



Utilisations du temps et explications en sciences de la terre par les élèves de lycée : étude dans quelques problèmes géologiques

Denise Ravachol Orange

► To cite this version:

Denise Ravachol Orange. Utilisations du temps et explications en sciences de la terre par les élèves de lycée : étude dans quelques problèmes géologiques. Education. Université de Nantes, 2003. Français. NNT : . tel-00480254

HAL Id: tel-00480254

<https://theses.hal.science/tel-00480254>

Submitted on 3 May 2010

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

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

UNIVERSITE DE NANTES
U.F.R. de Lettres et Langages

Année 2003

THESE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE NANTES
Discipline: Sciences de l'Education
présentée et soutenue publiquement

par

Denise RAVACHOL ORANGE

Le 13 mars 2003

UTILISATIONS DU TEMPS ET
EXPLICATIONS EN SCIENCES DE LA TERRE
PAR LES ELEVES DE LYCEE:
ETUDE DANS QUELQUES PROBLEMES GEOLOGIQUES

Directeur de thèse:
Michel FABRE
Co-directeur :
Gabriel GOHAU

JURY

M. Jean-Pierre ASTOLFI, Professeur, Université de ROUEN, rapporteur
M. Christian CHOPIN, Directeur de recherches, CNRS
M. Michel FABRE, Professeur, Université de NANTES
M. Gabriel GOHAU, Docteur d'Etat, Lycée Janson-de-Sailly
M. Guy RUMELHARD, Habilité à Diriger des Recherches, INRP, rapporteur

UNIVERSITE DE NANTES
U.F.R. de Lettres et Langages

Année 2003

THESE

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE NANTES
Discipline: Sciences de l'Education
présentée et soutenue publiquement

par

Denise RAVACHOL ORANGE

Le 13 mars 2003

**UTILISATIONS DU TEMPS ET
EXPLICATIONS EN SCIENCES DE LA TERRE
PAR LES ELEVES DE LYCEE:
ETUDE DANS QUELQUES PROBLEMES GEOLOGIQUES**

Directeur de thèse:
Michel FABRE
Co-directeur :
Gabriel GOHAU

JURY

M. Jean-Pierre ASTOLFI, Professeur, Université de ROUEN, rapporteur
M. Christian CHOPIN, Directeur de recherches, CNRS
M. Michel FABRE, Professeur, Université de NANTES
M. Gabriel GOHAU, Docteur d'Etat, Lycée Janson-de-Sailly
M. Guy RUMELHARD, Habilité à Diriger des Recherches, INRP, rapporteur

« Je laisse Sisyphe au bas de la montagne ! On retrouve toujours son fardeau. Mais Sisyphe enseigne la fidélité supérieure qui nie les dieux et soulève les rochers. Lui aussi juge que tout est bien. Cet univers désormais sans maître ne lui paraît ni stérile ni futile. Chacun des grains de cette pierre, chaque éclat minéral de cette montagne pleine de nuit, à lui seul, forme un monde. »

Albert CAMUS, *Le mythe de Sisyphe*

REMERCIEMENTS

Redérouler, en pensée, vingt ans d'exercice en lycée et collège et une entrée en didactique, c'est retrouver beaucoup d'élèves et comprendre la contingence de quelques rencontres importantes.

Je dois beaucoup à Michel FABRE et à Christian RIDAO, depuis l'époque où ils étaient professeurs à l'Ecole Normale de St Lô dans la Manche. N'y-a-t-il pas un heureux hasard à pouvoir participer, à la fin des années 1980, à un stage de formation continue en épistémologie, dont ils étaient les maîtres d'oeuvre? Merci à tous les deux d'avoir mis en résonance le questionnement issu de la classe et des approfondissements épistémologiques et didactiques. Merci à Michel FABRE d'avoir accepté de diriger ce travail de thèse.

Une fois « tombée en didactique », peut-on en sortir? Merci à « l'équipe de St Lô », complétée par Christian ORANGE, et au C.R.E.N., pour les discussions et les encouragements à poursuivre des recherches. Tous mes remerciements également à Jean-Pierre ASTOLFI et à Guy RUMELHARD, dont les écrits et les rencontres accompagnent mon itinéraire.

Dans ce parcours de recherche, je veux dire aussi ma gratitude aux chercheurs qui, chacun dans leur domaine, m'ont aidée à approfondir les Sciences de la Terre: Gabriel GOHAU, un maître en Histoire de la Géologie, qui a accepté de suivre mon travail de thèse et dont la réflexion est à la fois si précise et si enrichissante; Christian CHOPIN, pour des discussions qui ont contribué à me faire mieux comprendre ce que sous-tend l'acquisition d'une expertise géologique. André BRACK, André MICHARD et Xavier LE PICHON enfin, qui m'ont permis de me retrouver au plus près des préoccupations de la communauté scientifique actuelle: merci pour le temps qu'ils m'ont accordé et pour la relecture des transcriptions ou du compte rendu des entretiens.

Sans eux, mon mémoire n'aurait pas existé: il me faut remercier de façon appuyée tous les élèves avec qui nous avons fait des Sciences de la Terre, au lycée Le Brun de Coutances et au lycée Camus de Nantes. Je leur dois ce questionnement et cette réflexion sur les savoirs et les apprentissages, qui accompagnent le professeur et enrichissent le didacticien.

Mes remerciements vont enfin aux collègues qui m'ont « prêté » leurs classes afin que je complète mon corpus de données: Marie-Hélène LE GUILLOIS, professeur de SVT au lycée Le Brun de Coutances et Monique MICHAUD, professeur de SVT au lycée Lesage de Vannes, ainsi que leurs élèves; ils vont également à Mmes et MM. les proviseurs des lycées Le Brun de Coutances et Camus de Nantes qui ont toujours facilité ces recherches. Je dis ma reconnaissance à l'IUFM des Pays de la Loire et à l'INRP pour m'avoir aidée à faire aboutir ce travail.

SOMMAIRE

Sommaire	5
Sommaire des annexes	9
Introduction générale	11
 FONDEMENTS THEORIQUES	 15
 Chapitre 1. Les Sciences de la Terre, sciences fonctionnalistes et sciences historiques	 17
1. Géologie et Sciences de la Terre	17
2. Les Sciences de la Terre, entre sciences fonctionnalistes et sciences historiques	20
3. Les problèmes des sciences de la Terre fonctionnalistes et des sciences de la Terre historiques	24
4. Quelques figures du temps en Sciences de la Terre	26
5. Conclusion	35
 Chapitre 2. L'actualisme, lien entre Sciences de la Terre fonctionnalistes et Sciences de la Terre historiques	 37
1. Les reconstitutions du passé de la Terre dans l'histoire de la géologie	37
2. L'approche historique et les traces	40
3. L'uniformitarisme (ou actualisme) méthodologique	43
4. Uniformité des causes géologiques, et stationnarisme (steady state) du globe	47
5. Uniformité des causes géologiques et directionnalisme	50
6. Conclusion	55
 Chapitre 3. Problème, explication et temps en Sciences de la Terre	 59
1. La place de l'explication en sciences	59
2. Explication et modélisation	60
3. Explication et modélisation dans les sciences historiques	67
4. Problématisation dans les sciences de la Terre	72
5. Conclusion	79
 Chapitre 4. Les problèmes géologiques étudiés	 81
1. La complexité du temps en Sciences de la Terre	81
2. Les problèmes géologiques choisis	82
3. Méthodologie d'étude	84

PREMIERE ETUDE
LA RECONSTITUTION DU PASSE D'UN OCEAN
ET LE FONCTIONNEMENT DE LA ZONE D'UNE DORSALE
L'actuel extrapolé et la mise à l'écart du temps

Chapitre 5. Le fonctionnement d'un océan: un état du savoir	91
1. Les grands ensembles océaniques et leur signification géologique	91
2. La complexité géologique des fonds océaniques	93
3. Caractéristiques comparées de la sédimentation et de l'expansion	95
4. Quelques éléments d'histoire des sciences	97
5. Mobilisation de l'actualisme par les chercheurs actuels	100
6. Problématisation du fonctionnement des fonds océaniques par les géologues et les géophysiciens	106
7. Conclusion	111
Chapitre 6. Le passé d'un océan: analyse didactique a priori des situations	113
1. Le contexte général des situations de classe mises en place	113
2. Les situations de classe et les intentions du professeur	117
3. Analyse didactique a priori de la situation	118
4. Conclusion	121
Chapitre 7. Le passé d'un océan: explications des élèves et utilisation du temps	123
1. Le corpus de données	123
2. La compréhension par les élèves des processus de dérive/accrétion	125
3. La compréhension par les élèves de la sédimentation océanique	139
4. Conclusion	153
Chapitre 8. L'évolution de la zone d'une dorsale: analyse didactique a priori des situations	157
1. Le contexte général de la situation de classe mise en place	157
2. La situation de classe et les intentions du professeur.	157
3. Analyse didactique a priori de la situation	160
4. Conclusion	164
Chapitre 9. L'évolution de la zone d'une dorsale: explications des élèves et utilisation du temps	165
1. Le corpus de données	165
2. Analyse des réponses écrites des élèves	167
3. Etude des transcriptions de la confrontation des deux grands types de modèles d'élèves	179
4. Conclusion	181

DEUXIEME ETUDE	183
LE PROBLEME DES OPHIOLITES	
Actualisme de deuxième niveau et construction du temps long	
Chapitre 10. La mise en place des ophiolites: un état du savoir	185
1. La compréhension des ophiolites par les géologues actuels	185
2. Quelques éléments d'histoire des sciences	189
3. Mobilisation de l'actualisme par les chercheurs actuels	191
4. Problématisation la mise en place des ophiolites par les chercheurs actuels	194
5. Conclusion	200
Chapitre 11. La mise en place des ophiolites: analyse didactique a priori des situations	201
1. Le contexte général des situations mises en place	201
2. Les situations de classe et les intentions du professeur	203
3. Analyse didactique a priori des situations	205
4. Inventaire des contraintes empiriques disponibles, actualisme et problématisation.	209
5. Conclusion.	210
Chapitre 12. La mise en place des ophiolites: explication des élèves et utilisation du temps	211
1. Le corpus de productions d'élèves	211
2. Analyse des réponses écrites des élèves de la classe de Première S 98/99	212
3. Analyse des réponses écrites des élèves de la classe de Première S 99/00	227
4. Analyse des réponses écrites des élèves de la classe de Première S 2001/02	233
5. Conclusion	241
TROISIEME ETUDE	245
LE PROBLEME DE L'ORIGINE DE LA VIE SUR LA TERRE	
Evènement ou phénomène?	
Chapitre 13. L'origine de la vie sur la Terre: un état du savoir	247
1. La compréhension du problème de l'origine de la vie par les chercheurs actuels	247
2. Quelques éléments d'histoire des sciences	259
3. Mobilisation de l'actualisme par les chercheurs actuels	265
4. La construction du problème de l'origine de la vie par les scientifiques actuels	274
5. Conclusion	277
Chapitre 14. L'origine de la vie: explications des élèves et utilisations du temps	281
1. Le contexte général des situations mises en place	281
2. Premier type d'approche: ce qui explique l'existence de la vie sur la Terre.	284
3. Deuxième type d'approche: une entrée directe dans l'origine de la vie	290
4. Troisième type d'approche: l'origine des animaux et des végétaux	304

5. Quatrième type d'approche: la problématisation de l'origine de la vie	309
6. Conclusion	322

SYNTHESE 325

Chapitre 15. Mise en perspective et comparaison des trois études 327

1. Diversité des problèmes du point de vue de l'utilisation du temps	327
2. Les difficultés des élèves	330
3. Diversité et décalages dans les utilisations du temps : trois études de cas	333
4. Conclusion	339

Conclusion générale 341

1. Les apports de notre recherche	341
2. Limites et prolongements de notre recherche	342

Bibliographie 345

SOMMAIRE des ANNEXES

(voir second volume)

ANNEXE 1	Transcription de l'entretien avec Xavier LE PICHON (12/12/01)	4
ANNEXE 2	Compte rendu de l'entretien avec André MICHARD (06/02/01)	25
ANNEXE 3	Trancrption de l'entretien avec André BRACK (01/02/01)	31
ANNEXE 4	Entretien particulier avec Donia et Romain (1ère S, 1999/00)	59
ANNEXE 5	Productions écrites de Donia (1ère S, 1999/00, accrétion/dérive)	63
ANNEXE 6	Transcription de la confrontation des modèles des élèves (1ère S, 1999/00, sédimentation océanique)	64
ANNEXE 7	Productions écrites de 4 élèves (Milad, Julien P., Richard, Maria: 1ère S 99/00, sédimentation océanique)	74
ANNEXE 8	Coupe transversale de la zone d'une dorsale annotée (1 ^{ère} S, évolution de la zone d'une dorsale)	79
ANNEXE 9	Quelques productions d'élèves (1 ^{ère} S, 1995/96, évolution de la zone d'une dorsale)	80
ANNEXE 10	Transcription de la confrontation des modèles des élèves (1ère S, 1999/00, évolution de la zone d'une dorsale)	86
ANNEXE 11	Enoncés portant sur la mise en place des ophiolites (1 ^{ère} S, 1999/00 et 2001/02)	95
ANNEXE 12	- Quelques productions d'élèves (1 ^{ère} S, 1998/99, mise en place des ophiolites) - Deux types de modèles "tectoniques" d'élèves (1 ^{ère} S, 1999/00, mise en place des ophiolites)	97
ANNEXE 13	Transcription de la confrontation des modèles des élèves (1ère S, 1999/00, mise en place des ophiolites)	111

ANNEXE 14	Quelques productions d'élèves portant sur le problème de l'origine de la vie (Seconde et Terminale S)	127
ANNEXE 15	Transcription de l'entretien avec Vincent et Sophie (05/04/00) et production écrite de ces élèves (Terminale S, 1999/00)	141
ANNEXE 16	Transcription de l'entretien avec Kévin et Gaël (05/04/00) et production écrite de ces élèves (Terminale S, 1999/00)	156
ANNEXE 17	Transcription de l'entretien avec Céline et Caroline (14/09/99) et production écrite de ces élèves (Seconde, 1999/00)	172
ANNEXE 18	Productions d'élèves ayant participé, sur deux ans, aux situations étudiées	187

INTRODUCTION GENERALE

Il y a généralement accord pour dire que le temps est un concept fondamental des sciences de la Terre. Mais en disant cela on en reste souvent aux problèmes de mesures du temps géologique, de repérage et de situation dans le temps d'évènements ou de phénomènes, ou de représentation de l'immensité des temps géologiques.

C'est ce que font par exemple les programmes d'enseignement qui mettent l'accent sur le temps dans ses aspects chronologiques et de durée, en l'instituant comme un concept fédérateur des sciences de la vie et de la Terre (M.E.N. 2001, p.4) dont l'étude est axée sur la datation et la durée d'évènements ou de phénomènes géologiques majeurs donnés :

"Comprendre l'évolution biologique et géologique de la planète requiert la capacité d'identifier des moments remarquables dans l'histoire de la Terre, de les ordonner, d'évaluer leur âge et de mesurer les durées qui les séparent".

Pour importants que sont ces aspects, ils ne prennent en compte qu'une partie des relations entre temps et sciences de la Terre. C'est ce qui apparaît dans les analyses historiques, épistémologiques (Gould, 1990 ; Gohau, 1995a) et didactiques (Ravachol-Orange, 1997). Et cela mérite une étude didactique précise si l'on veut comprendre les difficultés rencontrées par les lycéens dans la compréhension de certains problèmes géologiques.

