'interaction entre un registre empirique et un registre des modèles. Ainsi en se référant aux travaux réalisés par C.Orange & al, (1999) sur la construction de problèmes, nous allons reconstituer les espaces de contraintes en termes de contraintes empiriques et de nécessités sur les modèles construits, et d'éléments du registre explicatif pour chaque problème étudié. Nous allons travailler sur des débats faits en classe qui vont nous fournir des arguments.

5.3. Une étude épistémologique

Pour chaque problème géologique, nous ferons d'abord un état du savoir actuel dans les relations qu'il entretient avec l'espace pour le premier problème, avec le fonctionnement pour le deuxième problème et avec le temps pour le troisième problème. Nous situerons ce savoir dans l'histoire de la géologie en précisant ses caractéristiques et les ruptures qu'il établit au cours de sa construction.

5.4. Une étude didactique

L'étude didactique se consacre à l'analyse et l'interprétation des productions des élèves. Nous disposons, pour chaque problème, d'un corpus fourni de productions écrites d'élèves auxquelles on ajoutera des débats faits en classe permettant la confrontation des modèles explicatifs des élèves. Dans les situations préparées nous avons traité l'utilisation du temps et l'utilisation de l'espace implicitement avec les élèves, mais pour le fonctionnement, nous avons questionné les élèves directement (quand il s'agit de trouver un mécanisme qui maintient l'équilibre lithosphérique du globe).

Avant de passer à l'analyse des productions des élèves, nous réalisons une analyse à priori des situations, en terme de problématisation dans les situations de classe proposées en se basant sur l'étude épistémologique afin de construire des grilles de lecture des productions des élèves.

Puis nous étudions les productions des élèves de façon à identifier les écarts entre ce que produisent l'élève et le scientifique.

Un dernier chapitre tente une synthèse des résultats obtenus pour les trois problèmes étudiés ainsi qu'une mise en perspective; il complète les études de cas par l'articulation des productions de quelques élèves dans les trois problèmes pour voir quel interférence fait le temps mobilisée avec l'espace utilisé et le fonctionnement proposé au sein d'une même interprétation.

Première étude
Le problème de la subdivision de la
surface Terrestre en plaques
lithosphériques

Chapitre 4

Plaques et limites des plaques

Contenu scientifique et réflexion épistémologique

Introduction

1. Les plaques lithosphériques et les limites de plaques. (Le contenu scientifique)
2. Réflexion épistémologique sur l'espace dans l'histoire de la construction du modèle plaquiste
3. L'utilisation de l'espace par les scientifiques actuels dans la compréhension des plaques lithosphériques et les limites de plaques
4. Problématisation de l'espace dans la notion des plaques lithosphériques et les limites de plaques par les scientifiques actuels
5. Conclusion

Introduction

Dans cette première étude nous allons traiter un problème d'espace celui des plaques lithosphériques et limites des plaques. Un problème qui a été choisi suite à un test diagnostique distribué aux élèves et qui révèle la présence d'une difficulté liée à la lecture de l'espace. Nous allons donc passer par une présentation du contenu scientifique du savoir géologique concernant les plaques lithosphériques ensuite nous allons faire une réflexion épistémologique sur le modèle plaquiste pour passer à la fin de ce chapitre à la problématisation des scientifiques actuels. Nous n'allons pas entrer dans le détail de l'expert pour la présentation du contenu scientifique mais nous allons nous limiter au niveau de formulation qui concerne la troisième année sciences expérimentales.

1. Les plaques lithosphériques et les limites de plaques

En se basant sur l'observation et l'interprétation des déformations actuelles qui se produisent à la surface de la Terre : des séismes, des volcans et l'absence de déformation des dépôts récents dans de vastes zones océaniques, la recherche en sciences de la Terre a démontré que la surface de la Terre est rigide sauf dans des zones étroites où se concentrent les déformations. Comment expliquer cette structure? La théorie de la tectonique des plaques en tant que modèle actuel explicatif des déformations observées à la surface du globe permet de répondre à cette question.

1.1 La répartition des séismes

D'après Westphal. M., Whitechurch.H & Munschy. M. (2002, p 51-52), la carte de répartition des séismes, montre que ces derniers ne se répartissent pas de façon aléatoire à la surface de la Terre mais se concentrent selon un certain nombre de lignes et de zones relativement étroites de quelques centaines de kilomètres de large, parfois même moins qui suivent les principales dorsales qui existent dans les océans.

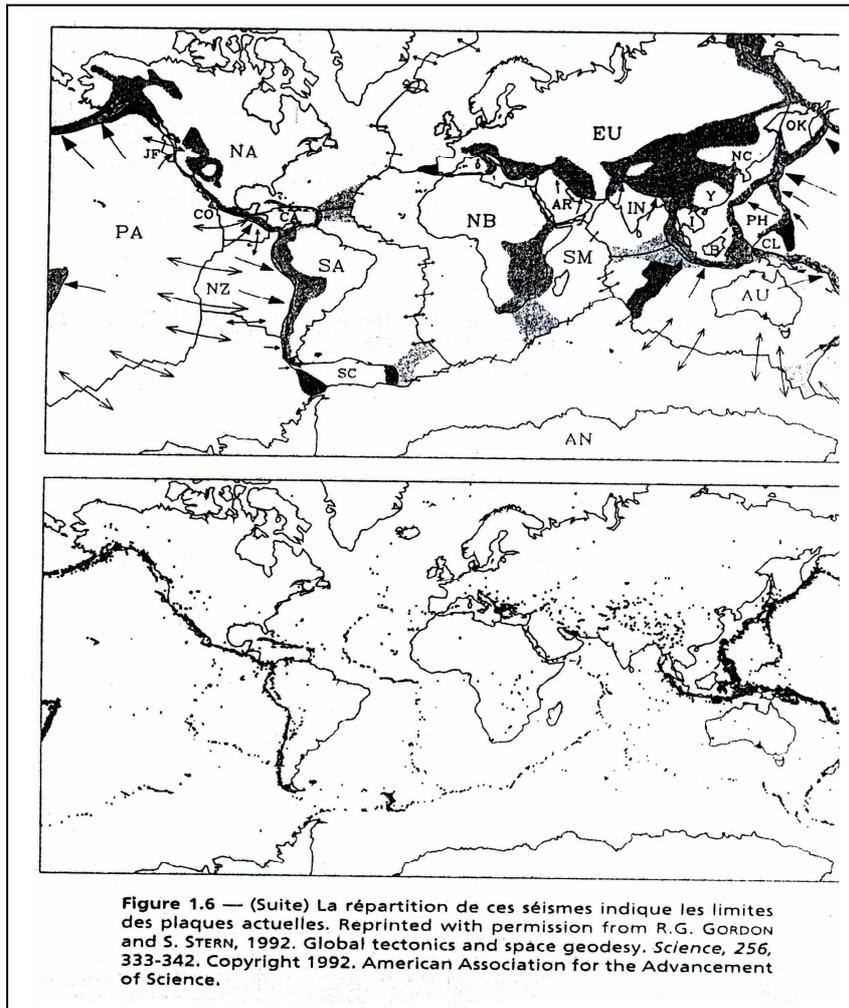


Figure 4.1 la répartition des séismes et les limites des plaques actuelles extraite du livre introduction à la géologie (2000, p17)

1.2 La répartition des volcans

La carte de répartition des volcans actifs montre une image semblable à celle donnée par les séismes. Mais on trouve certains volcans isolés comme les canaries, les îles du cap vert, et l'île de la réunion.... Ces volcans se trouvent dans des zones asismiques en contre partie, certaines zones sismiques ne présentent pas de volcanisme significatif comme l'exemple d'une grande partie de l'Asie. Ainsi, la carte des volcans ne souligne pas particulièrement le tracé des dorsales et la coïncidence entre la répartition des séismes et la carte des volcans actifs n'est donc pas parfaite. Westphal. M., Whitechurch.H & Munschy. M. (2002, p 53)

1.3 Les déformations des couches sédimentaires récentes

L'étude des déformations des couches sédimentaires à la surface de la Terre montre que de grandes étendues sédimentaires n'ont pas eu de dépôts sur des millions d'années comme les bassins paléozoïques de l'Afrique. Les zones déformées se concentrent dans des régions étroites des chaînes de montagne avec une progression de la déformation vers l'extérieur de la chaîne, comme les Alpes. Les parties les plus internes ont subi des déformations superposées au cours de différentes phases constitutives de la chaîne. Par contre au niveau des océans les couches sont uniformes et ne présentent pas de déformations sur de très vastes étendues contrairement à celles observées au voisinage des rifts et sur les marges continentales. Dans le cadre du modèle de la tectonique des plaques, la morphologie, la sismicité et le volcanisme montrent que les déformations ; ne se produisent que dans des zones étroites et limitées de la Terre limitant de vastes régions inactives. La surface Terrestre se subdivise en morceaux. On les nomme plaques à l'intérieur desquelles la déformation actuelle est faible en le comparant à ce qui se passe aux limites. Ces plaques sont des entités rigides qui se déforment surtout à leurs frontières qui sont étroites, elles agissent comme des guides de contraintes. Elles se créent sur les dorsales et disparaissent dans les zones de subduction. Lorsque deux continents se rencontrent on parle de collision. Westphal. M., Whitechurch.H & Munsch. M. (2002, p 54)

Dans le modèle de la tectonique des plaques, il existe trois types de frontière de plaques qui sont définis en fonction du mouvement relatif le long de cette frontière :

- Les deux plaques s'écartent l'une de l'autre. C'est ce qui se passe le long des dorsales océaniques et dans les rifts. On parle d'une frontière en expansion en train de se créer.
- Les deux plaques se rapprochent l'une de l'autre. On dit qu'elles convergent. Dans le cas le plus fréquent, l'une des deux plaques plonge et disparaît sous l'autre. C'est ce qui se passe dans toutes les grandes fosses océaniques, on parle d'une frontière de subduction. Le rapprochement et l'affrontement de deux continents contribuent à la collision.
- Les deux plaques coulissent l'une par rapport à l'autre, sans convergence ni divergence. Ce sont des frontières en décrochement ou transformantes. Ce nouveau concept a été introduit par Tuzo Wilson en 1965.

Une plaque évolue dans l'espace au cours du temps : elle se déplace, s'agrandit, se rétrécit. Elle peut se détruire par subduction, mais peut aussi se casser en plusieurs fragments. L'Arabie et l'Afrique formaient une seule plaque pendant, tout le Secondaire et le Tertiaire inférieur. Une plaque peut s'agrandir par l'accrétion le long des dorsales, mais aussi par l'adjonction et la suture d'une autre plaque. L'Asie s'est par exemple agrandie en plusieurs étapes par collision de fragments importants qui avaient appartenus au Gondwana et s'en étaient séparés. Westphal. M., Whitechurch.H & Munschy. M. (2002, p 55-57)

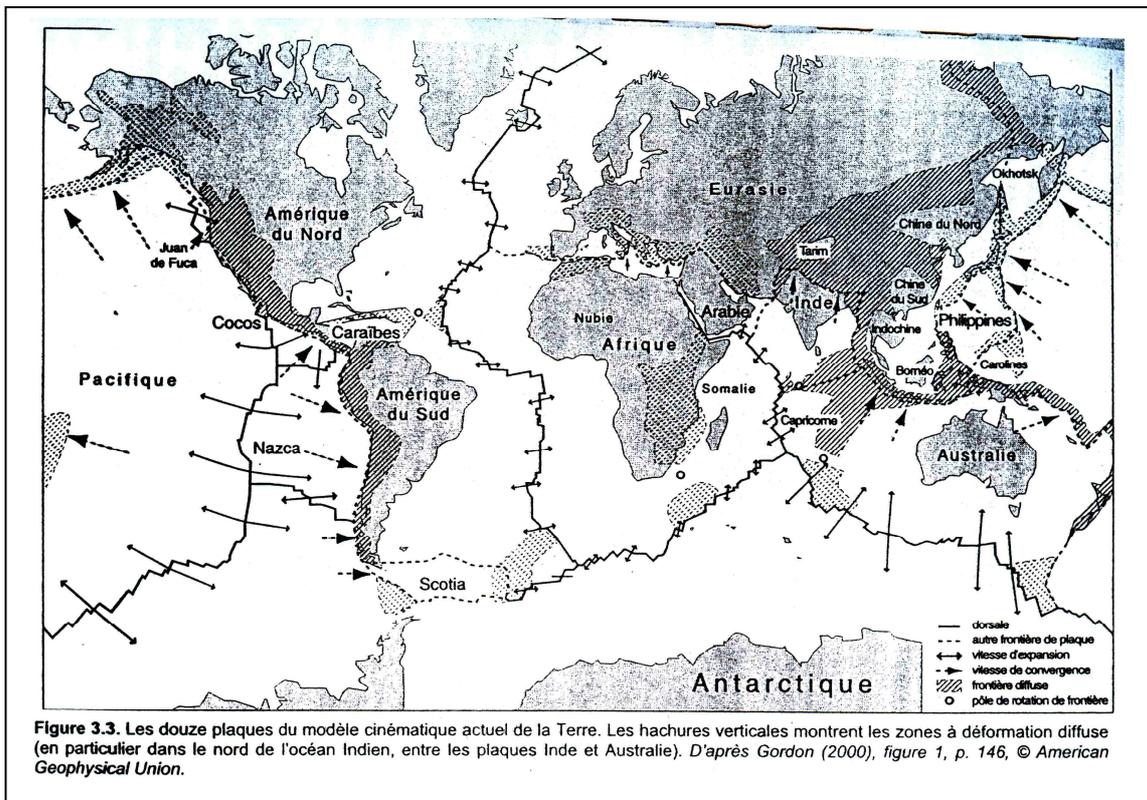


Figure 4.2 la subdivision de la surface de la Terre en plaques lithosphérique extraite du livre la tectonique des plaques (2002, p56).

2. Réflexion épistémologique sur l'espace dans l'histoire de la construction du modèle plaquiste

2.1 Le rapport à l'espace dans l'explication de la surface actuelle du globe Terrestre du 18^{ème} jusqu'au 20^{ème} siècle

En parcourant l'histoire de la recherche d'une explication au problème des similitudes des formes des continents sud américain et africain nous remarquons que « l'espace » n'est pas

mobilisé de la même manière au cours de l'histoire. La notion d'espace varie d'un modèle explicatif à un autre et nous remarquons qu'elle est fonction des conditions nécessaires proposées dans la thèse du géologue, pour l'obtention d'un espace bien déterminé au lieu d'un autre.

L'espace de Francis Bacon le philosophe anglais, en 1668, nécessite la présence d'un espace continental préexistant qui représente le seul type d'espace à la surface de la Terre. L'effondrement d'une partie du premier espace continental, s'impose comme une nécessité créant ainsi un deuxième type d'espace de même nature mais différent par sa localisation, en effet il forme une vallée remplie d'eau (produite par le déluge), à la différence du premier qui est dégagé à l'air libre. Nous assistons ainsi à la genèse de deux types d'espaces juxtaposés : un espace continental et un espace océanique dérivant du premier.

En 1810, la conceptualisation de « l'espace » change un peu dans la mesure où le géologue Alexandre de Humboldt, raisonne dans « un espace sédimentaire », par analogie au phénomène géologique actuel, qui se réalise à la surface de la Terre et défini par certaines conditions de réalisation : érosion aquatique, creusement, vallée, agent érosif (eau)...pour expliquer la formation de l'océan atlantique « *par des forces d'eau* » ainsi que le problème de la continuité des chaînes primitives parallèles à l'équateur (Gohau G, 1990, p241).

De l'espace sédimentaire défini par De Humboldt, nous nous retrouvons dans « un espace magmatique » défini lui aussi par ses conditions de réalisation avec Antonio Snider-Pellegrini. En effet, en 1858, ce géologue expliqua la surface actuelle de la Terre par la cristallisation (un phénomène de nature magmatique du à un refroidissement du matériel magmatique par baisement de la température) entraînant la formation des continents mais d'un seul côté de la Terre à partir d'un bloc en fusion. La répartition inégale des masses continentales à la surface Terrestre provoqua une instabilité dans l'équilibre Terrestre, ce dernier est réparé par le déluge qui provoqua une gigantesque cassure fractionnant le continent originel et forma les blocs qui se sont écartés en se répartissant d'une manière plus équilibrée à la surface de la Terre (A.Hallam, 1976, p13). La cristallisation est un phénomène actuel dont le fonctionnement est connu ainsi que la fusion et qui permettent d'expliquer la formation des roches magmatiques. Ainsi Antonio Snider-Pellegrini raisonne de la même manière que De Humboldt (par analogie à la genèse des roches magmatiques), mais cette fois, dans un « espace magmatique ».

Fisher, en 1881 attribua la genèse des chaînes de montagnes à « des mouvements tangentiels » (A.Hallam, 1976, p15). Contrairement à De Humboldt et Pellegrini, Fisher, ne raisonne pas « l'espace » par analogie à des processus géologiques actuels comme la

sédimentation et la cristallisation. Il était le premier à proposer le moteur de la dérive des continents. Ce sont des courants existant à l'intérieur de la Terre, qui remontent sous les océans et redescendent sous les continents. C'est une sorte d'analogie avec les mouvements de convection. Dans le modèle qu'il proposait, Fisher parlait de deux milieux différents (sous les continents et sous les océans), deux milieux qui ne se ressemblent pas mais se juxtaposent et ne sont pas réunis au sein d'une même structure telle que la plaque. Cette thèse nécessite un « espace souterrain » dans le quel circulent les courants de convection et un « espace de surface » subdivisé à son tour en deux espaces un « espace océanique » et un « espace continental ».

En 1900, Emile Haug supposa que le siège de formation des chaînes de montagnes, est l'espace qui se trouve entre les continents dans les géosynclinaux. Les déformations tectoniques sont localisées dans des endroits précis du globe il en est de même pour les roches volcaniques à la surface de la Terre. Donc pour Haug à « l'espace continental » il s'ajoute un deuxième « espace intercontinental » siège de l'orogénèse.

Comme pour De Beaumont, pour Suess, la Terre a passé par une phase de refroidissement et de solidification qui a provoqué sa contraction à la manière d'une pomme ridée. Cette contraction a provoqué aussi des mouvements crustaux à la surface de la Terre, entraînant des affaissements accompagnés par deux sortes de mouvements horizontaux : des mouvements compressifs à l'origine des reliefs et des mouvements distensifs à l'origine des effondrements (Gohau, 1987, p. 198) pour former les bassins océaniques. Par la thèse des effondrements, Suess explique la surface du globe. Les océans ne sont en réalité que des parties effondrées des continents. Mais cette thèse suppose que la croûte Terrestre est de même nature en tout point de la surface du globe. Ces mouvements crustaux qui peuvent échanger continents et océans à chaque fois qu'ils se produisent permettent de définir deux types d'espaces mais dans la dimension verticale c'est-à-dire suite à l'effondrement, la partie effondrée donc plus basse que la surface représente l'océan alors que la partie soulevée représente le continent. Les deux espaces ne sont définis donc que dans une dimension verticale. A côté de cela la dimension horizontale est absente dans la mesure où l'effondrement nécessite que la croûte Terrestre soit de même nature en tout point de la surface, et Suess ne distingue pas ainsi deux croûtes de natures différentes : une croûte océanique et une croûte continentale. Pour lui il existe un seul type de croûte de nature granitique riche en silicium et aluminium. Cette croûte est de même nature en profondeur comme en surface et au niveau des continents comme au niveau des océans.

Néanmoins, le modèle de l'effondrement a été réfuté car ce modèle théorique n'arrivait pas à répondre à la possibilité de l'existence d'un manteau plus dense que l'écorce Terrestre et donc qui ne permettait pas l'effondrement (Gohau G, 1990, p239-240). De même le modèle de la Terre en contraction que propose Suess pour expliquer la genèse des chaînes de montagnes a été réfuté par Wegener en discutant la répartition des chaînes de montagnes qui devrait se faire d'une manière uniforme et non pas tel que l'on observe. Grâce à l'évolution des moyens d'analyses géophysiques et géochimiques ainsi que géologiques, les géologues et les géophysiciens remettent le modèle de l'effondrement en question dans la mesure où par ces méthodes d'analyses on est arrivé à déterminer la nature de la croûte et des fonds océaniques. En effet, la croûte océanique est plus dense que la croûte continentale. Ainsi née une nouvelle conception de la croûte Terrestre différente de celle de Suess :

- Une croûte océanique rigide, basaltique, sur laquelle on observe un phénomène de sédimentation.
- Une croûte continentale rigide elle aussi, basaltique dans sa partie profonde et granitique dans sa partie superficielle.

Ainsi la croûte ne se caractérise plus par une homogénéité sur toute la surface de la Terre comme pour Suess, et elle constitue une enveloppe discontinue en surface : basaltique au niveau des océans et granitique au niveau des continents.

Avec Alfred Wegener, en 1930, l'organisation de la surface Terrestre change par rapport aux idées qui l'ont précédé. En effet toutes les Terres émergées étaient regroupées à la fin de l'ère primaire en un super continent, la Pangée. Les continents actuels proviendraient de la fracturation de la Pangée se déplaçant pour atteindre leur position actuelle en fendant le « *sima* » qui les entoure. Wegener affirme que les continents, sont constitués de la croûte Terrestre mais dont la partie externe majoritairement composée de silicates d'aluminium repose sur un substratum de couche inférieure riche en silice et en magnésium plus dense qui affleure directement au niveau des océans. L'espace est défini ainsi dans sa dimension horizontale contrairement à Suess avec un mobilisme translationniste.

Le géologue A. Holmes (1890-1995) par son modèle des courants de convection en 1929 explique la translation des continents

A partir de ce modèle nous distinguons chez Holmes trois conceptions de l'espace :

- L'espace global varie en profondeur c'est-à-dire dans la dimension verticale : on distingue **une croûte solide à la surface et un manteau fluide** en profondeur siège des courants de convection.
- L'espace à la surface de la Terre varie à l'horizontale est composé de trois types :
 - un « espace continental » sous lequel les courants de convection sont ascendants.
 - un espace défini par des contraintes tectoniques qu'il qualifie de « zones de compression » là où les courants de convection deviennent descendants et s'enfoncent en profondeur en prenant avec eux une partie de la croûte océanique vers le manteau et se manifestent en surface sous la forme de fosses océaniques profondes.
 - un espace intercontinental régénérateur de croûte océanique c'est-à-dire créateur d'un nouvel « espace océanique » qui se manifeste en surface au niveau des rifts par la formation des dorsales.
- L'espace n'est pas fixe, limité et fini, au contraire, il peut « se perdre » (dans les zones de compression) comme il peut « se régénérer » (dans les zones de distension).

2.2 Le rapport à l'espace dans l'explication de la surface actuelle du globe Terrestre à la fin du 20^{ème} siècle et à l'aube du 21^{ème} siècle

La difficulté à comprendre certains phénomènes géologiques dans un cadre continentaliste a permis aux idées concernant la structure de la surface du globe Terrestre de basculer d'un fixisme vers une conception nouvelle tout à fait différente et qui constitue la colonne vertébrale d'une nouvelle théorie « plaquiste », et qui permet d'expliquer le maintien en permanence de l'équilibre dynamique dans un cadre géologique plus vaste que le cadre géographique en utilisant un nouveau concept : « plaque lithosphérique ».

Les continents ne dérivent pas sur l'asthénosphère, mais ils font partie d'immenses plaques, qui, elles, dérivent sur le manteau. En s'appuyant sur cette théorie de l'expansion des fonds océaniques, la genèse des chaînes de montagnes, la répartition des faunes et flores, des volcans et des séismes ont trouvé là, une logique nouvelle dans une nouvelle conception de l'espace.

En 1961, Dietz propose l'hypothèse de l'expansion des fonds océaniques. Il introduit le concept de plaques océaniques rigides depuis les dorsales et jusqu'aux bords des continents. Ainsi le fond des océans participe conjointement à la dérive des continents. Le découplage entre la croûte rigide et le manteau convectif ne se fait plus à la base de cette

croûte, mais plus bas. Les marges des continents ne sont plus des limites majeures. Westphal. M., Whitechurch.H & Munsch. M. (2002, p 26)

En 1963, Fred Vine et Drummond Matthews suggèrent que les anomalies magnétiques sont induites par la croissance de la croûte océanique qui est aimantée tantôt positivement tantôt négativement suivant la polarité du champ magnétique. La corrélation entre le modèle et le profil magnétique n'est pas bonne. A l'époque on connaissait très mal la séquence réelle des inversions, leur article est passé ainsi inaperçu.

Deux ans plus tard, Wilson interpréta les décalages horizontaux des bandes magnétiques de plusieurs centaines de km au niveau de zones de fractures et faisant état de discontinuités en introduisant le concept de faille transformantes. Ces dernières relient des segments de dorsales ou de fosses en permettant à deux morceaux de croûte de coulisser l'un contre l'autre (un mouvement à l'horizontal).

La sismologie était l'outil de diagnostic qui apporta une preuve de ce nouveau concept mais aussi de l'ouverture des océans. L'analyse des ondes émises par un tremblement de Terre permettait de déterminer si celui-ci provenait d'un mécanisme d'étirement (faille normale), de fermeture (faille inverse) ou de glissement (décrochement). En effet, Lynn Sykes montra en 1966 que les séismes des failles transformantes correspondaient bien à des cisaillements et que ceux des dorsales traduisaient bien une ouverture. La conversion des géophysiciens à l'hypothèse du « sea floor spreading » fut alors massive. Par recours à la quantification des résultats obtenues, Vine et Tuzo Wilson en associant chaque anomalie magnétique à son inversion correspondante, calculèrent le taux d'ouverture des océans et l'âge de la croûte océanique. Cette datation a été prouvée par des forages réalisés en 1968.

L'espace qui se crée doit disparaître quelque part s'il faut admettre que la Terre est en équilibre, dans cette perspective, en 1967, Jack Oliver et Bryan Isacks interprétèrent ces plans d'inversion magnétique comme la trace de la lithosphère océanique retournant dans le manteau. Ces lieux de disparition de la lithosphère océanique (on dira plus tard « zones de subduction ») étaient nécessaires dans la logique du « sea floor spreading » si on ne voulait pas supposer l'expansion de la Terre ; ils étaient désormais démontrés. Jason Morgan synthétisa ces différentes approches en développant la première hypothèse « plaquiste ». Il supposa que la lithosphère était découpée en une série de « blocs » parfaitement rigides, se déplaçant les uns par rapport aux autres.

Le mouvement d'un bloc pouvait être décrit par une simple rotation entre sa position initiale et sa position finale, rotation définie par un axe passant par le centre de la Terre (axe eulérien) et une vitesse angulaire. Les failles transformantes correspondaient à des petits cercles centrés sur l'axe eulérien, permettant d'en déterminer la position. Dan McKenzie et Robert Parker développèrent des idées analogues en introduisant le terme de « plaque » et l'année suivante, Xavier Le Pichon en fit une première application. Il divisa la surface du globe en 6 plaques lithosphériques dont il détermina les frontières à partir de l'activité tectonique et calcula les pôles de rotation de leur mouvement relatif depuis 120 millions d'années. Par la suite, ces mêmes procédés permirent par simple « fermeture » des océans de reconstruire les positions successives des continents depuis 200 millions d'années.

Isaks, Jack Oliver et Lynn Sykes (1968) parlèrent de « nouvelle tectonique globale » en vérifiant qu'elle était conforme aux phénomènes sismiques, et Vine et Hess introduisirent l'expression « tectonique des plaques ». Des carottages ont permis de dresser la carte des fonds océaniques. Ces résultats confirment bien le modèle de Vine et Matthews. Les explications de Morgan (1970) à propos des points chauds confirment également le mouvement lithosphérique.

Nous remarquons que la lecture de l'espace au 20^{ème} siècle a évolué sur deux volets :

- Les études géologiques et géophysiques se sont concentrées sur l'espace profond mantellique et ne se limitent plus à l'espace de surface.
- La lecture de la surface du globe n'est plus descriptive qualitative mais elle est devenue quantitative grâce aux méthodes géophysiques, dans la mesure où la quantification des transformations qui affectent la surface permet de prévoir la morphologie future de la surface ainsi que retracer sa morphologie passée et permet de prouver et argumenter la théorie plaquiste.

2.3 Conclusion

La conceptualisation de l'espace, voit une évolution dans l'histoire de la construction du savoir géologique et aboutit à la construction du modèle de la théorie plaquiste, une nouvelle lecture de l'espace géologique sur Terre se substitue à la lecture géographique.

Cette grande révolution, consiste à l'introduction d'un nouveau concept celui de « plaque » comme unité crustale à la place du concept « continent », qui ne cessait d'être l'unité crustale, à la surface globale, dans la quasi-totalité des thèses présentées au cours de l'histoire.

3 L'utilisation de l'espace par les scientifiques actuels dans la compréhension des plaques lithosphériques et les limites de plaques (cas de Xavier Le Pichon)

Nous allons essayer de comprendre l'utilisation explicative de « l'espace » par les scientifiques actuels pour les plaques lithosphériques et leurs limites. Nous allons utiliser ce que nous avons expliqué à propos de la relation entre les sciences de la Terre et l'espace (voir le chapitre 1) comme cadre de référence. Pour comprendre comment les scientifiques actuels expliquent-ils la notion de plaque lithosphérique il faut se référer aux pères de la théorie de la tectonique des plaques (le cas de Xavier Le Pichon, géophysicien).

D. Orange Ravachol, en 2001, a eu un entretien avec Xavier Le Pichon (qui a porté sur le cadre général de la tectonique des plaques, l'entrée dans cette théorie dans les années 1960 et la compréhension par les chercheurs des fonds océaniques et de leur histoire pour comprendre l'utilisation de l'actualisme par les chercheurs actuels). Nous avons utilisé le contenu de cet entretien que D. Orange Ravachol a orienté vers l'étude de l'utilisation du temps, dans un autre angle de lecture, une lecture qui se focalise sur l'utilisation et la compréhension de « l'espace ».

Dans ses propos, Xavier Le Pichon évoque l'évolution de « l'espace Terrestre » en fonction du temps. Il argumente par des faits géologiques. Il inscrit la Terre dans un contexte évolutionniste. Pour ce géophysicien, l'espace Terrestre subit une évolution (l'espace n'est pas fixe, ni limité).

Le Pichon, évoque certains « problèmes d'espace » qui représentent encore des points de controverses : tel que la déformation au sein du domaine continental. Il explique les déformations dans le domaine continental et dans le domaine océanique. Pour le Pichon comme pour tous les géophysiciens et les géologues actuels, « l'espace tectonique plaquiste » est plus large et plus étendu que « l'espace continental » et « l'espace océanique » qui ne sont en réalité que les parties constructrices de cet espace. La tectonique des plaques s'applique bien au domaine océanique mais moins dans le domaine continental. Les problèmes actuels qui attendent une résolution sont donc des problèmes continentaux, dans les zones où la déformation est distribuée, Car comment expliquer une déformation dans un milieu rigide. L'étude de l'espace en tant que problème géologique s'avère donc nécessaire.

Xavier le Pichon était fixiste au début (des années soixante). En se basant sur des mesures expérimentales et sur des résultats obtenus, il suppose l'immobilité des continents et exclut la théorie de l'expansion des océans. Le Pichon raisonna dans un cadre fixiste, qui exclut le mouvement dans les directions de l'espace globale (et s'il existe il est à l'horizontal et de faible ampleur). L'utilisation de l'espace changea de caractéristiques lorsque le courant mobiliste a pris le relais. Les géophysiciens commencèrent à réfléchir dans un cadre mobiliste plus vaste que « l'espace continentaliste » pour définir un nouvel espace lithosphérique plaquiste qui permet les mouvements des plaques lithosphériques dans les dimensions de l'espace.

Le Pichon est devenu mobiliste plaquiste et se permet comme tout les géophysiciens actuels de définir différentes figures d'espace qui ne peuvent pas exister dans un contexte continentaliste : un espace qui se crée, un espace qui disparaît, un espace « *interplaquaire* » (entre les plaques, cet espace nous définit cet espace par rapport aux limites des plaques).

4 Problématisation de l'espace dans la notion des plaques lithosphériques et les limites de plaques par les scientifiques actuels

Le 20^{ème} siècle représente une révolution dans l'histoire des sciences de la Terre, les fonds océaniques sont de plus en plus explorés grâce à l'évolution des méthodes de détection et à l'interdisciplinarité notamment l'utilisation de la géophysique qui a participé à faire un grand pas en avant en faveur de la théorie de la tectonique des plaques. Certains chercheurs ont contribué à mieux expliquer l'espace globale en évoquant la différence qui existe entre l'océan et le continent. Les théories géologiques ont ainsi basculé du courant fixiste vers un courant mobiliste, celui de la tectonique des plaques. La problématisation de l'espace ne présente pas les mêmes caractères selon les deux courants nous allons nous limiter à l'espace comme le voient les deux courants et sa subdivision à la surface de la Terre en océans et continents ou bien en plaques. L'étude de la problématisation dans les deux cas précédemment décrits s'avère utile pour une étude de la problématisation chez les élèves ultérieurement.

Nous allons essayer d'identifier les espaces des contraintes qui ont soutenu les modèles fixiste et mobiliste dans les années soixante dans la problématisation de l'espace, en référence aux travaux de C. Orange (1999, 2000) sur la problématisation fonctionnaliste.

Nous allons nous référer également au travail de D. Orange Ravachol (2003) sur la

construction des espaces de contraintes faite à partir d'entretiens effectués par D. Orange Ravachol avec Le Pichon en 2001 ; du fait que ce chercheur a basculé d'une position fixiste à une position mobiliste (D. Orange Ravachol, 2003. p.106).

4.1 L'espace des contraintes construit dans le cadre fixiste des années soixante.

Dans les années soixante, Le Pichon faisait de la recherche sur des océans dans un laboratoire : le Lamont, où deux courants de pensées s'affrontent : un courant fixiste (les géophysiciens M. Ewing et X. Le Pichon) et un courant mobiliste (les géologues Heezen et Hess).

M. Ewing explique l'activité tectonique se déroulant au niveau du rift par les courants de convection profonds qui sont la cause du volcanisme à la surface mais qui ne provoquent pas de véritables mouvements de la croûte. (Le Pichon, 2001, p. 204, D. Orange Ravachol, 2003, p.107).

En se basant sur des données de sismique réfraction concernant la dorsale médio-atlantique, Le Pichon montre qu'au niveau des dorsales la croûte ne s'épaissit pas. L'altitude augmente vers le rift et on ne voit pas d'anomalie gravimétrique. Ceci prouve qu'il existe un système de compensation. (D. Orange Ravachol, 2003, p.107). Selon le principe de l'isostasie, et sachant que le manteau est plus dense que la croûte, dans les zones à relief, l'équilibre isostatique est rétabli par la présence d'une racine crustale. C'est dans ce cadre que Le Pichon construit le problème. Or les profils sismiques montrent une remontée du Moho. Il recourt alors à la nécessité d'un manteau localement anormal. Il suppose que l'on doit en principe mesurer un flux de chaleur très élevé sous les dorsales, si le manteau est proche et léger, mais il est plutôt bas (D. Orange Ravachol 2003, p.107).

Le Pichon dispose des mesures in situ et des estimations qu'il a faites de ce flux dans le cadre de mouvements de convection sous la dorsale et du modèle du *sea floor spreading* de Hess et les premières sont très différentes des secondes C'est ce qui le retient du côté du fixisme. Il ajoute au problème du flux de chaleur la symétrie des anomalies magnétiques étudiées dans l'Atlantique, en terme de largeur des bandes et d'intensité, qui n'est pas convaincante, ainsi que la variation latitudinale des sédiments océaniques qui sont absents au niveau de la dorsale et qui sont présents en une fine pellicule sédimentaire non déformée au niveau des plaines abyssales. Mais ce qui a consolidé la conception fixiste de Le Pichon c'est l'absence de sédiments déformés dans les fosses océaniques, là où la croûte océanique devrait s'enfoncer selon le modèle de Hess.

Il écarte en profondeur les courants de convection et construit la nécessité d'un manteau supérieur rigide sur une grande épaisseur, qui est inanimé. (D. Orange Ravachol 2003, p.108).

Nous représentons l'espace des contraintes du courant fixiste comme suit:

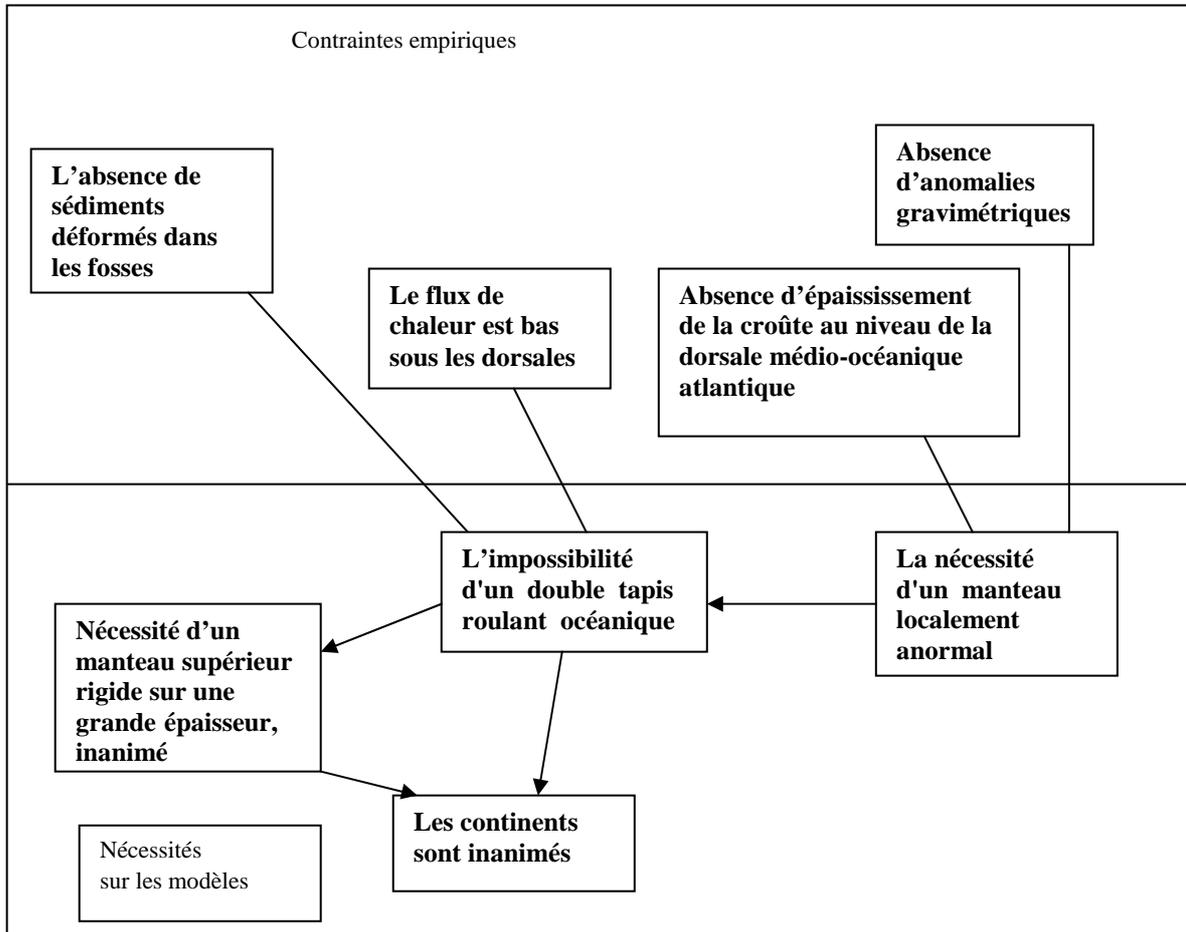


Figure4.3 : L'espace des contraintes le cadre continentaliste chez les fixistes des années soixante (la subdivision de la surface de la Terre en continents)

4.2 L'espace de contraintes construit par les mobilistes des années soixante

B. Heezen et H. Hess, sont deux géologues mobilistes pour qui les océans sont des structures récentes formées par expansion à partir du rift. H. Hess développe dès 1960 l'idée d'un fonctionnement en double tapis roulant des océans, ce que Dietz nomme en 1961 le « Sea floor spreading ». En 1963, Fred Vine et Drummond Matthews ont confirmé les idées de Hess et de Dietz en interprétant les anomalies des bandes magnétiques découvertes sur le plancher océanique comme des marqueurs de l'expansion et suggèrent la nécessité que la croûte océanique basaltique se forme régulièrement au niveau des dorsales (nécessité d'une expansion à la manière d'un double tapis roulant).

Les discontinuités des bandes magnétiques de zones de fractures nécessitent le modèle de faille transformantes qui sont les témoins d'un mouvement à l'horizontal. Lynn Sykes montra en 1966 que les séismes des failles transformantes correspondaient bien à des cisaillements et que ceux des dorsales traduisaient bien une ouverture. La conversion des géophysiciens à l'hypothèse du « sea floor spreading » fut alors massive.

En 1967, Jack Oliver et Bryan Isacks interprétèrent ces fosses océaniques comme la trace de la lithosphère océanique retournant dans le manteau. Jason Morgan supposa que la lithosphère était découpée en une série de « blocs » parfaitement rigides, se déplaçant les uns par rapport aux autres. Et c'est en 1968 que Dan Mc Kenzie et Robert Parker développèrent des idées analogues en introduisant le terme de « plaque » et que Vine et Hess introduisirent l'expression « tectonique des plaques ».

Nous représentons l'espace des contraintes des mobilistes comme suit :

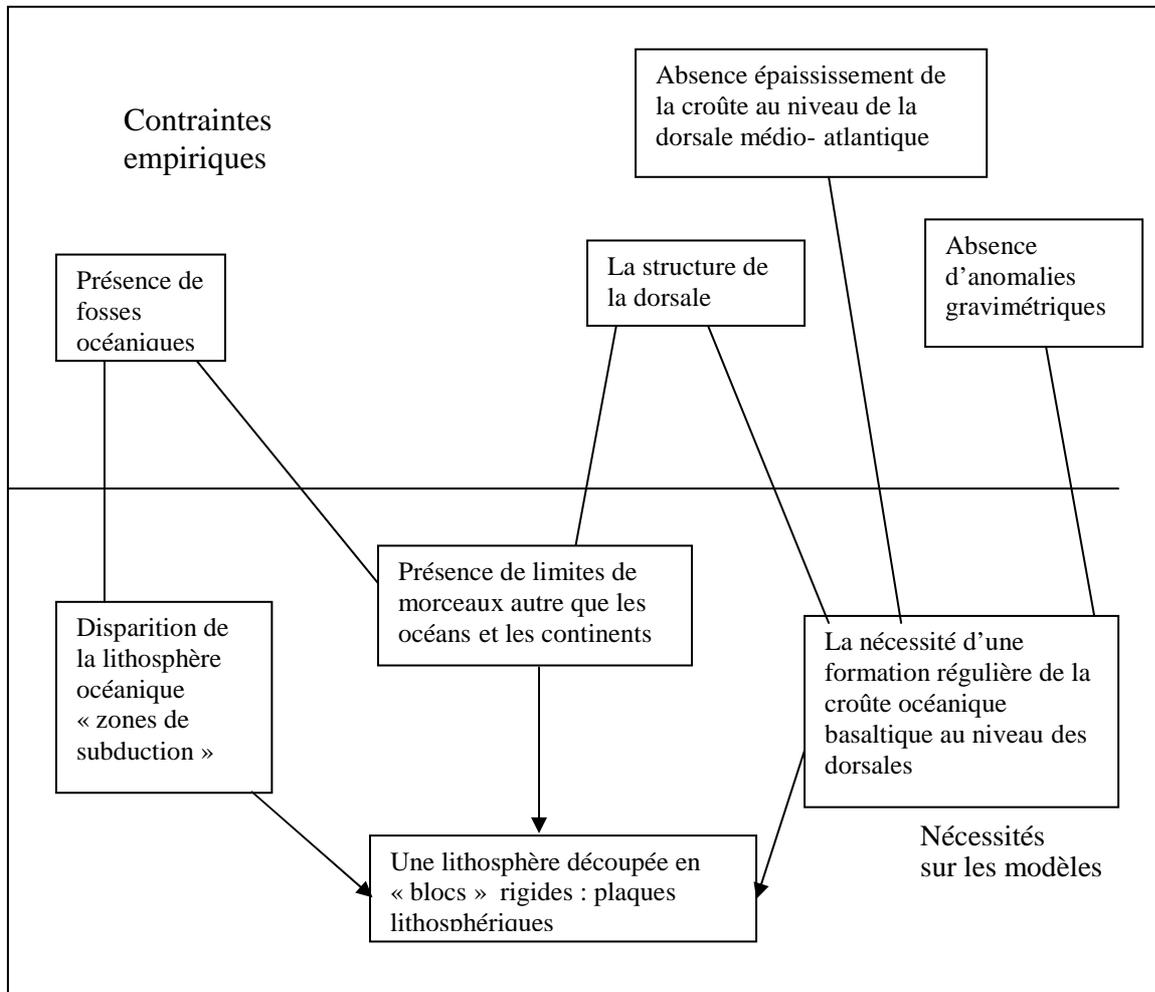


Figure 4.4 : L'espace des contraintes chez les mobilistes des années soixante (la subdivision de la surface de la Terre en plaques)

5 Conclusion

L'histoire des sciences de la Terre (au 20^{ème} siècle) confirme bien l'existence d'une rupture épistémologique à propos de la subdivision de l'enveloppe externe de la surface de la Terre. La communauté scientifique a basculé d'un continentalisme vers une conception plaquiste dont les rapports à l'espace ne sont pas les mêmes.

- Une lecture géographique qui suppose une subdivision de la surface du globe en océans et continents et nécessite la juxtaposition des deux types de lithosphères : océanique et continentale.
- Une lecture géologique qui suppose une subdivision de la surface du globe en plaques et nécessite la possibilité qu'une plaque porte à la fois les deux types de lithosphères.

La réflexion épistémologique faite sur l'utilisation de l'espace au cours de l'histoire de la géologie concernant la subdivision de la surface de la Terre est utile pour l'étude de l'utilisation de l'espace par les élèves au cours de la problématisation du concept plaque.

Chapitre 5

Les plaques lithosphériques et les limites de plaques

Analyse didactique préliminaire des situations

Introduction

1. Le cadre général de la situation de classe mise en jeu
2. La situation de classe et les objectifs du professeur
3. Analyse didactique préliminaire de la situation
4. Conclusion

Introduction

Les situations de classe que nous allons étudier se concentrent sur les plaques lithosphériques et les limites de plaques et plus précisément sur « l'espace » qui les contient. Elles ont été conçues dans le cadre de la partie consacrée à l'expansion océanique et la subduction, ces dernières prouvent l'existence de plaques lithosphériques mobiles dans le programme de troisième année sciences expérimentales (programme officiel 2006) voir annexe 1.

Le manuel scolaire (édition 2006, p.311) voir annexe 2 indique pour cette partie comme activités :

- « une représentation des plaques lithosphériques à analyser et à dégager les limites et identifier le déplacement de la plaque africaine ». La plaque lithosphérique est donc considérée comme un objet évolutif mobile.
- En se basant sur ce qu'apporte le savoir actuel, nous remarquons que l'évolution des limites des plaques est sous le contrôle de deux processus simultanés et continus : l'accrétion qui se produit au niveau de l'axe de la dorsale et la subduction qui s'exerce au niveau des fosses océaniques.

1. Le cadre général de la situation de classe mise en jeu

Les situations de classe que nous allons étudier sont effectuées, au cours de la même année scolaire, dans deux classes de troisième année sciences expérimentales du lycée de l'indépendance à la Manouba : Une classe de 17 élèves et une autre classe de 18 élèves en 2008/2009. Les situations de classe sont mises en place après que les élèves ont étudié la structure et la composition du globe Terrestre ainsi que la production d'énergie thermique. Avant que les situations de classe soient mises en place, les élèves doivent déjà comprendre la nature et les caractéristiques des enveloppes du globe Terrestre par l'étude de données sismiques et de variation de la densité des roches. Ils doivent déjà comprendre la nature de la lithosphère (solide, rigide) et de l'asthénosphère (solide ductile) ; ainsi que les notions de croûte et de manteau supérieur ; de croûte océanique et de croûte continentale.

Dans un chapitre intitulé « la tectonique des plaques », dont l'objectif est la recherche d'une explication aux phénomènes géodynamiques (séismes, volcans, orogénèse..) par la théorie de la tectonique des plaques, le professeur distribue le contenu comme suit :

- La théorie de la dérive des continents et les arguments en sa faveur.
- l'expansion océanique (cas de l'océan atlantique) et son argumentation par l'épaisseur des sédiments en allant de l'axe de la dorsale médio océaniques vers les marges continentales.
- l'explication de la naissance et l'expansion d'un océan.

Ces trois premiers points représentent pour les élèves des connaissances qu'ils doivent réinvestir dans la construction du reste du chapitre (c'est-à-dire le contenu dans lequel nous allons appliquer nos trois problèmes : d'espace de fonctionnement et de temps). Ce contenu scientifique comporte d'après le contenu du programme officiel et d'après ce que compte faire le professeur les points suivants :

L'analyse de l'activité volcanique et séismique au niveau du rift médio océanique et la répartition des volcans et des séismes dans le monde : la subdivision de la partie superficielle de la Terre en plaques rigides. (Auquel nous appliquerons notre première étude : le problème d'espace).

- Les mouvements des plaques : la subduction.
- La collision des plaques et la subduction sont à l'origine des séismes et des volcans et de la formation des chaînes de montagnes : cas des Cordillères des Andes et de la chaîne alpine (à ces deux points, nous appliquerons notre deuxième étude : le problème de fonctionnement).

La formation des chaînes de montagnes : cas de la chaîne atlasique. (Auquel, nous appliquerons notre troisième étude : le problème de temps).

A chaque fois les élèves doivent réinvestir les prérequis.

2. la situation de classe et les objectifs du professeur

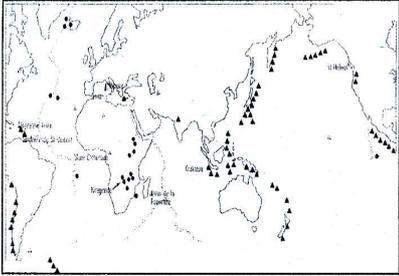
Le but de la situation est la recherche d'une explication à la répartition des volcans et des séismes et déduire la subdivision de la partie superficielle de la Terre en plaques rigides, présentant des zones de divergence au niveau des dorsales océaniques, et des zones de convergence.

Pour le problème d' « espace » que nous avons choisi d'étudier, nous avons discuté avec le professeur avant d'entamer les séances qui sont prévues pour le troisième trimestre de l'année scolaire et nous avons proposé au professeur une fiche d'activité qui s'applique à notre problème d'espace (voir fiche dans la page suivante) et qu'il va l'utiliser avec ses élèves au cours des séances de travaux pratiques.

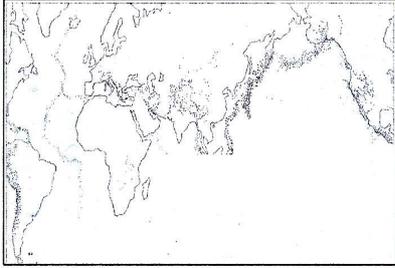
Fiche d'activité
la répartition des volcans actifs, (document1) La distribution géographique des séismes (document2), Répartition des déformations superficielles(document3)

Le texte :
La localisation des volcans actifs sur un planisphère montre des zones à forte activité volcanique et d'autres à activité faible ou nulle. En outre, on observe que les laves émises se répartissent en deux grandes familles: la famille « des basaltes » et la famille « des andésites ». de même, un séisme peut être repéré sur un planisphère par la localisation de son épocentre, c'est-à-dire de l'endroit de la surface du globe où le séisme est le plus fortement ressenti. En outre, un séisme peut être caractérisé par la nature du mouvement qui l'a créé: convergence, ou divergence. En fin en ce qui concerne les témoins d'une activité du globe, les plis isopaques (qui conservent la même épaisseur) et les failles se sont formés près de la surface du globe. Ce sont des indicateurs géologiques des mouvements (convergence et divergence) et des forces (compression ou extension) qui régnaient lors de leur formation, mais aussi de la profondeur (pression et température) où ont eu lieu ces mouvements.

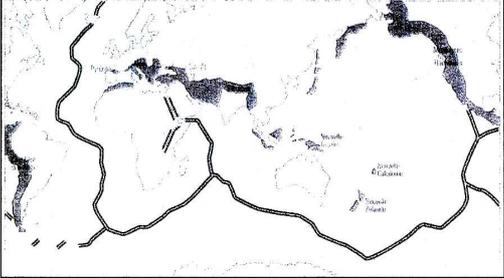
Document1 : La distribution géographique des séismes



Document2 : La distribution géographique des séismes
En bleu : séismes associés à des mouvements de convergence
En orange : séismes associés à des mouvements d'écartements



Document3 : Distribution géographique des déformations superficielles et récentes



En vous basant sur le texte et les trois documents :

1. Comparez la localisation de ces volcanismes, la répartition particulière des séismes et la répartition des déformations superficielle. Qu'en déduisez-vous? Expliquez en quelques lignes.
2. Comparez ces cartes de répartition des faits géologiques à la carte de la surface du globe (page 296 du manuel scolaire). Qu'en déduisez-vous? Expliquez en quelques lignes.
3. Existe-t-il un rapport direct entre les limites sur la carte du globe et la répartition « géographique » des océans et des continents? Expliquez en quelques lignes.

Figure 5.1 : fiche d'activité pour la répartition des faits géologiques

La situation consiste à construire la notion de plaque lithosphérique et à délimiter les différentes plaques du globe, en interprétant la répartition des volcans et des séismes dans le monde.

Le professeur prévoit une correction collective de cette première partie après un temps de réflexion au sein d'un travail de groupe.

Le tableau suivant résume la tâche qui est demandée aux élèves, et le résumé donné par le professeur après avoir terminé le travail de groupe.

Activité du professeur	tâches des élèves	Résumé
<p>Distribuer la fiche d'activité et expliquer que les élèves doivent répondre à la question précédente : « Que représente le rift à la surface du globe ? » d'après l'activité suivante.</p> <p>Corriger l'activité à l'aide d'une superposition de transparents des trois cartes : des séismes, des volcans et des chaînes de montagnes ce qui rend logiques la notion de subdivision de la surface en plaques lithosphériques</p>	<p>travail de groupe ou individuel formulant leurs productions sur des feuilles à remettre au professeur avant la correction</p> <p>l'objectif est :</p> <p>la recherche d'une explication à la répartition des volcans et des séismes et déduire la subdivision de la partie superficielle de la Terre en plaques.</p>	<p>La lithosphère est découpée en morceaux appelés plaques lithosphériques. On en dénombre 12. la plaque peut contenir à la fois une partie continentale et une partie océanique (plaque africaine) comme elle peut être complètement océanique (plaque pacifique). Il n'existe pas de plaque continentale c'est-à-dire un continent ne constitue pas à lui seul une plaque.</p> <p>Au niveau des marges ou des limites on observe une activité sismique et volcanique ainsi que la présence des chaînes de montagnes à la surface et des dorsales au niveau des océans.</p>

Tableau5.1 Tableau résumant la tâche et le résumé pour l'explication des répartitions des faits géologiques

Les réponses souhaitées, et les idées déduites en rapport avec les répartitions des phénomènes géologiques à la surface du globe sont résumées dans le tableau suivant :

Réponses souhaités pour cette activité	les idées sous- jacentes sur « l'espace»
<p>➤ Le centre des continents est peu ou pas concerné par le volcanisme par contre d'autre zones sont très volcanique : la ligne traversant l'Afrique, le pourtour du pacifique et dans certaines îles (Antilles).</p> <p>➤ Les séismes se répartissent en trois zones principales :</p> <p>Le pourtour du pacifique, la zone des dorsales océaniques et une zone située à la limite des continents eurasiatique et africain.</p> <p>➤ Des déformations superficielles : des chaînes de montagnes dans la périphérie des continents et une ligne de dorsale au niveau des océans.</p>	<p>La répartition des principaux témoins de l'activité du globe Terrestre (séismes, volcans, déformations récentes) indique qu'il existe en surface du globe de vastes calottes lithosphériques appelées plaques lithosphériques séparées par d'étroites zones ou l'essentiel de l'activité géologique est visible et concentré.</p> <p>Raisonnement dans un « l'espace tectonique. »</p> <p>Dans l'espace tectonique s'inscrit la notion de « plaque » (et par conséquent la notion de « limite de plaque »).</p> <p>La subdivision de la surface en continent et en océan n'est plus valable. D'un espace continentaliste on passe vers un espace plaquiste.</p>
<p>Le découpage de la lithosphère ne se superpose pas aux classiques continents et océans géographiques.</p> <p>Les limites des plaques ne présentent pas toujours une activité géologique.</p> <p>Les plaques présentent des marges actives et des marges passives.</p>	<p>Certaines plaques sont purement océaniques, d'autres océaniques et continentales.</p> <p>L'espace tectonique représente ainsi un espace plus large dans lequel s'inscrivent l'espace continental et l'espace océanique ainsi que l'espace de surface et l'espace souterrain non seulement superposés mais en interférence continue.</p>

Tableau 5.2 résumant les réponses souhaitées, et les idées déduites en rapport avec les répartitions des phénomènes géologiques à la surface du globe

3. Analyse didactique préliminaire de la situation

La situation est conçue pour savoir de quelle manière les élèves, avant enseignement, conçoivent l'espace dans sa dimension horizontale, et comment ils mobilisent et intègrent le processus d'accrétion déjà étudié en classe dans la construction de la notion de plaque.

La fiche d'activités proposée, en termes de tâches, nécessite un passage du modèle « continentaliste » au modèle « plaquiste ». Les résultats de l'activité proposée nous renseigneront sur l'enchaînement du raisonnement qui devrait être fait par les élèves sur la notion d'espace mise en jeu (par le biais de la notion de plaque).

3.1 Une analyse a priori de l'espace de contraintes dans la délimitation des plaques dans le contexte de la fiche d'activité

Construire une représentation des plaques lithosphériques et de leurs limites, dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques et dans le contexte de la fiche d'activité proposée aux élèves, c'est construire la nécessité d'une lithosphère fragmentée, ainsi que la nécessité d'une dorsale océanique qui met en relation les limites de deux plaques. Quelles contraintes empiriques peuvent être articulées à ces nécessités, parmi celles disponibles pour les élèves ?

- La superposition d'une part des répartitions des trois faits géologiques séismes, volcans et chaînes de montagnes sur la carte de la surface du globe et la non superposition d'autre part de ces faits aux limites géographiques, sont deux contraintes empiriques liées à la nécessité d'une subdivision de la surface selon des limites autre que les limites géographiques.
- La superposition des répartitions des trois faits géologiques séismes, volcans et chaînes de montagnes sur la carte de la surface du globe est une contrainte empirique liée à la nécessité d'une activité tout au long des lignes tracées.
- la nécessité d'une subdivision de la surface selon des limites autre que les limites géographiques et la nécessité d'une activité tout au long des lignes tracées sont liées à la nécessité du découpage de la surface de la Terre en plaques lithosphériques présentant une activité au niveau de ses limites.

La figure ci-dessous représente l'espace des contraintes ainsi défini :

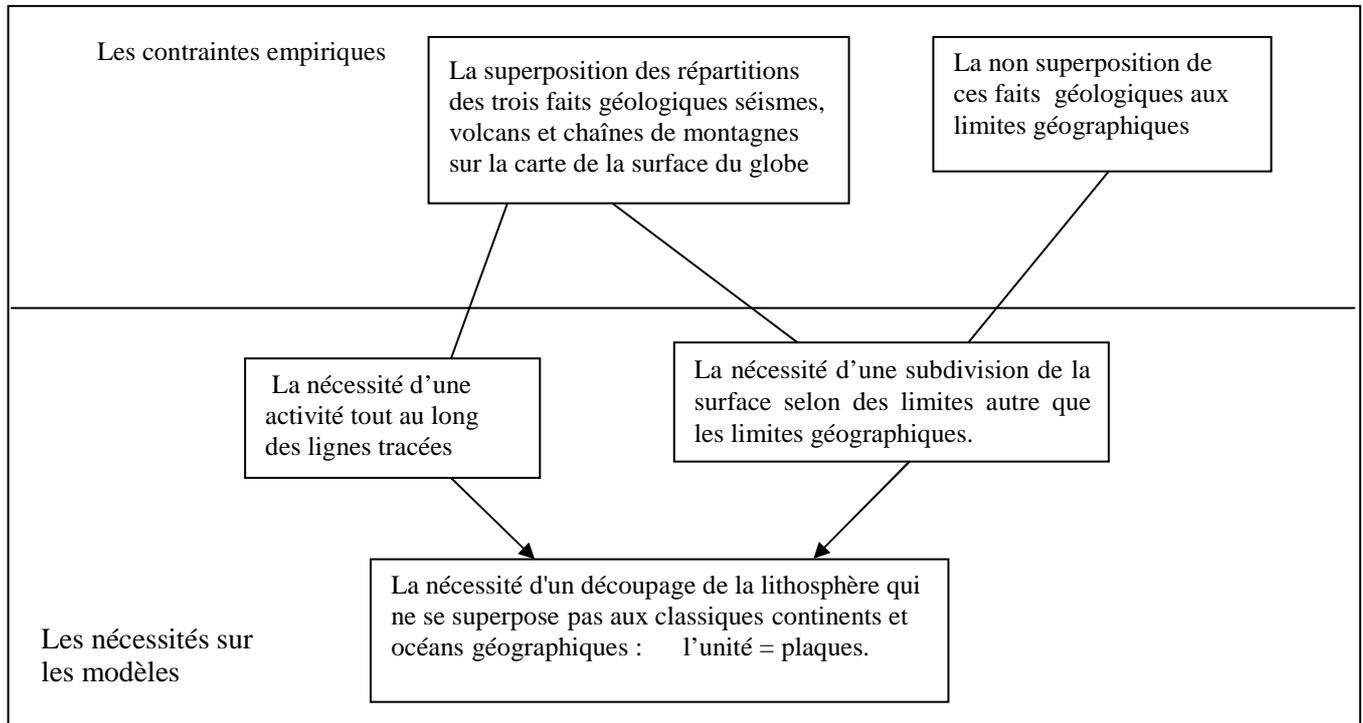


Figure 5. 2 l'espace de contraintes dans la délimitation des plaques dans le contexte de la fiche d'activité

4. Conclusion

L'analyse préliminaire de la situation nous permet de déduire que le repérage de « l'espace » et sa construction dans le cadre tectonique, n'est pas aussi simple qu'on le croit. Certainement, la perception des effets géologiques en jeu peut différer d'un élève à un autre, et on ne doit pas oublier que la construction de la nécessité d'une subdivision en plaques lithosphériques exige un passage d'une vision géographique vers une vision géologique c'est-à-dire qu'il faut changer le cadre d'observation pour pouvoir se détacher de la vision géographique de la surface du globe. On peut concevoir que l'élève trouve des difficultés à se détacher de la vision géographique.

Chapitre 6

Les plaques lithosphériques et les limites de plaques

Explication des élèves et utilisation de l'espace

Introduction

1. Le recueil des données
2. Les productions écrites des élèves aux questions de la fiche
3. La compréhension de l'espace par les élèves (Les plaques et les limites de plaques)
4. Conclusion générale de la première étude

Introduction

Dans le chapitre 4, nous avons étudié l'utilisation de l'espace chez les chercheurs au cours de la construction de la notion de plaques lithosphériques et de limites de plaques. Il y a à considérer **le basculement d'un fixisme vers un mobilisme**. De ce fait le chercheur commence à admettre l'existence de processus responsables du mouvement des plaques leur déroulement s'effectue dans les océans ; les processus sont imperceptible à l'échelle de l'homme mais leurs effets et leurs traces sont perceptibles à la surface et font l'objet d'une quantification (vitesse d'expansion des fonds océaniques ; vitesse de sédimentation...); ajoutons que leurs traces agissent sur l'espace et témoignent de sa création ou sa disparition (la sédimentation est la preuve d'une accrétion ;les chaînes de montagnes témoignent de l'existence d'une subduction...).

En ce référant à l'utilisation de l'espace des chercheurs, nous allons analyser les productions des élèves pour comprendre comment ces derniers utilisent l'espace « tectonique » en situation de construction de la notion de plaques et limites de plaques.

1. Le recueil de donnés

Nous avons commencé au cours de l'année scolaire 2006-2007 par la passation d'un pré test à titre diagnostique avant tout apprentissage aux élèves de troisième année sciences expérimentales dans lequel ils ont répondu à six questions qui tournent autour de la théorie de la dérive des continents, la répartition des séismes volcans et chaînes de montagnes, la formation des chaînes de montagnes et l'équilibre lithosphérique à la surface du globe.

Les analyses faites à partir des productions des élèves en réponse à ce questionnaire vont nous servir dans l'étude des trois problèmes géologiques.

A la lumière de ce que révèle l'analyse du pré test nous avons formulé nos trois problèmes et nous avons choisi la manière de les présenter aux élèves.

Dans deux classes, nous avons demandé à des élèves de troisième sciences expérimentales d'expliquer la répartition actuelle des séismes des volcans et des chaînes de montagnes en leur fournissant une fiche d'activité renfermant des questions aux quelles ils doivent répondre.

Ces deux classes sont dans la même année scolaire et étudient avec le même professeur. De plus, elles ont travaillé dans le même contexte d'étude général, à savoir le cadre général de la théorie de la tectonique des plaques.

Nous disposons de différents types de productions d'élèves

1.1 Analyse des réponses au questionnaire (pré- apprentissage)

Pour les trois problèmes de recherche, avant de proposer les situations problèmes, nous avons distribué aux élèves un questionnaire avant même d'entamer la première séance du cours sur la théorie de la tectonique des plaques pour connaître quels types de préconceptions possèdent-ils sur la théorie de la tectonique des plaques, et sur les notions telles que : plaque lithosphérique, mouvement des plaques, l'équilibre lithosphérique, subduction, collision. Et quels types d'expressions lexicologiques avancent-ils pour répondre et argumenter et quels modèles explicatifs proposent-ils pour expliquer un fonctionnement, quelles relations entretiennent-ils avec le temps et l'espace.

Ce questionnaire est composé de six questions réparties sur les trois problèmes d'étude mais implicitement. Deux questions pour chaque problème. Nous analysons chaque question indépendamment puis nous croisons les résultats obtenus des deux questions pour faire sortir des catégories de conceptions.

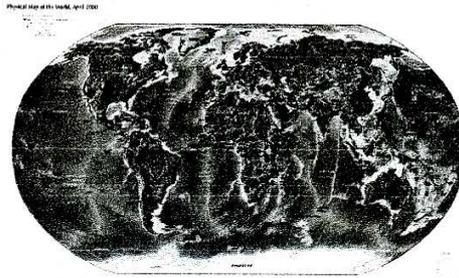
Ces conceptions vont servir pour voir s'il existe une évolution des conceptions ou un changement conceptuel au cours de la résolution de problème et de déterminer l'écart entre les préconceptions et les conceptions nouvelles si elles existent au cours de la problématisation.

Les deux questions qui se rapportent à l'espace sont la quatrième et la cinquième question. L'analyse des réponses des élèves à ces deux questions va nous permettre d'identifier les préconceptions que possèdent les élèves à propos de l'espace.

Questionnaire

Lisez ces questions et répondez dans l'espace réservé à la réponse. Si vous préférez répondre par un schéma dessinez le au verso de la feuille en indiquant le numéro de la question.

- 1) Wegener est un géologue des années 1910, en voyant sur la carte du globe terrestre les complémentarités qui existent entre les bords de l'Afrique et de l'Amérique du sud, a constaté que ces deux continents, s'emboîtaient autrefois comme les morceaux d'un puzzle. Comment expliquez leur disposition actuelle?



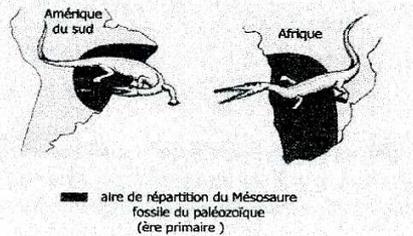
.....

.....

.....

.....

- 2) Les paléontologues essayent de tracer l'histoire de la terre au cours du temps. Pour cela, ils rassemblent des informations sur les animaux qui ont vécu dans le passé, le climat, l'environnement..... Au cours de leurs recherches, ils ont trouvé le fossile de mésosaure qui a vécu pendant l'ère primaire, en Afrique et ils l'ont trouvé aussi en Amérique du sud. Comment expliquez vous la présence de ce fossile de part et d'autre de l'océan Atlantique ?



.....

.....

.....

- 3) dans l'histoire de l'Homme, il y a des gens, qui, en regardant les reliefs (chaînes de montagnes, vallées, plaines...) à la surface de la terre ont pensé que la présence de ces reliefs est expliquée par le fait que la terre se rétrécit (diminue de surface) au cours du temps, d'autres ont expliqué la présence de ces reliefs par le fait qu'elle grandisse et une troisième catégorie a pensé qu'elle garde les mêmes dimensions au cours du temps. Qu'est- ce que vous en pensez ? et pourquoi ?

.....

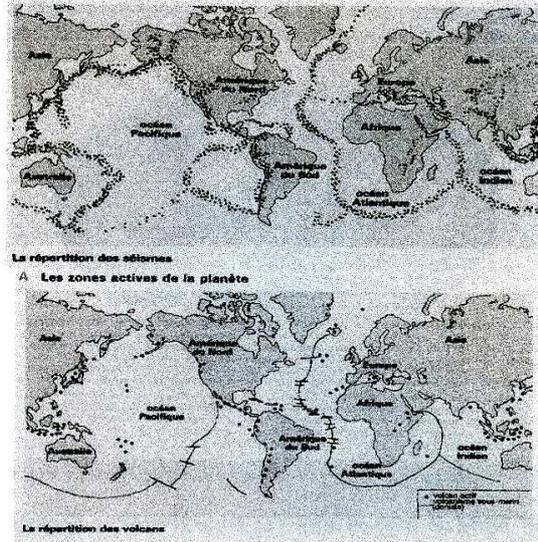
.....

.....

.....

Figure 6.1 la première page du questionnaire distribué avant l'apprentissage

4) les géologues ont pu tracer sur la carte du globe terrestre la répartition des séismes et des volcans: comme le montre les documents suivants :



4) Comment expliquez vous ces répartitions ?

.....

.....

.....

.....

.....

5) On entend parler souvent dans le journal télévisé des tremblements de terre et de leurs dégâts matériels et humains dans plusieurs pays du monde tel que le Japon, la Turquie, l'Iran, l'Italie etc.... pourquoi la terre tremble-t-elle souvent dans ces mêmes endroits et non pas dans d'autres?

.....

.....

.....

.....

.....

3) Pour certaines personnes les chaînes de montagnes se sont formées suite à un rétrécissement du volume de la terre ce qui crée un aspect de rides. D'autres pensent que les chaînes de montagnes se sont formées suite à un dépôt de sédiments lors de l'érosion des terrains qui l'entourent se qui explique leurs altitudes. Un troisième groupe pense que les chaînes de montagnes se sont formées suite à un plissement de terrain provoqué par des contraintes tectoniques. expliquez en quelques lignes ou par un schéma légendé comment d'après vous se sont formées les chaînes de montagnes ?

.....

.....

.....

.....

.....

Figure 6.2 la deuxième page du questionnaire distribué avant l'apprentissage

1.1.1 Analyse de la quatrième question du questionnaire

Elle propose de voir les répartitions des volcans et des séismes qui sont presque superposables sur la carte du globe Terrestre et qui marquent les limites des plaques lithosphériques. Cette question a pour but de mettre l'accent sur la nature de l'argumentation utilisée par les élèves pour expliquer cette répartition et si les élèves arrivent à identifier l'existence des plaques en se détachant des limites géographiques et en percevant les limites géologiques. La question est comme suit :

Les géologues ont pu tracer sur la carte du globe Terrestre la répartition des séismes et des volcans comme le montre les documents suivants (voir questionnaire en annexe) :

Comment expliquez-vous ces répartitions ?

En examinant les réponses des élèves à la quatrième question nous remarquons que ces derniers se répartissent en trois catégories de réponses qui sont réparties comme suit :

- **Première catégorie de réponse**

8/25 des élèves (N° 1-4-14-20-21-22-23-24)

Nous remarquons que pour tous ces élèves les séismes et les volcans sont les conséquences du mouvement des plaques, ils utilisent les mots « plaques et plaquettes », qui, à leurs limites se situent les volcans et les séismes. L'espace dans ce cas est un espace géologique tectonique et non pas un espace géographique continentale. La présence des volcans et des séismes dans ces endroits est expliquée par le mouvement des plaques. (annexe3)

Exemple de réponse n°1 : « Les séismes et les volcans sont situés au niveau des océans et des mers qui relient les différents continents. On sait que les différentes plaques sont en mouvement, alors, provoquent ces phénomènes naturels comme les séismes et les volcans »

Exemple n°14 : « La terre tremble souvent dans ces mêmes endroits car les plaquettes ne sont pas fixes. »

- **Deuxième catégorie de réponse**

8/25 des élèves (N°2-5-9-10-13-18-19-25).

Pour ces élèves, les séismes et les volcans sont situés dans les mers, les océans et à la frontière des pays car à cet endroit il n'y a pas de « plaquettes ». Pour ces élèves les volcans et les séismes ne peuvent pas être sur la Terre ferme. Pour ces élèves, les océans et

la partie continentale représentent deux milieux différents. L'espace est subdivisé en océans et continents, il s'agit d'un espace géographique. (annexe3)

L'exemple n°9 : «J'explique ces répartitions par la présence des séismes aux zones côtières et les frontières des pays».