Précisons un peu. La compréhension du temps, qui n'est pas innée chez l'homme, se construit au cours de l'évolution psychique de l'enfant (Piaget). Elle va avec sa conquête motrice de l'espace et l'acquisition de structures logiques. C'est peu à peu que le temps comme l'espace et les objets s'élaborent comme des invariants. La forme de pensée que Piaget appelle la "compréhension" du temps représenterait le stade où l'esprit est capable d'une "conduite de récit" complète (Piaget, 1946 ; Bachelet, 1996, p. 98). Compte tenu de leur âge, les élèves de lycée maîtrisent non seulement l'ordination d'évènements, leur succession ou leur synchronicité mais également la notion d'intervalles temporels (autrement dit la notion de durées) et leurs emboîtements éventuels, et ils sont capables de les relier en une structure d'ensemble. Il serait alors paradoxal de pointer les difficultés des lycéens avec le temps si on s'en tient à la chronologie et à la durée quand on peut penser qu'ils ont acquis une compréhension commune du temps.

Mais on est en droit de se demander si le "temps géologique" est une forme du "temps commun". Faut-il voir seulement dans les difficultés des élèves des problèmes de chronologie ou d'appréhension des grandes durées ? Il semble que non. Nous l'avons montré, dans une recherche antérieure (D. Ravachol-Orange, 1997) qui représentait une première étude des utilisations du temps par les lycéens. Par des investigations épistémologiques et didactiques, nous avons identifié, dans plusieurs domaines, des décalages d'utilisation du temps entre les chercheurs et les lycéens. Nous avons fait ressortir des éléments qui aident à comprendre, sinon à expliquer complètement, l'existence de ces décalages : la multiplicité et la complexité des formes du temps en géologie, qui vont au delà de la chronologie et la durée ; l'importance des conceptions sous-jacentes des élèves qui peuvent faire obstacle à l'appropriation de

certaines formes du temps. L'objet de ce travail est de prolonger et d'approfondir cette recherche.

Devant la multiplicité et la complexité des formes du temps pour lesquelles nous avons déjà quelques repères, notre travail didactique ne peut pas porter sur un seul domaine et encore moins un seul problème de géologie. Nous ne pouvons pas d'autre part prétendre faire porter notre étude sur l'ensemble des sciences de la Terre. Nous avons donc choisi de nous intéresser à un nombre limité de problèmes qui présentent a priori une diversité dans l'utilisation du temps et qui font ou ont fait partie des programmes français de lycée :

- le problème de la reconstitution du passé d'un océan ;
- le problème de l'évolution de la zone d'une dorsale océanique ;
- le problème de la formation et de la mise en place des ophiolites ;
- le problème de l'origine de la vie.

Volontairement certains de ces problèmes relèvent plutôt d'une géologie historique et d'autres d'une géologie fonctionnaliste (voir notre chapitre 1).

Notre cadre théorique est celui de la didactique des sciences (Astolfi & Develay, 1989 ; Johsua, Dupin, 1993). D'où l'importance que nous donnons aux conceptions (représentations) des élèves, vues *"sur le mode d'une structure conceptuelle construite, qu'il faut connaître afin de mieux transformer"* (Astolfi, 1992) ; d'où l'intérêt que nous portons à l'histoire des Sciences (Martinand, 1993 ; Gohau, 1995a) et aux types de raisonnement (Viennot, 1996 ; Orange C, Orange D., 1995). Nous complétons maintenant ce cadre par celui de la problématisation (Fabre, Orange C., 1997 ; Orange C., 2000), dans lequel les savoirs scientifiques sont des savoirs raisonnés intimement liés à la construction de problèmes explicatifs. Ainsi, les sciences ne sont à voir ni comme une accumulation de faits rendant l'explication du monde de plus en plus complète et limpide, ni comme un ensemble de lois démontrées mais plutôt comme une construction, en rupture avec la connaissance commune, de savoirs ayant une certaine part d'apodicticité (Bachelard, 1938, 1949).

Astolfi (1993) a défini trois paradigmes pour les recherches en didactique des sciences : les recherches de faisabilité, les recherches de signification et les recherches de régularités. Notre étude est une recherche de signification. Elle analyse des séquences didactiques pour en déterminer la cohérence et le sens qu'elles prennent tant pour l'expert que pour l'élève. C'est une recherche interprétative. *"Ce qui caractérise peut-être les recherches interprétatives c'est qu'elles ne disposent que de la seule émergence possible d'un sens à construire, comme résultat prévisible de recherche"* écrit J.-P. Astolfi (1993, p. 11) et il poursuit en précisant qu'elles *"cherchent à rendre compte de la complexité de situations didactiques singulières"*.

Ce travail cherche à comprendre des productions d'élèves de différents niveaux du lycée (seconde, première S et terminale S) pour cerner les rapports au temps qu'elles expriment. Le nombre de productions-élèves que nous considérons fait que nous sommes sur des études de cas. C'est avant tout une recherche qualitative.

Pour mener à bien cette étude, notre mémoire comprend une première partie où, après avoir présenté, dans le chapitre 1, les tensions constitutives de la géologie, entre un pôle fonctionnaliste et un pôle historique, nous nous engageons dans des approfondissements théoriques visant à mieux comprendre comment, dans leur rapport au temps, elle dépasse ces tensions. Cela nous conduit à interroger l'actualisme (chapitre 2) et les formes d'explication en sciences de la Terre (chapitre 3). Nous plaçons nos réflexions sur l'explication dans le cadre de la modélisation et de la problématisation. Cette première partie permet d'entrer dans les

domaines géologiques choisis selon deux angles d'approche : l'actualisme et la problématisation.

La seconde partie est consacrée à l'étude didactique des problèmes retenus, du point de vue essentiel de l'utilisation du temps. Chaque problème fait d'abord l'objet d'une analyse épistémologique puis vient l'étude didactique proprement dite des productions d'élèves (productions écrites, confrontations de groupes, entretiens particuliers).

Cette seconde partie se termine par un chapitre qui tente une mise en perspective des apports de ces études de cas pour ce qui est des utilisations du temps par les élèves.

FONDEMENTS THEORIQUES

Chapitre 1

LES SCIENCES DE LA TERRE, SCIENCES FONCTIONNALISTES ET SCIENCES HISTORIQUES

Sommaire

- 1. Géologie et Sciences de la Terre**
- 2. Les Sciences de la Terre, entre sciences fonctionnalistes et sciences historiques**
- 3. Les problèmes des sciences de la Terre fonctionnalistes et des sciences de la Terre historiques**
- 4. Quelques figures du temps en Sciences de la Terre**
- 5. Conclusion**

Notre recherche est un travail de didactique des sciences de la Terre. Elle doit prendre en compte la spécificité des problèmes et des savoirs construits dans ce champ disciplinaire, aussi bien du point de vue épistémologique que du point de vue des apprentissages. Le but de ce chapitre est de poser les premiers éléments de cette étude en partant d'une caractéristique essentielle des Sciences de la Terre: leur définition comme sciences historiques mais aussi, pour une part, comme sciences fonctionnalistes.

1. Géologie et Sciences de la Terre

1.1. Regard sur l'évolution récente d'une discipline d'enseignement au lycée

Les sciences de la Terre ne forment pas une entité isolée et homogène dans les sciences de la nature. Leur histoire et leurs objets d'étude montrent combien elles forment un ensemble complexe de spécialités et combien elles s'articulent aux autres sciences de la nature (biologie mais aussi sciences physiques et chimie) (C. Orange, D. Orange, 1995). Cela se traduit en particulier par les péripéties récentes qu'elles ont vécues en tant que discipline d'enseignement au lycée. C'est à partir des programmes de 1992 que la géologie prend la dénomination de sciences de la Terre. Elle est toujours associée à la biologie, devenue sciences de la vie, dans un ensemble appelé Sciences de la vie et de la Terre (SVT). Auparavant, ces deux disciplines (géologie et biologie) ont formé les "sciences naturelles" puis des "sciences et techniques biologiques et géologiques" (1987). Il faut voir dans ces changements terminologiques l'expression des *"profonds renouvellements théoriques que les dernières décennies ont apportés : notamment, la biologie moléculaire et la tectonique des plaques"* (G. Chevalier, 1992, p. 144). Et dans le maintien de leur couplage depuis 1992 le résultat de réflexions et de débats qui ont envisagé leur séparation. N'a-t-on pas en effet pensé intégrer la géologie dans un champ disciplinaire plus vaste : les Sciences de la Terre et de l'Univers (STU) ? De ces changements, les sciences de la Terre y ont gagné de la reconnaissance au lycée, puisqu'elles sont présentes à tous les niveaux (Seconde, Première S, Terminale S des programmes de 1992

et programmes 1999/2000/2001) et qu'elles figurent depuis 1994 dans l'épreuve de SVT du baccalauréat scientifique.

1.2. De la Géologie comme une science

La géologie en tant que sciences commence avec les dernières années du 18^e siècle (Gohau, 1987, p. 13) et on assiste à sa "*grande éclosion*" au début du 19^e siècle (Ellenberger, 1994, p. 294). C'est à cette époque qu'une véritable communauté scientifique se constitue, échange, discute, confronte des points de vue. Les travaux antérieurs étaient des oeuvres individuelles (des "théories de la Terre") et portaient davantage sur l'explication de la formation de la Terre quand la géologie naissante s'intéresse à l'histoire de la Terre : "*Un mot nouveau, géologie, va désigner l'entreprise commune à tous ceux qui s'intéressent au passé de la terre*" (Gohau, 1987, p. 8). C'est dire que la géologie s'érige fondamentalement comme une science historique : son objet d'étude est la planète Terre, prise comme un objet historique, puisque l'accent est mis sur la reconstitution de son passé. Mais ce n'est pas la seule préoccupation de cette science. Gohau (1987, p. 7 ; 1997) précise que "*La géologie a pour objectif d'étudier à la fois les phénomènes se produisant actuellement à la surface de la terre, ou dans ses parties superficielles, et l'histoire de notre globe. La première étude forme la géologie dynamique et la seconde la géologie historique*" (1997, p. 140). La géologie n'est donc pas seulement une science historique mais également une science "dynamique" - nous pourrions dire aussi fonctionnelle ou fonctionnaliste - et ces deux dimensions sont indissociables¹. On comprend que cette dualité va interroger notre projet sur l'utilisation du temps dans les explications.

1.3. De la Géologie aux Sciences de la Terre²

Notre recherche nous a conduit à rencontrer trois chercheurs spécialistes chacun d'un des domaines pris en compte dans les programmes de lycée et sur lequel porte notre réflexion. La spécialité qu'ils revendiquent rend compte des interactions qu'établit avec profit la géologie avec d'autres sciences. Le Professeur A. Brack, qui travaille sur l'origine de la vie, est chimiste de formation. Le Professeur Xavier Le Pichon, qui a contribué à la formulation et au développement de la théorie de la tectonique des plaques, est un physicien passé à la géophysique (Hallam, 1976, p. 102). Enfin, le Professeur A. Michard, dont les travaux portent notamment sur les ophiolites, se qualifie de tectonicien. Si nous prenons la géologie dans son acception classique (Gohau, 1987, 1997 ; Foucault, Raoult, 1980, 2001), seul A. Michard a le statut de géologue. Et pourtant tous ces chercheurs s'intéressent au système Terre, dans ses aspects fonctionnalistes et/ ou historiques. C'est qu'une mutation radicale, en rapport avec la bascule de la communauté scientifique dans le paradigme de la tectonique des plaques et avec la diversification et la sophistication des techniques d'investigation (radiochronologie, paléomagnétisme, sismique réflexion et sismique réfraction, ...), a concerné ces sciences depuis les années 1960. L'étude de la Terre a non seulement pris une dimension planétaire et extraplanétaire, mais elle fait interagir des spécialités autrefois davantage séparées, et elle ne peut plus faire l'économie de recherches couplant le fonctionnement des différents compartiments de la planète (partie superficielle/ partie profonde ; hydrosphère/ atmosphère ; hydrosphère/ lithosphère,...). Comme l'écrivent R. Demounem et J.P. Astolfi, lorsqu'ils s'intéressent à l'évolution du savoir universitaire en la matière : "*La géologie cède la place aux sciences de la Terre. Ce changement d'appellation correspond à la fois à une évolution des concepts et à une évolution des techniques*" (1996, p. 16).

¹ Pour une étude de cette tension, voir aussi R. Laudan (1982, pp.7-13).

² On emploie aussi le terme de Géosciences.

Il n'en reste pas moins que, si la géologie change, elle cherche toujours à préserver une certaine identité. Les propos de X. Le Pichon en témoignent³. Ce chercheur étudie principalement les déplacements et les déformations des plaques. Son champ de recherche appartient à la géologie, et plus précisément à la géologie fonctionnaliste puisqu'il s'intéresse à des modèles de fonctionnement actuel de la partie superficielle de la Terre. D'ailleurs, la chaire qu'il occupe au Collège de France en a le label : il s'agit d'une chaire de géodynamique. Pourtant X. Le Pichon n'est pas forcément considéré par ses pairs comme un géologue. Quand nous lui demandons s'il se qualifie de géophysicien, de géologue ou d'historien (DO, 253)⁴, il répond : *"Les géophysiciens disent que je suis géologue et les géologues disent que je suis géophysicien"* (XLP, 254). Ses propos (XLP, 256) éclairent sur la difficulté qu'ont ses pairs géologues ou géophysiciens de le faire appartenir à leur communauté, sans toutefois l'exclure. Il y a sa polyvalence *"... j'ai toujours fonctionné depuis mon début en m'intéressant un peu à toutes les disciplines"*, qu'il décrit dans ses avantages *"... ça a un avantage, c'est que vous avez une culture très large et vous comprenez à peu près ce qui se fait dans l'ensemble des disciplines"* et dans ses limites *"Ca a un inconvénient, c'est que vous n'êtes pas ultra-spécialisé dans un domaine particulier"*. Pourtant X. Le Pichon dit avoir une spécialité forte *"sur tout ce qui touche la tectonique des plaques, et plus particulièrement l'aspect cinématique, c'est-à-dire tout ce qui touche les déplacements et les déformations liés à la tectonique des plaques"*. A mettre en regard ce qu'il dit de son expertise et les réticences qu'ont les géologues à le reconnaître comme un des leurs, nous trouvons d'autres éléments d'explication. Voici ce qui, selon lui, perturbe les sciences de la Terre : *"Ce qui dérange dans les sciences de la Terre à l'heure actuelle, c'est qu'on utilise toutes les disciplines physiques et chimiques"*. L'identité de la géologie n'est-elle pas affectée par la prise d'importance d'un pôle physique-chimique et mathématique plus marqué ? Ce n'est pas sans rappeler un des effets de la mathématisation des divers domaines des sciences physiques, entre le 17^e et le 18^e siècle : une recomposition de la communauté scientifique, notamment par une marginalisation souvent mal vécue de certains de ses membres (Gingras, 2001). Pour ce qui est de la géologie historique, X. Le Pichon précise qu'il n'en fait pas (XLP, 260). Et pourtant ? Si nous nous intéressons à ses travaux, nous constatons qu'il considère ses objets d'étude (les plaques et leurs déplacements) sur une durée qui dépasse la perception humaine (plusieurs millions d'années). Certes, il affirme qu'il s'intéresse avant tout aux processus actuels (XLP, 262 et 264) et que ça ne l'a jamais intéressé de reconstituer l'histoire d'un bassin océanique (XLP, 262). Mais il n'en demeure pas moins qu'il extrapole ce fonctionnement actuel au passé. Un exemple se trouve dans l'étude comparée des mouvements des plaques mesurés par la géodésie satellitaire sur quelques années et ceux mesurés par le taux d'expansion au fond des océans sur 3, 5 millions d'années (Le Pichon, 2002, p. 72). La corrélation donne quasiment une droite, ce qui veut dire qu'elle est presque parfaite. N'est-on pas là sur une rencontre de la géologie fonctionnaliste et de la géologie historique, dans une nécessaire liaison et une légitimation réciproque ?

³ Nous prenons l'exemple de X. Le Pichon mais le cas d'A. Brack, chimiste de formation, aurait pu également être développé.

⁴ (DO, 253) ou encore (XLP, 254) renvoient à l'entretien que nous avons eu avec X. Le Pichon le 12 décembre 2001. La transcription de cet entretien figure dans l'annexe 1. Les initiales signalent celui qui parle : DO pour Denise Orange; XLP pour Xavier Le Pichon. Le nombre correspond au numéro de l'intervention dans l'entretien.

1.4. Conclusion

En résumé, la géologie actuelle étend nécessairement son champ d'investigation (de la surface de la Terre à la Terre entière et aux systèmes extra-terrestres), la palette des disciplines qui la composent (elle ajoute par exemple la géophysique et la géochimie à la pétrologie, la sédimentologie, la tectonique, la paléontologie etc.) et les connexions entre la géologie fonctionnelle et la géologie historique. Le qualificatif de Sciences de la Terre prend à nouveau tout son sens, même si, dans le même temps, on assiste d'une part à l'exclusion ou à la marginalisation de certaines approches (ainsi en est-il d'une certaine géologie régionale ou de la paléontologie) ou de certaines personnes, et d'autre part à une ouverture sur une partie des sciences de l'univers. Dans la suite de notre travail Sciences de la Terre et Géologie seront considérées comme des synonymes.

2. Les Sciences de la Terre, entre sciences fonctionnalistes et sciences historiques

2.1. Les sciences de la vie et de la Terre, entre fonctionnement et histoire

La géologie se définit dans une tension entre un pôle fonctionnaliste et un pôle historique. Comme, selon E. Mayr (1989, p. 77-78), un des grands biologistes évolutionnistes du 20^e siècle, il en est de même de la biologie, il paraît intéressant de pousser la comparaison entre ces deux champs disciplinaires.

- E. Mayr écrit que la biologie "*est diverse et hétérogène*" (1989, p. 76) et qu'au cours de son histoire, les phénomènes biologiques ont été rangés dans deux grands types de subdivisions : il y eut, pendant des centaines d'années, la médecine (physiologie) et l'histoire naturelle et plus récemment, un découpage en subdivisions nommées zoologie, botanique, mycologie etc. Un parallèle peut d'emblée être établi avec la géologie. Car dans son acception actuelle, la géologie est plurielle et nous trouvons plusieurs façons d'en rendre compte : il est possible de la subdiviser en géologie dynamique et géotectonique et en géologie historique, "*plus pour souligner une manière d'envisager les problèmes, que pour désigner une section particulière de la science géologique*", (Foucault, Raoult, 2001, p. 151) ; mais on peut également la caractériser comme un ensemble de disciplines : pétrologie, sédimentologie, géochimie, stratigraphie, tectonique, paléontologie, géomorphologie.

- E. Mayr dit la pertinence de subdiviser la biologie en sciences physiologiques (au sens large⁵) et en histoire naturelle. Et il précise : les sciences physiologiques s'occupent du fonctionnement de l'organisme et de ses parties ; elles tentent de comprendre "*le mode d'action des éléments structuraux et leurs interactions, des molécules jusqu'aux organes et aux organismes entiers*" (Mayr, 1989, p. 78). Les sciences physiologiques sont ainsi des **sciences fonctionnalistes**. Quant à l'histoire naturelle, elle tente de comprendre l'organisme comme produit d'une histoire évolutive. L'histoire naturelle aujourd'hui est la biologie évolutionniste, dont certains biologistes (Haeckel par exemple) font **une science historique**. Il paraît possible de faire cette distinction dans les sciences de la Terre car la géologie dynamique se préoccupe du fonctionnement actuel du système Terre ou de ses parties tandis que la géologie historique reconstitue l'évolution de cet objet depuis sa formation. Mais il reste des interrogations sur le sens d'une frontière entre ces deux champs. G.Gohau (1997, p.

⁵ En intégrant l'écologie. Le fonctionnement est étudié au niveau de l'organisme. L'évolution se comprend au niveau de l'espèce dans un contexte environnemental.

140) ne dit-il pas que la géologie étudie **à la fois** le fonctionnement actuel de la Terre et de son histoire ? Et ailleurs, en se référant à W. Whewell, géologue et logicien du 19^e siècle, ne la rapproche-t-il pas de l'histoire, quand il écrit qu'*"elle (la géologie) est une science historique, ou une science "palétiologique" (Gohau, 1987, p. 11 ; 1997, p. 141) ?* Tout comme le paléontologue Gould (1999, p. 62), qui range résolument la géologie dans les sciences historiques, ainsi que la science de l'évolution et la cosmologie (1991, pp. 307-308 ; 1999, p. 62).

- E. Mayr souligne aussi la nécessaire articulation entre les deux types de biologie : *"Il n'y a guère de structure ou de fonction d'un organisme qui puisse être comprise, si on ne l'étudie pas dans un contexte historique"* (Mayr, 1989, p. 78). Les questions du type "Comment ?" (Comment tel élément de l'organisme fonctionne-t-il ? Comment telle chose produit-elle un effet ?) de la biologie fonctionnaliste vont avec les questions du type "pourquoi ?" (Pourquoi un tel organisme ? Pourquoi telle fonction ? Pourquoi telle adaptation ?) de la biologie évolutionniste. Chaque phénomène en rapport avec le fonctionnement d'un être vivant n'est pas absolu, déconnecté du temps et de l'espace. Il en est de même des phénomènes géologiques : la Terre actuelle porte le fardeau de son histoire. Gohau (1987, p. 11) prévient bien, pour la géologie, des problèmes d'une rencontre de la science (qui *"a ses régularités, qu'on traduit par des lois"*) et de l'histoire (qui *"a ses évènements qu'elle recherche dans les archives"*).

- E. Mayr distingue les deux biologies par des types différents de causes auxquels sont assujettis les organismes :

* la biologie fonctionnaliste s'intéresse aux *"causes proximales"* des phénomènes biologiques, celles qui expliquent comment marche l'organisme et comment il se développe.

* la biologie évolutionniste prend en compte les *"causes ultimes (évolutives ou historiques)"* des phénomènes biologiques, celles qui expliquent pourquoi un organisme est comme il est maintenant. Ainsi le passé est la clé du présent et le présent est le produit d'une histoire.

A la croisée de ces causes, et donc à la rencontre des deux biologies, il y a le programme génétique : *"Les causes proximales ont à voir avec le décodage du programme d'un individu donné ; les causes ultimes (évolutives) concernent les changements du programme génétique au cours du temps, et les raisons de ces changements "* (Mayr, 1989, p. 77-78). Le programme génétique des êtres vivants est responsable de leur fonctionnement, mais il est aussi le produit d'une histoire en termes d'évolution darwinienne : il peut donc subir la double investigation, celle de la biologie fonctionnaliste et celle de la biologie historique. Sur cet aspect, la géologie se démarque car, si la Terre ou ses parties fonctionnent et évoluent, elles ne le font pas dans un contexte de procréation ni de sélection naturelle. Mais on peut s'interroger sur la notion de "cause". Le philosophe Gayon (1993) montre que, dans la tension de la biologie entre loi et histoire, il est difficile de reconnaître d'authentiques lois déterministes et que les sciences biologiques se contentent souvent d'un concept affaibli de la cause (Gayon, 1993, pp. 41-42). Qu'en est-il des sciences de la Terre ?

- E. Mayr envisage les méthodes de recherche des deux biologies : si la biologie fonctionnaliste tente d'isoler ses objets d'étude, d'en contrôler toutes les variables et de mettre en expérience l'étude de leur fonctionnement (ce qui la rapproche des démarches des sciences physico-chimiques), il n'en est pas de même de la biologie évolutionniste où *"presque tous les phénomènes et processus sont expliqués grâce à des inférences tirées d'études comparatives"* fondées sur des descriptions détaillées (1989, pp 78-79). La géologie porte-t-elle ces tensions méthodologiques ? Oui, selon le paléontologue Gould, qui rejoint le biologiste évolutionniste Mayr quand il caractérise la géologie et la science de l'évolution, comme des sciences

historiques. Gould (1991, p. 309 ; 1999, p. 62) dit la tendance à considérer ces sciences comme "molles" ou "simplement descriptives" par opposition aux "sciences dures" ou "sciences rigoureusement expérimentales" auxquelles appartiendraient les sciences physiques. Et il souligne le fait qu'il est difficile de ramener des événements complexes et souvent uniques d'un récit à une simple mise en scène expérimentale soumise aux seules lois de la nature (Gould donne l'exemple de la disparition des dinosaures ; Gould, 1991, p. 308). Les sciences historiques comme la géologie recourent *"à un mode différent d'explication, fondé sur la comparaison et l'observation d'abondantes données"* (Gould, 1991, p. 311). C'est ce que dit aussi Mayr pour la biologie évolutive. Les oppositions "sciences molles/ sciences dures", ou encore celle de "Sciences de terrain/ Sciences de laboratoire" (Stengers, 1995, p. 58), si elles sont discutables pour une mise en catégories tranchée des sciences de la nature, présentent l'intérêt d'interroger leurs méthodes, leurs types d'explication et l'utilisation du temps qu'elles font : un "réel d'archives de terrains" (roches, fossiles, affleurements, ...) porte nécessairement la marque du temps et de l'espace, un "réel de laboratoire" (expériences Pression/ Température, analyses de roches en termes d'oxydes ...), par construction, tente de s'affranchir de ces caractéristiques spatiales et temporelles (Ravachol-Orange D., 1997 ; Orange C., dir., 1998).

Nous retenons de cette comparaison entre biologie et géologie que ces sciences comportent un pôle fonctionnaliste à un pôle historique, qu'elles articulent nécessairement, ce qui n'est pas sans leur poser problème. Mais le parallélisme interroge sur ce qui est à la croisée des deux sortes de géologie. Contrairement aux êtres vivants, la Terre n'est pas "héritière" d'un "programme génétique". En revanche, elle porte une partie des traces de son passé (fossiles, structures, minéraux, ...). G. Gohau donne une piste quand il écrit que l'élément de liaison entre la géologie dynamique et la géologie historique est *"un principe dit "principe des causes actuelles", qui affirme que le présent est la clef du passé⁶, ou que 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"* (Gohau, 1997, p. 140). Nous approfondirons cette piste dans le chapitre 2 de notre travail.

2.2. Des lois de la nature et des causes

Dans la tension de la biologie comme de la géologie entre sciences fonctionnalistes et sciences historiques, il semble qu'il faut préciser ce que l'on entend par "lois", notion hautement polysémique et lourde de contenu philosophique (Rumelhard, 1986, pp. 62-65), et dont la physique newtonienne a contribué à faire un modèle idéal d'énoncés de relations, universels dans le temps et l'espace ; et aussi la notion polysémique de "causes". Pour la biologie, Mayr fait intervenir les "causes proximales" et les "causes ultimes", qui ne servent pas les mêmes pôles de la biologie. Pour les sciences historiques, Gould écrit que la survenue d'événements ne peut se suffire des seules lois de la nature, par définition invariables dans le temps et l'espace, mais que leur production relève de la contingence : *"On peut expliquer un événement 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). A remonter l'histoire, dans "une expérience de pensée", l'événement s'explique par un ensemble de **conditions nécessaires** qui l'ont déterminé ; et à redescendre le cours de l'histoire, toujours dans une "expérience de pensée", il y a peu de chances qu'il se reproduise.

⁶ Mais le passé est aussi la clé du présent.

Une petite variation dans les conditions, ou plus largement de paramètres non contrôlables et non connaissables, et cet événement n'existait pas. Gould ne parle donc guère de causes (Tirard, 2000b, p. 113), mais il valorise la contingence (cela aurait pu être autrement).

Gohau a souligné la tension de la géologie entre loi et histoire (1987) et il note qu'*"on pourrait peut-être dire que le passé de la Terre devient franchement historique quand il est assez complexe pour ne pas être entièrement prévisible, ou totalement déductible des lois de la nature"* (Gohau, 1987, p. 106). J. Gayon (1993) a également étudié cette tension pour la biologie. Dans la mesure où des parallélismes existent entre la biologie et la géologie, les approfondissements de ce philosophe doivent nourrir notre réflexion en géologie. J. Gayon rappelle que la biologie a trouvé son unité dans la réunion de son côté historique et de son côté fonctionnel. Son côté fonctionnel oriente vers les sciences générales de la matière (ce qui pourrait valoir une incorporation de la biologie aux sciences physico-chimiques), son côté historique laisse une place immense à la causalité et à la contingence historique (ce qui va dans le sens d'une autonomie des sciences biologiques). Mais dans cette dualité, nous retenons que les lois de la biologie ne peuvent aucunement prétendre être des lois de la nature. *"Les 'lois de la nature' s'expriment dans des énoncés qui lient des abstraits. Aussi l'exigence la plus fondamentale est-elle que les lois expriment des relations constantes et invariables"* (Gayon, 1993, p. 35). Or les énoncés nomologiques des sciences biologiques n'ont jamais toutes ces caractéristiques. Ce sont des généralisations du type *"tous les corbeaux sont noirs"* (Ibidem, p. 37), fondées sur la concordance de faits et non sur leur connexion, très sensibles à une réfutation par un cas singulier, dépendante du contexte spatial et temporel : *"Tous les corbeaux sont noirs"* ne vaut peut-être que pour la période récente du Quaternaire. En d'autres termes, ces lois sont plus des lois empiriques que des lois de la nature. *"Il se pourrait que toutes les généralisations de ces sciences (les sciences biologiques) soient accidentelles, c'est-à-dire qu'elles n'aient de pertinence que relativement à des singularités historiques"*. (Gayon, 1993, p. 46)

Gayon montre également qu'il est difficile de reconnaître en biologie d'authentiques lois déterministes (1993, p. 40), c'est-à-dire des lois permettant, à partir de la connaissance de l'état actuel des systèmes vivants, de connaître leur état futur ou leur état antérieur. Et il relie cela à la complexité et à l'ouverture des systèmes vivants.

En comparaison avec la biologie, que pouvons-nous penser des généralisations de la géologie ? Un énoncé comme *"L'eau altère les roches"* souffre des mêmes insuffisances que *"Tous les corbeaux sont noirs"* pour être qualifié de loi de la nature. Et les objets d'étude de la géologie, à savoir tout ou parties de la Terre, sont reconnus par les géologues comme des systèmes complexes et ouverts, et présentant une certaine singularité dans le temps et l'espace. L'évolution de ces systèmes a peu de chance de se réduire à la seule mise en jeu de lois physico-chimiques intemporelles et ubiquistes.

2.3. Conclusion

Les sciences de la Terre ne peuvent se suffire dans leurs explications des lois de la nature, qui s'affranchissent du temps et de l'espace. La Terre, par ses qualités d'objet d'étude complexe et inscrit dans une histoire, oblige à penser ses changements non pas en termes de lois empiriques ou de causes entraînant un effet mais en termes de conditions nécessaires pour que l'effet existe. Nous reviendrons, dans le chapitre 3, sur les explications en sciences de la Terre, en approfondissant les liens qu'elles entretiennent avec la modélisation. Notre préoccupation sera double : étudier leurs caractères selon que l'on est plutôt sur un des pôles (fonctionnaliste ou historique) de la géologie et clarifier leur utilisation du temps.