- **Troisième catégorie de réponse**

9/25 des élèves n'ont pas répondu à la question (N° 3-6-7-8-11-12-15-16-17).

Nous récapitulons les trois catégories de réponses dans le tableau ci-dessous.

Les catégories des réponses à Q4	Les caractéristiques de chaque catégorie	Le nombre des élèves
Catégorie 1	la présence d'une conception mobiliste : le mouvement des plaques provoque les séismes et les volcans. La présence du concept plaque mais exprimé avec d'autres mots : « plaquettes, plaques». Les séismes et les volcans sont situés aux limites des plaques : « côte, bord ».	8/25 (N°1-4-14-20-21-22-23-24)
Catégorie 2	Les séismes et les volcans sont situés dans les mers et les océans et à la frontière des pays.	8/25 N°2-5-9-10-13-18-19-25
Catégorie 3	Pas de réponse	9/25 N° 3-6-7-8-11-12-15-16-17

Tableau 6.1: Récapitulation des catégories de réponses pour la question 4

En conclusion : on distingue deux types d'espace : Un espace géographique qui subdivise la surface en océans et continents et un espace géologique qui subdivise la surface en plaques.

1.1.2 Analyse de la cinquième question du questionnaire

La cinquième question consiste à donner une explication à la localisation d'un séisme dans le but de tirer les préconceptions sur les limites de plaques du fait que le chapitre qui précède la théorie de la tectonique des plaques est celui de la structure du globe Terrestre. La question est comme suit :

On entend parler souvent dans le journal télévisé des tremblements de Terre et de leurs dégâts matériels et humains dans plusieurs pays du monde tel que le Japon, la Turquie,

l'Iran, etc.... pourquoi la Terre tremble-t-elle souvent dans ces mêmes endroits et non pas dans d'autres ?

En examinant les réponses des élèves à la cinquième question nous remarquons que ces derniers se répartissent en deux catégories de réponses qui sont réparties comme suit :

- **Première catégorie de réponse**

10/25 des élèves (N° 1-3-4-5-14-20-21-22-23-24).

Les séismes se localisent aux limites des plaques, leur répartition n'est pas aléatoire, est ayant une étroite liaison avec le mouvement des plaques qui les engendre. (annexe3)

Exemple n°14 : « *La terre tremble souvent dans ces même endroits car les plaquette ne sont pas fixe* ».

Exemple n°23 : « *Ces endroits sont localisés au bord des plaques alors au cours du mouvement du plaque ces endroits auront des tremblements* ».

- **Deuxième catégorie de réponse**

9/25 des élèves (N°2-6-8-9-13-16-18-19-25).

Les élèves proposent comme origine des séismes dans ces pays et non pas dans d'autres, des facteurs comme la position géographique (le nord de l'équateur, au niveau de l'équateur), et la texture du sol (le sol est fragile, la Terre est fragile) et la présence de volcans dans ces pays. La référence aux limites géographiques dans l'explication de la répartition des séismes à la surface du globe inhibe la perception des limites géologiques et interdit la subdivision en plaque. (annexe3)

Exemple n°2 : « *Ces pays se trouvent au nord de l'équateur et ce zone est en danger à cause des tremblements de terre provoquée souvent dans ces endroits et non pas dans d'autres.* »

Exemple n°25 : « *Parce qu'ils sont sur les endroits des séismes et des volcans.* »

Nous récapitulons les deux catégories de réponses dans le tableau ci-dessous.

Les catégories des réponses à Q5	Les caractéristiques de chaque catégorie	Le nombre des élèves
Catégorie 1	la présence d'une conception mobiliste : le mouvement des plaques provoque les séismes et les volcans dans ces pays. La présence du concept plaque exprimé avec les mots : « plaquettes, plaques». Les pays présentant des séismes se trouvent aux limites des plaques qui sont en mouvement	10/25 (N° 1-3-4-5-14-20-21-22-23-24)
Catégorie 2	Les séismes sont dus à plusieurs facteurs tels que les volcans, l'emplacement géographique des pays et la fragilité et la minceur des couches lithosphériques	9/25 N°2-6-8-9-13-16-18-19-25

Tableau 6.2 : Récapitulation des catégories de réponses pour la question5

1.1.3 Croisement des catégories de réponses de la quatrième et de la cinquième question

Le croisement va nous permettre d'identifier des catégories de conceptions qui existent chez les élèves avant d'entamer le chapitre de la tectonique des plaques. il va nous permettre aussi de voir s'il existe une cohérence dans les réponses des élèves aux deux questions proposées. Ces conceptions, et ces raisonnements vont nous aider dans l'étude de l'utilisation de l'espace par les élèves au cours de la résolution du premier problème celui de la subdivision de la surface de la Terre en plaques lithosphériques. En croisant les catégories de réponses des ces deux questions nous remarquons que les élèves se répartissent comme suit :

Q4 Répartition des séismes et des volcans	Catégorie 1 sont situés aux limites des plaques.	Catégorie 2 sont situés dans les mers et les océans, sur les côtes et aux frontières des pays.	Total des réponses obtenues
Q5 Origine des séismes et des volcans			
Catégorie 1 due aux mouvements des plaques	1, 4, 14, 20, 21, 22, 23,24	5	9/25
Catégorie 2 due à La position géographique et à la structure du globe Terrestre		2, 19,9, 13, 18, 25	6/25
Total des réponses obtenues	8/25	7/25	15/25

Tableau 6.3 : Croisement des catégories de réponses des questions 4 et 5

Le tableau de croisement montre que lorsque les élèves situent les séismes et les volcans au niveau des limites des plaques ils expliquent leur choix spatial par les mouvements des plaques et cela pour 8/25 des élèves (la case colorée en vert). Ils utilisent l'espace géologique. Il s'agit d'un raisonnement cohérent qui justifie une conception plaquiste mobiliste. Pour ce qui reste des élèves qui ont répondu aux deux questions proposées (7/25) (la case colorée en rose), c'est la fragilité de la structure du globe Terrestre et la position géographique qui explique les répartitions des séismes et des volcans dans les mers et les océans, sur les côtes et aux frontières des pays. Il s'agit aussi d'un raisonnement cohérent mais qui mobilise un espace géographique.

Ces deux raisonnements existent avant l'apprentissage. Nous allons voir si ces deux raisonnements continuent à exister ou bien vont-ils changer au cours d'une situation de résolution de problème.

2. Les productions écrites des élèves aux questions de la fiche

Il s'agit des réponses aux questions de la fiche que les élèves ont traitées dans un travail de groupe mais on trouve dans certaines réponses un désaccord entre les membres du groupe et donc deux idées différentes sont mentionnées sur un même brouillon :

- Dans la première classe (17 élèves) nous avons assisté à une séance de cours : 4 productions en groupe de 4 élèves.
- Dans la deuxième classe (18 élèves) nous avons assisté à deux séances de travaux pratiques : 6 productions en groupe de 3 élèves.

2.1 Les transcriptions de la confrontation des réponses des élèves à la fiche

Après avoir terminé l'activité de la fiche le professeur entame une discussion collective entre tous les élèves du groupe nous avons fait des enregistrements audio et nous avons transcrit toutes leurs réponses et leurs suggestions en annexes.

2.2 Procédure d'analyse

Nous allons analyser les productions écrites des élèves en réponses aux trois questions de la fiche, en procédant par une catégorisation et en identifiant les conceptions et les façons

par les quelles ils entreprennent « l'espace ». Nous allons analyser les réponses des élèves selon les deux grandes idées qui marquent l'histoire de la tectonique : une conception continentaliste et une plaquiste. Nous porterons une attention particulière aux interactions et aux oppositions établies entre ces deux conceptions.

Après avoir terminé l'activité de la fiche, le professeur entame une discussion collective entre tous les élèves de la classe. Nous avons effectué des enregistrements audio mais nous n'avons pas pu avoir l'autorisation pour filmer le déroulement de la séance. Nous avons transcrit toutes leurs propos et leurs suggestions voir annexe.

Nous allons analyser les propos des élèves émis lors des discussions selon les deux grandes idées qui marquent l'histoire de la tectonique dans le cadre d'un problème d'espace, de temps et de fonctionnement dans lesquels nous cherchons à identifier le rapport qu'entretiennent les élèves avec l'espace géologique tectonique, le temps et le fonctionnement.

En examinant le contenu des propos des élèves nous remarquons que ces débats peuvent être analysés selon deux modes :

- **le mode de raisonnement adopté à chaque fois envers « l'espace » « le temps » et « le fonctionnement :** Pour cette analyse nous avons étudié les réponses assemblés de certains élèves dont le raisonnement paraît clair et cohérent, car certains élèves ont peu participé dans le débat par comparaison à d'autres qui ont presque été toujours présents et de ce fait leurs idées paraissaient plus claires du fait qu'ils ont produit plusieurs commentaires.
- **Une analyse de la forme des argumentations émises** tout au long du débat, c'est-à-dire la nature des phrases utilisées (affirmative, interrogative exclamative...utilisent-ils des expressions de doute, de problématique...) peut aussi être intéressante.

En référence à l'article de Orange.C, Lhoste.Y et Orange.D (2007) sur l'argumentation, la problématisation et la construction de concepts en classes de sciences nous allons discuter les relations entre argumentation, problématisation et construction de concepts plaques et limites de plaques. Cette analyse verbale est basée sur le modèle de l'argumentation, du trilogue argumentatif ((Kerbrat-Orecchioni & Plantin, 1995 ; Plantin, 1996). Selon ce modèle, les situations d'argumentation mettent en jeu trois rôles discursifs :

- Le proposant porte une proposition (une thèse) en faveur de laquelle il argumente.
- l'opposant tente de réfuter les arguments du proposant (des objections et des contre objections) et peut contre argumenter en faveur d'une autre thèse.

- Le tiers, c'est celui qui prend en charge la Question, c'est-à-dire la modalité discursive qui n'est ni du côté du proposant ni du côté de l'opposant, mais exprime le doute et le problématique.

Le débat qui a eu lieu avec le premier groupe a été guidé par le professeur car les élèves avaient des difficultés à s'exprimer en langue française. Le professeur pose une question et les élèves essayent de présenter leurs opinions.

Alors que dans le deuxième groupe le débat met bien en jeu différents points de vue, qui se contredisent, expriment le doute et le problématique. Dans ce cadre d'analyse, nous avons subdivisé les deux débats en trois épisodes selon le problème posé qu'il soit un problème d'espace de temps ou de fonctionnement. Dans chaque étude nous allons analyser les épisodes correspondants, c'est-à-dire dans cette première étude (le problème d'espace) nous allons analyser le premier épisode de chaque débat qui tourne autour de la répartition des volcans, des séismes et des chaînes de montagnes. Dans la deuxième étude (consacrée au problème de fonctionnement) nous analyserons les deux épisodes qui tournent autour du mouvement de plaques et le moteur qui est y responsable, alors que dans la troisième étude (le problème de temps), nous analyserons les épisodes qui tournent autour de la formation des chaînes de montagnes.

3 La compréhension de « l'espace » par les élèves (les plaques et les limites de plaques)

Les questions 1 à 3 de la fiche concernent les répartitions des séismes et des volcans et des chaînes de montagnes, de même que la discussion. Leur analyse doit nous permettre d'évaluer la conceptualisation de « l'espace » par les élèves.

3.1 . Etude des réponses écrites aux questions 1 à 3 de la fiche

3.1.1. Analyse des réponses à la question 1

La question 1 consiste à comparer la répartition des séismes, des volcans et des déformations superficielles et de déduire en quelques lignes s'il existe une relation entre les trois faits géologiques.

Tous les élèves (cinq élèves se sont absentés) qui ont répondu à la question, ont pu déduire la superposition des répartitions des trois faits géologiques. Certains ont cherché à trouver une explication à cette superposition, d'autre se sont limités à préciser l'endroit où on peut les rencontrer sur la carte du globe. Nous répartissons en **deux catégories** les réponses écrites des élèves à cette question.

- **La catégorie 1** rassemble les réponses aux caractéristiques suivantes :

Les réponses qui confirment l'existence d'une superposition entre les différentes répartitions des faits géologiques mais aussi qui les localisent sur la carte et leur attribuent une position spatiale précise. (annexe 4)

Exemple1 « ils sont tous localisés en même endroit : au marge continental ». (Maysa, Manel et Soumaya)

Exemple2 : « se localisent aux bords des continents et autour des îles, les déformations superficielles sont localisées au niveau des océans. » (Hamza et Hamza)

Exemple3 : « Les volcans les séismes et les déformations sont près de la dorsale. » (Refka et Amani)

- **La catégorie 2** rassemble les réponses aux caractéristiques suivantes :

Les réponses qui confirment l'existence d'une superposition entre les différentes répartitions des faits géologiques sans qu'ils leur attribuent une position spatiale, mais proposent une explication pour cette superposition. (annexe 4)

Exemple1 « les Séismes et les volcans provoquent les déformations superficielles Les séismes provoquent les volcans et les volcans résultent de la dorsale ». (Insaf, Asma et Olfa)

Exemple2 : « Les volcans les séismes et les déformation sont près de la dorsale et ça a comme cause le rift d'où sort le magma. Le volcanisme cause le séisme qui est responsable des déformations. » (Refka et Amani)

Exemple3 : « ces chaînes de montagnes sous marine sont responsables des déformations superficielles. » (Takwa et Sabrine)

Exemple4 : « on peut conclure que la déformation superficielle est causée par les activités : volcanisme et séisme. » (Wejdane, Rihab et Abir).

Certaines réponses présentent la possibilité de l'existence d'une relation entre les trois faits géologiques sans préciser sa nature.

Exemple5 : « Il existe une relations entre séismes volcans et déformations. » (Mejri et Manai)

D'autres réponses confirment l'existence d'une superposition entre les différentes répartitions des faits géologiques mais ne les localisent pas sur la carte et ne leur attribuent aucune position spatiale précise.

Les catégories de réponses à la question1	Classe1 sur 12 productions	Classe2 sur 18 productions	Total sur 30 productions
Catégorie1 : attribue une position spatiale aux faits : séismes, volcans et déformations superficielles sur la carte	02	05	07
Catégorie 2 : absence de localisation spatiale avec la proposition d'une explication de la superposition des faits : séismes, volcans et déformations superficielles	09	13	22

Tableau 6.4 Catégorisation des réponses à la question1 de la fiche

Nous pensons que les réponses de la catégorie 1 montrent que l'élève mobilise « l'espace ». Il le lie aux marges continentales ou aux bords des continents ou encore près de la dorsale. La notion d'espace figure dans les réponses de la catégorie 2. Peut-être que la difficulté de se représenter une position spatiale pour les faits géologiques par rapport à la dorsale (qui a été étudié au paravent) est présente car cette difficulté a émergé au cours de la discussion (qu'on analysera ultérieurement). Finalement, cette première question conduit à une bonne proportion de réponses d'élèves qui ne mentionnent pas explicitement « l'espace » (les limites de plaques).

3.1.2. Analyse des réponses à la question 2

La question 2 de la fiche demande aux élèves de comparer la répartition des principaux témoins de l'activité du globe Terrestre (séismes, volcans, déformations récentes) à la carte du globe pour déduire qu'il existe en surface du globe de vastes calottes lithosphériques appelées plaques lithosphériques séparées par d'étroites zones ou l'essentiel de l'activité géologique est visible et concentré. Il s'agit d'un raisonnement dans un «espace tectonique», dans lequel s'inscrit la notion de « plaque » (et par conséquent la notion de « limite de plaque »). La subdivision de la surface en continent et en océan n'est plus valable. D'un espace continentaliste on passe vers un espace plaquiste.

Dans une première catégorie, pour la majorité des élèves 28/30 le repère spatial dans l'espace global est représenté par la dorsale médio océanique. Les élèves proposent des explications pour justifier la répartition des faits géologiques identifiés.

Ceux qui donnent un repère spatial exact, essaient de justifier la présence des faits géologiques au niveau de la dorsale et non pas dans d'autres endroits. La majorité des justifications reprend le phénomène d'accrétion et la sortie de magma au niveau du rift. Mais nous trouvons deux types d'explications :

1) Les faits géologiques sont la cause de la formation de la dorsale médio océanique. Exemple : (voir annexe 5)

Refka13 : « les séismes et les volcans se superposent à la dorsale car c'est eux qui la provoque donc c'est normal de les trouver dans le même endroit. »

Insaf 12 : « les faits géologiques se trouvent surtout au niveau de la dorsale médio océanique l'activité géologique intervient dans la formation de la dorsale médio océanique. Les faits géologiques sont la cause de la formation de la dorsale médio océanique. »

Wijdène22 : « en comparant la répartition des faits géologiques à la carte de la surface du globe, on constate qu'ils ont la même localisation d'où on peut déduire que la formation des dorsales médio océanique est dû par des activités volcanique et séisme. »

2) La dorsale est responsable de la présence des faits à ses côtés. Exemple :

Takwa14 : « on remarque que la répartition des faits géologique sont le même que la carte de la surface du globe on déduit que les dorsales médio océanique sont à la cause de ces répartition car les dorsales contiennent un rift axial et à ce niveau là il y a une remonté du magma basaltique qui forme la croûte océanique. »

3) Les réponses se limitent à confirmer la superposition des répartitions des faits à la dorsale, sans chercher le pourquoi des choses.

Hanène11 : « la répartition des séismes et des volcans et la même que la dorsale alors on déduit quand il y a des séismes il s'agit des volcans »

Maysa21 : « on déduit que l'activité sismique et volcanique se fait au voisinage de la dorsale »

Mohamed ali 23 : « les zones volcaniques actives sont localisées dans les mêmes endroits que celles des séismes et des déformations superficielles. »

Maroua 24 : « les volcans et les séismes des cartes (doc1 et 2) se localisent au niveau des dorsales (doc3). »

Rihab25 : « la comparaison des cartes des répartitions à la carte de la surface du globe montre que les séismes et les volcans se répartissent au niveau du dorsales médio océaniques. »

Labben26 : « on peut déduire qu'ils ont presque la même localisation. »

Deux élèves sur 30 seulement qui proposent une subdivision spatiale en océans et continents basée sur la répartition des faits.

La chaîne de dorsale océanique renferme la majorité des déformations superficielles.

La localisation spatiale des séismes et des volcans se fait **par rapport aux côtes continentales**.

Hamza 27 : « la répartition des déformations superficielles est plus développés dans les océans que la répartition des faits géologiques car la plupart des faits géologiques sont répartis à des chaînes et surtout au niveau des côtes. »

2/30 semble négligeable devant une majorité qui se réfère à la dorsale pour localiser les faits géologiques mais il est intéressant dans la mesure où il présente une vision géographique de l'espace.

Le tableau suivant rassemble les résultats de la mise en catégories pour les deux classes de troisièmes sciences :

Les catégories de réponses à la question2		Classe1 sur 12 productions	Classe2 sur 18 productions	Total sur 30 productions
Catégorie1 :	Le repère spatial sur la carte du globe est représenté par la dorsale médio océanique sans explication	07	09	28
	La dorsale est le résultat ou la cause des faits géologiques.	05	07	
Catégorie 2 : Une subdivision spatiale en océans et continents, basée sur la répartition des faits par rapport aux côtes continentales		0	02	02

Tableau 6.5 Catégorisation des réponses à la question2 de la fiche

3.1.3. Etude croisée de réponses aux questions 1 et 2

Nous avons mis en correspondance les réponses à la question 1 et à la question 2, dans le but de nous assurer de leur fixation de l'espace.

Le tableau suivant croise les résultats de ces élèves à la question 1 et 2. Les nombres du tableau expriment des nombres de réponses.

Question1 question2	Catégorie1 : attribue une position spatiale aux faits	Catégorie 2 : absence de localisation spatiale des faits géologiques	total
Catégorie1 Le repère spatial est représenté par la dorsale	Refka, amani Maysa, soumaya, manel 05	Insaf, asma, olfa, takwa, sabrine, wejdane rihab abir ; HoussemeMejri ; manaï, labben Takwa ; Hanène,oumayma, amira, ameni, amel med ali, adnen, haïthem maroua, khaoula, 22	27
Catégorie 2 Une subdivision spatiale en océans et continents,	Hamza, hamza 02	00	02
total	07	22	29

Tableau 6.6 Tableau de croisement des réponses à la question 1 et 2 de la fiche

Sans tenir compte des réponses manquantes aux deux questions, nous remarquons qu'en réponse à la deuxième question, 27 élèves sur 29 considèrent la dorsale médio océanique comme repère spatial relatif à la surface du globe Terrestre. Alors qu'en réponse à la première question, sur ces mêmes 27 élèves, 22 n'ont pas précisé de repère spatial.

Nous pouvons constater que la simple comparaison entre les différentes répartitions (question1) ne permet pas la coordination de l'espace globale par contre la comparaison des répartitions des différents faits géologiques à la carte du globe (question2), fait apparaître chez ces mêmes élèves une coordination de l'espace qui se manifeste par la fixation d'une origine spatiale, par rapport à la quel l'élève localise les faits géologiques à la surface Terrestre.

Seulement 02 sur 29 utilisent les marges continentales comme repère spatial.

A ce stade de notre analyse des réponses des élèves, nous pouvons écrire que la presque totalité des élèves utilisent les prérequis (formation de la dorsale médio océanique) de manière adéquate, pour la mobilisation de l'espace.

3.1.4. Analyse des réponses à la question 3

Existe-t-il un rapport direct entre les limites sur la carte du globe et la répartition « Géographique » des océans et des continents ? Expliquez en quelques lignes.

Par le biais de cette question, les élèves vont essayer de :

- D'identifier la position spatiale des limites géologiques sur la carte par rapport aux limites géographiques subdivisant la surface globale en océans et continents, déjà connues.
- Préciser la nature du rapport qui existe entre les limites géologiques et les limites géographiques.

Une telle question permet d'identifier les conceptions des élèves sur l'espace tectonique globale : la conception continentaliste ou la conception plaquiste.

Une réponse exacte a les caractères suivants :

- les limites géologiques subdivisent la surface du globe non pas en océans et continents mais en morceaux plus larges que ces derniers, composés à la fois de lithosphère continentale et de lithosphère océanique ou de lithosphère océanique seulement.
- les limites géologiques sont responsables de la variation des limites géographiques au cours du temps suite au phénomène d'accrétion qui se déroule au niveau de la dorsale médio océanique et donc en d'autres termes au niveau de certaines limites géologiques, et qui provoque la formation de la lithosphère océanique et par conséquent l'élargissement de l'océan et donc la variation des limites géographiques.

A ce niveau, il est normal que les élèves n'utilisent pas dans leurs explications la subduction à côté de l'accrétion. Car jusqu'à ce stade d'enseignement seul le phénomène d'accrétion fait partie des prérequis.

En se basant sur la première variable (la position spatiale des limites géologiques sur la carte par rapport aux limites géographiques) nous remarquons que les élèves se répartissent sur deux ensembles qui traitent la notion d'espace géologique tectonique de deux manières différentes, d'où nous distinguons deux conceptions de l'espace tectonique :

Une conception « plaquiste »

Nous remarquons que 15/30 des élèves (50%) ont pu effectuer une lecture de l'espace tectonique sur la carte du globe. Les limites géographiques ne se superposent pas aux limites géologiques. Ils ont pu subdiviser la surface en morceaux autres que les continents et les océans et cela en précisant les limites géologiques qui délimitent à la fois « le continent et une portion de l'océan », sans les désigner par le concept « plaque lithosphériques ». Cela paraît clair quand ils additionnent le continent à la moitié de l'océan formant ainsi une surface à la fois continental et océanique qui n'est en réalité qu'une plaque lithosphérique. (voir annexe 6)

Exemple24 : « Les limites coupent chaque continents de l'autre et ça n'arrive pas spontanément car chaque continent est localisé ou entouré d'un océan que ce soit atlantique océanique.... »

Exemple 1.2 : « les limites sur la carte du globe entourent tout les continents et se trouve au milieu de chaque océan. La répartition de la dorsale médio océanique provoque l'éloignement des continents l'un de l'autre. La dorsale médio océanique sépare les continents l'un des autres au milieu de chaque océan. »

Exemple 1.1 : « il existe un rapport direct entre les limites sur la carte du globe et la répartition géographique des océans et des continents car la même forme de dorsale géographique et sous marin. » (Amira, Omayma, Amani, Amel).

Une conception « continentaliste »

Nous remarquons que 15/30 des élèves (50%) n'ont pas pu effectuer une lecture de l'espace tectonique sur la carte du globe. Ils ont subdivisé la surface en continents et océans et cela en se référant aux limites géographiques et en insistant dans leurs réponses sur la dérive des continents. (Voir annexe 6)

Exemple 2.6 : « oui, il existe un rapport direct entre les limites sur la carte du globe car il sépare entre deux continents complémentaires et au début on a vu qu'il été un seul continent. »

Exemple 1.3 : « oui il y a un rapport direct entre les limites sur la carte du globe et la répartition « géographique » des océans et des continents. Au niveau du rift, il y a une

remonté de magma qui est l'origine de l'éloignement des continents et la répartition des continents puis les océans. » (Refka, Amani)

Exemple 2.2 : *« les limites sur la carte du globe prend la même forme de la répartition géographique ce qui prouve la théorie de dérive des continents ainsi la répartition géologique et la géographique ne sont pas les mêmes car : dans la répartition géographique on sépare les continents les une au autre or dans le géologique les continents tous sont assemblés sauf le continent Amérique c'est grâce à la dorsale médio océanique. »(Wejdène, Rihab, Abir)*

En se basant sur la deuxième variable (Le type du rapport qui existe entre les limites géologiques et géographiques) et comme la dorsale océanique présente une importance particulière dans le mécanisme de l'accrétion, nous avons analysé plus finement les réponses selon la place qu'ils donnent à la dorsale dans leurs justifications. Nous remarquons que les élèves se répartissent sur deux ensembles qui ne donnent pas la même importance à la dorsale océanique dans le rapport qui existe entre les limites géologiques et les limites géographiques :

Un rapport spatial lié à la dorsale

Nous remarquons que 15/30 des élèves ont justifié le rapport existant entre les limites géologiques et géographiques par ce qui se passe au niveau de la dorsale: les limites géologiques définies par la dorsale médio océanique selon les élèves participent à l'édifice et au traçage des limites géographiques par le phénomène d'accrétion qui provoque le mouvement d'écartement au niveau du rift. Nous constatons que les élèves accordent une importance à la dorsale en l'utilisant comme repère dans l'espace ou comme cause qui fait varier l'espace géologique et permet de ce faite sa lecture et sa subdivision.

Exemple 1.3 : *« oui il y a un rapport direct entre les limites sur la carte du globe et la répartition « géographique » des océans et des continents. Au niveau du rift, il y a une remonté de magma qui est l'origine de l'éloignement des continents et la répartition des continents puis les océans. »*

Exemple 1.2 : *«les limites sur la carte du globe entourent tout les continents et se trouve au milieu de chaque océan. La répartition de la dorsale médio océanique provoque l'éloignement des continents l'un de l'autre. La dorsale médio océanique sépare les continents l'un des autres au milieu de chaque océan »*

Un rapport spatial non lié à la dorsale

Nous remarquons que 15/30 des élèves ont justifié le rapport existant entre les limites géologiques et géographiques par d'autres causes différentes de ce qui se passe au niveau de la dorsale. Pour eux les limites géologiques sont responsables de la distribution géographique à la surface. (Voir annexe 6)

Exemple 2.3 : « les limites sur la carte du globe sont responsables de la formation et la distribution des continents pour prendre la forme actuel. Ce sont les facteurs de la répartition des continents et de la création des océans. »

Exemple 2.6 : « oui, il existe un rapport direct entre les limites sur la carte du globe car il sépare entre deux continents complémentaires et au début on a vu qu'il été un seul continent. »

Exemple 1.4 : « il y a un rapport car ces limites sont la causes de cette division. » (Takwa, Sabrine)

Exemple 2.2 : « les limites sur la carte du globe prend la même forme de la répartition géographique ce qui prouve la théorie de dérive des continents ainsi la répartition géologique et la géographique ne sont pas les mêmes car : dans la répartition géographique on sépare les continents les une au autre or dans le géologique les continents tous sont assemblés sauf le continent Amérique c'est grâce à la dorsale médio océanique. » (Wejdène, Rihab, Abir)

En récapitulation, notre analyse s'est faite selon deux variables :

- La première variable : la position spatiale des limites géologiques sur la carte par rapport aux limites géographiques, elle nous permet de distinguer deux conceptions de l'espace tectonique.
- La deuxième variable : le type du rapport qui existe entre les limites géologiques et géographiques, elle nous permet de distinguer deux ensembles qui ne donnent pas la même importance à la dorsale océanique dans le rapport qui existe entre les limites géologiques et les limites géographiques.

Le croisement de ces deux variables donne les répartitions suivantes :

V1 : Position spatiale des limites géologiques sur la carte/ limites géographiques	Conception plaquiste	Conception continentaliste	total
V2 :L'explication présentant un rapport spatial			
Non lié à la dorsale	Catégorie1. G24 02	Catégorie3 G14, G23, G26, G25, G22 13	15
Lié à la dorsale	Catégorie2 G11, G21, G27. G12 13	Catégorie4 G13 02	15
Total des élèves	15	15	30

Tableau 6.7 Tableau de croisement des variables de la question 3 de la fiche

Le croisement des deux variables de la troisième question permet de repérer deux types de raisonnements majoritaires :

- Une conception plaquiste qui s'appuie sur une lecture géologique de l'espace à la surface de la Terre et qui subdivise la surface en des entités qui réunissent à la fois océans et continents. Le rapport qui existe entre les limites géographiques et les limites géologiques est lié à la dorsale. Le phénomène d'accrétion, en participant dans l'édifice des limites géologiques, sert à tracer les limites géographiques. Ce raisonnement utilise des éléments qui appartiennent au même registre spatial (l'espace géologique tectonique) ce qui lui offre une cohérence.
- Une conception continentaliste qui s'appuie sur une lecture géographique de l'espace à la surface de la Terre et qui subdivise la surface en océans et continents. Le rapport qui existe entre les limites géographiques et les limites géologiques n'est pas clair dans les réponses des élèves mais aussi il n'est pas lié à la dorsale. Il s'agit aussi d'un raisonnement cohérent.

3.1.5 Récapitulation de l'analyse du travail de la fiche

L'analyse précédente des productions des élèves en réponse aux trois questions de la fiche d'activité nous permet de constater les points suivants :

- La répartition géographique l'emporte sur la répartition géologique et représente une difficulté à raisonner dans un espace tectonique globale.
- La dorsale peut constituer un repère spatial dans le rapport qu'entretiennent les élèves avec l'espace tectonique.

- Lorsque l'élève ne possède pas une idée au préalable de ce qu'il va observer que ce soit microscopiquement ou bien sur le terrain dans une série sédimentaire par exemple, il peut voir l'objet sans le connaître. C'est ce qui se passe lors de la lecture de la carte du globe, en observant les répartitions des faits géologiques séismes, volcans et chaînes de montagnes. La simple observation faite sur la carte ne permet pas d'identifier facilement les plaques et leurs limites et donc ne permet pas de concevoir « l'espace tectonique ».

3.2 L'analyse de la discussion à la suite du travail de la fiche

Comme nous l'avons déjà mentionné au début du chapitre l'analyse de la discussion sera faite selon deux modes : Une analyse selon le mode de raisonnement adopté envers l'espace, il s'agit d'une étude de cas et une analyse de la forme des argumentations émises. Dans la discussion qui a eu lieu dans le premier groupe on a des élèves qui ont donné des propositions intéressantes mais ils étaient guidés avec l'aide de l'enseignant. Alors que dans le deuxième groupe la discussion met bien en jeu différents points de vue, qui se contredisent, expriment le doute et la problématique. Dans ce cadre d'analyse, nous avons choisi de schématiser certaines séquences argumentatives sous forme d'une structure argumentative dans la première et la deuxième discussion.

3.2.1 L'analyse selon le mode de raisonnement adopté envers « l'espace » (Etude de cas)

3.2.1.1 La discussion1 dans la première classe de troisièmes sciences

Cette discussion tourne autour des trois questions de la fiche d'activité. Ainsi que la subduction.

3.2.1.1.1 Le cas de Takwa Labben

- En réponse à la question1 de la fiche, que fait rappeler le professeur au début de la discussion (En comparant les répartitions des différents faits qu'est ce que vous avez constaté ?), Takwa présente une **conception continentaliste** de l'espace globale. L'espace est vu selon Takwa en océans et continents : il s'agit d'un espace de surface à

première vue observable sur la carte et dans lequel les continents se juxtaposent aux océans et ne forment pas ensemble une seule entité.

- Il s'agit d'un espace « géographique » défini par les limites géographiques et non pas par les limites géologiques. L'espace n'est pas fixe il est animé de mouvement des continents et donc variable extensible c'est-à-dire ayant la possibilité de s'agrandir.
- La répartition des faits géologiques à la surface du globe n'est pas le fruit du hasard mais c'est le fruit d'une relation de cause à effet qui relie les tremblements de Terre aux volcans et ces derniers à l'éloignement des continents en un enchaînement d'événements dont l'un provoque l'autre : (voir annexe 7)

1	<i>p</i>	<i>En comparant les répartitions des différents faits qu'est ce que vous constaté ?</i>
9	<i>Takwa</i>	<i>Les tremblements de Terre qui sont responsables des volcans et donc provoque l'éloignement des continents.</i>

- Lorsque le professeur demande si les répartitions des faits géologiques coïncident avec les limites des continents, Takwa change de conception continentaliste en conception plaquiste en assemblant l'Afrique à une partie de l'océan qui l'entoure. La subdivision de l'espace change on passe d'un espace dans lequel « continent » et « océan » se juxtaposent en un espace où le continent et l'océan forment ensemble une nouvelle entité géologique plus large.

20	<i>P</i>	<i>Est-ce que chaque continent est entouré par une chaîne de montagnes sous marines ?</i>
22	<i>Takwa</i>	<i>L'Afrique et l'océan ! une partie de Terre et une partie de l'océan sont délimitées ensemble !</i>

- En réponse à la question du professeur : « comment peut-on les appeler ? » (elle veut dire les nouvelles unités identifiées sur la carte du globe), Takwa s'est basée sur un transfert d'une discipline à une autre, en se référant au cours de géographie de l'année précédente (et qui est enseigné en langue arabe) dans lequel on a défini les plaques lithosphériques. Elle a mobilisé des acquis en géographie qu'elle transpose en sciences de la Terre. Ce recours au transfert du savoir dans sa réponse reconforte Takwa et la rassure dans la mesure où le cours de géographie a le statut d'une « autorité » pour

l'argumentation, et le changement conceptuel (de la subdivision en continents à la subdivision en plaques) se fait aisément.

30	<i>p</i>	<i>Comment on peut les appeler (en désignant les plaques sur la carte) ? dans quel partie du globe</i>
31	<i>Takwa</i>	<i>Madame ! dans le cours de géographie on les appelle des plaques lithosphériques (en arabe)</i>

- L'exemple qui illustre le mouvement des plaques pour Takwa se manifeste en l'expansion océanique. Takwa affirme l'existence du fait (le mouvement) par son résultat observé à la surface (l'expansion de l'océan), mais suppose l'existence d'un rapprochement des plaques qui compense l'éloignement. Takwa utilise l'expression « *Parce que l'expansion provoque la formation de croûte donc pour un équilibre, il faut obligatoirement un rapprochement.* ». Elle explique l'expansion océanique par un simple éloignement des deux plaques qui agrandit la distance de l'océan et n'explique pas l'expansion océanique par une création de matière lithosphérique. Dans son expression cet élève inscrit la Terre dans un dynamisme qui maintient l'équilibre à la surface du globe mais qui se résume en de simples mouvements antagonistes et non pas en terme de gain et perte de matière.

35	<i>p</i>	<i>Donnez un exemple de mouvement de plaque.</i>
39	<i>Takwa</i>	<i>L'expansion océanique</i>
40	<i>p</i>	<i>Quel est le résultat de l'expansion ?</i>
42	<i>Takwa</i>	<i>Oui ! l'élargissement des océans provoque de l'autre côté un rapprochement. Parce que l'expansion provoque la formation de croûte donc pour un équilibre, il faut obligatoirement un rapprochement.</i>

En définitive, ce que dit Takwa nous montre que, dans ce problème de plaques lithosphériques et limites de plaques il peut y avoir plusieurs utilisations de «l'espace» :

- une utilisation où l'espace est fixe inchangé du type continental/océanique, lorsque la lecture géographique de l'espace l'emporte sur la lecture géologique. L'espace continental/océanique qui permet de garder la structure et ne permet pas la création d'espaces nouveaux.
- une utilisation où l'espace est variable et change à la surface de la Terre, du type

tectonique (plaques lithosphériques), lorsque la lecture géologique de l'espace l'emporte sur la lecture géographique. Cet espace a de l'importance parce qu'il varie au cours du temps mais par un simple mouvement de rapprochement et d'éloignement de plaques.

Ce que montre également cet exemple, c'est que Takwa a passé par un changement conceptuel de « l'espace » remarquable du début à la fin de la discussion d'une conception continentaliste de l'espace vers une conception plaquiste de l'espace.

3.2.1.1.2 Le cas de HousseM Méjri

- En réponse à la question 1 de la fiche, que fait rappeler le professeur au début de la discussion HousseM ne passe pas par l'observation et la comparaison des différentes répartitions, mais il essaye de trouver une explication à une telle répartition. L'espace tectonique est représenté dans sa réponse par la dorsale un élément qu'il connaît déjà : observable sur la carte et qui a été étudié dans la séance précédente.
- La répartition des faits géologiques à la surface du globe n'est pas le fruit du hasard mais elle est due à la dorsale (**une relation de cause à effet**).
- HousseM donne l'exemple de « failles » comme fait géologique observable à la surface. L'élève raisonne en dehors du cadre de la géologie structurale (donc en dehors du cadre de l'espace tectonique globale) mais plutôt dans le cadre d'une géologie de surface (plis et failles). Il se limite à l'espace de surface. (voir annexe 7)

1	<i>p</i>	<i>En comparant les répartitions des différents faits qu'est ce que vous constaté ?</i>
5	<i>HousseM</i>	<i>La dorsale est responsable des déformations à la surface du globe comme les failles</i>

- Lorsque le professeur demande si les répartitions des faits géologiques coïncident avec les limites des continents, HousseM affirme qu'elles entourent les continents. Contrairement à ce qu'avance Takwa précédemment, HousseM dans sa réponse, néglige la partie océanique qui se trouve entre le rift et la marge continentale, (alors que Takwa l'a additionné au continent). HousseM ne fait pas une lecture détaillée de la répartition des faits géologiques sur la carte du globe et leur emplacement par rapport aux limites

géographiques, mais il voit la surface de la Terre sur la carte d'une manière générale en disant que les faits (séismes et volcans et déformations superficielles) entourent les continents, sans préciser si elles se collent aux marges continentales ou si elles se placent un peu plus loin dans l'océan. Le détail spatial n'est pas important, mais l'élève accorde une importance à la dorsale en l'utilisant comme repère dans l'espace ou comme cause qui fait varier l'espace géologique :

16	<i>P</i>	<i>Les répartitions des séismes, volcans et déformations superficielles coïncident elles avec les limites des continents ?</i>
19	<i>Houssem</i>	<i>Elles entourent les continents</i>

- une élève passe au tableau pour montrer la chaîne de la dorsale, elle montre du doigt l'Arabie saoudite. Cet exemple a déstabilisé la conception continentaliste chez Houssem. En fait, si les chaînes de montagnes sous marines entourent les continents comment ça se fait qu'elles entourent l'Arabie alors que Houssem est sûr que cette dernière ne représente pas à elle seule un continent :

20	<i>P</i>	<i>Est-ce que chaque continent est entouré par une chaîne de montagnes sous marines ?</i>
21	<i>Houssem</i>	<i>Elle est entourée par une chaîne et pourtant ce n'est pas un continent ! (en parlant de l'Arabie saoudite)</i>

- Cet exemple était intéressant dans le cas de Houssem car il a permis de créer chez lui une déstabilisation (dû à la confrontation avec un document), que le professeur a tenté d'accentuer en s'interrogeant sur la répartition à la surface (est-elle géographique). Mais Houssem résiste et a essayé de trouver une explication à ce cas qu'il voyait une exception à la règle dans un cadre continentaliste.
- Houssem présente une **vision géographique** de l'espace globale. L'espace est vu selon lui en océans et continents : il s'agit d'un espace de surface observable sur la carte et dans lequel les continents se juxtaposent aux océans et ne forment pas ensemble une seule entité. Il s'agit d'un espace « géographique » défini par les limites géographiques et non pas par les limites géologiques. La variation de l'espace continental est une

fonction de l'intensité volcanique, et comme la répartition des faits à la surface est due à la dorsale, alors c'est la dorsale qui participe à la naissance d'un continent. Un continent naît suite à une déchirure continentale. En effet il explique le fait que l'Arabie ne représente pas un continent car l'intensité de l'activité volcanique dans cet endroit est faible et donc elle n'arrive pas à créer une limite continentale.

23	<i>P</i>	<i>Est-ce nous sommes en présence d'une répartition géographique en océans et en continents ?</i>
24	<i>Houssem</i>	<i>C'est en fonction de la localisation des volcans et leur intensité que ce fait la répartition ! donc selon l'activité. Quand l'activité volcanique n'est pas intense on ne trouve pas une limite qui se crée, la Terre ne se déchire pas.</i>

- L'espace n'est pas fixe. Il est animé de mouvement des continents et donc variable extensible c'est-à-dire ayant la possibilité de s'agrandir. Houssem propose deux exemples de mouvements de plaques (il ne faut pas oublier que la notion de plaque a été imposée à Houssem dans la discussion) : les plissements et la dérive des continents.
- Pour les plissements, d'une part ils font partie de la géologie de surface, (marquant l'espace de surface) et d'autre part représentent une des conséquences du mouvement, observé à la surface et non pas le mouvement proprement dit. Par cet exemple on retrouve deux conceptions déjà rencontrées : une chez Houssem au début du débat : lorsqu'il donne l'exemple de failles et une chez Takwa lorsqu'elle explique les faits par leurs effets.
- La proposition de la dérive des continents comme exemple illustrant le mouvement des plaques, confirme la résistance de la conception continentaliste à changer.

33	<i>p</i>	<i>Puisque la plaque ne peut pas être continentale donc l'activité sismique et volcanique est au niveau de l'océan. Donc au niveau de la marge de la plaque. Est-ce que ces plaques sont stables ?</i>
34	<i>Houssem</i>	<i>Non ! en mouvement.</i>
35	<i>p</i>	<i>Donnez un exemple de mouvement de plaque.</i>
36	<i>Houssem</i>	<i>Les plissements</i>
37	<i>Walid</i>	<i>Le marais</i>
38	<i>Houssem</i>	<i>La dérive des continents</i>

En définitive, ce que dit Houssein nous montre que, dans ce problème de plaques lithosphériques et limites de plaques il est difficile de passer par un changement conceptuel sur « l'espace » lorsque les difficultés suivantes se présentent :

- Une difficulté à faire une lecture détaillée comparative et précise de « l'espace » directement sur la carte, et donc le détail spatial n'a plus d'importance.
- Une difficulté à dévaloriser les limites géographiques sur la carte par rapport aux limites géologiques.
- Une difficulté à faire un lien direct ou indirect entre l'expansion océanique et les limites géographiques.
- L'importance donnée à la dorsale, rétrécit l'espace tectonique à un seul élément (la dorsale). L'espace tectonique globale n'a plus d'importance.

3.2.1.2 La discussion² dans la deuxième classe de troisièmes sciences

Cette deuxième discussion se différencie de la première par le fait que le professeur a posé une question au début puis il n'intervient qu'à la fin de la discussion. Les élèves entrent en débat et c'est eux qui le mènent.

Nous remarquons qu'il existe des élèves qui ont parlé plus que d'autres et donc leurs conceptions sont les plus claires et représentent de bons exemples pour une étude de cas.

3.2.1.2.1 Le cas de Khawla

Khawla possède une conception plaquiste, elle utilise le concept de plaques dans son affirmation, l'espace globale est un espace géologique tectonique. L'espace n'est pas fixe il est animé de mouvement des plaques.

L'élève distingue les limites des plaques auxquelles se localisent les séismes et qui sont en relation avec le mouvement de plaques. (Voir annexe 8)

<i>I</i>	<i>p</i>	<i>Comment se répartissent les séismes et les volcans ?</i>
4	Khawla	<i>Lors des séismes les plaques bougent car les séismes sont dans les bords des plaques.</i>

Selon Khawla, les faits observables à la surface varient selon l'intensité du mouvement.

Pour Khawla, à une intensité donnée du mouvement on ne peut observer qu'un seul type de fait géologique à la surface, donc la diversité des faits géologiques revient à la variation de l'intensité du mouvement. Le mouvement a la possibilité de se réaliser dans les différentes directions de l'espace horizontal : écartement, rapprochement et frottement (pour dire peut être coulissement), elle évoque même la possibilité d'une subduction (un mouvement dans la direction verticale de l'espace). Cette élève propose un moteur au mouvement des plaques (les roches en fusion) d'une part, et d'autre par précise que la croûte est subdivisée en morceaux. L'élève raisonne dans ce cas sur l'espace vertical : en se dirigeant de la surface vers la profondeur en subdivisant le globe à la vertical en couches de nature différentes une croûte à la surface et de la matière en fusion en profondeur.

12	Khawla	<i>La croûte est subdivisée en morceaux. Les roches en fusion font bouger les morceaux. Le résultat est un écartement provoquant des volcans et les rapprochements donnent des séismes et le frottement simple provoque un petit tremblement alors que si une plaque monte sur une autre provoque un grand séisme</i>
----	--------	---

3.2.1.2.2 Le cas de Maïssa

La dorsale est un repère spatial, l'explication de l'existence des séismes et des volcans dans cet endroit ne se réfère pas aux limites géologiques ou géographiques mais elle est en relation avec l'énergie de la Terre. L'élève ne parle ni de continents ni de plaques. Les deux subdivisions n'ont rien à avoir dans la répartition des séismes et des volcans mais expliquent la répartition des chaînes de montagnes par la sédimentation qui se produit au niveau de la dorsale et qui augmente en allant de l'axe de la dorsale vers le continent.

On peut conclure que dans ce cas :

- La lecture de la carte ne sert à rien pour identifier l'espace. Pour une recherche d'une explication à une telle répartition, l'élève utilise des prérequis du chapitre précédent (la structure du globe Terrestre). (voir annexe 8)
- L'élève mobilise ses connaissances sur l'accrétion mais dans un contexte sédimentaire pour expliquer une répartition spatiale des chaînes de montagnes.

<i>I</i>	<i>p</i>	<i>Comment se répartissent les séismes et les volcans ?</i>
8	Maïssa	<i>Les séismes se produisent dans les mêmes endroits des volcans. Les endroits de déroulement des deux phénomènes sont plus aptes à obtenir l'énergie qui provient du noyau. Au niveau de la dorsale on rencontre les deux phénomènes les sédiments augmentent de largeur jusqu'à ce que les limites des sédiments se collent au continent ce qui explique la présence des chaînes de montagnes dans ces endroits donc la sédimentation qui est à l'origine des chaînes de montagnes »</i>

3.2.1.3 Récapitulation de l'analyse selon le mode de raisonnement adopté en vers « l'espace »

Nous avons choisi de faire une étude de cas dans l'analyse du mode de raisonnement adopté en vers « l'espace ». Après le dépouillement des différentes réponses des élèves nous avons identifié quatre cas d'élèves dont les propos renseignent sur quatre modes de raisonnement différents les autres élèves s'ancrent dans ces quatre catégories que nous résumons comme suit :

Les critères de l'entretien avec « l'espace »	Catégorie 3 Le cas de Khawla	Catégorie 1 Le cas de Takwa	Catégorie 2 Le cas de Houssem	Catégorie 4 Le cas de Maïssa
La répartition des séismes et des volcans	Varie selon l'intensité et le type du mouvement	un enchaînement d'événements dont l'un provoque l'autre	elle est du à la dorsale	en relation avec l'énergie de la Terre
La répartition des chaînes de montagnes	Complètement absente	Complètement absente	Complètement absente	Par la sédimentation
La subdivision de la surface du globe	conception « plaquiste ». elle utilise le concept de plaques	Au début une conception continentaliste	conception « continentaliste »	Complètement absente
		A la fin conception « plaquiste ».		
L'importance de la dorsale	La dorsale n'a pas d'importance spatiale	La dorsale est importante dans la création de l'espace	La dorsale est un repère spatial	La dorsale est un repère spatial
L'utilisation de « l'espace »	un espace géologique tectonique	Au début Il s'agit d'un espace « géographique »	Dans le cadre d'une géologie de surface : l'espace de surface. Il s'agit d'un espace « géographique »	L'espace de surface sédimentaire pour les chaînes de montagnes
		A la fin un espace géologique tectonique.		L'espace profond pour les séismes et les volcans

Tableau 6.8 Tableau récapitulatif de l'analyse selon le mode de raisonnement adopté en vers « l'espace »

Ce tableau récapitulatif des quatre cas de conceptions montre que le changement conceptuel de Takwa fait que sa conception présente des points en commun avec celle de Khawla d'un côté et celle de Houssem de l'autre côté. Lorsque l'élève utilise un espace géographique, il présente une conception continentaliste pour la subdivision de la surface du globe. Alors que lorsqu'il utilise un espace géologique, la surface du globe est subdivisée en plaques.

Si la répartition des séismes et des volcans se fait en fonction du type du mouvement et de son intensité, il est normal que la dorsale n'ait pas d'importance spatiale. Mais si la répartition des faits géologiques est la conséquence d'un enchaînement d'événements, et que ces événements se déroulent au niveau de la dorsale, il est logique que la dorsale ait une importance dans la création de l'espace. Cette même dorsale est un repère figé dans un contexte continentaliste ou lorsque la subdivision de l'espace est absente et ce qui est aussi logique. Il faut noter que ces raisonnements sont cohérents malgré qu'ils présentent un écart par rapport à la pensée scientifique.

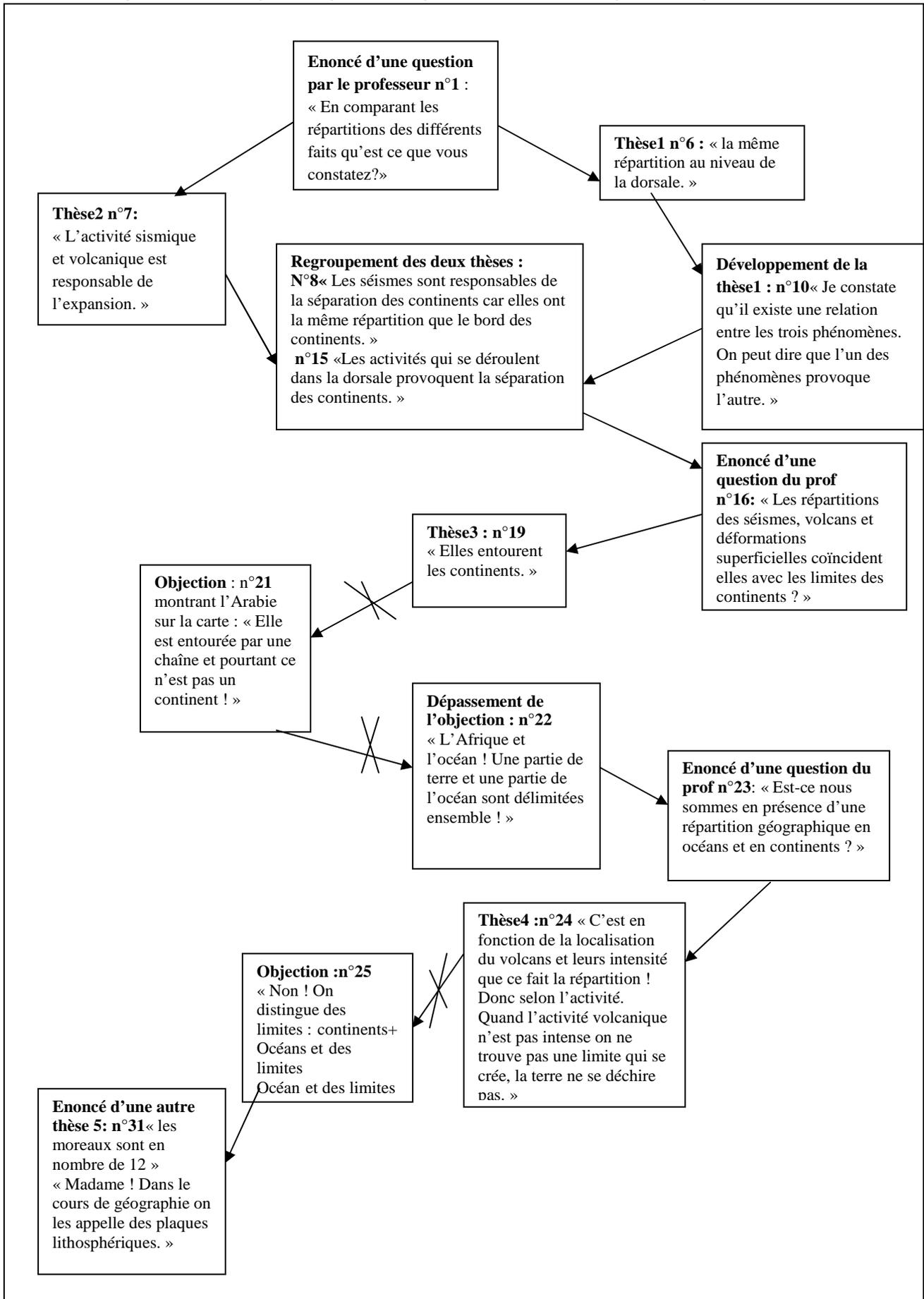
3.2.2 Argumentation et problématisation dans le débat

Dans le premier groupe, la discussion met bien en jeu différents points de vue malgré que cette discussion a été guidée par les questions que pose le professeur. En référence à Orange.C, Lhoste.Y et Orange.D (2007) sur l'argumentation, la problématisation et la construction de concepts en classes de sciences nous allons discuter les relations entre argumentation, problématisation et l'utilisation de « l'espace » au cours de la construction de concepts plaques et limites de plaques. Nous allons, selon le problème travaillé, présenter l'épisode en structure argumentative puis nous allons l'analyser pour construire les espaces de contraintes que construisent les élèves en réponse à un problème d'espace. Ces espaces de contraintes comparés aux espaces de contraintes construits par les scientifiques actuels vont permettre de mettre en évidence l'écart qui s'installe par rapport au savoir scientifique, et permettra donc de dévoiler les raisons qui sont responsables de cet écart et les difficultés qui apparaissent au cours du constructivisme au sein d'une situation problème.

3.2.2.1 Episode argumentatif sur la répartition des volcans, séismes et chaînes de montagnes à la surface de la Terre dans la première classe.

3.2.2.1.1 Structure de l'épisode1 : voir figure 6.3

Figure 6.3 : Structure argumentative de l'épisode1 sur la répartition des faits géologiques dans le premier débat (classe1) : transcriptions de n°1 au n°32. (Annexe 7)



3.2.2.1.2 Analyse de l'épisode 1 dans la discussion de la première classe

Le document 7.2 représente la structure de cet épisode. Dans une chronologie, représentée verticalement, sont indiquées les thèses discutées et leur développement face aux objections. Les flèches indiquent les relations argumentatives qui existent entre les différents éléments du débat ; quand elles sont barrées, ces relations sont d'opposition¹.

Ce premier épisode est composé de 32 interventions (1 à 32). (voir annexe 7)

En réponse à la question de départ, les thèses et les argumentations émises s'appuient d'une part sur une comparaison due à une lecture directe de la carte (thèse 1) et d'autre part s'appuient sur la nécessité de l'existence d'une relation entre ces répartitions et ce qui se passe au niveau de la dorsale (thèse2), ce qui permet d'envisager une conséquence au niveau de la surface de la Terre (l'éloignement des continents). Les élèves ont tendance à aller au-delà de la description comparative pour chercher une explication à ce qu'ils sont entrain de voir, pour eux le passage à un modèle explicatif s'avère nécessaire.

Nous remarquons qu'il y a un enchaînement dans l'argumentation de la thèse1 : les élèves partent de l'observation directe sur la carte, ils passent ensuite à émettre une hypothèse sur l'existence d'une relation entre ces répartitions. Ils proposent enfin une explication qui est basée aussi sur l'observation et la comparaison entre les bords des continents et les répartitions sur la carte du globe : « *Les séismes sont responsables de la séparation des continents car elles ont la même répartition que le bord des continents.* », en effet, les élèves comparent les répartitions aux bords des continents, cette similitude impose la nécessité d'une dérive continentale on retrouve dans ce cas la même conception wégenérienne qui prend comme point de départ l'argument géographique.

Jusqu'ici nous prouvons constater qu'il existe une difficulté chez ces élèves à se libérer de l'influence qu'imposent les limites géographiques dans la lecture de l'espace globale, et de voir au-delà de l'espace « continental » un espace plus élargi dans ses dimensions.

L'observation faite sur la carte représente dans un premier lieu un précurseur qui incite l'élève à émettre une hypothèse. L'élève essaye de confirmer son hypothèse, il fait intervenir l'observation à nouveau mais cette fois comme argument justificatif. Nous schématisons le raisonnement adopté par les élèves de la manière suivante :

¹ Orange.C, Orange.D, Lhoste.Y (version 2 mars 2007)

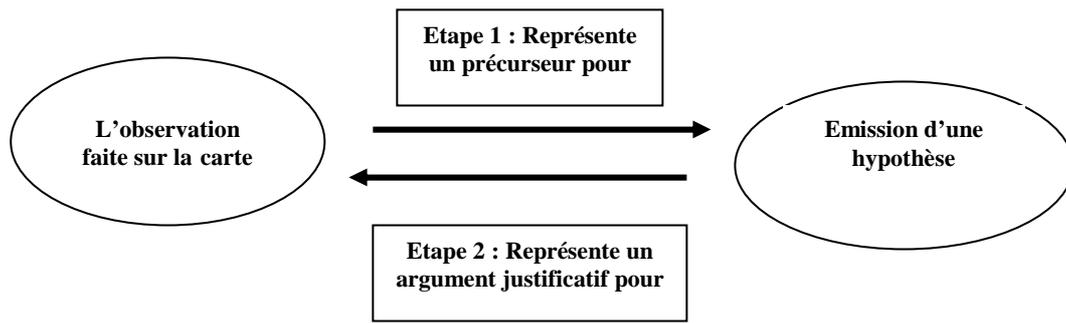


Figure 6.4 Le raisonnement adopté par les élèves dû à l'observation de la carte

Sous la forme d'une question n°1 « *Les répartitions des séismes, volcans et déformations superficielles coïncident elles avec les limites des continents ?* », le professeur remet en cause la relation qui existe entre les répartitions des faits géologiques et les limites des continents. Il semble que la valeur « d'objection » de cette question est importante puisque les élèves tentent de la dépasser en formulant la thèse³ : intervention n°19 « *Elles entourent les continents.* ». Une objection (due à la lecture de la carte du globe) est formulée suite à un doute de la validité de la thèse 3 : intervention n°21 « *Elle est entourée par une chaîne et pourtant ce n'est pas un continent !* ». L'élève cherche à valider la thèse³ en essayant de l'appliquer au morceau de l'Arabie Saoudite, ce qui fait apparaître le problème géologique celui de la subdivision de la surface du globe Terrestre, obéit-elle aux limites géographiques (subdivision en océans et continents) ou à d'autres limites.

Une controverse s'installe à ce moment là du débat et les argumentations qui seront proposées dans la suite vont s'organiser autour de ce désaccord. Le dépassement de l'objection représente un essai de recherche d'une thèse alternative permettant le passage d'une conception géographique « continentaliste » de l'espace globale vers une conception géologique « plaquiste » : intervention n°22 « *L'Afrique et l'océan ! Une partie de Terre et une partie de l'océan sont délimitées ensemble !* ». Cette objection va permettre à la fois une discussion critique du modèle de la subdivision géographique de la surface du globe mais également la proposition d'une thèse concurrente à la fin (thèse 5) de la subdivision en plaques lithosphériques.

La mise en discussion critique de la subdivision géographique de la surface du globe conduit à établir son impossibilité grâce à l'exemple type de l'Arabie saoudite proposé par l'un des élèves, ce qui rend la superposition des répartitions des faits géologiques aux limites continentales est incompatible avec le savoir que fournit l'observation directe sur la carte. Cette discussion critique, même si elle ne permet pas d'établir totalement le modèle de la subdivision en plaques lithosphériques par l'argumentation, elle mène vers l'impossibilité de garder la thèse « continentaliste » par un appel à un transfert d'un cours à un autre : intervention n°31 « *Madame ! Dans le cours de géographie on les appelle des plaques lithosphériques.* ».

Nous sommes ainsi en présence d'un épisode argumentatif riche, avec objections et contre objections, où deux thèses s'opposent : une thèse où les répartitions des faits géologiques coïncident avec les limites des continents, et une thèse, où la surface est subdivisée d'une autre manière selon les limites géologiques. Pour les tenants de la première c'est l'intensité sismique qui crée les limites continentales, ils formulent un modèle explicatif sans référence à aucune observation ; alors que les seconds partent de l'observation détaillée pour formuler leur thèse.

L'utilisation de la phrase « *La Terre ne se déchire pas* » montre bien que la conception de la dérive des continents résiste aux controverses. Cette partie du débat met donc en place un problème spatial très important.

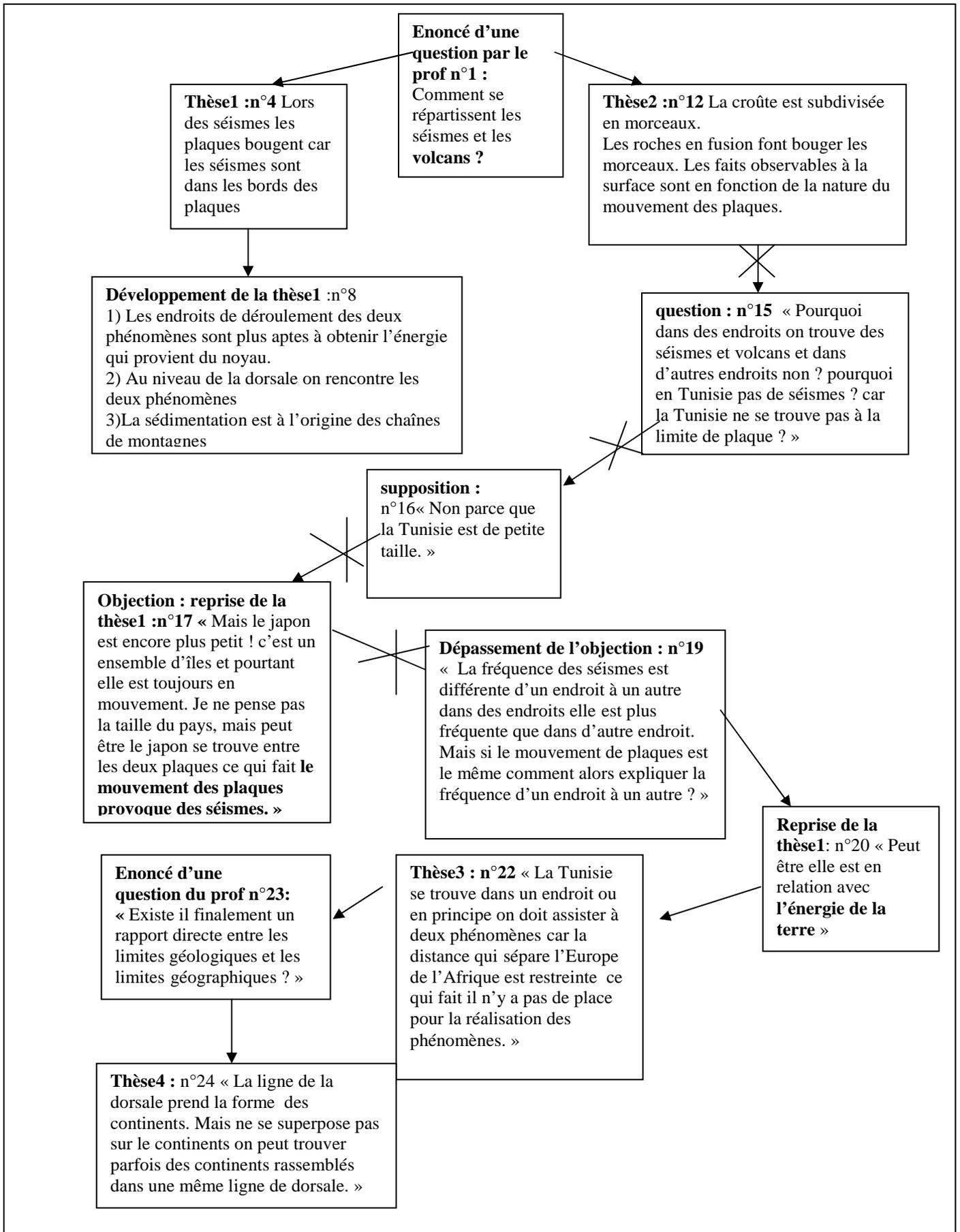
Les arguments échangés guident les élèves dans l'obligation de la délimitation du champ des possibles et met en place une problématisation scientifique.

Pour le travail de la problématisation de l'espace (la subdivision en plaques), nous relevons trois nécessités : la nécessité de la superposition des différentes répartitions des faits géologiques, la nécessité de la non correspondance entre ces répartitions et les limites géographiques et la nécessité des limites géologiques.

3.2.2.2. Episode argumentatif sur la répartition des volcans, séismes et chaînes de montagnes à la surface de la Terre dans la deuxième classe (voir annexe 8)

3.2.2.2.1 Structure de l'épisode 1 dans le débat de la deuxième classe

Figure 6.5 : Structure argumentative de l'épisode1 sur la répartition des faits géologiques dans le deuxième débat (classe2) : transcriptions du n°1 au n°28.



3.2.2.2.2 Analyse de l'épisode 1 dans le débat de la deuxième classe

Cet épisode est composé de 28 interventions.

Contrairement à ce que révèle le premier débat, en réponse à la question proposée par le professeur, les élèves utilisent dans leurs propos le concept « plaque ».

Les thèses et les argumentations émises ne se réfèrent en aucun cas à la comparaison faite à partir de la lecture directe de la carte mais elles représentent des modèles explicatifs, qui permettent d'envisager la nécessité d'un mouvement qui explique les répartitions des séismes des volcans et des chaînes de montagnes à la surface de la Terre. La lecture de l'espace en référence aux limites géologiques est totalement absente, mais la conceptualisation de l'espace tectonique est présente par le biais du concept « plaque » qu'ils utilisent dans leurs explications.

Dans la thèse¹ : intervention n° 4 « *Lors des séismes les plaques bougent car les séismes sont dans les bords des plaques* », les séismes sont en relation avec le mouvement des plaques, ils se trouvent au niveau des bords des plaques. Dans cette thèse les élèves localisent les séismes spatialement dans un espace tectonique subdivisé en plaques et donc un espace géologique différent de l'espace géographique.

Le développement de la thèse¹ permet de voir plus clairement la conception de l'élève. En effet l'élève localise les deux phénomènes (séismes et volcans) au niveau de la dorsale. Sachant qu'ils se trouvent au niveau des bords des plaques donc les dorsales se localisent entre deux plaques. L'énergie qui provient du noyau se localise aussi au niveau des dorsales lieux des séismes et des volcans : ce qui montre que la conception va dans le sens d'une conception de la tectonique des plaques. Mais dès que l'élève explique la formation des chaînes des montagnes par le phénomène de sédimentation, nous identifions une deuxième conception qui cohabite avec la première c'est la conception sédimentaire : intervention n°8 « *Les séismes se produisent dans les mêmes endroits des volcans. Les endroits de déroulement des deux phénomènes sont plus aptes à obtenir l'énergie qui provient du noyau. Au niveau de la dorsale on rencontre les deux phénomènes les sédiments augmentent de largeur jusqu'à ce que les limites des sédiments se collent au continent ce qui explique la présence des chaînes de montagnes dans ces endroits donc la sédimentation qui est à l'origine des chaînes de montagnes* »

A côté de la première thèse¹, une deuxième thèse² apparaît. Elle est en accord avec la première dans la subdivision de la lithosphère en plaques mais diffère de la première par

la cause du mouvement qu'elle propose : intervention n°12 «... *Les roches en fusion font bouger les morceaux.* »

La diversité des faits géologiques à la surface de la Terre est expliquée par la nature du mouvement des plaques : intervention n°12 « *La croûte est subdivisée en morceaux. Les roches en fusion font bouger les morceaux. Le résultat est un écartement provoquant des volcans et les rapprochements donnent des séismes et le frottement simple provoque un petit tremblement alors que si une plaque monte sur une autre provoque un grand séisme* ».

Une intervention en forme «de question» est formulée à la suite de la thèse2 recherche une explication au problème géologique celui de la répartition des séismes dans des endroits précis et non pas dans d'autres, en effet par cette question le problème qui a été évoqué au début et auquel les élèves n'ont pas répondu dans les deux thèses proposées, réapparaît de nouveau et le débat retourne vers le premier point de départ.

Un désaccord s'installe à ce moment là du débat. Un essai de recherche d'une thèse alternative permettant de trouver la cause d'une telle répartition spatiale des faits géologiques à la surface de la Terre dans un espace géologique « plaquiste ». Les élèves proposent la taille du pays comme cause pour l'absence de séismes dans certains endroits comme la Tunisie : intervention n°16 « *Non ! Parce que la Tunisie est de petite taille.* » On peut dire qu'implicitement pour l'élève, l'étendu de l'espace est une nécessité pour la réalisation des séismes. Une deuxième tentative pour la résolution de ce problème consiste à proposer l'emplacement géologique et non géographique du Japon entre deux plaques en mouvement qui explique la présence de séismes au Japon contrairement à la Tunisie : intervention n°17 « *Mais le Japon est encore plus petit ! C'est un ensemble d'îles et pourtant elle est toujours en mouvement. Je ne pense pas la taille du pays, mais peut être le Japon se trouve entre les deux plaques ce qui fait le mouvement des plaques provoque des séismes.* »

Dans ce cas il faut que les nécessités suivantes se présentent: la nécessité d'une subdivision en plaques, la nécessité d'un mouvement de plaques juxtaposées et la nécessité de la localisation du Japon dans l'espace « inter plaques ».

Cette deuxième tentative qui fait intervenir le mouvement des plaques dans l'explication des répartitions des séismes, installe les élèves dans une incertitude qui remet le mouvement des plaques en question en tant que facteurs responsable de telles répartitions : intervention n°19 « *Mais si le mouvement de plaques est le même comment alors expliquer la fréquence d'un endroit à un autre ?* ».

La réponse consiste à reprendre la thèse1 en proposant l'énergie de la Terre comme facteur responsable d'une telle répartition des faits géologiques.

Dans la troisième thèse 3 nous retrouvons la nécessité d'un espace étendu pour la réalisation des séismes tant que cet espace est restreint les séismes n'auront pas lieu. Nous pouvons dire que les élèves valorisent l'espace en fonction de la valeur des faits qui s'y produisent. C'est-à-dire si les élèves voient que le fait géologique qui se déroule est important, donc l'espace qui doit être attribué à la réalisation de ce fait doit lui aussi être important : intervention n°22 « *La Tunisie se trouve dans un endroit ou en principe on doit assister à deux phénomènes car la distance qui sépare l'Europe de l'Afrique est restreinte ce qui fait il n'y a pas de place pour la réalisation des phénomènes.* »

Le professeur remet en question le rapport qui existe entre les limites géologiques et les limites géographiques. La réponse dans une quatrième thèse montre que la ressemblance existe mais il n'y a pas de superposition : intervention n°24 « *La ligne de la dorsale prend la forme des continents. Mais ne se superpose pas sur le continents on peut trouver parfois des continents rassemblés dans une même ligne de dorsale.* »

Nous avons donc dans cet épisode un mouvement argumentatif qui établit des interactions entre les trois pôles de la discussion : les trois principales thèses étayées.

Une thèse1 (la répartition des faits géologiques est une fonction de l'énergie de la Terre) Une autre thèse2 (la répartition des faits géologiques est une fonction du mouvement des plaques) et une autre thèse 3 (la répartition des faits géologiques est une fonction de l'étendu de l'espace). L'argumentation fait des allers et retours entre ces trois thèses. Cette discussion critique ne permet pas de trancher clairement en faveur d'une thèse c'est-à-dire elle ne permet pas de « *justifier rationnellement la préférence pour une théorie prise dans un ensemble de théories concurrentes, à un moment donné ; c'est-à-dire en fonction de l'état présent de la discussion* » (Popper, 1991, p. 148).

3.3 Récapitulation de la problématisation dans les deux épisodes

Du côté de la problématisation, les deux groupes construisent des pensées semblables autour du problème de la répartition des faits géologiques à la surface de la Terre. Des conceptualisations proches sont en jeu (au niveau de la dorsale, autour des continents, sont la cause de l'énergie de la Terre...), mais à des degrés différents. Les deux cas de débat présentent un certain nombre de processus argumentatif identiques : développement de thèses, objections, proposition de thèse concurrente.

Cela montre l'implication des élèves dans le débat. Il faut noter que les différences identifiées entre les élèves pourraient être dues à différents points.