3. Les problèmes des sciences de la Terre fonctionnalistes et des sciences de la Terre historiques

Avant d'approfondir l'actualisme (chapitre 2) et d'entrer dans le détail des explications construites en sciences de la Terre (chapitre 3), il paraît important d'identifier les grands problèmes que prend en charge la communauté géologique actuelle. Pour éviter de nous perdre dans les dédales des recherches pointues, nous avons exploré deux pistes : 1) les revues scientifiques à l'interface des revues spécialisées et des revues de vulgarisation ; il s'agit de *La Recherche* et de *Pour la Science*. 2) les conférences (366 conférences) tenues chaque jour de l'année 2000 à Paris dans le cadre de l'Université de tous les savoirs. Les plus grands spécialistes ont parcouru, à l'attention d'un large public, *"les différents domaines de la connaissance dans un esprit qui est à la fois celui du bilan encyclopédique et celui du questionnement d'avenir"* (Michaud, 2002, p. 7). Nous nous sommes limitée aux conférences sur le globe terrestre.

3.1. Les problèmes des sciences de la Terre fonctionnalistes

C'est une banalité d'écrire que les volcans et les séismes, par exemple, ont souvent éveillé la curiosité des hommes qui ont cherché à les expliquer. La géologie en tant que science fonctionnaliste s'intéresse à ces questions ou problèmes, qui sont l'expression du fonctionnement actuel de la Terre. Mais il en est d'autres. Quels sont les grands problèmes pris en charge par la géologie fonctionnaliste ? Le géologue P. Thomas (2002, pp. 88-91) fait un état des recherches en sciences de la Terre depuis 1968, année marquée par la révolution de la tectonique des plaques. Nous retenons qu'il y eut d'abord des investigations visant à consolider le modèle de la tectonique des plaques (exploration approfondie des océans et des continents, quantification des phénomènes), puis une réorganisation des recherches dans le sens d'une prise en compte du fonctionnement global de la Terre, dans tout l'espace qu'elle représente, dans la continuité de ce fonctionnement. Toutes les enveloppes terrestres sont en effet étudiées, même les enveloppes internes inaccessibles directement et pour longtemps encore (noyau et manteau). Les recherches portent sur la dynamique actuelle et la constitution de chacune de ces enveloppes, mais aussi sur le couplage de leurs activités (le couplage entre les circulations océaniques et les circulations atmosphériques par exemple), et encore sur l'extrapolation possible de leur fonctionnement actuel vers un passé ou un futur proches (années à millions d'années). Citons quelques titres d'articles : *"El Niño et la rotation de la Terre"* (*Pour la Science*, mars 2001), *"Nouvelle stratégie contre l'effet de serre"* (*La Recherche*, novembre 2000), *"Le noyau de la Terre tourne-t-il vraiment ?"* (*La Recherche*, décembre 1998), *"L'eau du centre de la Terre"* (*La Recherche*, juin 1993), etc.. Ces recherches fonctionnalistes bénéficient de grandes avancées techniques : auscultation satellitaire en continu de la pesanteur, de la composition de l'atmosphère, des déplacements etc., dispositifs expérimentaux permettent d'atteindre des conditions thermodynamiques extrêmes, analyses géochimiques pointues des échantillons, simulations informatiques complexes, explorations extra-terrestres. Les conférences 2000 de l'Université de tous les savoirs confirment les préoccupations de la géologie fonctionnaliste dont nous parle P. Thomas, en privilégiant cependant la dynamique des enveloppes terrestres externes. Voici quelques titres de celles en rapport avec la géologie dynamique : *"La tectonique des plaques : de l'océan à l'espace"* (X. Le Pichon) ; *"Séismes et risques sismiques"* (M. Campillo) ; *"Au dessus des volcans"* (C. Jaupart) ; *"Les fleuves sous les mers, courants et marées"* (J.-F. Minster) ; *"Le cycle de l'eau et l'adéquation besoins-ressources au XXI^e siècle"* ((G. de Marsily), *"El Niño, un phénomène issu de l'océan pacifique tropical"* (J. Picaud).

3.2. Les problèmes des sciences de la Terre historiques

De la même manière que nous l'avons fait pour les sciences de la Terre fonctionnalistes, interrogeons-nous sur les problèmes des sciences de la Terre historiques. Qu'en est-il des problèmes historiques dans ce qu'évoque P. Thomas ? Ce chercheur constate là également un changement depuis une trentaine d'années. Avant les années 1970, le passé de la Terre perdait de l'importance au fur et à mesure que l'on remontait dans le temps, pour cause de faiblesse des archives terrestres ; d'autre part, l'entrée dans la construction du passé terrestre se faisait en général par une spécialité géologique (la pétrologie, la tectonique, ...) et se limitait à des études régionales et exclusivement continentales.

Depuis, grâce à l'exploration du système solaire et à l'étude des météorites, les problèmes très éloignés dans le temps géologique, comme le problème de la formation de la Terre (qui remonte à 4, 55 milliards d'années) et de son évolution comparée à celles de planètes "soeurs" (Vénus et Mars), ainsi que le problème de l'origine de la vie (daté aux environs de -4 milliards d'années) prennent une grande importance dans la recherche. De plus, leur prise en charge est devenue plus globale :

- le "terrain" du chercheur déborde largement du domaine continental ; il est terrestre et extraterrestre ;
- cette prise en charge se joue dans l'interdisciplinarité "géologique", avec une discipline nouvelle qui est la planétologie, et dans des relations fructueuses avec la biologie, la chimie, les sciences physiques, les mathématiques et l'informatique.

Les articles des numéros récents de *La Recherche* et de *Pour la Science* témoignent de ces mutations : des dossiers ont été consacrés aux origines de la vie (*La Recherche*, novembre 2000), de même qu'une conférence de l'Université des savoirs ("*La vie : origine et distribution possible dans l'Univers*" de A. Brack (2002)). En ce qui concerne le passé de la Terre depuis son origine, il est surtout étudié, dans sa totalité ou plus ponctuellement, en relation avec l'histoire de la vie sur la Terre et l'évolution des êtres vivants ("*Catastrophes cosmiques et extinctions*", *Pour la Science*, octobre 2002 ; "*La dynamique du globe contrôle-t-elle l'évolution des espèces ?*" Conférence de V. Courtillot, 2002, Université des savoirs) ou quand il s'agit d'étendre la théorie de la tectonique des plaques aux périodes reculées de l'histoire de la Terre ("*La formation de l'Atlantique Nord*", *Pour la Science*, septembre 2001 ; "*Coésite et formation des montagnes*", *Pour la Science*, novembre 2001). Mais il est aussi des problèmes historiques qui traversent les époques. C'est ce que semble montrer la conférence de J.L. Le Mouél sur "*Le refroidissement de la Terre*" (2002, Université des savoirs).

3.3. Conclusion

Même si nous n'avons pas fait un recensement exhaustif des problèmes de la géologie actuelle, nous pensons pouvoir dégager quelques unes de leurs caractéristiques qui nous serviront par la suite :

- 1) Les problèmes géologiques mettent en jeu des systèmes naturels complexes (le système Terre, le système océan, la biosphère...), "*beaucoup plus complexes que les expériences de laboratoire de physique et de chimie*" écrit Thomas (2002, p 90).
- 2) Les problèmes pris en charge par les sciences de la Terre ne sont pas généralement des problèmes "purs", c'est-à-dire des problèmes de la seule géologie fonctionnaliste ou de la seule géologie historique. L'étude du fonctionnement actuel de la Terre s'inscrit dans son histoire, comme dans celle du système solaire ; l'histoire de la Terre a un point fixe, c'est l'actuel. La géologie fonctionnaliste élargit son domaine d'étude temporel ; la géologie

historique se connecte à la géologie fonctionnaliste. Cependant, il est des problèmes plus "mixtes" que d'autres : pensons aux problèmes en rapport avec l'origine de la vie et l'évolution des êtres vivants.

3) La distinction entre problème fonctionnaliste et problème historique renvoie bien à une certaine prise en compte du temps qui est plus compliquée qu'on pourrait le penser a priori :

- En première approche, les problèmes de la géologie fonctionnaliste s'ancrent dans le **temps humain** mais les extrapolations sont faites qui le débordent. D'autre part, des problèmes historiques comme la formation des chaînes de montagnes exigent du **temps long** (millions d'années) mais ne se réalisent-ils pas encore actuellement ? La **durée** de certains phénomènes comparée à l'instantanéité d'autres n'est peut-être pas un critère discriminant.

- Les mutations récentes de la géologie historique tendent à apprivoiser le temps long et à la rapprocher de la géologie fonctionnaliste. Par des simulations numériques, par exemple, on reproduit maintenant au laboratoire des phénomènes ou événements historiques. Thomas écrit que *"La révolution des années 1968-1978 a été à la fois la cause et la conséquence d'une vision globale de la planète, d'une réelle interdisciplinarité, et d'une systématisation de la quantification et des explications physiques et chimiques"* (2002, p. 91) Et on se rend compte que ces caractéristiques servent tout autant l'étude de processus actuels que de processus historiques.

4) Les problèmes géologiques, fonctionnalistes ou historiques, se construisent et se résolvent dans l'interdisciplinarité qui les constitue, et dans une interdisciplinarité qui mobilise d'autres sciences. P. Thomas souligne la fécondité des travaux qui fédèrent maintenant des disciplines différentes au delà de celles de la géologie classique.

5) On retient enfin la crainte exprimée par P. Thomas du risque d'une nouvelle fragmentation de la géologie en chapelles, d'une perte de vue des problèmes et de la réalité au profit des modèles mathématiques. Cela nous montre l'importance accordée par le scientifique aux problèmes globaux, mais également au monde visible et aux modèles qui l'expliquent.

Notre réflexion à venir devra approfondir ces notions de problèmes, de registre empirique et de modèle (chapitre 3). Comme elle aura à tenir compte, dans le choix des domaines géologiques où les utilisations du temps seront plus particulièrement étudiées, de l'articulation entre science fonctionnaliste et science historique (deuxième grande partie de notre recherche).

4. Quelques figures du temps en Sciences de la Terre

Les scientifiques reconnaissent qu'il y a une multiplicité des temps. I. Prigogine et I. Stengers (1979, p. 275-276) écrivent que *"La découverte de la multiplicité des temps n'est pas une "révélation" surgie soudain de la science; bien au contraire, les hommes de science ont cessé aujourd'hui de nier ce que, pour ainsi dire chacun savait"*. Dans une recherche précédente (D. Ravachol-Orange, 1997, p. 16-), nous avons procédé à une investigation, non exhaustive, des grandes « figures du temps »⁷ dans les Sciences de la Nature avant de nous intéresser plus précisément à celles qui caractérisent la géologie. Nous montrons combien le temps est

⁷ Nous empruntons cette expression à B. Bachelet (1996).

complexe et multiforme, combien il est inféodé aux types de systèmes que l'on étudie (systèmes simples, systèmes complexes), aux types d'explications que l'on construit (explications déterministes ou non) et qu'il ne peut pas être réduit à un axe de coordonnées simple et neutre. L'histoire des sciences physiques le montre. A leur sujet, Bachelet (1996, p. 150) dit la difficulté sérieuse à penser le temps physique, qu'il relie "*à une difficulté extrême à penser la complexité physique du réel*". On peut tenir la même réflexion en sciences de la Terre à propos du "temps géologique" : le fait même que ces sciences se définissent entre un pôle fonctionnaliste et un pôle historique augmente vraisemblablement la diversité et la complexité des utilisations du temps dans les explications.

De façon à approfondir les fonctions du temps dans les sciences de la Terre, plus complexes qu'elles ne paraissent, nous allons d'abord montrer combien les "figures du temps" sont multiples dans ces sciences. A titre d'illustration, notre étude développera plus précisément deux exemples : le premier se rapporte aux débuts de la géologie moderne (fin du 18^e siècle, début du 19^e siècle), le second est contemporain.

4.1. La naissance de la géologie moderne et le temps

Le développement de la Géologie moderne est intimement lié à son rapport au temps. Ellenberger (1994, p. 294) situe les prémices de cette grande éclosion au début du 19^e siècle. Les trois grands concepts qu'il met en valeur pour caractériser cette "*révolution scientifique créatrice*" ramènent non seulement au **temps** mais aussi à **la multiplicité des temps**. Quels sont ces concepts ? Il y a l'immensité des durées passées et de l'âge de la Terre, les modifications radicales du monde vivant au cours du temps, attestées par la succession des faunes et flores fossiles sans cesse différentes, et enfin la transformation des roches (jusque là considérées comme formées une fois pour toutes) et la reformation périodique du bâti terrestre. Ellenberger montre comment, au sein d'une communauté qui multiplie les échanges, ces concepts se rencontrent et s'imposent à cette époque les uns comme fruits d'un mûrissement depuis longtemps entamé, les autres réellement inédits (Ellenberger, 1994, p. 318).

C'est également à cette époque que les historiens des sciences situent l'émergence de la géologie historique : elle est pour eux un facteur important de la grande éclosion de la géologie moderne. Cette émergence se fait en rupture avec les théories de la Terre jusque là proposée. Rudwick (1997, p. 122) relève la diversité déroutante des théories de la Terre du 18^e siècle. Pour lui, peu importe qu'elles utilisent une durée brève ou une durée énorme ; peu importe qu'elles prennent en compte un développement directionnel de la Terre ou une évolution cyclique. Ce qui fondamentalement les écarte de la géologie historique (Rudwick préfère le terme de géohistoire) tient au fait qu'elles ne prennent pas en compte la contingence. En se référant à Gohau (1990a), Rudwick écrit que **la contingence** seule caractérise "*un récit vraiment géohistorique comportant un sens de la complexité imprévue et de la singularité de l'histoire*" (Rudwick, 1997, p. 122). D'autres chercheurs comme le paléontologue Gould (1990, 1999) le soulignent également. Cela montre donc que les utilisations du temps dans les explications géologiques ne se suffisent pas de la durée, du temps sagittal (la flèche du temps) ou du temps cyclique ; elles font nécessairement jouer la contingence.

4.2. Neptunisme contre plutonisme (fin du 18^e siècle)

Dans ce paragraphe et le suivant, nous reprenons certains de nos travaux antérieurs simplement pour illustrer la "multiplicité" des temps dans les explications en géologie. Cette question des formes du temps sera en effet éclairée d'une autre façon aux chapitres 2 et 3.

Notre choix se porte sur deux exemples : le premier concerne le problème de la formation des roches crustales, tel qu'il est construit à la fin du 18^e siècle et au début du 19^e siècle ; le second se rapporte à la compréhension récente et actuelle de l'évolution des êtres vivants.

Deux figures marquantes caractérisent la géologie naissante de la fin du 18^e siècle et du début du 19^e siècle : James Hutton (1726-1797), "*gentleman farmer*" écossais aisé, passionné par l'étude de la Nature, dont le traité intitulé "*Theory of the Earth*" (Théorie de la Terre, 1795) installe une polémique qui remet en question les thèses neptuniennes alors en cours de Abraham Gottlob Werner (1749-1817), inspecteur des Mines et chargé de cours de minéralogie et de sciences minières à l'Académie des mines de Freiberg en Saxe (Ellenberger, 2001c). Le temps est au coeur de cette controverse. S.J. Gould est un de ceux qui reconnaissent que la parution de cet ouvrage "*marque conventionnellement l'introduction du concept de temps profond dans la pensée géologique britannique*" (Gould, 1990, p. 101). C'est plus précisément l'opposition entre temps cyclique et temps sagittal qui est en jeu.

4.2.1. Le neptunisme, paradigme unificateur de la fin du 18^e siècle

Au 18^e siècle, la préoccupation majeure des intellectuels qui s'intéressent à la Terre est de fournir une explication à la formation des roches de la croûte terrestre (roches crustales) dont la variété ne laisse pas de les étonner. Quand paraît le traité de Hutton, un courant explicatif emporte l'adhésion de la presque totalité de la communauté scientifique : c'est **le neptunisme**. Werner en est un des plus prestigieux porte-parole, mais d'autres grands hommes défendent ce courant : le naturaliste J.-A. Deluc (1727-1817) et le savant Déodat Gratet de Dolomieu (1750-1801). Cette théorie dit que les roches crustales, y compris le granite et le basalte, sont le produit de l'eau : 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), en se référant à Delamétherie, qui avait rencontré Werner en 1802, rappelle les épisodes de la formation des roches :

- le premier épisode conduit à la formation, par précipitation chimique, des granites, puis des gneiss et des "schistes". Ces terrains primitifs ne contiennent pas de fossiles. Le retrait de l'océan laisse à découvert les parties élevées (montagnes primitives).
- le deuxième épisode est celui de la formation, au-dessus des roches précédemment formées, des grauweekes. Des êtres vivants apparaissent dans les eaux alors refroidies ce qui explique qu'on retrouve désormais des fossiles dans les roches. L'océan poursuivant sa retraite, on obtient les "montagnes de transitions", qui suivent les irrégularités des montagnes primitives.
- le troisième épisode se caractérise par la formation de roches sédimentaires variées (calcaires, grès,...) avec un contenu fossilifère abondant.
- le quatrième épisode voit l'émergence de continents de taille imposante et la mise en place de dépôts marins détritiques entretenus par l'érosion continentale (sables, graviers, ...).

Les basaltes sont tardifs, "*produits d'une dissolution particulière, et sédimentés après de grandes destructions des roches antérieures*".

Le "système neptunien" est solide car Werner est un fin connaisseur du terrain, et plusieurs massifs européens (dont le Massif du Harz en Allemagne) valident son idée que les formations rocheuses ayant une extension importante (il les oppose aux formations plus

localisées : gîtes, filons) s'observent toujours dans un même ordre de succession, que l'on peut corréler aux épisodes ci-dessus.

On peut noter que ce "système" a plusieurs grandes caractéristiques :

- il est totalement atectonique et amagmatique. Pas de mouvements engendrant des montagnes : il y a des montagnes primitives sur les irrégularités desquelles se moulent de nouveaux dépôts à l'origine d'autres montagnes. Et le granite comme le basalte ne sont pas des roches magmatiques mais des produits de précipitations dans l'eau.
- pour ce qui est du temps, la théorie neptunienne inscrit la Terre dans une histoire sagittale progressive maintenant achevée. Pour Ellenberger, cette théorie est pleinement scientifique (1994, p. 271), car elle est de nature réfutable et elle l'a été depuis. Sa fragilité tient dans l'abus du principe d'économie : *"on est tombé dans le piège éternel, si séduisant, de l'explication unicausale. Un seul agent, une seule variable, dans une seule direction"* (Ibidem, p. 272). Mais s'agit-il vraiment d'une histoire de la Terre ? Le paléontologue et historien britannique M. Rudwick (1997, p. 121) écrit qu'un tel développement programmé d'étapes physiques est profondément anhistorique, car il manque la contingence. Il est vrai que ce "système" n'est pas sans rappeler le système cartésien et encore le déterminisme laplacien. Mais il comporte bien une succession dans le temps d'épisodes qui ne peuvent pas s'inverser. Cela ne le rapproche-t-il pas d'une explication historique ?

En résumé, la théorie neptunienne met en jeu **la flèche du temps**, mais aussi **la continuité** et **l'irréversibilité** des processus qu'elle contient. Mais cette flèche du temps n'est pas directement liée à ces processus : **elle leur est extérieure** en ce sens qu'elle en est seulement la toile de fond. Le temps long ne produit rien par lui-même. Ce qui détermine l'évolution de la Terre tient seulement à des conditions initiales et à des principes physiques d'évolution.

4.2.2. L'oeuvre de Hutton et le plutonisme

Publiée dans le contexte unificateur du neptunisme, l'ouvrage de J. Hutton, *Theory of the Earth* (1788, 1795) est une *"synthèse archaïque de ton, audacieusement novatrice sur le fond"* (Ellenberger, 2001a). En quoi est-elle novatrice ? En quoi cette oeuvre rompt-elle avec le neptunisme ambiant ?

La nouveauté dans l'oeuvre de Hutton tient d'abord au rôle fondamental qu'il donne au feu ou à la chaleur souterraine (*subterraneous fire or heat*), dans la consolidation des sédiments (action diagénétique), dans le soulèvement des strates et la formation des montagnes (rôle tectonique), enfin dans l'injection de granite à l'état liquide dans les couches (effet plutonique). Dans le cadre ambiant neptunien, ce sont trois problèmes qui prennent une autre explication. Précisons un peu :

- les neptuniens expliquent la diagenèse par la cimentation des grains assurée par une matière dissoute dans l'eau qui circule entre eux. Hutton envisage une fusion périphérique des grains sous l'action de la chaleur souterraine, et leur soudure lors du refroidissement de la matière fondue.

- les neptuniens écartent les mouvements, au contraire de Hutton qui conçoit que, sous l'action du feu souterrain, des couches jusque là horizontales puissent être soulevées et prendre une certaine inclinaison. Ellenberger reconnaît l'immense mérite de Hutton dans cette façon d'envisager l'orogénèse (1994, p. 308). Les couches soulevées et déformées sont aussitôt rabotées par l'érosion, et il est possible d'envisager plus tard leur recouvrement par les eaux et de nouveaux dépôts. Hutton établit en un lieu donné les éléments d'un cycle entretenu par l'action antagoniste du feu et de l'eau : il y a le feu souterrain qui progressivement soulève et l'eau qui érode (transporte et dépose ailleurs).

- les neptuniens donnent à l'eau de l'océan le rôle d'engendrer toutes les roches, y compris les roches cristallines comme le granite. Hutton donne non seulement à l'eau mais aussi à la chaleur souterraine un rôle dans la formation des roches. Le granite change d'origine : il est le produit d'une fusion des sédiments enfouis. Sous l'effet de la chaleur souterraine, des montées intrusives de granite s'effectuent en force. Elles ont un rôle tectonique puisque ce sont elles qui déterminent le soulèvement et le refoulement latéral des couches (Gohau, 1990, p. 273). C'est peut-être là, selon Gohau (1987, p. 133), l'élément le plus audacieux de la thèse de Hutton.

Il est une deuxième façon d'entrer dans la nouveauté de l'oeuvre de Hutton, c'est en prenant en considération la finalité qu'il donne à la Terre : elle est un objet physique de tout temps hospitalier pour les êtres vivants. La tension qui s'opère entre une Terre, objet physique parfait inscrit dans une finalité, et sa lente dégradation par l'érosion, conduit Hutton à rejeter le récit d'érosion ininterrompue des reliefs terrestres que donnent les neptuniens qui, si on le prolonge, entraîne la ruine de la Terre, et à envisager un mécanisme de restauration des reliefs. D'où l'idée de soulèvements, ce qui va à l'encontre du neptunisme atectonique ou des propositions d'affaissement.

Enfin, il est une dernière façon de considérer la nouveauté de l'oeuvre de Hutton : c'est le rapport au temps qu'elle installe. La théorie de la Terre de Hutton rompt avec le temps sagittal des neptuniens au profit du temps cyclique⁸ et du temps profond. En effet, elle installe la Terre dans une succession de cycles identiques qui se perpétuent depuis la nuit des temps et pour toujours. Chaque cycle comprend 3 phases se succédant progressivement et intimement liées puisque chacune est la cause de la suivante :

- une phase de destruction des reliefs sous l'action de l'eau (ainsi progressivement les continents se transforment en océans).
- une phase de dépôt des matériaux en strates dans les bassins océaniques.
- enfin, sous l'action de la masse des strates, une phase d'échauffement des couches inférieures conduisant à de la fusion et à un bombement responsable de reliefs là où précédemment il y avait un océan. On revient alors à la première phase.

Ainsi *"Continents et océans changent de place, permutent à la faveur d'une lente chorégraphie qui jamais ne s'achèvera, ni même ne prendra de l'âge tant que les puissances supérieures ne révoqueront pas les lois qui régissent la nature"* (Gould, 1990, p. 109)

Comme tous les cycles se ressemblent, on ne sait situer la Terre dans une quelconque histoire. La flèche du temps n'a pas de raison d'être. A un moment donné, que l'on regarde vers l'avenir ou vers le passé, l'histoire terrestre se perd, immuable, dans l'immensité du temps, dans le temps profond. J. Hutton résume cela en écrivant : *"No vestige of a beginning, no prospect for an end"* (pas le moindre vestige d'un commencement, pas la moindre perspective d'une fin).

C'est, chez Hutton, l'état de perfection **contre l'histoire** : *"si les choses se perfectionnent avec le temps, c'est que la machine terrestre n'a pas été créée parfaite, et si elles se dégradent, c'est que la Terre n'est pas davantage aujourd'hui une perfection"* (Gould, 1990, p. 139). Dans leurs effets, les cycles de Hutton gommant l'histoire : ils installent la physionomie de la Terre dans une oscillation lente et continue autour d'un état "moyen" et ils effacent les traces d'un passé ancien. Le modèle de J. Hutton est un modèle de stabilité dynamique qui répond à la finalité dont il dote l'objet terrestre : *"A tout instant existe un globe*

⁸ On peut remarquer qu'il n'est pas le premier à le faire. Le cycle existe déjà chez les stoïciens (Gohau, 1990, pp. 139-140). Et l'éternel retour est une idée primitive (Eliade, 1969).

tout à la fois solide et aqueux, à l'usage des plantes et des animaux ; à tout moment existe à la surface de la Terre des sols secs et des eaux mouvantes, bien que la forme et la situation particulières de ces choses fluctuent et ne sont point permanentes comme le sont les lois de la nature"(Gould, 1990, p. 109). A tout le moins, les discordances renseignent-elles sur le(s) dernier(s) cycle(s) (Gohau, 1987).

En résumé, la théorie de Hutton (théorie plutoniste), en recourant au **temps cyclique**, inscrit la Terre dans un ordre intemporel qui éloigne dans l'immense **profondeur du temps** le problème d'une origine ou d'une fin. Les cycles permettent à la terre d'évoluer autour d'un état moyen et ils apportent ainsi une réponse à la causalité téléologique qu'applique Hutton à la Terre. Mais du même coup, ils écartent le problème des origines. Enfin, s'il est possible de repérer une succession d'étapes dans un cycle, il est impossible de distinguer un cycle d'un autre. Le plutonisme est anhistorique.

4.2.3. Conclusion

La mise en comparaison du neptunisme et du plutonisme permet de rendre compte de la multiplicité des utilisations du temps dans le problème de la formation des roches crustales, que le tableau suivant tente de résumer :

La formation des roches crustales	Neptunisme	Plutonisme
* s'inscrit dans :	- un temps sagittal	- un temps cyclique mais aussi dans - un temps sagittal (au sein de chaque cycle)
	- un temps fini (court ou long)	- un temps profond
* se caractérise par :	- des épisodes irréversibles	- des épisodes irréversibles au sein de chaque cycle - une réversibilité assurée par la succession de cycles identiques
	- des processus continus de précipitation	- des processus continus d'érosion et de restauration des reliefs
* avec en toile de fond :	- le temps absolu (déterminisme)	

Tableau 1.1. La multiplicité des temps dans le neptunisme et dans le plutonisme

Ce sont des observations de terrain qui sonneront le glas du neptunisme. Pour en finir avec le temps sagittal ? Non, si on lit F. Ellenberger (1994, p. 272) parlant des disciples de Werner : *"... ils ont certes dû, les uns après les autres, renoncer à l'utopie neptunienne ; mais celle-ci n'aura-t-elle pas contribué à mettre en selle une vraie remplaçante : à savoir la vision séquentielle et directionnelle des faunes fossiles ?"*. Même si on peut discuter de l'"histoire" que les neptunistes ont donné à la Terre, à tout le moins participent-ils à l'émergence de la stratigraphie et donc la géologie historique. Mais ne peut-on pas en dire autant du plutonisme ? 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. Les neptuniens situaient dans le temps des formations lithologiques ; c'est

un neptunien, J.-A. De Luc qui envisagera plus tard leur datation par l'utilisation des faunes fossiles (Ellenberger, Gohau, 1981 ; Grandchamp, 1999, p. 882). Avec la stratigraphie naissante, nous pourrions encore parler de la "multiplicité" du temps.

4.3. Gradualisme contre équilibres ponctuels (fin du 20^e siècle)

Depuis près de 150 ans, c'est-à-dire depuis la publication en novembre 1859 de *"L'origine des espèces"* de Charles Darwin (1809-1882), la théorie de l'évolution des espèces ne cesse d'être enrichie, aménagée, controversée. C'est une théorie qui de nos jours reçoit l'adhésion de la quasi-totalité de la communauté scientifique (Langaney, 1990, p.153) et comme l'écrit E. Mayr (1993, p. 179), *"La saine agitation qui caractérise aujourd'hui la biologie de l'évolution ne doit pas être considérée comme une lutte dévastatrice, mais plutôt comme la pétulance que l'on rencontre dans toutes les branches bien vivantes de la science."* Nous n'allons pas reprendre toutes les discussions autour de cette théorie mais nous attachons à l'opposition qui existe actuellement entre les chercheurs sur le rythme de l'évolution : dans le prolongement de l'œuvre de Darwin, certains comme E. Mayr, se rangent à l'idée d'évolution graduelle des êtres vivants alors que d'autres comme Eldredge et Gould proposent une évolution véritablement "saltatoire". En quoi ces deux approches illustrent-elles la "multiplicité" des temps ?

4.3.1. Le gradualisme

Au milieu du 19^e siècle, la publication de *"L'origine des espèces"* de C. Darwin ébranle la communauté scientifique. Même si quelques autres avant lui, le zoologiste Lamarck par exemple, ont envisagé l'idée d'évolution, la théorie que développe Darwin est novatrice parce qu'elle donne un mécanisme de l'évolution, la sélection naturelle, et parce qu'elle introduit le hasard dans l'histoire des êtres vivants. Darwin considère que les espèces vivantes présentent en leur sein une certaine variabilité qui tient au hasard. Dans leur *"lutte pour l'existence"* (conditions environnementales, concurrence vitale, réussite de la reproduction), seuls les organismes d'une espèce présentant les variations avantageuses survivent : il y a sélection naturelle des plus aptes, c'est-à-dire *"conservation des différences ou des variations individuelles favorables"* et *"élimination des variations nuisibles"* (Darwin, 1983 (1886), p.86). "Hasard" des variations, "nécessité" imposée par le milieu, voilà ce qui peut caractériser le mécanisme de l'évolution selon Darwin. Celui-ci s'emploie dans son ouvrage à fonder et à discuter les limites de sa théorie. Dans ces développements, il affirme sa conception d'une évolution graduelle des espèces en empruntant à Leibniz le vieil adage : *"Natura non facit saltum"* (Ibidem, p. 226). C'est progressivement, graduellement, par le jeu de modifications légères et répétées associées au tri par le milieu des plus avantageuses que les espèces se sont transformées ou se transforment. Elles engendrent en leur sein d'abord des variétés qui insensiblement, conduisent à de nouvelles espèces.