La différence qui existe entre l'une des élèves de la classe 1 et le reste des élèves, est que cette élève se réfère au cours de géographie et le transpose dans le cours de géologie pour argumenter, alors que les autres ne recourent pas au transfert du savoir dans leurs résolutions du problème de notion de plaques lithosphériques. Cette différence ne pourrait pas être due aux apprentissages scolaires ni à l'âge car ces élèves appartiennent à la même tranche d'âge et au même niveau scolaire donc obligatoirement ils ont vu le même cours de géographie, cette différence peut cependant être interprétée comme une aptitude que possède cette élève à la différence des autres à se détacher de la lecture géographique de l'espace globale et de supposer qu'il existe d'autres possibilités d'interprétation de l'espace dans un autre cadre de lecture possible tel est la lecture géologique. Mais le rejet de la conception initiale (la subdivision en océans et continents) et l'adoption de la nouvelle conception (la subdivision en plaques) ne s'est pas produit grâce à la problématisation, cette élève n'arrive pas à le faire au cours de la construction du savoir mais grâce au recours à des savoirs scolaires d'autres disciplines (cours de géographie). Ce savoir d'autorité réconfortant par son statut, permet de donner un modèle explicatif acceptable facilement par le reste du groupe (subdivision de la surface en plaques lithosphériques) sans le discuter et permet de l'établir comme nécessité. En contre partie **la problématisation a été bloquée** par ce recours au transfert du savoir scientifique scolaire.

Dans le premier débat, le concept de marges actives mais de types continentales est fortement critiqué. En effet, un doute de la localisation des séismes et des volcans autour des continents s'est installé suite à l'existence d'un contre exemple qui fait l'exception à la règle dans un cadre continentaliste : l'Arabie saoudite n'est pas un continent malgré l'existence de séismes tout autour. Ainsi un premier passage conceptuel se fait vers la subdivision non plus en deux ensembles différents : océans et continents mais plutôt en nouveaux morceaux formés à la fois d'océans et continents pour arriver à la fin à admettre une subdivision en plaques lithosphériques. Ce contre exemple (du fait qu'il est réel et directement observable sur la carte) a formé une sorte de résistance contre la subdivision en océans et continents, et rend possible la substitution de la conception continentaliste par la conception plaquiste au moins pour certains élèves. Dans le cadre de la conceptualisation, nous pouvons dire que le débat évolue en termes de rupture avec les

conceptions préexistantes caractérisée par un changement conceptuel de l'espace à la surface de la Terre : d'un espace géographique on passe à un espace géologique.

Dans ce cas la lecture adéquate de l'espace géologique sur la carte, la présence d'un contre exemple qui déstabilise les préconceptions concernant la subdivision de la surface du globe en océans et en continents, ainsi que l'argumentation en faveur de cet exemple, ont bien servi la problématisation.

Dans le deuxième débat, nous ne remarquons pas un changement conceptuel clair du fait que les élèves commencent le débat par l'idée que la lithosphère est subdivisée en plaques et que les faits géologiques séismes, volcans et chaînes de montagnes se localisent au niveau des limites de plaques et terminent par les mêmes idées. Il est vrai que certaines idées apparaissant au cours du débat sur la recherche d'une explication à la variation de l'intensité des séismes d'un endroit à un autre, et que cette question secondaire installe un doute sur la localisation des faits au niveau des limites des plaques (dans la mesure où au niveau des limites on devrait trouver toujours la même intensité sismique pour tout les volcans avec la même fréquence au cours du temps, alors que pour les élèves ce n'est pas le cas réel.) mais cette question reste suspendue. La difficulté à trouver une réponse convaincante satisfaisante pour cette question de deuxième ordre qui influence l'abandon d'une conception préexistante, fait qu'il n'y a pas eu de changement conceptuel et on retrouve la même conception de départ à la fin de l'épisode. Dans le cadre de la conceptualisation, nous pouvons dire que **le débat évolue dans une direction cyclique caractérisée par une constance conceptuelle.**

Un autre exemple, a été évoqué dans les deux débats concernant la question de la relation qui existe entre les faits géologiques (séismes, volcans, et déformations) et la dorsale d'un côté et les continents d'un autre côté telle qu'elle est discutée en classe de 3^{ème}. Pour une grande partie des élèves, la relation qui lie les faits à la dorsale (dans le cadre d'une vision géologique) ou aux continents (dans le cadre d'une vision géographique) se pense en termes de causes à effets: les séismes sont la cause des mouvements des continents Amel n°8 « *Les séismes sont responsables de la séparation des continents car elles ont la même répartition que le bord des continents* ». Les séismes sont la conséquence du mouvement des plaques : (abir n°11 épisode1 débat2) « *Donc il y a un mouvement des morceaux provoque la présence de séisme* » / (Khawla n°4 épisode 1 débat 2) « *Lors des séismes les plaques bougent car les séismes sont dans les bords des plaques* » / (Khawla n°12 épisode1

débat2) « le résultat et un écartement provoquant des volcans et les rapprochements donnent des séismes ». Dans tous ces exemples, les conceptions mobilisées font obstacle à la pensée scientifique. Si le mouvement des continents est considéré comme effet dû à l'activité sismique et volcanique cela est dû peut-être à **une survalorisation d'une vision géographique avec la difficulté à changer le cadre de description** ; en fait dès que l'ancien cadre de description devient impossible (par une mise en situation déstabilisante en évoquant l'exemple de l'Arabie) une modification conceptuelle s'installe par le changement du cadre de description géographique par un nouveau cadre géologique.

Certaines interventions telles que : Rihab 15 « Pourquoi dans des endroits on trouve des séismes et volcans et dans d'autres endroits non ? Pourquoi en Tunisie pas de séismes ? Car la Tunisie ne se trouve pas à la limite de plaque ? » / Manel 17 « Mais le Japon est encore plus petit ! C'est un ensemble d'îles et pourtant elle est toujours en mouvement. Je ne pense pas la taille du pays, mais peut être le Japon se trouve entre les deux plaques ce qui fait le mouvement des plaques provoque des séismes. » / Mayssa 22 « La Tunisie se trouve dans un endroit où en principe on doit assister à deux phénomènes car la distance qui sépare l'Europe de l'Afrique est restreinte ce qui fait il n'y a pas de place pour la réalisation des phénomènes. » montrent que les élèves sont impliqués dans le processus de la problématisation mais ils font des efforts pour construire un modèle explicatif cohérent et réconfortant pour la répartition des séismes et des volcans. Mais la présence de certaines idées entraîne les élèves dans des malentendus difficiles à résoudre du fait que ces idées font partie de la pensée commune et vont être mobilisées en tant que contraintes empiriques pour l'élaboration de modèles explicatifs scientifiques.

Les deux débats portent sur le problème de la répartition des faits géologiques à la surface de la Terre. Les différents éléments disponibles du registre empirique, en relation avec les savoirs visés sont présents, qu'ils soient donnés par la situation (par exemple, la création de la lithosphère au niveau de la dorsale, l'expansion océanique...) ou qu'ils fassent partie des connaissances communes des élèves (le volcanisme et généralement couplé au séisme, la ligne tracée par la dorsale représente la même allure que les bords des continents. La subdivision géographique en océans et continents). Ces deux débats peuvent se retracer en termes d'espace de contraintes (Orange 1999, Orange. D 2003) que nous allons essayer de tracer en se basant sur les nécessités (la nécessité d'une subdivision en plaques, la nécessité de la non correspondance entre ces répartitions et les limites géographiques et la nécessité de limites géologiques....), même si ces nécessités ne paraissent pas claires dans le

discours utilisé. Pour rendre compte de trois problématiques différentes d'élèves de 3^{ème} (deux problématiques dans le premier débat et une dans le deuxième débat) ; nous allons établir les espaces de contraintes construits au cours de cette étude du problème d'espace.

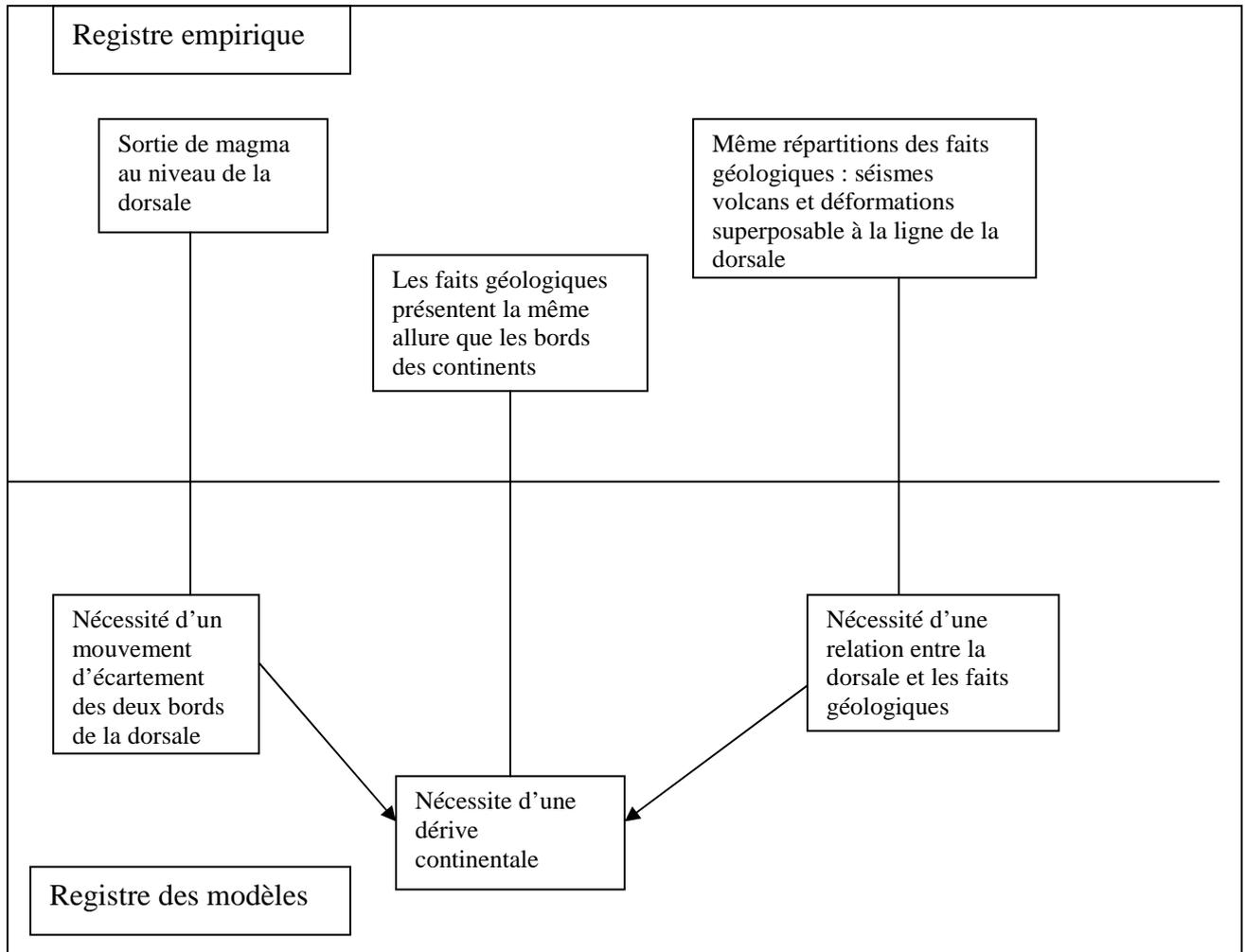
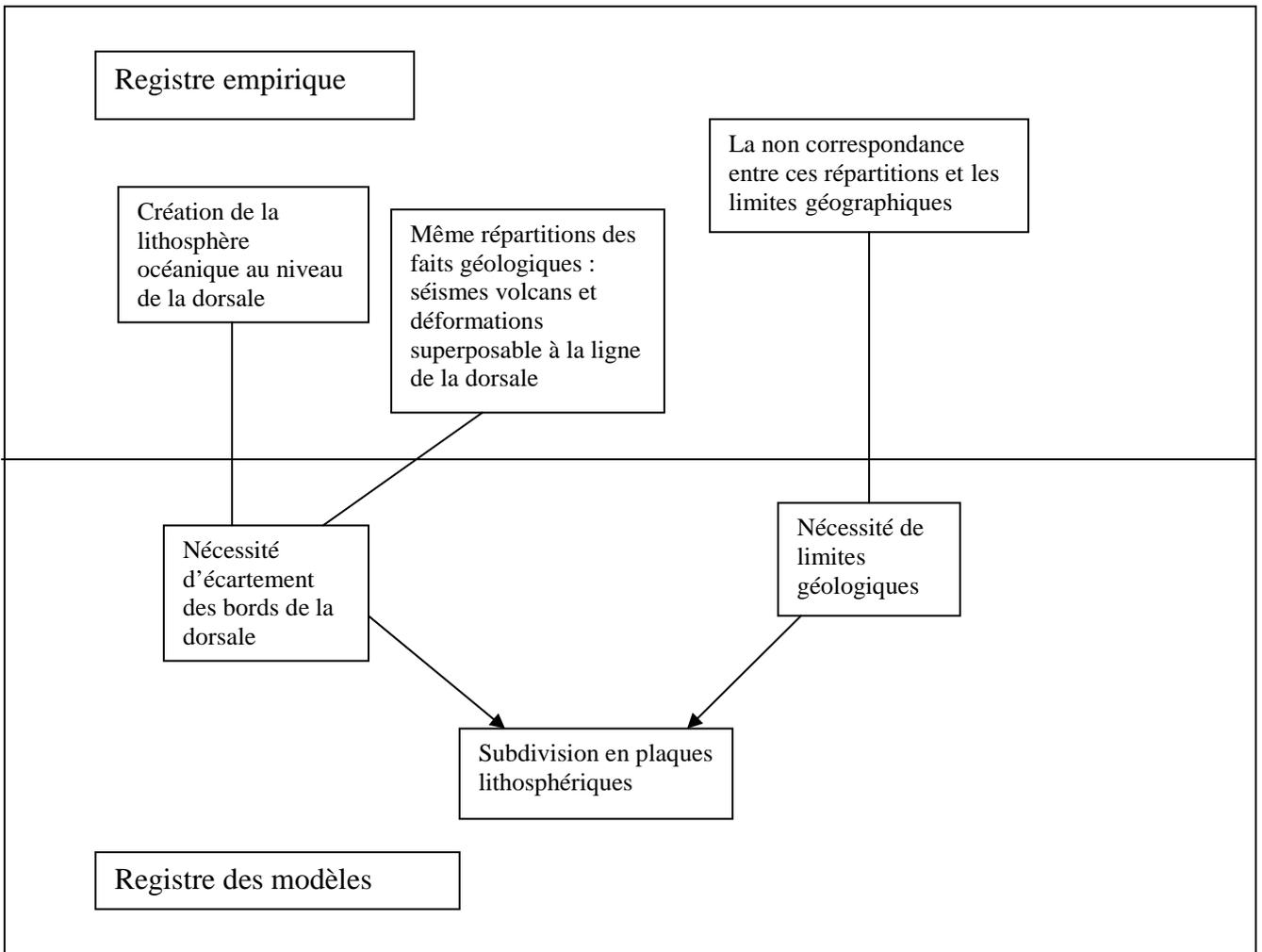
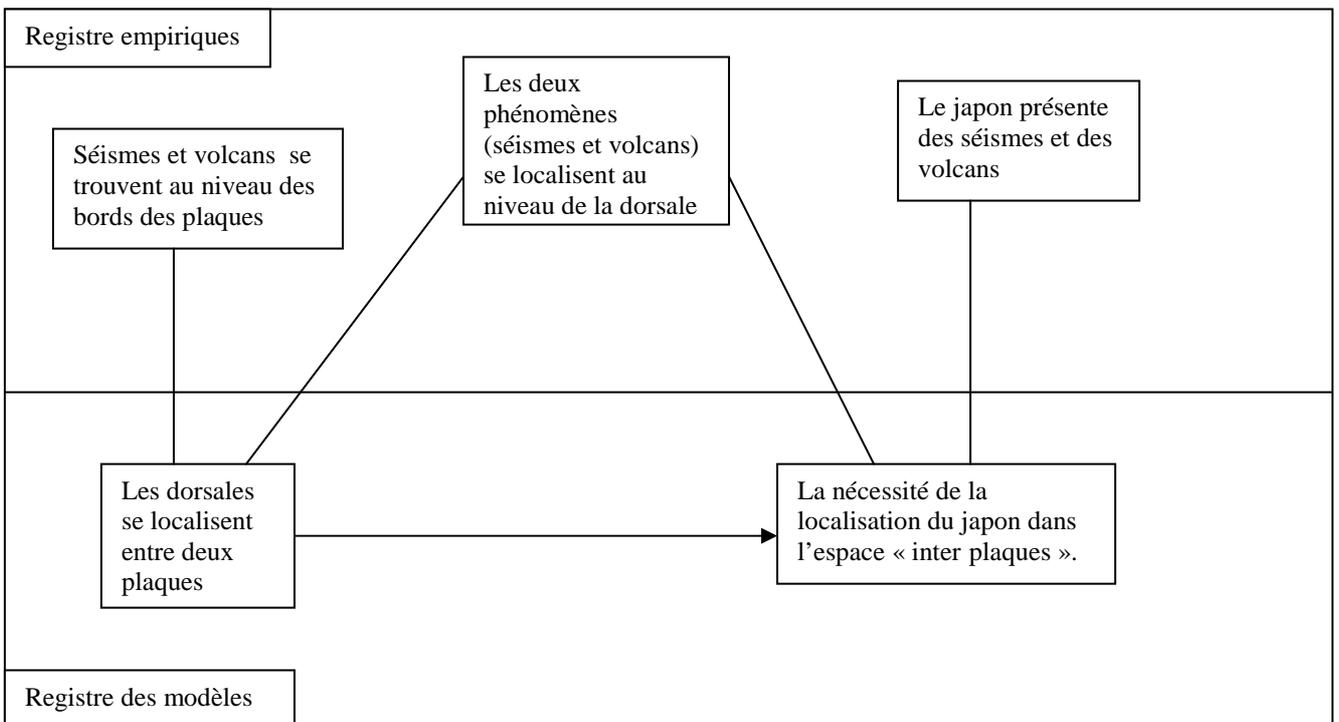


Figure 6.6 type 1 des espaces de contraintes construits au cours du premier épisode au premier débat : subdivision en continents



**Figure 6.7 type 2 des espaces de contraintes construits au cours du premier épisode du premier débat :
Notion de plaques lithosphériques**



**Figure 6.8 Les espaces de contraintes construits au cours du premier épisode du deuxième débat :
Notion de plaques lithosphériques**

4 Conclusion générale de la première étude

Dans cette première étude nous avons étudié un problème d'espace celui de la subdivision de la surface de la Terre en plaques lithosphériques. Cette étude nous a permis d'identifier l'utilisation de plusieurs figures d'espace par les élèves de 3^{ème} année sciences expérimentales lors de la problématisation. Les élèves ont évoqué l'espace géographique dans le quel s'inscrivent deux figures d'espaces : l'espace continental et l'espace océanique. Ils ont évoqué aussi l'espace géologique dans le quel s'inscrivent deux figures d'espaces : l'espace plaquiste et l'espace entre les plaques « inter plaques ». A côté de ces figures d'espace, les élèves évoquent l'espace sédimentaire lorsqu'ils essaient d'expliquer la présence de chaînes de montagnes comme faits géologiques. Ils évoquent implicitement l'espace profond souterrain et l'espace vertical, lorsqu'il parle de la sortie de magma à la surface au niveau de la dorsale. Ils utilisent aussi l'espace de surface et l'espace horizontal lorsqu'ils expliquent l'accumulation des sédiments en allant de la dorsale vers les marges des continents.

Nous constatons que les élèves arrivent à se construire certaines conjonctures spatiales au cours de la résolution d'un problème d'espace. Mais à côté de cela nous constatons l'absence de l'espace négatif (espace en voie de disparition au niveau des fosses) qui est lié à l'espace positif qui se crée au niveau de la dorsale cela pourrait être dû au fait que la subduction n'est pas encore étudiée par les élèves. Ceci explique aussi l'absence de l'utilisation de « l'espace cyclique » qui présente deux bornes une créatrice et une destructrice. Nous allons donc voir si ces figures d'espaces seront utilisées au cours de la résolution d'un problème de fonctionnement celui du mouvement des plaques.

Cette étude nous a permis aussi de constater que l'utilisation de l'espace au cours de la problématisation en sciences de la Terre est délicate pour les raisons suivantes:

- La lecture erronée des cartes de la surface du globe Terrestre à deux dimensions valorise les limites géographiques au dépendant des limites géologiques. La mise en valeur des limites géographiques ne permet pas d'identifier facilement les limites géologiques et ne permet pas ainsi de contribuer à un changement conceptuel. Ainsi s'installe la difficulté à changer le cadre de description de l'espace.

- L'espace est vu en terme de mouvement d'écartement d'entités (que ce soit plaque ou continents) et il n'est pas vu en terme d'espace crée (formation du planché océanique) et espace disparu.
- La mise en jeu d'une forme d'explication qui se focalise sur certaines structures (comme la dorsale) et certains phénomènes (l'expansion océanique) en marginalisant d'autres en principe de même importance (comme les rifts, les chaînes de montagnes et la subduction...) rétrécit l'espace tectonique en terme de conjoncture dans la représentation de l'élève et le limite à un seul élément : la dorsale créant ainsi **un réductionnisme spatial** qui fait que l'espace tectonique globale n'a plus d'importance il se résume en une dorsale.
- La focalisation faite sur l'explication des mécanismes (la naissance de la dorsale et l'expansion océanique), en se limitant aux enchaînements et aux contrôles, inhibe la mobilisation d'une vue globale de l'espace. La vue spatiale se concentre sur l'espace de réalisation de ces phénomènes.
- L'immensité de l'espace tectonique par rapport à l'espace dans lequel circule l'homme (le continent et l'océan et donc l'espace géographique) rend difficile la possibilité et la capacité de se détacher de cet espace « humain » et de se placer dans un espace plus large.

Deuxième étude
Problème de mouvement des plaques
Couple accrétion- subduction et courants
de convection

Chapitre 7

Mouvement des plaques et courants de convection

-Contenu scientifique et réflexion épistémologique-

Introduction

1. Le mouvement des plaques lithosphériques et les courants de convection
(Le contenu scientifique)
2. La géologie fonctionnaliste dans l'histoire de la construction du modèle plaquiste
3. Problématisation fonctionnaliste du mouvement des plaques chez les scientifiques actuels
4. Conclusion

Introduction

Après l'étude faite sur la problématisation de l'espace en partant de l'explication de la répartition des séismes et des volcans à la surface du globe pour aboutir à la construction de la subdivision de la surface de la terre en plaques lithosphériques dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques nous allons passer à l'étude de la problématisation du mouvement des plaques dans le même cadre précédent. En liaison avec ce qui précède, et en continuant dans la même logique de travail de recherche nous avons choisi comme problème de fonctionnement le mouvement des plaques et le moteur qui en est responsable. Ce passage de la problématisation de la subdivision de la surface du globe à la problématisation du mouvement des plaques et au moteur du mouvement est très intéressant dans la mesure où nous évoquons un problème d'espace et un problème de fonctionnement portant tous les deux sur la même entité géologique et qui s'enchainent dans une suite logique pour l'élève. Nous allons d'abord présenter le contenu scientifique à propos du mouvement des plaques et les courants de convection pour passer ensuite à une réflexion épistémologique dans l'histoire des sciences puis à la fin la problématisation des chercheurs suivie de la problématisation des élèves.

Le contenu scientifique que nous allons présenter ne porte pas sur tout ce qui a été dit par les experts en sciences de la Terre avec tout le détail du mouvement des plaques et de ses conséquences mais il se limitera aux différents types de mouvements et aux différentes structures qu'ils engendrent à la surface ainsi qu'au moteur responsable du mouvement des plaques à la surface.

1. Le mouvement des plaques lithosphériques et les courants de convection (le contenu scientifique)

1.1 Les différents types de mouvements horizontaux des plaques

Grâce à des outils géodésiques de grande précision (GPS, par exemple), disponibles seulement depuis peu de temps, les scientifiques ont démontré que la lithosphère n'est pas une enveloppe continue, elle est fragmentée et divisée en morceaux mobiles de plusieurs millions de kilomètres carrés appelés «plaques ». Leur nombre a varié (entre 12 et 15 plaques) au cours de l'histoire géologique. Les déplacements des plaques lithosphériques sont lents, quelques centimètres ou quelques dizaines de centimètres par an. Les phénomènes géologiques comme l'expansion océanique, la subduction,

l'orogénèse, servent pour définir les frontières de plaques. Une plaque est capable de transmettre les forces appliquées à ses limites; c'est donc principalement à ses frontières avec d'autres plaques que se produisent les phénomènes géologiques consommateurs d'énergie. On assiste à ces endroits à des fusions des terrains lithosphériques ou asthénosphériques donnant lieu à du volcanisme en surface ; le frottement entre plaques provoque des déformations (des plis, des failles, etc.) et des ruptures (des séismes). Ainsi peut-on dessiner la configuration actuelle des limites de plaques par une cartographie de l'activité géologique (principalement de l'activité sismique), qui est bien plus intense aux bordures des plaques que dans les régions « intra plaques ». On distingue trois mouvements horizontaux relatifs entre les plaques: Boillot G., Huchon, P & Lagabrielle. Y, (2000.p.14-20)

- **Le coulissement** bord à bord s'effectue avec la conservation de surface lithosphérique, le long de structures nommées «failles transformantes ». Ces structures forment un type de frontières, celui où les plaques coulissent l'une contre l'autre. Elles «transforment » donc un mouvement de convergence ou de divergence d'un lieu à l'autre. Les failles transformantes décrivent des arcs de cercle à la surface Terrestre, qui renseignent sur la trajectoire des deux plaques en contact. Les failles transformantes constituent ainsi des structures actives ; mais elles sont prolongées par des faisceaux de failles où le mouvement coulissant a cessé, et qui ne constituent plus des frontières de plaque. Boillot G., Huchon, P & Lagabrielle. Y, (2000.p.14-20)
- **La divergence** est l'écartement, perpendiculaire ou oblique par rapport à la frontière commune de deux plaques; il en résulte le phénomène de l'accrétion océanique par lequel se créent de nouvelles surfaces et de nouveaux volumes lithosphériques. La lithosphère étant rigide se déchire au cours de la divergence de plaque et L'asthénosphère a tendance à remonter vers la surface alors elle se refroidit très vite (du moins à l'échelle des temps géologiques), et se transforme en lithosphère, ce phénomène se déroule au niveau des rifts ou se forment des dorsales océaniques. La déchirure continentale conduit à une ouverture de l'océan. Elle intervient entre le stade «rift continental » et le stade «expansion océanique ». Chacun des demi-rifts devient alors une marge continentale passive. Les rifts continentaux forment à la surface du globe des reliefs et des creux allongés sur plusieurs milliers de kilomètres. Le rift, en surface, comprend un fossé

d'effondrement. C'est un lieu d'amincissement crustal et de subsidence active, souvent occupé par un bras de mer ou par un lac, parfois entièrement comblé par des sédiments. Boillot G., Huchon, P & Lagabrielle. Y, (2000.p.14-20)

- **La convergence** elle aussi perpendiculaire ou oblique par rapport à la frontière commune de deux plaques; qui implique au contraire une disparition de surface lithosphérique. C'est le phénomène de la subduction au cours duquel la lithosphère océanique plus dense que la lithosphère continentale plonge sous cette dernière et rejoint l'asthénosphère. C'est ainsi que disparaissent des surfaces océaniques. La lithosphère portant des continents flotte au contraire sur l'asthénosphère, parce qu'elle est moins dense qu'elle, et n'est donc en général pas affectée par le phénomène de subduction. Boillot G., Huchon, P & Lagabrielle. Y, (2000.p.14-20). La convergence de plaques contribue à l'apparition de différentes structures géologiques à la surface :
- **L'arc insulaire** actif est une guirlande d'îles, dont la croûte est le plus souvent de nature continentale, et qui porte de nombreux volcans actifs, nourris par la fusion partielle des roches du manteau. L'arc insulaire actif est séparé du continent par un bassin à croûte océanique, nommé « bassin marginal » qui s'ouvre et s'agrandit à la façon des grands océans.
 - **Les fosses océaniques** : ce sont des reliefs négatifs, dont la longueur est de l'ordre du millier de kilomètres, dont la largeur est d'environ 100km et dont la profondeur varie de 5 à 11km (la fosse de Japon) sont des frontières de plaques convergentes. Elles signalent des zones de subduction, zones où de la lithosphère océanique s'enfonce et se résorbe dans le manteau sous lithosphérique. Debeltmas J., Mascle G. (2000, p 143)
 - **Les chaînes de montagnes** : l'exemple caractéristique est celui de la cordillère des Andes à la bordure ouest de l'Amérique du sud, de la Colombie jusqu'au Chili, ce sont des reliefs positifs, lorsque la plaque chevauchante présente un bord continental, la marge continentale active est marquée par une chaîne de montagne longue et étroite. Ces chaînes de montagnes sont constituées de formations sédimentaires et de granitoïdes.
 - **Les arcs magmatiques** : qui se manifestent en surface en une chaîne de volcans comme la ceinture du feu du pacifique. Ces arcs peuvent être insulaires dans le cas où la plaque chevauchante est de nature océanique formant ainsi des archipels, d'îles

volcaniques alignées parallèlement à la fosse, comme ils peuvent être aussi, intégrés dans les chaînes de montagnes dans le cas où la plaque chevauchante est de nature continentale. Debelmas J., Mascle G. (2000, p. 148-150)

- **Les bassins arrière arc** : Ce sont des bassins sédimentaires qui se situent en arrière des arcs magmatiques. Debelmas J., Mascle G. (2000, p. 156)
- **Les prismes d'accrétion** : Quand s'enfonce une plaque océanique dans une zone de subduction, les sédiments qu'elle porte peuvent, selon les cas, être « avalés avec elle, ou bien être retenus en surface dans la zone frontière entre les deux plaques convergentes. En ce cas, la plaque chevauchante joue un peu le rôle d'une pelle mécanique qui pousse devant elle la Terre meuble pour découvrir la roche dure: il se constitue à son front un bourrelet de sédiments déformés et entassés les uns sur les autres, qui s'épaissit progressivement jusqu'à émerger localement. Ce bourrelet est nommé « prisme d'accrétion tectonique ». Une partie des sédiments reste adhérente à la croûte océanique, et la suit dans la subduction. C'est le « tégument ». L'autre partie, est décollée et reste en surface. Les sédiments situés au-dessus constituent alors des sortes « d'écailles » qui s'empilent et se redressent progressivement à mesure que de nouvelles écailles sont ajoutées à la base de l'édifice. La mobilité de ces écailles les unes par rapport aux autres est facilitée par une intense circulation de fluides sous pression dans les plans de failles et les surfaces de chevauchement. Debelmas J., Mascle G. (2000, p. 144-147)

Qu'elles soient transformantes, divergentes ou convergentes, les limites de plaques actuelles, coïncident avec des « ceintures sismiques ». Parmi ces ceintures, la plus large et la plus marquée est celle qui correspond aux frontières de plaques convergentes, dans les zones de subduction ou de collision. C'est là que les trois quarts de l'énergie sismique du globe sont dissipés.

1.2. Les mouvements verticaux de la lithosphère et l'équilibre isostatique

1.2.1 Le principe d'isostasie et l'équilibre isostatique local

Tout objet existant à la surface de la Terre est soumis à un champ de gravité terrestre. L'attraction exercée par le volume de cet objet dépend de sa masse et de son enfouissement (la profondeur). La gravité à la surface de la terre est constante en tout point de la surface en première approximation.

Ce ci nous renvoie vers une structure du globe en couches concentriques. Dans ce cas, deux objets se trouvant à une même profondeur, exercent des forces d'attractions égales. Or, la structure de la Terre n'est pas uniforme à ce point, les masses rocheuses existant au niveau du globe se répartissent sur de différentes profondeurs. A quelques kilomètres de la surface de la Terre et à profondeur égale la pression n'est pas forcément la même sous un continent et en plein océan du fait de la différence de densité entre croûte océanique et croûte continentale. Ainsi théoriquement la force d'attraction ne sera pas la même. Mais réellement la gravité est quasiment la même que ce soit au niveau du continent ou au niveau de l'océan. Il existe donc un système de compensation des différences de pressions et de densité qui fait que la gravité soit constante : c'est le principe de l'isostasie qui selon lequel il existe une surface de compensation, ou les pressions s'égalisent. Les lois de l'isostasie sont une simple application de la poussée d'Archimède : La croûte flotte sur le manteau plus dense. Ce dernier exerce une poussée sur les terrains crustaux. Pour émerger de l'océan et apparaître à la surface, une croûte en équilibre isostatique doit être épaisse d'au moins 30 km, elle est produite par la fusion partielle hydratée du manteau. La fusion anhydre produit en général une croûte mince (7 km) ; le Moho et les roches denses du manteau se rapprochent donc de la surface, ce qui implique une compensation isostatique superficielle par la tranche d'eau océanique légère. Boillot G., Huchon, P & Lagabrielle. Y, (2000.p.63-67)

1.2.2 Les mouvements verticaux de la lithosphère provoqués par les variations de l'épaisseur crustale

Par rapport à un continent d'altitude zéro, où la croûte est épaisse de 30 km, la croûte est épaissie sous la chaîne de montagnes formant une racine crustale alors qu'elle est amincie au niveau des bassins.

1.2.2.1 L'épaississement de la croûte.

Ce phénomène se produit par plissement suite à un raccourcissement horizontal, par chevauchement de deux fragments lithosphériques au moment de la subduction puis la collision, par magmatisme dû à la fusion partielle des péridotites ou encore par l'addition de nouvelles roches crustales à la base de la croûte (formées par la cristallisation des magmas produits par la fusion partielle des péridotites, sous forme de gabbro). Les reliefs qui en résultent, suivent les frontières des plaques en formant des chaînes de montagnes

allongées comme elles : par exemple, la Cordillère des Andes et la chaîne himalayenne. Boillot G., Huchon, P & Lagabrielle. Y, (2000.p.69-70)

1.2.2.2 L'amincissement de la croûte

L'un des facteurs destructeur des reliefs est l'érosion qui se déroule à un rythme lent de l'ordre de quelques millimètres par an. Sur des millions d'années, ce phénomène peut aboutir à l'amincissement de la croûte. Une grande partie du relief détruit est donc reconstituée par un soulèvement régional et par la migration du Moho vers le haut, selon le principe de l'isostasie. L'étirement horizontal de la croûte entraîne à la fois une remontée du Moho et la naissance d'une dépression qui se remplit d'eau puis de sédiments et continue à se creuser sous l'effet de la surcharge. Le bassin résultant de l'amincissement d'une croûte continentale soumise à extension horizontale est nommé rift continental. Le mouvement vers le bas du fond du bassin est nommé subsidence. Boillot G., Huchon, P & Lagabrielle. Y, (2000.p.71-72)

1.2.3 Les mouvements verticaux de la lithosphère provoqués par son état thermique et son épaisseur

La lithosphère subit un échauffement régional associé à du volcanisme, sa densité diminue et son volume augmente de 1%. La surface de la lithosphère se soulèvera à pression constante. Cette légère augmentation de la température lithosphérique, se manifeste en surface par un flux thermique un peu plus élevé que la normale. Inversement, le refroidissement de la croûte provoque un accroissement de la densité lithosphérique moyenne et entraîne donc un abaissement. Boillot G., Huchon, P & Lagabrielle. Y, (2000.p.73-77)

1.2.4 Les mouvements verticaux de la lithosphère provoqués par son élasticité

À cause de l'élasticité de la lithosphère superficielle, l'équilibre isostatique local n'est pas respecté. En revanche, l'équilibre est rétabli à l'échelle régionale grâce au fluage en profondeur de l'asthénosphère et de la lithosphère ductile. Ce type de mouvement est en général d'ampleur limitée, de l'ordre de millier de mètres et peuvent ainsi participer à la naissance des reliefs à la surface du globe. Boillot G., Huchon, P & Lagabrielle. Y, (2000.p.77-78)

1.3. Moteur du mouvement des plaques

1.3.1. Origine de la chaleur Terrestre

La température Terrestre augmente avec la profondeur de l'ordre de 30° par Km dans la partie supérieure de la croûte continentale, moins rapidement plus bas. Un flux de chaleur qui provient de la profondeur s'échappe vers la surface. Les géologues et les géophysiciens ont distingué plusieurs origines à ce flux de chaleur :

- Une partie de cette chaleur revient à l'époque où la Terre est formée.
- Une partie est due au processus de cristallisation du nickel au niveau du noyau.
- La plus grande partie est due à la radioactivité dans les enveloppes silicatés croûte et manteau. Westphal. M., Whitechurch.H & Munsch. M. (2002, p.81)

1.3.2 évacuation de la chaleur Terrestre par convection

Il existe deux modes de transmission du flux de chaleur vers l'extérieur :

- La conduction : Le transfert de chaleur d'une surface chaude vers une surface froide par contact direct entre ces deux dernières.
- La convection est le passage de la chaleur vers la surface grâce à des courants qui se déplacent entre un fond chaud et une surface plus froide c'est ce qui se passe au niveau de l'asthénosphère, un milieu solide mais suffisamment ductile, l'évacuation de la chaleur se fait par convection mais à une vitesse très lente. Westphal. M., Whitechurch.H & Munsch. M. (2002, p.83)

1.3.3 Courants de convection dans l'asthénosphère

L'évacuation de chaleur vers l'extérieur est due à de lente convection dans les roches du manteau, dans l'asthénosphère la convection se produit à des profondeurs entre 150 et 700km et influe sur l'évolution de la lithosphère sus-jacente. La chaleur terrestre, en s'évacuant vers la surface provoque des déplacements de matière très lents mais incessants, en particulier celui des plaques lithosphériques. Il s'agit ainsi d'une transformation de la chaleur en profondeur en mouvement à la surface. Le mouvement comme nous l'avons décrit en haut est de trois types : mouvement de convergence, de divergence et de coulissement.

D'autre part, qu'ils soient divergents ou convergents, les mouvements des plaques retentissent sur ceux de l'asthénosphère. Parce que celle-ci est chauffée à sa base et perd de la chaleur à son sommet au contact de la lithosphère, les axes des principales cellules de convection y sont horizontaux. Il est vrai que les géophysiciens hésitent encore sur la forme de ces cellules, qui peuvent, selon les époques géologiques, se répartir sur un ou deux étages. Mais de toute manière, les mouvements lithosphériques et asthénosphériques sont couplés. Les zones où divergent sous la lithosphère les cellules de convection asthénosphérique correspondent ainsi aux frontières de plaques divergentes (les dorsales océaniques), tandis que les zones où elles convergent sont associées à la convergence et à la subduction des plaques. Westphal. M., Whitechurch.H & Munschy. M. (2002, p.183-200)

Après avoir présenté le savoir scientifique actuel sur le mouvement des plaques et les courants de convection qui sont responsables de ce mouvement, nous allons passer à une réflexion épistémologique sur la notion du mouvement des plaques dans l'histoire des sciences de la Terre et dans un cadre fonctionnaliste.

2. La géologie fonctionnaliste dans l'histoire de la construction du modèle plaquiste

Depuis le début du 17^{ème} siècle et jusqu'au 19^{ème} siècle, les changements à la surface de la Terre sont restés peu connus mais cela n'empêcha pas qu'il y eut d'une manière indirecte des estimations et des propositions de modèles au cours de l'histoire. En effet, les études faites sur l'origine des espèces se sont intéressées à l'histoire géologique. Sténo (1638-1686) énonce les bases de la stratigraphie en discutant l'origine des espèces, il rompt avec les conceptions bibliques et écrit une histoire de la géologie en y décrivant les phases tectoniques et en citant les événements géologiques. Il intègre la dynamique et la classification des ensembles géologiques. Hooke (1635-1703) a été le premier à affirmer que certaines structures géologiques ont disparu en attribuant ces disparitions à des changements brutaux qui ont lieu à la surface du globe. Buffon (1707-1788) publie en 1749 une histoire de la Terre, il réédite son ouvrage trente ans après en introduisant une conception cyclique des événements. Il estime l'âge de la Terre à plus de 75000 ans en évaluant l'épaisseur des sédiments déposés depuis le début des temps géologiques. Il affirme que les continents devraient se séparer pour expliquer la répartition de certaines

espèces paléontologiques. Buffon et Linné (1707-1778), ont tenté de classer les espèces. Par la suite Lamarck (1744-1829) et surtout Cuvier (1769-1832) élaborent les bases de la paléontologie. Pour expliquer l'apparition et la disparition des espèces, Cuvier développe la notion de cycle en sciences de la Terre, chaque cycle se termine par une catastrophe naturelle. Elie de Beaumont (1798-1874) propose que les phases catastrophiques soient liées aux phases tectoniques lors du soulèvement des chaînes de montagnes Westphal. M., Whitechurch.H & Munschy. M. (2002, p.10,11). A côté des études faites sur l'origine des espèces, d'autres études se sont rapportées à l'explication de la formation des océans et des chaînes de montagnes. Certaines explications représentent des thèses fixistes stationnaristes, d'autres translationnistes ou mobilistes. De même, dans certaines de ces thèses rencontrées dans l'histoire, nous ne trouvons pas des mécanismes explicatifs du mouvement et donc nous ne pouvons pas les considérer toutes du ressort de la géologie fonctionnaliste. (D. Orange 2003)

2.1.Le modèle de l'effondrement

Le philosophe anglais Francis Bacon, en 1668, pour expliquer la formation de l'océan Atlantique par l'effondrement d'un bloc de la partie centrale d'un continent appelé Atlantide après le déluge entraînant l'apparition d'un continent à l'ouest. Nous retrouvons la même idée chez Alexandre de Humboldt, en 1810 il propose aussi l'effondrement comme la solution au problème de la continuité des chaînes primitives parallèles à l'équateur, et le creusement d'une « vallée » provoquée par l'érosion aquatique, ce qui explique la formation de l'océan atlantique. Néanmoins, la naissance de l'océan atlantique cette fois ci a un caractère répétable dans le temps et dans l'espace et de ce fait il lui attribue le statut de phénomène. Cette explication révèle de la géologie fonctionnaliste.

Antonio Snider-Pellegrini, en 1858, reprend le modèle de Bacon et émet l'hypothèse que la Terre a passé par une phase de refroidissement et de cristallisation, entraînant la formation des continents mais d'un seul côté de la Terre, à partir d'un bloc en fusion. La répartition inégale des masses continentales à la surface terrestre provoqua une instabilité dans l'équilibre terrestre, ce dernier est réparé **par le déluge** qui provoqua une gigantesque cassure fractionnant le continent originel et forma les blocs qui se sont écartés en se répartissant d'une manière plus équilibrée à la surface de la Terre. Snider-Pellegrini ne propose aucun fonctionnement permettant l'écartement et la répartition des continents à

la surface de la Terre mais il convoque une cause brutale (le déluge) pour expliquer les dispositions actuelles. Il raisonne ainsi en dehors du cadre fonctionnaliste.

La conception de l'effondrement continue à être adoptée par d'autres géologues tels que Marcel Bertrand qui, en 1887, affirme lui aussi que l'Amérique du Nord et l'Europe formaient autrefois un seul continent qui s'est effondré en son centre pour constituer l'Atlantique. L'unité des deux blocs continentaux est démontrée par le prolongement des chaînes européennes (chaînes calédonienne, hercynienne et alpine) sur le continent américain. Néanmoins, **le modèle de l'effondrement a été réfuté car ce modèle théorique n'arrivait pas à répondre à la possibilité de l'existence d'un manteau de nature différente par rapport à l'écorce Terrestre.** (Gohau G, 1990, p239-240).

2.2. Le modèle contractionniste

Pour Suess (1831-1914), la Terre a passé par une phase de refroidissement et de solidification qui a provoqué sa contraction à la manière d'une pomme ridée. Cette contraction a provoqué aussi des mouvements crustaux à la surface de la Terre, entraînant des affaissements accompagnés par deux sortes de mouvements horizontaux : des mouvements compressifs à l'origine des reliefs et des mouvements distensifs à l'origine des effondrements (Gohau, 1987, p. 198). Par le modèle contractionniste, Suess explique toutes les structures qui existent à la surface du globe et relie la formation des chaînes de montagnes à celle des océans (Hallam, 1976, p. 22) on dirait que le phénomène obéit à un cycle. Ces mouvements crustaux qui peuvent échanger continents et océans à chaque fois qu'ils se produisent, placent la thèse de Suess dans un cadre fonctionnaliste. **Mais cette thèse suppose que la croûte Terrestre est de même nature en tout point de la surface du globe ce qui la rend fragile devant le modèle translationniste.**

Ainsi à la fin du 19^e siècle et au début du 20^e siècle, ce modèle met l'accent sur des mouvements verticaux et **nécessite un seul type de croûte.** Il explique la formation des chaînes de montagnes par des mouvements horizontaux compressifs. **Si on le compare au modèle actuel, il ne met pas en jeu les mêmes processus dans l'explication de l'affaissement.** Au début du 20^e siècle, les données gravimétriques remettent en question la nature des fonds océaniques et les types de mouvements de la croûte possibles proposées par Suess (Hallam, 1976, p. 25), et remettent en question la nature de la croûte (on distingue deux types de croûtes de natures différentes : une croûte océanique basaltique et une croûte continentale granitique dans sa partie superficielle et basaltique

dans sa partie profonde). La théorie de l'isostasie issue des travaux d'Airy (1801-1892), de Pratt (1800-1871) et de Dutton (1841-1912) remet en question le modèle de Suess concernant les affaissements des blocs continentaux qui deviennent impossibles dans le cadre de l'isostasie. En effet, les continents plus légers flottent sur une couche visqueuse plus dense, leurs mouvements verticaux répondent au le principe d'Archimède. Ils peuvent être vers le haut (des soulèvements) ou vers le bas (des enfoncements). Seule donc une surcharge (sédimentaire ou glaciaire) peut expliquer un enfoncement continental.

2.3. Le modèle translationniste

Ce modèle éclo avec Fisher (1817-1914), en 1881 il remet en question la théorie de la contraction de la croûte Terrestre qui explique la formation des chaînes de montagnes et attribue leur genèse à « des mouvements tangentiels ». Il est le premier à proposer une explication aux mouvements de translation des continents, en proposant le moteur de la dérive des continents. Ce sont des courants existant à l'intérieur de la Terre, qui remontent sous les océans et redescendent sous les continents.

Fisher raisonne dans le cadre d'une géologie fonctionnaliste, il explique la structure externe de la surface du globe Terrestre **par la nécessité d'un fonctionnement qui représente le moteur du mouvement de translation.**

Dans un contexte de controverse sur l'organisation et le fonctionnement de la partie superficielle du globe (Gohau, 1990b, p. 240-241), Alfred Wegener (1880-1930), reprend la conception translationniste de Fischer sous la thèse de la dérive des continents. Cette thèse défend l'idée essentielle du mobilisme et explique que les continents se fragmentent, dérivent sur des milliers de kilomètres à la manière de radeaux sur l'eau, et entrent en collision. A la différence de Suess qui distribue les océans et les continents grâce à des mouvements verticaux, Wegener les distribue par des mouvements horizontaux. Les conditions d'un tel mouvement des continents constituent un point de controverses.

En effet, les détracteurs se sont basés dans la justification de leur rejet sur les arguments invoqués par Wegener pour rendre compte des mouvements des continents : l'intensité des forces supposées est bien trop faible, la résistance du sima bien trop forte pour permettre un déplacement appréciable des continents. En effet l'un des négateurs absolus de la dérive des continents, Harold Jeffrey (1891-1989) calcula que les forces supposées ont une

amplitude $2,5 \cdot 10^5$ fois trop faible pour mouvoir et déformer les blocs continentaux et pour lui la théorie des translations est hors de question.

A. Holmes (1890-1965) s'interroge sur l'évacuation de la chaleur centrale radioactive à la surface de la Terre. Pour l'expliquer, il propose en 1929 l'existence de courants de convection dans le manteau qui est supposé de nature fluide et qui se situe sous l'écorce. Cette thèse ajoute de la nouveauté par rapport à la théorie de la dérive des continents qui permet de soutenir les idées de Wegener dans la mesure où elle offre à la translation continentale un mécanisme logique et convaincant. En effet, les courants de convection sont ascendants sous les continents et provoquent de ce fait leur éclatement et la création de croûte océanique nouvelle dans l'espace créé entre les morceaux disloqués. Mais par ailleurs il existe des zones de compression, là où les courants de convection deviennent descendants et s'enfoncent en profondeur en prenant avec eux une partie de la croûte océanique vers le manteau et se manifestent en surface sous la forme de fosses océaniques profondes. Le modèle de Holmes nous rappelle celui de Lyell où les causes fonctionnent dans une évolution cyclique pour maintenir la stabilité de la Terre. Holmes raisonne dans un cadre fonctionnaliste.

2.4. Le modèle plaquiste

Il fallait attendre les études sur le paléomagnétisme des roches de Keith Runcorn et de Ted Irving pour qu'elles éclaircissent la recherche en 1954, et **montrent que la position du pôle de rotation n'est pas fixe à la surface du globe mais qu'elle a évolué au cours des temps**. Cette migration polaire n'est pas identique lorsqu'elle est déterminée par rapport à l'un ou l'autre des continents mais les écarts sont annulés si l'on suppose un mouvement relatif entre les blocs continentaux. Il s'agit ainsi de « preuves » des translations continentales et surtout elles permettent de reconstituer les dérives avant les 200 derniers millions d'années, dérives qui ont représenté des lacunes qui ont joué un grand rôle dans le rejet de la théorie de Wegener. Les mesures bathymétriques ont aidé à découvrir les dorsales médio océaniques, les fosses sous marines et les zones de fractures. Les prélèvements de roches effectués au niveau du plancher océanique ont montré que les continents sont composés de granites alors que le plancher océanique est composé de basalte, le basalte et les sédiments sus-jacents deviennent progressivement plus anciens en s'éloignant de la dorsale. Le basalte du plancher océanique est considérablement plus jeune que les continents, on ne trouve aucun échantillon de plus de 200 millions d'années, ce qui

contraste avec des âges maximums de 3 milliards d'années pour les roches continentales. Les mesures de flux de chaleur du plancher océanique ont montré que la température était la plus élevée au niveau des dorsales et diminue progressivement en s'éloignant de ces dorsales. Les cartes des anomalies magnétiques des fonds marins révèlent une structure en « peau de zèbre » des plus étranges, elles présentent des bandes symétriques parallèles aux dorsales. Cette observation était une des plus étonnantes de toutes. L'observation des répartitions des séismes et des volcans à la surface du globe Terrestre (La carte de la répartition des séismes établie par Beno Gutenberg et Charles Francis Richter en 1954) additionné à hypothèse de l'expansion des fonds océaniques ont contribué à la genèse de la théorie de la tectonique des plaques.

En effet on a remarqué que les chaînes de montagnes et les volcans se répartissaient suivant des bandes et que les séismes étaient regroupés dans des régions bien déterminées du globe correspondant aux dorsales, aux fosses, aux failles transformantes et aux chaînes montagneuses. Les séismes étaient limités à la partie superficielle du globe (la lithosphère couche à comportement rigide, qui surmontait l'asthénosphère, couche à comportement ductile), à une profondeur inférieure à 100 km (A l'exception des fosses où les tremblements de Terre, existaient jusqu'à 700 km de profondeur). Wadati en 1930 et Bénéioff en 1955 avaient remarqué que les séismes profonds situés sous les fosses se localisaient suivant des plans inclinés.

La conception mobiliste triompha de nouveau mais dans un autre cadre tout à fait différent de la théorie de la dérive des continents dans la mesure où contrairement au modèle de la dérive des continents, ce modèle plaquiste explique le mouvement des continents aperçu à la surface, par un mécanisme ou bien un fonctionnement qui se produit en profondeur du globe. En effet, Hess en 1960 invente l'idée de l'expansion des fonds océanique ce qui va permettre d'aboutir à la formulation de la théorie de la tectonique des plaques dans laquelle les idées mobilistes prennent la relève dans un cadre fonctionnaliste. Par analogie au modèle d'Arthur Holmes présenté en 1930, Harry Hammond Hess en 1960, propose que le manteau Terrestre est animé de courants de convection : les dorsales mettent en évidence les courants ascendants et les fosses océaniques les courants descendants. La croûte océanique plus dense, créée au niveau des dorsales et enfouie au niveau des fosses océaniques (subduction), est recyclée de manière continue alors que la croûte continentale, plus légère, dérive à la surface de la Terre.

Robert Dietz reprit les visions de Hess en 1961 et introduisit l'expression « sea floor spreading » (expansion des fonds océaniques). Une année plus tard, Harry Hess propose l'hypothèse du « double tapis roulant » des fonds océaniques. Westphal. M., Whitechurch.H & Munschy. M. (2002, p 26)

En 1963, Fred Vine et Drummond Matthews suggèrent que les anomalies magnétiques sont induites par la croissance de la croûte océanique qui est aimantée tantôt positivement tantôt négativement suivant la polarité du champ magnétique. La corrélation entre le modèle et le profil magnétique n'est pas bonne. A l'époque on connaissait très mal la séquence réelle des inversions, leur article est passé ainsi inaperçu.

En 1965, après l'interprétation des décalages horizontaux des bandes magnétiques de plusieurs centaines de km au niveau de zones de fractures, Wilson a introduit le concept de faille transformantes qui reliaient des segments de dorsales ou de fosses en permettant à deux morceaux de croûte de coulisser l'un contre l'autre (un mouvement à l'horizontal).

La sismologie était l'outil de diagnostique qui apporta une preuve de ce nouveau concept mais aussi de l'ouverture des océans. En effet, Lynn Sykes montra en 1966 que les séismes des failles transformantes correspondaient bien à des cisaillements et que ceux des dorsales traduisaient bien une ouverture. La conversion des géophysiciens à l'hypothèse du « sea floor spreading » fut alors massive. Par recours à la quantification des résultats obtenues, Vine et Tuzo Wilson et en associant chaque anomalie magnétique à son inversion correspondante, ils calculèrent le taux d'ouverture des océans et l'âge de la croûte océanique. Cette datation a été prouvée par des forages réalisés en 1968.

L'espace qui se crée doit disparaître quelque part s'il faut admettre que la Terre est en équilibre, dans cette perspective, en 1967, Jack Oliver et Bryan Isacks interprétèrent ces plans comme la trace de la lithosphère océanique retournant dans le manteau. Ces lieux de disparition de la lithosphère océanique (on dira plus tard « zones de subduction ») étaient nécessaires dans la logique du « sea floor spreading » si on ne voulait pas supposer l'expansion de la Terre.

Jason Morgan synthétisa ces différentes approches en développant la première hypothèse « plaquiste ». Il supposa que la lithosphère était découpée en une série de « blocs » parfaitement rigides, se déplaçant les uns par rapport aux autres. Dan Mc Kenzie et Robert Parker développèrent des idées analogues en introduisant le terme de « plaque » et l'année suivante, Xavier Le Pichon en fit une première application. Il divisa la surface du globe en 6

plaques lithosphériques dont il détermina les frontières à partir de l'activité tectonique et calcula les pôles de rotation de leur mouvement relatif depuis 120 millions d'années. Par la suite, ces mêmes procédés permirent par simple « fermeture » des océans de reconstruire les positions successives des continents depuis 200 millions d'années.

Isaks, Jack Oliver et Lynn Sykes (1968) parlèrent de « nouvelle tectonique globale » en vérifiant qu'elle était conforme aux phénomènes sismiques, et Vine et Hess introduisirent l'expression « tectonique des plaques ». Des carottages ont permis de dresser la carte des fonds océaniques. Ces résultats confirment bien le modèle de Vine et Matthews. Les explications de Morgan (1970) à propos des points chauds confirment également le mouvement lithosphérique.

John Dewey et John Bird, en 1969-70, furent les premiers à montrer la fécondité de cette théorie pour comprendre les formations géologiques. Détruisant toutes les anciennes conceptions, ils définirent les marges continentales passives, actives et les chaînes de collision. Ils affirmèrent également que les montagnes anciennes résultaient d'anciennes collisions et étaient donc le témoin d'océans aujourd'hui disparus. La tectonique des plaques pouvait donc avoir une application antérieure à 200 millions d'années. Les travaux de Dewey et Bird marquèrent une étape essentielle dans l'histoire de la géologie. Leur classification des formations géologiques restait encore rudimentaire, mais ils montraient que la tectonique des plaques pouvait être un cadre unificateur, un schéma général dans lequel les investigations géologiques pouvaient être reprises, les faits observés réinterprétés, l'histoire du globe et des continents redécouverte. Ils permirent à une nouvelle géologie fonctionnaliste de se développer où il allait s'agir, en association avec les études chimiques, thermiques et dynamiques, de définir et de comprendre la genèse et l'évolution des différentes structures de la surface du globe, tant océaniques que continentales.

Elle fut rapidement acceptée par la communauté des géophysiciens car elle leur permit d'interpréter l'ensemble de leurs nouvelles observations. Elle se heurta par contre à une forte opposition de la part des géologues qui la considéraient avant tout comme une théorie des océans. Son application à la géologie continentale posait, de sérieuses difficultés.

Comment l'utiliser pour comprendre le passé géologique ?

Les plaques étaient-elles vraiment rigides alors qu'on observait des séismes intra plaques par exemple en Asie ?

Comment définir une frontière entre deux continents alors que les séismes se répartissaient sur une large bande ?

2.5 Conclusion

Le fonctionnement du globe a été vu par les chercheurs suivants plusieurs angles. Ces différents points de vues ont permis l'élaboration de plusieurs thèses fonctionnalistes, dont certaines ont fragilisé d'autres suite à la persistance de certains problèmes fonctionnalistes, que certaines thèses n'arrivaient pas à résoudre dans un cadre fonctionnaliste, tel que : le problème du mouvement horizontal et le mécanisme de son fonctionnement, jusqu'à l'élaboration de la théorie de la tectonique des plaques, qui est née comme une théorie cinématique des mouvements à grandes échelles à la surface du globe et qui représente le modèle fonctionnaliste le plus cohérent jusqu'à présent. Elle met d'abord en évidence les échanges de matière entre l'intérieur et l'extérieur de la planète et la nécessité de l'existence de courants de convection dans le manteau. Elle définit surtout un nouveau cadre pour expliquer les formations géologiques. Elle permet ainsi une compréhension entièrement renouvelée de la surface du globe en lui redonnant son unité et en révélant une Terre en plein dynamisme.

3. Problématisation fonctionnaliste du mouvement des plaques chez les scientifiques actuels.

Le 20^{ème} siècle représente une révolution dans l'histoire des sciences de la Terre, les fonds océaniques sont de plus en plus explorés grâce à l'évolution des méthodes de détection et à l'application d'autres disciplines au domaine de la géologie notamment l'utilisation de la géophysique qui a participé à faire un grand pas en avant en faveur de la théorie de la tectonique des plaques. Certains chercheurs ont contribué à mieux expliquer l'espace globale en évoquant la différence qui existe entre l'océan et le continent. Les théories géologiques ont ainsi basculé du courant fixiste vers un nouveau courant mobiliste, celui de la tectonique des plaques. La problématisation du fonctionnement ne présente pas les mêmes caractères selon les deux courants. L'étude de la problématisation dans les deux cas (mobilistes et fixistes) précédemment décrits s'avère utile pour une étude de la problématisation chez les élèves ultérieurement.

Nous allons essayer d'identifier les espaces des contraintes qui ont soutenu les modèles fixiste et mobiliste dans les années soixante, en référence aux travaux de C. Orange (1999, 2000) sur la problématisation fonctionnaliste.

3.1. L'espace des contraintes construit chez les fixistes des années soixante.

En se référant à l'entretien qu'a fait D. Orange avec Le Pichon, Nous avons déjà construit dans la première étude les espaces de contraintes construit par les fixistes des années soixante et ceux construit par les mobilistes. Les espaces de contraintes que nous avons présenté pour le problème de la subdivision de la surface du globe pour les fixistes vont servir pour l'étude du problème du mouvement car à côté de la subdivision en continents, l'espace de contrainte construit par les fixistes montre bien l'absence du mouvement. Les deux problèmes sont liés dans la mesure où la recherche de la compréhension de la répartition actuelle de la surface de la terre fait intervenir la nécessité du mouvement, nous allons donc utiliser les espaces de contraintes construit par les fixistes des années soixante déjà construits pour ce problème fonctionnaliste.

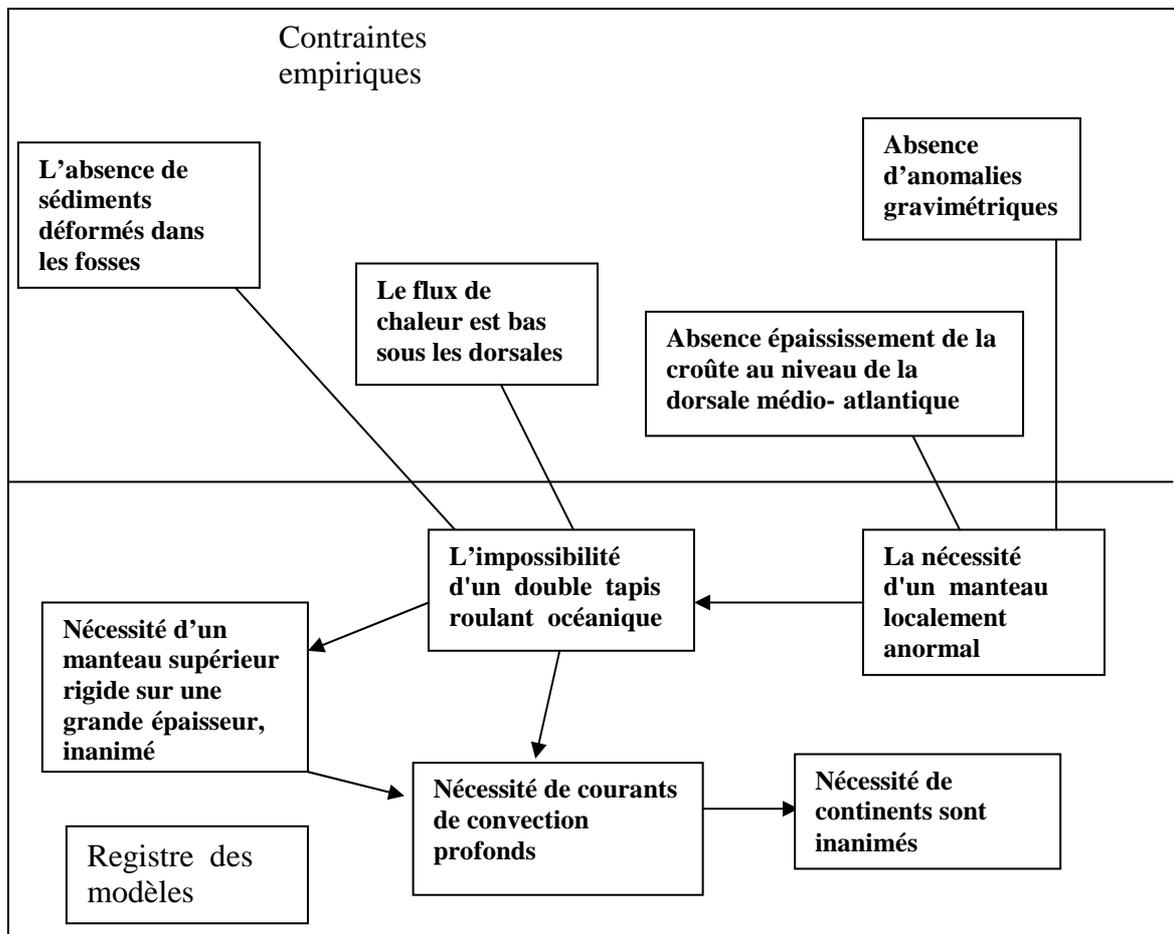


Figure 7.1 L'espace des contraintes possibles construit chez les fixistes des années soixante (les continents sont inanimés).

3.2. L'espace de contraintes construit par les mobilistes des années soixante pour le problème du mouvement des plaques.

H. Hess développe dès 1960 l'idée d'un fonctionnement en double tapis roulant des océans, ce que Dietz nomme en 1961 le « Sea floor spreading ». Nous nous servons de plusieurs éléments empiriques pour construire l'espace de contraintes construit par les mobilistes des années soixante:

- L'absence d'anomalies gravimétriques, l'absence de l'épaississement de la croûte au niveau de la dorsale médio-atlantique, sont liées à la nécessité d'une formation régulière de la croûte océanique basaltique au niveau des dorsales.
- Les bandes magnétiques découvertes sur le plancher océanique sont interprétées comme des marqueurs de l'expansion par Fred Vine et Drummond Matthews en 1963.
- La nécessité que la croûte océanique basaltique se forme régulièrement au niveau des dorsales est liée à la nécessité d'une expansion à la manière d'un double tapis roulant.
- Les discontinuités des bandes magnétiques des zones de fractures nécessitent le modèle de faille transformantes qui sont les témoins d'un mouvement à l'horizontal. Lynn Sykes montra en 1966 que les séismes des failles transformantes correspondaient bien à des cisaillements et que ceux des dorsales traduisaient bien une ouverture.
- En 1967, Jack Oliver et Bryan Isacks interprétèrent ces fosses océaniques comme la trace de la lithosphère océanique retournant dans le manteau.
- Jason Morgan suppose que la lithosphère était découpée en une série de « blocs » parfaitement rigides, se déplaçant les uns par rapport aux autres.

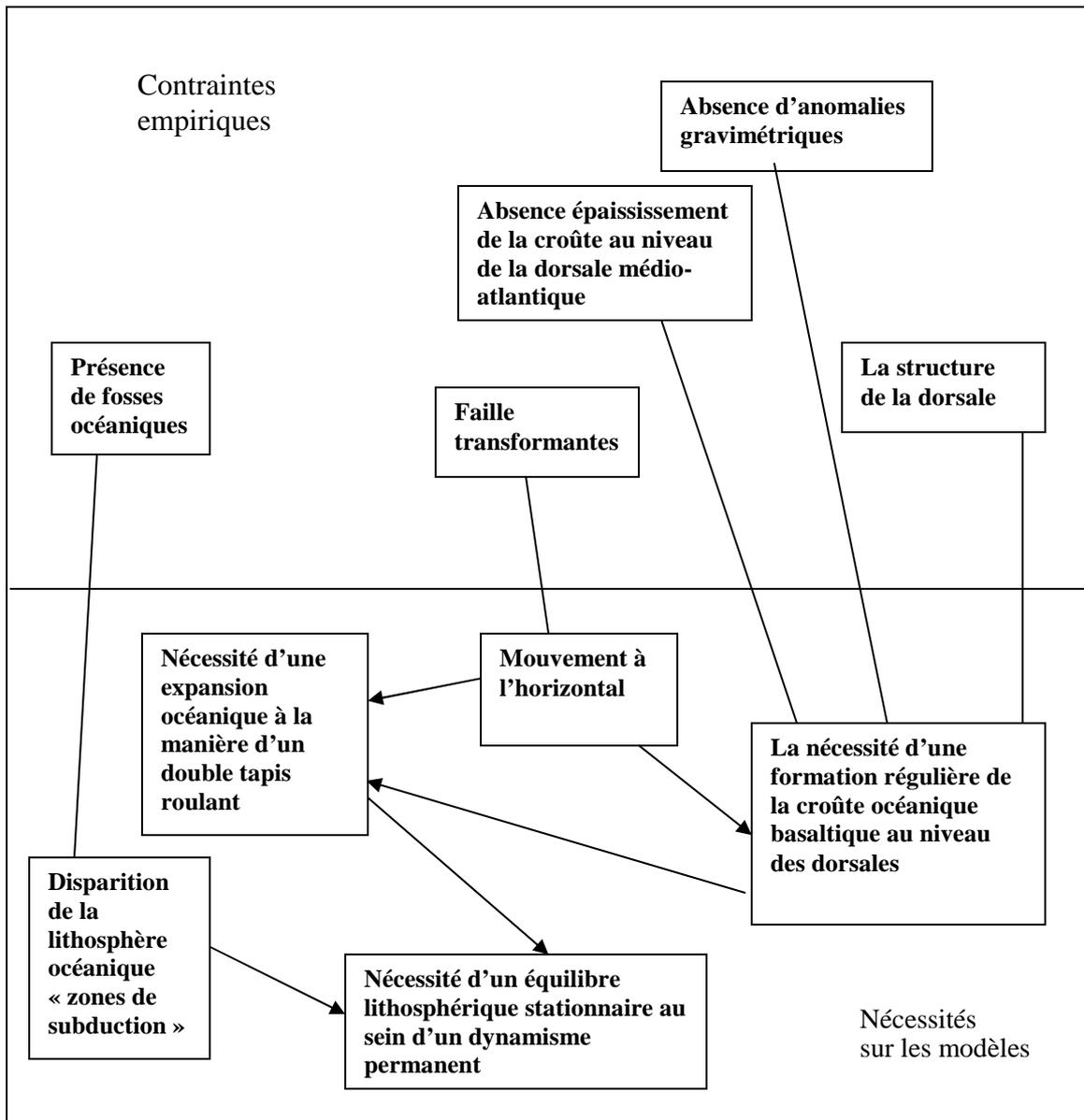


Figure 7.2 L'espace de contraintes construit par les mobilistes des années soixante
(Le mouvement des plaques)

3.3 L'espace de contraintes du moteur du mouvement des plaques dans le cadre plaquiste par les mobilistes des années soixante.

Le problème que nous nous posons ici est : comment peut-on expliquer la mobilité des plaques alors qu'elles reposent sur un milieu solide tel que l'asthénosphère ? C'est-à-dire quel mécanisme permet de faire bouger les plaques malgré cette contrainte ?

Nous nous appuyons sur les travaux des mobilistes des années 1960, sur les interprétations et les analyses de D. Orange des témoignages et les écrits de Xavier Le

Pichon déjà présentés plus haut et sur les idées de certains mobilistes notamment B. Heezen (géologue du Lamont) et H. Hess (géologue de Princeton). B. Heezen pense que les océans sont des structures récentes formées par expansion à partir du rift. H. Hess développe dès 1960 l'idée d'un fonctionnement en double tapis roulant des océans, ce que Dietz nomme en 1961 le "*Sea floor spreading*".

Dans cette perspective les recherches ont montré que le moteur du mouvement des plaques se produit à l'intérieur du manteau Terrestre (l'asthénosphère). En effet, l'asthénosphère est un milieu caractérisé par une matière chaude et peu dense. Elle est surmontée par la lithosphère où la matière est moins chaude et plus dense. Le contact entre ces deux sources thermiques : chaude en profondeur et froide en surface, entraîne l'établissement de courants d'échanges de matière appelés courants de convection.

Les courants de convection entraînent la matière chaude vers la surface et ramènent la matière relativement froide plus dense vers l'asthénosphère. Les courants de convection représentent donc un moteur thermique complexe. Ils sont responsables des déplacements des plaques lithosphériques qui glissent sur l'asthénosphère en mouvements convergent et divergent.

La problématisation des chercheurs fait intervenir des variables physico-chimiques : la température, la densité, la profondeur, l'échange de matière entre deux milieux, les gradients thermiques et de densité.

Dans la suite de cette recherche, nous allons étudier la problématisation des élèves confrontés au problème du mouvement des plaques au sein d'une situation problème établi ultérieurement en classe. Puis nous allons comparer la problématisation des chercheurs à celles des élèves dans le but d'identifier quel genre de difficultés rencontrent les élèves au cours de la construction d'un problème fonctionnaliste.