L'idée de gradualisme appelle en conséquence :

a) un ou des mécanismes permettant la variation elle-même dans tout ce qu'elle a d'**aléatoire** et la pérennisant de génération en génération. Cela renvoie à l'étude des supports et des mécanismes de l'hérédité. Darwin manquait à ce sujet d'arguments forts (il adhérait, comme beaucoup de chercheurs de son époque, à la théorie de l'"hérédité flexible"⁹) mais ses

⁹ E. Mayr, 1989, p. 635.

successeurs, à la lumière des recherches sur les gènes et leur transmission, conforteront la théorie de la sélection naturelle (M. Blanc, 1990, p. 63).

b) l'existence de formes de transition entre les espèces. La paléontologie ne cessera de s'y intéresser tout en reconnaissant le manque fréquent de ces "chaînon" dans les archives géologiques. Faut-il y voir, comme Darwin, "l'extrême imperfection" des documents fossiles ou, comme Gould, un argument de poids contre le gradualisme ?

c) la nécessité de l'**immensité des temps géologiques** pour que de grandes modifications aient le temps de se faire et se concrétisent par une diversité des espèces et des groupes. *"La seule durée du temps ne peut rien par elle-même, ni pour ni contre la sélection naturelle"* écrit Darwin mais cette *"durée du temps est seulement importante (...) en ce qu'elle présente plus de chances pour l'apparition de variations avantageuses et en ce qu'elle leur permet (...) de s'accumuler et de se fixer"* (1983 (1876), pp. 112-113). Cette nécessité du temps long n'a jamais posé réellement de problème, l'immensité des temps géologiques étant admise. C. Darwin d'ailleurs renvoyait assez sèchement ses détracteurs à la lecture des Principes de la Géologie de C. Lyell (1797-1875) : *"Quiconque peut lire le grand ouvrage de Sir Charles Lyell sur les Principes de la Géologie, auxquels les historiens futurs attribueront à juste titre une révolution dans les sciences naturelles, sans reconnaître la prodigieuse durée des périodes passées, peut fermer ici ce volume."* (Darwin, 1983 (1876), p. 357)

Il y a dans la théorie de l'évolution développée par Darwin et consolidée depuis à la lumière de la génétique, la prise en compte des modifications **aléatoires** s'effectuant chez les êtres vivants, suivie de la prise en compte de l'action du milieu (survie des plus aptes)¹⁰. Ainsi se construit un **"chemin" irréversible** de l'histoire de vie conduisant, à cause de la sélection, vers plus de complexité. Mais ce n'est pas une "route" globalement prévisible, car Darwin introduit le **hasard** dans l'histoire des espèces : c'est ce qui sépare radicalement la théorie darwinienne de toute pensée évolutionniste antérieure (Jacob, 1970, p. 170). Il est vrai que de nombreuses données (paléontologiques, géographiques,...) concourent à montrer la contingence des êtres vivants et de leur formation (Ibidem, p. 183).

4.3.2. Les équilibres ponctués

Selon le paléontologue américain S.J. Gould (1941-2002), l'histoire de la vie est insuffisamment expliquée par la théorie "continuiste" de l'évolution parce qu'elle sous-estime la complexité de notre monde : *"...les évènements sont si imbriqués et embrouillés par des éléments chaotiques et aléatoires, ils sont si peu reproductibles, ils mettent en jeu tant d'éléments spécifiques, que les modèles standard de prédiction ne s'appliquent pas"* (Gould, 1994, p. 90). Darwin mettait en jeu le **hasard**, Gould affirme le **rôle déterminant de la contingence**, à tout le moins bien supérieur à l'impact de la sélection naturelle : *"presque chaque phénomène intéressant de l'histoire de la vie relève du royaume de la contingence"* (Gould, 1991, p. 324), contrairement à l'origine de la vie, il y a quatre milliards d'années, qu'il considère comme inévitable compte tenu des conditions physico-chimiques d'alors. C'est ainsi que *"pour comprendre les évènements 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).

¹⁰ On parle actuellement de théorie synthétique de l'évolution.

Sans remettre donc en cause la théorie générale de l'évolution, Gould en démonte certains aspects et mécanismes, fragiles selon lui au vu de certaines données paléontologiques. Précisons un peu :

- La théorie classique parle d'une complexification voire même d'un "progrès" dans les formes vivantes qui se sont succédées sur la Terre (pour certains, l'Homme en serait l'aboutissement le plus parfait). Faux, selon Gould, au regard notamment des études de la faune cambrienne : les schistes de Burgess au Canada livrent des formes d'une incroyable diversité et complexité. Si on replace l'explosion de la vie cambrienne dans l'histoire de la vie telle qu'on la connaît : sur environ 4 milliards d'années au total, on a *"trois milliards de vie unicellulaire, 5 millions d'années d'une créativité intense (au Cambrien), le tout couronné par plus de 500 millions d'années de variations sur des thèmes anatomiques donnés"* (Gould, 1994, p. 96), ce qui met en doute une tendance prévisible et continue vers la complexité et le "progrès".

- La théorie classique envisage une évolution graduelle dont le mécanisme principal serait la sélection naturelle. Eldredge et Gould remettent en cause le gradualisme, mais non le darwinisme (Gould, 1982, p. 208). Ils opposent au gradualisme la théorie des équilibres ponctués : l'évolution des espèces se serait faite en "marches d'escaliers inégales" plutôt que selon un "plan plus ou moins incliné" : *"...l'équilibre ponctué, dans son principe fondamental, se fie à l'interprétation littérale du témoignage géologique et soutient que la plupart des espèces sont apparues brusquement avant de se perpétuer "en plateau", et que ce n'est pas là l'expression d'un authentique gradualisme masqué par les lacunes de nos collections de fossiles."* (Gould, 1990, p.284). C'est en s'appuyant sur son expertise paléontologique que Gould souligne que l'on n'a jamais "vu" le gradualisme dans les roches elles-mêmes (Gould, 1982, p. 208).

Selon Gould et Eldredge, l'évolution des espèces est **donc discontinue**, alors que la théorie "classique" la pense **continue**. Pour A. de Riquès (2002, pp. 27-28), titulaire de la chaire de biologie historique et évolutionnisme au Collège de France, il y a, derrière ces propositions, un "problème de temps" : les mécanismes micro-évolutifs étudiés par les systématiciens et les généticiens relèvent du "temps écologique" court. Or Gould, en tant que paléontologue, travaille sur ses témoins dans les strates géologiques. Il n'est pas dans la même échelle de temps ; il est sur du "temps géologique" profond. Comme de Riquès l'écrit : *"Tout le problème est de parvenir à transposer un temps dans l'autre et à rendre compte des inéluctables distorsions correspondantes"* (2002, p. 28). Pour Gould et Eldredge, si les processus de spéciation sont longs à l'échelle du temps écologique, il n'en demeure pas moins qu'ils sont très courts à l'échelle des temps géologiques. La théorie classique de l'évolution proposerait une extrapolation simple du temps écologique au temps géologique. Outre le fait que cet exemple illustre la "multiplicité" des temps, ne montre-t-il pas également la rencontre et la difficulté d'articulation d'un problème fonctionnel (l'évolution actuelle des populations) et d'un problème historique (l'histoire des espèces) ? Nous sommes sur un cas d'utilisation de l'actualisme, dont Gohau dit qu'il est à la rencontre des deux géologies. Sa complexité, que nous percevons sur ce problème en rapport avec la paléontologie, sera étudiée dans le chapitre 2.

Ajoutons enfin que selon Gould, les catastrophes qui ont jalonné l'histoire de la Terre et ont provoqué des extinctions de masse¹¹, n'auraient pas seulement accentué des événements

¹¹ Les géologues identifient cinq crises majeures caractérisées par des extinctions en masse. Elles se situent il y a 65 millions d'années (crise Crétacé/ Tertiaire = crise K/T, à la limite entre l'ère Secondaire et l'ère Tertiaire), il y a 210 millions d'années (à la limite entre le Trias et le Jurassique), il y a 250 millions d'années (à la limite

ordinaires, à savoir la sélection plus marquée des plus aptes (la compétition darwinienne). Elles auraient également changé brutalement les règles du jeu. En effet, les groupes ou espèces survivantes ne semblent pas être les mieux adaptées lors des périodes normales. Les archives paléontologiques montrent par exemple que les groupes ou espèces qui ont survécu à la crise de la fin du Crétacé n'ont pas vraiment de points communs qui signaleraient des adaptations particulières (Gould, 1994, p. 97).

4.3.3. Conclusion

Le tableau suivant illustre la multiplicité des temps dans la controverse "gradualisme/équilibres ponctués". On peut remarquer que ces deux théories s'opposent principalement en termes de continuité/ discontinuité.

L'évolution des espèces	Gradualisme	Equilibres ponctués
* s'inscrit dans :	- un temps sagittal - un temps long	
* se caractérise par :	- l'irréversibilité des mécanismes	
	Hasard s'exerçant sur des phénomènes	Contingence des évènements
	Continuité	Discontinuité

Tableau 1.2. La multiplicité des temps dans le gradualisme et les équilibres ponctués

Si nous prenons en compte les deux exemples étudiés, neptunisme/ plutonisme et gradualisme/ équilibres ponctués, nous remarquons que la "multiplicité" des temps participe de la construction des problèmes et des savoirs géologiques : elle accompagne l'histoire de la recherche en géologie, elle concerne des domaines divers de la géologie, elle existe au sein d'un même domaine.

D'autre part, il paraît important de noter que cette multiplicité ne se limite pas à la seule prise en compte du temps linéaire, de la chronologie et de la durée. On voit combien la durée peut être investie de certains rôles du temps : ainsi, la contingence qui par ses effets oriente le cours de l'histoire.

5. Conclusion.

Les approfondissements de ce chapitre permettent de situer les sciences de la Terre entre un pôle fonctionnaliste et un pôle historique. Mais la dualité géologie fonctionnaliste/ géologie historique n'est pas si tranchée qu'on pourrait le croire : beaucoup de problèmes géologiques sont mixtes et le temps n'est pas l'apanage de l'une ou de l'autre. Plutôt que de "mettre tout dans tout", nous allons réfléchir sur ce qui fonde chacun de ces pôles et les met en tension.

- Nous interrogerons d'abord l'articulation entre le pôle fonctionnaliste et le pôle historique de la géologie. Nous consacrerons le chapitre 2 à étudier le principe de l'actualisme, dont Gohau nous dit qu'il les réunit.

entre l'ère Primaire et l'ère Secondaire) , il y a 370 millions d'années (entre le Frasnien et le Famennien, dans la période du Dévonien) et enfin il y a 440 millions d'années, entre l'Ordovicien et le Silurien. (Jaeger, 1996, p. 145).

- Il paraît également nécessaire d'étudier les caractéristiques des savoirs construits dans la géologie "plutôt" fonctionnaliste et dans la géologie "plutôt" historique, et les liens qu'ils entretiennent avec le temps. Ce sera l'objet du chapitre 3.
- Enfin, nous pensons que les problèmes choisis (deuxième partie de notre recherche) pour réaliser une étude didactique devront tenir compte de cette complexité des sciences géologiques vis à vis du temps.

Chapitre 2

L'ACTUALISME, LIEN ENTRE SCIENCES DE LA TERRE FONCTIONNALISTES ET SCIENCES DE LA TERRE HISTORIQUES

Sommaire

- 1. Les reconstitutions du passé de la Terre dans l'histoire de la géologie**
- 2. L'approche historique et les traces**
- 3. L'uniformitarisme (ou actualisme) méthodologique**
- 4. Uniformité des causes géologiques, et stationnarisme (steady state) du globe**
- 5. Uniformité des causes géologiques et directionnalisme**
- 6. Conclusion**

Nous avons vu que les sciences de la Terre se définissent entre un pôle fonctionnaliste et un pôle historique et que la plupart des problèmes géologiques sont mixtes (chapitre 1). On est en droit de s'interroger sur les conditions d'une prise en charge de ces problèmes. Un positionnement marqué du côté du pôle fonctionnaliste peut se suffire de lois de la nature invariables et intemporelles, à condition d'étudier des systèmes simples et anhistoriques: ce n'est pas souvent le cas des objets géologiques. Un positionnement en rapport avec le pôle historique conduit nécessairement à reconstituer le passé de la Terre. Des difficultés viennent alors du fait que ce passé met en jeu des durées qui dépassent la perception de l'homme, et qu'il ne nous parvient que sous la forme de traces, qu'il s'agit d'identifier et d'interpréter. Comment surmonter ces difficultés ? Nous allons voir, dans ce chapitre, de quelle manière l'actualisme ou principe des causes actuelles permet d'articuler les pôles fonctionnaliste et historique des sciences de la Terre (Gohau, 1987a, p. 265). Cette étude s'appuiera sur des éclairages historiques nécessaires à la compréhension des différentes dimensions de ce principe.

1. Les reconstitutions du passé de la Terre dans l'histoire de la géologie

L'histoire de la géologie, depuis ses balbutiements au 17^e siècle, en passant par sa véritable éclosion à la fin du 18^e siècle et au début du 19^e siècle, et jusqu'à la période actuelle, montre que des reconstitutions différentes du passé de la Terre ont été faites. Etudions quelques-unes d'entre elles.

1.1. L'émergence d'une histoire de la Terre au 17^e siècle

Nous rappelons ici ce qui, au 17^e siècle, rend possible l'émergence d'une histoire de la Terre.

1.1.1. Du temps éternel aux durées courtes

Les anciens (les stoïciens et les péripatéticiens) n'envisageaient pas une histoire de la Terre. D'une certaine façon, ils la voyaient éternelle, les stoïciens l'inscrivant dans un monde cyclique (alternance destruction/ restauration) qui périodiquement ramenait au même état, les péripatéticiens dans des cycles imbriqués se compensant (Gohau, 1987a, p.24). C'est entre le 14^e et le 17^e siècle que se forme une limitation dans le temps de l'histoire de la Terre (Gohau¹², 1990a, p. 82). A l'origine de ce changement, des événements tragiques (épidémies de peste, guerres et jacqueries, affaiblissement de l'Eglise), qui donnent une impression de fin du monde et entretiennent un sentiment de peur largement propagée¹³ : *"Les signes de la dégradation du monde sont si manifestes pour les hommes de l'époque qu'il leur est impossible d'imaginer qu'il avait pu braver des durées infinies"* (Gohau, 1990a, p. 83). On en vient alors à se préoccuper de l'histoire de humanité (c'est la naissance de l'histoire) et de l'histoire de la Terre, de la Création jusqu'au jugement dernier, soit 6 000 à 7000 ans (Gohau, 1990a, p. 84). Il semble donc que cette bascule dans une durée courte conforme à la Bible n'aurait en rien constitué un obstacle à la prise en compte des phénomènes géologiques (Gohau, 1987a, p. 31). Au contraire, elle aurait autorisé les auteurs à se tourner vers le passé de la Terre (Gohau, 1990a, p.88) et rendu faisable une reconstitution historique.

1.1.2. D'un cosmos fini à un cosmos infini

Pour Gohau (1987a, p. 31), *"Le véritable obstacle est dans la fermeture du cosmos"* et non dans les durées courtes. Or si nous nous projetons au 17^e siècle, nous assistons à "une ouverture" de ce cosmos et à une banalisation du statut de la Terre. Deux raisons à cela :

- le changement de conception quant à l'organisation du cosmos, ce que l'on appelle la révolution copernicienne (1543 ; Copernic, 1473-1543) : on passe d'un monde géocentrique à un monde héliocentrique. Le Soleil se substitue à la Terre dans l'occupation de la place centrale du système solaire et cette dernière devient une planète comme les autres. La Terre s'affranchit notamment d'un régime de mouvement de ses éléments (terre, eau, air, feu) et de ses corps qu'ils composent qui lui était jusqu'alors particulier, par opposition au mouvement parfait des sphères célestes. Quant aux étoiles, on les retrouve dans une sphère rejetée beaucoup plus loin dans l'espace, et par là même très éloignée des sphères plus internes des planètes. C'est un premier pas vers un univers infini (Koyré, 1973 ; Kuhn, 1973, p. 216).

- l'éclatement de la sphère des étoiles. Descartes (1596-1650) en effet postule qu'elles n'appartiennent pas à la même sphère et qu'elles peuvent même être très éloignées les unes des autres (Gohau, 1990a, p. 73). C'est l'abandon d'un monde fini, très organisé, dont on imagine mal une évolution et une existence indépendante de ses éléments, pour un univers infini, ouvert, où l'on peut envisager l'histoire d'une de ses parties, d'une de ses "poussières", sans que l'ensemble en soit compromis (Gohau, 1987a, p. 50-51).

¹² Gohau s'appuie sur les travaux de l'historien J. Delumeau.

¹³ Selon l'historien G. Duby, les 15^e et 16^e siècles se distinguent de la fin du 10^e siècle par l'ampleur de la propagation des peurs. Celles qui caractérisèrent la fin de l'an 1000, parce qu'elles apparurent dans un monde fragmenté et peu instruit, n'eurent qu'une faible diffusion (Gohau, 1990a, p. 83).

1.1.3. Conclusion

En résumé, au 17^e siècle, les conditions de possibilité sont réunies pour que ceux qui s'intéressent à la Terre admettent qu'elle peut avoir une histoire. Descartes, dans ses *Principes de la philosophie*, en fera un Soleil avorté, avec un feu central, et se penchera sur sa formation (en cela il est "*le père d'une géologie primitive*" : Gohau, 1990a, p.72), qu'il suppose courte en durée, avec des étapes rigoureusement déterminées et s'achevant sur un état stable qui est encore celui qu'elle présente (Gohau, 1990a, p.102-103). Descartes rompt avec le temps réversible ou immuable de ses prédécesseurs : il fait entrer la Terre dans une histoire sagittale (soit irréversible) au terme de laquelle elle est arrivée.

1.2. L'"histoire" de la Terre selon Descartes

L'"histoire" de la Terre selon Descartes relève d'une explication déterministe : "*la conjecture cartésienne prétend déduire le monde actuel de la seule connaissance des "lois de la nature" et de "suppositions" sur la disposition que pouvait avoir au commencement les "parties de la matière", en choisissant la "plus simple" des hypothèses*" (Gohau, 1990a, p.103). Elle renvoie aux explications du monde ou d'une partie du monde qu'ont cherché à faire les physiciens, en définissant et en utilisant **des lois de la nature universelles**. Cette tradition trouve son origine dans la révolution copernicienne, qui unifie les mondes supralunaire et sublunaire, et se consolide avec les travaux de Newton (1642-1727) et de Laplace (1749-1827). La connaissance des lois de la nature et de l'état initial d'un objet suffirait à appréhender son état antérieur et son état postérieur : "*envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur et comme la cause de celui qui va suivre*" (P. S. Laplace, 1819, p. 3-4, cité par G. Gohau, 1997, p. 141). Peut-on alors parler d'une histoire de la Terre ? Non, en ce sens que tout est déterminé, l'avant comme l'après. D'autre part, il n'y a **pas de recours à des traces**. On peut enfin remarquer que le temps n'a pas vraiment d'importance, sinon comme cadre absolu de l'explication : c'est donc plutôt un temps de "physicien". Ce fut l'ambition de Descartes et de ses successeurs que d'expliquer la Terre de cette manière, mais elle sera abandonnée définitivement par les géologues de la fin du 18^e siècle (Gohau, 1997, p. 141).

1.3. Le passé de la Terre dans une approche "historique"

Le souci des géologues depuis la fin du 18^e siècle sera, non point de rejeter les lois de la nature, mais de prendre également en compte **des témoins du passé**, notamment des fossiles, qu'ils qualifient d'"archives de la nature" (Gohau, 1997, p. 141-142). Descartes (1596-1650) ne l'avait pas fait mais certains de ses contemporains - citons Sténon (1638-1686) et Hooke (1635-1703)- l'initieront : Sténon par exemple reconnaît dans les fossiles des êtres vivants du passé et les utilise comme indicateurs de faciès anciens ; il étudie également les couches qui les contiennent, leur disposition ou inclinaison, dans le but de reconstruire leur histoire. Buffon (1707-1788), dans *Les époques de la Nature*, daté de 1778, s'appuie sur ces traces du passé, qu'il nomme "monuments" mais aussi sur des lois physiques (il donne une chronologie chiffrée déduite d'expériences de refroidissement de sphères de différente nature). Il dresse là une véritable histoire de la Terre, orientée et unidirectionnelle (Ellenberger, 1994, p. 215-216).

A partir des 17^e et 18^e siècles, l'histoire de la Terre prend les caractères d'une explication historique : les traces ont de l'importance et sont vues comme un état final dont il faut comprendre la production et où le temps a non seulement un rôle quantitatif (il contient l'histoire) mais aussi un rôle qualitatif (il peut jouer sur le cours de l'histoire). Car inscrire l'histoire de la Terre dans une explication historique, c'est reconnaître que son déroulement

n'était pas entièrement déterminé dès le départ, c'est prendre en compte dans ce déroulement **la contingence** qui fait dire que d'autres possibles auraient pu exister, c'est mettre en jeu des événements dont l'occurrence ne peut pas se réduire à de la causalité simple. Bref, en parcourant l'histoire de la Terre jusqu'à nous, nous avons un chemin mais cela aurait pu en être un autre, ce que Cournot (1851) illustre par l'exemple du jeu d'échecs. Gohau (1990a, p.104) cite ce philosophe : *"chaque coup influe plus ou moins sur la série des coups suivants et subit l'influence des coups antérieurs"*. Pour tenter d'approcher ce chemin¹⁴, on ne peut s'en tenir à l'état initial ou à l'état final assorti de règles, il est nécessaire de posséder des traces, "des archives de la Terre".

1.4. Une multiplicité des temps

Sans entrer dans le détail de toutes les reconstitutions faites du passé de la Terre à partir du 18^e siècle, on peut noter que quand certains comme Werner¹⁵ (1749-1817), Cuvier (1769-1832), Elie de Beaumont (1798-1874) ou encore les géologues actuels construisent une histoire sagittale irréversible, d'autres comme Hutton¹⁶ (1726-1797) place la Terre dans une histoire cyclique qui se perd dans la nuit des temps, et d'autres encore comme Lyell (1797-1875) lui confère à jamais un état global stationnaire qui écarte du même coup l'idée d'une histoire. Pourtant toutes ces reconstitutions s'appuient sur les archives que renferme la planète (les formations rocheuses crustales, les fossiles, les couches de terrain, plus tardivement les structures tectoniques, ...), voire des principes méthodologiques partagés¹⁷. Pourquoi alors des histoires différentes ? A quoi tiennent les décalages ?

2. L'approche historique et les traces

Si l'on admet que le passé de la Terre relève d'un mode d'investigation historique, sa reconstitution exige de déterminer les événements ou phénomènes qui le caractérisent. Cette reconstitution ne peut se suffire de lois intemporelles et ubiquistes ; il y a une nécessaire utilisation des traces que le passé a laissées, ce qui ne se fait pas sans difficultés.

2.1. Quelles sont les traces qui révèlent l'histoire de la Terre ?

C'est dans le présent de la Terre que nous recherchons des traces de son passé. Cela exige que nous sachions distinguer ce qui a valeur de traces du passé, ce qui est à la fois une énigme à interroger (de quels processus cette trace est-elle le résultat ?) et une clé pour entrer dans le passé. Qu'est-ce qui fait que nous porterons de l'attention à un fossile d'Ammonite et pas à un os de Seiche ? A un plissement dans un affleurement de côte rocheuse et pas à des ripple marks de zone intertidale ? A Flamanville, au contact du granite et des cornéennes et pas aux tâches "rouilles" sur le granite (C. Orange (dir), 1998, p. 102 et 111) ? Cette sélection de traces n'a rien d'évident : elle se construit en interaction avec d'autres registres empiriques (l'inventaire des êtres vivants actuels, ...) et des registres théoriques¹⁸ incluant notamment des processus géologiques (diagenèse, mouvements tectoniques, ...), des théories (la théorie de

¹⁴ Le géologue et logicien anglais W. Whewell (1794-1866) distinguait un *"actuel past"* d'un *"possible past"* (1847, III, p. 527)

¹⁵ voir le chapitre 1

¹⁶ voir le chapitre 1

¹⁷ dans le sillage de Sténon (1638-1686), *"une sorte de Champollion de la géologie"* selon Gohau, (1987a, p. 75), qui ne s'est attaché qu'à l'histoire de la Toscane mais qui a beaucoup oeuvré pour établir des bases de lecture de ces archives.

¹⁸ Nous définirons plus précisément, dans le chapitre 3, les notions de registre empirique et de registre théorique.

l'évolution des êtres vivants...). Ce que l'on peut dire, c'est que les géologues s'accordent à penser qu'un certain nombre d'objets matériels (roches, modelés, structures, ...) sont des traces intéressantes du passé.

2.2. Comment interpréter ces traces ? Avec quels outils et quelles règles ?

Si tant est que nous disposions de traces, il s'agit de savoir les "lire", de remonter d'elles aux événements et processus dont elles sont le résultat et dont elles portent le fardeau : s'appuyer sur elles pour construire un passé, dérouler ce passé pour comprendre ce qu'elles ont accumulé de lui. La tâche n'est pas aisée : elle se rapproche de celle de l'historien. Comme dans l'Histoire, la reconstruction du passé existe dans une tension entre l'impossibilité de retrouver ce qui s'est réellement passé et la proposition de possibles historiques, mais pas n'importe lesquels ; à la différence de l'Histoire, et ceci sera surtout valable à partir de la fin du 19^e siècle, quand on donnera un très grand âge à la Terre, il s'agit d'une remontée beaucoup plus lointaine dans le temps, donc sans possibilité de témoignages directs ou relatés dans des écrits.

Quelle méthodologie peut alors aider à construire une histoire possible incluant ces traces ? L'histoire de la géologie nous montre que tous les géologues ont vu un nécessaire recours à la nature actuelle et à l'observation de ce qui s'y passe, au risque de s'en détourner, contraints et forcés, par insuffisance de possibles explicatifs (c'est le cas de Cuvier " *aucun des agents que (la nature) emploie aujourd'hui ne lui aurait suffi pour produire ses anciens ouvrages*" Cuvier, 1825, p. 28 cité par Gohau (1997), p. 142). **Le présent a donc un autre rôle que celui de contenir des traces ; il est une base, une référence de modélisation du passé, un vivier de possibles géologiques.**

Les développements précédents nous permettent de pointer toute l'ambiguïté que contient le présent, puisqu'il est à la fois ce que l'on cherche à expliquer et ce qui va nous permettre d'expliquer.

2.3. Le "présent est la clé du passé" : aller au-delà des évidences

Comment le présent peut-il nous aider à reconstruire le passé ? Il nous semble que la référence au présent peut à la fois aider mais également brouiller, voire rendre impossible une reconstitution de l'histoire de la Terre :

2.3.1. Le "présent est la clé du passé"¹⁹ : une évidence

Sauf à prendre la position de Descartes (ou des physiciens), cela paraît relever de l'évidence, du truisme, de dire que dans une perspective historique le présent est la clé du passé : *"à moins de décréter que l'on va purement et simplement inventer a priori l'histoire passée de la Terre, le plus simple bon sens impose de partir des données concrètes offertes par la géographie et par le contenu du sous-sol"* écrit F. Ellenberger (1994, p.12). Devant des archives "muettes" (en apparence seulement car si elles ont valeur d'archives, c'est qu'elles ne sont pas totalement "muettes"), le géologue a-t-il d'autres moyens pour construire une histoire de la Terre tout en se maintenant dans le domaine de la science ? Assurément pas et l'histoire de la géologie nous conforte dans cette idée : à la fin du 17^e siècle et pendant le 18^e, des

¹⁹ F. Ellenberger (1994, p. 297) écrit que c'est à Geikie, un géologue écossais, que l'on doit le fameux principe "The present is the key to the past". Cet énoncé, appliqué à la philosophie de Hutton, figure dans son ouvrage *"The founders of geology"* paru en 1905.

géologues prirent des distances avec les cosmogonies, trop spéculatives à leur goût pour être scientifiques. Ceux qui se sont affranchis des géogonies et qui ont voulu se limiter à l'explication des changements dont les traces étaient encore accessibles à l'observation, *"ont tenté de le faire en recourant aux causes qu'ils voyaient agir sous leurs yeux"* (Hooykaas, p. 18-19). Ce fut le cas de Cuvier (1769-1832) et même de Buffon (1707-1788). Depuis, la démarche du géologue contient donc une part d'inférence à partir du présent, de ce qui, des processus en oeuvre aujourd'hui, lui est connu et accessible. On saisit l'intérêt et l'évidence de se doter *"d'une vaste batterie, (d') un riche assortiment de "causes actuelles" connues à fond, (d'un) un riche trousseau à clefs à essayer dans les vieilles serrures, sans forcer, prudemment"* (Ellenberger, 1996, p.66). Mais à quelles conditions cela est-il performant ? et suffisant ?

2.3.2. Une limite : la nature actuelle paraît stable

A nos yeux d'hommes, à l'échelle de temps humaine, la nature actuelle ne change pas vraiment, ce qui peut faire que pour expliquer les changements anciens, nous recourions à des phénomènes autres, en nature et en intensité, que ceux que nous voyons agir (Gohau, 1990, p.318). Autrement dit, s'appuyer sur la nature actuelle risque de conduire à penser qu'elle ne peut pas servir.

Nous voyons donc qu'une méthodologie assise sur "le présent comme clé du passé" est difficile à tenir parce qu'elle seule ne peut pas toujours conduire de manière évidente à une histoire acceptable. Le risque est grand alors de rechercher des causes non agissantes à l'heure actuelle et autrement plus efficaces ; ou alors de projeter abusivement tout le présent sur tout le passé. Et quand l'histoire des sciences nous montre que des experts aussi fameux que Cuvier (1769-1832), Lyell (1797-1875) ou Elie de Beaumont (1798-1874) ont utilisé le présent et produit des reconstitutions du passé totalement différentes, cela signifie l'actualisme des scientifiques est plus sophistiqué que cet actualisme de bon sens.