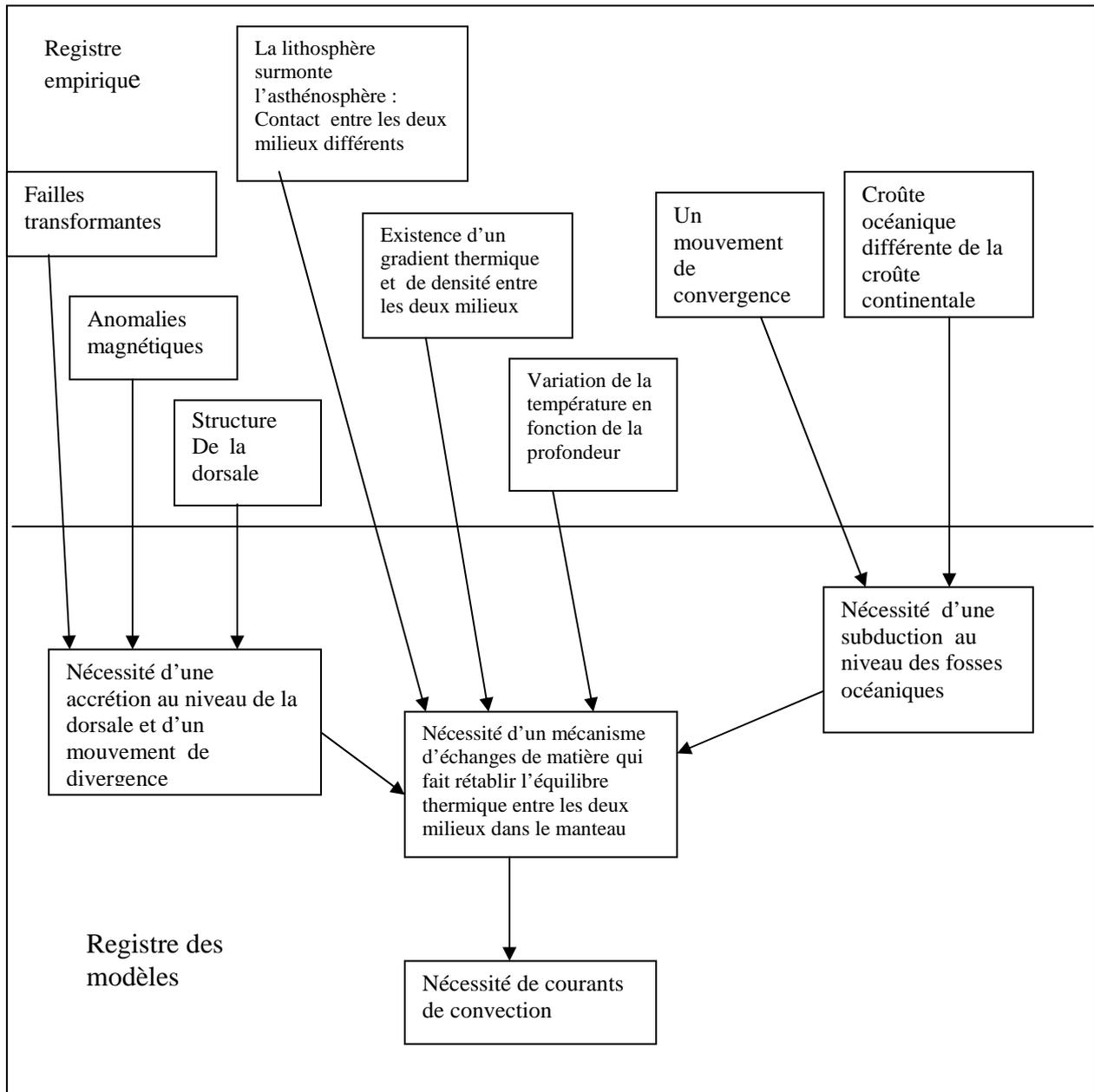


Figure 7.3. problème du mouvement des plaques : Espaces des contraintes des chercheurs

4. Conclusion

L'histoire des Sciences de la Terre confirme une rupture épistémologique en matière de savoir sur le mouvement des plaques et le moteur qui en est responsable suite à un changement du registre explicatif. La communauté scientifique a basculé d'un fixisme vers un mobilisme, dont les rapports à l'espace ne sont pas les mêmes.

- un fixisme qui suppose que les continents sont immobiles et rejette la possibilité d'un double tapis roulant océanique et nécessite pour cela un manteau supérieur

rigide sur une grande épaisseur, inanimé. Les mouvements quand ils existent sont des mouvements verticaux d'affaissement de zones crustales.

- un mobilisme qui suppose que les plaques sont animées de mouvement à la manière d'un double tapis roulant et qui nécessite un renouvellement des fonds océaniques qui se produit dans deux dimensions de l'espace : une mobilité à l'horizontale des fonds océaniques en rapport avec l'accumulation des sédiments à la verticale.

L'étude de la problématisation dans les deux cadres : mobiliste d'un côté et fixiste de l'autre côté montre clairement la co-construction des différents registres. Elle permet de mettre l'accent sur la résistance de certaines contraintes empiriques telles que les anomalies magnétiques dont l'interprétation a influencé l'évolution de l'espace de contraintes des scientifiques, géologues et géophysiciens. Dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques actuellement admis par la communauté scientifique, Le mouvement permanent des plaques à la surface de la terre et du ressort de la géologie fonctionnaliste. Comment les élèves problématissent ils le mouvement des plaques ? quel fonctionnement proposent ils pour expliquer le mouvement permanent à la surface du globe et qui permet de maintenir l'équilibre lithosphérique à la surface au sein d'un dynamisme permanent ?

Pour le passage à l'analyse didactiques des situations de classe, nous avons choisi de diviser le travail : une première étude qui va se faire sur la compréhension du couplage accréation subduction et comment ces deux processus interviennent dans le maintien de l'équilibre dynamique et une deuxième étude se rapportera au moteur du mouvement des plaques (convergence et divergence) : les courants de convection.

Chapitre 8

Mouvement de plaques le couple

« Accrétion subduction »

Analyse didactique de la situation

Introduction

1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu
2. La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur
3. Analyse didactique préliminaire de la situation
4. Conclusion

Introduction

La situation que nous allons étudier s'intègre dans le cadre du programme de géologie de troisième année sciences expérimentales (programme officiel 2006) et plus précisément dans le cadre de l'étude du mouvement des plaques lithosphériques et les courants de convection. Il s'agit de comprendre « le fonctionnement » du mouvement des plaques à la surface de la Terre et le moteur de ce mouvement (les courants de convection). Dans une première partie nous cherchons à voir comment les élèves problématisent l'équilibre lithosphérique à la surface du globe, est-ce qu'ils arrivent à établir un lien entre l'accrétion et la subduction pour le maintien de l'équilibre ? Puis nous allons voir comment expliquent-ils le couplage de la subduction à l'accrétion, quel mécanisme proposent-ils pour le maintien de l'équilibre lithosphérique. La situation que nous allons étudier dans les deux chapitres qui suivent (chapitre 8 et chapitre 9) s'intéresse au couplage « accrétion subduction » dans le temps géologique et dans l'espace ; le manuel scolaire (édition 2006, p.310) indique une seule activité pour cette partie que nous n'allons pas travailler avec les élèves mais nous allons proposer une autre activité. Puis nous traiterons la problématisation du fonctionnement dans le cas du moteur du mouvement (les courants de convection) dans les deux chapitres qui suivent (chapitre 10 et 11).

1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu

La situation de classe mise en place vient après que les activités précédentes (travaillées au cours de la première étude) ont permis aux élèves de se replacer dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques, de construire la notion de plaque lithosphérique, de limite de plaques et l'organisation et le fonctionnement actuel d'une dorsale.

2. La situation d'apprentissage et les objectifs et du professeur

La situation qui est proposée aux élèves prend comme point de départ la construction du concept de plaques lithosphériques et leurs articulations avec l'expansion au niveau de la dorsale pour en déduire un mouvement de plaques à la surface du globe. Le professeur pose le problème de l'équilibre lithosphérique à la surface et comment il peut être maintenu dans le cas où l'accrétion contribue à un élargissement de l'espace océanique.

Les deux plaques s'écartant d'un côté et contribuant par leur divergence à l'expansion de l'océan, simultanément deux autres se rapprochent de l'autre côté et entrent en subduction, il s'agit donc d'expliquer ce dynamisme qui se produit à la surface. L'élève doit s'approprier l'idée qu'une création de lithosphère sur toute l'épaisseur des plaques existe à l'aplomb de la dorsale, et il doit réfléchir au fait que de l'autre côté une disparition de la lithosphère au niveau des zones de subduction devrait se produire simultanément. Ainsi l'élève se dirige vers l'idée de complémentarité entre ces deux phénomènes qui tendent à maintenir l'équilibre lithosphérique.

La réponse attendue est conforme au savoir actuel, construit dans le cadre théorique de la tectonique des plaques. Elle exprime l'idée de l'équilibre lithosphérique par le jeu compensé de l'accrétion (ou agrandissement des plaques) et de la subduction.

3. Analyse didactique préliminaire de la situation

Dans notre étude sur le fonctionnement, cette situation de classe nous intéresse. Elle peut permettre de comprendre comment les lycéens prennent en compte le couple « accrétion –subduction » (deux phénomènes affectant les plaques qui s'inscrivent dans le temps et dans l'espace) et dans quelle mesure ils parviennent à construire la nécessité d'un mécanisme moteur pour la réalisation de ces deux phénomènes géologiques dans le but du maintien de l'équilibre lithosphérique.

3.1 Un cadre « plaquiste »

Dans tout l'espace considéré, les mouvements de rapprochement et d'écartement se déroulent avec les mêmes caractéristiques et les mêmes réflexions sur « l'espace » dans ses dimensions verticale et horizontale. Dans « l'espace tectonique » considéré, deux « conditions fondamentales » se posent, elles résultent des caractéristiques des deux mouvements et qui permettent de reconstituer chacun une « figure d'espace » suite à une conjoncture donnée: un « espace horizontal négatif » engendré par un raccourcissement suite à un rapprochement de plaques et un « espace horizontal positif » engendré par une création due à un écartement de plaques . Ces deux figures s'appliquent toutes les deux à l'espace horizontal en lui posant une variation par rapport à son état spatial initial. Ces conditions sont comme suit :

1) Au niveau de l'axe d'une dorsale, il se forme des sédiments de fond océaniques dans une direction verticale, suivie d'une double dérive des sédiments néoformés dans une direction horizontale qui crée l'espace lithosphérique horizontal positif.

2) Au niveau des zones de convergence de plaques, des fragments de lithosphère disparaissent dans une direction verticale, au cours d'un rapprochement des deux lithosphères entrant en contact dans une direction horizontale qui réduit l'espace lithosphérique horizontal.

Ces « conditions » sont complémentaires mais en même temps elles diffèrent dans leur espace d'application : la première gouverne l'axe de la dorsale ; la deuxième, les fosses océaniques. A ce stade de notre étude, nous retenons qu'elles attribuent à l'étendu de « l'espace » deux extrémités : d'un côté, une extrémité constructrice et de l'autre côté une extrémité destructrice.

La coordination de « l'espace » dans ses différentes directions qui est demandée aux élèves doit les conduire à articuler « l'espace négatif » à « l'espace positif », envisageables par la mise en jeu des conditions spatiales. De quelle manière les élèves arriveront-ils à cela ? La réflexion sur le « double tapis roulant » et les courants de convection sera le contenu de notre deuxième étude.

3.2 L'équilibre lithosphérique et l'espace

Ces deux processus l'accrétion et la subduction contribuent à la mise en place d'**une « interférence spatiale »** car simultanément par le biais de l'accrétion, l'espace lithosphérique se construit et remplace un autre espace qui disparaît au cours de la subduction. La conservation de l'espace constitue une forme de l'équilibre lithosphérique qui se maintient.

Nous pensons que, par simplification du phénomène, l'élève a la tendance à mobiliser deux plaques pour chaque processus (la subduction et l'accrétion). Les deux processus se déroulent simultanément dans « les coins opposés d'un même espace » jusqu'à obtenir un état d'équilibre lithosphérique « spatial » mais l'élève risque de ne pas mobiliser la simultanéité dans le couplage de l'accrétion à la subduction.

On peut aussi rencontrer chez les élèves dans la problématisation d'un mécanisme une tendance à une dissociation des phénomènes ou encore une « *séquentialisation des phénomènes* » (Viennot, 1993, 1996 ; C. Orange, D. Orange, 1995 ; D. Orange, 2000), par exemple en faisant fonctionner d'abord l'accrétion puis la subduction (ou l'inverse). Ou encore qu'ils les relient, dans un enchaînement causal par exemple : la réalisation de la subduction est la conséquence d'une accrétion de l'autre côté ; ou inversement, la poussée du magma provoque la dérive des plaques d'un côté ce qui provoque obligatoirement leur rapprochement de l'autre côté. Mais le but final est de comment arriver par le biais d'un processus géologique à construire un équilibre lithosphérique.

Nous pensons que les élèves ont tendance à transposer un processus d'un cadre vers un autre. Autrement dit ils ont la tendance à se servir d'un enchaînement connu déjà pour expliquer par analogie, un nouveau phénomène de la même manière que le premier comme par exemple expliquer la formation des chaînes de montagnes par le processus de sédimentation comme pour la formation des strates sédimentaires.(voir première étude)

3.3 L'explication du mécanisme pourrait exclure « le temps »

Nous pensons qu'au cours de la recherche d'un mécanisme explicatif, l'élève risque de se concentrer sur l'enchaînement des étapes qui contribueront à faire bouger les plaques et à l'articulation du moteur du mouvement à la conséquence en surface (l'accrétion et la subduction), ainsi il risque de réfléchir en dehors du cadre temporel, et dans un cadre spatial limité à deux plaques qui s'écartent d'un côté et se rapprochent de l'autre côté.

Ce qui distingue cette situation, c'est qu'elle se focalise sur un mécanisme qui est responsable de l'équilibre dynamique du globe. Pour le scientifique, cet équilibre repose non seulement sur la mise en jeu des deux processus complémentaires subduction et accrétion, mais également sur le maintien de leur réalisation en permanence c'est-à-dire que le mécanisme sous jacent qui leur permet de se perpétuer dans le temps et dans l'espace en continuité forme un cycle, permettant par le biais de cet état dynamique d'inscrire le système Terre dans un cadre stationnaire.

Les élèves qui prennent en compte les deux processus, de quelle manière vont-ils les articuler ? Quel moteur possible proposent-ils pour faire fonctionner les deux processus simultanément ? En quoi cela peut-il jouer sur la construction de la nécessité d'un équilibre dynamique ?

Le professeur entame une discussion autour du maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface du globe avec les deux classes. Nous avons transcrit les deux discussions en annexes et nous allons analyser chacune des discussions pour voir comme nous l'avons déjà mentionné, comment les élèves prennent en compte les deux processus qui se déroulent à la surface (accrétion et subduction), de quelle manière ils vont les articuler ? En quoi cela peut-il jouer sur la construction de la nécessité d'un équilibre dynamique ?

3.4 L'espace des contraintes pour le couple accrétion subduction dans le contexte de la séance.

Au niveau des zones de dorsales l'accrétion de la matière magmatique, au moment d'une divergence des deux lithosphères de part et d'autre de la dorsale crée l'espace lithosphérique horizontale et contribue ainsi à une augmentation de l'océan. Dans un autre côté de l'espace, un deuxième mécanisme géré par des conditions physico-chimiques, ainsi que des variations de pressions et de température se déroule au niveau des fosses océaniques au moment d'une convergence de plaques fait disparaître l'espace lithosphérique c'est le phénomène de subduction. L'équilibre lithosphérique est maintenu. Ces « conditions » sont complémentaires mais en même temps elles diffèrent dans leur espace d'application : la première gouverne l'axe de la dorsale ; la deuxième, les fosses océaniques. A ce stade de notre étude, nous retenons qu'elles attribuent, pour l'élève, à l'étendue de « l'espace », deux extrémités : d'un côté, une extrémité constructrice et de l'autre côté une extrémité destructrice qui se complètent pour maintenir l'équilibre à la surface de la Terre. La figure ci-dessous représente l'espace des contraintes possible en jeu ainsi défini dans le contexte de la séance :

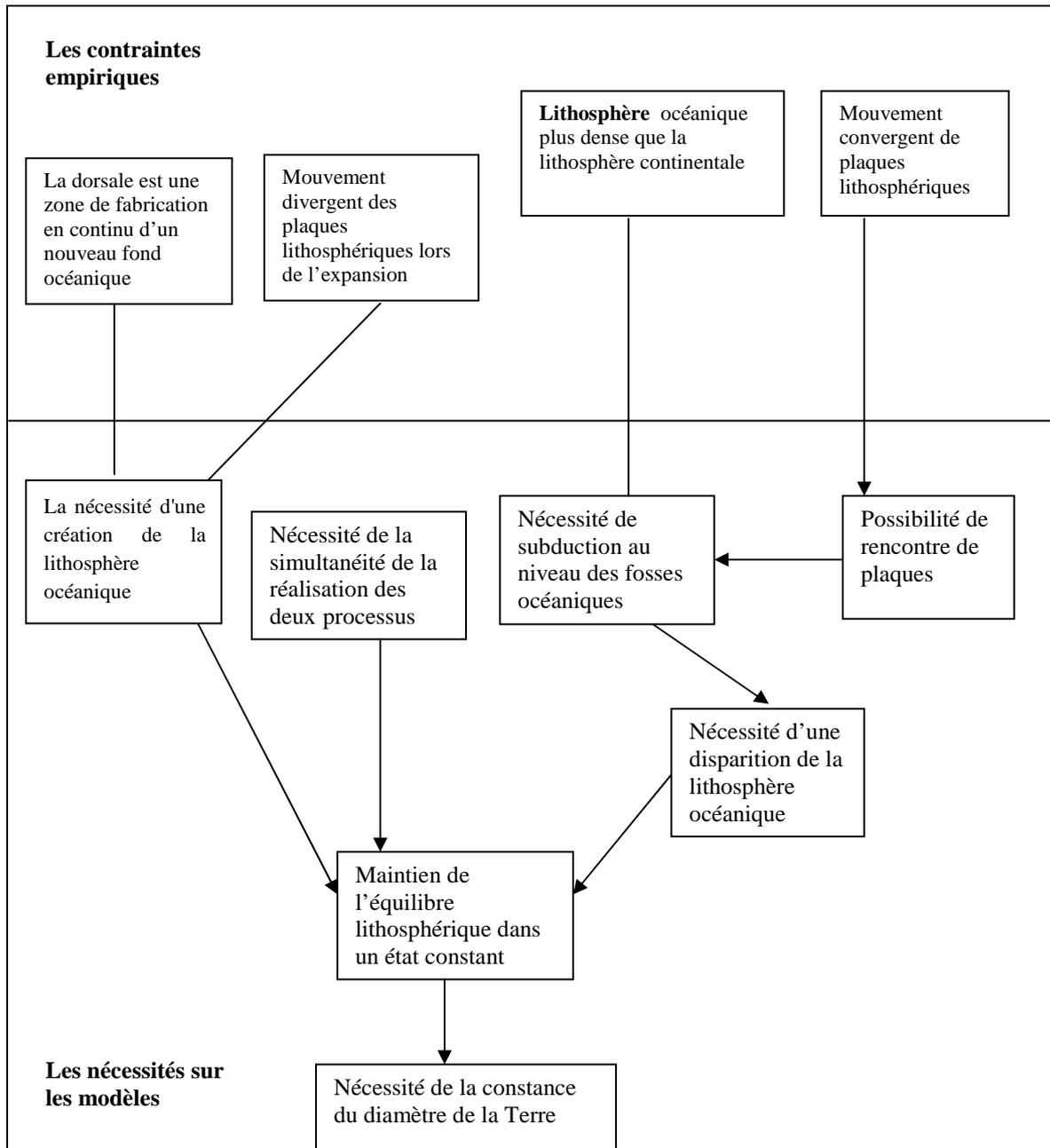


Figure 8.1 L'espace des contraintes possible pour le couple accrétion subduction dans le contexte de la séance.

4 Conclusion

L'analyse préliminaire de la situation nous permet de déduire que l'articulation de processus géologiques dans le but d'un maintien de l'équilibre globale, dans le cadre tectonique n'est pas aussi simple qu'on le croit. L'articulation des deux processus : accrétion et subduction dans l'espace comme dans le temps varie certainement d'un élève à un autre. Or on sait que l'élève a la tendance de transformer le synchronique en successif (C. Orange, D. Orange, 1995 ; D. Orange, 2000). On peut concevoir qu'il trouve des difficultés à articuler deux déroulements synchrones pour construire un état d'équilibre.

Chapitre 9
Le mouvement des plaques
Couplage (accrétion–subduction)
Explication des élèves et nécessité de l'équilibre
lithosphérique

Introduction

1. Analyse et catégorisation des réponses des élèves au questionnaire avant la mise en œuvre de la situation de classe
2. Le recueil des données
3. Analyse des productions des élèves
4. Conclusion

Introduction

Dans le chapitre 7, nous avons étudié la problématisation du mouvement des plaques chez les chercheurs au cours de la construction du moteur responsable de ce mouvement à la surface. Il y a à considérer l'articulation de l'accrétion à la subduction et la nécessité de l'existence d'un mécanisme sous-jacent : les courants de convection.

En ce référant à la problématisation des chercheurs, nous allons analyser les productions des élèves pour comprendre comment ces derniers problématisent ils l'équilibre lithosphérique à la surface du globe comme un point de départ qui va nous mener dans la suite du travail à chercher le moteur responsable du couple accrétion –subduction à la surface.

Dans le questionnaire que nous avons choisi de passer aux élèves avant l'apprentissage nous avons posé deux questions N°1 et 2 (voir plus haut p.103) pour voir si les élèves évoquent le mouvement des plaques. Nous avons choisi d'éliminer la deuxième question car elle tourne autour d'un animal fossile et elle a orienté les réponses des élèves en dehors de notre cadre d'étude. Nous allons donc analyser seulement la première question du questionnaire pour le problème de mouvement des plaques. En ce qui concerne l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre nous allons analyser la troisième question.

1. Analyse et catégorisation des réponses des élèves au questionnaire avant la mise en œuvre de la situation de classe

1.1 Analyse de la première question du questionnaire

Cette analyse portera sur le vocabulaire utilisé par les élèves, le type du modèle explicatif, la présence ou pas d'expressions visant : l'espace et surtout le mouvement.

La question est comme suit :

Wegener est un géologue des années 1910, en voyant sur la carte du globe Terrestre les complémentarités qui existent entre les bords de l'Afrique et de l'Amérique du sud, a constaté que ces deux continents, s'emboîtaient autrefois comme les morceaux d'un puzzle. Comment expliquez leur disposition actuelle ?

Nous rappelons que la première question vise implicitement le mouvement des plaques.

Nos allons essayer de mettre en catégories les productions des élèves selon deux variables :

- variable1 : subdivision de l'espace en espace géologique ou en espace géographique
- Variable 2 : l'explication proposée pour la disposition actuelle (par le mouvement ou bien par autres causes)

Le tableau suivant représente le tableau de croisement de ces deux variables.

V1 : Subdivision de l'espace	Surface subdivisée en plaque	Surface subdivisée En continent/océan	L'unité de subdivision de la surface est absente	Total des réponses
V2 : L'explication de la disposition actuelle				
le mouvement	1.4.5.6.7.11.12.1 8.23			9/25
Autre explication		3.21.22.25	2.8.9.10.13.14.15.16. 17.19.20	15/25
Total des réponses	9/25	4/25	11/25	24/25

Tableau 9.1 tableau de la répartition des catégories après croisement des variables dans l'analyse de la première question du questionnaire

Le croisement des deux variables montre que les réponses des élèves se répartissent en trois catégories:

- 9/25 des élèves expliquent la disposition actuelle de l'Afrique et de l'Amérique par le mouvement des plaques à la surface du globe. Ces élèves utilisent l'espace géologique dans leurs explications malgré que l'énoncé de la question se rapporte à deux continents. (annexe 3)

Exemple n°1 : « *Le globe terrestre est constitué par un ensemble de plaque qui sont reliées et emboîtées comme les morceaux d'un puzzle. Pour cela les bords de l'Afrique et de l'Amérique peuvent s'emboîter. Les volcans et les séismes explique et montre que les plaques sont reliées entre eux et toujours en mouvement.* »

Exemple23 : « *La disposition actuelle est due au mouvement des plaques.* »

- 4/25 des élèves subdivisent la surface du globe en océans et continents, et expliquent la disposition actuelle de l'Afrique et de l'Amérique par des causes autres que le mouvement. Ces élèves utilisent l'espace géographique.

Exemple n°3 : « *Au début, à l'époque des dinosaures ou même avant, la terre était composée de deux principaux surfaces la mer (l'eau) et de la terre (le sol) et il n'y avait pas de continents ; et à cause des tremblements de terre on peut comprendre sa disposition*

actuelle. Il y a une deuxième théorie c'est qu'une météorite a tombé sur la terre mais elle est très peut fréquente. »

- 11/25 des élèves expliquent la disposition actuelle de l'Afrique et de l'Amérique non pas par le mouvement mais par des « catastrophes » qui sont dues soit à une explosion naturelle, soit aux facteurs climatiques, soit aux séismes et aux volcans.

La **proposition de catastrophe** comme cause explicative de la disposition actuelle des deux continents est le modèle le plus confortant pour un élève ayant une **conception fixiste**. Mais il s'agit d'un raisonnement cohérent.

Exemple n°2 : « Cette disposition actuelle est causée par une grande explosion naturelle faite par des facteurs climatiques depuis longtemps ».

En conclusion : L'étude du croisement des variables de la première question montre que la conception mobiliste s'exprime lorsque l'élève mobilise l'espace géologique, mais lorsque l'espace utilisé est géographique ou indéfini, la conception mobiliste n'existe plus.

1.2 Analyse de la troisième question du questionnaire

L'objectif visé par la troisième question est de voir quels mécanismes proposent les élèves pour expliquer les pertes, les gains ou la conservation de la matière, s'y a-t-il parmi les réponses, des propositions qui rappellent l'expansion ou la subduction ou bien existe-t-il d'autres modèles explicatifs pour le maintien de l'équilibre dynamique globale.

La question est comme suit :

dans l'histoire de l'Homme, il y a des gens, qui, en regardant les reliefs (chaînes de montagnes, vallées, plaines...) à la surface de la Terre ont pensé que la présence de ces reliefs est expliquée par le fait que la Terre se rétrécit (diminue de surface) au cours du temps, d'autres ont expliqué la présence de ces reliefs par le fait qu'elle grandisse et une troisième catégorie a pensé qu'elle garde les mêmes dimensions au cours du temps. Qu'est-ce que vous en pensez ? Et pourquoi ?

Nous allons analyser les réponses des élèves selon deux variables :

- * la variation des dimensions de la Terre (v1) : si la Terre garde les mêmes dimensions au cours du temps ou bien si elle grandit ou elle rétrécit.
- * le mécanisme proposé pour expliquer la conservation ou la variation de la surface de la Terre (v2).

Nous distribuons les réponses des élèves selon les deux variables précédentes dans le tableau suivant :

V1 variation de la surface Terre	La Terre garde les mêmes dimensions	La Terre grandit	La terre rétrécit	Total des réponses
V2 explication proposé				
L'érosion			8.10.21.	3/12
L'accumulation des sédiments		2.		1/12
Pas d'explication	1.5.12.14.20.22.23		9	8/12
Total des réponses	7/12	1/12	4/12	12/12

Tableau 9.2 tableau de la répartition des catégories après croisement des variables dans l'analyse de la troisième question du questionnaire

La répartition des réponses des élèves est hétérogène. Sur 25 élèves, 12 seulement ont parlé de la surface de la Terre. Les autres se sont limités à expliquer comment se forment les reliefs (nous allons analyser cette partie de la question dans la troisième étude : la naissance d'une chaîne de montagne). Nous remarquons que :

- Lorsque la Terre garde les mêmes dimensions, les élèves ne proposent aucune explication pour cet état constant. L'état d'équilibre est difficile à expliquer, ceci est pour 7/12 des réponses obtenues. Exemple : N° 1 « *Les dimensions de la Terre reste constante mais les reliefs sont dus à un ensemble des facteurs comme la sédimentation, le plissement, l'érosion, etc...* »(annexe 3)
- La surface de la Terre s'agrandit par l'accumulation des sédiments. L'élève se réfère au modèle sédimentaire. Il s'agit d'un raisonnement cohérent dans la mesure où l'accumulation des particules ou de sédiments aboutit à la formation d'une strate au cours du temps donc par analogie à la formation des strates sédimentaires, la surface de la terre s'agrandit. Exemple N°2 « *je pense que la présence de ces reliefs par le fait qu'elle grandisse car le sol s'accumule et avec les facteurs climatiques (vent, pluie..) il se forme ces reliefs.* »
- La surface de la Terre se rétrécit au cours du temps sous l'effet de l'érosion. L'élève se réfère à une étape du processus de la formation des roches sédimentaires. L'érosion contribue à une diminution des matériaux de l'endroit érodé, donc par analogie à cette

opération, le raisonnement adopté est cohérent. Exemple N°8 « *je pense qu'elle diminue par l'érosion* ».

On peut conclure qu'il existe une difficulté à expliquer l'équilibre lithosphérique du système Terre. Lorsque la variation existe, elle est expliquée par analogie au modèle sédimentaire dans un raisonnement cohérent.

1.3 Récapitulation

L'analyse à priori du questionnaire avant la mise en place d'une situation problème montre que :

- La mobilisation du mouvement des plaques **nécessite** l'utilisation de l'espace géologique.
- Il existe une difficulté à proposer un système explicatif pour le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre.
- Le système explicatif pour une variation de la surface de la Terre est construit par analogie au modèle sédimentaire.

Nous allons voir si ces conceptions persisteront au cours de la problématisation ou bien s'il y aura un changement conceptuel. Les élèves arriveront-ils à construire un système qui permet le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre en couplant l'accrétion à la subduction au cours de la problématisation ?

2. Le recueil de données

Au cours d'une séance de cours de deux heures qui réunit toute la classe de troisième année sciences, nous avons demandé aux élèves d'expliquer le problème de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre, et comment peut-il être maintenu dans le cas où l'accrétion contribue à un élargissement de l'espace océanique et donc une création permanente de lithosphère océanique. Le professeur leur demande de proposer une explication en premier lieu par un dessin au sein d'un travail individuel ou bien en groupe. Ce travail est fait avec les deux classes de troisièmes sciences expérimentales. Ensuite nous avons passé à une discussion avec les deux classes.

2.1 Les productions écrites des élèves

Nous avons récolté les différents dessins faits par les élèves par lesquels ils expliquent le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre. (Voir annexe 9)

2.2 Les transcriptions de la discussion des élèves

Après que les dessins sont terminés le professeur entame une discussion collective entre tous les élèves des deux classes. Nous avons transcrit toutes leurs réponses et leurs suggestions en annexes 10 et 11.

2.3 Procédure d'analyse

Nous allons analyser les dessins des élèves en essayant de voir comment les lycéens prennent en compte spontanément le couple « accréation –subduction » (deux phénomènes affectant les plaques qui s'inscrivent dans le temps et dans l'espace), et dans quelle mesure ils parviennent à construire la nécessité d'un mécanisme explicatif pour la réalisation de ces deux phénomènes géologiques dans le but du maintien de l'équilibre dynamique.

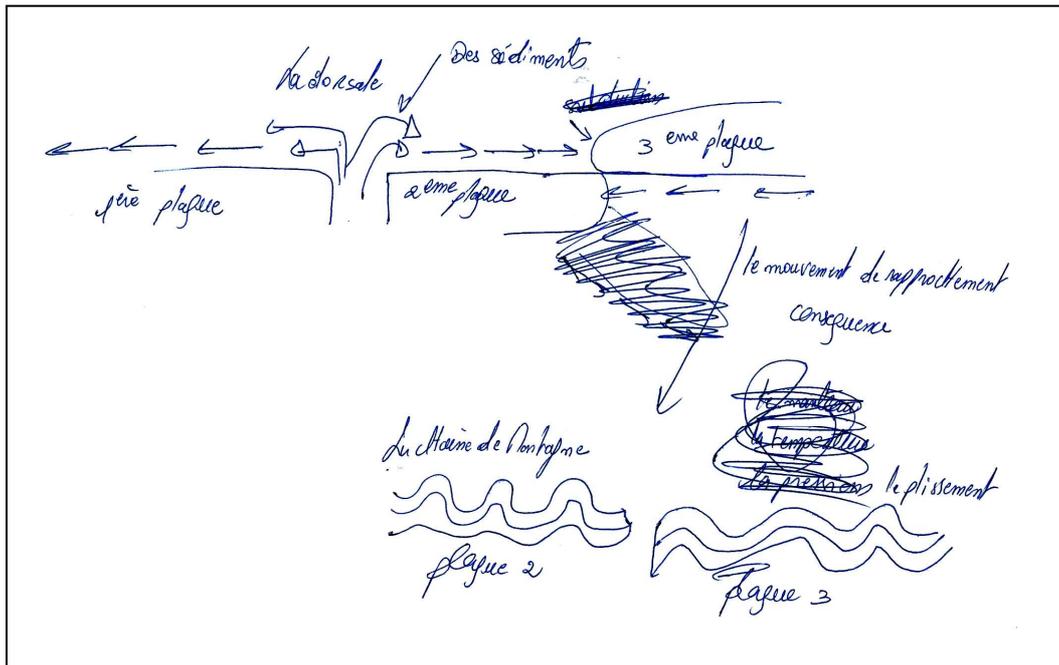
3 Analyse des productions des élèves

3.1 Analyse des types de dessins (annexe 9)

L'analyse porte sur :

- * la nature du dessin : est ce qu'il se limite au lieu de déroulement des deux phénomènes accréation et subduction seulement ou bien est ce qu'il présente un espace qui dépasse le lieu de déroulement des phénomènes cités.
- * l'articulation de l'accréation à la subduction : au sein d'un cycle ou dans une succession par une mise en histoire.
- * le type de figure d'espace utilisé pour expliquer l'accréation et la subduction.
- * le mécanisme proposé pour maintenir l'équilibre lithosphérique.

3.1.1 Analyse du premier type de dessin



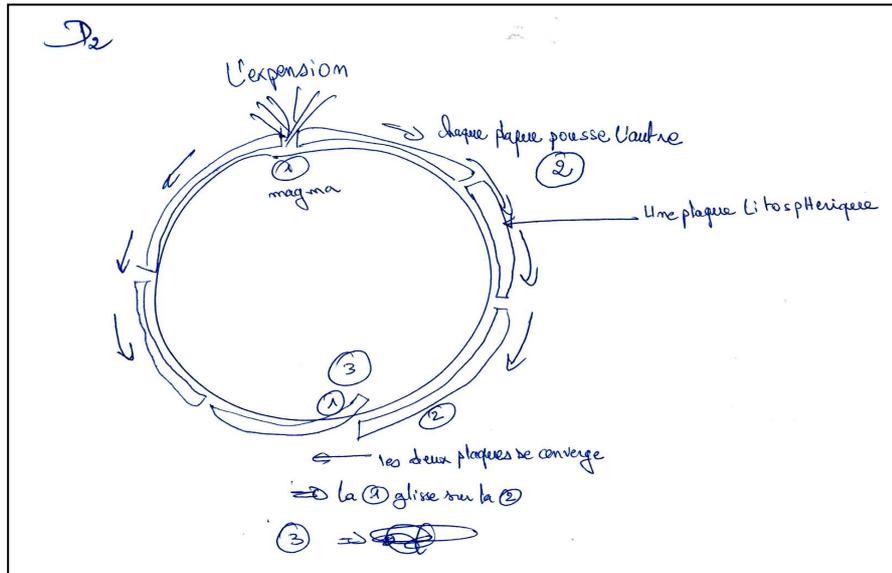
Dessin 9.1 premier type de dessin pour l'explication du maintien de l'équilibre dynamique

Les deux phénomènes accréation et rapprochement des deux plaques se juxtaposent. Le premier phénomène qui a eu lieu (l'accréation) a engendré le deuxième phénomène (rapprochement de deux plaques) : il s'agit d'une relation de cause à effet.

La subduction a été schématisée sur le dessin puis on l'a effacée donc comme si elle ne figure pas sur le dessin elle ne représente pas obligatoirement pour ces élèves la solution pour le maintien de l'équilibre dynamique à la surface. Les élèves proposent un autre phénomène, qui pour eux, pourrait naître suite aux rapprochements de plaques comme conséquence à l'effet de l'expansion océanique et qui a pour effet la correction de l'augmentation de la lithosphère: c'est la formation des chaînes de montagnes qui est expliquée par le plissement des deux plaques à la surface. Ainsi pour ce groupe d'élèves l'équilibre est établi en altitude par la migration de la matière lithosphérique dans une direction verticale suite au plissement, la matière qui se crée d'un côté ne doit pas forcément disparaître elle peut rester en surface accumulée sous la forme de chaînes de montagnes : l'espace positif est utilisé mais l'espace négatif est absent.

Dans la problématisation d'un mécanisme ces élèves relient les phénomènes dans un enchaînement d'étapes dont l'une engendre l'autre, ils utilisent le mot « conséquence » dans leur explication, on peut le qualifier d'enchaînement causal (D. Orange, 2000).

3.1.2 Analyse du deuxième type de dessin

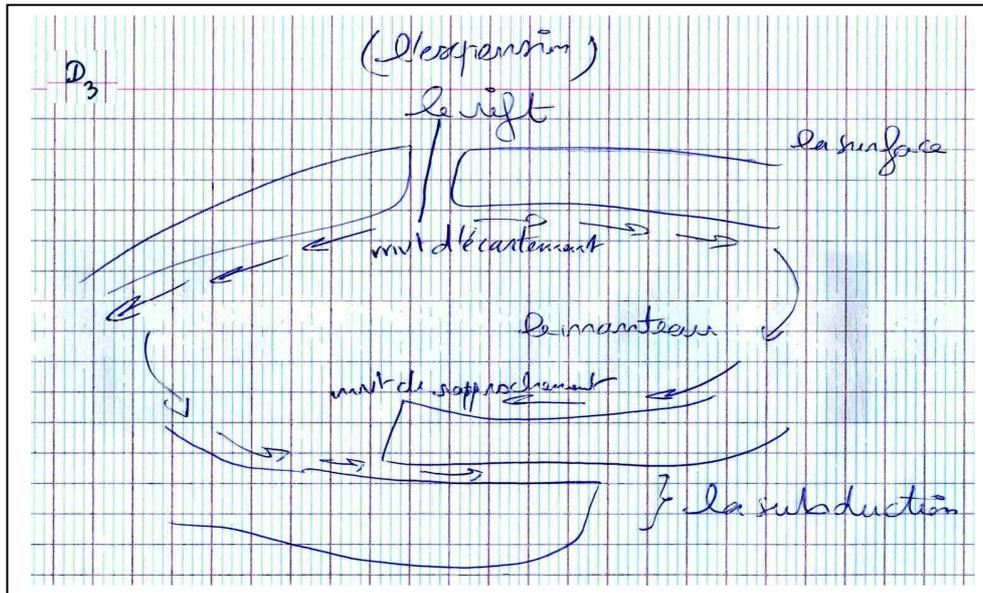


Dessin 9.2 deuxième type de dessin pour l'explication du maintien de l'équilibre dynamique

Le dessin est réalisé sous la forme d'un cercle (marqué par les flèches qui montrent le sens du mouvement des plaques sur le cercle représentant le globe Terrestre). Nous remarquons que les élèves numérotent les étapes de 1 à 3 sur le dessin dans un ordre de succession dans le temps formant ainsi une mise en histoire : La poussée du magma provoque la divergence des plaques d'un côté ce qui provoque obligatoirement leur rapprochement de l'autre côté. La subduction figure sur le dessin comme conséquence finale (l'élève lui attribue le numéro 3). Elle représente pour ces élèves la solution pour le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface. Ainsi pour ce groupe d'élèves, l'équilibre est établi en profondeur, la matière qui se crée d'un côté doit disparaître au cours de la subduction, ils utilisent donc l'espace positif et l'espace négatif mais ces élèves n'expliquent pas les variables qui gouvernent le phénomène de subduction (gradient de densité, de pression et de température).

Malgré les différences qui existent dans le modèle proposé par ce groupe par rapport au groupe précédent, il faut encore noter que dans la problématisation d'un mécanisme les élèves relient encore une fois les phénomènes dans un enchaînement causal (D. Orange, 2000).

3.1.3 Analyse du troisième type dessin

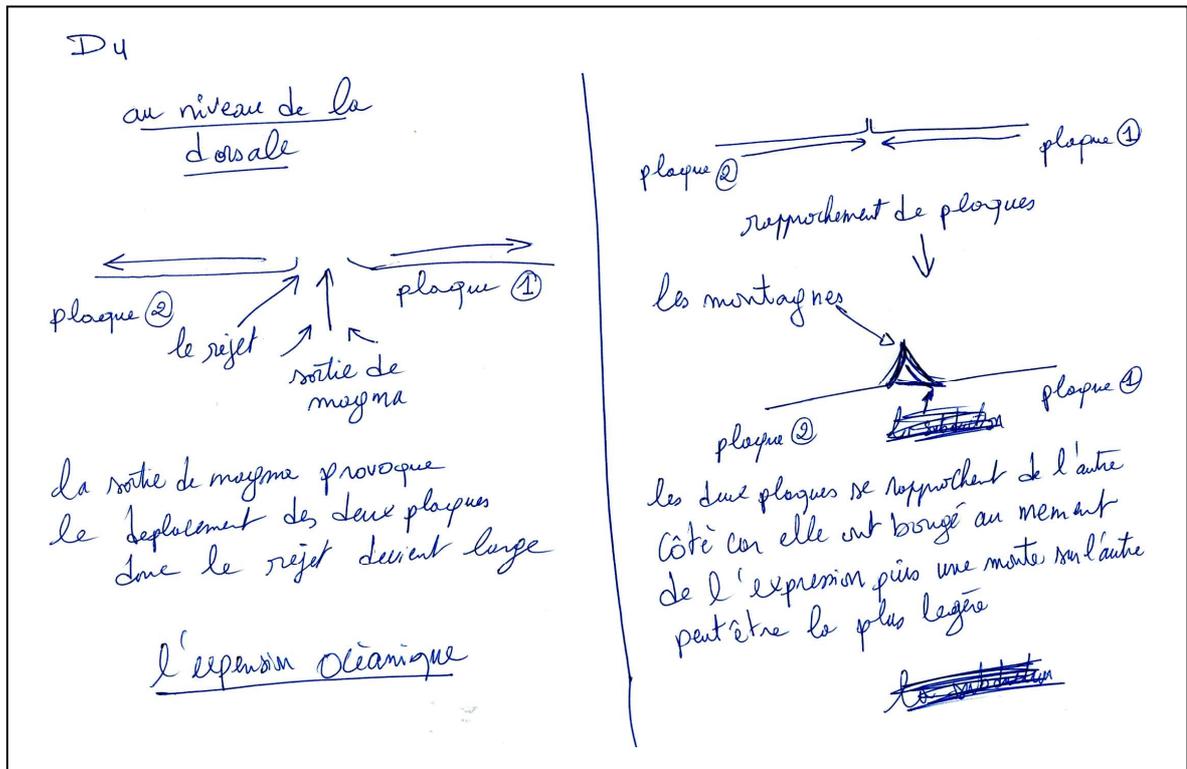


Dessin 9.3 troisième type de dessin pour l'explication du maintien de l'équilibre dynamique

Le dessin est réalisé sous la forme d'un cercle (marqué par les flèches qui montrent le sens du mouvement des plaques). Par comparaison au dessin précédent rien ne montre sur ce dessin que les phénomènes se succèdent dans le temps ni qu'ils sont simultanés. On distingue deux phénomènes majeurs qui se réalisent : l'expansion d'un côté et la subduction de l'autre côté. Ainsi pour ce groupe d'élèves l'équilibre est établi en profondeur, ils utilisent sur le dessin le mot « le manteau ».

Contrairement aux deux autres dessins ce groupe d'élèves fait figurer deux plaques seulement, dans la réalisation du mécanisme, intégrant les deux phénomènes mais vus en terme de mouvements antagonistes et non pas en terme de gain et de perte en matière lithosphérique et donc non pas en terme d'espace positif qui se crée et d'espace négatif en voie de disparition. Ces deux plaques subissent les deux phénomènes dans les deux coins opposés de l'espace. On peut supposer que la focalisation faite par l'élève sur le mécanisme, inhibe la mobilisation d'une vue globale de l'espace et limite l'espace en deux plaques.

3.1.4 Analyse du quatrième type de dessin 4

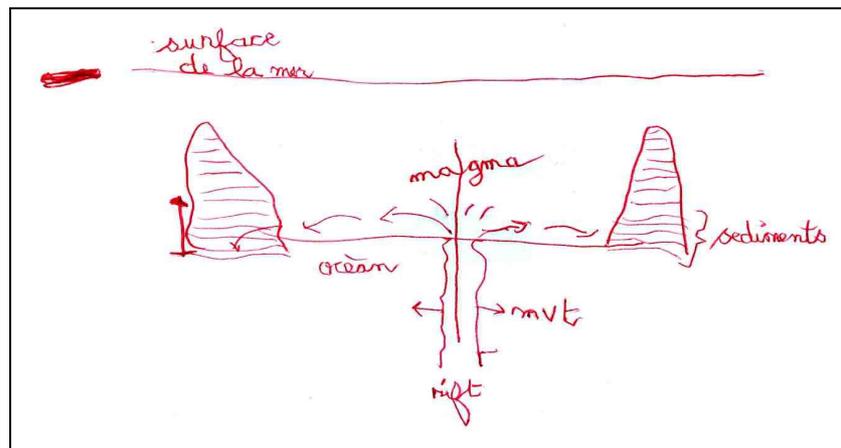


Dessin 9.4 quatrième type de dessin pour l'explication du maintien de l'équilibre dynamique

Il s'agit de deux dessins faits séparément. Dans le premier dessin l'élève explique l'expansion océanique et dans le deuxième dessin il explique la convergence de plaques. L'élève montre par les flèches le sens du mouvement des plaques. Il ne dessine pas le globe terrestre et ne réunit pas les deux phénomènes sur un même espace. Les deux phénomènes sont séparés sur le papier mais ils sont reliés dans la nature cela figure dans les commentaires qui accompagnent les deux dessins : « la sortie de magma provoque le déplacement des deux plaques donc le rift devient large » et « les deux plaques se rapprochent de l'autre côté car elles ont bougé au moment de l'expansion puis une montagne sur l'autre peut être la plus légère ». Ces élèves ont une tendance à une dissociation des phénomènes ou encore une « séquentialisation des phénomènes » (Viennot, 1993, 1996 ; C. Orange, D. Orange, 1995 ; D. Orange, 2000). Sur le dessin rien ne montre si les deux phénomènes se succèdent dans le temps ou s'ils se déroulent simultanément. La subduction ne figure pas sur le dessin mais elle est exprimée dans le commentaire. Sur le dessin les élèves proposent un autre phénomène, qui pour eux, pourrait naître suite au rapprochement de plaques comme conséquence à l'effet de la subduction et qui a pour effet

la correction de l'augmentation de la lithosphère: c'est la formation des chaînes de subduction. Ainsi pour ce groupe d'élèves l'équilibre peut être établi en altitude, la matière qui se crée d'un côté ne doit pas forcément disparaître elle peut rester en surface accumulée sous la forme de chaînes de montagnes. Ceci nous rappelle la même conception rencontrée au dessin 1.

3.1.5 Analyse de cinquième type de dessin



Dessin 9.5 cinquième type de dessin pour l'explication du maintien de l'équilibre dynamique

Le dessin est réalisé dans le plan de la dorsale. L'élève dessine deux plaques qui divergent pour permettre au magma de se déposer sur les deux bords mais les sédiments se déposent les uns sur les autres dans une direction verticale formant par accumulation des couches en hauteur. Ces couches forment des montagnes. Le phénomène de convergence de plaques est absent sur le dessin. Ainsi pour ce groupe d'élèves l'accrétion est corrigée par la sédimentation et l'augmentation de l'espace à l'horizontale est compensée par la création d'un espace dans une direction verticale. L'espace positif et l'espace négatif sont tout les deux absents.

Récapitulation

Les dessins	Type1	Type2	Type3	Type4	Type5
Nombre de production	02	02	02	01	02
Le temps de réalisation	Absent	Absent	Absent	Absent	Absent
Schématisation de l'espace	Se réduit à la dorsale	Schéma sous la forme d'un cercle	Schéma sous la forme d'un cercle	Se réduit à la dorsale	Se réduit à la dorsale
L'articulation des phénomènes	Une mise en histoire	Une mise en histoire	N'est pas claire	séquentialisation	N'est pas claire
Le maintien de l'équilibre lithosphérique	Par la formation de chaînes de montagnes par plissement en surface	Par la subduction en profondeur	Par la subduction en profondeur	Par la formation des chaînes de subduction en surface	Par la formation de chaînes de montagnes par sédimentation au niveau de la dorsale en surface

Tableau 9.3 tableau récapitulatif des différents types de dessin expliquant le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre

En comparant les différents schémas réalisés par les élèves nous remarquons que lorsque l'élève représente l'espace par un schéma linéaire, le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface est rétabli par la formation des chaînes de montagnes, alors que lorsque l'espace est représenté sur un cercle le maintien de l'équilibre lithosphérique est rétabli par la subduction en profondeur. **Cela nous mène à penser que la conceptualisation de la forme de l'espace impose le type de mécanisme qui maintient l'équilibre lithosphérique.** C'est-à-dire la mobilisation d'un espace linéaire est liée à des phénomènes qui se réalisent en surface et quand l'espace mobilisé est schématisé par une forme circulaire les phénomènes se déroulent en profondeur.

Nous pouvons conclure que la problématisation du maintien de l'équilibre lithosphérique s'accompagne par:

- Une absence du temps géologique dans la majorité des productions.
- Une inhibition de la perception de l'espace globale l'élève schématise l'espace de réalisation du phénomène en dehors du cadre de l'espace globale: une tendance à réduire l'espace à la dorsale.

- La correction d'un gain en matière lithosphérique par une perte dans les zones de subduction ne représente pas l'unique solution pour le maintien de l'équilibre dynamique global.
- Certains élèves articulent l'accrétion à la subduction dans un enchaînement causal.
- L'augmentation de l'espace à l'horizontal est corrigé par une migration du matériel dans une direction verticale non pas en profondeur mais à la surface soit par plissement soit par sédimentation.
- L'espace positif qui se crée et l'espace négatif qui est en voie de disparition sont tous les deux absents.
- Le temps cyclique et absent, les élèves procèdent par une mise en histoire.

3.2 L'analyse de la discussion à la suite du travail des dessins

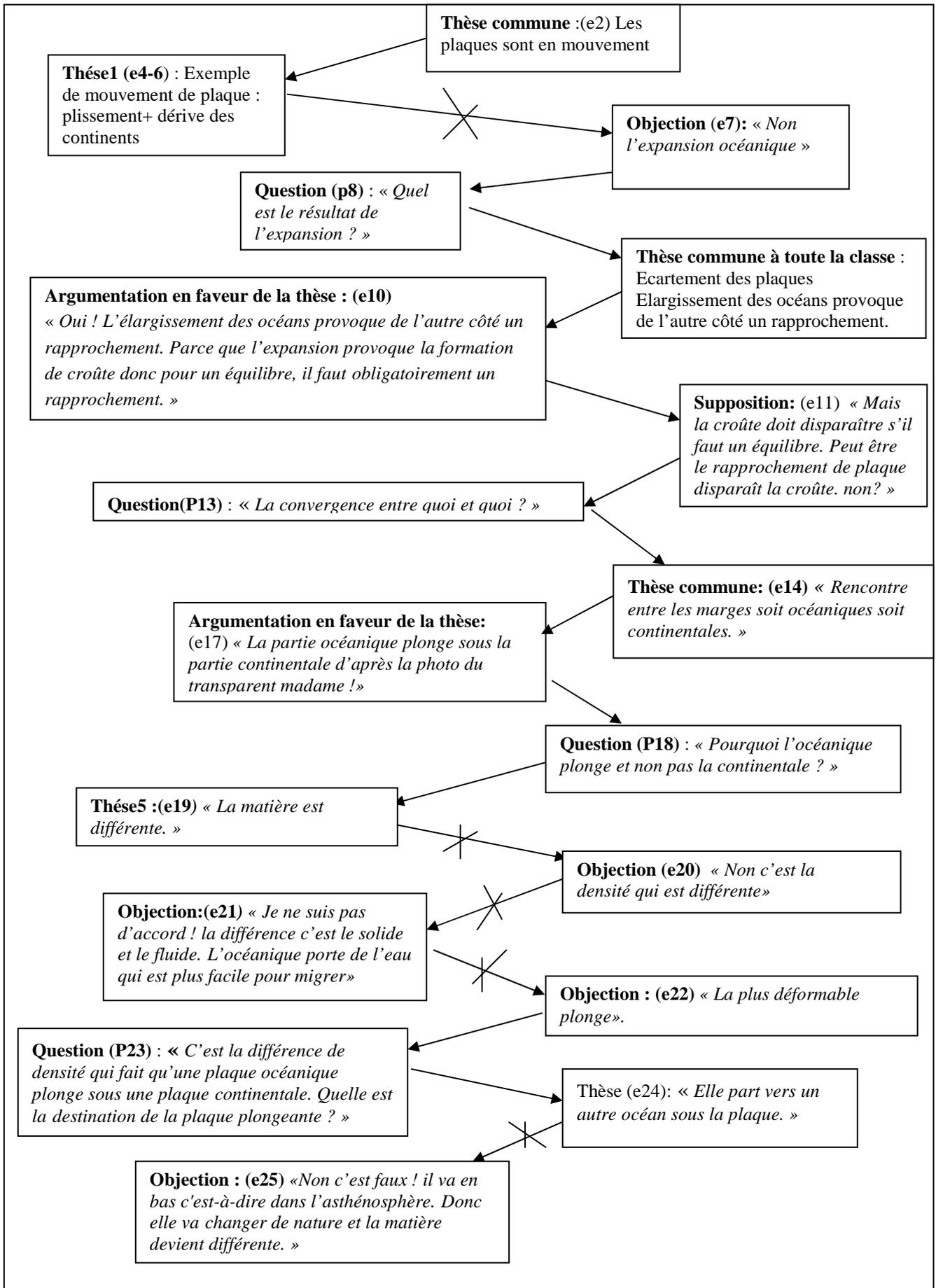
L'analyse des discussions est focalisée sur trois points : la prise en compte de la nécessité du maintien de l'équilibre dynamique, le type du mécanisme proposé comme solution pour rétablir l'équilibre perturbé par l'accrétion et la mise en valeur du couple accrétion-subduction. Il s'agit d'une étude de cas. Les discussions mettent bien en jeu différents points de vue, qui se contredisent, expriment le doute et le problématique. En référence à Orange.C, Lhoste.Y et Orange.D (2007) sur l'argumentation, la problématisation et la construction de concepts en classe de sciences nous allons discuter les relations entre problématisation et l'utilisation de « du couple accrétion subduction » au cours de la construction de la nécessité d'un équilibre géodynamique. Nous allons, selon le problème travaillé, présenter l'épisode en structure puis nous allons l'analyser pour construire les espaces de contraintes que construisent les élèves au cours du débat sur un problème de fonctionnement. Ces espaces de contraintes comparés aux espaces de contraintes construits par ces scientifiques actuels vont permettre de mettre en évidence les difficultés qui apparaissent au cours du constructivisme au sein d'une situation problème.

3.2.1 Episode argumentatif sur l'équilibre géodynamique et le couple accrétion subduction dans la première classe.

3.2.1.1 Structure de l'épisode.

Ce premier épisode est composé de 28 interventions (1 à 28). Nous désignons l'élève qui participe par (e) avec son intervention dans le débat en chiffre exemple : (e2) (Annexe 10).

Figure 9.1 : Structure argumentative de l'épisode sur la nécessité de l'équilibre dynamique et le couple accréation- subduction dans la première classe



3.2.1.2 Analyse de l'épisode argumentatif sur l'équilibre géodynamique et le couple accréation subduction dans la première classe

Le mouvement des plaques est supposé évident pour toute la classe dans la mesure où il a été établi lors de l'étude de l'expansion océanique au niveau de la dorsale même si dans ce cas le mouvement est divergent, mais ce qui fait la différence entre les élèves et divise les opinions, se sont les types de mouvements proposés par les élèves. (Annexe 10)

3	<i>p</i>	<i>Donnez un exemple de mouvement de plaque.</i>
4	<i>houssem</i>	<i>Les plissements</i>
5	<i>walid</i>	<i>La marais</i>
6	<i>houssem</i>	<i>La dérive des continents</i>
7	<i>takwa</i>	<i>Non l'expansion océanique</i>

L'objection qui propose comme résultat l'expansion océanique, l'emporte dans le discours et la dérive des continents n'est plus évoquée dans le reste de la discussion, et toute la classe s'est mise d'accord d'une part sur l'expansion et d'autre part sur le déséquilibre lithosphérique provoqué par l'expansion océanique contribuant à l'élargissement des océans et sur la nécessité de rétablir l'équilibre lithosphérique. Ils proposent ainsi un rapprochement des plaques de l'autre côté : (e10) *«Oui ! L'élargissement des océans provoque de l'autre côté un rapprochement. Parce que l'expansion provoque la formation de croûte donc pour un équilibre, il faut obligatoirement un rapprochement.»*

Dans cet enchaînement cohérent des idées les élèves arrivent à admettre la nécessité d'une disparition de la lithosphère pour rétablir l'équilibre. Ils proposent ainsi la subduction comme solution au problème du déséquilibre lithosphérique : (e11) *«Mais la croûte doit disparaître s'il faut un équilibre. Peut être le rapprochement de plaque disparaît la croûte. Non? »* Il ya du doute pour la validité de cette proposition, mais aussitôt le modèle proposé est validé par un recours à un document possédant le statut d'autorité : le transparent présenté par le professeur : (e17) *« La partie océanique plonge sous la partie continentale d'après la photo du transparent madame ! »*

Dans l'explication de la subduction une controverse s'installe autour du facteur responsable de la disparition de la plaque océanique.

18	<i>p</i>	<i>Pourquoi l'océanique plonge et non pas la continentale ?</i>
19	<i>Takwa</i>	<i>La matière est différente</i>
20	<i>Walid</i>	<i>Non c'est la densité qui est différente</i>
21	<i>Housseem</i>	<i>Je ne suis pas d'accord ! la différence c'est le solide et le fluide. L'océanique porte de l'eau qui est plus facile pour migrer</i>
22	<i>Amira</i>	<i>La plus déformable plonge.</i>
23	<i>p</i>	<i>C'est la différence de densité qui fait qu'une plaque océanique plonge sous une plaque continentale. Quelle est la destination de la plaque plongeante ?</i>

Lorsque le professeur demande de préciser la destination de la plaque plongeante, la conception continentaliste émerge de nouveau chez un élève : (e24): « *Elle part vers un autre océan sous la plaque.* » comme si lorsque la plaque plonge sous une autre elle glisse et se déplace vers un autre océan. Cette intervention montre bien que l'élève suppose que les plaques flottent sur l'eau. Mais une objection par un autre élève s'oppose à cette idée est acceptée par le reste de la classe et clôture la discussion: (e25) « *Non c'est faux ! il va en bas c'est-à-dire dans l'asthénosphère. Donc elle va changer de nature et la matière devient différente.* ».

Nous pouvons conclure pour cette première discussion qu'une seule thèse est étayée et présente les nécessités suivantes :

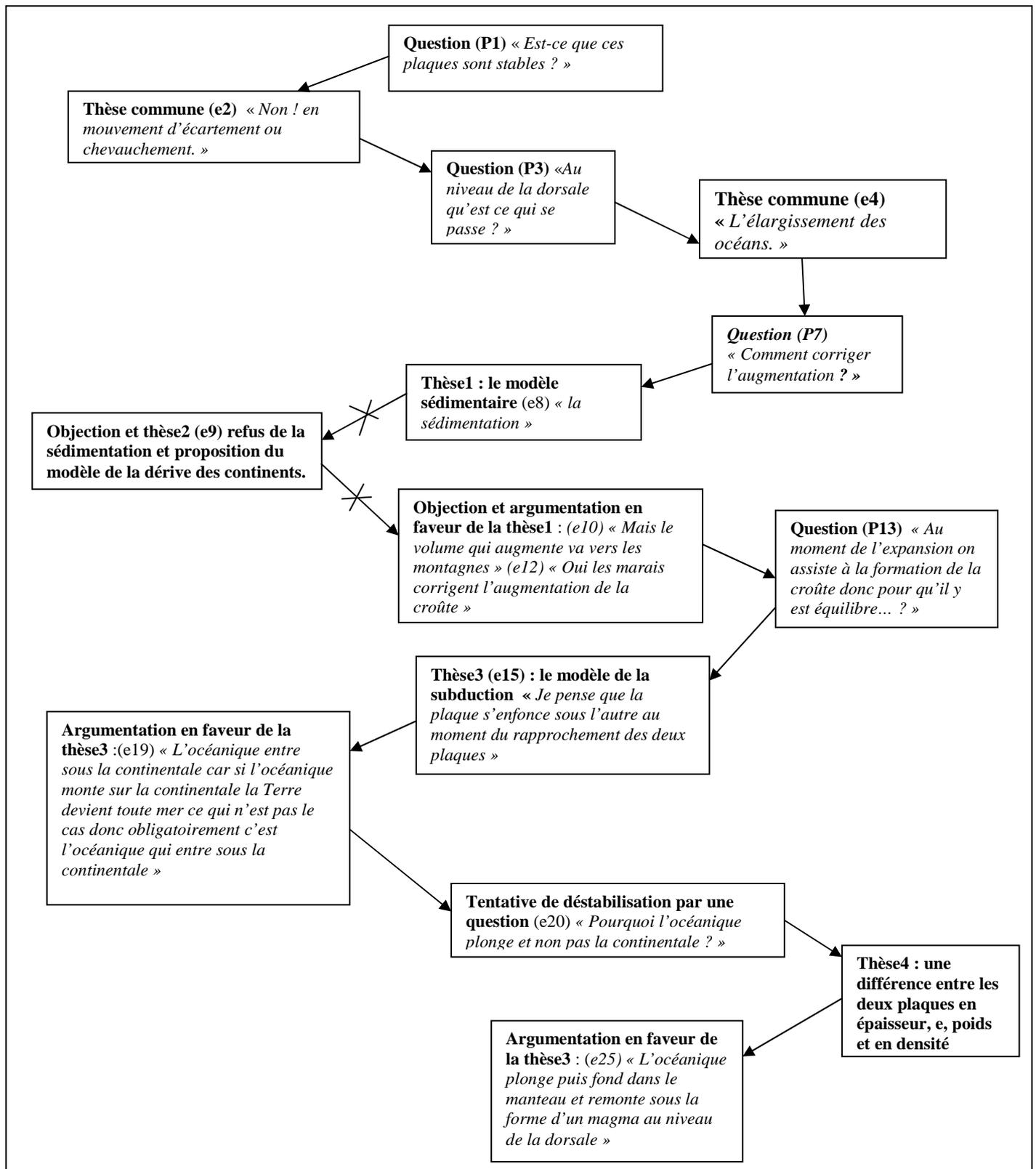
- L'expansion océanique favorise la formation de la croûte lithosphérique ce qui provoque le déséquilibre lithosphérique à la surface de la Terre.
- Le maintien de l'équilibre lithosphérique est obligatoire.
- La subduction, grâce à la disparition de la matière lithosphérique au niveau de l'asthénosphère corrige le déséquilibre lithosphérique.

Il faut noter que dans cette discussion, la subduction est liée à l'accrétion dans un enchaînement de cause à effet. La subduction vient comme une solution rétablissant un équilibre déjà interrompu par l'accrétion.

3.2.2 Episode argumentatif sur l'équilibre géodynamique et le couple accrétion subduction dans la deuxième classe.

3.2.2.1 Structure de l'épisode

Figure 9.2 : Structure argumentative de l'épisode sur la nécessité de l'équilibre dynamique et le couple accréation- subduction dans la deuxième classe



3.2.2.2 Analyse de l'épisode argumentatif sur l'équilibre géodynamique et le couple accréation subduction dans la deuxième classe

Un accord s'installe au début de la discussion sur le mouvement des plaques qui est supposé évident pour toute la classe il en est de même pour le résultat observé au niveau de la dorsale :

1	<i>p</i>	<i>Puisque la plaque ne peut pas être continentale donc l'activité sismique et volcanique est au niveau de l'océan. Donc au niveau de la marge de la plaque. Est-ce que ces plaques sont stables ?</i>
2	<i>Oumayma</i>	<i>Non ! en mouvement d'écartement ou chevauchement.</i>
		<i>Un silence</i>
3	<i>P</i>	<i>Au niveau de la dorsale qu'est ce qui se passe ?</i>
4	<i>Rihab</i>	<i>L'élargissement des océans.</i>
5	<i>Olfa</i>	<i>L'écartement des plaques</i>
6	<i>Insaf</i>	<i>L'océan s'agrandit</i>

Comme réponse à la question posée par le professeur « **Comment corriger l'augmentation ?** » une première thèse est présentée comme solution corrigeant l'augmentation de la surface terrestre (e8) « *la sédimentation* » (e10) « *Mais le volume qui augmente va vers les montagnes* » (e11) « *Le volume n'augmente pas c'est un cycle, car l'eau transporte les sédiments... (a été interrompu)* » (e12) « *Oui les marais corrigent l'augmentation de la croûte* »

Cette thèse est construite par analogie au modèle sédimentaire dans la mesure où les élèves évoquent la sédimentation, l'action de l'eau comme facteur d'érosion, et proposent comme solution pour le problème de l'augmentation de la lithosphère dans « l'espace horizontal », l'accumulation du matériel lithosphérique dans « une direction verticale » contribuant à la formation de montagnes. Les élèves n'évoquent pas le mouvement divergent des plaques qui permet au matériel magmatique de se déposer et de ce fait ils ne proposent pas le rapprochement de plaques ni la perte de matière lithosphérique pour corriger le déséquilibre.

Une objection à la thèse 1 fait virer le débat vers la nécessité d'un mouvement convergent corrigeant l'équilibre perturbé suite au mouvement divergent. En effet dans cette objection l'élève argumente son point de vue en se basant sur la constance de la surface actuelle du globe Terrestre pour prouver l'invalidité de la thèse1 comme suit : (e9) « *Non si la sédimentation existe la forme des continents change et on a une autre forme du globe mais comme ils se sont séparés il y a une probabilité que de l'autre côté se rapprochent* ».

L'élève évoque ainsi la nécessité de deux mouvements complémentaires permettant de maintenir l'équilibre géodynamique au sein d'un couplage (divergence- convergence) et non pas en terme de création et perte du matériel lithosphérique mais se sont les continents qui se déplacent (le modèle de la dérive des continents). Une troisième thèse propose la subduction comme solution pour rétablir l'équilibre lithosphérique.

13	<i>P</i>	<i>Au moment de l'expansion on assiste à la formation de la croûte donc pour qu'il y est équilibre... ?</i>
14	<i>Khawla</i>	<i>Il faut obligatoirement un rapprochement</i>
15	<i>Rihab</i>	<i>Je pense que la plaque s'enfonce sous l'autre au moment du rapprochement des deux plaques</i>

L'argumentation en faveur de la nouvelle thèse repose sur un raisonnement par l'absurde dans la mesure où pour prouver que la lithosphère continentale ne peut pas glisser en aucun cas sous la lithosphère océanique l'élève se base sur l'aspect externe actuel de la surface du globe comme suit : (e19) « *L'océanique entre sous la continentale car si l'océanique monte sur la continentale la Terre devient toute mer ce qui n'est pas le cas donc obligatoirement c'est l'océanique qui entre sous la continentale* ». La référence au modèle actuel de la surface de la Terre reconforte le modèle explicatif et le rend cohérent et admis par toute la classe malgré que cette explication ne fasse pas appel au gradient de densité.

Une tentative de déstabilisation du modèle explicatif apparaît par une question posée par un élève qui n'est ni du côté du proposant ni du côté de l'opposant, mais exprime le doute et le problème. (Plantin, 1996): (e20) : « *Pourquoi l'océanique plonge et non pas la continentale ?* ».

Les élèves expliquent par la différence de densité, du poids et de l'épaisseur.

20	<i>Haïthem</i>	<i>Pourquoi l'océanique plonge et non pas la continentale ?</i>
21	<i>Maïssa</i>	<i>L'épaisseur peut être de l'océanique est supérieure à la continentale.</i>
22	<i>Haïthem</i>	<i>Le poids de l'océanique est supérieur car on lui ajoute le poids de l'eau par rapport à la continentale</i>
23	<i>Manel</i>	<i>C'est la densité car l'océanique est plus dense que la continentale peut être parce qu'elle est formée de roche magmatiques.</i>

Une deuxième tentative de déstabilisation du modèle explicatif vient d'une deuxième question posée par le même élève : (e24) d'un ton ironique: « *Ok ! ok ! Si elle plonge sous la continentale, Où part cette plaque ? Elle la soulève ?* ». Une élève reprend le modèle de la subduction proposée dans la troisième thèse pour expliquer la destination de la plaque plongeante. L'élève explicite d'avantage le modèle de la subduction en évoquant la perte de la matière lithosphérique de nature océanique par fusion dans le manteau.

L'élève relie la subduction à l'accrétion dans un enchaînement cyclique de création et perte de la lithosphère en évoquant dans son explication la remonté du matériel fondu sous la forme d'un magma au niveau de la dorsale (e25) « *L'océanique plonge puis fond dans le manteau et remonte sous la forme d'un magma au niveau de la dorsale* ». Néanmoins, la simultanéité des deux phénomènes (accrétion-subduction) est absente.

Nous pouvons conclure qu'au cours de cette deuxième discussion, on assiste à une progression dans la conceptualisation du mécanisme qui permet de rétablir l'équilibre lithosphérique interrompu par l'accrétion au niveau de la dorsale, dans la mesure où la discussion commence par un modèle sédimentaire, puis on passe au modèle de la dérive des continents pour arriver à la fin de la discussion au modèle du couple accrétion-subduction.

3.2.3 Récapitulation de l'analyse selon le mode de raisonnement adopté en vers « l'équilibre lithosphérique »

Au cours des discussions faites nous remarquons la mobilisation des idées suivantes:

- Pour la majorité des élèves le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre est nécessaire et obligatoire.
- L'équilibre lithosphérique à la surface est vu en terme de **mouvements antagonistes** (convergence et divergence) et n'est pas vu en terme de création et perte de matière lithosphérique sauf pour deux élèves (Amira classe1 et Rihab classe2).
- La divergence de plaque au cours de l'accrétion constitue une perturbation de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre par création de matière lithosphérique.
- La correction de la perturbation lithosphérique peut se faire de plusieurs façons c'est-à-dire l'articulation de l'accrétion à la subduction ne représente pas la solution unique.
- Les élèves supposent que la convergence est la conséquence de la divergence de plaque. En pensant de cette façon, les deux phénomènes sont liés dans un enchaînement de cause à effet par une mise en histoire, en terme de simple mouvement à la surface et non pas en terme de création d'espace par accrétion et perte d'espace par subduction.

Nous résumons ces trois catégories dans le tableau suivant :

Les conceptions qui ont dominé dans les discussions faites			
Les caractéristiques	Catégorie 1 Maïssa	Catégorie 2 Amira	Catégorie 3 Khaoula
La nécessité d'un équilibre dynamique	Présente	Présente	présente
Le temps utilisé	un temps nécessaire pour une sédimentation	Un temps sagittal la subduction est une conséquence de l'accrétion	Un temps sagittal la convergence des continents est une conséquence de la divergence
L'espace utilisé	Espace géologique	Un espace géologique	Un espace géographique
La nécessité du couple accrétion subduction	Il n'est pas nécessaire que la création de la matière soit corrigée par une disparition de matière lithosphérique au cours de la subduction.	C'est la solution proposée pour le maintien de l'équilibre	absente
Le mécanisme rétablissant l'équilibre	Accumulation des sédiments formant des montagnes Un modèle sédimentaire	le couplage de l'accrétion à la subduction qui maintient le système Terre dans un état d'équilibre (gain et perte de la lithosphère)	Mouvements divergent et convergent sans parler de gain ni de perte de matière Modèle de la dérive des continents

Tableau 9.4 tableau récapitulatif des conceptions dominantes au cour des discussions

Nous présentons les espaces de contraintes des trois catégories de réponses comme suit :

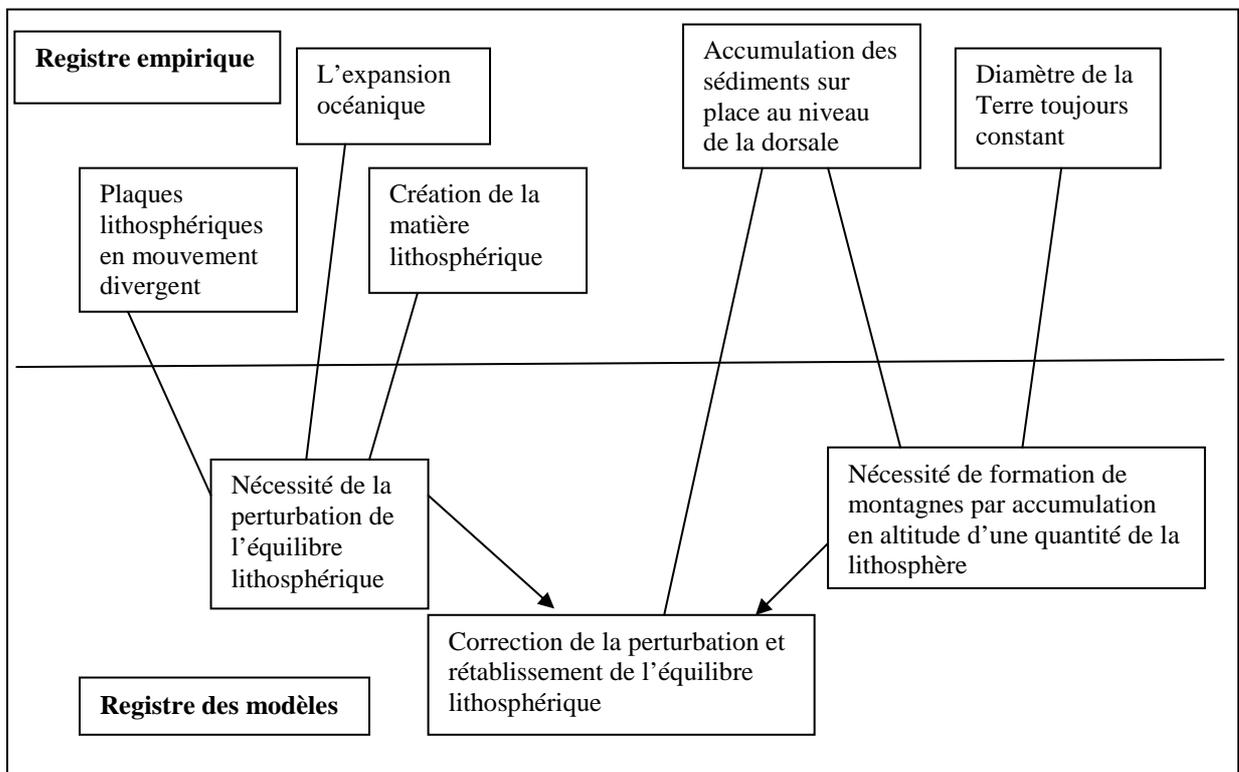


Figure 9.3 l'espace de contraintes pour la catégorie1 (cas de Maïssa) pour le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre.

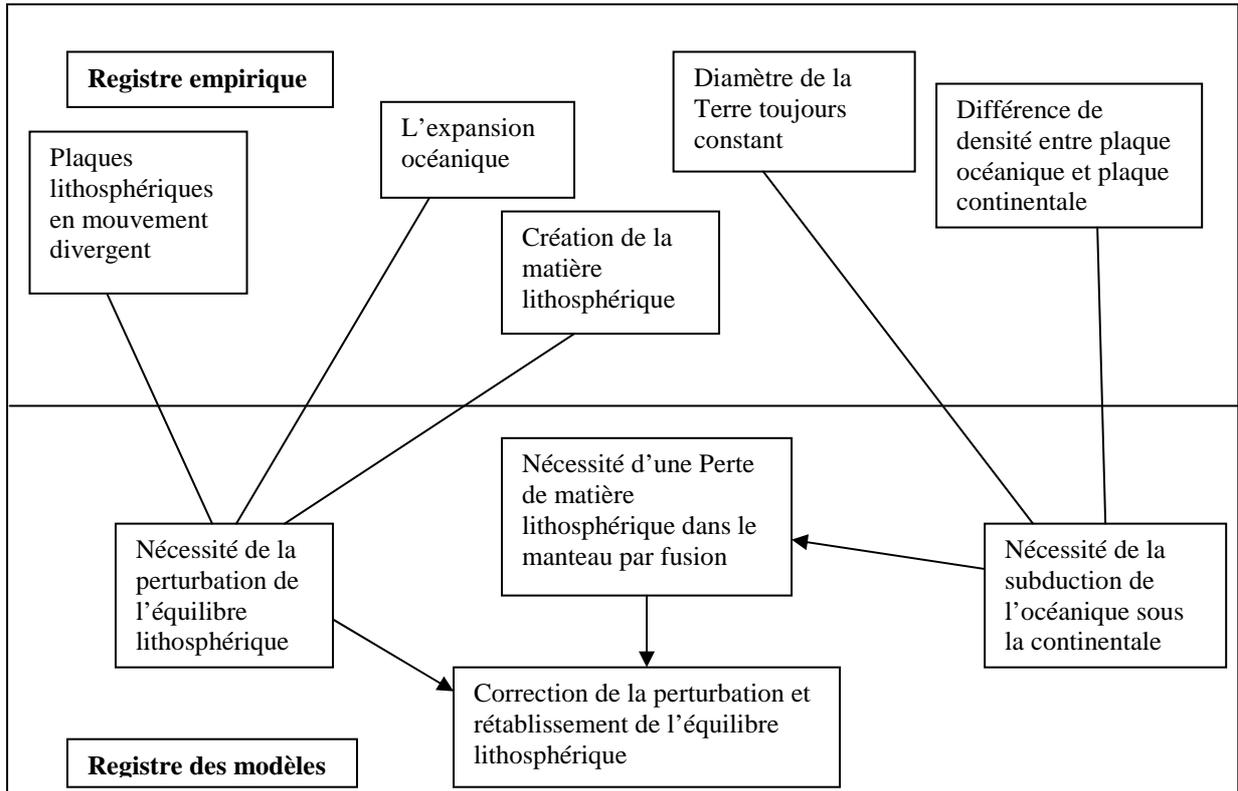


Figure 9.4 l'espace de contraintes pour la catégorie2 (cas d'Amira) pour le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre.

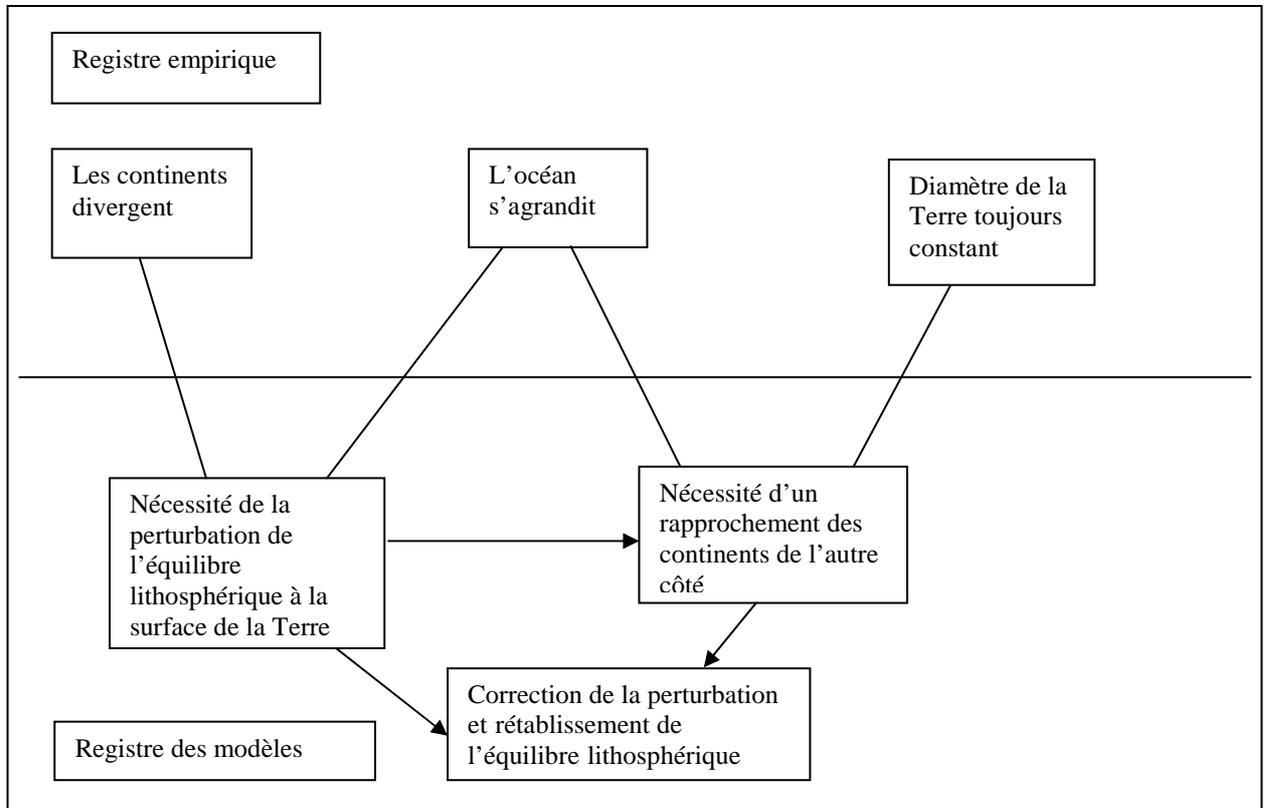


Figure 9.5 l'espace de contraintes pour la catégorie3 (cas de khaoula) pour le maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre.

4 Conclusion

Nous pouvons conclure que la constance du diamètre de la Terre est évidente pour tous les élèves et que le maintien de l'équilibre lithosphérique est obligatoire mais il n'est pas toujours vu en termes de gain et de perte de matière lithosphérique ce qui rend l'articulation de l'accrétion à la subduction sans importance et ne représente pas la solution unique pour le maintien de l'équilibre lithosphérique. Nous pensons que la difficulté à penser le maintien de l'équilibre lithosphérique en terme de gain et perte de matière est lié à la conceptualisation de l'espace, dans la mesure où l'absence de l'utilisation de l'espace qui se crée (que nous qualifions d'espace positif) et de l'espace qui disparaît ('espace négatif) explique le non recours à la subduction comme solution correctrice de l'accrétion.

Les deux discussions aboutissent à l'idée que l'accrétion perturbe l'équilibre lithosphérique par création de matière au niveau des dorsales et c'est la subduction qui s'impose comme conséquence pour corriger le déséquilibre par perte de matière au niveau des fosses. Les élèves à la fin des discussions lient la subduction à l'accrétion mais dans une succession chronologique et ne recourent pas à la réalisation des deux phénomènes au sein d'un même fonctionnement répétitif dans le temps, ainsi les élèves inscrivent l'équilibre lithosphérique et le couple accrétion-subduction dans un cadre historique linéaire. Nous pensons là aussi que le recours à la mise en histoire pourrait être expliqué par une difficulté à utiliser le temps cyclique qui permet l'articulation des deux phénomènes au sein d'un cycle à caractère répétitif dans le temps et donc qui fonctionnent en dehors de l'histoire, or pour les élèves ces phénomènes font partie de l'histoire de la terre et donc ils se trouvent sur la flèche du temps linéaire c'est ce qui rend l'utilisation du temps cyclique et du concept cycle difficile à admettre. Il reste à voir quel mécanisme sous-jacent permettant l'articulation de l'accrétion à la subduction proposent les élèves? Et dans quels contextes temporels et spatiaux l'inscrivent-ils ?

Chapitre 10
Les courants de convection
Moteur du mouvement des plaques
Analyse didactique de la situation

Introduction

1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu
2. La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur
3. Analyse didactique préliminaire de la situation
4. Conclusion

Introduction

Nous venons d'étudier dans le chapitre précédent la conceptualisation de l'équilibre lithosphérique par les élèves et la nécessité du couple accréation subduction dans le but de maintenir cet équilibre. Dans ce qui suit nous allons étudier quel mécanisme sous-jacent proposent les élèves pour expliquer la simultanéité des deux processus se déroulant à la surface. Cette situation s'articule à la situation qui la précède et la complète dans la mesure où elle s'intéresse aux courants de convection ; moteur responsable du mouvement des plaques à la surface. Le manuel scolaire (édition 2006, p.312) n'indique pas d'activité claire pour cette partie. (Voir annexe 2)

1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu

La situation de classe mise en place vient après que des activités ont permis aux élèves de se replacer dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques, de construire la notion de plaque lithosphérique, les limites de plaques, l'organisation et le fonctionnement actuel d'une dorsale et de comprendre le couplage accréation–subduction en tant que phénomènes responsables du maintien de l'équilibre dynamique globale.

2. La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur

La situation qui est proposée aux élèves a comme point de départ le couplage de l'accréation à la subduction. Le professeur a d'abord rappelé que la création de la matière lithosphérique au niveau de la dorsale est compensée par une disparition de lithosphère au niveau des fosses par la subduction. C'est une façon de remobiliser ce qui a été précédemment travaillé avec la classe et d'installer la consigne à suivre dans un cadre bien identifié des élèves. Ensuite, le professeur propose la question suivante :

Qu'est ce qui fait bouger les plaques à la surfaces et contribue à leur rapprochement et donc à la réalisation d'un phénomène de subduction ou à leur écartement et donc à la réalisation d'un phénomène d'accréation et l'élargissement de l'océan ?

Il s'agit donc d'expliquer la cause ou le moteur du mouvement des plaques. La mise en place du matériel mantellique au niveau de la dorsale, la variation de la température et de la pression, la disparition de la lithosphère d'un côté et sa création de l'autre côté, devraient

être gérés par un processus tel que les courants de convection. En fait, nous allons rechercher quel mécanisme explicatif proposent les élèves qui rend compte du mouvement des plaques lithosphériques à la surface, de l'accrétion au niveau des dorsales et de la plongée dans les zones de subduction.

La réponse attendue est conforme au savoir actuel, construit dans le cadre théorique de la tectonique des plaques. Elle exprime l'idée de l'équilibre dynamique de la Terre par le jeu compensé de l'accrétion et de la subduction, C'est un état constant mais à la fois dynamique:

Le professeur demande donc aux élèves de proposer soit par écrit ou par un dessin un mécanisme qui permet de faire bouger les plaques lithosphériques à la surface, au sein d'un travail de groupe avant de passer à la discussion. Le professeur prévoit une correction collective de cette partie.

3. Analyse didactique préliminaire de la situation

Dans notre étude sur le fonctionnement, cette situation de classe nous intéresse. Elle peut permettre de comprendre comment les lycéens prennent en compte le couplage accrétion-subduction (deux phénomènes affectant les plaques qui s'inscrivent dans le temps et dans l'espace), et dans quelle mesure ils parviennent à construire la nécessité d'un mécanisme explicatif pour la réalisation de ces deux phénomènes géologiques dans le but du maintien de l'équilibre dynamique.

3.1. Un cadre « mantellique »

Dans le chapitre 9 nous avons essayé de comprendre comment les élèves expliquent le maintien de l'équilibre dynamique à la surface du globe par l'articulation de deux phénomènes : accrétion au niveau de la dorsale et subduction au niveau de la fosse océanique. Ces deux phénomènes se déroulent simultanément dans le temps pour conserver un équilibre lithosphérique spatial. Le problème proposé maintenant, représente la suite de ce qui a été travaillé avec les élèves c'est-à-dire une recherche du mécanisme sous jacent qui permet de maintenir l'équilibre dynamique. Sur le plan didactique ce problème nécessite une articulation entre ce qui se passe à la surface avec ce qui se passe en profondeur c'est-à-dire au niveau du manteau. Le but est de chercher un mécanisme qui se déroule au niveau du manteau et qui a pour conséquence en surface le couple accrétion

subduction. L'élève doit prendre en compte :

- un raisonnement dans deux types d'espace un espace lithosphérique et un espace mantellique.
- un cadre temporel qui permet la simultanéité dans la réalisation des deux phénomènes à la surface au sein d'un même mécanisme.
- les conditions physicochimiques auxquelles obéit le matériel mantellique et qui gèrent le fonctionnement des courants de convection.

3.2 L'espace des contraintes pour les courants de convection dans le contexte de l'activité

Il faut rappeler qu'il existe deux modes de transmission du flux de chaleur vers l'extérieur :

- La conduction qui est le transfert de chaleur d'une surface chaude vers une surface froide par contact direct entre ces deux dernières (à la manière d'une plaque chauffante sur laquelle on met une casserole).
- La convection qui est le passage de la chaleur vers la surface grâce à des courants qui se déplacent entre un fond chaud et une surface plus froide (à la manière d'une eau chauffant dans une casserole). Si la différence de température est suffisante, le même type de convection, très lent peut affecter un milieu solide mais suffisamment ductile ce qui est le cas de l'asthénosphère. On admet donc que le facteur principal de transfert de chaleur vers l'extérieur est une lente convection dans les roches du manteau. La convection se produit à des profondeurs entre 150 et 700km et influe sur l'évolution de la lithosphère sus-jacente. (M.Lemoine, P.C.De Graciansky, P. Tricart.2000, p.18-19).

Les mouvements des plaques traduisent ceux de l'asthénosphère. Parce que celle-ci est « chauffée – à sa base et perd de la chaleur à son sommet au contact de la lithosphère, les axes des principales cellules de convection y sont horizontaux. Mais de toute manière, les mouvements lithosphériques et asthénosphériques sont couplés. Le déplacement de la matière au niveau de l'asthénosphère du bas vers le haut dans les zones où divergent sous la lithosphère les cellules de convection asthénosphériques permet d'évacuer de la chaleur terrestre vers la surface au niveau des dorsales. Ces endroits correspondent ainsi aux frontières de plaques divergentes. Tandis que les zones où les cellules de convection de la matière asthénosphérique convergent (en se déplaçant de haut en bas) sont associées à la convergence et à la subduction des plaques en surface.

Construire une représentation des courants des convection, dans le cadre de la théorie de la

tectonique des plaques et dans le contexte de l'activité proposée aux élèves, c'est construire la nécessité de courants descendants sous les zones de subduction, la nécessité de courants ascendants sous les dorsales, ainsi que la nécessité d'un gradient de température entre un fond chaud et une surface plus froide au niveau de l'asthénosphère, un milieu solide mais suffisamment ductile, Quelles contraintes empiriques peuvent être articulées à ces nécessités, parmi celles disponibles pour les élèves ?

- La divergence de plaques en surface, la création de la lithosphère au niveau des dorsales suite à une sortie de magma et le flux de chaleur élevé par rapport à la normale sont trois contraintes liées à la nécessité de courants ascendants sous les dorsales.
- La convergence de plaques en surface, et la disparition de la lithosphère au niveau des fosses océaniques sont deux contraintes liées à la nécessité de courants descendants sous les zones de subduction.
- La nécessité de courants ascendants sous les dorsales et la nécessité de courants descendants sous les zones de subduction sont liées à la nécessité d'un gradient de température de haut en bas au niveau de l'asthénosphère.

La figure ci-dessous représente l'espace des contraintes possible ainsi défini :

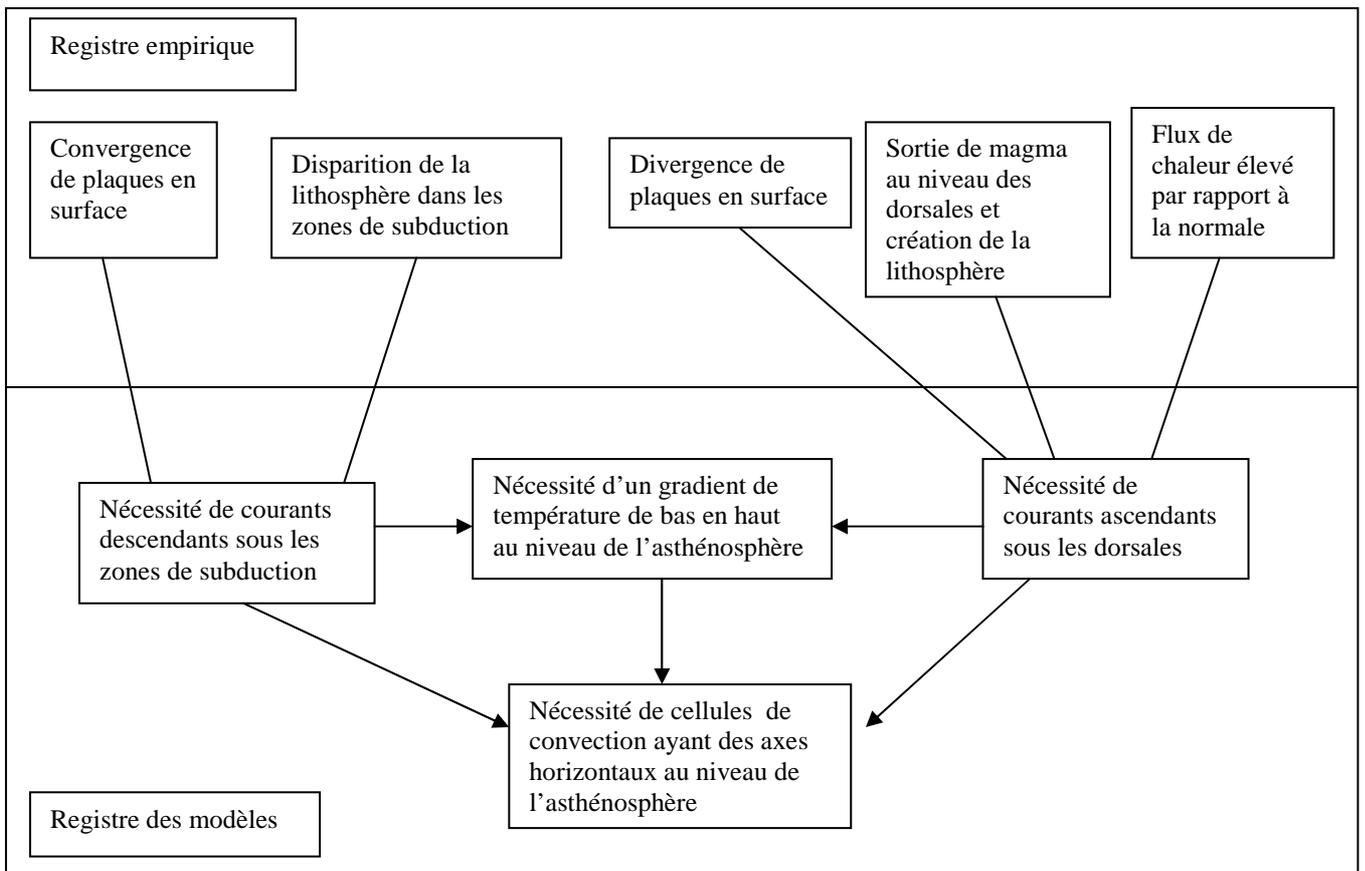


Figure 10.1 L'espace des contraintes possible pour les courants de convection dans le contexte de l'activité

4. Conclusion

La coordination de « l'espace » dans ses différentes directions qui est demandée aux élèves doit les conduire à articuler « l'espace mantellique » à « l'espace lithosphérique », envisageables par la mise en jeu des conditions thermodynamiques. De quelle manière les élèves arriveront-ils à cela ?

Chapitre11

Mouvement de plaques et courants de convection

Explication des élèves et nécessité des mécanismes

Introduction

1. Le recueil des données
2. Procédures d'analyse
3. Conclusion générale de la deuxième étude

Introduction

Dans le chapitre 7, nous avons étudié la problématisation du fonctionnement chez les chercheurs au cours de la construction du mouvement des plaques et du moteur qui y est responsable. Il y a à considérer **l'articulation de l'accrétion à la subduction et la nécessité de l'existence d'un mécanisme sous-jacent : les courants de convection.**

En ce référant à la problématisation du fonctionnement des chercheurs, nous allons analyser les productions des élèves pour comprendre comment ces derniers expliquent le moteur responsable de la simultanéité de la réalisation des deux phénomènes à la surface du globe quels types de mécanismes sous jacents proposent ils ?

1. Le recueil de donnés

Au cours d'une séance de travaux pratiques de deux heures pour chaque groupe, nous avons rappelé aux élèves le problème de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre qui est maintenu par le couple accrétion subduction, nous avons ensuite demandé d'expliquer comment cet équilibre peut il être maintenu en permanence : il est vrai que c'est le fonctionnement en couple (accrétion- subduction) en apparence qui fait que la Terre est un système stable mais ce que nous demandons est d'expliquer quel mécanisme sous- jacent contrôle cette stabilité.

1.2. Les productions écrites des élèves

Il s'agit de dessins par groupe ainsi que quelques phrases qui expliquent le phénomène.

1.3. Les transcriptions de la discussion des élèves

Après avoir terminé les dessins en groupes le professeur entame une discussion collective entre tous les élèves de chaque classe. Nous avons transcrit toutes leurs réponses et leurs suggestions en annexes.

2. Procédure d'analyse

Nous allons analyser les productions des élèves en essayant de voir dans quelle mesure

ils parviennent à construire la nécessité d'un mécanisme explicatif qui se déroule au niveau de l'asthénosphère (les courants de convections) pour la réalisation des ces deux phénomènes géologiques à la surface dans le but du maintien de l'équilibre dynamique.

2.1 Analyse des productions des élèves concernant le moteur du mouvement des plaques

Les productions écrites ou dessins des élèves sont faites au sein d'un travail de groupe (2à3élèves par groupe). Nous avons 13 productions en tout. Nous pouvons les subdiviser en catégories selon le type de mécanisme qui contribue au mouvement des plaques à la surface

Catégorie1 : La sortie de magma au niveau de la dorsale provoque le mouvement des plaques.

Il s'agit de 2 productions. Les élèves se limitent à l'explication de ce qui se passe au niveau de la dorsale. La sortie de magma au niveau du rift provoque un mouvement de divergence de plaques par formation d'une nouvelle croûte océanique. Jusqu'ici il y a un espace positif qui est mobilisé mais ils ne lient pas la création de la lithosphère au niveau de la dorsale à une disparition de la lithosphère au cours de la subduction au niveau des fosses, ils expliquent que la convergence de plaques de l'autre côté n'est qu'un résultat de la divergence. On révèle ainsi l'absence de la nécessité d'une disparition du matériel au niveau des fosses et la non utilisation de l'espace négatif. L'explication se limite au mouvement seulement à la surface on ne voit pas une articulation entre l'espace de surface et l'espace souterrain (mantellique)et donc il est tout à fait normal que les élève n'évoque pas le moteur sous jacent responsable de l'articulation des deux processus. Du côté de l'utilisation du temps, il s'agit d'une mise en histoire, expliquée par l'absence d'un temps cyclique (Groupes : 3 " classe 2, groupe1 classe 1).

kelifi Amani groupe 3''

Le moteur de la tectonique des plaques

L'activité visible du globe terrestre (volcanisme, séisme, un flux de chaleur, un métamorphisme de roches du au hautes températures et aux pressions...) est concentrée, pour l'essentiel, dans des zones étroites qui délimitent de vastes zones tranquilles. Ce découpage en plaques lithosphériques a été mis en évidence par les géologues vers le milieu des années 1960. Au niveau des dorsales océaniques on observe une divergence des terrains (Écartement), leur exploration nécessite la mise en œuvre de moyens d'étude importants: bateau (pour sonder, forer...), sous-marin ... en contre partie on assiste au niveau des fosses océaniques une convergence des terrains (rapprochement). D'après vous qu'est ce qui fait bouger les plaques ?

Proposer un mécanisme que vous supposez être capable de faire bouger les plaques à la surface de la terre.
 Votre réponse peut être sous la forme d'un paragraphe ou d'un dessin.

on peut s'intéresser aux divergences de terrains seulement car on peut déduire que la convergence est le résultat de ~~convergence~~ divergence. et puisque la divergence de plaque se fait au niveau de la dorsale où se trouve la rift qui est se l'origine de la sortie de magma d'où il ya une formation de croûte océanique qui pousse l'ancienne croûte d'où il ya un éloignement de plaque d'une côté d'où la rencontre de plaque de l'autre côté qui est la convergence

Figure11.1 production du groupe 3'' (kelifi Amani) classe2 sur le moteur du mouvement des plaques

6

Le moteur de la tectonique des plaques

L'activité visible du globe terrestre (volcanisme, séisme, un flux de chaleur, un métamorphisme de roches du au hautes températures et aux pressions...) est concentrée, pour l'essentiel, dans des zones étroites qui délimitent de vastes zones tranquilles. Ce découpage en plaques lithosphériques a été mis en évidence par les géologues vers le milieu des années 1960. Au niveau des dorsales océaniques on observe une divergence des terrains (Écartement), leur exploration nécessite la mise en œuvre de moyens d'étude importants: bateau (pour sonder, forer...), sous-marin ... en contre partie on assiste au niveau des fosses océaniques une convergence des terrains (rapprochement). D'après vous qu'est ce qui fait bouger les plaques ?

Proposer un mécanisme que vous supposez être capable de faire bouger les plaques à la surface de la terre.
 Votre réponse peut être sous la forme d'un paragraphe ou d'un dessin.

le fait que les plaques bougent (convergence et divergence) à la surface de la terre on offre le volcanisme et les séisme puis un flux de chaleur c'est son un moteur qui est indispensable, certains pense que d'eau est le moteur ~~son~~ a cause de son déplacement. d'autre pense que les déformation des failles et les plissements a un rôle dans la tectonique des plaques, je pense que l'élévation de température dans l'asthénosphère se qui provoque l'essorie de magma au niveau de dorsale.

on explique ca par la sortie de magma de l'asthénosphère au niveau de la dorsale

Figure11.2 production du groupe 1 (Hanan, omayma, Amira, Ameni, Amel) classe1 sur le moteur du mouvement des plaques

Catégorie2 : Le mouvement du magma sous les plaques les fait bouger

Il s'agit de deux productions. Pour cette catégorie d'élèves, les plaques sont disposées sur du magma. Ainsi ils mobilisent deux figures d'espace : un espace de surface lithosphérique et un espace souterrain asthénosphérique superposés. Sous l'action de la température le magma bouge. Les élèves le comparent à une saucière en mouvement dans une casserole sur le feu et couverte par un couvercle. Le mouvement de bouillonnement (écrit en arabe) dans la casserole fait bouger le couvercle c'est ce qui se passe avec les plaques lorsque le

magma bouge au dessous d'elles. Il s'agit d'un mouvement en profondeur qui est transmis en surface par simple contact entre les deux milieux.

Cette catégorie d'élèves mobilise la subduction dans leur dessin. L'espace négatif cette fois est mobilisé mais il n'est pas lié à l'espace positif représenté sur le dessin et donc le couple accréation subduction n'est pas évoqué d'un côté et la relation existant entre la surface et le manteau ne peut pas avoir un aspect cyclique. Le sens de déplacement du magma n'est pas précisé c'est ce qui d'ailleurs explique l'absence du rapport entre le mouvement asthénosphérique et le couple accréation subduction à la surface. (Groupe 1' et 2 classe 2). Le rapport spatial établi entre l'espace de surface et l'espace mantellique se réduit à une transmission simple de mouvement par contact.

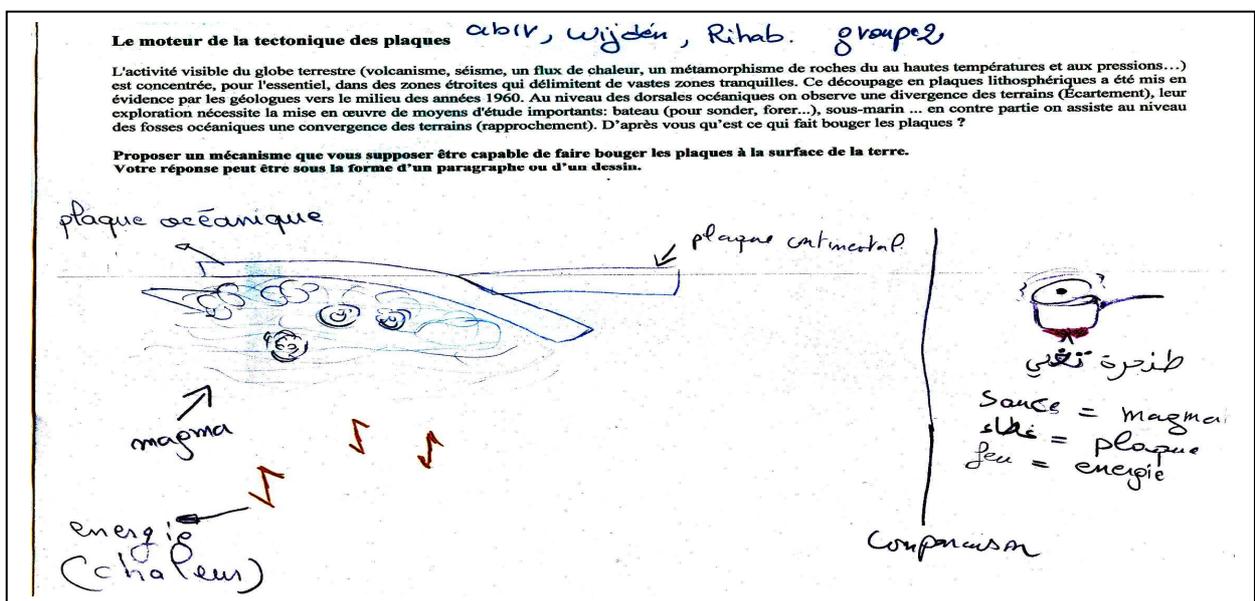


Figure11.3 production du groupe 2 (Abir, Wejden, Rihab) classe2 sur le moteur du mouvement des plaques

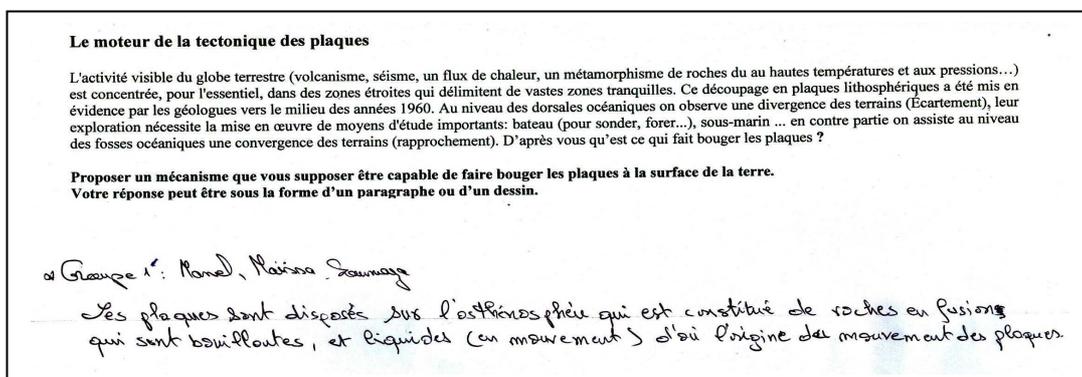


Figure11.4 production du groupe 1' (Manel, maissa et soumaya) classe 2 sur le moteur du mouvement des plaques

Catégorie3 : Les ondes provenant du noyau font sortir le magma qui fait bouger les plaques

Il s'agit de 3 productions. Pour cette catégorie d'élèves une rupture brutale (sans mentionner la cause) des roches au niveau du noyau de la Terre fait naître des ondes qui au cours de leurs propagations subissent une variation de vitesse et qui agissent sur le mouvement de la lithosphère en remontant le magma à la surface. Le mouvement des ondes dans une direction verticale présentée sur le dessin de bas en haut contribue à un mouvement horizontal de plaque à la surface. L'élève utilise deux types d'espace : un espace profond souterrain et un espace de surface. Ces deux espaces sont en relation mais dans un seul sens c'est-à-dire ce qui se passe en profondeur à une influence sur ce qui se produit en surface. Le mouvement vertical en profondeur de bas en haut, se traduit en surface par un mouvement de plaques divergeant. L'élève mobilise une conception liée aux phénomènes sismiques et l'espace négatif est absent. Les élèves n'évoquent pas le couple accréation-subduction, ils se limitent à la sortie du magma au niveau du rift dans leurs dessins. (Groupes 3,4 classe1et le groupe 6 classe 2).

Le moteur de la tectonique des plaques

L'activité visible du globe terrestre (volcanisme, séisme, un flux de chaleur, un métamorphisme de roches du au hautes températures et aux pressions...) est concentrée, pour l'essentiel, dans des zones étroites qui délimitent de vastes zones tranquilles. Ce découpage en plaques lithosphériques a été mis en évidence par les géologues vers le milieu des années 1960. Au niveau des dorsales océaniques on observe une divergence des terrains (Écartement), leur exploration nécessite la mise en œuvre de moyens d'étude importants: bateau (pour sonder, forer...), sous-marin ... en contre partie on assiste au niveau des fosses océaniques une convergence des terrains (rapprochement). D'après vous qu'est ce qui fait bouger les plaques ?

Proposer un mécanisme que vous supposez être capable de faire bouger les plaques à la surface de la terre. Votre réponse peut être sous la forme d'un paragraphe ou d'un dessin.

* hypothèse : le moteur de la tectonique des plaques c'est :
 au profondeur (au niveau du grain solide) il ya un repture brutale des roches ce qui provoque des mouvements d'écartement ou de rapprochement qui affecte le lithosphère . ces mouvements provoqués par des sondes plus au moins fortes : (l'onde L le plus destructrice)

groupe 4:
 Takwa
 Sabrina

Figure11.5production du groupe 4 (Takwa et Sabrina) classe1 sur le moteur du mouvement des plaques

Le moteur de la tectonique des plaques Kefka Nahdi groupe 3

L'activité visible du globe terrestre (volcanisme, séisme, un flux de chaleur, un métamorphisme de roches du au hautes températures et aux pressions...) est concentrée, pour l'essentiel, dans des zones étroites qui délimitent de vastes zones tranquilles. Ce découpage en plaques lithosphériques a été mis en évidence par les géologues vers le milieu des années 1960. Au niveau des dorsales océaniques on observe une divergence des terrains (Écartement), leur exploration nécessite la mise en œuvre de moyens d'étude importants: bateau (pour sonder, forer...), sous-marin ... en contre partie on assiste au niveau des fosses océaniques une convergence des terrains (rapprochement). D'après vous qu'est ce qui fait bouger les plaques ?

Proposer un mécanisme que vous supposer être capable de faire bouger les plaques à la surface de la terre.
Votre réponse peut être sous la forme d'un paragraphe ou d'un dessin.

* hypothèse : La variation de la vitesse des ondes au cours de leur propagation qui ont comme origine le noyau de terre.

Le moteur de la tectonique des plaques est les ondes

Figure 11.6 production du groupe 3 (Kefka et Nahdi) classe 1 sur le moteur du mouvement des plaques

Catégorie 4 : Le gradient de densité et de température entre lithosphère et asthénosphère fait bouger les plaques

Représentée par une seule production. Pour cette catégorie d'élèves le mouvement des plaques à la surface est dû à un déplacement de matière lithosphérique dense à faible température vers l'asthénosphère qui est moins dense à température élevée. Les élèves proposent deux facteurs gouvernant le déplacement de matière (la température et la densité) mais ils se limitent à un seul sens de déplacement de matière (de la lithosphère vers l'asthénosphère), rien n'indique dans la production de cette catégorie qu'un mouvement de matière s'effectue dans le sens inverse. Le couple accréation subduction à la surface et sa liaison avec ce qui se passe au niveau de l'asthénosphère est aussi absent. (groupe 2 classe 1). Cela peut être expliqué par l'absence de l'espace négatif et l'espace positif et la difficulté de les articuler à la manière d'un mécanisme cyclique ; alors les élèves invitent le choc thermique comme solution catastrophique possible pour un phénomène qui ne possède pas de solution en dehors du cadre catastrophiste.

groupe 2: Olfa - Insaif - Asma

Le moteur de la tectonique des plaques

L'activité visible du globe terrestre (volcanisme, séisme, un flux de chaleur, un métamorphisme de roches du au hautes températures et aux pressions...) est concentrée, pour l'essentiel, dans des zones étroites qui délimitent de vastes zones tranquilles. Ce découpage en plaques lithosphériques a été mis en évidence par les géologues vers le milieu des années 1960. Au niveau des dorsales océaniques on observe une divergence des terrains (Ecartement), leur exploration nécessite la mise en œuvre de moyens d'étude importants: bateau (pour sonder, forer...), sous-marin ... en contre partie on assiste au niveau des fosses océaniques une convergence des terrains (rapprochement). D'après vous qu'est ce qui fait bouger les plaques ?

Proposer un mécanisme que vous supposer être capable de faire bouger les plaques à la surface de la terre.
Votre réponse peut être sous la forme d'un paragraphe ou d'un dessin.

- température, densité,
passage de la température de faible densité de lithosphère et plus dense au milieu de
grandes températures élevée et faible densité de l'asthénosphère peut provoquer un
choc thermique qui est un mécanisme qui peut être capable de bouger les plaques et la
à la surface de terre

Figure11.7 production du groupe 2 (Olfa, insaf et asma) classe1 sur le moteur du mouvement des plaques

Catégorie 5 : L'énergie libérée par le magma à forte pression fait bouger les plaques

Représentée par 5 productions. Les élèves parlent d'énergie libérée par le magma lorsqu'il est soumis à de fortes températures et de fortes pressions. Cette énergie rejoint la surface en provoquant le mouvement des plaques. L'idée de l'énergie qui rejoint la surface rappelle de loin le flux de chaleur. Ces élèves ont une difficulté à imaginer et à construire un mécanisme dynamique qui s'inscrit dans une périodicité (comme les courants de convection. (Groupes : 5', 3', 7, 5, 6' classe 2)

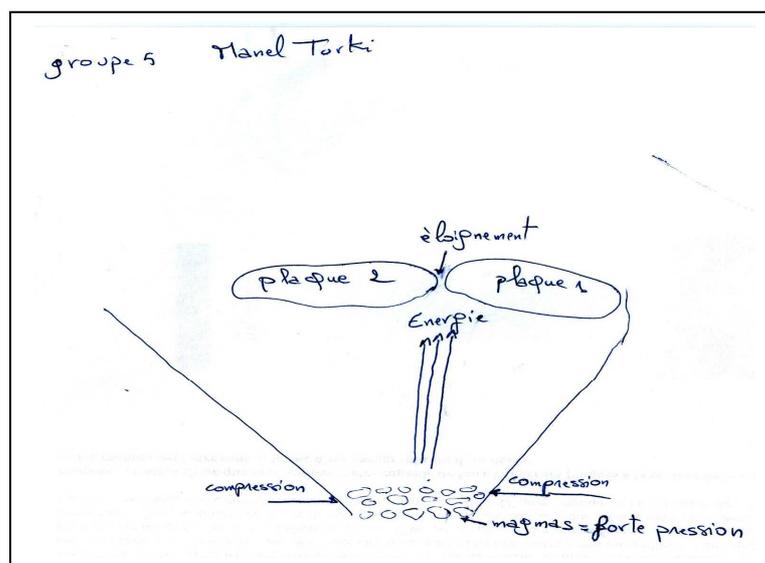


Figure11.8 production du groupe 5 (Manel) classe2 sur le moteur du mouvement des plaques

Le moteur de la tectonique des plaques G5' *Marwa Barsssi - Khawla Watalem*

L'activité visible du globe terrestre (volcanisme, séisme, un flux de chaleur, un métamorphisme de roches du au hautes températures et aux pressions...) est concentrée, pour l'essentiel, dans des zones étroites qui délimitent de vastes zones tranquilles. Ce découpage en plaques lithosphériques a été mis en évidence par les géologues vers le milieu des années 1960. Au niveau des dorsales océaniques on observe une divergence des terrains (Écartement), leur exploration nécessite la mise en œuvre de moyens d'étude importants: bateau (pour sonder, forer...), sous-marin ... en contre partie on assiste au niveau des fosses océaniques une convergence des terrains (rapprochement). D'après vous qu'est ce qui fait bouger les plaques ?

Proposer un mécanisme que vous supposer être capable de faire bouger les plaques à la surface de la terre.
 Votre réponse peut être sous la forme d'un paragraphe ou d'un dessin.

des roches au fusion quand ils vont se presser ils vont s'éclater (explosion) et ça qui monte en flèche = une énergie qui va séparer la plaque et se couper en 2.

Figure 11.9 production du groupe 5' (Marwa et Khawla) classe 2 sur le moteur du mouvement des plaques

Résumons les différentes catégories dans le tableau suivant :

Les catégories	Catégorie1	Catégorie2 (Maïssa)	Catégorie3 (Takwa)	Catégorie4	Catégorie5 (Khawla)
Le moteur du mouvement des plaques à la surface	La sortie de magma au niveau de la dorsale provoque le mouvement des plaques.	Le mouvement du magma sous les plaques les fait bouger	Les ondes provenant du noyau font sortir le magma qui fait bouger les plaques	Le gradient de densité et de température entre lithosphère et asthénosphère fait bouger les plaques	L'énergie libérée par le magma à forte pression fait bouger les plaques
Le processus évoqué à la surface	L'accrétion	Schéma de subduction	Divergence ou convergence de plaques	La subduction	Divergence de plaques
Le concept des courants de convection	Absent	Absent	Absent	Absent	Absent
Le couple accrétion subduction	Absent	Absent	Absent	Absent	Absent
La nécessité de l'équilibre dynamique	Absente	Absente	Absente	Absente	Absente

Tableau 11.1 tableau récapitulatif des différentes catégories concernant le moteur du mouvement des plaques.

Récapitulation

Nous remarquons que pour la plus part des élèves le mouvement des plaques résulte d'un mouvement sous jacent d'une entité qui se trouve sous les plaques (du magma, ou bien des ondes ou bien de l'énergie) sauf pour la catégorie 4 qui explique le mouvement des plaques par un mouvement de matière gouverné par un gradient de température et de densité entre deux milieux différents la lithosphère et l'asthénosphère. Lorsqu'ils expliquent ce qui se passe à la surface, tous les élèves modélisent un seul phénomène (soit l'accrétion, soit la subduction, soit un mouvement divergent ou convergent de plaques). Ils ne mobilisent pas les deux processus accrétion et subduction articulés. La nécessité du maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface de la Terre déjà traité dans l'activité précédente est absente dans les productions de tous les élèves. Cela est dû au fait que les élèves ne considèrent pas dans leurs productions l'accrétion en terme de gain de matière ni la subduction en terme de perte de matière, mais ils les regardent en terme de mouvement divergent et convergent. Ils n'établissent pas une relation entre un espace positif qui se crée et un espace négatif qui disparaît.

Le fait que l'élève ne fait pas la liaison entre le maintien de l'équilibre lithosphérique et la création et la disparition de la lithosphère, cela exclut la nécessité de l'articulation de l'accrétion à la subduction. La différence du gradient de température et de densité entre la lithosphère et l'asthénosphère est présente dans le cas qui permet le passage dans un sens unique (de la lithosphère vers l'asthénosphère) mais non pas dans le sens inverse.

2.2 Argumentation et problématisation du moteur de la tectonique des plaques dans le débat (annexe 3)

La discussion met bien en jeu différents points de vue. En référence à Orange.C, Lhoste.Y et Orange.D (2007) sur l'argumentation, la problématisation et la construction de concepts en classes de sciences nous allons discuter la problématisation des « courants de convection » en tant que nécessité pour un équilibre dynamique du globe. Nous allons, selon le problème travaillé, présenter l'épisode en structure puis nous allons l'analyser pour construire les espaces de contraintes que construisent les élèves au cours du débat sur un problème de fonctionnement.

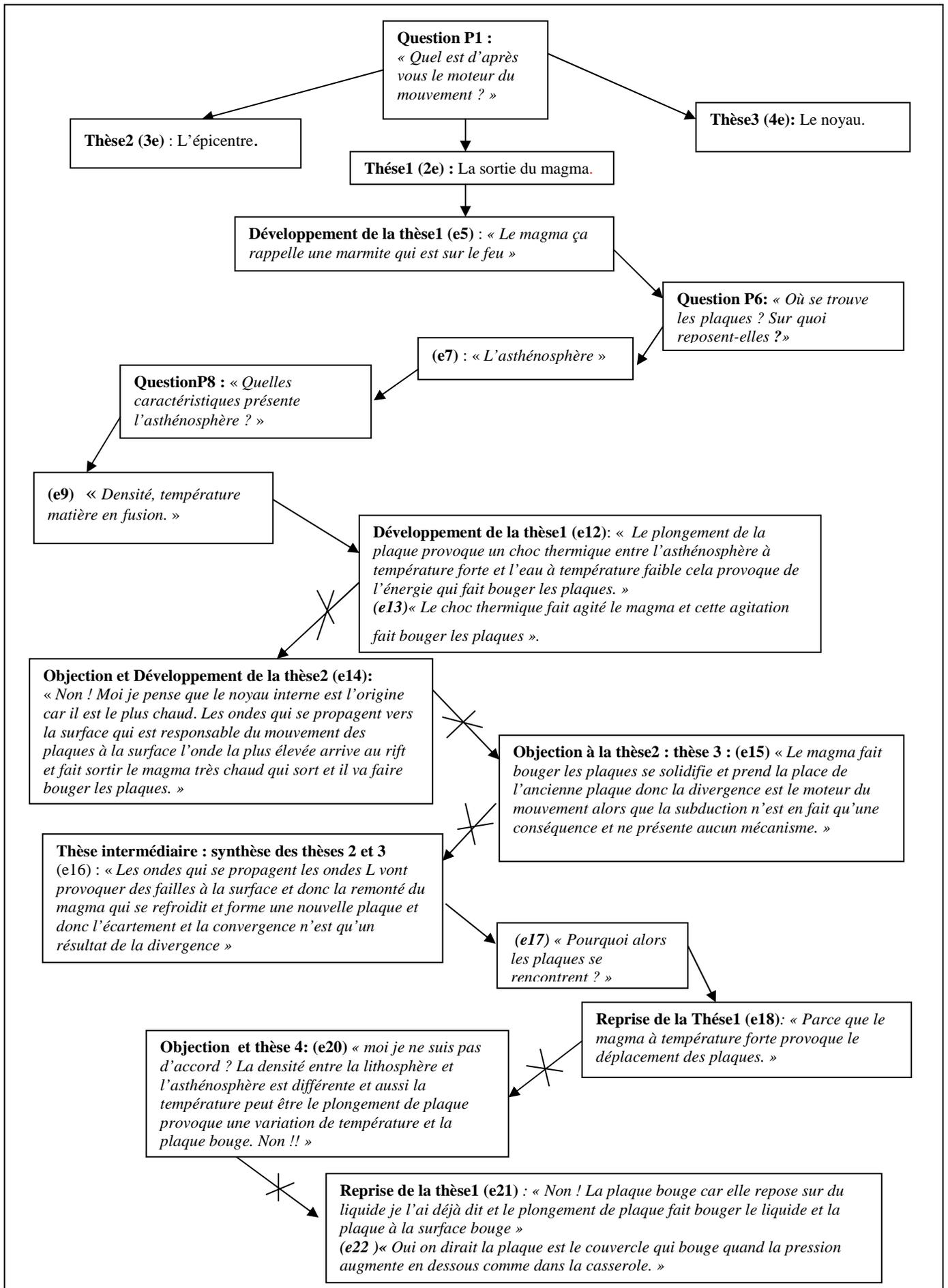
Ces espaces de contraintes comparés au espaces de contraintes construits par les scientifiques actuels vont permettre de mettre en évidence les raisonnements possibles par rapport au savoir scientifique, et permettra donc de dévoiler les raisons qui sont responsables de cet écart et les difficultés qui apparaissant au cours du constructivisme au sein d'une situation problème.

2.2.1 Episode argumentatif sur le moteur du mouvement des plaques :(courants de convection) dans la première classe

2.2.1.1 Structure de l'épisode

Le document 11.10 représente la structure de cet épisode. Cet épisode est composé de 22 interventions (1 à 22). Nous désignons l'élève qui participe par (e) avec son intervention dans le débat en chiffre exemple : (e2)

Figure 11.10 Structure argumentative sur le moteur du mouvement des plaques dans la première classe



2.2.1.2 Analyse de l'épisode dans la première classe

La discussion commence par une question posée par le professeur sur le moteur responsable du mouvement des plaques. Trois thèses sont proposées :

Une première thèse (1) qui propose la sortie du magma comme moteur du mouvement des plaques à la surface. Deux autres thèses qui viennent la contredire : Une thèse (2) proposant l'épicentre et une troisième thèse qui propose le noyau de la Terre comme responsable du mouvement des plaques à la surface.

Le professeur demande d'expliquer la relation entre la lithosphère et l'asthénosphère lorsqu'il pose les deux questions suivantes: Question P6: « *Où se trouve les plaques ?* »
Question P8 : « *Quelles caractéristiques présente l'asthénosphère ?* »

Comme réponses à ces questions les élèves développent les thèses précédemment proposées en tenant compte des relations qui peuvent exister entre les deux milieux : l'asthénosphère et la lithosphère.

La thèse 1 : (e12): « *Le plongement de la plaque provoque un choc thermique entre l'asthénosphère à température forte et l'eau à température faible cela provoque de l'énergie qui fait bouger les plaques.* »

(e13) « *Le choc thermique fait agiter le magma et cette agitation fait bouger les plaques* ».

Dans cette thèse l'élève évoque le phénomène de plongement de plaque mais non pas dans le cadre d'une subduction, sans parler de perte de matière lithosphérique ni de gradient de densité ni de convergence mais il explique le mouvement des plaques par un choc thermique dû à une différence de température entre les deux milieux (l'asthénosphère et l'eau portée par la lithosphère océanique plongeante) qui fait agiter le magma et donc qui fait bouger les plaques à la surface, le mouvement de plongement de plaques qui a lieu au cours de la subduction ne représente pas pour l'élève un mouvement de plaque mais il représente un élément qui participe à la naissance d'un mouvement de magma au niveau de l'asthénosphère et donc à l'apparition d'un mouvement de plaque à la surface. En parlant de choc thermique l'élève suppose que le plongement de la plaque se fasse très rapidement dans le temps ce qui provoque un choc thermique or il oublie que ce phénomène se produit d'une vitesse très lente à l'ordre de quelque centimètre par an (pourtant il a travaillé la subduction dans l'activité précédente). Cette conception montre bien que l'élève ne mobilise pas le temps géologique lorsqu'il modélise un mécanisme géologique.

Le développement de la thèse 2 vient comme objection à la thèse 1 : (e14): « *Non ! Moi je pense que le noyau interne est l'origine, car il est le plus chaud. Les ondes qui se propagent vers la surface, qui est responsable du mouvement des plaques à la surface. L'onde la plus élevée arrive au rift et fait sortir le magma très chaud qui sort et il va faire bouger les plaques.* »

Dans cette deuxième thèse on distingue quatre points essentiels:

- La sortie du magma au niveau du rift fait bouger les plaques. Par cette idée l'élève considère la divergence au niveau de la dorsale comme un mouvement de plaque.
- Le magma est très chaud par rapport à la surface de la lithosphère donc il existe une différence de température entre le milieu asthénosphérique et le milieu lithosphérique.
- La sortie du magma est provoquée par une propagation d'ondes provenant du noyau de la Terre.
- Le mouvement de plaque que propose l'élève se limite à la divergence. La convergence de plaque n'est pas évoquée.

Un désaccord s'installe sur le fait que des ondes se propagent du noyau à la surface et font sortir le magma. Une troisième thèse est proposée donc comme objection à la thèse 2. Dans cette thèse, l'élève reprend l'idée précédente qui annonce que la sortie du magma fait bouger les plaques mais il ajoute que la lithosphère néoformée prend la place de l'ancienne et provoque ainsi une divergence de plaques. Cette divergence produit comme conséquence la subduction : (e15) « *Le magma fait bouger les plaques se solidifie et prend la place de l'ancienne plaque donc la divergence est le moteur du mouvement alors que la subduction n'est en fait qu'une conséquence et ne présente aucun mécanisme.* » Dans ce cas l'accrétion est plus importante dans la conception de l'élève que la subduction. L'élève lie la subduction à l'accrétion dans une relation de cause à effet.

La discussion progresse par une synthèse des deux thèses 2 et 3 en formulant une nouvelle thèse qui confirme que l'accrétion au niveau de la dorsale provoque une divergence et que cette dernière provoque à son tour une convergence de plaques mais dans la nouvelle thèse on explique la sortie de magma au niveau de la dorsale par les ondes qui se propagent du noyau. L'élève reprend l'idée des ondes parce qu'il n'arrive pas à imaginer un autre facteur explicatif pour la sortie du magma: (e16) : « *Les ondes qui se propagent les ondes L vont provoquer des failles à la surface et donc la remonté du magma qui se refroidit et forme*

une nouvelle plaque et donc l'écartement et la convergence n'est qu'un résultat de la divergence ».

En réponse à une question posée par un élève sur la convergence de plaques : (e17) « Pourquoi alors les plaques se rencontrent ? » on assiste à une reprise de la thèse 1

(e18): « Parce que le magma à température forte provoque le déplacement des plaques. ».

Une objection à la thèse 1 explique la subduction par une différence de densité et de température entre la lithosphère et l'asthénosphère. (e20) « Moi, je ne suis pas d'accord ? La densité entre la lithosphère et l'asthénosphère est différente et aussi la température peut être le plongement de plaque provoque une variation de température et la plaque bouge. Non !! » Mais cette thèse ne domine pas la discussion, la thèse 1 réapparaît de nouveau et achève la discussion en supposant que la plaque plongeante fait bouger le magma au niveau de l'asthénosphère et les plaques bougent à la surface. (e21) : « Non ! La plaque bouge car elle repose sur du liquide je l'ai déjà dit et le plongement de plaque fait bouger le liquide et la plaque à la surface bouge »

Pour argumenter l'élève se sert du modèle de la casserole sur le feu contenant de l'eau et couverte par un couvercle (e22) « Oui on dirait la plaque est le couvercle qui bouge quand la pression augmente en dessous comme dans la casserole. »

Dans ce débat nous assistons à un retour au point de départ on dirait qu'il s'agit d'un débat « clos ou en boucle ». Nous assistons à un départ de la thèse1 vers la thèse 3, puis vers la thèse1 pour revenir à la fin du débat à la thèse du départ : thèse1. Nous schématisons la trajectoire de ce débat au cours du temps par le schéma suivant :

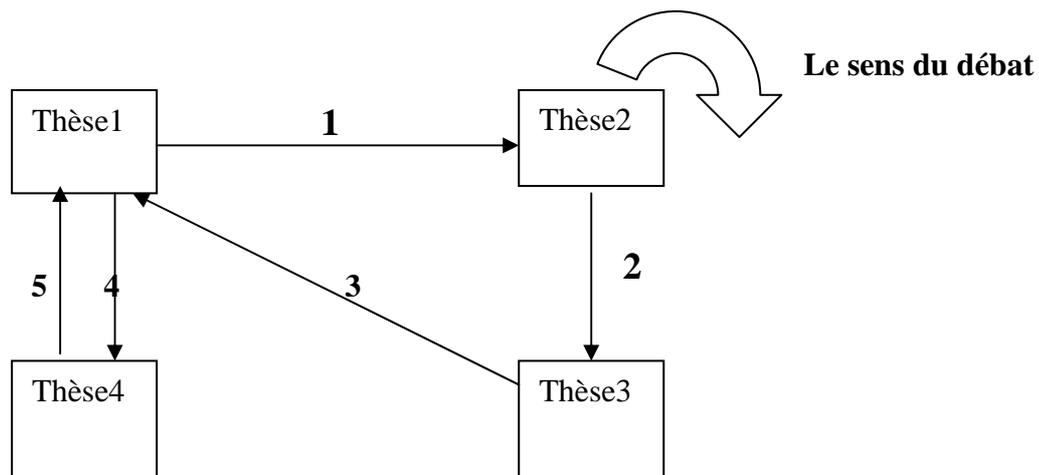


Figure 11.11 représentation de la trajectoire de ce débat au cours du temps

La problématisation du moteur du mouvement des plaques au cours de cette discussion n'a pas aboutit à un changement conceptuel. L'idée de départ persiste jusqu'à la fin de la

discussion. A chaque fois le mouvement est défini en un seul type soit divergent lorsque les élèves mobilisent l'accrétion soit convergent lorsqu'ils mobilisent la subduction.

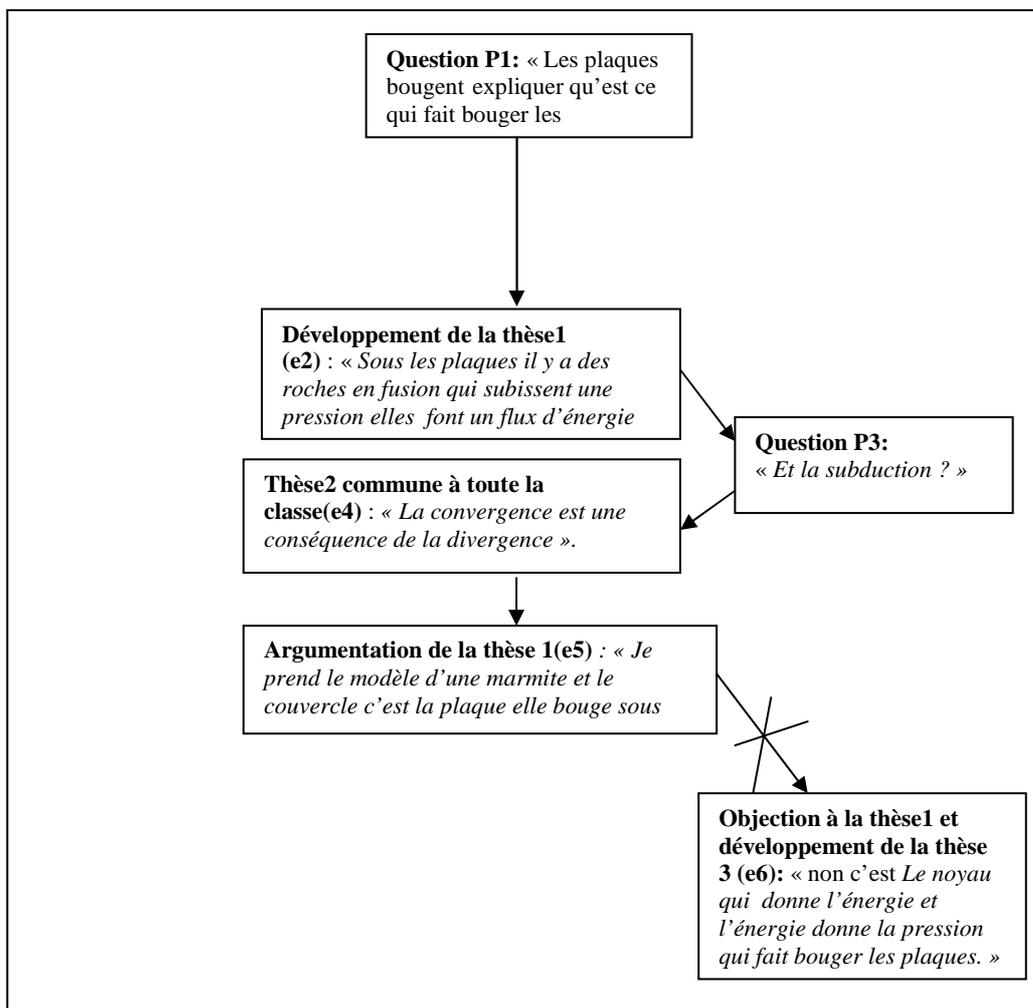
La subduction est une conséquence résultant de l'accrétion. L'idée de gain et de perte de la lithosphère ainsi que la nécessité de l'équilibre dynamique sont absentes. Nous constatons encore une fois que la difficulté à construire l'équilibre dynamique dans le cadre de la tectonique des plaques est liée à la nature des figures de l'espace utilisées par les élèves.

2.2.2 Episode argumentatif sur le moteur du mouvement des plaques : (courants de convection) dans la deuxième classe

2.2.2.1 Structure de l'épisode

La figure 11.12 représente la structure de cet épisode. Dans une chronologie, représentée verticalement, sont indiqués les thèses discutées et leur développement face aux objections. Cet épisode est très courte elle est composée de 7 interventions (1 à 7).

Figure 11.12 Structure argumentative sur le moteur du mouvement des plaques dans la deuxième classe



2.2.2.2. Analyse de l'épisode dans la deuxième classe

Dans la thèse 1 formulée comme réponse à la question posée par le professeur « *Les plaques bougent. Expliquez qu'est ce qui fait bouger les plaques ?* », les élèves définissent la nature du milieu asthénosphérique comme étant un ensemble de roches en fusion qui subissent une pression et dégagent ainsi un flux d'énergie qui va déplacer les plaques à la surface. Jusqu'à présent c'est le flux d'énergie qui provoque le mouvement divergeant des plaques et non pas le mouvement des matériaux au niveau de l'asthénosphère. (e2) : « *Sous les plaques il y a des roches en fusion qui subissent une pression elles font un flux d'énergie qui va déplacer les plaques donc une divergence.* ». La restriction au mouvement divergent a fait que le professeur a fait une tentative d'éclaircissement des idées lorsqu'elle a posé la question « *Et la subduction ?* » mais toute la classe s'est mise d'accord sur le fait que la convergence n'est en fait qu'une conséquence de la divergence. (e4) : « *La convergence est une conséquence de la divergence* ». Cette idée n'est plus discutée et le débat revient à la thèse 1 pour l'argumenter. En effet dans l'argumentation l'élève propose le modèle d'une marmite ayant un couvercle, les vapeurs, sous l'effet de la pression, font bouger le couvercle et c'est ce qui se passe au niveau du globe : les vapeurs venant de l'asthénosphère font bouger les plaques mais dans ce cas le sens du mouvement des vapeurs et celui des plaques n'est pas précisé. (e5) : « *Je prends le modèle d'une marmite et le couvercle c'est la plaque elle bouge sous l'effet des vapeurs c'est l'effet de la pression* ». Le développement de la thèse 3 constitue une objection à la thèse 1. Pour les tenants de cette thèse, l'énergie qui fait bouger les plaques à la surface provient du noyau. (e6) : « *non c'est Le noyau qui donne l'énergie et l'énergie donne la pression qui fait bouger les plaques.* ». Le professeur décide d'arrêter la discussion à ce stade par contrainte de temps.

2.2.3 Récapitulation de l'analyse selon le mode de raisonnement adopté en vers « Le moteur du mouvement des plaques »

Les deux discussions n'ont pas permis par le biais des controverses de construire les nécessités pour le problème des courants de convection comme étant le moteur principal du mouvement des plaques à la surface du globe. Nous distinguons dans ces deux discussions deux types majeurs de raisonnement :

- Un premier type de raisonnement qui considère la divergence de plaques comme étant le mouvement principal à la surface alors que la convergence n'est que le résultat de la divergence. Nous rencontrons ce type de raisonnement chez les élèves des deux classes.

Dans la première classe, le mouvement divergent des plaques est lié à la nécessité de la formation de la lithosphère au niveau du rift qui prend la place de l'ancienne.

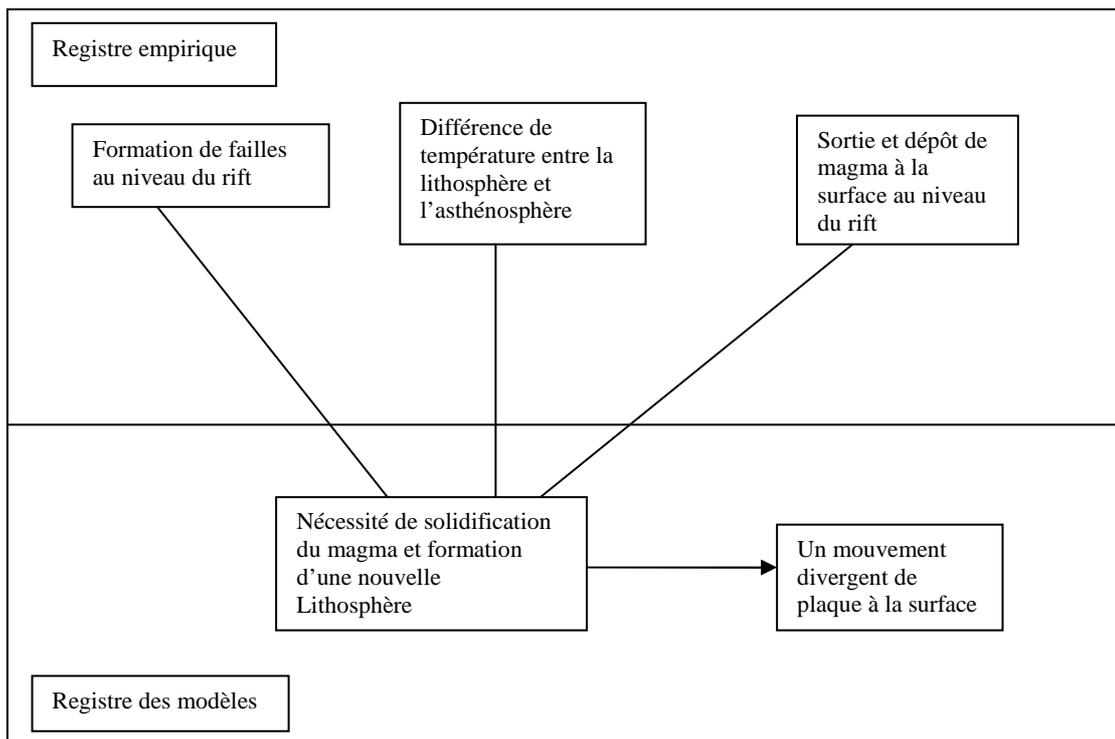


Figure 11.13 premier type de l'espace de contraintes dans la classe 1 pour le moteur du mouvement des plaques

Dans la deuxième classe, le mouvement divergent des plaques est lié à la nécessité d'une remonté d'un flux d'énergie naissant de la fusion des roches asthénosphériques sous l'effet de la pression.

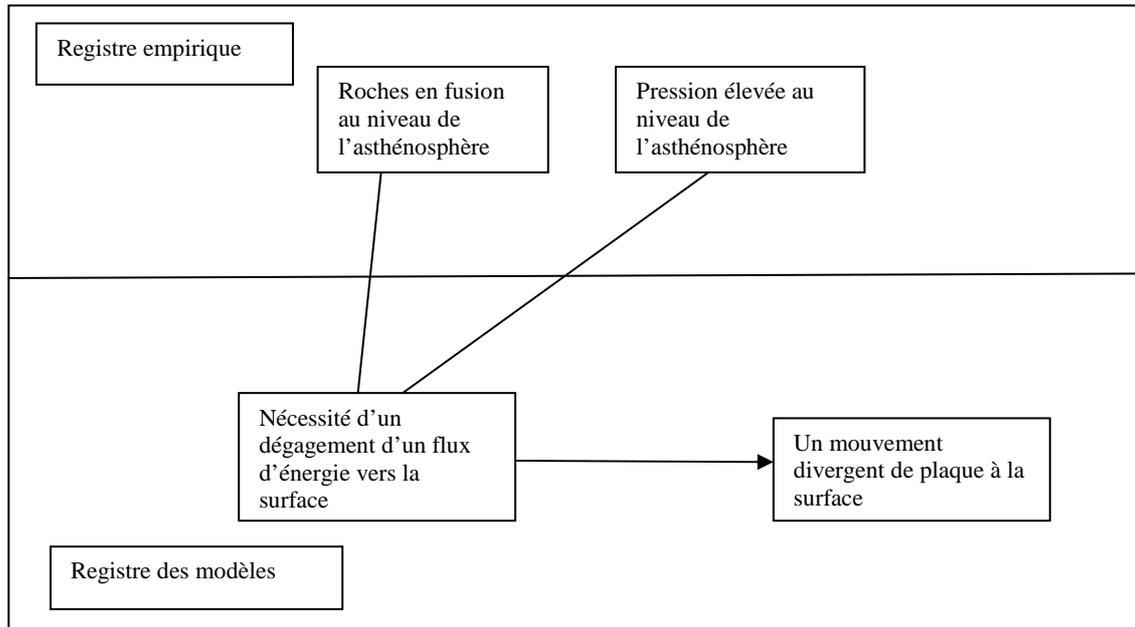


Figure 11.14 L'espace de contraintes dans la classe 2 pour le moteur du mouvement des plaques

- Un deuxième type de raisonnement qui considère le plongement de plaques comme étant le phénomène responsable du mouvement des plaques à la surface sans l'identification de la nature du mouvement. Nous rencontrons ce type de raisonnement seulement chez les élèves de la première classe. Le plongement de la plaque provoque un choc thermique dû à une différence de température entre les deux milieux: l'asthénosphère et l'eau portée par la lithosphère océanique plongeante qui fait agiter le magma et donc qui fait bouger les plaques à la surface, le plongement de plaque représente un élément qui participe à la naissance d'un mouvement de magma au niveau de l'asthénosphère et donc à l'apparition d'un mouvement de plaque à la surface. Nous représentons l'espace de contraintes construit dans la première classe pour le moteur du mouvement des plaques.

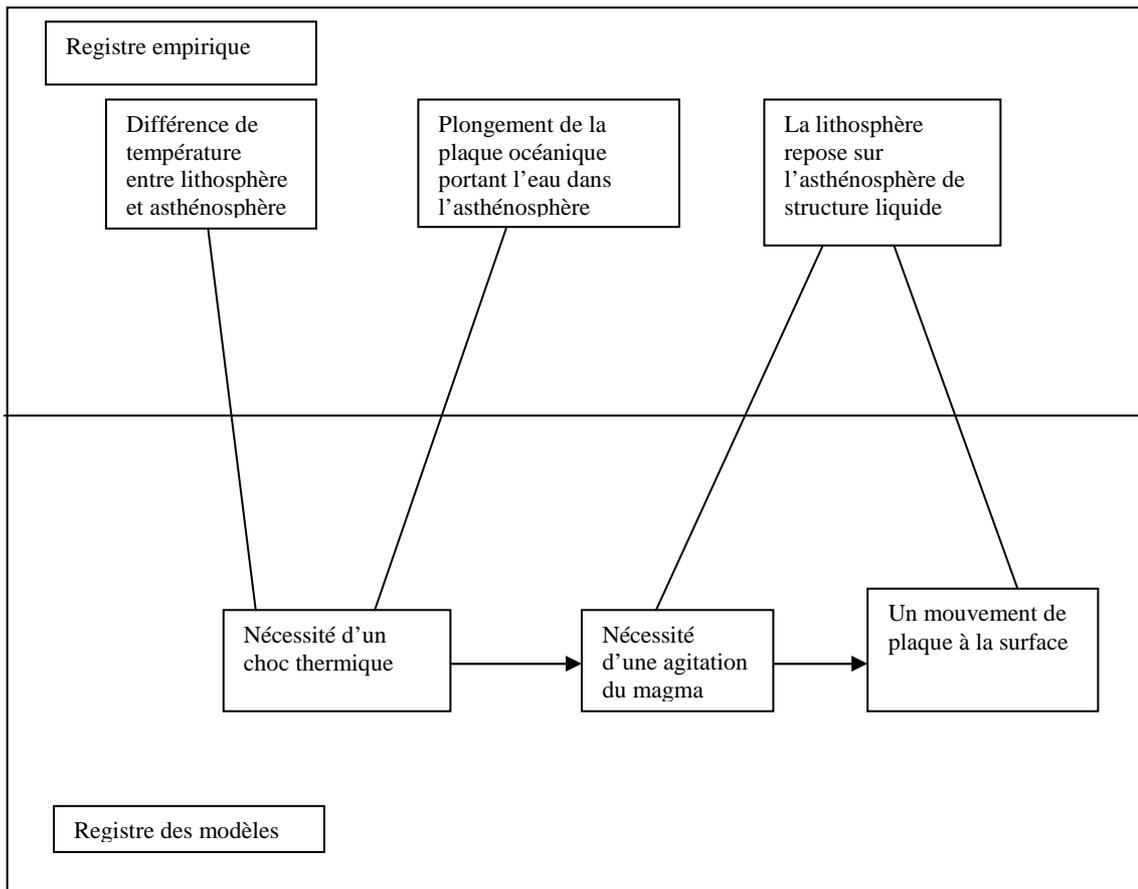


Figure 11.15 Deuxième type de l'espace de contraintes dans la classe 1 pour le moteur du mouvement des plaques

3 Conclusion générale de la deuxième étude

Les élèves construisent les mêmes modèles explicatifs pour le moteur du mouvement des plaques au cours de la discussion comme dans les productions écrites au sein du travail de groupe. Le débat en classe n'a pas permis de construire les nécessités pour le problème des courants de convection à partir des contraintes empiriques à sa disposition pour les raisons suivantes :

- La différence entre la lithosphère et l'asthénosphère est définie qu'en termes de différence de structure tout en oubliant la différence de densité et de température.
- L'articulation entre l'accrétion et la subduction dans le maintien de l'équilibre lithosphérique est absente. Chaque phénomène est traité indépendamment de l'autre. L'articulation entre les deux processus lorsqu'elle existe elle est traduite en histoire (la subduction succède l'accrétion parce qu'elle en est la conséquence).

- L'accrétion quand elle est évoquée, elle n'est pas toujours vue en termes de gain de matière mais elle est vue en termes de mouvement de divergence.
- Ce mouvement de divergence ne représente pas pour l'élève une perturbation de l'équilibre ce qui explique l'absence de la mobilisation du maintien de l'équilibre lithosphérique à la surface en tant que nécessité.
- Puisque le maintien de l'équilibre ne représente pas une nécessité, la subduction n'est pas alors convoquée comme phénomène nécessaire qui corrige la perturbation provoquée par l'accrétion. Ceci explique deux choses : l'absence de l'articulation (subduction-accrétion) et l'absence de la nécessité d'un espace négatif qui neutralise l'espace positif. C'est pour cela que lorsque la subduction est évoquée, elle est vue en tant que convergence de plaques et non pas en tant que perte de matière et d'espace.
- Du côté de l'utilisation du temps, l'absence de la nécessité de l'articulation de la subduction à l'accrétion explique l'utilisation du temps linéaire par une mise en histoire à la place du temps cyclique.

A ce stade de notre étude nous pouvons dire que les difficultés que rencontre l'élève au cours de la problématisation d'un phénomène fonctionnaliste sont liées à des difficultés dans l'utilisation des figures d'espace. Ainsi le recours à telle ou telle figure d'espace oriente vers un type de raisonnement pour construire un fonctionnement donné. Il en est de même pour l'utilisation du temps ; en effet, l'absence du temps cyclique dans les raisonnements des élèves fait que ce dernier construit un mécanisme dans un enchaînement successif des étapes et n'arrive pas à les articuler au sein d'un cycle fonctionnel. Nous allons voir si cette hypothèse est confirmée dans la troisième étude que nous allons entamer et qui s'intéresse à l'utilisation du temps par les élèves au cours de la résolution d'un problème historique mais aussi fonctionnaliste, celui de la reconstitution de l'histoire de l'Atlas Tunisien.

Troisième étude
La reconstitution de l'histoire de la
genèse d'une chaîne de collision
intercontinentale
(Cas de l'Atlas Tunisien)

Chapitre 12

La formation d'une chaîne de marges cas de l'Atlas tunisien

Introduction

1. La compréhension de la formation d'une chaîne de montagne par les scientifiques actuels
2. Réflexion épistémologique sur le temps dans l'histoire de la formation des chaînes de montagnes au sens large
3. Problématisation historique actualiste : formation des chaînes de marges
4. Conclusion

Introduction

Il faut rappeler que notre travail consiste à étudier la problématisation dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques. Nous avons commencé dans une première étude par la problématisation de la subdivision de la surface de la Terre en plaques lithosphériques et nous avons étudié l'utilisation de l'espace par les élèves tunisiens. Dans une deuxième étude nous avons étudié le fonctionnement dans la problématisation du moteur responsable du dynamisme globale et du maintien de l'équilibre du système Terre : les courants de convection. Nous nous intéressons maintenant au problème de formation des chaînes de montagnes au sens large et plus particulièrement au problème de formation des chaînes de marges (le cas de l'Atlas Tunisien) et à l'étude des utilisations du temps.

Il s'agit donc dans cette étude de voir comment les élèves problématifient-ils la naissance d'une chaîne de marges : le cas de L'Atlas tunisien et quelles sont les figures de temps utilisées par les élèves dans la résolution d'un tel problème.

Ce modèle appartient au cadre théorique de la tectonique des plaques. Comme pour les problèmes précédemment étudiés, nous consacrons une première partie à la présentation du modèle actuel de ce problème, ainsi que les utilisations du temps ensuite nous passons à une étude épistémologique de la formation des chaînes de montagnes et nous présentons quelques éléments d'histoire de la géologie dans l'histoire des sciences de la Terre, dans le but de voir comment les chercheurs problématifiaient-ils la naissance d'une chaîne de montagnes lorsqu'ils retracent l'histoire de la Terre et quelles sont leurs utilisations du temps. En fin nous passons à l'étude de la problématisation des élèves lorsqu'ils construisent l'histoire de l'Atlas tunisien et leurs utilisations du temps.

Dans notre aperçu scientifique sur la naissance des chaînes de marges nous allons détailler les chaînes de collision intercontinentales du fait que dans la suite du travail les activités vont porter sur un exemple de ce type, la chaîne atlasique (le cas de l'Atlas tunisien). Nous rappelons aussi que dans cet aperçu scientifique nous n'allons pas faire une étude exhaustive et entrer dans les détails scientifiques, mais nous allons nous limiter à un niveau de formulation qui est adéquat au programme de la troisième année sciences expérimentales.

1. La compréhension de la formation d'une chaîne de montagnes par les scientifiques actuels.

Dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, la surface de la Terre nommée lithosphère est découpée en plaques rigides, solides et mobiles (plaques lithosphériques ; 13 plaques majeures, Pomerol et al, 2000, p. 229) reposant sur l'asthénosphère solide mais plus plastique. La lithosphère comprend la croûte et le manteau supérieur. Au niveau de la lithosphère on distingue différentes structures géologiques que les scientifiques actuels subdivisent trois grandes catégories: les structures océaniques, les structures continentales de distension et les structures continentales de compression (Debelmas J., Mascle G, 2000.). Dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, la formation des chaînes de montagnes au sens large s'explique par le modèle de convergence de plaques. Le phénomène de convergence de plaques produit toujours une compression. Au cours de laquelle, la partie continentale portée par la plaque lithosphérique se déforme et les parties les plus fragiles commencent à s'effacer il se produit alors des phénomènes d'inversion tectonique. Si la déformation s'accroît, on obtient une véritable chaîne de montagnes (Debelmas J., Mascle G, 2000. p.159). On distingue :

- Les chaînes intracontinentales (que nous n'allons travailler avec les élèves).
- Les chaînes de marges : chaînes de subduction, chaînes d'obduction et chaînes de collision (qui nous intéressent du fait que nous travaillons avec les élèves un exemple de chaînes de collision, l'exemple de l'Atlas tunisien.).

1.1 Les chaînes de marges

Les chaînes de marges sont des chaînes de montagnes qui naissent au niveau des marges actives des frontières de plaques, suite à un régime compressif au cours du processus de subduction au moment de la convergence de plaques. On distingue trois types de chaînes de marges.

1.1.1. Les chaînes de subduction

Les chaînes de subduction naissent suite à un régime compressif et apparaissent à la verticale au niveau des zones de subduction.

Dans le phénomène de subduction, la lithosphère océanique, dense, s'enfonce sous la lithosphère continentale plus légère.

Les modélisations physiques (Chemenda 1993) montrent que la densité de la lithosphère plongeante détermine la nature du régime induit par cette dernière en cours de subduction. En effet pour une lithosphère légère, le régime est compressif car cette dernière reste collée à la plaque supérieure. Le régime est distensif pour une lithosphère dense et contribue ainsi à l'apparition d'un bassin marginal. Pour une lithosphère intermédiaire, légèrement plus dense que celle de la plaque supérieure, en cours de subduction, la plaque supérieure subit une assez longue période de distension, avant que l'extrémité de la lithosphère subduite se détache, le réarrangement du système induit une compression dans la plaque supérieure. On assiste ainsi à une succession d'épisodes compressifs relativement brefs entrecoupant une évolution globalement distensive. Le régime est alternant. (Debelmas J., Mascle G 2000. p.186). Les chaînes de subduction constituent l'une des deux principales lignes de relief qui parcourent la surface de la Terre, l'autre, plus spectaculaire encore, résultant de la collision continentale.

1.1.2. Les chaînes d'obduction

Dans certains cas, au début de la subduction la lithosphère océanique chevauche une bordure continentale de la plaque plongeante. Ce phénomène s'appelle obduction, et contribue à l'apparition de dispositions inverses à ce qui doit se passer au cours de la subduction. Selon le géologue américain Coleman en 1971, ces dispositions inverses de la subduction sont liées à une tectonique de compression brutale rendant secondaires les différences de densité, mais dès que la compression cesserait, l'isostasie reprendrait ses droits par apparition d'un plan de subduction classique qui isolerait la lame obductée.

Coleman distingue la subduction de l'obduction mais pour beaucoup d'autres auteurs l'obduction représente un phénomène lié à la subduction dans la mesure où il est rencontré lorsque la subduction est bloquée: il s'agit de la subduction d'une plaque portant un continent sous une plaque océanique ; quand le continent arrive au niveau de la zone de subduction, il ne peut s'enfoncer du fait de sa moindre densité et la subduction est bloquée. On cite comme exemple les montagnes d'Oman, à l'entrée du Golfe persique, sont un ancien promontoire océanique de la plaque asiatique poussé sur la marge de la plaque arabe lorsque les deux plaques sont entrées en collision à la fin du Mésozoïque. (Debelmas J., Mascle G, 2000. p.195).

1.1.3 Les chaînes de collision

D'après Boillot G. (2000. p.125) « *quand une plaque en voie de subduction comporte à la fois une partie océanique et une partie continentale, il arrive un moment où le continent porté par cette plaque arrive au contact avec l'arc ou avec la marge active portée par la plaque chevauchante. Alors commence la collision continentale.* ». Dans le cadre de la tectonique des plaques, la collision engage de la lithosphère continentale dans la zone de subduction. La convergence de plaques devient alors difficile, parce que la croûte continentale est plus ou moins épaisse, est moins dense que l'asthénosphère. La collision de différents objets telle que marge active, arc insulaire actif, marge passive peut contribuer à la formation d'une chaîne de collision.

Il se produit au cours de la subduction un raccourcissement horizontal et une superposition de deux croûtes continentales qui entrent en contact et par réaction isostatique, naissent de puissants reliefs compensés en profondeur par une racine crustale. L'épaisseur de la croûte continentale peut ainsi atteindre 60 à 80 km, et les altitudes correspondantes dépassent alors couramment 5 à 6 km. (Boillot G. 2000. p.126)

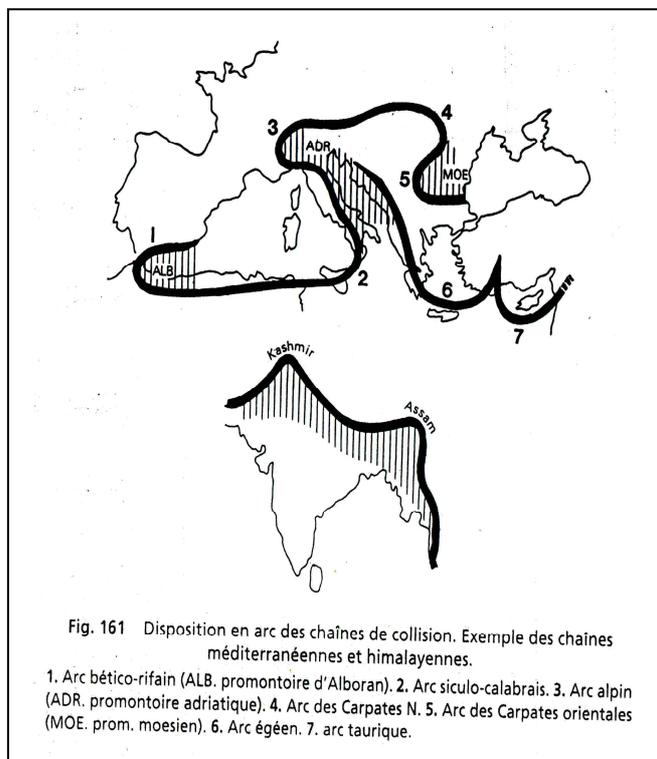


Figure 12.1 disposition en arc des chaînes de collision
Extraite du livre les grandes structures géologiques (2000, p 224)

Les effets de la collision continentale se propagent à des régions très éloignées de la zone d'affrontement des plaques, par transmission des contraintes appliquées. Ainsi naissent, en même temps que la chaîne de collision, des chaînons montagneux « intra plaques » le plus souvent situés à l'emplacement d'anciens bassins sédimentaires (eux mêmes issus de rifts continentaux), dont les structures extensives enfouies sont remobilisées et inversées. C'est le cas par exemple des montagnes de l'Atlas au Maroc. (Boillot G. 2000. p.130, 131)

On distingue deux grands types de chaînes de collision :

1.1.3.1 Les chaînes liminaires

Telles que les Andes de Colombie et Equateur qui représentent au crétacé un cas de collision de plateau océanique, l'île de Taiwan qui résulte de la collision actuellement en cours de l'arc des Philippines avec la marge chinoise (eurasiatique) et les chaînes pacifiques de l'ouest américain.

1.1.3.2 Les chaînes de collision intercontinentales

D'après Debelmas J., Mascle G, 2000. p.222, la collision de deux marges continentales séparées par un espace de croûte océanique contribue à la formation de ce type de chaînes. L'exemple intéressant est celui résultant de la collision des blocs africain et indien d'une part, eurasiatique de l'autre et impliquant la fermeture d'un domaine océanique qui disparaît laissant sur les marges actives des écaillés, nappes ophiolitiques, ainsi que des phénomènes volcaniques et métamorphiques comme traces à ce stade: l'axe orogénique qui court de Gibraltar à la Birmanie ou axe mésogéen.

On distingue au cours de la collision deux cas possibles selon Debelmas J., Mascle G 2000. p.222 :

- *Le processus de rapprochement est bloqué et se transfère au niveau d'une autre limite de plaque. La chaîne est alors réduite à des paquées d'écaillés ophiolitifères coincées entre des bordures continentales peu déformées c'est le cas de l'Iran central.*
- *Le processus de rapprochement ne peut pas se débloquent ailleurs. La pression se maintient dans la zone de contact et les deux marges se raccourcissent en se clivant en lames granito-gneissiques, à la limite croûte superficielle croûte profonde. Ces lames gneissiques s'empilent les unes sur les autres en donnant naissance à une racine crustale qui peut atteindre 50à70km et qui déclenchent le soulèvement isostatique de la chaîne vue leur légèreté.*

1.1.3.2.1 Le cas de l'Atlas tunisien

La Tunisie occupe la bordure Nord de la plaque africaine. L'orogénèse de l'Atlas Tunisien résulte de la collision de deux plaques africaine et eurasiatique et constitue la partie Est de l'Atlas Magrébin. Cette genèse commence par l'ouverture de l'atlantique nord au crétacé inférieur suivie de la fermeture d'un domaine océanique la Thétys dont les restes forment la mer méditerranée (crétacé supérieur) et d'un début de subduction de la plaque africaine sous la plaque eurasiatique au niveau de l'Espagne (miocène inférieur et moyen). Au miocène supérieur la subduction de la plaque africaine sous la plaque eurasiatique se poursuit au niveau de la Sicile au N-E alors qu'elle est bloquée au nord de la Tunisie et les deux bords continentaux entrent en collision au N-W. Il en résulte une compression de plus en plus forte qui atteint la Tunisie septentrionale (Nord) et gagne la Tunisie centrale et méridionale contribuant au plissement de la lithosphère et la formation de l'Atlas Tunisien (C. Martinez & R. Truillet 1987, p35-45).

1.2 Les particularités des chaînes de marges dans leur relation avec le temps et l'espace

Dans le cadre de la tectonique des plaques les chaînes de marges représentent un objet géologique intéressant dans leur édifice (qui fait intervenir deux plaques), dans leur fonctionnement et dans leur âge:

- 1) Les chaînes de marges témoignent des mouvements verticaux d'enfoncement dans la mesure où la nécessité des zones de subduction, zones où on assiste à une disparition par enfoncement de la lithosphère océanique s'impose comme élément essentiel dans la genèse de ces chaînes présentant dans certaines cas un processus d'obduction ou de collision (Nicolas, 1990, p. 22 ; Pomerol & al, 2000, p. 495-496).
- 2) Les chaînes de marges présentent une complexité dans leur structure dans la mesure où on peut rencontrer des roches de natures différentes, disposées dans un contact anormal, et ne présentant pas parfois le même âge. Les géologues ont maintenant identifié et bien décrit une centaine de massifs ophiolitiques à la surface du globe (Nicolas, 1990, p. 100). Ces massifs sont répartis dans presque toutes les chaînes

de montagnes terrestres, qu'elles soient continentales (Oural, Alpes et Himalaya, Appalaches) ou insulaires (Nouvelle Calédonie, Cuba, Chypre), qu'elles soient anciennes (chaîne du Primaire comme la chaîne calédonienne de Terre Neuve ou de Scandinavie) ou récentes (chaînes du Secondaire et du Tertiaire que sont les Alpes, l'Himalaya et les Cordillères ouest-américaines) (Michard, 1987, p. 312 ; Nicolas, 1990, p. 106 ; Debelmas, Mascle, 2000).

- 3) Les chaînes de marges sont géologiquement jeunes. Mais ils portent dans leur structure la trace du passé de la Terre qui disparaît au moment où la plaque océanique plonge dans le manteau ainsi que l'histoire de leur genèse.
- 4) Dans le cadre de la tectonique des plaques, sachant que les dimensions de la Terre sont constantes au cours du temps, les processus d'accrétion et de subduction se déroulent de façon continue, les chaînes de marges sont donc en continu et en graduel formation. Mais nous pouvons leur attribuer une histoire qui commence par une subduction et qui pourrait se terminer par une collision.
- 5) Les chaînes de marges s'inscrivent dans le cadre de la géologie historique dans la mesure où elles témoignent de l'une des plus grandes étapes d'une histoire cyclique du système Terre, c'est l'étape où la croûte océanique rejoint le manteau à nouveau, au niveau d'une zone de subduction.
- 6) La genèse des chaînes de marges s'intègre dans un fonctionnement crusto-mantellique permanent maintenu par les courants de convection.

2 Réflexion épistémologique sur le temps dans l'histoire de la formation d'une chaîne de montagne

Parmi les problèmes auxquels les géologues ont fait face depuis qu'ils ont essayé de trouver une explication à la structure externe du globe Terrestre; on trouve celui de la formation des chaînes de montagnes dans le sens large.

Dans le cadre d'une géologie historique, quel rapport entretiennent les géologues avec le temps pour retracer l'histoire des chaînes de montagnes?

Pour comprendre dans quel cadre temporel, les chercheurs actuels géologues et géophysiciens inscrivent la formation des chaînes de montagnes, il faut d'abord comparer le temps mobilisé par les géologues actuels dans le cadre de la tectonique des plaques à celui des géologues dans l'histoire des sciences de la Terre.

2.1 Le rapport au temps dans l'explication de la formation des chaînes de montagnes du 18^{ème} jusqu'au 20^{ème} siècle

Dans le premier chapitre nous avons déjà détaillé le rapport qu'entretiennent les sciences de la Terre avec le temps et nous avons expliqué comment les géologues anciens expliquent la naissance des chaînes de montagnes. Nous rappelons rapidement les figures de temps qui ont accompagné ce problème géologique.

Le modèle neptuniste, soutenu par Werner (Gohau, 1987) suppose que les montagnes sont au début cristallines, elles se sont formées successivement et graduellement, par précipitations chimiques et mécaniques, au sein d'un grand océan primordial en retrait progressif, Ellenberger (1994, p. 270). Au cours du temps, ces montagnes se sont dégagées par l'abaissement des eaux de l'océan primitif ou « initial ». Ce phénomène a produit le début de l'érosion continentale et par conséquent les premiers sédiments détritiques, ainsi s'explique la perte régulière de la cristallinité des dépôts. Cet océan primitif va donc contenir « des matières en solution » qui successivement vont se précipiter soit par évaporation ou par pénétration dans des cavités souterraines. Les roches cristallines forment donc les montagnes primitives alors que la genèse des roches sédimentaires se déroule au fond de l'océan primitif, et ces roches peuvent couvrir le socle cristallin. Dans cette conception, l'histoire est linéaire et irréversible dans le temps, le temps est donc orienté sagittal. Mais si le sol provient de la dégradation des roches et il est constamment entraîné par l'érosion vers la mer et **si ce mouvement n'est pas compensé par une « réparation » des continents, les reliefs s'atténueront jusqu'à leur disparition et c'est ce qui fait la faiblesse de la thèse neptunienne.** Ce problème trouve une explication dans un autre modèle soutenu par J. Hutton (1726-1797) c'est le modèle plutoniste qui permet de faire triompher le concept du temps cyclique par l'introduction du concept du cycle géologique et qui représente la nouveauté par rapport à la thèse neptunienne (Gohau, 1990, pp.139-140).

D'après Hutton les couches solides formées au fond de l'eau après transport, ont au départ, la forme d'un sol meuble. Ils se consolident par cimentation des particules libres : c'est la diagenèse qui se fait soit par des solutions aqueuses soit par l'effet de la chaleur et de la fusion. Il propose d'éliminer les actions aqueuses car la consolidation ne peut pas se faire par l'intermédiaire des substances insolubles dans l'eau. Le feu reste donc le seul agent possible par -la fusion partielle du sédiment- contribuant à le consolider par solidification subséquente lors du refroidissement. Hutton explique la présence des fractures,

dislocations, courbures dans les strates par le soulèvement provoqué par l'action de la chaleur. Il avance la thèse que les strates sont injectées de laves souterraines qui n'ont pas fait éruption. La nouveauté est dans le rôle que jouent ces laves. Il entreprenait des observations sur le granite et il voyait que le granite s'est introduit dans les terrains à l'état fluide il a constaté donc qu'il est postérieur aux schistes alpins. Il conclut que cette superposition comprend deux cycles dont le second a soulevé les couches déjà formées sans les plisser : une thèse dynamique tectonique qui explique la formation des montagnes (Ellenberger, 1994, p.308). Pour Hutton, la diagenèse le métamorphisme et le magmatisme ne sont que des degrés d'une même action du feu souterrain sur les sédiments. Il va au bout de son raisonnement en attribuant l'origine de la chaleur à un mécanisme « cyclique ».

Cette conception constitue une piste pour le concept de l'immensité des temps géologiques, mais cache l'aspect historique des sciences de la Terre. En effet, si l'histoire de la Terre est constituée par la répétition d'événements identiques, dès que les premiers événements ont eu lieu, l'histoire est déjà finie et commence à se répéter.

Le temps cyclique n'est plus donc orienté il ne présente ni origine ni fin et donc il n'est plus historique, car les cycles écartent le problème d'une origine et d'une fin. Par contre il est producteur et réversible, dans la mesure où il permet la restauration du relief par ses épisodes au sein d'un enchaînement cyclique. Le temps cyclique offre ainsi à la Terre une stabilité dynamique en dehors du cadre temporel ayant un début et une fin.

Avec un temps cyclique, les phénomènes qui s'enchaînent se sont produits dans le passé mais ils continuent à se réaliser dans l'actuel de la même manière. Hutton rompt avec le temps sagittal, directionnel, non producteur, neptunien, au profit du temps cyclique. En recourant au **temps cyclique** la théorie de Houtton inscrit la Terre dans un ordre intemporel qui éloigne dans l'immense **profondeur du temps** le problème d'une origine ou d'une fin, ceci constitue une révolution scientifique (Dodick & Orion, 2003b ; Rudwick, 2005) à prendre au sens que Kuhn (1962) elle constitue une rupture dans l'évolution des idées dans les sciences de la Terre c'est-à-dire un changement de paradigme, Gould (1990). Selon Gould (1990), l'investissement de Hutton et plus tard (au 19^{ème} siècle) de Lyell (**l'uniformitarisme**) dans l'idée de temporalité cyclique a contribué à la découverte du « temps profond ». L'immensité des temps géologiques constitue ainsi le cadre essentiel dans lequel se déroulent les cycles Terrestres.

La formation des chaînes de montagnes trouve encore une nouvelle explication au 19^{ème} siècle dans le modèle de la Terre en contraction soutenu par Suess (géologue autrichien 1831-1914) En effet la Terre a passé par une phase de refroidissement et de solidification qui a provoqué sa contraction à la manière d'une pomme ridée. Cette contraction a provoqué aussi des mouvements crustaux à la surface de la Terre, entraînant des affaissements accompagnés par deux sortes de mouvements horizontaux: des mouvements compressifs à l'origine des reliefs et des mouvements distensifs à l'origine des effondrements : "*Souvent, la poussée latérale (mouvement compressif) qui produit la chaîne (de montagnes) est associée à un effondrement (mouvement radial) de la région située en arrière et que Suess nomme l'arrière pays*". (Gohau, 1987, p. 198).

Dans cette thèse il ya la nécessité que la croûte Terrestre est de même nature en tout point de la surface du globe. Ces mouvements crustaux qui peuvent échanger continents et océans à chaque fois qu'ils se produisent, placent la thèse de Suess dans **un cadre actualiste** mais il ajoute à ces mouvements réguliers l'effet de certaines causes géologiques qui peuvent parfois intervenir d'une manière aléatoire. Ainsi, la thèse de Suess s'inscrit aussi dans **un cadre catastrophiste**. Dans son modèle, Suess ne parle pas de fonds océaniques, il suppose qu'ils existent déjà. Le temps est seulement créateur de sédiments. *« Si on le compare au modèle actuel, il ne met pas exactement en jeu les mêmes processus puisqu'il envisage l'affaissement (ce qui est différent du modèle actuel) et la sédimentation (ce qui est comparable au modèle actuel). On peut remarquer que ces deux processus se font dans la même direction verticale : dans ce modèle, les utilisations du temps et de l'espace paraissent donc plus simples. »*(Orange.D, 2003 p.98).

Néanmoins, ce modèle théorique a été réfuté car il n'arrivait pas à répondre à **la possibilité de l'existence d'un manteau plus dense que l'écorce Terrestre** et donc qui ne permettait pas l'effondrement². Malgré que Suess a pensé l'orogénèse comme un phénomène lent, graduel (actualisme de 2^{ème} niveau) et répétitif (Gohau, 1987, p.199- ; Ellenberger, 1994, pp. 317, 331) son explication a été réfuté par Wegener en discutant la répartition des chaînes de montagnes qui devrait se faire d'une manière uniforme et non pas tel que l'on observe réellement.

² Gohau G Les sciences de la Terre aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle. Naissance de la géologie. Paris : Editions Albin Michel , 1990, p239-240 : « Suess dans le tome II de la face de la terre, prolonge la réunion en imaginant un continent austral qu'il appelle Gondwana, et un autre septentrional (Atlantis), séparés par une mer : la Téthys ».

Fisher (1817-1914), en 1881 remet en question **la théorie de la contraction de la croûte Terrestre** qui explique la formation des chaînes de montagnes et il attribua leur genèse à « des mouvements tangentiels »³. Il était le premier à proposer une explication aux mouvements de translation des continents, en proposant le moteur de la dérive des continents de Wegener dans son traité « *Physics of the earth's crust* ». Ce sont des courants existant à l'intérieur de la Terre, qui remontent sous les océans et redescendent sous les continents.

Fischer propose un phénomène de nature cyclique qui explique la translation « continentale » et la naissance des chaînes de montagnes. Le temps est cyclique producteur permanent des phénomènes géologiques.

En récapitulation

Le temps sagittal du neptunisme, le temps cyclique du plutonisme et l'uniformitarisme ou actualisme présentent les figures de temps qui ont été utilisées du 18^{ème} siècle au 20^{ème} siècle pour expliquer certains problèmes scientifiques parmi lesquels, celui de la formation des chaînes de montagnes. Ces conceptions du temps historiques se différencient par un certain nombre de caractéristiques que nous résumons (par analogie au résumé fait par D. Orange (2003) dans la comparaison des deux figures de temps pour la formation des roches crustales) dans le tableau suivant qui va nous servir dans le reste du travail dans l'étude didactique d'un problème historique celui de la formation des chaînes de montagnes.

³ A.Hallam, Une révolution dans les Sciences de la Terre, Ed. Points Science, 1976, p15

La formation des chaînes de montagnes dans le modèle	Le neptunisme	Le plutonisme	Contraction de la Terre	Les translations continentales
Le cadre temporel :	-Un temps sagittal	-Actualisme méthodologique -Un temps cyclique	Actualisme de deuxième niveau	Actualisme de deuxième niveau
	-Un temps fini, orienté -Temps historique -Temps long, non producteur	- un temps infini, non orienté - temps anhistorique - temps profond, producteur	-Un temps long -le temps est créateur de sédiments	-temps long
Les conditions nécessaires de formation des chaînes de montagnes:	-Nécessité d'un état stationnaire : atectonique, amagmatique -Des épisodes irréversibles empruntés au modèle sédimentaire.	-Nécessité d'un état dynamique (mouvement) : tectonique, magmatique - une réversibilité assurée par la succession de cycles identiques composés d'épisodes irréversibles	-Nécessité d'un état dynamique (mouvements crustaux) -phénomène lent graduel répétitif	-nécessité d'une translation continentale -nécessité de courants de convections sous les continents et les océans
	Nécessité des processus continus de précipitation, puis sédimentation Apparition en surface par une nécessité du rabaissement des eaux	des processus continus d'érosion et de restauration des reliefs Apparition en surface par le soulèvement des couches	des mouvements compressifs à l'origine des reliefs et des mouvements distensifs à l'origine des effondrements	Des mouvements tangentiels entre continents

Tableau 12.1 La multiplicité des temps pour le problème de la formation des chaînes de montagnes du 18^{ème} au 20^{ème} siècle

2.2 Le rapport au temps dans l'explication de la formation des chaînes de montagnes à la fin du 20^{ème} siècle et à l'aube du 21^{ème} siècle

Les modèles précédents n'arrivent pas à répondre à certaines questions en rapport avec la structure plissée des chaînes de montagnes, leur altitude et la présence de certains types de roches tels que les ophiolites et leur disposition anormale par rapport aux roches sédimentaires par ce qu'on n'arrive pas à construire des nécessités dans des cadres atectonique. Dans les années soixante, le modèle de la tectonique des plaques a pu résoudre ces problèmes et reconstituer l'histoire du système Terre dans un dynamisme permanent crusto-mantellique. Les sciences de la Terre basculent alors d'un pôle fixiste vers un pôle mobiliste. Le recours à l'actualisme a permis d'attribuer une histoire à la Terre

et de raisonner les phénomènes géologiques antérieurs par l'utilisation de ce qu'apporte l'actuel, dans un cadre historique, utilisant le temps long. **Ainsi les géologues actuels utilisent l'actualisme de deuxième niveau nécessitant le temps long.**

Mais dans le même cadre mobiliste, la recherche géologique du côté de la géologie historique présente deux pôles un premier pôle représenté par les géologues et un deuxième pôle représenté par les géophysiciens. Ces deux pôles entretiennent des relations différentes avec le temps et de ce fait chacun d'eux trace l'histoire de la Terre à sa manière. D. Orange en 2001 dans le cadre d'une recherche en didactique, a réalisé un entretien avec X. Le Pichon (un géophysicien ayant vécu le bascule de la communauté scientifique vers la théorie plaquiste) portant sur le cadre général de la tectonique des plaques, l'adoption de cette théorie dans les années soixante et la compréhension par les chercheurs du fonctionnement et de l'histoire des fonds océaniques.

Il affirme l'existence d'une différence dans le rapport qu'entretiennent les géologues et les géophysiciens avec le temps. En effet, selon Le Pichon les géologues utilisent le temps long dans la reconstitution de l'histoire de la Terre, cette reconstitution, Le Pichon la qualifie d'une lecture qualitative des processus géologiques ; alors que les processus géologiques ne sont pas directement fonction du temps au contraire, ils sont fonction d'autres variables tel que le champ magnétique, le flux de chaleur, la propagation des ondes, la vitesse de réalisation d'un processus géologique comme pour le mouvement des plaques, la sédimentation, l'érosion, la déglaciation...Les géologues doivent donc connaître la teneur des processus géologiques et prendre en compte leurs constantes de temps et leur côté physique (processus physique) et c'est ce qui fait la différence entre les géophysiciens et les géologues, donc accorder plus d'importance à une lecture quantitative (quantification des processus) à côté de la lecture qualitative, qui permet de déduire les propriétés physique de la structure globale, pour pouvoir reconstituer l'histoire de la Terre d'une manière plus consolidée.

Comme nous l'avons déjà dit, les géologues classiques ont recours à **l'actualisme méthodologique de deuxième niveau exigeant le temps long**. Les géophysiciens ne disposent pas des mêmes variables pour la reconstitution de l'histoire de la Terre. Dans quel cadre temporel la retracent-ils ?

Selon Xavier Le Pichon la Terre est inscrite dans un **cadre directionnaliste**, son état passé ne ressemble en aucun cas à son état actuel. Il situe le système Terre dans un **cadre évolutionniste**. Mais dans ses propos, Le Pichon affirme qu'il utilise des processus actuels pour expliquer des situations antérieures. Il est de ce fait actualiste. Mais il précise aussi que pour l'étude des anomalies magnétiques les chercheurs procèdent par une extrapolation des résultats des anomalies les plus récentes à des anomalies plus anciennes : il s'agit bien **d'un actualisme** que D. Orange (2003, p, 105) qualifie **d'actualisme d'extrapolation**, différent de l'actualisme d'analogie dans la mesure où les chercheurs projettent les résultats obtenus de l'actuel d'un océan dans le passé du même océan et non pas d'un autre océan. Mais aussi différent de l'actualisme de deuxième niveau dans la mesure où l'actuel est étendu en continuité vers le passé grâce à la quantification.

Il s'agit donc d'un actualisme qui procède par analogie dans le temps au sein d'une même structure géologique entre son actuel et son passé sur de longues durées c'est **l'actualisme d'extrapolation** « *Cet actualisme projette intégralement dans le passé des phénomènes actuels ; mais cette projection se fait par extrapolation de l'actuel à des périodes plus ou moins reculées : elle étire donc l'actuel vers le passé. Le temps long a pour seule fonction de représenter la latitude d'étirement temporel de l'actuel. C'est un temps long qui prolonge dans le passé un phénomène actuel mais qui ne construit pas de phénomènes imperceptibles à l'homme parce que très longs.* » (D. Orange, 2003, p. 105).

Le Pichon ajoute aussi que les fonds océaniques sont différents des continents, de point de vue constantes de temps, processus physiques et contraintes environnementales, ce qui fait que l'actualisme d'extrapolation ne peut pas être appliqué intégralement pour les continents, en effet les fonds océaniques fonctionnent en « double tapis roulant » et donc le renouvellement de ces derniers subit toujours les mêmes lois dans le temps et rappelle bien un processus cyclique qui pourrait être étudié dans un cadre **stationnariste** du système Terre. Alors que les continents changent continuellement en surface, et leur passé ne ressemble pas à leur actuel et s'inscrivent de ce fait, dans un **directionnalisme progressif** (D. Orange, 2003, p. 106).

3 Problématisation historique actualiste : formation des chaînes de marges

Dans le cadre de la tectonique des plaques, l'aspect externe de la surface de la Terre subit un changement continu au cours des temps géologiques. Les chaînes de montagnes sont

traitées donc dans un cadre directionnaliste progressif.

Dans le modèle de la tectonique des plaques, le devenir de la lithosphère océanique est son enfoncement dans la Terre au niveau des zones de subduction. Pour que la subduction se déroule dans sa totalité, il faut du temps long. L'actuel ne permet pas au chercheur de voir le phénomène entier il lui fournit que quelques indices que le scientifique utilise comme des étapes d'un scénario long. Le chercheur fait référence à l'actuel et recoure à l'actualisme de 2^e niveau.

Dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques, les chaînes de marges forment des alignements bien précis autour de l'océan pacifique, en Europe, dans l'océan indien et au milieu des océans atlantique et pacifique et marquent les limites des plaques lithosphériques. Comme nous l'avons déjà défini, on distingue trois types de chaînes de marges : les chaînes de subduction, les chaînes d'obduction et les chaînes de collision.

Nous allons nous limiter à l'exemple de la chaîne de collision de l'Atlas tunisien, du fait qu'il est étudié dans le programme des SVT de la troisième année au lycée (correspond à la classe de première S en régime français).

En effet, La Tunisie occupe la bordure Nord-Est de la plaque africaine. Elle se caractérise géologiquement par des ensembles structuraux parmi les quels figure la chaîne montagneuse de l'Atlas tunisien. L'Atlas tunisien appartient à l'Atlas magrébin qui est une chaîne de collision qui résulte du rapprochement progressif de l'Afrique et de l'Eurasie. Il reste cependant des témoins de l'ancien océan (la Thétys) qui séparait au crétacé les deux continents : Il s'agit des deux parties de la méditerranée, l'occidentale et l'orientale. La formation de l'Atlas Tunisien dans le cadre précédent, nécessite la collision entre les croûtes continentales de la plaque africaine et la plaque eurasiatique et la disparition de la partie océanique de la plaque eurasiatique sous la plaque africaine, il se produit un raccourcissement horizontal et la superposition des deux croûtes continentales. Il en résulte un épaississement crustal et par réaction isostatique naissent de puissants reliefs compensés en profondeur par une racine crustale.

Pour résoudre le problème de la genèse des chaînes de collisions intercontinentales telles que l'Atlas Tunisien (qui fait partie de l'Atlas magrébin) et dans le cadre d'une problématisation fonctionnaliste, les chercheurs font intervenir **la nécessité que les deux plaques africaine et eurasiatique entrent en collision.**

Dans le cadre d'une problématisation historique, l'actuel ne permet pas de voir l'orogénèse en sa totalité. La résolution de ce problème, n'est par contre possible que dans un cadre

temporel plus large, c'est-à-dire un actualisme de deuxième niveau, (D. Orange 2003) qui **nécessite un temps long** pour la production du phénomène. En effet, les chercheurs peuvent détecter de faibles modifications qui se produisent à notre échelle temporelle et les transposer sur une longue durée pour reconstituer le phénomène.

Dans la suite de cette recherche, nous allons étudier la problématisation des élèves de la formation de l'Atlas tunisien. Puis nous allons comparer la problématisation des chercheurs à celles des élèves dans le but d'identifier quels genres de difficultés rencontrent les élèves au cours de la construction d'un problème historique.

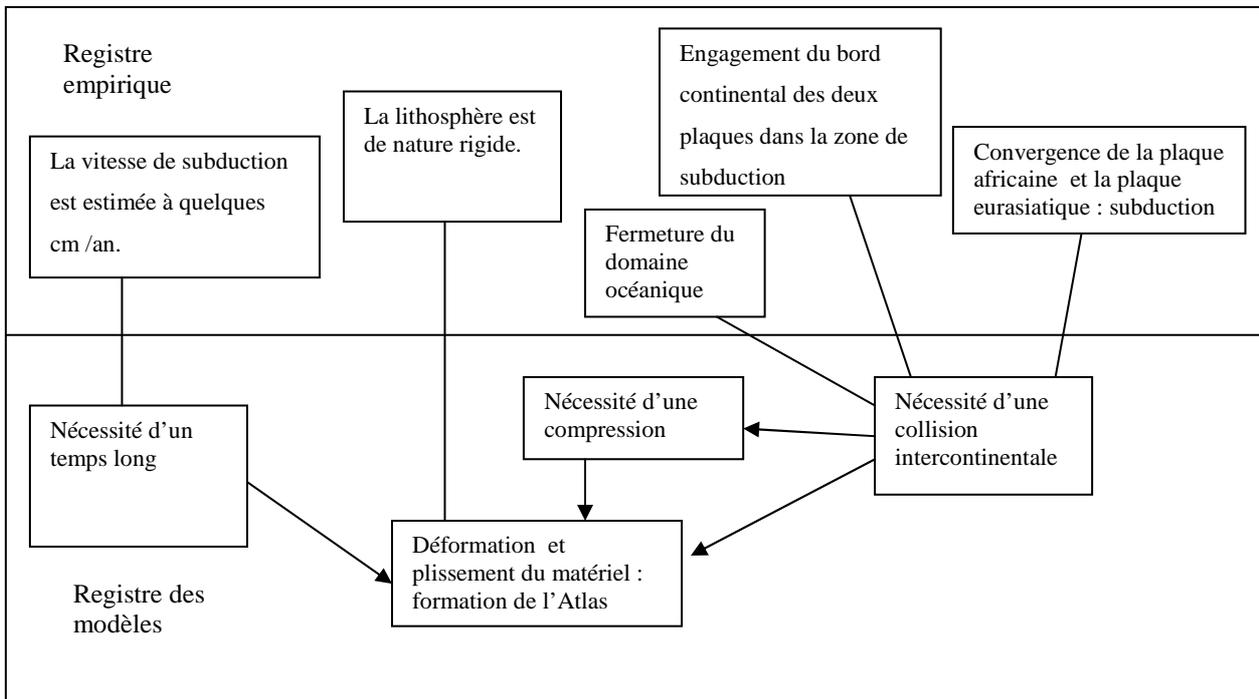


Figure 12.2. Espaces des contraintes des chercheurs dans le problème de la formation de l'Atlas magrébin

4 Conclusion

La réflexion épistémologique sur la naissance des chaînes de montagnes au sens large dans l'histoire de la géologie montre qu'il existe différents modèles depuis le 18^{ème} siècle jusqu'au 20^{ème} siècle. Nous signalons de même l'utilisation de différentes figures de temps. Un nouveau type d'actualisme est dégagé chez les chercheurs actuels en particuliers les géophysiciens, que qualifie D. Orange, d'actualisme de deuxième niveau faisant intervenir le temps long dans la reconstitution de l'histoire de la naissance des chaînes de montagnes au sens large.

Chapitre 13

La formation de l'Atlas tunisien

Cadre didactique de la situation

Introduction

1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu
2. La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur
3. Analyse didactique préliminaire de la situation
4. Conclusion

Introduction

La situation que nous allons étudier s'intègre dans le cadre du programme de géologie de troisième année sciences expérimentales (programme officiel 2006), et plus précisément dans le cadre de l'étude de la formation des chaînes de montagnes : cas de l'Atlas tunisien.

Il s'agit de reconstituer les étapes majeures contribuant à la genèse de l'Atlas tunisien en tenant compte du temps.

Le manuel scolaire (édition 2006, p.319, 320 et 321) indique une seule activité pour cette partie (dégager les étapes de l'orogénèse de l'Atlas Tunisien). Nous traiterons dans ce chapitre et le chapitre qui suit la reconstitution de la naissance de l'Atlas tunisien par les élèves et leur utilisation du temps.

1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu

La situation de classe mise en place vient après que des activités ont permis aux élèves de se replacer dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques, de construire la notion de plaque lithosphérique, les limites de plaques, l'organisation et le fonctionnement actuel d'une dorsale et de comprendre le couplage accréation –subduction en tant que phénomènes responsables du maintien de l'équilibre dynamique globale ainsi que le moteur responsable, les courants de convection. Suite à ce qui a été travaillé nous allons passer à l'étude de la formation et la naissance de l'Atlas tunisien comme étant l'une des conséquences du dynamisme globale qui apparaît à la surface de la Terre.

2. La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur

Le professeur a d'abord rappelé que la création de la matière lithosphérique au niveau de la dorsale est compensée par une disparition de lithosphère au niveau des fosses au moment de la subduction et que le moteur responsable de la réalisation en permanence de ces deux phénomènes consiste dans les courants de convection qui se trouvent au niveau du manteau. C'est une façon de remobiliser ce qui a été précédemment travaillé avec la classe et d'installer la consigne à suivre dans un cadre bien identifié des élèves. Le professeur propose la question suivante :

La divergence de plaques qui se déroule au niveau des dorsales contribue à la naissance d'un océan. D'après vous quelle structure géologique se forme suite à la convergence de la plaque africaine et la plaque eurasiatique au nord de la Tunisie et quelles sont les étapes de sa formation?

Il s'agit donc de tracer l'histoire de la naissance de l'Atlas tunisien. La réponse attendue est conforme au savoir actuel, construit dans le cadre théorique de la tectonique des plaques. Pour ce faire, le professeur demande aux élèves de compléter deux étapes qui précèdent l'état actuel de l'Atlas tunisien. Le professeur souhaite que les élèves réinvestissent certains des points précédents dans un travail sur l'histoire de l'Atlas tunisien. La subduction est donc connue par les élèves, par la disparition de la lithosphère océanique. Cette partie s'appuie sur trois schémas très simplifiés du Nord de la Tunisie. Les élèves ont à reconstituer, les positions des bords des deux plaques africaine et eurasiatique. C'est un moyen de matérialiser des étapes successives de la naissance de l'Atlas en liaison avec le fonctionnement de la subduction dans cette partie de Terre. Une correction collective est prévue à la fin du travail.

3. Analyse didactique préliminaire de la situation

Cette situation de classe nous intéresse. Elle permet de savoir de quelle manière les élèves, avant enseignement, reconstituent l'histoire de l'Atlas tunisien et s'ils peuvent reculer dans le temps pour retracer les étapes qui ont contribué à la formation de la chaîne Atlasique et dans quelle mesure ils parviennent à construire la nécessité d'un temps long. L'activité proposée par le professeur, exige un recul de l'actuel vers des moments du passé. Les réalisations sur les dessins nous renseignent sur la compréhension par les élèves des grandes étapes aboutissant à la formation de l'Atlas tunisien. Dans trois périodes considérées données aux élèves dans l'activité à faire : le miocène inférieur, le miocène supérieur et le quaternaire.

Cet exemple laisse penser a priori qu'on peut utiliser le principe de l'actualisme, parce que le temps et l'espace conservent les effets des phénomènes géologiques c'est-à-dire dans notre cas (la genèse de l'Atlas Tunisien) on observe des structures géologiques qui représentent les traces de la subduction puis de la collision continentales comme par exemples les prismes d'accrétion, les écaillés, la formation d'un bassin marginal, les plis, les failles ... La présence de telles structure, suggère des nécessités dans le passé déduites à

partir de l'actuel par un recul dans le temps long. On a recours ainsi à un actualisme de deuxième niveau.

Pour comprendre la position du bord de la plaque eurasiatique par rapport au bord africain il est nécessaire de mettre en jeu sur une certaine durée une dérive latérale dans l'espace, un phénomène que l'on perçoit encore aujourd'hui à l'ordre de quelques cm par an. Nous utilisons l'**actualisme de deuxième niveau**. Le temps long dont on a besoin est donc relativement simple, pour plusieurs raisons qu'énumère D. Orange (2003) :

- ses effets sur une petite durée sont visibles pour l'homme.
- ses effets sur une grande durée sont visibles : c'est la chaîne atlasique actuelle
- par un simple calcul, on trouve le temps long nécessaire pour obtenir l'Atlas.

Dans notre cas, le temps long est représenté par de l'espace (C. Orange & al, 1999, p. 114)

La fiche d'activité

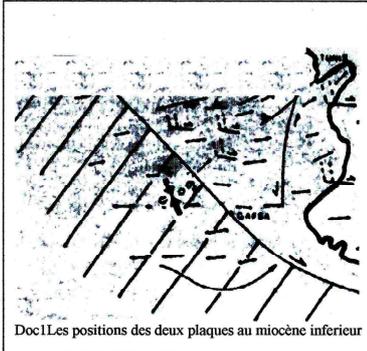
La formation des chaînes de montagnes
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

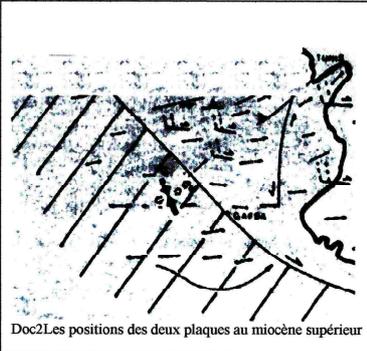
- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

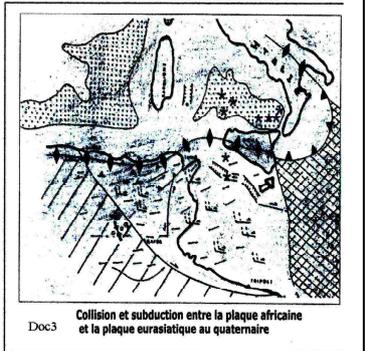
Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←	▨▨▨▨	▲▲▲	◆◆◆



Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur



Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur



Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 13.1 fiche d'activité pour la troisième étude

3.1 L'espace des contraintes possible pour la formation de l'Atlas tunisien dans le contexte de l'activité

Construire une représentation la genèse de l'Atlas tunisien sur le bord africain, se

déroulant dans le passé, dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques et dans le contexte de l'activité proposée aux élèves, c'est construire la nécessité **d'une compression appliquée sur le matériel lithosphérique**. Quelles contraintes empiriques peuvent être articulées à cette nécessité, parmi celles disponibles pour les élèves ?

Pour qu'une collision intercontinentale ait lieu il faut que la plaque eurasiatique ainsi que la plaque africaine portent toutes les deux une croûte continentale il faut que ces deux croûtes continentales soient engagées dans une zone de subduction et il faut que le domaine océanique qui existe entre ces deux croûtes continentales disparaisse.

La vitesse de subduction est estimée à quelques cm/an est liée à la nécessité d'un temps long.

La rigidité du matériel lithosphérique et la nécessité d'une collision intercontinentale sont liées à la nécessité d'une compression de la lithosphère qui nécessite du temps long.

Nous représentons l'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas tunisien dans le contexte de la fiche d'activité.

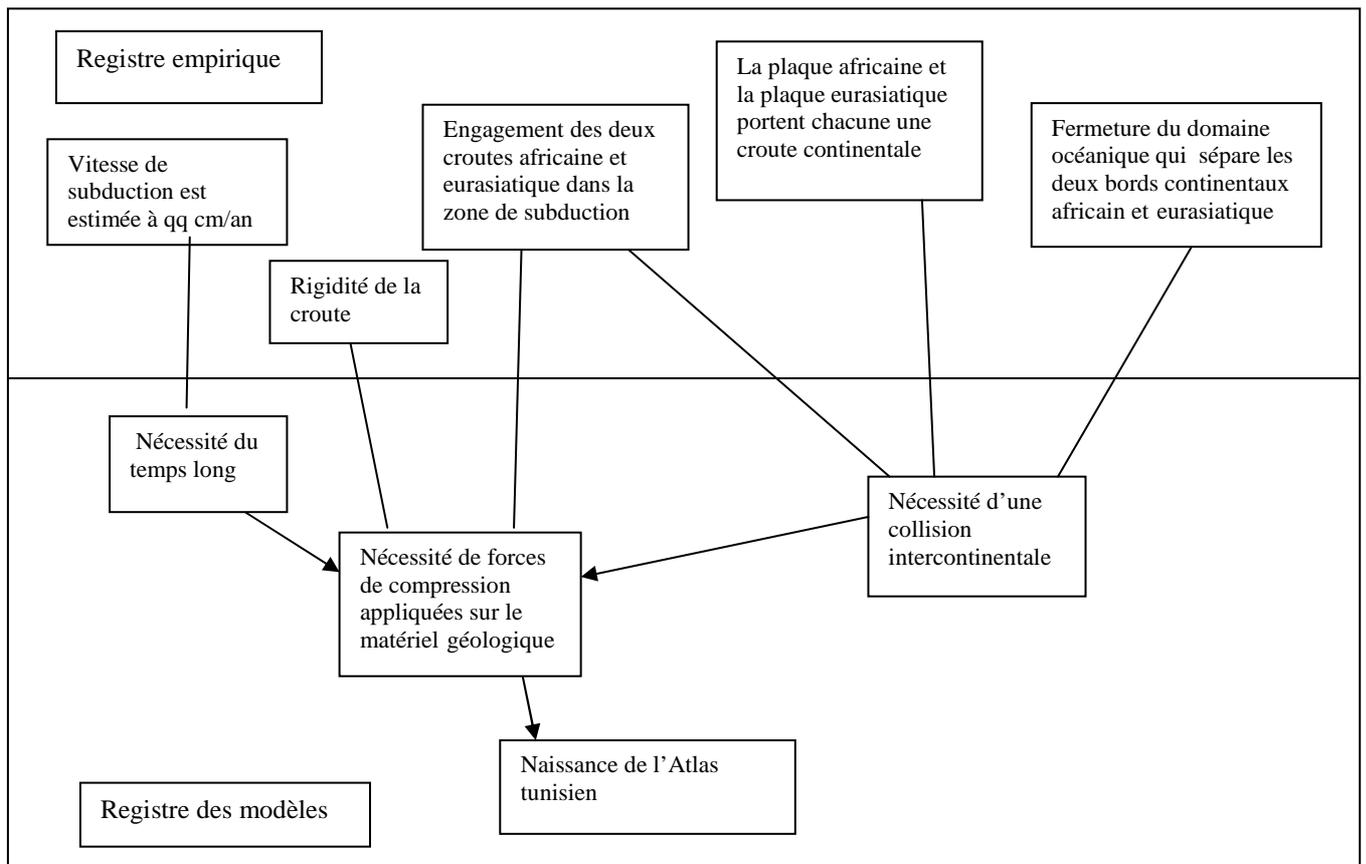


Figure 13.2 L'espace des contraintes pour la formation de l'Atlas tunisien dans le contexte de l'activité

4. Conclusion

L'analyse a priori de cette situation laisse penser que la reconstitution de l'histoire de l'Atlas tunisien n'est pas simple. Dans la mesure où la projection dans le passé met en jeu un actualisme de deuxième niveau, qui lie explicitement du temps à de l'espace ce qui n'est pas évident pour tout les élèves ainsi que l'utilisation d'un temps long qui permet d'obtenir des chaînes à des altitudes importantes malgré que la vitesse de subduction et de collision est faible de quelques cm/an.

Chapitre14
La reconstitution de l’histoire de genèse de l’Atlas
tunisien
Explication des élèves et utilisation du temps

Introduction

1. Le recueil des données
2. Les productions écrites des élèves
3. Conclusion générale de la troisième étude

Introduction

Dans le chapitre 12, nous avons étudié la problématisation du temps chez les chercheurs au cours de la construction de l'histoire des chaînes de montagnes. En ce référant à cette dernière, nous allons analyser les productions des élèves pour comprendre comment ces derniers problématisent ils le temps géologique historique dans la reconstitution des étapes aboutissant à la formation des chaînes de montagnes et plus particulièrement l'Atlas Tunisien.

1. Le recueil de donnés

Pour la formation d'une chaîne de montagne, nous avons procédé comme pour les deux autres études par un questionnaire diagnostique qui comporte six questions dont deux ont un rapport avec la formation des chaînes de montagnes au sens large car nous avons choisi de ne pas se limiter à l'Atlas Tunisien avant tout apprentissage fait : la troisième et la sixième question. L'analyse de ces deux questions va nous permettre de voir les idées et les raisonnements que proposent les élèves avant l'apprentissage.

1.1 Analyse de la troisième question du questionnaire

La troisième question évoque le maintien de l'équilibre au niveau de l'écorce Terrestre, que nous avons analysé dans la deuxième étude et demande aussi de proposer une explication à la formation des reliefs. (annexe3)

La question est comme suit :

dans l'histoire de l'Homme, il y a des gens, qui, en regardant les reliefs (chaînes de montagnes, vallées, plaines...) à la surface de la Terre ont pensé que la présence de ces reliefs est expliquée par le fait que la Terre se rétrécit (diminue de surface) au cours du temps, d'autres ont expliqué la présence de ces reliefs par le fait qu'elle grandisse et une troisième catégorie a pensé qu'elle garde les mêmes dimensions au cours du temps. Qu'est- ce que vous en pensez ? Et pourquoi ?

Nos allons reproduire les réponses des élèves comme elles sont écrites dans leurs productions.

- **Première catégorie de réponse : une conception sédimentaire**

Pour expliquer le mécanisme qui conduit à la formation des reliefs à la surface de la Terre les élèves utilisent un vocabulaire du type : facteurs, sédimentation, érosion, plissement, accumulation, facteurs climatiques, vent, pluie, plis, failles, couches stratigraphiques. Le nombre des élèves ayant présenté ces types de réponses : 5/25(N° 1-2-4-16-18)

Nous constatons que ces élèves proposent le modèle sédimentaire pour expliquer la formation des reliefs. Le recours à ce modèle explicatif, pourrait être expliqué par le fait que les élèves n'ont étudié comme processus de genèse en géologie que le phénomène de sédimentation et la genèse des roches sédimentaires. En effet, la tectonique n'est présente en aucun des programmes d'enseignement de sciences de la vie et de la Terre des niveaux précédents la troisième année secondaire (équivalant de la classe de première en régime français) ni en primaire ni au lycée. « *L'accumulation des roches forme les montagnes* » et « *l'érosion par le vent ou l'eau forme les vallées* ». Le temps géologique édificateur des structures géologiques et producteur des événements est absent dans les productions des élèves. (annexe 3)

Exemple n°1 : « Les dimensions de la terre restent constantes mais les reliefs sont dues à un ensemble de facteurs comme la sédimentation le plissement, l'érosion ect... »

Exemple n°2 : « Je pense que la présence de ces reliefs par le fait qu'elle grandisse car le sol s'accumule et avec les facteurs climatiques (vent, vent, pluie...) il se forme ces reliefs. »

- **Deuxième catégorie de réponse : une conception plaquiste**

Pour expliquer le mécanisme qui conduit à la formation des reliefs à la surface de la Terre les élèves utilisent un vocabulaire du type : accidents des plaques, éloignement des plaques, les mouvements des plaques, convergence entre les continents. Le nombre des élèves ayant présenté ces types de réponses : 4/25 (N°3-11-24-25)

Nous constatons que ces élèves proposent le modèle tectonique pour expliquer la formation des reliefs. Le recours à ce modèle explicatif, les élèves n'entrent pas dans l'explication du mécanisme qui se déroule. Encore une fois nous décelons une difficulté à construire un mécanisme cette fois dans un contexte tectonique. Le temps géologique est encore absent.

Exemple n° 3 : « les reliefs sont dues à cause des accidents des plaques et les rivières les océans et les mers sont dues à leurs éloignement »

Nous récapitulons les deux catégories de réponses dans le tableau ci-dessous

Les catégories des réponses à Q3	Les caractéristiques de chaque catégorie	Le nombre des élèves
Catégorie 1 Conception sédimentaire	La présence des reliefs à la surface de la Terre est expliquée par la sédimentation et les facteurs qui l'engendrent : érosion, vent, pluie... Le temps est absent	5/25 N° 1-2-4-16-18
Catégorie 2 Conception plaquiste	La subduction et l'expansion sont les deux mécanismes explicatifs de la conservation de la surface de la Terre et de la genèse des reliefs. Le temps est absent.	4/25 N°3-11-24-25

Tableau 14.1 : Récapitulation des catégories de réponses pour la question3 du questionnaire

En conclusion

Le problème du temps géologique est toujours présent, les élèves raisonnent en dehors du cadre de la géologie historique.

1.2 Analyse de la sixième question du questionnaire

Par la sixième question concernant l'origine des chaînes de montagnes, nous cherchons à voir quels sont les scénarios que les élèves proposent pour expliquer la genèse des montagnes au sens large s'ils prennent comme point de départ la sédimentation, l'érosion, les plis ou autre chose et à quel point les élèves arrivent- ils à évoquer le phénomène de la subduction et de l'accrétion comme mécanismes explicatif de la genèse des chaînes de montagnes, et surtout, s'ils mobilisent le temps géologique long édificateur d'événements.

La question est comme suit : (annexe 3)

Pour certaines personnes les chaînes de montagnes se sont formées suite à un rétrécissement du volume de la Terre ce qui crée un aspect de rides .D'autres pensent que les chaînes de montagnes se sont formées suite à un dépôt de sédiments lors de l'érosion des terrains qui l'entourent se qui explique leurs altitudes. Un troisième groupe pense que les chaînes de montagnes se sont formées suite à un plissement de terrain provoqué par des contraintes tectoniques. Expliquez en quelques lignes ou par un schéma légendé comment d'après vous se sont formées les chaînes de montagnes ?

En examinant les réponses des élèves à la sixième question nous remarquons que ces derniers se répartissent en trois catégories de réponses qui sont réparties comme suit :

- **Première catégorie de réponse : une conception sédimentaire**

Le nombre des élèves ayant présenté ces types de réponses : 5/25(N°1-4-8-9-10)

Pour expliquer la genèse des chaînes de montagnes les élèves utilisent un vocabulaire du type : l'érosion, l'accumulation des roches dans un bassin, un dépôt de sédiments, sédimentation d'un ensemble de strates sédimentaires.

En comparant ces réponses à celles produites à la troisième question nous remarquons que ces élèves excepté le n°9 (c'est-à-dire 4 /5 des élèves) ont répondu de la même façon. Le temps géologique est encore absent

- **Deuxième catégorie de réponse : une conception plaquiste**

Pour expliquer la genèse des chaînes de montagnes les élèves utilisent un vocabulaire du type : des contraintes tectoniques, plissement de terrain, des plaques qui se mettent l'une sur l'autre. Le nombre des élèves ayant présenté ces types de réponses : 5/25(N° 2-3-7-23-24). Nous constatons que ces élèves proposent une conception mobiliste pour expliquer la genèse des chaînes de montagnes. Le facteur responsable de la genèse des montagnes (force de pression exercée au niveau de l'écorce Terrestre) est présent, mais le mécanisme de l'orogénèse est absent. Le temps avec toutes ses figures est absent. Les élèves raisonnent en dehors de la géologie historique.

- **Troisième catégorie de réponse : la genèse des chaînes de montagnes est due aux séismes et aux volcans**

Le nombre des élèves ayant présenté ces types de réponses : 2/25 (N°5-14)

Pour expliquer la genèse des chaînes de montagnes les élèves proposent les séismes et les volcans comme cause. Le temps géologique est absent.

Nous récapitulons les trois catégories de réponses dans le tableau ci-dessous.

Les catégories des réponses à Q6	Les caractéristiques de chaque catégorie	Le nombre des élèves
Catégorie 1 Une conception sédimentaire	Les chaînes de montagnes se sont formées par l'érosion, l'accumulation des roches dans un bassin, un dépôt de sédiments, sédimentation d'un ensemble de strates sédimentaires. Présence d'une conception sédimentaire.	5/25 N°1-4-8-9-10
Catégorie 2 Une conception plaquiste	Les chaînes de montagnes se sont formées suite à des contraintes tectoniques (plissement de train, convergence de plaques) Présence d'une conception mobiliste.	5/25 (N°2-3-7-23-24)
Catégorie 3 Les séismes et les volcans sont la cause	Les chaînes de montagnes se sont formées à causes des volcans et des séismes	2/25 N°5-14

Tableau 14.2 : Récapitulation des catégories de réponses pour la question 6 du questionnaire

En conclusion

Nous pouvons confirmer que l'élève présente une difficulté à construire un processus explicatif (un mécanisme) pour la formation des chaînes de montagnes. Il est plus facile pour lui de proposer les causes responsables du résultat (genèse d'une chaîne de montagne) sans passer par le comment des choses c'est-à-dire le processus qui a permis l'obtention de ce résultat final.

De même le temps en tant que facteur essentiel dans l'édification des chaînes de montagnes est totalement absent dans toutes les productions des élèves. L'orogénèse constitue dans ce cas pour tous les élèves un problème de temps.

1.3 Croisement des catégories de réponses de la troisième et de la sixième question

Nous allons croiser les catégories de réponses de la troisième et de la sixième question car ces deux dernières tournent autour de la formation des reliefs et surtout des chaînes de montagnes et concernant les moteurs responsables de cette genèse (subduction et expansion). Le croisement va nous permettre d'identifier des catégories de conceptions. En croisant les catégories de réponses des ces deux questions nous remarquons que les élèves qui ont répondu aux deux questions se répartissent comme suit :

Q6 \ Q3	Catégorie 1 Une conception sédimentaire	Catégorie 2 Une conception structuraliste
Catégorie 1 la conception sédimentaire	1, 4	
Catégorie 2 conception structuraliste	2	3, 24

Tableau 14.3 : croisement des catégories de réponses des questions 3 et 6

Deux élèves expliquent la formation des reliefs en général et des chaînes de montagnes en particulier par des contraintes tectoniques dues aux mouvements de translation des plaques. Ces deux élèves représentent un exemple intéressant dans la mesure où la même conception est mobilisée pour expliquer la formation des reliefs en générale et la genèse des chaînes de montagnes en particulier.

Deux élèves proposent le modèle sédimentaire pour expliquer la formation des reliefs d'une part et des chaînes de montagnes d'autre part mais toujours dans un raisonnement cohérent, c'est-à-dire c'est l'accumulation des sédiments qui fait que les chaînes de montagnes prennent cette forme et ces altitudes. C'est la conception la plus primitive en géologie (conception neptunienne), De même dans les programmes d'enseignements en SVT, en Tunisie, le cycle sédimentaire, représente le seul cycle enseigné en géologie, ce qui explique bien la présence de cette conception chez les élèves.

En conclusion

Le nombre d'élèves qui ont répondu à ces questions est très faible, cela nous conduit à supposer que la construction d'un modèle explicatif pour la formation des chaînes de montagnes représente une difficulté. Le temps géologique est absent.

Au cours d'une séance de travaux pratiques de deux heures et à la suite du travail fait sur le moteur du mouvement des plaques nous avons demandé aux élèves d'expliquer la formation des chaînes de montagnes, Le professeur pose la question suivante :

La divergence de plaques qui se déroule au niveau des dorsales contribue à la naissance d'un océan. D'après vous quelle structure géologique se forme suite à la convergence de la plaque africaine et la plaque eurasiatique au nord de la Tunisie et quelles sont les étapes de sa formation?

Il s'agit donc de tracer l'histoire de la naissance d'une chaîne de montagnes, celle de l'Atlas tunisien

2. Les productions écrites des élèves

Pour répondre à cette question, le professeur demande aux élèves de compléter deux étapes qui précèdent l'état actuel de l'Atlas tunisien en s'appuyant sur trois schémas très simplifiés du Nord de la Tunisie. Les élèves ont à reconstituer, les positions des bords des deux plaques africaine et eurasiatique. C'est un moyen de matérialiser des états successifs de l'Atlas en liaison avec le fonctionnement de la subduction dans cette partie de la surface de la Terre. Une correction collective est prévue à la fin du travail.

Pour cette étude nous n'avons pas fait de discussions à-propos de la genèse de l'Atlas tunisien par contrainte de temps.

2.1 Procédure d'analyse

Nous allons analyser les dessins de 30 élèves (deux classes) en essayant de voir comment les lycéens prennent en compte le temps dans la reconstitution historique des étapes de formation de l'Atlas tunisien et dans quelle mesure ils parviennent à construire la nécessité d'un actualisme. Il ne s'agit pas d'analyser des types de dessins puisque tous les élèves doivent compléter les dessins déjà faits sur une fiche d'activité, notre analyse consiste donc à catégoriser les schémas complétés.

Du fait que l'activité consiste à placer les structures qui devaient se présenter au deux époques miocène inférieur et miocène supérieur, deux périodes qui précèdent l'état actuel de l'Atlas, l'analyse sera donc dans le sens d'une recherche du temps mobiliser par les élèves et indiqué par de l'espace c'est-à-dire nous allons essayer d'analyser les indicateurs de l'espace placés par les élèves pour se renseigner sur la nature du temps qu'ils mobilisent dans le cas où il existe.

Sur le schéma du miocène inférieur, l'élève doit placer un indicateur qui montre qu'il s'agit d'une zone de subduction entre deux bords continentaux : le bord africain déjà présent sur le dessin et le bord eurasiatique que l'élève doit schématiser. Il doit aussi présenter une zone de compression ainsi que les prismes d'accrétion qui séparent les deux bords d' 1cm de large.

Sur le schéma du miocène supérieur, l'élève doit indiquer le blocage de la subduction et la collision entre les deux bords.

2.2 Analyse des schémas

Nous analysons les schémas des élèves par indicateur utilisé c'est-à-dire nous analysons comment les élèves schématisent le bord eurasiatique, la zone de compression, les prismes d'accrétion, la subduction et le blocage de la subduction.

2.2.1 Le bord eurasiatique

Sur 30 élèves, 28 ont schématisé sur le premier schéma le bord eurasiatique séparé du bord africain. Pour les élèves **le temps est représenté par de « l'espace »** dans la mesure où la partie qui sépare les deux bords nécessite du temps pour disparaître et pour arriver à la collision au quaternaire. Le temps est mobilisé par l'utilisation de « l'espace » mais sa nature n'est pas encore déterminée s'agit-il d'un temps long ou d'un temps de la petite histoire.

Pour 12/30 élèves, **le bord eurasiatique prend une allure complémentaire à l'allure du bord africain avant même la collision**, comme étant deux bords qui peuvent se coller comme les morceaux d'un puzzle (une conception qui rappelle le continentalisme de Wegener).

En prenant la dernière étape « le quaternaire » comme point de départ pour reculer dans le temps ces élèves construisent le bord eurasiatique au miocène inférieur et supérieur par analogie à l'allure actuelle après collision, les élèves mobilisent **un actualisme analogique** (exemple figure 14.4).

NEJRI
ANAL

La formation des chaînes de montagnes
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	◆◆◆

Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur

Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur

Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 14.1 le bord eurasiatique est complémentaire au bord africain avant la collision

7/30 des élèves ont tracé le **bord eurasiatique en une ligne droite horizontale** au miocène inférieur, ce dernier n'est pas personnalisé il n'a aucune allure spécifique définie au miocène inférieur. Ce bord eurasiatique ne change pas d'allure même au miocène supérieur lorsqu'il se colle au bord africain tout en restant en ligne droite autrement il ne se déforme pas (exemple figure 14.5). Nous pouvons supposer que ce bord eurasiatique ne subit pas de contraintes tectonique au cours du temps.

Nous émettons les suppositions suivantes :

- L'allure du bord eurasiatique reste inchangée au cours du temps même lorsque ce dernier se colle au bord africain **dans ce cas le temps conserve la structure. Il s'agit d'un temps historique narrateur mais non producteur à l'échelle de la structure (le bord eurasiatique).**
- Le bord eurasiatique se déplace et se colle au bord africain, il change de position dans l'espace au cours du temps (du miocène inférieur au miocène supérieur) **dans ce cas le temps est historique narrateur mais aussi producteur d'événement à l'échelle de la surface de la Terre.**
- Le temps historique utilisé par l'élève est un temps relatif : il n'est pas producteur par rapport à la structure elle-même mais il est producteur d'événement par rapport à la surface de la terre.

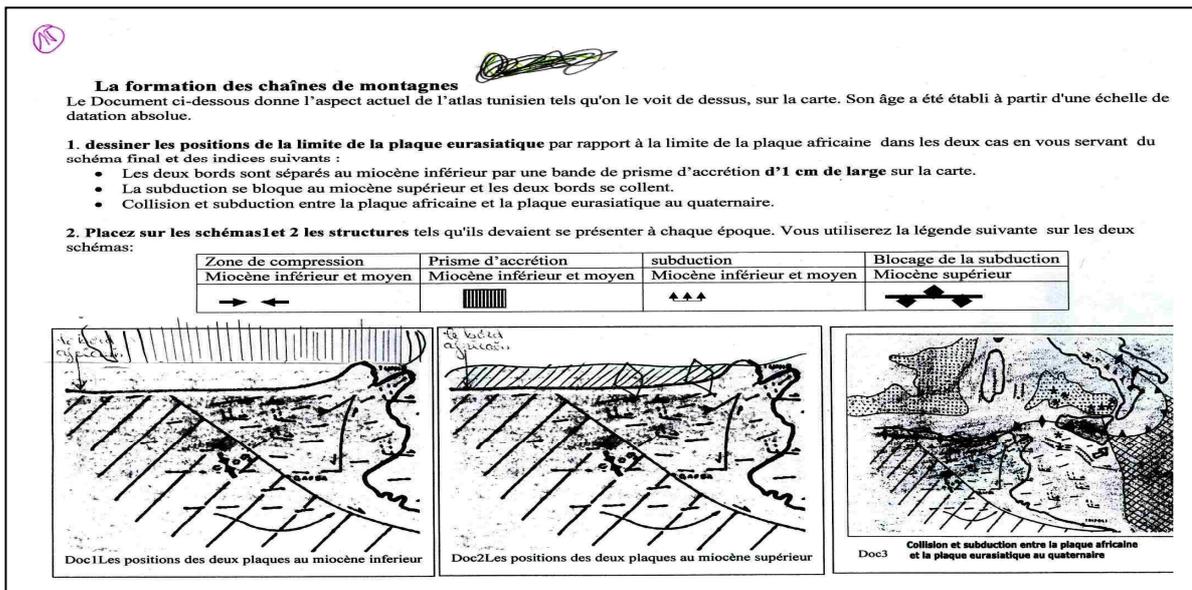


Figure 14.2 le bord eurasiatique indéfini tracé à la règle ne change pas d'allure au cours du temps

Pour 9/30 des élèves le bord eurasiatique a une allure spécifique qui n'est pas complémentaire au bord africain, mais qui prend petit à petit la forme du bord africain au cours du miocène supérieur est après la collision (exemple figure 14.6). Le bord eurasiatique évolue au cours du temps et change d'allure. Nous supposons que les élèves font appel à l'actuel dans leurs raisonnements pour construire une étape passée de l'histoire de l'Atlas tunisien mais ils mobilisent aussi le temps long qui a permis un changement d'allure pour le bord eurasiatique. **Il s'agit dans ce cas d'un actualisme de deuxième niveau qui nécessite le temps long. (Exemple figure 14.6)**

Maâlouk Wijssène

La formation des chaînes de montagnes
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	◆◆◆

Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur

Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur

Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 14.3 le bord eurasiatique est personnalisé et change d'allure au cours du temps

2.2.2 La zone de compression

La zone se trouvant entre les deux plaques subit la compression suite à la convergence des deux plaques au moment de la subduction ainsi les élèves doivent placer les deux flèches (indicateur d'une zone de compression) sur les deux bords continentaux de part et d'autre de l'espace où se trouve les prismes d'accrétion.

Sur 30 élèves, 6 seulement ont indiqué sur leurs schémas qu'il s'agit d'une zone de compression malgré que l'indicateur de cette dernière figure dans la consigne.

Pour 3 d'entre eux la compression est perpendiculaire au sens de la convergence. Nous distinguons deux types de compression :

- Une compression qui se produit entre les deux bords continentaux

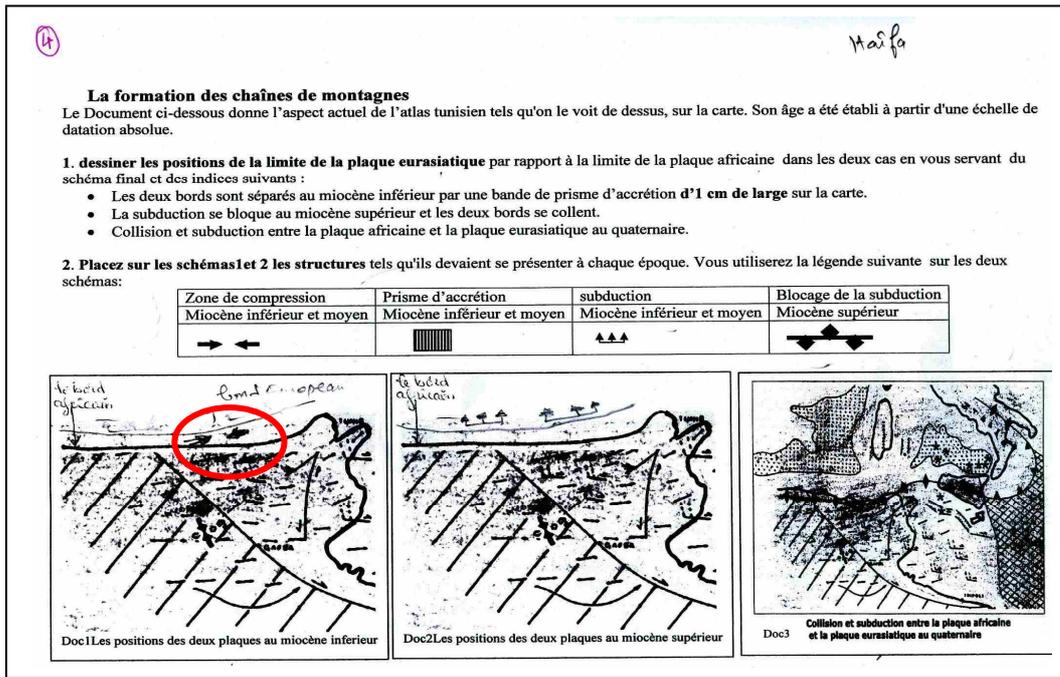


Figure 14.4 la compression perpendiculaire au sens de la convergence et se trouve dans l'espace intercontinental

- Une compression qui se produit sur le bord eurasiatique. Le matériel eurasiatique seul subit les déformations avant d'entrer en collision avec le bord africain.

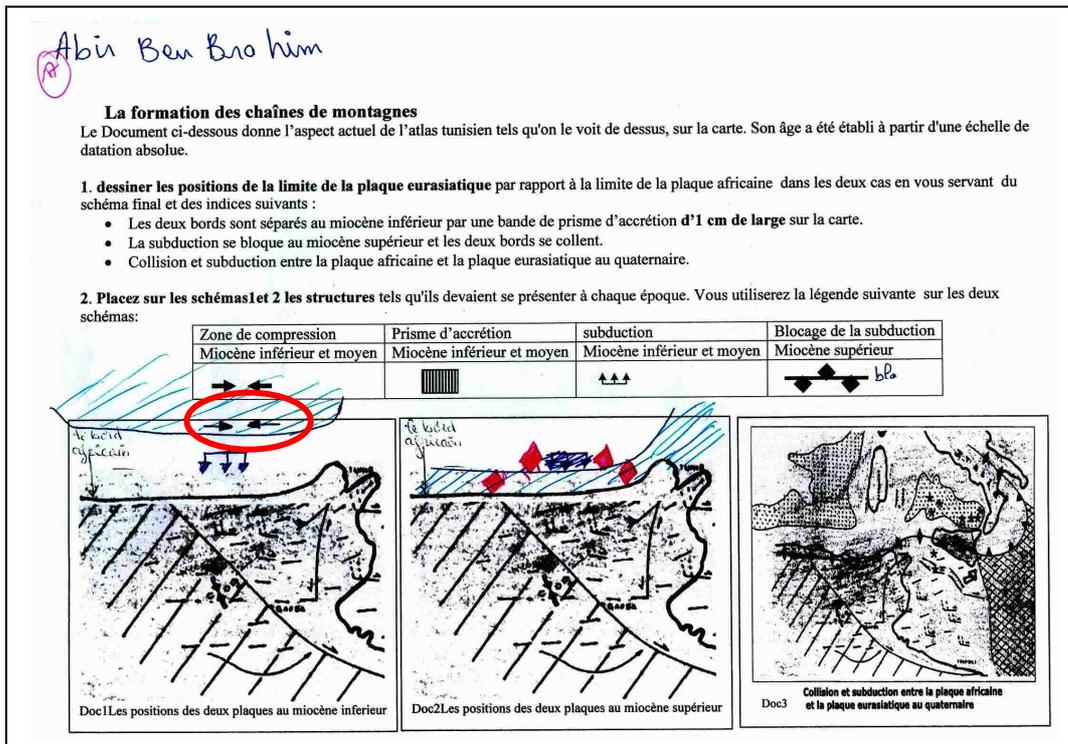


Figure 14.5 la compression perpendiculaire au sens de la convergence et touche au matériel eurasiatique

Pour les 3 autres élèves la compression est schématisée dans le même sens que la convergence. La convergence provoque la compression du matériel intercontinental, il s'agit d'un enchaînement de cause à effet cohérent.

⑤

La formation des chaînes de montagnes

Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'1 cm de large sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	◆◆◆

Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur

Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur

Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

⑥

Maoulawi Wijésène

La formation des chaînes de montagnes

Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'1 cm de large sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	◆◆◆

Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur

Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur

Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figures 14.6 la compression est parallèle au sens de la convergence

2.2.3 Les prismes d'accrétion

Les prismes d'accrétion se forment dans l'espace qui sépare les deux bords continentaux des deux plaques, suite aux compressions provoquées au cours de la subduction. Sur le schéma les élèves doivent les représenter dans cet espace en utilisant la légende proposée dans la fiche d'activité.

Sur 30 élèves, 26 ont schématisé les prismes d'accrétion, la convergence de plaques s'accompagne donc pour la majorité des élèves par la formation de structures comme les prismes d'accrétion, mais leur emplacement diffère. Nous distinguons deux emplacements possibles :

- Les 2/3 des élèves ont placé les prismes d'accrétion dans l'espace qui sépare les deux bords continentaux. Donc les deux bords continentaux participent à l'édifice des prismes d'accrétion par leur convergence.

Ha nem

La formation des chaînes de montagnes
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'1 cm de large sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	◆◆◆

le bord africain

Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur

le bord africain

Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur

Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 14.7 prismes d'accrétion constituent une bande séparant les deux bords continentaux

- Le 1/3 restant a placé les prismes d'accrétion sur le bord eurasiatique. Le bord eurasiatique est le siège des contraintes alors que le bord africain ne subit rien.

La formation des chaînes de montagnes

Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'1 cm de large sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	◆◆◆

Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur

Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur

Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 14.8 les prismes d'accrétions se trouvent sur le bord eurasiatique

2.2.4 La zone de subduction

Dans la consigne de l'activité, la subduction a eu lieu au miocène inférieur. Les élèves doivent placer l'indicateur de la subduction sur le premier schéma au miocène inférieur sur le bord eurasiatique car c'est la plaque africaine qui s'enfonce sous la plaque eurasiatique. 21/30 élèves ont marqué une subduction sur leur schéma. Un seul élève a obéi à la consigne de l'activité et place l'indicateur d'une zone de subduction au miocène inférieur mais dans l'espace inter continental dans un sens dirigé vers l'Afrique autrement dit c'est la plaque eurasiatique qui plonge sous la plaque africaine.

Abu Ben Brahim

La formation des chaînes de montagnes
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

Zone de compression Miocène inférieur et moyen	Prisme d'accrétion Miocène inférieur et moyen	subduction Miocène inférieur et moyen	Blocage de la subduction Miocène supérieur

Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur

Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur

Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 14.9 la plaque eurasiatique plonge sous la plaque africaine

Les 20 autres élèves ont placé l'indicateur de la zone de subduction sur le bord africain mais au miocène supérieur. Nous avons deux points à discuter : le lieu de l'emplacement du symbole et la période historique attribuée à la subduction.

- **Le lieu de l'emplacement du symbole**

L'indicateur de la subduction doit être placé sur le bord eurasiatique car la plaque africaine plonge sous le bord eurasiatique.

Les 20 élèves ont placé l'indicateur de la zone de subduction sur le bord africain. Peut être qu'ils sont influencé par le fait que l'Atlas est au niveau de L'Afrique et de se fait ils supposent que la subduction devrait être au niveau du bord africain. Le sens des flèches est dirigé vers le bord eurasiatique donc la plaque africaine plonge sous l'eurasiatique.

- **La deuxième variable : la période historique attribuée à la subduction**

La consigne de l'activité indique que la compression, les prismes d'accrétion et la subduction ont lieu au miocène inférieur. La majorité des élèves ont placé la subduction au miocène supérieur alors que ces mêmes élèves ont placé les prismes d'accrétion au miocène inférieur. Les élèves ne rangent pas les prismes d'accrétion, la zone de

compression et la subduction dans une même période (le miocène inférieur) ils succèdent et les étalent sur deux périodes dans le temps alors que normalement ces phénomènes se produisent dans la même période (le miocène inférieur). **Pour les élèves la mise en histoire nécessite une succession des événements dans le temps.**

(16) - Asma.
- groupe 2.

La formation des chaînes de montagnes
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

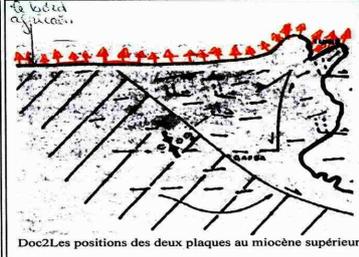
- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

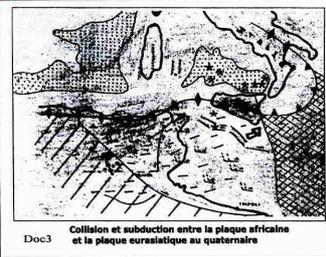
Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
← →		▲▲▲	◆◆◆



Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur



Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur



Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 14.10 subduction au niveau du bord africain au miocène supérieur

2.2.5 Le blocage de la subduction au miocène supérieur

Le blocage de la subduction se produit au miocène supérieur. Les élèves doivent placer l'indicateur du blocage de la subduction sur la ligne lorsque les deux bords continentaux se collent. Nous distinguons deux types de blocages de la subduction :

- 4/30 des élèves ont marqué le blocage de la subduction et la collision des deux bords qui se soudent au miocène supérieur. Pour ces élèves le blocage de la subduction se termine par une collision intercontinentale.

La formation des chaînes de montagnes

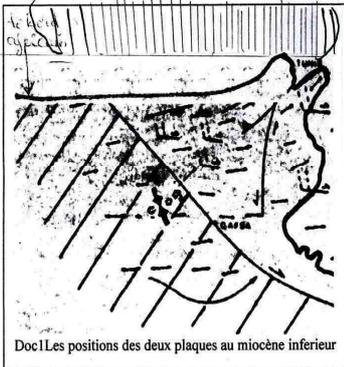
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

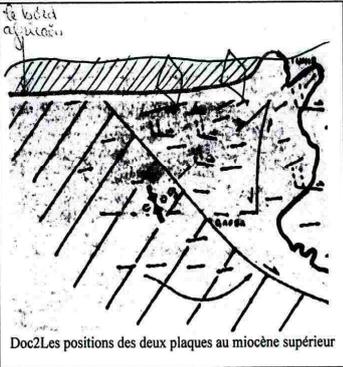
- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

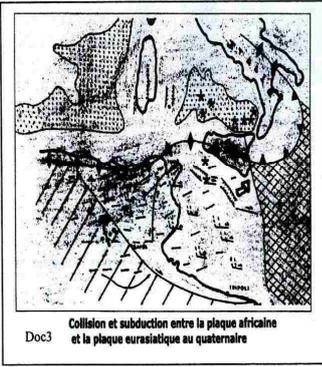
Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	◆◆◆



Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur



Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur



Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Manel Hanoué

La formation des chaînes de montagnes

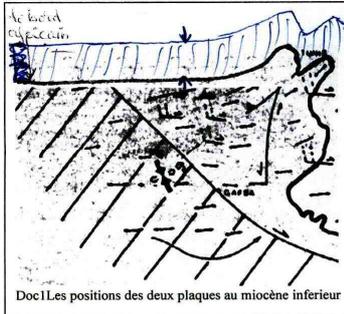
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

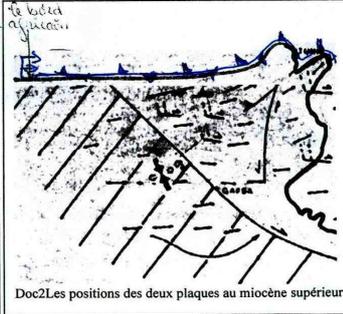
- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	◆◆◆



Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur



Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur



Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figures 14.11 la subduction se bloque et on assiste à une collision intercontinentale

- 10/30 des élèves schématisent le blocage de la subduction sans que les deux bords entrent en contact et se soudent. Pour ces élèves la subduction peut être bloquée avant la collision.

Manel Turki groupe 5

(M)

La formation des chaînes de montagnes

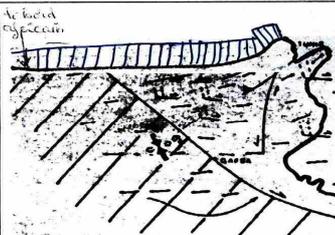
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

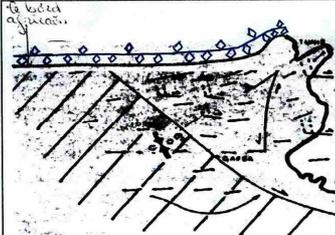
- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

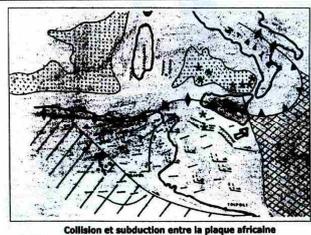
Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	↔



Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur



Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur



Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 14.12 la subduction se bloque avant la collision intercontinentale

La forme du bord eurasiatique, l'emplacement des prismes d'accrétion, la zone de compression, la subduction et le blocage de cette dernière montrent une variabilité dans les productions des élèves.

2.3 Croisement des cinq variables utilisées

Nous résumons la répartition des productions selon l'emplacement des cinq indicateurs utilisés dans l'activité pour la reconstitution de la naissance de l'Atlas Tunisien dans le tableau suivant.

Les variables Etudiées	Présence du bord eurasiatique	Une zone de compression	les prismes d'accrétion	Indicateur d'une zone de subduction	Le blocage de la subduction au miocène supérieur
Nature du dessin	Tracé en une ligne droite (9 élèves) (n°8.10.12.13.14.15.16.19.29)	La compression est dans le même sens et dans la même direction que la convergence (3 élèves) (n°17.4.6)	Sont placés dans l'espace intercontinental qui sépare les deux bords avant collision (17 élèves) (10.27.13.14.7.30.28.19.26.25.24.23.22.12.9.21.29)	Dans l'espace intercontinental (7 élève) (n°3.4.5.6.11.17)	Blocage de la subduction et collision des deux bords (4 élèves) (n°15.17.21.29)
	Prend une allure tracée à la main (19élèves) (n°1.2.3.4.5.6.11.17.18.20.21.22.23.24.25.26.27.28.30)	La compression est dans le sens perpendiculaire au sens de la convergence (3 élèves) (n°21.5.23)	Sont placés sur le bord eurasiatique (9 élèves) (18. 20.16.8.3.2.1.17.15)	Sur l'un des bords au miocène supérieur (20 élèves) (1.2.7.9.10.12.13.14.16.20.21.22.23.24.25..8.26.27.28.30)	Blocage de la subduction avant la collision des deux bords (8 élèves) (n°5.7.10.13.18.19.20.27)
Absence du symbole	2/30 (n°7.9)	24/30	4/30	4/30	18/30
Total	28/30	6/30	26/30	26/30	12/30

Tableau 14.4 tableau résumant la répartition des productions selon l'emplacement des indicateurs dans la reconstitution de l'histoire de la genèse de l'Atlas tunisien du miocène inférieur au miocène supérieur.

Le tableau précédent montre que la majorité des élèves a utilisé au moins trois indicateurs dans leurs productions: le bord eurasiatique, les prismes d'accrétion et la zone de subduction. Les deux autres indicateurs (la zone de compression et le blocage de la subduction) sont les moins utilisés par les élèves. Nous allons essayer de voir si l'emplacement des indicateurs au sein d'une même production renseigne sur un raisonnement cohérent. Nous allons donc choisir les productions qui contiennent le plus d'indicateurs possible pour les analyser dans leur cohérence.

Nous allons croiser les variables obtenues pour chacun des indicateurs suivants : le bord eurasiatique, les prismes d'accrétion et la zone de subduction.

Le croisement des variables choisies permet d'identifier les catégories de productions suivantes :

		Le bord eurasiatique					
		Tracé en une Ligne droite	Complément aire au bord africain	Autre Allure	absent		
Les prismes d'accrétion	placés dans l'espace intercontinental	10.12 13.14.19.29 Cas 6	21.24.26. 30 Cas 3	22.23.25.27. 28 Cas 2	9.7	Sur l'un des bords continentaux	Indicateur d'une zone de subduction
	placés sur le bord eurasiatique	16.8 Cas 5	1.2 Cas 4				
		15	18.20			absent	
			17.3 Cas1			Dans l'espace intercontinental	
	Absence des prismes		4	5.6.11			

Tableau 14.5 des croisements de variables obtenues à partir des indicateurs utilisés dans la reconstitution de la naissance de l'Atlas Tunisien

Dans le cadre de l'activité proposée, l'Atlas tunisien est une chaîne montagneuse qui présente un matériel déformé par rapport à son état initial sous l'action d'une ou de plusieurs phases compressives. Comment les élèves expliquent-ils la naissance de l'Atlas, quel scénario proposent-ils ? Quelles figures de temps utilisent-ils ?

Si nous allons analyser la cohérence dans le raisonnement des élèves en tenant compte du maximum des indicateurs utilisés dans leurs productions, nous n'allons pas donc tenir compte des cases grises du tableau dans notre analyse parce que ces cases présentent à chaque fois, l'absence de l'un des indicateurs. Nous obtenons ainsi six catégories possibles. Nous allons analyser dans les catégories obtenues les cas les plus représentatifs qui ont utilisé le plus possibles des indicateurs et dont l'arrangement de leur indicateurs renseigne sur un raisonnement bien déterminé.

Cas 1 : production n°17

L'élève place la zone de compression sur le bord eurasiatique. Cette compression est perpendiculaire au sens de la convergence donc elle n'agit pas sur l'espace

intercontinental. Elle agit sur le matériel eurasiatique en le compressant. Ceci explique pourquoi l'élève place les prismes d'accrétion aussi sur le bord eurasiatique du fait que ces prismes représentent une structure naissant suite à une compression.

L'élève place l'indicateur de la subduction dans l'espace intercontinental dirigé vers l'Afrique. Ainsi c'est la plaque eurasiatique qui converge vers la plaque africaine et plonge sous cette dernière jusqu'à la collision des deux bords continentaux et disparition de l'espace intercontinental. Ceci est confirmé sur le deuxième schéma (miocène supérieur) par la présence de l'indicateur du blocage de la subduction.

L'élève explique donc la naissance de l'Atlas tunisien par deux phases successives.

Une première phase au cours de laquelle le bord eurasiatique subit des compressions contribuant à la naissance de prismes d'accrétion.

Une deuxième phase au cours de laquelle le bord eurasiatique entre en contact avec le bord africain suite à la collision et les déformations naissant sur le bord eurasiatique appartiendront ainsi au bord africain constituant la chaîne Atlasique. L'élève reconstitue l'histoire de l'Atlas dans un raisonnement cohérent utilisant un temps long narrateur mais aussi producteur d'événements. **Il mobilise ainsi un actualisme de deuxième niveau.**

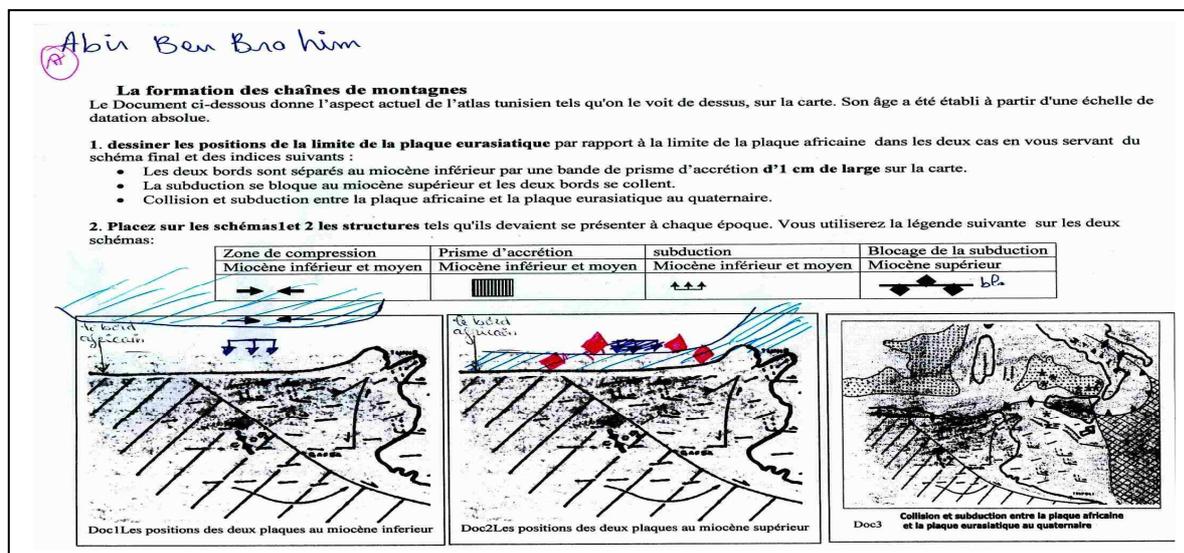


Figure 14.9 la plaque eurasiatique plonge sous la plaque africaine

Nous construisons l'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas Tunisien pour ce raisonnement :

- La zone de compression et les prismes d'accrétion se trouvant au niveau du bord eurasiatique sont deux contraintes empiriques liées à la nécessité de la compression et la déformation de la lithosphère eurasiatique.

- La subduction de la plaque eurasiatique sous la plaque africaine ainsi que la disparition de l'espace intercontinental, sont deux contraintes empiriques liées à la nécessité d'une collision des deux bords continentaux et l'appartenance du matériel eurasiatique déformé au bord africain.

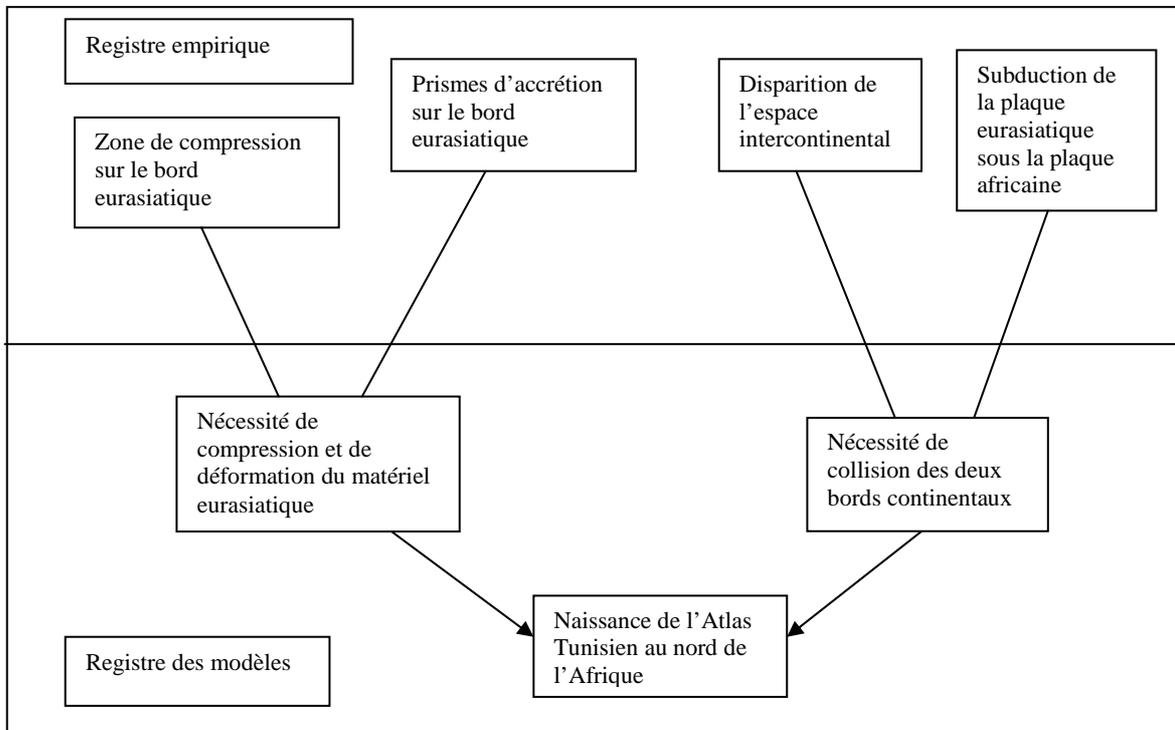


Figure 14.13 l'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas tunisien pour le cas 1 production n°17

Cas 2 : production n°23

L'élève place l'indicateur de la zone de compression sur les deux bords continentaux c'est-à-dire de part est d'autre de l'espace intercontinental. La compression est parallèle au sens de la convergence des plaques elle agit sur l'espace intercontinental. Ce qui explique pourquoi l'élève place les prismes d'accrétion entre les deux bords continentaux du fait que ces prismes représentent une structure naissant suite à une compression.

L'élève place l'indicateur de la subduction sur le bord africain dirigé vers l'Afrique. Ainsi c'est la plaque eurasiatique qui converge vers la plaque africaine et plonge sous cette dernière. La compression continue à agir au cours du temps et accompagne la subduction et contribue à la disparition de l'espace intercontinental jusqu'à la collision des deux bords continentaux au miocène supérieur. L'élève installe ainsi une certaine continuité dans l'exercice des causes et la sommation des effets sur une longue période construit l'état actuel.

L'élève trace l'histoire de l'Atlas tunisien dans un gradualisme nécessitant un temps long. Il s'agit d'un actualisme de deuxième niveau.

Cette histoire commence par la convergence des deux plaques provoquant la compression de l'espace intercontinental et la naissance des prismes d'accrétion au miocène inférieur. La compression continue au cours du temps et contribue à la disparition de l'espace intercontinental et des prismes d'accrétion. Le phénomène se poursuit jusqu'à la collision. Il existe une cohérence dans l'ensemble du raisonnement de l'élève.

Maâlouk Wijléne

La formation des chaînes de montagnes
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'Atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blochage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
← →		▲▲▲	◆◆◆

Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur

Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur

Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figures 14.6 la compression est parallèle au sens de la convergence

Nous construisons l'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas Tunisien pour ce raisonnement :

- Les deux bords continentaux sont séparés par un espace intercontinental ainsi que les forces de compression agissent de part et d'autre de l'espace intercontinental sont deux contraintes empiriques liées à la nécessité de l'apparition des prismes d'accrétion dans l'espace intercontinental.
- La subduction du bord eurasiatique sous le bord africain et la continuité de la compression au cours du temps sont deux contraintes empiriques liées à la nécessité du temps long d'une part et à la nécessité de la disparition de l'espace intercontinental d'autre part.
- La nécessité du temps long, la nécessité de la disparition de l'espace

intercontinental ainsi que la subduction du bord eurasiatique sont liées à la nécessité d'une collision intercontinentale.

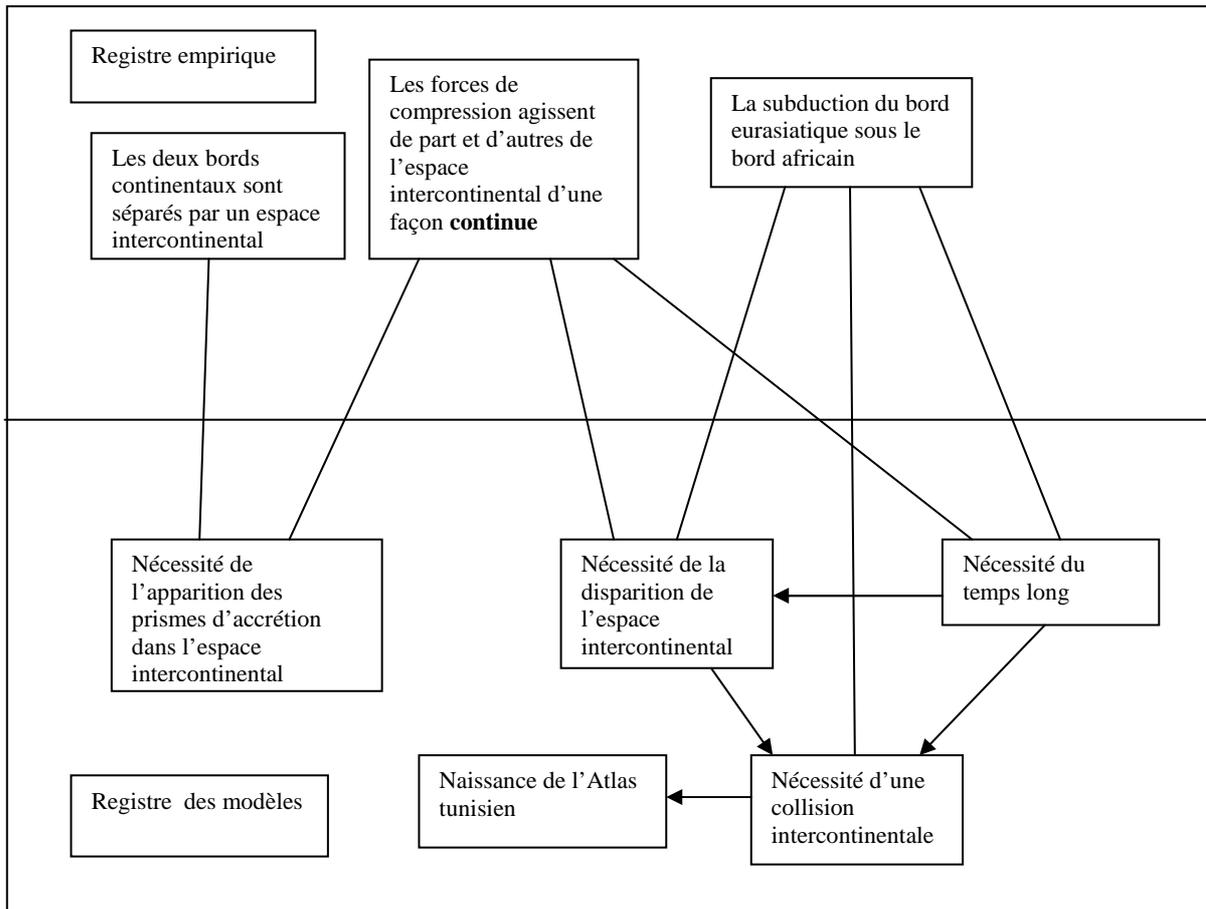


Figure 14.14 l'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas tunisien pour le cas 2 production n°23

Cas 3 : production n°24

Le bord eurasiatique comme le bord africain ont deux allures complémentaires avant la collision ayant la forme actuelle. Ils conservent leurs allures inchangées au cours du temps ceci montre que l'élève fait une liaison entre le passé et l'actuel. Les deux bords sont séparés par une bande de prismes d'accrétion au miocène inférieur.

L'élève place l'indicateur de la subduction sur le bord africain dirigé vers la plaque eurasiatique au miocène supérieur. Ainsi c'est la plaque africaine qui plonge sous la plaque eurasiatique mais on n'assiste pas à la collision des deux bords continentaux au miocène supérieur. L'espace intercontinental se réduit petit à petit au cours du temps sous l'effet de la subduction mais il ne disparaît pas totalement au miocène supérieur. L'élève laisse la collision au quaternaire et dans ce cadre il est normal qu'il n'utilise pas l'indicateur du blocage de la subduction au miocène supérieur.

L'élève crée une relation entre le passé et l'actuel en installant une certaine continuité dans l'exercice des causes dans la mesure où la collision ne se produit pas au miocène supérieur et continue jusqu'au quaternaire cela prouve que l'élève utilise le temps long et que les effets produits par la subduction prennent du temps pour se réaliser.

L'élève trace l'histoire de l'Atlas tunisien dans un gradualisme continu dans un temps long en mobilisant **un actualisme méthodologique (actualisme de 2^{ème} niveau)**.

NEJRI
ANAL

La formation des chaînes de montagnes
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

Zone de compression Miocène inférieur et moyen	Prisme d'accrétion Miocène inférieur et moyen	subduction Miocène inférieur et moyen	Blocage de la subduction Miocène supérieur
← →		▲▲▲	◆◆◆

Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur

Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur

Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 14.1 le bord eurasiatique est complémentaire au bord africain avant la collision

Nous construisons l'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas Tunisien pour ce raisonnement :

- La séparation des deux bords continentaux par une bande de prismes d'accrétion et la Subduction de la plaque africaine sous la plaque eurasiatique sont deux contraintes empiriques liées à la nécessité de la disparition de l'espace intercontinental.
- La continuité du processus de subduction est une contrainte empirique liée à la nécessité du temps long.
- La nécessité du temps long et la nécessité de la disparition de l'espace intercontinental sont liées à la nécessité du rapprochement des deux bords continentaux.

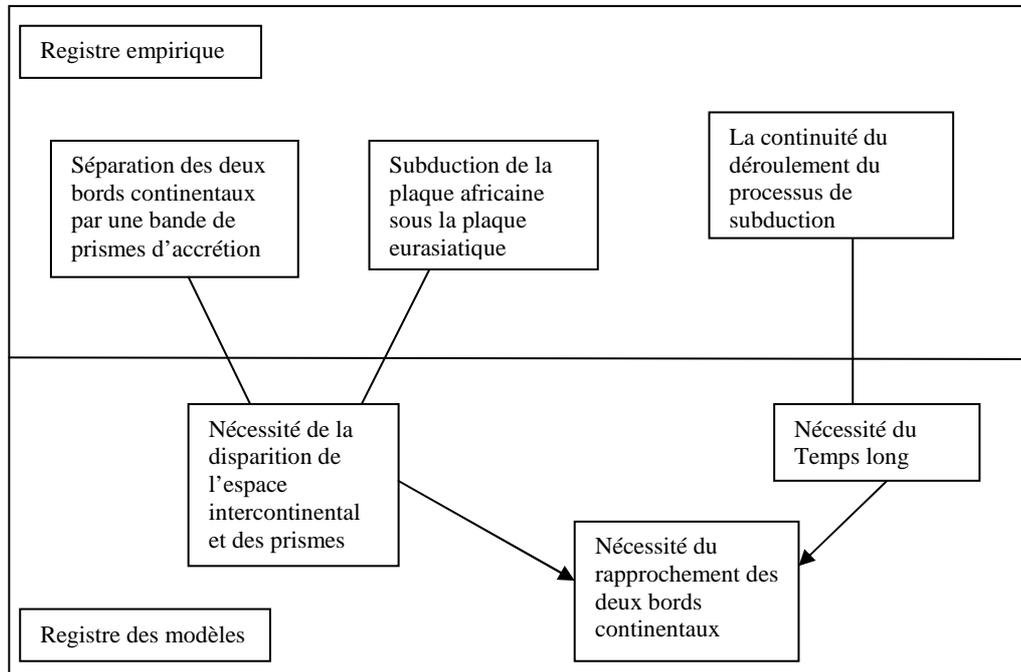


Figure 14.15 L'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas tunisien pour le cas 3 production n°24

Cas 4 : production n°2

L'indicateur d'une zone de compression est absent sur le schéma. Les prismes d'accrétion existent déjà sur le bord eurasiatique qui a une allure complémentaire au bord africain avant la subduction.

Les deux bords ont la forme actuelle. Ils conservent leurs allures inchangées au cours du temps. Il s'agit d'un actualisme analogique.

L'élève place l'indicateur de la subduction sur le bord eurasiatique dirigé vers la plaque africaine. Ainsi c'est la plaque eurasiatique qui plonge sous la plaque africaine mais on n'assiste pas à la collision des deux bords continentaux et à la disparition totale de l'espace intercontinental au miocène supérieur. L'indicateur d'un blocage de la subduction est absent au miocène supérieur. La collision se déroule au quaternaire.

L'élève trace une histoire en une seule phase dans **un actualisme analogique**, au cours de laquelle la plaque eurasiatique plonge sous la plaque africaine passivement sans provoquer la trace de sa subduction (formation de zone de compression ni de prismes d'accrétion) du miocène inférieur jusqu'au quaternaire sans laisser la trace de contraintes tectonique car les

prismes et l'allure des deux bords sont préexistants ils n'ont qu'à rejoindre leur emplacement actuel.

بنيان نارا

La formation des chaînes de montagnes

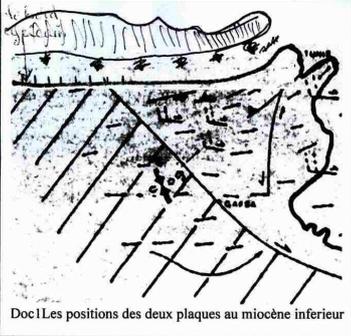
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

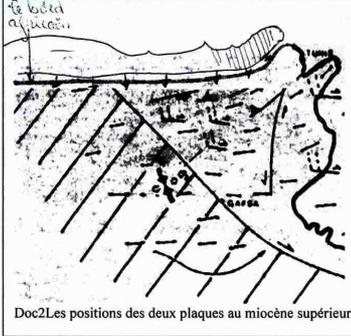
- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

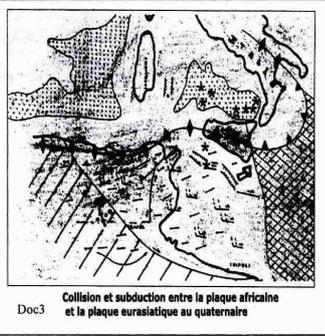
Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	◆◆◆



Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur



Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur



Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 14.16 Les deux bords ont la forme actuelle, leurs allures sont inchangées au cours du temps
 Nous construisons l'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas Tunisien pour ce raisonnement :

- La subduction de la plaque eurasiatique sous la plaque africaine et la présence d'un espace intercontinental sont deux contraintes empiriques liées à la nécessité de la disparition de l'espace intercontinental.
- La subduction de la plaque eurasiatique sous la plaque africaine et la nécessité de la disparition de l'espace intercontinental sont liées à la nécessité d'une collision mais au quaternaire.
- En dehors de toutes contraintes tectoniques la présence des prismes d'accrétion au niveau du bord eurasiatique et la nécessité d'une collision au quaternaire contribuent à la formation de la chaîne Atlasique.

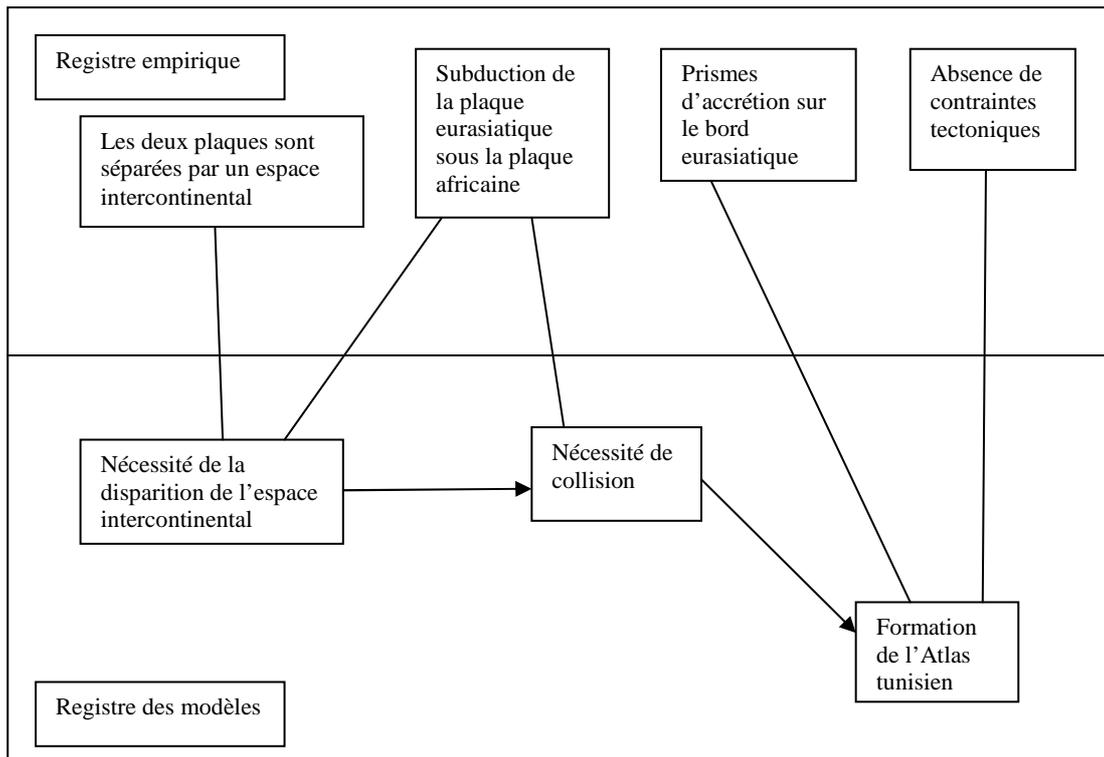


Figure 14.17 L'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas tunisien pour le cas 4 production n°2

Cas 5 : production n°16

La zone de compression est absente, les schémas ne portent aucune trace de contraintes tectoniques. L'indicateur de la subduction est placé sur le bord africain dirigé vers la mer cela veut dire que c'est la plaque africaine qui plonge au cours de la subduction or le bord eurasiatique tracé en ligne droite au miocène inférieur portant les prismes d'accrétion, disparaît au miocène supérieur et ne figure pas sur le schéma du miocène supérieur, et le bord africain garde son allure initiale sans aucun changement au cours du temps. Dans un contexte où le bord africain doit rester inchangé, il faut que la collision n'ait pas lieu, donc la solution que trouve l'élève, est de faire disparaître le bord eurasiatique. Ainsi on est sûr que le bord africain garde son état initial. Il est donc normal que dans un cadre stationnaire l'élève ne présente pas de zone de compression.

Pour que l'allure du bord africain reste inchangée au cours du temps jusqu'à l'état actuel, l'élève projette la forme actuelle dans le passé en produisant une image du bord africain au miocène supérieur qui ressemble beaucoup à l'état actuel.

Il s'agit d'un actualisme méthodologique de 1^{er} niveau D. Ravachol Orange (2003.p, 47).

Mais si l'équivalent actuel ne peut pas exister parce qu'on impose à l'élève de tracer un bord eurasiatique au miocène inférieur dans la consigne et qui est destiné à entrer en collision avec le bord africain, l'élève fait alors appel au temps long permettant la réalisation de certains phénomènes qui aideront à garder un état inchangé dans de telles conditions. Il mobilise ainsi l'actualisme de deuxième niveau par le recours au temps long. L'élève voit que la solution idéale dans un tel cadre est de faire disparaître le bord eurasiatique imposé par la consigne de l'activité pour résoudre le problème de la forme inchangée du bord africain au cours du temps. Cette disparition est vue comme nécessité car l'actualisme à lui seul est insuffisant. **Il s'agit donc d'un catastrophisme de 2^{ème} niveau raisonné** D. Orange Ravachol (2003, p58)

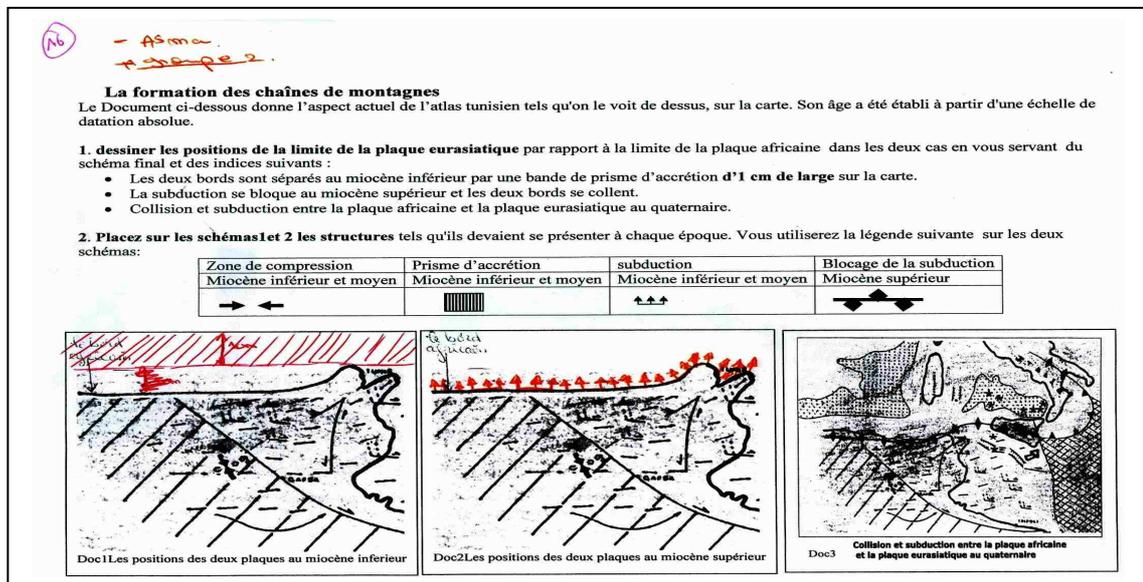


Figure 14.10 subduction au niveau du bord africain au miocène supérieur

Nous construisons l'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas Tunisien pour ce raisonnement :

- L'absence de contraintes tectoniques et la disparition du bord eurasiatique sont deux contraintes empiriques liées à la nécessité de l'absence d'une collision intercontinentale.
- La disparition du bord eurasiatique est une contrainte empirique liée à la nécessité d'un temps long.
- La nécessité du temps long et la nécessité de l'absence de collision intercontinentale sont liées à constance de la forme du bord africain.

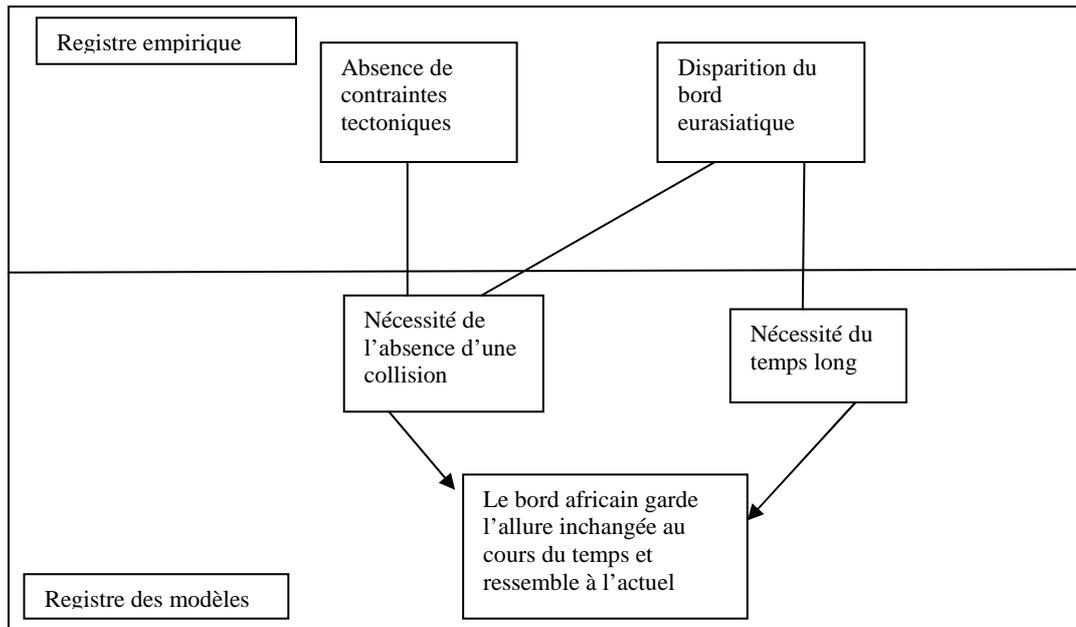


Figure14.18 L'espace de contraintes pour la non variabilité du bord africain pour le cas 5 production n°16

Cas 6 : production n°13

Le bord eurasiatique est tracé en une ligne droite qui reste inchangée au cours du temps. Ce bord eurasiatique ne ressemble pas à l'état actuel même lorsqu'il est engagé dans la subduction. L'élève ne projette pas donc l'actuel dans le passé. Il est non actualiste. L'élève recourt à la subduction pour faire disparaître les prismes d'accrétion et réduire l'espace intercontinental mais le sens de la subduction n'est pas clair. Cette dernière est bloquée au miocène supérieur sans préciser quelle plaque plonge sous l'autre. L'explication de la variation de l'espace intercontinental par des causes géologiques possibles (la subduction) fait que l'élève raisonne en dehors du cadre catastrophiste un tel raisonnement est **non actualiste- non catastrophiste**.

Nous construisons l'espace de contraintes pour la naissance de l'Atlas Tunisien pour ce raisonnement :

- Les prismes d'accrétion déjà existants dans l'espace intercontinental et l'absence de contraintes tectoniques sont deux contraintes empiriques liées à la nécessité d'un bord eurasiatique de forme inchangée au cours du temps.
- La réduction de l'espace intercontinental sans sa disparition et la nécessité d'un bord eurasiatique d'allure inchangée sont liées à la nécessité du blocage de la subduction avant la collision.

La formation des chaînes de montagnes

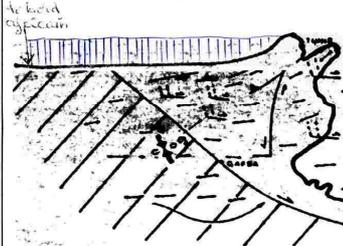
Le Document ci-dessous donne l'aspect actuel de l'atlas tunisien tels qu'on le voit de dessus, sur la carte. Son âge a été établi à partir d'une échelle de datation absolue.

1. dessiner les positions de la limite de la plaque eurasiatique par rapport à la limite de la plaque africaine dans les deux cas en vous servant du schéma final et des indices suivants :

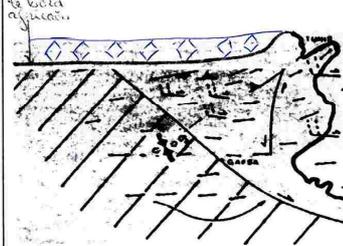
- Les deux bords sont séparés au miocène inférieur par une bande de prisme d'accrétion d'**1 cm de large** sur la carte.
- La subduction se bloque au miocène supérieur et les deux bords se collent.
- Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire.

2. Placez sur les schémas 1 et 2 les structures tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous utiliserez la légende suivante sur les deux schémas:

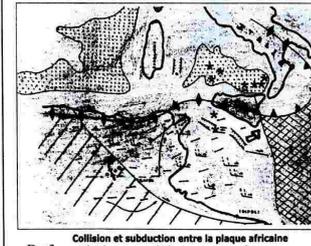
Zone de compression	Prisme d'accrétion	subduction	Blocage de la subduction
Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène inférieur et moyen	Miocène supérieur
→ ←		▲▲▲	◆◆◆



Doc1 Les positions des deux plaques au miocène inférieur



Doc2 Les positions des deux plaques au miocène supérieur



Doc3 Collision et subduction entre la plaque africaine et la plaque eurasiatique au quaternaire

Figure 14.19 Le bord eurasiatique ne ressemble pas à l'état actuel même lorsqu'il est engagé dans la subduction

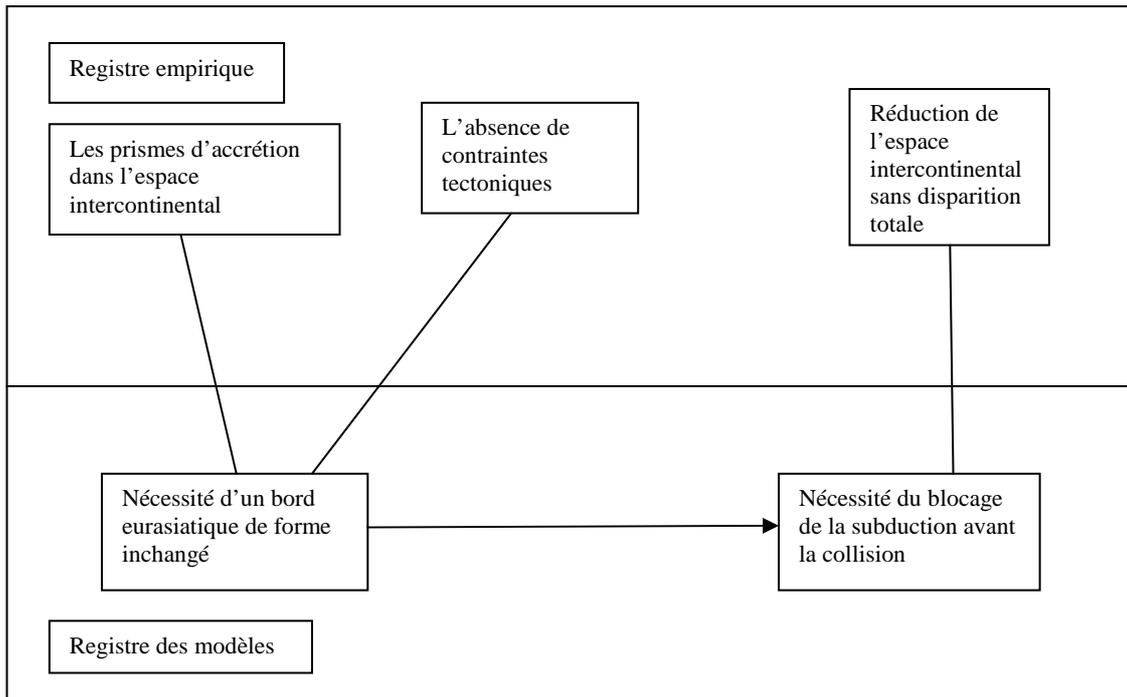


Figure 14.20 l'espace de contraintes pour le blocage de la subduction pour le cas 6 production n°13

3. Conclusion générale de la troisième étude

Dans cette troisième étude nous avons étudié un problème de temps celui de la reconstitution de l'histoire de l'Atlas Tunisien. Cette étude didactique nous a permis d'identifier l'utilisation de plusieurs figures de temps au cours de la problématisation. Cette étude s'est basée sur l'analyse de l'emplacement des indicateurs de l'espace qui existent à la disposition des élèves. Les différentes combinaisons faites par les élèves en plaçant ces indicateurs d'espace sur leurs schémas, renseignent sur la nature du temps mobilisé. Cette étude nous a permis de conclure les points suivants :

- Nous remarquons que les élèves reconstituent différentes histoires de l'Atlas tunisien en utilisant différentes figures de temps. Certaines élèves font appel à un actualisme de deuxième niveau (n°17, 23 et 24), d'autres ont recours à un actualisme analogique (n°2), mais lorsque la possibilité de projeter l'actuel dans le passé ne se présente pas certains élèves ont recours au catastrophisme de 2^{ème} niveau raisonné (n° 16) ou bien trace l'histoire en dehors du cadre actualiste mais sans faire appel à une catastrophe (n°13).
- Malgré que les élèves disposent des mêmes indicateurs, ils tracent des histoires différentes de l'Atlas Tunisien et mobilisent des figures de temps différentes ceci prouve que l'histoire géologique ne dépend pas que des éléments du registre empirique qui existent à notre disposition mais elle dépend aussi des liens qu'on établit entre ces éléments et des nécessités qu'on construit pour aboutir à un tel ou tel modèle.
- La diversité des figures de temps détectées chez les élèves est due à la variabilité dans leur entretient avec l'espace, ainsi la figure d'espace utilisée définit une figure de temps bien déterminée. L'espace a une influence directe sur l'utilisation du temps.

Synthèse

Chapitre15

Articulation des trois études au sein d'une même théorie

Mise en perspective

Introduction

1. La tectonique des plaques vue de trois angles différents
2. Les difficultés des élèves dans les utilisations du temps de l'espace et des mécanismes
3. L'articulation du temps à l'espace et au fonctionnement dans la compréhension de la théorie de la tectonique des plaques
4. Conclusion

Introduction

Nous cherchons dans ce chapitre à récapituler et à mettre en perspective, les trois utilisations du temps, de l'espace et du fonctionnement, dans les cas que nous avons étudiés. Nous allons d'abord faire une synthèse des figures du temps de l'espace et du fonctionnement dans le cadre théorique de la tectonique des plaques c'est-à-dire du côté du savoir, nous passons ensuite à la synthèse des raisonnements que présentent les productions des élèves dans l'utilisation du temps, de l'espace et des mécanismes. Pour cela, nous allons choisir les productions de quelques élèves qui ont assisté aux différentes situations d'apprentissages dans le but de récapituler les conceptions que ces élèves mobilisent dans la problématisation du temps, dans la problématisation de l'espace et dans la problématisation du fonctionnement dans un même cadre théorique celui de la tectonique des plaques et de voir s'il existe une interférence, ou encore une interdépendance entre les trois problèmes.

1. La tectonique des plaques vue de trois angles différents

1.1. Du côté de l'espace : La subdivision de la surface de la terre en plaques lithosphériques

La répartition des séismes, des volcans et des chaînes de montagnes, représentent les structures qui ont déclenché une problématique sur la nature de l'espace chez les géologues et les géophysiciens. Leur explication dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, repose sur la comparaison qui existe entre ces répartitions et les limites géographiques: il s'agirait donc d'une surface terrestre dont il faut comprendre sa subdivision actuelle. La difficulté de trouver des explications à certains phénomènes (le flux de chaleur, l'inversion du champ magnétique...) dans un cadre fixiste où les continents sont inanimés a poussé les chercheurs à adopter un nouveau cadre théorique, différent du cadre fixiste. C'est le cadre mobiliste dans lequel, les problèmes géologiques (qui existent dans un cadre fixiste) deviennent explicables grâce à un changement conceptuel de « l'espace »: L'espace passe d'une vue géographique qui repose sur la subdivision en océan et en continents en un espace qui repose sur une vision tectonique plus étendue qui réunit continent et océan au sein d'une même structure géologique nommée : plaque.

Dans un tel cadre spatial les structures géologiques et leurs répartitions deviennent logiques.

1.2. Du côté du fonctionnement : les courants de convection

Dans le cadre de la géologie fonctionnaliste, le système Terre évolue en renouvelant ses matériaux tout en restant en équilibre c'est-à-dire dynamiquement stable. Par le jeu compensé de la subduction et de l'accrétion, tout change et pourtant tout reste identique. Le temps dans ce cas est complètement effacé. Pour comprendre la constance dans le temps et dans l'espace du système globale et construire l'équilibre dynamique et lithosphérique, il faut réfléchir en dehors du cadre temporel.

Le couplage des deux processus subduction et accrétion, leur simultanété dans le temps fait que le système Terre puise son équilibre dynamique dans un cycle crusto-mantellique ininterrompu : les courants de convection, moteur de la tectonique des plaques.

1.3. Du côté du temps : la naissance d'une chaîne de collision intercontinentale : cas de l'Atlas tunisien

Dans un contexte historique, la reconstitution de la naissance de l'Atlas tunisien (une chaîne de collision intercontinentale) à différentes époques de son passé conduit les chercheurs à prendre en considération deux types de processus : la subduction de deux plaques convergentes et la collision de leurs bords continentaux. Les deux types de processus ont la caractéristique de se succéder dans le temps et de marquer le temps par de l'espace, dans la mesure où leurs effets apparaissent sous la forme de structures telles que les prismes d'accrétion, et les arcs insulaires. la subduction et la collision marquent le temps dans la même direction de l'espace mais dans deux sens différents : la subduction le marque horizontalement puis verticalement dans le sens des profondeurs ; alors que la collision le marque verticalement dans le sens des altitudes.

Pour la reconstitution de l'Atlas à une époque plus ou moins reculée, le géologue projette l'actuel dans le passé nécessitant le temps long: il met en jeu de l'**actualisme de deuxième niveau**. (D. Orange 2003).

1.4. Conclusion

Les utilisations du temps, de l'espace et du fonctionnement sont essentiels et indissociables, non seulement dans le cadre de la tectonique de plaques mais dans toute la géologie et qu'on ne peut pas négliger le temps lorsqu'on étudie un phénomène ou une structure géologique dans l'espace ni négliger l'espace lorsqu'on trace l'histoire d'une structure. Tracer l'histoire ou étudier la variation de la structure dans l'espace nécessite le passage par un fonctionnement qui explique les variations dans le temps et/ou l'espace. Ainsi temps espace et fonctionnement sont articulés et fonctionnent ensemble.

Les problèmes que nous avons choisis mettent en évidence certaines figures d'espace, de temps et certains mécanismes. L'étude épistémologique confirme cela, en éclairant et en précisant la complexité des utilisations des différentes figures du temps et de l'espace et même les différents mécanismes dans les explications.

Notre étude repose sur quelques cas. Cela ne suffit pas pour mettre à l'épreuve et identifier toutes les utilisations possibles du temps ou de l'espace ainsi que tous les mécanismes possibles dans les explications, mais ces trois études permettent de projeter la lumière sur certaines de ces figures. Certaines figures de temps et d'espace sont peu présentes dans nos études malgré qu'elles aient une place très importante dans le cadre de la tectonique des plaques tel que le temps cyclique comme figure de temps et l'espace négatif (au niveau des fosses) comme figure d'espace. Cela n'est dû peut-être au fait que la recherche s'est étendue sur une période de cinq ans et elle s'est limitée à des études de cas. Mais nous pourrions prolonger cette recherche dans ces mêmes domaines d'études comme nous pourrions explorer d'autres domaines dans ce même cadre.

2. Les difficultés des élèves dans les utilisations du temps de l'espace et des mécanismes

Après avoir déterminé la diversité et la difficulté des utilisations du temps de l'espace et des mécanismes des scientifiques dans les trois cas étudiés, essayons de voir quelles figures de temps et d'espace utilisent les élèves, quels mécanismes construisent-ils et quelles difficultés rencontrent-ils.

Les raisonnements construits par les élèves révèlent un certain nombre de difficultés :

2.1 Les difficultés dans l'utilisation de l'espace

L'analyse faite dans la première étude sur la problématisation de la subdivision de la surface de la Terre en plaques lithosphériques et dans laquelle nous avons étudié l'utilisation de l'espace nous permet de constater les points suivants :

- La lecture erronée des cartes de la surface du globe Terrestre à deux dimensions valorise les limites géographiques au dépendant des limites géologiques. La mise en valeur des limites géographiques ne permet pas d'identifier facilement les limites géologiques et ne permet pas ainsi de contribuer à un changement conceptuel. Ainsi s'installe la difficulté à changer le cadre de description de l'espace.
- L'espace est vu en terme de mouvement d'écartement d'entités (que ce soit plaque ou continents) et il n'est pas vu en terme d'espace crée (formation du planché océanique) et espace disparu.
- La mise en jeu d'une forme d'explication qui se focalise sur certaines structures (comme la dorsale) et certains phénomènes (l'expansion océanique) en marginalisant d'autres en principe de même importance (comme les rifts, les chaînes de montagnes et la subduction...) rétrécit l'espace tectonique en terme de conjoncture dans la représentation de l'élève et le limite à un seul élément : la dorsale créant ainsi **un réductionnisme spatial** qui fait que l'espace tectonique globale n'a plus d'importance il se résume en une dorsale.
- La focalisation faite sur l'explication des mécanismes (la naissance de la dorsale et l'expansion océanique), en se limitant aux enchaînements et aux contrôles, inhibe la mobilisation d'une vue globale de l'espace. La vue spatiale se concentre sur l'espace de réalisation de ces phénomènes.
- L'immensité de l'espace tectonique par rapport à l'espace dans lequel circule l'homme (le continent et l'océan et donc l'espace géographique) rend difficile la possibilité et la capacité de se détacher de cet espace « humain » et de se placer dans un espace plus large.

2.2 Les difficultés dans la construction d'un mécanisme

L'analyse faite dans la deuxième étude sur la problématisation du couplage de la subduction à l'accrétion et son importance dans le maintien de l'équilibre dynamique puis en deuxième lieu la problématisation du moteur du mouvement des plaques : les courants de convection en tant que mécanisme sous-jacent permettant le renouvellement de la lithosphère et le maintien de l'équilibre globale nous permet de constater les points suivants :

2.2.1 Le couplage accrétion subduction

Dans l'étude de la problématisation du couplage accrétion subduction nous retenons que:

- La problématisation du mécanisme exclue le temps, les phénomènes se déroulent en dehors du cadre temporel.
- La problématisation du mécanisme inhibe la perception de l'espace globale et se limite à l'espace de réalisation du phénomène : une tendance à réduire l'espace.
- La correction d'un gain en matière lithosphérique par une perte dans les zones de subduction ne représente pas l'unique solution pour le maintien de l'équilibre dynamique global.
- Le mécanisme est subdivisé en étapes qui se succèdent dans le temps par la mise en histoire.

Pour la discussion

Il est vrai que le couple accrétion subduction est supposé par toute la classe comme le mécanisme adéquat pour maintenir le système Terre dans un état d'équilibre géodynamique en apparence stationnaire mais ce que nous remarquons dans tous ces débats est que les élèves le voient en terme de mouvements antagonistes de plaques à la surface et non pas en terme de gain et de perte de matière lithosphérique ni en terme d'espace positif qui se crée et d'espace négatif qui disparaît.

2.2.2 Les courants de convection

- En partant des éléments empiriques, les élèves ont tendance toujours à relier ces derniers dans une succession chronologique.
- Ils trouvent des difficultés à construire un mécanisme sous jacent qui explique le couple (accrétion- subduction) en surface même dans un cadre de cause à effet.
- L'articulation entre ce qui se passe au niveau du manteau et ce qui se passe au niveau de la lithosphère est difficile à réaliser chez les élèves. Cela est tout à fait normal dans un cadre où on ne s'intéresse pas aux pertes et aux gains de matière, car comme nous l'avons déjà expliqué dans l'étude précédente la nécessité de proposer un mécanisme sous jacent qui articule un mouvement au niveau de l'asthénosphère à un mouvement de plaques en surface, ne s'avère nécessaire que lorsque l'élève prend en compte **la création de la matière au niveau des dorsales et sa disparition au niveau des fosses**.
- Pour la majorité des élèves pour ne pas dire pour la quasi-totalité, lorsqu'il s'agit d'un travail sur un mécanisme, le temps est effacé.
- Pour la totalité des élèves, la subduction, n'est qu'une conséquence de l'accrétion au niveau de la dorsale et elle vient comme solution qui corrige le déséquilibre lithosphérique provoqué par une création de la matière lithosphérique. Cette correction s'exprime par une perte d'une quantité équivalente au niveau des fosses océaniques.
- Ce que nous constatons suite à cette étude est que le problème de fonctionnement rencontré chez l'élève peut être dû à l'absence du temps cyclique (du côté de l'utilisation du temps) et de l'absence de l'espace négatif (du côté de l'utilisation de l'espace) formant ainsi un problème de fonctionnement qui est lié à des difficultés à raisonner le temps et l'espace.

2.3 Les difficultés dans l'utilisation du temps

L'analyse des productions des élèves dans le but de reconstituer l'histoire d'une chaîne de montagnes (l'Atlas tunisien) permet de dégager plusieurs points qui éclairent l'utilisation du temps par les élèves :

- Dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, la reconstitution de l'histoire d'une chaîne de montagne fait intervenir un actualisme de deuxième niveau. Les

élèves sont amenés à exprimer le temps en travaillant sur l'espace. Un nombre d'élèves n'arrive pas à mobiliser un actualisme méthodologique. L'espace a une influence sur la nature de la figure de temps utilisée ce qui a conduit certains élèves à mobiliser un actualisme analogique et même dans certains cas un catastrophisme de 2^{ème} niveau raisonné.

- Une difficulté à utiliser tout les éléments fournis dans l'activité pour reconstituer une histoire qui tient compte de tout les événements qui ont eu lieu et toutes les structures qui se sont formées. Les élèves négligent certains éléments comme les zones de compression qui accompagnent la convergence de plaques. La non utilisation de ces éléments modifie l'histoire et modifie le temps utilisé.
- La difficulté à articuler des événements appartenant à une même période géologique. Les élèves préfèrent placer le symbole de la subduction au miocène supérieur au lieu de le mettre au miocène inférieur (la période des compressions et de la formation des prismes d'accrétion). Pour eux la compression et la formation des prismes d'accrétion précèdent la subduction, alors que ces événements coexistent à la même période. Nous constatons, que pour les élèves les séquences constituant une histoire ne peuvent pas être simultanées mais elles doivent se suivre dans le temps et/ou dans l'espace. Ils ont tendance à linéariser ce qui s'exerce simultanément (C. Orange, D. Orange, n1995).

2.4 Conclusion

La mise en comparaison élève/chercheur permet de souligner qu'il y a chez les élèves une variété de difficultés dans les explications du temps de l'espace et du fonctionnement.

Cette mise en comparaison attire l'attention sur le fait que parfois certaines difficultés dans la problématisation du fonctionnement, sont dues à d'autres difficultés déjà préexistantes dans l'utilisation du temps (l'absence de la simultanéité de la réalisation des phénomènes, et l'absence du temps cyclique) et dans l'utilisation de l'espace (l'absence de l'espace en voie de disparition ou encore de l'espace négatif). Ceci nous pousse à penser que dans le cadre de la tectonique des plaques, l'utilisation d'une figure de temps a une influence sur la nature de l'espace mobilisé et inversement la nature de l'espace mobilisé a une influence sur la figure de temps utilisée. Comme par exemple pour un actualisme analogique, l'espace du passé ressemble beaucoup à l'espace actuel car il s'agit d'une

simple analogie alors que pour le catastrophisme l'espace passé est différent de l'espace actuel.

Ainsi au cours de la problématisation dans le cadre de la tectonique des plaques l'utilisation du temps et l'utilisation de l'espace **sont interdépendantes** et fonctionnent en couple; dans la mesure où, les difficultés rencontrées chez les élèves au cours de la problématisation sont en réalité des difficultés dans l'utilisation du temps et/ou de l'espace. Ceci nous pousse à voir quels résultats peut-on obtenir si on les étudie articulés.

3 l'articulation du temps à l'espace et au fonctionnement dans la compréhension de la théorie de la tectonique des plaques

En partant du point de vue présenté dans la conclusion précédente, nous allons essayer d'étudier l'articulation des trois problématisations comme forme de synthèse de ce qui a été fait dans chacune des trois études. En reprenant quelques cas d'élèves qui ont été confrontés aux trois situations de classe que nous avons étudiées : comment se "concrétisent" dans leurs réponses, cette interdépendance dans les utilisations du temps de l'espace et du fonctionnement et les décalages par rapport au savoir scientifique? Et comment l'étude de l'espace ou du fonctionnement fait ressurgir certaines utilisations du temps et vis versa ?

3.1 Le choix des cas d'élèves

Nous nous limitons aux quatre élèves (Takwa, Housseem, Khawla et Maissa) pour lesquelles les productions, concernant les utilisations de l'espace, du temps et du fonctionnement, sont les plus précises. Nous écartons les élèves pour lesquels nous ne disposons pas de toutes les productions écrites brutes en rapport avec notre recherche.

3.2. Synthèse par élève des analyses faites

3.2.1. Le cas de Takwa

- La subdivision en plaques lithosphériques

Les productions de Takwa (voir annexe 4 et 5) montrent que, dans ce problème d'espace

il peut y avoir plusieurs figures de «l'espace» :

- une première figure où l'espace est fixe inchangé du type continental/océanique, lorsque la lecture géographique de l'espace l'emporte sur la lecture géologique. L'espace continental/océanique qui permet de garder la structure et ne permet pas la création d'espaces nouveaux.

- une deuxième figure où l'espace est variable et change à la surface de la Terre, du type tectonique (plaques lithosphériques), lorsque la lecture géologique de l'espace l'emporte sur la lecture géographique. Cet espace a de l'importance parce qu'il varie au cours du temps : il se crée et disparaît.

Takwa a passé par un changement conceptuel de «l'espace» du début à la fin de la discussion d'une conception continentaliste vers une conception plaquiste.

- Le couple accréation subduction

Les phénomènes ont lieu a priori sur une surface sphérique de l'espace (voir annexe 7). Les phénomènes se succèdent dans le temps par une mise en histoire. La subduction figure sur le dessin comme conséquence finale de l'accréation. Elle représente la solution pour le maintien de l'équilibre dynamique à la surface, mais sans l'articulation de l'espace positif à l'espace négatif dans un enchaînement cyclique ainsi du côté du temps il existe une difficulté à imaginer **une répétition et une continuité** de la réalisation des deux processus dans le temps, **le temps cyclique est absent et remplacé par un temps linéaire.**

-Les courants de convection

La matière ne peut pas se déplacer entre des milieux différents par leurs structures et leurs propriétés physico-chimiques (lithosphère et asthénosphère), alors Takwa proposent les ondes comme facteur qui peut naître en profondeur (*sans donner une explication logique à sa naissance elle parle de **rupture brutale** « une conception catastrophiste »*) et dont l'effet s'observe à la surface en provoquant le déplacement des plaques (voir annexe 10).

- ✓ Du côté de «l'espace» : La problématisation du mécanisme permet de partir d'un phénomène **local** (ce qui se passe au cours d'un séisme) pour le généraliser ou **l'appliquer à un espace plus étendu : la plaque**. Dans ce cas peut-on dire qu'il s'agit d'une **extrapolation spatiale** ?

- ✓ La difficulté à imaginer un moteur permanent au mouvement des plaques est liée à l'absence de l'articulation de la subduction à l'accrétion au sein d'un cycle répétitif.
- ✓ Du côté du « Temps » : La problématisation du mécanisme fait dévoiler une figure de temps telle est : **le catastrophisme de 1er niveau** qui met en jeu une cause brutale (rupture brutale au niveau du noyau de la Terre) qui explique l'utilisation du temps linéaire et ne nécessite pas de l'actualisme, il s'agit d'un événement brutal achevée.

-L'histoire de la naissance d'une chaîne de collision intercontinentale :

l'Atlas tunisien

Takwa par sa production n°19 appartient au cas n° 6 (voir annexe 13) pour qui le bord eurasiatique est tracé en une ligne droite qui reste inchangée au cours du temps. Takwa ne projette pas donc l'actuel dans le passé. Elle est non actualiste. L'élève recourt à la subduction pour faire disparaître les prismes d'accrétion et réduire l'espace intercontinental mais le sens de la subduction n'est pas clair. Cette dernière est bloquée au miocène supérieur sans préciser quelle plaque plonge sous l'autre. L'explication de la variation de l'espace intercontinental par des causes géologiques possibles (la subduction) fait que l'élève raisonne en dehors du cadre catastrophiste un tel raisonnement est **non actualiste-non catastrophiste**.

3.2.2. Le cas de Housseem

- La subdivision en plaques lithosphériques

Les productions de Housseem (voir annexe 4 et 5) nous montrent que, dans ce problème de plaques lithosphériques et limites de plaques il est difficile de passer par un changement conceptuel pour « l'espace » lorsque les difficultés suivantes se présentent :

- Une difficulté à faire une lecture détaillée comparative et précise de « l'espace » directement sur la carte, et donc le détail spatial n'a plus d'importance.
- Une difficulté à dévaloriser les limites géographiques sur la carte par rapport aux limites géologiques.

- Une difficulté à faire un lien direct ou indirect entre l'expansion océanique et les limites géographiques.
- L'importance donnée à la dorsale, réduit l'espace tectonique à un seul élément : la dorsale et fait que l'espace tectonique globale n'a plus d'importance.

- le couple accrétion subduction

Le dessin est réalisé dans une direction linéaire (marqué par les flèches qui montrent le sens du mouvement des plaques). Les phénomènes ont lieu a priori sur une surface plane de l'espace, l'espace sphéroïde ne figure pas (voir annexe 7).

Les deux phénomènes se juxtaposent. Le premier phénomène qui a eu lieu (l'accrétion) a engendré le deuxième phénomène (rapprochement de deux plaques) : il s'agit d'une mise en histoire. On rencontre chez Houssem la même difficulté existant chez Takwa : l'absence **de la répétition et la continuité** de réalisation des deux processus dans le temps donc **le temps utilisé en absence du temps cyclique est linéaire.**

La subduction ne figure pas sur le dessin elle ne représente pas obligatoirement pour cet élève la solution pour le maintien de l'équilibre dynamique à la surface. Il propose un autre phénomène qui, pour lui, pourrait naître suite aux rapprochements de plaques comme conséquence à l'effet de l'expansion océanique et qui a pour effet la correction de l'augmentation de la lithosphère: c'est la formation des chaînes de montagnes qui est expliquée par le plissement des deux plaques à la surface. Ainsi, pour cet élève, l'équilibre est établi en altitude, la matière qui se crée d'un côté ne doit pas forcément disparaître elle peut rester en surface cumulée sous la forme de chaînes de montagnes.

- ✓ Du côté de l'espace : l'espace est toujours positif il se crée et ne peut pas disparaître, **la possibilité d'un espace négatif n'existe pas.**
- ✓ Du côté du temps : la conception directionnaliste persiste, le temps est encore linéaire le temps cyclique est absent.

-Les courants de convection

L'asthénosphère est formée de roches en fusion donnant naissance au magma. Ce magma sous l'effet de l'élévation de la température et de la pression, produit de l'énergie qui passe en surface contribuant au mouvement des plaques. (Voir annexe 10)

Cet élève comme nous l'avons déjà dit plus haut dans la deuxième étude, propose une explication au mouvement des plaques lithosphériques il mobilise la structure du manteau asthénosphérique qui représente un milieu ductile en utilisant les mots « magma » et « liquide » par comparaison à la lithosphère qui représente un milieu rigide en utilisant les mots « éclatement » et « compression » mais son explication ne touche en aucun cas au couple accréation subduction ; c'est-à-dire qu' Houssem évoque le mouvement des plaques mais d'une façon générale et ne précise pas s'il s'agit de mouvements convergents et divergents synchronisés et articulés qui se réalisent dans un but défini : le maintien de l'équilibre dynamique sous la forme d'un cycle.

Il parle d'énergie libérée au niveau du manteau sous l'effet de fortes températures et de fortes pressions et qui rejoint la surface en ayant comme conséquence le mouvement des plaques. Cette idée rappelle de loin le flux de chaleur par conduction. Cet élève a une difficulté à imaginer et à construire un mécanisme dynamique qui s'inscrit dans une périodicité (comme les courants de convection), il enchaîne les éléments qu'il possède du registre empiriques dans une succession dans le temps par une mise en histoire. Encore une fois le temps est toujours linéaire qui raconte une histoire mais ne l'édifie pas.

-L'histoire de la naissance d'une chaîne de collision intercontinentale : l'Atlas tunisien

Dans sa reconstitution de la naissance de l'Atlas Tunisien dans la production n°13 (voir chapitre 14), Comme Takwa, Houssem est un non actualiste dans la mesure où il ne projette pas l'actuel dans le passé et il est non catastrophiste dans la mesure où il propose une cause possible (la subduction et la collision) pour faire disparaître l'espace intercontinental en absence de contraintes de compression. Il représente l'exemple type du cas n° 6.

3.2.3. Le cas de Khawla

- La subdivision en plaques lithosphériques

Khawla possède une conception plaquiste, elle utilise le concept de plaques dans son affirmation, l'espace globale est **un espace géologique tectonique**. L'espace n'est pas fixe il est animé de mouvement des plaques. Khawla distingue les limites des plaques

auxquelles se localisent les séismes et qui sont en relation avec le mouvement de plaques. Selon Khawla, les faits observables à la surface varient selon l'intensité du mouvement. Pour Khawla, à une intensité donnée du mouvement on ne peut observer qu'un seul type de fait géologique à la surface, donc la diversité des faits géologiques revient à la variation de l'intensité du mouvement. Le mouvement a la possibilité de se réaliser dans les différentes directions de l'espace horizontal : écartement, rapprochement et frottement (pour dire peut être coulissement), elle utilise l'espace horizontal, elle évoque même la possibilité d'une subduction (un mouvement dans la direction verticale de l'espace). Cette élève propose un moteur au mouvement des plaques (les roches en fusion) d'une part, et d'autre part précise que la croûte est subdivisée en morceaux. L'élève raisonne dans ce cas sur l'espace vertical : de la surface vers la profondeur en subdivisant le globe à la vertical en couches de nature différentes une croûte à la surface et de la matière en fusion en profondeur.

(Voir annexe 4 et 6)

- le couple accréation subduction

Le dessin est réalisé dans une direction circulaire (marqué par les flèches qui montrent le sens du mouvement des plaques). Les phénomènes ont lieu a priori sur une surface sphérique de l'espace. Les phénomènes se succèdent dans le temps par une mise en histoire : on distingue deux phénomènes majeurs qui se réalisent : l'expansion d'un côté et la subduction de l'autre côté qui est la conséquence de l'expansion. Ainsi pour Khawla comme pour le groupe d'élèves auquel elle appartient l'équilibre est établi en profondeur. (Voir annexe7)

Contrairement aux deux autres dessins celui du groupe de Houssem et celui du groupe de Takwa, le groupe de Khawla, fait figurer deux plaques seulement, dans la réalisation du mécanisme, intégrant les deux phénomènes. Ces deux plaques subissent les deux phénomènes dans les deux coins opposés de l'espace.

- ✓ La focalisation faite par l'élève sur le mécanisme, inhibe la mobilisation d'une vue globale de l'espace.
- ✓ Encore une fois nous décelons une difficulté à percevoir l'articulation de réalisation des phénomènes : accréation –subduction au sein d'un mécanisme répétitif et continu dans le temps. Le temps cyclique est encore une fois absent.

-Les courants de convection

Khawla comme Houssem a une difficulté à imaginer et à construire un mécanisme dynamique qui s'inscrit dans une périodicité (comme les courants de convection), elle enchaîne les éléments qu'elle possède du registre empirique dans une succession par une mise en histoire. Le temps est linéaire. (Voir annexe 10)

-L'histoire de la naissance d'une chaîne de collision intercontinentale : l'Atlas tunisien

Khawla par sa production n°3 appartient au cas n°1 (voir annexe 13) dans la mesure où elle place les prismes d'accrétion sur le bord eurasiatique et l'indicateur de la subduction dans l'espace intercontinental dirigé vers l'Afrique. Ainsi c'est la plaque eurasiatique qui converge vers la plaque africaine et plonge sous cette dernière mais elle diffère par le fait que les deux bords continentaux n'entrent pas en collision. Ceci est confirmé sur le deuxième schéma (miocène supérieur) par la présence de l'espace intercontinental. Par un bord complémentaire au bord africain au miocène inférieur Khawla projette l'actuel dans le passé elle est de ce fait actualiste. Elle fait appel au temps long pour faire disparaître les prismes d'accrétion au cours de la subduction elle mobilise donc un actualisme de deuxième niveau.

3.2.4. Le cas de Maïssa

- La subdivision en plaques lithosphériques

La dorsale est un repère spatial, l'explication de l'existence des séismes et des volcans dans cet endroit ne se réfère pas aux limites géologiques ou géographiques mais elle est en relation avec l'énergie de la Terre. L'élève ne parle ni de continents ni de plaques, les deux subdivisions n'ont rien à avoir dans la répartition des séismes et des volcans. Mais explique la répartition des chaînes de montagnes par la sédimentation qui se produit au niveau de la dorsale et qui augmente en allant de l'axe de la dorsale vers le continent.

(Voir annexe 4 et 6)

On peut conclure que :

- La lecture de la carte ne sert à rien pour identifier l'espace. Pour une recherche d'une explication à une telle répartition, l'élève utilise des pré-acquis du chapitre précédent (la structure du globe Terrestre).
- L'élève mobilise ses connaissances sur l'accrétion mais dans un contexte sédimentaire pour expliquer une répartition spatiale des chaînes de montagnes.

- **le couple accrétion subduction**

Il s'agit de deux dessins faits séparément et réalisés dans une direction linéaire de l'espace (marquée par les flèches qui montrent le sens du mouvement des plaques). Les phénomènes ont lieu a priori sur une surface plane de l'espace, l'espace sphéroïde ne figure pas. (Voir annexe 7)

Les deux phénomènes sont séparés sur le papier mais ils sont reliés dans la nature cela figure dans les commentaires qui accompagnent les deux dessins : « *la sortie de magma provoque le déplacement des deux plaques donc le rift devient large* » et « *les deux plaques se rapprochent de l'autre côté car elles ont bougé au moment de l'expansion puis une monte sur l'autre peut être la plus légère* ». Ils se succèdent dans le temps.

La subduction ne figure pas sur le dessin mais elle est exprimée dans le commentaire. Sur le dessin les élèves du groupe de Maïssa proposent un autre phénomène, qui pour eux, pourrait naître suite au rapprochement de plaques comme conséquence à l'effet de la subduction et qui a pour effet la correction de l'augmentation de la lithosphère: c'est la formation des chaînes de subduction. Ainsi pour ce groupe d'élèves l'équilibre est établi en altitude, la matière qui se crée d'un côté ne doit pas forcément disparaître elle peut rester en surface cumulée sous la forme de chaînes de montagnes. L'espace négatif est absent et donc la nécessité du couple accrétion –subduction ne s'impose plus. Dans la problématisation d'un mécanisme ces élèves ont une tendance à une dissociation des phénomènes ou encore une « *séquentialisation des phénomènes* » (Viennot, 1993, 1996 ; C. Orange, D. Orange, 1995 ; D. Orange, 2000). La simultanéité de la réalisation des phénomènes géologiques n'est pas traitée.

-Les courants de convection (Maïssa)

Les plaques sont disposées sur l'asthénosphère qui est constituée de roches en fusion. Sous l'action d'une énergie ces roches en fusion constituent un liquide bouillonnant c'est du magma que Maïssa la compare à une sauce en mouvement dans une casserole sur le feu et couverte par un couvercle. Le mouvement de bouillonnement dans la casserole fait bouger le couvercle c'est ce qui se passe avec les plaques lorsque le magma bouillonne au dessous d'elles. Maïssa mobilise la structure du globe Terrestre c'est-à-dire la superposition de la lithosphère et de l'asthénosphère. Elle mobilise la subdivision de la lithosphère en plaques juxtaposées rigides en les comparant au couvercle d'une casserole, ainsi que la structure ductile de l'asthénosphère en effet Nous remarquons l'utilisation des expressions telles que « une sauce » et « liquide » (voir annexe 10). Le couple accrétion subduction n'est pas évoqué.

Mais le mouvement des plaques à la surface n'est que la conséquence d'un mouvement de la matière asthénosphérique. Nous pouvons dire que cette conception est sur la voie des courants de convection mais elle n'est pas encore claire car le mouvement existe mais son sens de déplacement n'est pas précisé c'est ce qui d'ailleurs peut expliquer l'absence de la liaison entre le bouillonnement asthénosphérique et le couple accrétion subduction à la surface, et la nécessité d'un fonctionnement en cycle.

Maïssa, comme son groupe procède par un raisonnement par analogie (la casserole sur le feu muni d'un couvercle et contenant une sauce) mais ce modèle ne correspond pas aux savoirs géologiques actuels dans la mesure où il ne leur permet pas de mettre en évidence le mouvement des courants de convection au niveau du manteau pour arriver à trouver une explication logique au couple accrétion subduction à la surface. Le facteur responsable du bouillonnement est la température.

-L'histoire de la naissance d'une chaîne de collision : l'Atlas tunisien

Maïssa, par sa production n°14 appartient au cas n° 6 elle se range avec Housseem dans la même catégorie. (Voir annexe 13)

Le bord eurasiatique est tracé en une ligne droite qui reste inchangée au cours du temps. Ce bord eurasiatique ne ressemble pas à l'état actuel même lorsqu'il est engagé dans la subduction. L'élève ne projette pas donc l'actuel dans le passé. Elle est non actualiste. Elle recourt à la subduction pour faire disparaître les prismes d'accrétion et réduire l'espace

intercontinental mais à la différence de Houssem, c'est la plaque eurasiatique qui plonge sous la plaque africaine. La subduction est bloquée au miocène supérieur. L'explication de la variation de l'espace intercontinental par des causes géologiques possibles (la subduction) fait que l'élève raisonne en dehors du cadre catastrophiste un tel raisonnement est **non actualiste- non catastrophiste**.

Le tableau suivant récapitule les différentes utilisations des figures d'espaces, de temps et les mécanismes fonctionnels utilisés par les quatre élèves et l'influence qu'imposent les figures d'espace sur la nature du fonctionnement et sur le temps utilisé.

	Maïssa	Houssem	Takwa	Khawla
Les figures d'espace utilisées	Absence de l'espace géographique et géologique Absence de l'espace négatif Utilisation d'un espace sédimentaire pour la genèse des chaînes de montagnes	Utilisation de l'espace géographique Utilisation de l'espace positif par la mobilisation de la dorsale Absence de l'espace négatif	Espace géographique qui évolue en espace géologique Absence de l'espace positif et de l'espace négatif	Utilisation de l'espace géologique Absence de l'espace positif et de l'espace négatif
Mécanismes utilisés	Absence de l'articulation de la subduction à l'accrétion Absence d'un enchaînement cyclique Difficulté à construire un moteur pour le mouvement des plaques	Absence de l'articulation de la subduction à l'accrétion Absence d'un enchaînement cyclique Difficulté à construire un moteur pour le mouvement des plaques	Absence de l'articulation de la subduction à l'accrétion Absence d'un enchaînement cyclique Difficulté à construire un moteur pour le mouvement des plaques	Absence de l'articulation de la subduction à l'accrétion Absence d'un enchaînement cyclique Difficulté à construire un moteur pour le mouvement des plaques
Les figures de temps Reconstitution De la naissance de l'Atlas tunisien	Mise en histoire Temps linéaire directionnel Absence du temps cyclique ⇒ Non actualiste non catastrophiste	Mise en histoire Temps linéaire directionnel Absence du temps cyclique ⇒ Non actualiste non catastrophiste	Mise en histoire Temps linéaire directionnel (un catastrophisme de 1^{er} niveau) Absence du temps cyclique ⇒ Non actualiste non catastrophiste	Mise en histoire Temps linéaire directionnel Absence du temps cyclique ⇒ Utilisation du temps long Actualisme de 2^{ème} niveau

Tableau 15.1 Tableau récapitulatif des différentes utilisations des figures d'espaces, de temps et les mécanismes fonctionnels utilisés par les quatre élèves et l'influence qu'imposent les figures d'espace sur la nature du fonctionnement et sur le temps utilisé

3.3 Analyse du tableau

L'analyse de ce que présentent ces quatre élèves ne vise pas annoncer l'ensemble des raisonnements cohérents et des difficultés des élèves, mais permet de faire ressortir quelques rapports et articulations dans les utilisations du temps, de l'espace et le fonctionnement :

- **L'analyse du tableau dans le sens horizontal de gauche à droite:**

- 1) En allant de gauche à droite on remarque une variation dans la conceptualisation de l'espace : d'une absence totale de l'espace géographique et de l'espace géologique on arrive à la mobilisation de l'espace géographique puis l'espace géologique. Mais l'espace négatif est absent chez les quatre élèves.
- 2) Les quarts élèves présentent des difficultés à construire un moteur sous jacent au mouvement des plaques à la surface.
- 3) En allant de gauche à droite on remarque une variation dans la conceptualisation du temps : une conception non catastrophiste non actualiste qui est associée à l'espace lorsqu'il n'est pas défini ou lorsqu'il est géographique, une conception catastrophiste associée à l'espace lorsqu'il évolue de la figure géographique vers la figure géologique et un actualisme de 2^{ème} niveau associé à un espace purement géologique.

- **L'analyse du tableau dans le sens vertical de haut en bas :**

- 1) La conceptualisation de l'espace en terme de mouvement de plaques et non pas en terme de gain et de perte de matière entraine l'absence de l'utilisation de l'espace négatif et de l'espace positif.
- 2) L'absence de ces deux figures entraine à son tour une absence de la nécessité de l'articulation de la subduction à l'accrétion au sein d'un fonctionnement cyclique et donc la construction d'un mécanisme sous jacent permettant la répétition du couple (accrétion-subduction) d'une manière permanente et le maintien de l'équilibre dynamique, ne s'impose plus.
- 3) L'absence d'un fonctionnement cyclique contribue au non utilisation du temps cyclique et explique ainsi le recours des élèves à l'utilisation d'un temps linéaire directionnel par une mise en histoire.

- 4) Dans cette mise en histoire, si le temps long est convoqué et si le passé ressemble à l'actuel, l'élève fait appel à un actualisme de 2^{ème} niveau. Mais si le passé est différent de l'actuel l'élève fait appel soit au catastrophisme de 1^{er} niveau, soit à un catastrophisme raisonné et parfois l'histoire ne fait pas appel ni à l'actualisme ni au catastrophisme.

4 Conclusion

Au terme de cette mise en perspective des 3 études, il existe une relation très étroite entre l'utilisation du temps, l'utilisation de l'espace et la modélisation d'un mécanisme. La problématisation de l'espace fait appel à la géologie fonctionnaliste et à la géologie historique, dans la problématisation du temps on peut raisonner dans le cadre fonctionnaliste, et quand on traite un problème de fonctionnement le temps et l'espace doivent être pris en considération.

Les figures d'espace pour un même phénomène changent lorsque ce phénomène est traité dans deux cadres problématiques différents, en effet nous remarquons que le problème de la reconstitution de la naissance d'une chaîne de montagne fait l'exemple de ce que nous avançons dans la mesure où certaines élèves comme Maïssa, proposent une explication sédimentaire (accumulation de sédiments dans la mer et de part et d'autre de la dorsale, jusqu'à apparition à la surface) à la formation des chaînes de montagnes quand ce phénomène est évoquée au cours de la première étude dans la problématisation de la subdivision de la surface de la Terre en plaques lithosphériques, mais ce même phénomène a une explication différente par la même élève dans un autre cadre c'est-à-dire dans la troisième étude au cours de la problématisation de la reconstitution de l'histoire de l'Atlas tunisien dans la mesure où l'élève propose la subduction comme phénomène contribuant à la formation de l'Atlas Tunisien. Ceci montre que l'espace mobilisé par l'élève dans la première étude est un espace sédimentaire alors que dans la troisième étude l'espace devient tectonique. Il en est de même pour les figures de temps, en effet dans la recherche d'un mécanisme moteur du mouvement des plaques qui permet la formation des chaînes de montagnes à la surface du globe, Takwa mobilise un catastrophisme de 1^{er} niveau alors qu'au cours de la reconstitution de la naissance d'une chaîne de montagne, cette même élève raisonne en dehors du cadre actualiste et en dehors du cadre catastrophiste.

Ainsi, les figures de temps, les figures d'espace et les modèles de mécanismes fonctionnels, varient selon le problème traité mais aussi selon le cadre problématique dans lequel on est entrain d'expliquer un phénomène donné. La variation de la figure de

temps peut influencer la figure d'espace et même le mécanisme proposé et inversement.

On peut conclure que l'utilisation de telle ou telle figure d'espace influe la construction d'un mécanisme explicatif et oriente ainsi vers l'utilisation d'une figure de temps bien déterminée c'est ce qui explique que pour un même objet géologique on peut tracer des histoires différentes.

Conclusion générale

Nous avons entamé cette recherche dans le but de préciser et de comprendre les utilisations du temps, de l'espace et du fonctionnement des élèves de troisième année sciences expérimentales dans les explications en tectonique des plaques en particulier et en géologie d'une façon générale. Le développement de notre cadre théorique nous a conduits à faire une approche par problématisation pour les trois domaines d'études. Pour chaque domaine d'étude, l'étude épistémologique a permis de construire des "outils" d'interprétation des productions des élèves basés sur la problématisation. Quels apports pouvons-nous retirer à la fin de cette recherche ? Quelles perspectives de travaux futurs ouvre-t-elle?

1. Les apports de notre recherche

Nous classions au départ des repères sur la multiplicité des formes du temps, des figures d'espace et des mécanismes possibles en tectonique des plaques et de quelques éléments sur les décalages d'utilisation du temps, de l'espace et des mécanismes entre élèves et chercheurs. Nous avons pu préciser les décalages et expliquer en partie les difficultés des élèves.

1.1 L'identification d'obstacles à la construction de l'espace tectonique global

La problématisation en sciences de la Terre est rendu difficile, d'un côté par la lecture des cartes de la surface du globe Terrestre à deux dimensions qui valorisent les limites géographiques au dépens des limites géologiques et d'un autre côté par la mise en jeu d'une forme d'explication qui se focalise sur certaines structures (comme la dorsale) et certains phénomènes (l'expansion océanique) par rapport à d'autres en principe de même importance (comme les rift, les chaînes de montagnes et la subduction...) ce qui limite

l'espace tectonique en un seul élément : la dorsale, ce qui rend difficile à observer l'espace tectonique globale. Il ne faut pas aussi oublier que la focalisation faite sur l'explication des mécanismes, en se limitant aux enchaînements et aux contrôles, inhibe la mobilisation d'une vue globale de l'espace et se limite à l'espace de réalisation du phénomène sans le voir dans le cadre spatial général et sans voir les relations qu'établit l'espace de réalisation d'un phénomène avec le reste de l'espace.

1.2 L'identification d'obstacles à la construction du temps long qualitatif

La problématisation en Sciences de la Terre est rendue difficile d'un côté par le raisonnement en dehors du cadre actualiste au cours de la reconstitution de l'histoire de l'Atlas tunisien, et d'un autre côté par le recours au catastrophisme, ce qui constitue un obstacle à la construction de la nécessité du temps long qualitatif fondamental pour l'orogénèse.

Il ne faut pas aussi oublier que la focalisation faite sur l'explication des mécanismes, en se limitant aux enchaînements et aux contrôles, fait que ces phénomènes se construisent en dehors du cadre temporel et donc sans histoire alors que les phénomènes géologiques nécessitent du temps long.

1.3 L'identification d'obstacles à la construction d'un mécanisme géologique

La problématisation en Sciences de la Terre est rendue difficile par le recours à une forme d'explication qui se focalise sur une dissociation des phénomènes ou encore une « *séquentialisation des phénomènes* » (Viennot, 1993, 1996 ; C. Orange, D. Orange, 1995 ; D. Orange, 2000) dans le but de faciliter la compréhension des phénomènes. Cette dissociation favorise la liaison des éléments du registre empiriques dans un enchaînement en étapes successives dans le temps. Ainsi l'élève aura la difficulté à concevoir la nécessité du couplage des phénomènes (accrétion- subduction) et leur réalisation dans une continuité. A cette difficulté s'additionne la difficulté à construire la nécessité d'un mécanisme dynamique sous jacent qui s'inscrit dans une périodicité (comme les courants de convection). La problématisation du mécanisme est influencée par l'utilisation du temps historique, ce qui fait que la figure du temps sagittal domine dans le raisonnement des élèves et produit une difficulté à concevoir le temps cyclique en tant que figure de temps intéressante dans ce domaine.

1.4 Des conséquences de l'enseignement et l'apprentissage des Sciences de la Terre dans les programmes Tunisiens

Les Sciences de la Terre au collège et au lycée sont presque absentes dans les programmes d'enseignement et les rares fois où ils sont enseignés, ils s'intéressent à la sédimentation, aux caractéristiques des roches sédimentaires, à la genèse du pétrole et des phosphates et surtout au cycle sédimentaire, en n'évoquant à chaque fois que des notions de base.

Ce minimum de savoir géologique présent dans les programmes d'enseignements tunisiens, quand il est présenté, il n'est pas programmé pour être enseigné dans une progression. C'est-à-dire ce qui figure dans le programme de 7^{ème} année de base n'est pas lié à ce qui est programmé pour la 1^{ère} année secondaire ni au contenu du programme de la 3^{ème} année sciences. Le changement du niveau de formulation d'un concept donné d'un niveau scolaire à un autre est absent. La géologie structuraliste n'est présente qu'au programme de 3^{ème} année sciences expérimentales et découpée de tout contexte géologique c'est-à-dire il n'y aucune liaison entre la tectonique des plaques et le volcanisme, les séismes, le métamorphisme comme étant des phénomènes en liaison étroite avec cette dernière. Ces phénomènes ne sont pas enseignés dans tous les programmes de l'enseignement primaire et secondaire et même en classe terminal (section sciences expérimentales).

Le minimum de contenu géologique présent dans les programmes est présenté d'une manière qui ne touche en aucun cas à une approche du temps géologique ni à l'actualisme.

Au terme de notre étude, il paraîtrait important de :

- Enrichir le programme d'enseignement des sciences par les sciences de la Terre et de leur attribuer la même importance que les sciences de la vie.
- Attribuer la même importance à la géologie structuraliste qu'à la géologie de surface.
- Valoriser le temps géologique et le présenter comme édificateur d'événements géologiques. On peut focaliser l'enseignement des sciences de la Terre sur la prise en compte du "*principe d'actualisme*" sans avoir une tendance à l'actualisme d'analogie, ou d'extrapolation. Ce qui va permettre aux élèves de construire le temps long qualitatif.

- Prendre compte du temps cyclique dans l'enseignement des mécanismes, qui a une tendance à être fait par séquentialisation des phénomènes dans le but de faciliter l'apprentissage ce qui ne permet pas d'une part de construire le temps cyclique et d'autre part de construire la simultanéité de réalisation des phénomènes.

2. Limites et prolongements de notre recherche

Cette étude nous permet de constater qu'il est important de prolonger cette réflexion par des approfondissements à poursuivre dans les domaines des Sciences de la Terre.

2.1 Des approfondissements à poursuivre

Dans le cadre théorique de la "construction de problème" ou "problématisation" (Fabre, 1999 ; C. Orange, 2000) dans lequel nous nous sommes situés, nous avons vu que, l'utilisation du temps, celle de l'espace et celle du fonctionnement, ne peuvent pas être indépendantes, elles interfèrent et s'influencent les unes par les autres, dans la mesure où la problématisation d'un phénomène spatial ou historique ou même fonctionnaliste est influencée par la multiplicité des figures de temps et d'espace. C'est-à-dire comme nous l'avons déjà dit un peu plus haut la difficulté à construire le temps long peut influencer la problématisation d'une structure dans l'espace ou encore la difficulté à construire un temps cyclique peut influencer la problématisation d'un mécanisme, peut-on parler dans ce cas d'un réseau de problématisation dont les nœuds sont le temps, l'espace et le fonctionnement ? Et dans ce cas comment étudier la problématisation dans un cadre historique en arrivant à inhiber l'influence de l'effet qu'impose les figures d'espace ou qu'impose les nécessités pour construire un mécanisme ?

Notre recherche doit être comprise comme une tentative de repérage d'indices de la problématisation des élèves. Ce qui veut dire qu'elle mérite d'être poursuivie par des approfondissements théoriques et didactiques, notamment en ce qui concerne cette **idée d'interférence entre les utilisations des figures de temps et celles de l'espace ainsi que son influence sur le processus de problématisation** et sur les nécessités pour la construction, des registres explicatifs et des modèles géologiques.

2.2 Une ouverture à d'autres domaines de la géologie

Nous avons fait porter notre étude épistémologique et didactique sur trois domaines des Sciences de la Terre : la subdivision de la surface de la Terre en plaques lithosphériques, le moteur du mouvement des plaques (couplage accréation –subduction et courants de subduction) et la reconstitution du passé d'une chaîne de collision intercontinentale : l'Atlas Tunisien. Ce choix nous paraît fécond a posteriori dans la mesure où il nous a permis de construire, en matière de temps, d'espace et de fonctionnement, des outils d'interprétation des productions des élèves d'une certaine variété.

Mais nous sommes conscients que des approfondissements sont à poursuivre. En effet, si les exemples choisis permettent de questionner le temps, l'espace et le fonctionnement, il nous paraîtrait intéressant de poursuivre des études sur des problèmes géologiques qui recourent à d'autres figures de temps et autres figures d'espace et d'autres types de mécanismes.

Nous pensons plus particulièrement aux problèmes de sismicité, surtout de métamorphisme et de volcanisme qui sont absents dans les programmes d'enseignement.

Enfin, il y a à approfondir, dans d'autres problèmes géologiques, les relations entre l'espace et le temps, que nous avons rencontrées dans notre recherche.

Bibliographie

- ACHACHE J. (1990). Préface in WEGENER (1990). *La genèse des continents et des océans*. Paris : Christian Bourgois. pp. I-IX.
- ALLEGRE C. (1983). *L'écume de la Terre*. Paris : Fayard.
- ALLEGRE C. (1987). *Les fureurs de la Terre*. Paris : O/Jacob.
- ALLEGRE C. (2002). L'âge d'or des géosciences. *Pour la science*, n° 300, pp. 70-75.
- ALLEGRE C, (2001). *Histoires De Terre*, Ed: Fayard, Collection: Le Temps Des Sciences
- AMAUDRIC du CHAFFAUT S. (1999). *Tectonique des plaques*. CRDP de l'Académie de Grenoble.
- ASTOLFI J.-P. & DEVELAY M.(1989).*La didactique des sciences*. Paris: PUF, Que sais- je?
- ASTOLFI J.-P. (1992). *L'école pour apprendre*. Paris: ESF.
- ASTOLFI J.-P. (1993). Trois paradigmes pour les recherches en didactique. *Revue Française de Pédagogie*, n° 103, avril-mai-juin 1993. pp. 5-18.
- ASTOLFI J.-P. (1997).et all, *Les mots clés de la didactique des sciences*, éd De Boeck,
- Auteurs Collectifs, (2005) *La Mesure Du Temps Dans L'Histoire De La Terre*, Ed: Vuibert , Collection : Enseigner Les Sciences De La Terre ,.
- AUBOUIN J., BROUSSE R., LEHMAN J.-P. (1967). *Précis de géologie, tome 2*. Paris: Dunod.
- AUBOUIN J., BROUSSE R., LEHMAN J.-P. (1968). *Précis de géologie, tome 3*. Paris: Dunod.
- AUBOUIN J., BROUSSE R., LEHMAN J.-P. (1968). *Précis de géologie, tome 1*. Paris: Dunod.
- BACHELARD G. (1986). *Le rationalisme appliqué*. Paris : P.U.F.
- BACHELARD G.,(1996) *La formation de l'esprit scientifique*, Vrin, Paris,.
- BACHELARD S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. DELATTRE et M. THELLIER (éd) (1979). *Elaboration et justification des modèles*. Paris: Maloine.
- BACHELET B. (1996). *Sur quelques figures du temps*. Paris : J. Vrin.
- BOILLOT G. (2000). *Introduction à la géologie*. Paris : Dunod.
- BOILLOT G. (1982).*Géologie des marges continentales*. Paris, édition Masson.
- BORDEAUX,A., *Histoire des sciences au XIXe siècle*, Ch. Béranger, Paris, 1992.
- BOUGHANMI. Y.(2009), *Obstacles à la problématisation du temps dans une approche interdisciplinaire*, Thèse de doctorat de l'Université de bourgogne.

- CANGUILHEM G. (2000) . Article Vie. In *Encyclopaedia universalis*.
- CARLES J. (1966). *Les origines de la vie*. Paris : PUF, Que sais-je ?
- CELAL SENGOR, A-M,(2005) : Une Autre Histoire De La Tectonique , Ed: Fayard , Collection : Collège De France Fayard .
- COTARDIERE P. de la & PENOT J.-P. (1995). *Dictionnaire de l'espace*. Paris: Larousse.
- COURTILLOT V. (1995). *La vie en catastrophes*. Paris :Fayard.
- DEBELMAS J., MASCLE G. (2000). Les grandes structures géologiques. Paris: Dunod.
- DELSEMME A. (1994). *Les origines cosmiques de la vie*. Paris: Champs Flammarion.
- DEMOUNEM R. & ASTOLFI J.-P.(1996). *Didactique des sciences de la vie et de la Terre*.Paris: Editions Nathan.
- DURIS P. & GOHAU G. (1997). *Histoire des sciences de la vie*. Paris :Nathan.
- DUVE C. de (1996). *Poussière de vie*. Paris : Fayard.
- ELLENBERGER F. & GOHAU G. (1981). A l'aurore de la stratigraphie paléontologique. Jean-André de Luc, son influence sur Cuvier. *Revue d'Histoire des Sciences*. 34. pp. 217-257.
- ELLENBERGER F. (1987). Les causes actuelles en géologie. Origine de cette expression: la légende et la réalité. *Bull. Soc; géol. France*, (8), t.III, n°1, p. 199-206.
- ELLENBERGER F. (1988). *Histoire de la géologie, Tome 1*. Paris: Technique et Documentation (Lavoisier).
- ELLENBERGER F. (1994). *Histoire de la géologie, Tome 2*. Paris: Technique et Documentation (Lavoisier).
- ELLENBERGER F. (1996). Le présent, clef du passé in *Travaux du comité français d'histoire de la géologie (COFRHIGEO)*, Troisième série, t.X, n°5 (séance du 20 mars 1996).
- ELLENBERGER F. (2001). Article "Géologie- Histoire des sciences de la Terre". In *Encyclopaedia Universalis* (2001).
- ELLENBERGER F. (2001). Article "Hutton (J.) In *Encyclopaedia Universalis* (2001).
- ELLENBERGER F. (2001). Article "Werner (A.G.)". In *Encyclopaedia Universalis*(2001)
- ELMI SERGE (2006) ; Babin, Claude, : Histoire De La Terre (5e Edition) , Ed: Dunod Collection : Universciences .
- FABRE M. (1999). *Situations-problèmes et savoir scolaire*. Paris: PUF.
- FABRE M. & ORANGE C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *ASTER*, 24, 37-57.
- FOUCAULT A. & RAOULT J.-F. (2001). *Dictionnaire de géologie*. Paris: Dunod.
- GOHAU G. (1987). *Une histoire de la géologie*. Paris: Editions du Seuil, Points

Sciences(réédition de 1990).

- GOHAU G. (1990a), *Les sciences de la Terre au XVII^e et XVIII^e siècles, Naissance de la géologie*. Paris: Editions Albin Michel.
- GOHAU G. (1990b). Postface. In WEGENER A. (1990) *La genèse des continents et des océans*. Christian Bourgois éditeur. pp. 233-253.
- GOHAU G. (1995a). Traquer les obstacles épistémologiques à travers les lapsus d'élèves et d'écrivains. *ASTER*, 20, pp 21-41.
- GOHAU G. (1999). Article "Actualisme ou uniformitarisme". In LECOURT D. (dir) (1999).*Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. PUF.
- GOIX H. (1996). *Difficultés d'apprentissage des concepts de cristal et de magmatisme chez les élèves de collège : aspects historiques et didactiques*. Thèse de doctorat de l'Université de Paris 7.
- GOGUEL J. (1965). *Traité de tectonique*, Paris, Edition Masson.
- GOULD S.J. (1990). *Aux racines du temps*. Paris: Grasset. (1987).
- GOULD S.J. (1999). La paléontologie: une fiction de nos origines. In *Qu'est-ce qu'on ne sait pas? Les rencontres philosophiques de l'UNESCO*. Paris: Découverte Gallimard.
- GRANDCHAMP P. (1999). Article "Stratigraphie". In D. LECOURT dir. (1999).*Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. pp.881-883.

- HALLAM A. (1976). *Une révolution dans les sciences de la Terre*. Paris: Le Seuil.
- HEMPEL C. (1972). *Eléments d'épistémologie*. Paris: Armand Colin.
- HOOYKAAS R. (1970). *Continuité et discontinuité en géologie et biologie*. Paris: Seuil.
- JAEGER J.-J. (1996). *Les mondes fossiles*. Paris: Editions Odile Jacob.
- JOHSUA S. & DUPIN J.J. (1989). *Représentations et modélisations: le "débat scientifique" dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne : Peter Lang.
- JOHSUA S. & DUPIN J.J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris : PUF.
- JOLIVET L. & NATAF H.-C. (1998). *Géodynamique*. Paris: Dunod. -JOLIVET L. (1997). *La déformation des continents*. Paris :Hermann.
- JUTEAU T. & MAURY R. (1999). *Géologie de la croûte océanique*. Paris: Dunod.
- KOYRE A. (1973). *Du monde clos à l'univers infini*. Paris: Gallimard.
- KUHN T. (1973). *La révolution copernicienne*. Paris: Fayard (Le livre de poche).
- KUHN T. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris:

Flammarion.

-LARGEAULT J. (2000). Article « Description et explication ». In *Encyclopaedia Universalis*.

-LE PICHON X. (1984). La naissance de la tectonique des plaques. *La Recherche*. 53, mars 1984, pp. 414-423.

-LE PICHON X. (2000). Quand les sciences de la Terre redémarrent. *La Recherche*. 331, mai 2000, pp. 91-92.

LE PICHON X. (2001). My conversion to plate tectonics. In ORESKES N. (2001). *Plate tectonics An Insider's History of the Modern Theory of the Earth*. pp. 201-224. Naomi Oreskes editor with Homer Le Grand, Westview Press

LE PICHON X. (2002). La tectonique des plaques: de l'océan à l'espace. In MICHAUD Y.

(dir.) (2002). *Université de tous les savoirs 15*, Le Globe. pp. 65-75.

LECOURT D. (dir.) (1999). *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris: PUF.

LUIGI LUISI P. (2000). L'assemblage des macromolécules. *La Recherche* 336, novembre 2000, p. 27.

MARTINAND J.-L. (1992). Présentation. In *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, pp. 7-22.

MARTINAND J.-L. (1993) Histoire et didactique de la physique et de la chimie: quelles relations? *Didaskalia*, 2, pp. 89-99.

MARTINAND J.-L. (1995). Introduction à la modélisation. In *Séminaire de didactique des disciplines technologiques 1994-1995*. Association Tour 123, pp. 7-19.

MARTINAND J.-L., GENZLING J.-C. & PIERRARD M.-A., LARCHER C., ORANGE C., RUMELHARD G., WEIL-BARAIS A. & LEMEIGNAN G. (1994). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.

Martinez C & Truillet R. (1987) article « Evolution structurale et paléogéographique de la Tunisie » in cahiers Orstom Mem. Soc.Géol. It., 38,4ff p35-45.

MAUREL M.-C. & TIRARD S. (1999). Article "Origines de la vie". In LECOURT D. (dir.)

Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences, pp. 711-713.

PUF.

MAUREL M.-C. (1999). Article "Génération spontanée". In LECOURT D. (dir.) *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, pp. 449-453. PUF.

MAUREL M.-C.(2002). Les origine du vivant : une histoire biologique. In F. Raulin- Cerceau, P.Léna & J. Schneider (dir.) *Sur les traces du vivant*. Le pommier.

MICHARD A. (1987). L'obduction. *La Recherche* n° 186, pp. 312-322.

MICHARD A., JUTEAU T. & WHITECHURCH H. (1985). L'obduction: revue des modèles et confrontation au cas de l'Oman. *Bulletin de la Société géologique de France*. Série 8, volume 1, n° 2, pp. 189-198.

MICHAUD Y. (2002). Introduction. In *Université de tous les savoirs 15*, Le Globe. Paris: Editions O. Jacob.

- MICHAUD Y., dir. (2002). *Université de tous les savoirs 4, La Vie*. Paris: O. Jacob.
- MICHAUD Y., dir. (2002). *Université de tous les savoirs 15, Le Globe*. Paris: O. Jacob.
- MONOD J. (1970). *Le hasard et la nécessité*. Paris: Seuil (Points Sciences)
- NICOLAS A. (1990). *Les montagnes sous la mer*. Orléans: BRGM.
- ORANGE C. (dir) (1998). "Réal de terrain", "réel de laboratoire" et construction de problèmes en biologie-géologie. Rapport de la recherche associative
« L'expérimental dans la classe » INRP, IUFM des Pays de la Loire.
- ORANGE C. & ORANGE D. (1993). Problèmes de rupture, problèmes normaux et apprentissage en biologie-géologie. *Les sciences de l'éducation- Pour l'ère nouvelle*, 4-5, pp. 51-69.
- ORANGE C. & ORANGE D. (1995), Géologie et Biologie: analyse de quelques liens épistémologiques et didactiques. *ASTER*, 21, pp. 27-49.
- ORANGE C. (1994). *Intérêt de la modélisation pour la définition de savoirs opérants en biologie-géologie*. Thèse de doctorat de l'Université de Paris 7.
- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris: PUF.
- ORANGE C. (1999). Les fonctions didactiques du débat scientifique dans la classe : faire évoluer les représentations ou construire des raisons ? In *Actes des premières rencontres scientifiques de l'ARDIST*, Cachan, octobre 1999
- ORANGE C. (2000a). *Idées et raisons: construction de problèmes, débats et apprentissages scientifiques en Sciences de la vie et de la Terre*. Mémoire de recherche pour l'H.D.R.. Université de Nantes.
- ORANGE C. (2000b). Investigations empiriques, construction de problèmes et savoirs scientifiques. In LARCHER C., coord. (2000). *La pratique expérimentale dans la classe*. Paris, INRP.
- 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., BEORCHIA, F. DUCROCQ, & ORANGE D. (1999). "Réal de terrain", "réel de laboratoire" et construction de problèmes en sciences de la vie et de Terre. *ASTER*, 28, pp. 107-129.
- ORANGE C., dir.(1998). "Réal de terrain", "réel de laboratoire" et construction de problèmes en biologie-géologie. Rapport final de la recherche coopérative INRP, IUFM de Caen, IUFM de Nantes "La pratique expérimentale dans la classe" (coordination nationale, C. Larcher).
- ORANGE D. & ORANGE C. (1993). Mise en œuvre d'une situation-problème en géologie. *Biologie-Géologie*, bulletin de l'A.P.B.G., n°3, pp547-555.
- ORANGE D. (1998). Les registres utilisés en sciences de la Terre par les élèves de lycée (1^{ère}S). In ORANGE C., (2000b).
- ORANGE D. (1999). Représentations et utilisations explicatives du temps en Sciences de la Terre chez les élèves de lycée : caractéristiques, obstacles, conditions de leur prise en compte didactique. In *Actes des premières rencontres scientifiques de l'ARDIST*, Cachan, octobre 1999.

- ORANGE D. (2000). Comprendre le milieu intérieur, n'est-ce pas dépasser la mise en histoire? In C. ORANGE, coord. (2000). *Changer, réorganiser, refondre ses connaissances sur le milieu intérieur*. Rapport de la recherche INRP/ IUFM des pays de la Loire (coordination nationale G. Rumelhard), pp. 65-89.
- ORANGE D. (2001). L'histoire des ophiolites selon les géologues et les lycéens : comparaison et conséquences didactiques. In *Actes des deuxièmes rencontres scientifiques de l'ARDIST*, Carry, octobre 2001.
- PHILIP ANDRIEUX J., DLALAM ., CHIHI L. & BENAYED N. (1986) - *Evolution tectonique mio-plio quaternaire du fossé de Kasserine (Tunisie centrale): implications sur l'évolution géodynamique récente de la Tunisie*. Bull. Soc. Géol. France (8), 11, (4), 559-568.
- PIAGET J. & GARCIA R. (1983). *Psychogenèse et histoire des sciences*. Paris: Flammarion.
- PIAGET J. (1973) Introduction: le problème de l'explication. In L. APOSTEL et al (1973). *L'explication dans les sciences*. Paris: Flammarion.
- POMEROL C., LAGABRIELLE Y. & RENARD M. (2000). *Éléments de géologie*. Paris: Dunod.
- RAVACHOL-ORANGE D. (1997). *Fonctions explicatives du temps dans l'apprentissage de la Géologie*. DEA de Didactique et Sciences de l'éducation. Université de Nantes.
- RAVACHOL-ORANGE 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 de l'Université de Nantes.
- RICHET P. (1999). *L'âge du monde*. Paris: Seuil.
- RUMELHARD G., dir. (2000). *Les formes de causalité dans les sciences de la vie et de la Terre*. Paris, INRP.325
- SANCHEZ. E. (2007), Investigation scientifique et modélisation dans l'enseignement des sciences de la Terre. Thèse de doctorat de l'université de LYON.
- SAVATON P. (1998). *La carte géologique dans l'enseignement secondaire*. Thèse de doctorat de l'Université de Paris 7.
- THOMAS P. (2002). Après la tectonique des plaques. *Pour la science*, n° 300, pp. 88-91.
- WESTPHAL. M., WHITECHURCH.H & MUNSCHY. M. (2002). La tectonique des plaques. CPI.Gb Science Publisher.
- ZARGOUNI. F (1985) - *Tectonique de l'Atlas méridional de Tunisie. Evolution géométrique et cinématique des structures en zone de cisaillement*. Thèse doctorat, Univ. Strasbourg, 292p.

Table des matières

Dédicace	3
Remerciements	4
Résumé	5
Abstract	6
Sommaire	7
Liste des figures	10
Liste des dessins	13
Liste des tableaux	14
Introduction générale	15
Fondements théoriques	19
Chapitre 1	20
Les sciences de la Terre entre temps, espace et mécanismes	
Introduction	21
1. Géologie et sciences de la Terre	21
1.1 Place de la Géologie dans les programmes d'enseignement tunisiens au lycée	21
1.2 Les sciences de la Terre se substituent à la Géologie	22
1.3. Conclusion	24
2. Les sciences de la Terre entre temps et espace	24
2.1 Les rapports entre temps et espace	25
2.1.1 Les sciences de la Terre et l'espace	26
2.1.1.1 Le rapport des sciences de la Terre au réel	26
2.1.1.2 L'échelle : une lecture du réel grâce à un changement de variable	27
2.1.1.3 « l'espace » réel et « l'espace » de conjoncture	28
2.1.1.4. La notion d'espace est inscrite dans le vocabulaire géologique	29
2.1.1.5. Les roches indicatrices d'espace	29
2.1.1.5.1 L'espace sédimentaire – conjoncture sédimentaire	30
2.1.1.5.2 L'espace magmatique- conjoncture magmatique	30
2.1.1.5.3 L'espace métamorphique- conjoncture métamorphique	31
2.1.1.6 Un espace de conjoncture tectonique	32
2.1.2 L'utilisation de l'outil « espace »	33
2.2 La notion d'espace dans l'histoire des sciences de la Terre	35
2.2.1 La notion d'espace géologique dans le neptunisme	36
2.2.2 La notion d'espace géologique dans le plutonisme	37
2.2.3 Conclusion	38
2.3 Les sciences de la Terre et le Temps	39
2.3.1 Le neptunisme contre le plutonisme	41
2.3.1.1 Le neptunisme et le temps sagittal	42
2.3.1.2 Le plutonisme et le temps cyclique	43
2.3.1.3 La révolution huttonienne et le temps profond	45
2.3.2 Gradualisme contre équilibres ponctuels (fin du 20 ^è siècle)	46
2.3.2.1 Le gradualisme	46
2.3.2.2 Les équilibres ponctuels	47
2.3.3 L'actualisme contre le catastrophisme	49
2.3.3.1 L'actualisme	49
2.3.3.1.1 : L'actualisme dans un contexte stationnariste	51

2.3.3.1.2 : L'actualisme dans un contexte directionnaliste	52
2.3.3.2 Le catastrophisme	53
2.4 Conclusion	54
3. Sciences de la Terre, sciences de mécanismes	54
4. Les problèmes des sciences de la Terre	55
4.1 Les problèmes spatiaux des sciences de la Terre	56
4.2 Les problèmes historiques des sciences de la Terre	57
4.3 Les problèmes fonctionnalistes des sciences de la Terre	58
4.4 Conclusion	58
5. La géodynamique : une branche des sciences de la Terre	59
6. La théorie de la tectonique des plaques : pourquoi ce choix ?	60
7. Conclusion	61
Chapitre 2	63
Problématisation et modélisation dans les sciences de la Terre	
Introduction	64
1 L'Épistémologie et la didactique des sciences de la Terre	65
1.1 L'épistémologie et la construction de situations problèmes	65
1.2 Temps, espace et obstacles dans l'apprentissage des sciences de la Terre	66
1.2.1 Des obstacles épistémologiques aux obstacles didactiques	66
1.2.1.1 Les obstacles liés à la perception de l'espace	67
1.2.1.2 Les obstacles liés à la perception du temps	68
2 Problématisation et modélisation dans les sciences de la Terre	69
2.1 Les modèles, au cœur des résolutions des problèmes	69
3. Conclusion	71
Chapitre 3	72
Méthodologie de recherche	
Introduction	73
1 L'articulation de l'espace et du temps au fonctionnement en Sciences de la Terre	73
2 Les problèmes géologiques choisis	74
2.1 Des problèmes liés à une même théorie : la tectonique des plaques	74
2.2 Des problèmes dont l'un explique l'autre	75
2.2.1 Un problème d'espace : La subdivision en plaques lithosphériques	75
2.2.2 Un problème de fonctionnement : Le mouvement des plaques	76
2.2.3 Un problème de temps : La naissance d'une chaîne de collision intercontinentale : l'exemple de l'Atlas Tunisien	76
2.2.4 Conclusion	77
3 Les questions de recherche	77
4 Les hypothèses proposées	78
5 Méthodologie de recherche	78
5.1 un questionnaire de diagnostique (pré- apprentissage)	78
5.2 Une approche par la problématisation	79
5.3. Une étude épistémologique	79
5.4. Une étude didactique	79
Première étude	81
Le problème de la subdivision de la surface Terrestre en plaques lithosphériques	

Chapitre 4	82
Plaques et limites des plaques	
Contenu scientifique et réflexion épistémologique	
Introduction	83
1 Les plaques lithosphériques et les limites de plaques	83
1.1 La répartition des séismes	83
1.2 La répartition des volcans	84
1.3 Les déformations des couches sédimentaires récentes	85
2 Réflexion épistémologique sur l'espace dans l'histoire de la construction du modèle plaquiste	86
2.1 Le rapport à l'espace dans l'explication de la surface actuelle du globe Terrestre du 18 ^{ème} jusqu'au 20 ^{ème} siècle	86
2.2 Le rapport à l'espace dans l'explication de la surface actuelle du globe Terrestre à la fin du 20 ^{ème} siècle et à l'aube du 21 ^{ème} siècle	90
2.3 Conclusion	92
3 L'utilisation de l'espace par les scientifiques actuels dans la compréhension des plaques lithosphériques et les limites de plaques (cas de Xavier le Pichon)	93
4 Problématisation de l'espace dans la notion des plaques lithosphériques et les limites de plaques par les scientifiques actuels.	94
4.1 L'espace des contraintes construit dans le cadre fixiste des années soixante.	95
4.2 L'espace de contraintes construit par les mobilistes des années soixante	96
5 Conclusion	98
Chapitre 5	99
Les plaques lithosphériques et les limites de plaques	
Analyse didactique préliminaire des situations	
Introduction	100
1 Le cadre général de la situation de classe mise en jeu	100
2 La situation de classe et les objectifs du professeur	101
3 Analyse didactique préliminaire de la situation	104
3.1 Une analyse a priori de l'espace de contraintes dans la délimitation des plaques dans le contexte de la fiche d'activité	105
4 Conclusion	106
Chapitre 6	107
Les plaques lithosphériques et les limites de plaques	
Explication des élèves et utilisation de l'espace	
Introduction	108
1 Le recueil de données	108
1.1 Analyse des réponses au questionnaire (pré- apprentissage)	109
1.1.1 Analyse de la quatrième question du questionnaire	112
1.1.2 Analyse de la cinquième question du questionnaire	113
1.1.3 Croisement des catégories de réponses de la quatrième et de la cinquième question	115
2. Les productions écrites des élèves aux questions de la fiche	116
2.1 Les transcriptions de la confrontation des réponses des élèves à la fiche	116
2.2 Procédure d'analyse	116
3 La compréhension de « l'espace » par les élèves (les plaques et les limites de plaques)	118

3.1 . Etude des réponses écrites aux questions 1 à 3 de la fiche	118
3.1.1. Analyse des réponses à la question 1	118
3.1.2. Analyse des réponses à la question 2	120
3.1.3. Etude croisée de réponses aux questions 1 et 2	123
3.1.4. Analyse des réponses à la question 3	124
3.1.5 Récapitulation de l'analyse du travail de la fiche	128
3.2 L'analyse de la discussion à la suite du travail de la fiche	129
3.2.1 L'analyse selon le mode de raisonnement adopté envers « l'espace » (Etude de cas)	129
3.2.1.1 La discussion1 dans la première classe de troisièmes sciences	129
3.2.1.1.1 Le cas de Takwa Labben	129
3.2.1.1.2 Le cas de Houssef Méjri	132
3.2.1.2 La discussion2 dans la deuxième classe de troisièmes sciences	135
3.2.1.2.1 Le cas de Khawla	135
3.2.1.2.2 Le cas de Maïssa	136
3.2.1.3 Récapitulation de l'analyse selon le mode de raisonnement adopté en vers « l'espace »	137
3.2.2 Argumentation et problématisation dans le débat	139
3.2.2.1 Episode argumentatif sur la répartition des volcans, séismes et chaînes de montagnes à la surface de la Terre dans la première classe.	139
3.2.2.1.1 Structure de l'épisode1	139
3.2.2.1.2 Analyse de l'épisode 1 dans la discussion de la première classe	141
3.2.2.2. Episode argumentatif sur la répartition des volcans, séismes et chaînes de montagnes à la surface de la Terre dans la deuxième classe.	143
3.2.2.2.1 Structure de l'épisode 1 dans le débat de la deuxième classe.	143
3.2.2.2.2 Analyse de l'épisode 1 dans le débat de la deuxième classe.	145
3.3 Récapitulation de la problématisation dans les deux épisodes.	147
4 Conclusion générale de la première étude	153
Deuxième étude	155
Problème de mouvement des plaques (Couple accréation- subduction et courants de convection)	
Chapitre 7 Mouvement des plaques et courants de convection	156
Introduction	157
1. Le mouvement des plaques lithosphériques et les courants de convection (Le contenu scientifique)	157
1.1 Les différents types de mouvements horizontaux des plaques	157
1.2. Les mouvements verticaux de la lithosphère et l'équilibre isostatique	160
1.2.1 Le principe d'isostasie et l'équilibre isostatique local	160
1.2.2 Les mouvements verticaux de la lithosphère provoqués par les variations de l'épaisseur crustale	161
1.2.2.1 L'épaississement de la croûte.	161
1.2.2.2 L'amincissement de la croûte	162
1.2.3 Les mouvements verticaux de la lithosphère provoqués par son état thermique et son épaisseur	162
1.2.4 Les mouvements verticaux de la lithosphère provoqués par son élasticité	162
1.3. Moteur du mouvement des plaques	163

1.3.1. Origine de la chaleur Terrestre	163
1.3.2 évacuation de la chaleur Terrestre par convection	163
1.3.3 Courants de convection dans l'asthénosphère.	163
2 La géologie fonctionnaliste dans l'histoire de la construction du modèle plaquiste	164
2.1 Le modèle de l'effondrement	165
2.2 Le modèle contractionniste	166
2.3 Le modèle translationniste	167
2.4 Le modèle plaquiste	168
2.5 Conclusion	172
3 Problématisation fonctionnaliste du mouvement des plaques chez les scientifiques actuels.	172
3.1 L'espace des contraintes construit chez les fixistes des années soixante.	173
3.2 L'espace de contraintes construit par les mobilistes des années soixante pour le problème du mouvement des plaques.	174
3.3 L'espace de contraintes du moteur du mouvement des plaques dans le cadre plaquiste par les mobilistes des années soixante.	175
4 Conclusion	177
Chapitre 8	179
Mouvement de plaques le couple « accréation subduction »	
Analyse didactique de la situation	
Introduction	180
1 Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu	180
2 La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur	180
3 Analyse didactique préliminaire de la situation	181
3.1 Un cadre « plaquiste »	181
3.2 L'équilibre lithosphérique et l'espace	182
3.3 L'explication du mécanisme pourrait exclure « le temps »	183
3.4 L'espace des contraintes pour le couple accréation subduction dans le contexte de la séance.	184
4 Conclusion	185
Chapitre 9	186
Le mouvement des plaques : couplage (accréation –subduction)	
Explication des élèves et nécessité de l'équilibre lithosphérique	
Introduction	187
1. Analyse et catégorisation des réponses des élèves au questionnaire avant la mise en œuvre de la situation de classe.	187
1.1 Analyse de la première question	187
1.2 Analyse de la troisième question	189
1.3 Récapitulation	191
2 Le recueil de données	191
2.1 Les productions écrites des élèves	192
2.2 Les transcriptions de la discussion des élèves	192
2.3 Procédure d'analyse	192
3 Analyse des productions des élèves	192
3.1 Analyse des types de dessins	192
3.1.1 Analyse du premier type de dessin	193
3.1.2 Analyse du deuxième type de dessin	194

3.1.3 Analyse du troisième type dessin	195
3.1.4 Analyse du quatrième type de dessin 4	196
3.1.5 Analyse de cinquième type de dessin	197
3.2 L'analyse de la discussion à la suite du travail des dessins	199
3.2.1 Episode argumentatif sur l'équilibre géodynamique et le couple accréation subduction dans la première classe.	199
3.2.1.1 Structure de l'épisode.	199
3.2.1.2 Analyse de l'épisode argumentatif sur l'équilibre géodynamique et le couple accréation subduction dans la première classe.	201
3.2.2 Episode argumentatif sur l'équilibre géodynamique et le couple accréation subduction dans la deuxième classe.	202
3.2.2.1 Structure de l'épisode	202
3.2.2.2 Analyse de l'épisode argumentatif sur l'équilibre géodynamique et le couple accréation subduction dans la deuxième classe	204
3.2.3 Récapitulation de l'analyse selon le mode de raisonnement adopté en vers « l'équilibre lithosphérique »	206
4 Conclusion	209
Chapitre 10	210
Les courants de convection : Moteur du mouvement des plaques	
Analyse didactique de la situation	
Introduction	211
1 Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu	211
2 La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur	211
3 Analyse didactique préliminaire de la situation	212
3.1. Un cadre « mantellique »	212
3.2 L'espace des contraintes pour les courants de convection dans le contexte de l'activité	213
4 Conclusion	215
Chapitre 11	216
Mouvement de plaques et courants de convection	
Explication des élèves et nécessité des mécanismes	
Introduction	217
1 Le recueil de données	217
1.2. Les productions écrites des élèves	217
1.3. Les transcriptions de la discussion des élèves	217
2 Procédure d'analyse	217
2.1 Analyse des productions des élèves concernant le moteur du mouvement des plaques	218
2.2 Argumentation et problématisation du moteur de la tectonique des plaques dans le débat	225
2.2.1 Episode argumentatif sur le moteur du mouvement des plaques :(courants de convection) dans la première classe	226
2.2.1.1 Structure de l'épisode	226
2.2.1.2 Analyse de l'épisode dans la première classe	228
2.2.2 Episode argumentatif sur le moteur du mouvement des plaques :(courants de convection) dans la deuxième classe	231
2.2.2.1 Structure de l'épisode	231
2.2.2.2. Analyse de l'épisode dans la deuxième classe	232

2.2.3 Récapitulation de l'analyse selon le mode de raisonnement adopté en vers « le moteur du mouvement des plaques »	232
3 Conclusion générale de la deuxième étude	235
Troisième étude	237
La reconstitution de l'histoire de la genèse d'une chaîne de collision intercontinentale (Cas de l'Atlas Tunisien)	
Chapitre 12	238
La formation d'une chaîne de marges : cas de l'Atlas Tunisien	
Introduction	239
1 La compréhension de la formation d'une chaîne de montagnes par les scientifiques actuels.	240
1.1 Les chaînes de marges	240
1.1.1 Les chaînes de subduction	240
1.1.2 Les chaînes d'obduction	241
1.1.3 Les chaînes de collision	242
1.1.3.1 Les chaînes liminaires	243
1.1.3.2 Les chaînes de collision intercontinentales	243
1.1.3.2.1 Le cas de l'Atlas tunisien	244
1.2 Les particularités des chaînes de marges dans leur relation avec le temps et l'espace	244
2 Réflexion épistémologique sur le temps dans l'histoire de la formation d'une chaîne de montagne	245
2.1 Le rapport au temps dans l'explication de la formation des chaînes de montagnes du 18 ^{ème} jusqu'au 20 ^{ème} siècle	246
2.2 Le rapport au temps dans l'explication de la formation des chaînes de montagnes à la fin du 20 ^{ème} siècle et à l'aube du 21 ^{ème} siècle	250
3 Problématisation historique actualiste : formation des chaînes de marges	252
4 Conclusion	254
Chapitre 13	255
La formation de l'Atlas Tunisien : Cadre didactique de la situation	
Introduction	256
1. Le cadre général de la situation d'apprentissage mise en jeu	256
2 La situation d'apprentissage et les objectifs du professeur	256
3 Analyse didactique préliminaire de la situation	257
3.1 L'espace des contraintes possible pour la formation de l'Atlas tunisien dans le contexte de l'activité	258
4 Conclusion	260
Chapitre 14	261
La reconstitution de l'histoire de genèse de l'Atlas Tunisien	
Explication des élèves et utilisation du temps	
Introduction	262
1 Le recueil de données	262
1.1 Analyse de la troisième question du questionnaire	262
1.2 Analyse de la sixième question du questionnaire	264
1.3 Croisement des catégories de réponses de la troisième et de la sixième question	266

2. Les productions écrites des élèves.	268
2.1 Procédure d'analyse	268
2.2 Analyse des schémas	269
2.2.1 Le bord eurasiatique	269
2.2.2 La zone de compression	272
2.2.3 Les prismes d'accrétion	275
2.2.4 La zone de subduction	276
2.2.5 Le blocage de la subduction au miocène supérieur	278
2.3 Croisement des cinq variables utilisées	280
Cas 1 : production n°17	282
Cas 2 : production n°23	284
Cas 3 : production n°24	286
Cas 4 : production n°2	288
Cas 5 : production n°16	290
Cas 6 : production n°13	292
3. Conclusion générale de la troisième étude	294
Synthèse	295
Chapitre15	
Articulation des trois études au sein d'une même théorie : Mise en perspective	
Introduction	296
1. La tectonique des plaques vue de trois angles différents	296
1.1 Du côté de l'espace : La subdivision de la surface de la terre en plaques lithosphériques	296
1.2 Du côté du fonctionnement : les courants de convection	297
1.3 Du côté du temps : la naissance d'une chaîne de collision intercontinentale : cas de l'Atlas tunisien.	297
1.4 Conclusion.	298
2. Les difficultés des élèves dans les utilisations du temps de l'espace et des mécanismes.	298
2.1 Les difficultés dans l'utilisation de l'espace	299
2.2 Les difficultés dans la construction d'un mécanisme	300
2.2.1 Le couplage accrétion subduction	300
2.2.2 Les courants de convection	301
2.3 Les difficultés dans l'utilisation du temps	301
2.4 Conclusion	301
3 L'articulation du temps à l'espace et au fonctionnement dans la compréhension de la théorie de la tectonique des plaques	303
3.1 Le choix des cas d'élèves	303
3.2. Synthèse par élève des analyses faites	303
3.2.1. Le cas de Takwa	303
3.2.2. Le cas de Housseem	305
3.2.3. Le cas de Khawla	307
3.2.4. Le cas de Maïssa	309
3.3 Analyse du tableau	313
4. Conclusion	314
Conclusion générale	315
1 Les apports de notre recherche.	315

1.1 L'identification d'obstacles à la construction de l'espace tectonique global.	315
1.2 L'identification d'obstacles à la construction du temps long qualitatif.	316
1.3 L'identification d'obstacles à la construction d'un mécanisme géologique.	316
1.4 Des conséquences de l'enseignement et l'apprentissage des Sciences de la Terre dans les programmes Tunisiens.	317
2 Limites et prolongements de notre recherche.	318
2.1 Des approfondissements à poursuivre.	318
2.2 Une ouverture à d'autres domaines de la géologie.	319
Bibliographie	320
Table des matières	327
Sommaire des annexes	335

Sommaire des annexes
(Voir volume 2)

Annexe1	La tectonique des plaques dans le programme officiel de la troisième année sciences expérimentales	3
Annexe2	Chapitre la tectonique des plaques dans le manuel scolaire de la troisième année sciences expérimentales	4
Annexe3	Le questionnaire de diagnostic (avant l'apprentissage) (Mai 2007)	32
Annexe 4	Fiche d'activité pour le travail de la répartition des faits géologiques	82
Annexe5	Productions des élèves pour l'explication de la répartition des faits géologiques (question1 de la fiche d'activité) (Mai 2008)	83
Annexe6	Productions des élèves pour l'explication de la répartition des faits géologiques (question2 de la fiche d'activité) (Mai 2008)	89
Annexe7	Productions des élèves pour l'explication de la répartition des faits géologiques (question3 de la fiche d'activité) (Mai 2008)	95
Annexe8	Discussion 1 (classe1) autour de la répartition des faits géologiques à la surface du globe (Mai 2008)	100
Annexe9	Discussion 1 (classe2) autour de la répartition des faits géologiques à la surface du globe (Mai 2008)	102
Annexe10	Productions des élèves pour le maintien de l'équilibre dynamique global (Mai 2008)	104
Annexe11	Discussion 2 (classe1) autour de l'équilibre dynamique du globe terrestre (Mai 2008)	109
Annexe12	Discussion 2 (classe2) autour de l'équilibre dynamique du globe terrestre (Mai 2008)	111
Annexe13	Productions des élèves pour le moteur du mouvement des plaques (Mai 2008)	113
Annexe14	Discussion 3 (classe1) autour du moteur du mouvement des plaques (Mai 2008)	119
Annexe15	Discussion 3 (classe2) autour du moteur du mouvement des plaques (Mai 2008)	121
Annexe16	Productions des élèves pour la reconstitution de l'histoire de l'Atlas tunisien (Mai 2008)	122

Résumé

Ce travail de recherche porte sur la problématisation dans le cadre de la tectonique des plaques. Nous cherchons à voir les différentes utilisations de l'espace au cours de la problématisation de la répartition des faits géologiques à la surface du globe, les types de mécanismes construits au cours de la problématisation du moteur du mouvement des plaques et les différentes utilisations du temps au cours de la reconstitution de la naissance de l'Atlas Tunisien. L'analyse des productions des élèves orales et écrites est faite en référence au modèle théorique de la tectonique des plaques actuellement admis et à une réflexion épistémologique sur l'histoire des sciences de la Terre. Les résultats obtenus montrent une variabilité dans les figures d'espace et du temps rencontrées chez les élèves ainsi qu'une variabilité dans la modélisation du mécanisme moteur du mouvement des plaques. Certaines difficultés sont liées au rapport qu'entretiennent les élèves avec le temps et avec l'espace. Les difficultés liées à l'espace ont une influence sur la figure de temps choisie par l'élève et sur la nature du modèle proposé pour expliquer un mécanisme et inversement. Nous retenons que la problématisation en sciences de la Terre exige l'articulation du temps, de l'espace et d'un fonctionnement. Il est difficile de problématiser un phénomène géologique dans un cadre historique sans faire appel à une figure d'espace et à un fonctionnement. Nous proposons de problématiser le contenu géologique dans un cadre spatial, historique ou fonctionnaliste en tenant compte des effets provoqués par l'interférence des utilisations du temps de l'espace et du fonctionnement pour un problème donné.

Mots clés : problématisation- temps- espace- fonctionnement- la théorie de la tectonique des plaques- espaces de contraintes- difficultés- conception- débat scientifique

The title

The problématisation in the theory of the plate tectonics and the use of the time of the space and the functioning By the Tunisian pupils of the third year experimental sciences

Abstract: This research task concerns the problematization in the context of plate tectonics. We seek to see the various uses of space during the problematization of the distribution of geological facts to the surface of the globe, the types of mechanisms built during the problematization of the engine of plate movement and the various uses of time during the reconstruction of the birth of the Tunisian Atlas. The analysis of the pupil's productions oral and written made in reference to the theoretical model of plate tectonics and a currently accepted epistemological reflection on the history of science of the Earth. The results show variability in the figures of space and time experienced by the pupil as well as variability in the modeling of the driving mechanism of plate movement. Some difficulties are bound to the relationship of pupils over time and with space. The difficulties bound to time have an influence on the shape of space chosen by the pupil and the nature of the proposed model to explain a mechanism and conversely. We hold that the problematization in Earth Sciences requires the joint of time, of space and of a functioning. It is difficult to problematize a geological phenomenon in a historical setting without using a figure of space and to a functioning. We suggest to problematize the geologic contents in a spatial, historic or functionalist frame by taking into account the effects caused by the interference of the uses of the time of the space and the functioning for a given problem.

Keywords: problematization- time- space- functioning- the theory of the plate tectonics - space of constraints- Difficulty -conception - scientific debate

Discipline : Sciences de l'éducation

UNIVERSITÉ DE NANTES

UFR *Lettres et langages*

École doctorale *Cognition, éducation, interaction*

Centre de recherches en éducation de Nantes - CREN

Chemin de la Censive-du-Tertre, BP 81227, F-44312 NANTES CEDEX 3 (France)