2.3.3. La nécessité d'un pari sur le passé

Ellenberger écrit qu' *"il faut impérativement un complément à cette vérité première : à savoir un "pari sur le passé" (1994, p. 12). En d'autres termes, il y a à construire un monde de possibles qui n'est pas forcément l'équivalent du monde actuel. Le présent joue un rôle complexe en ce sens qu'il nous offre à la fois des traces du passé (ce qui est à expliquer : des roches, des modelés, des structures) mais également des processus en action dont on peut se servir pour expliquer les traces ; et ces processus ne sont une clé du passé qu'à condition que l'on pense qu'ils ont existé autrefois. C'est alors qu'il peut y avoir plusieurs présupposés, plusieurs paris sur le passé, selon que l'on est actualiste ou catastrophiste. Notons que partir de l'idée que la nature a toujours fonctionné comme elle fonctionne maintenant, autrement dit utiliser l'actualisme comme axiome méthodologique, paraît a priori plus simple. Mais, comme l'a écrit Ellenberger, d'autres paris pourraient exister : "Au départ, l'actualisme n'est jamais qu'un pari sur le passé, une pure hypothèse de travail ; à nous de voir si sa mise en application "marche". Il est tout aussi légitime en principe de postuler d'autres hypothèses, telles que l'intervention de crises, de catastrophes, d'agents inconnus dans le monde actuel, etc..."(1996, p. 66).*

2.3.4. Un pari sur le passé, soit uniformitariste (ou actualiste), soit catastrophiste

Un retour à l'histoire de la géologie conduit à faire quelques remarques quant à ce pari sur le passé, qu'il soit actualiste ou catastrophiste.

Le risque d'une mise en catégorie trop hâtive des géologues

Ellenberger (1988, p.323) écrit que *"les choix opposés du catastrophisme ou de l'uniformitarisme se sont imposés à travers les siècles à des auteurs indépendants les uns des autres, sans que la raison de l'option apparaisse toujours clairement"* et *"qu'il serait trop simple de préjuger que le biblicisme entraîne de soi le catastrophisme, et que la libre pensée conduit à la solution de l'uniformité actualiste"*. On doit donc se garder de ranger trop hâtivement la communauté des chercheurs en deux camps avec d'un côté, les catastrophistes vus comme des dévots et/ ou des adeptes du temps court et/ ou des archaïques ; et de l'autre, les actualistes considérés comme des athées, et/ ou des partisans des longues durées géologiques, et/ou des novateurs.

Voici quelques exemples qui doivent permettre d'éviter cette caricature : Cuvier (1769-1832) soucieux des traditions religieuses est catastrophiste, mais le prêtre italien Lazzaro Moro (1687-1764) est actualiste ; Bourguet (1678-1742) et De Luc (1727-1817) sont tous deux catastrophistes, le premier dans du temps court, le second dans du temps long.

Un pari sur le passé qui s'affirme dans l'émergence de la géologie

Ce que nous remarquons, c'est que la mise en jeu de l'actualisme et du catastrophisme (et les débats associés) accompagne l'émergence de la géologie (au 17^e siècle, avec les travaux de Sténon, se fondant sur des observations de terrains, au 18^e siècle avec De Luc et Hutton, et au 19^e siècle avec Cuvier, Lyell, Elie de Beaumont), lorsqu'il s'agit d'expliquer les changements géologiques par autre chose que des interventions divines, surnaturelles ou trop imaginaires (ce que faisaient les cosmogonies²⁰) et dès lors que les explications déterministes paraîtront insuffisantes (Descartes).

Que recouvrent les doctrines de l'uniformitarisme (ou de l'actualisme) et du catastrophisme ? En quoi se distinguent-elles ? Comment ces théories envisagent-elles les changements géologiques ?

3. L'uniformitarisme (ou actualisme) méthodologique

Il nous faut réfléchir plus précisément sur ce que l'on entend par actualisme²¹, qualifié encore d'uniformitarisme.

3.1. Essai de définition de l'uniformitarisme méthodologique

C'est au géologue et logicien anglais Whewell (1794-1866) que l'uniformitarisme doit son nom (1832). Whewell caractérise ainsi la doctrine de Lyell (1797-1875) (et par opposition, il nomme la doctrine opposée catastrophisme), bien que cette doctrine soit antérieure à ce grand

²⁰ voir par exemple les cosmogonies de Burnet, Woodward et Whiston auxquelles renvoie Hooykaas (1970, p. 18).

²¹ vs catastrophisme

géologue (Hooykaas, 1970, p. 18). En effet, la mobilisation explicite et critique des causes actuelles, comprises comme des agents encore à l'oeuvre aujourd'hui dans la nature, se rencontre dans des écrits de la fin du 18^e siècle (8^e lettre de de Luc à Delamétherie (1790) ; Ellenberger, 1987, p. 200) et du début du 19^e siècle (Discours préliminaire des Recherches sur les ossements fossiles (1812) de Cuvier (1769-1832) ; Gohau, 1997, p. 140). Pour sa part, c'est en 1830 que Lyell annonce sa méthodologie de reconstitution du passé quand il présente son ouvrage intitulé *Principles of geology* comme *"une tentative pour expliquer les modifications passées de la surface de la Terre par référence aux causes actuellement en opération"* (Hooykaas, 1970, p. 13).

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."*

Il y a dans "l'actualisme" (ou "l'uniformitarisme") de la complexité et de l'ambiguïté. S'agit-il d'une doctrine ou d'un principe méthodologique ? Pourquoi les uns parlent-ils de causes quand les autres invoquent des lois ? A quelles causes actuelles ou à quelles lois se réfère-t-on ? Voilà autant d'éclaircissements que nous nous proposons de faire, en nous aidant notamment des travaux de Gohau (1997), Gould (1965, 1990) et Hooykaas (1970, p. 71-77).

L'emploi du vocable de "lois" est une première source d'ambiguïté : de quelles lois s'agit-il ? De lois de la nature ? De lois physico-chimiques ? Les premières sont-elles l'équivalent des secondes ?

Gohau, qui dans l'énoncé que nous avons repris précédemment parlait de lois, met en jeu des causes géologiques dans un écrit plus récent (Gohau, 1997, p. 140). Voici comment il présente alors le "principe des causes actuelles" : ce principe *"affirme que le présent est la clé du passé, ou que les causes qui ont agi au long de l'histoire de la terre ne diffèrent point essentiellement des causes géologiques actuelles (érosion, transport, sédimentation, métamorphisme, volcanisme, plissement et soulèvement des montagnes). La doctrine correspondante se nomme actualisme"*.

Les lois précédemment énoncées sont remplacées par des causes géologiques. Nous nous sommes interrogée sur ce remplacement. Les analyses de Hooykaas (1970), reprises par Gohau (1997, p. 142) nous paraissent éclairantes. R. Hooykaas distingue "causes physiques" de "causes géologiques" et précise qu'aucun géologue n'a envisagé une variation des premières au cours des temps géologiques. Les "causes physiques" correspondent aux lois physiques et chimiques les plus élémentaires, valables en tous temps et en tous lieux. Ce sont par exemple les lois de la radioactivité ou encore les lois de Newton. Quant aux causes géologiques, qualifiées également de causes secondaires (quand les causes physiques prennent alors le statut de causes primordiales), elles correspondent à des processus géologiques comme l'érosion, la sédimentation, le volcanisme, ce dont parle Gohau dans le deuxième extrait. C'est à leur sujet qu'ont porté des discussions fortes entre géologues depuis le 17^e siècle. Ce qui est donc mis en débat dans le principe de l'actualisme n'est pas l'exportation au passé des lois physico-chimiques, que tout un chacun reconnaît comme intemporelles et ubiquistes, mais celle **des causes géologiques encore agissantes**. D'où l'intérêt du deuxième énoncé de Gohau, qui se centre sur les seules causes géologiques.

Deux types de causes actuelles : (Hooykaas, 1970, p. 71- 77)	Ce qui est partagé ou mis en débat chez les géologues depuis le 17^e siècle :
1) causes primordiales = causes physiques = lois physiques et chimiques Exemples : lois de Newton, lois de la radioactivité	Pour tous les géologues, ce sont des lois universelles dans le temps et l'espace
2) causes géologiques = causes secondaires = phénomènes géologiques avec une certaine complexité Exemples : érosion, sédimentation, volcanisme, métamorphisme, volcanisme, plissement et soulèvement des montagnes (Gohau, 1997, p. 140)	Chez les géologues, des discussions et controverses portent sur les variations ou non de leur nature et/ ou de leur "énergie" dans le temps et l'espace.

Figure 2.1 : Deux types de causes actuelles

En résumé, **l'actualisme** peut d'abord être compris comme **un principe méthodologique** aidant à reconstituer le passé de la Terre jusqu'à son état actuel. Il s'énonce 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**.

Si donc on admet la continuité dans l'exercice des causes, si la référence pour la modélisation du passé est l'actuel, et que dans cet actuel, rien de brutal ne se produit, les changements passés n'ont pu être que continus et progressifs, c'est-à-dire être considérés comme la succession et l'addition d'une infinité de petits changements, sans à-coup ou catastrophe. Ainsi, **le continuisme** (Gohau, 1987a, p. 160) mais également **le gradualisme** sont deux aspects de la thèse actualiste. D'autre part, puisque les causes actuelles ont des effets plutôt lents, il est nécessaire de recourir à **des durées immenses** pour obtenir ces effets.

Faisons par exemple fonctionner l'actualisme, pour expliquer la disparition de montagnes anciennes : on peut penser à leur soumission à l'action érosive continue et prolongée des eaux de surface et du gel (causes actuelles et principe d'uniformité). Cependant cette action érosive des eaux superficielles et du gel, bien caractérisable de nos jours, ne donne pas d'effets spectaculaires immédiats en termes d'arasement de montagnes. Il est nécessaire de la perpétuer sur un **temps long** pour que ces grands effets existent.

Référence à l'actuel d'un côté, avec le secours éventuel du temps long. Et interprétation des traces de l'autre. Or des difficultés d'application du principe d'uniformitarisme peuvent se présenter si des traces anciennes évoquent des discontinuités (exemple : une couche lacustre reposant sur une couche marine). Comment s'en sortir en gardant le même outil ? En prenant le risque de considérer ces traces comme des legs incomplets de la nature ; on s'attachera alors à rechercher des preuves de l'existence de formations intermédiaires (depuis lors évincées) qui

permettront de les relier dans un processus progressif (voir C. Prévost in Gohau, 1995, p.78-79 ; Gohau, 1987a, p. 159). C'est ce que pensa Lyell. Gould se fait son interprète quand il écrit : *"regardons derrière les apparences concrètes, et essayons d'y découvrir les signes indubitables du gradualisme, car le paysage géologique est partout si criblé d'imperfections que les transitions insensiblement accomplies ont été dégradées, émiettées, jusqu'à nous donner l'impression d'une discontinuité"* (Gould, 1990, p. 214).

En d'autres termes, le principe des causes actuelles est un outil plus compliqué dans son utilisation qu'il n'en a l'air, car d'un côté, il est très exigeant, par les contraintes "cachées" (continuité et gradualisme, temps long) qu'il impose et de l'autre, parce qu'un certain nombre de traces à expliquer (celles qui expriment une discontinuité) pousseront à se détourner de son emploi. C'est quand son usage est devenu trop difficile que des géologues ont recouru à des causes anciennes différentes, en nature et/ ou en intensité, de l'actuel. Nous verrons plus loin dans ce chapitre quelques exemples.

3.2. Uniformitarisme (actualisme) méthodologique et uniformitarisme doctrinaire

Nous raisonnions dans le cadre d'un **premier pari** sur le passé : actualiste ou catastrophiste, qui est **lié à l'utilisation ou non du principe méthodologique de l'actualisme (ou uniformitarisme)**. Mais l'histoire des sciences nous montre qu'un autre "pari" s'ajoute à celui-ci dans la reconstitution d'une histoire de la Terre. Ce pari se joue sur l'idée que l'on se fait de l'évolution de la Terre au cours des temps géologiques. Deux options existent : une première qui suppose que la Terre reste globalement inchangée (ce qui ne veut pas dire qu'elle est immuable, figée) : c'est la **conception stationnariste**, qui fut notamment celle de Lyell (1797-1875) ; une autre qui admet qu'elle évolue et change globalement d'aspect : c'est la **conception directionnaliste**, à laquelle adhérait par exemple E. de Beaumont (1798-1874).

Gould (1965, 1990) a particulièrement étudié la double dimension de l'uniformitarisme ("*a dual concept*", 1965, p. 223), en approfondissant en particulier les travaux de Lyell. Il distingue en effet le "*substantive uniformitarianism*" (l'uniformitarisme substantiel), et le "*methodological uniformitarianism*" (l'uniformitarisme méthodologique). Le "*substantive uniformitarianism*" est une théorie testable portant sur les changements géologiques. Cette théorie, réfutable et réfutée, sous-tend non seulement l'uniformité du rythme des changements géologiques : ils sont lents, réguliers, progressifs dans l'espace et le temps ; mais aussi l'uniformité de l'état physique de la planète : "*le changement est un phénomène continu mais qui n'aboutit nulle part*" écrit Gould (1990, p. 198) . Elle exprime donc l'uniformité de la variation mais aussi celle de ses effets.

Nous savons par ailleurs (Canguilhem, 1983, pp. 165-167) que les méthodes sont étroitement liées à leur contexte d'utilisation. Nous pouvons donc penser que selon la conception de l'évolution de la Terre que l'on a, le principe de l'actualisme ne sera pas utilisé de la même manière et qu'il n'aura pas forcément la même efficacité. Puisque deux types de conceptions sur l'évolution de la Terre peuvent exister, comment se combinent alors l'uniformitarisme méthodologique à chacune de ces options ? Pour répondre à cette question, nous choisissons de nous référer à une période de l'histoire de la géologie, le 19^e siècle, où les points de vue stationnarisme et le directionnalisme ont été défendus par des géologues de renom. En arrière plan, nous retrouvons une réflexion sur l'actualisme et le catastrophisme.

4. Uniformité des causes géologiques, et stationnarisme (steady state) du globe

Nous tentons, dans cette partie, de montrer comment un pari actualiste méthodologique peut se conjuguer à un deuxième pari qui serait de penser que la Terre n'évolue pas, qu'elle garde globalement la même physionomie : nous dirons pari "stationnariste", ce que Gohau appelle "modèle stationnariste" (Gohau, 1999, p. 19). Deux figures marquantes de l'histoire de la géologie entrent dans ce cadre : Hutton (1726-1797), dont nous avons déjà parlé dans le chapitre 1, et Lyell (1797-1875). Voyons comment leurs présupposés théoriques et le recours à la méthode actualiste leur permettent de régler les deux grands problèmes de la communauté scientifique de leur époque (formation des chaînes de montagnes et renouvellement des êtres vivants).

4.1. La Terre change peu, dans un contexte d'évolution cyclique (Hutton)

Hutton (1726-1797) traite la Terre comme un objet physique parfait, certes soumis aux lois de la nature, mais inscrit dans la finalité d'offrir un habitat aux êtres vivants. Il s'emploie à expliquer l'état présent du globe mais aussi les changements qui l'affectent. Comme le rappelle Hooykaas (1970, p. 48), il part de l'hypothèse que *"les opérations de la nature ont toujours été et sont encore aujourd'hui égales et régulières"* : il met bien en oeuvre de l'actualisme méthodologique, exclut les causes extraordinaires mais convoque le temps long pour transformer l'inefficace à l'oeil humain en efficace à l'échelle des temps géologiques (Gould, 1990, p. 147). Voici ce que déclare Hutton : *"L'objet que j'ai en vue est de montrer, premièrement, que les opérations terrestres naturelles, poursuivies pendant un temps suffisant, seraient adéquates aux effets que nous observons"* (Hutton cité par Hooykaas, 1970, p. 50). Le problème vient de la tension entre la finalité²² qu'il donne à la Terre (qui exige une certaine stabilité de son état) et les changements qui l'affectent et qu'il perçoit : ainsi la destruction lente des reliefs par l'érosion qui à terme pourrait conduire à la ruine de cette planète. Pour lui garder son aspect de perfection globale depuis la nuit des temps et pour toujours, Hutton doit penser à un mécanisme de régénération de ces reliefs et il imagine une évolution cyclique de la Terre. L'histoire de la Terre se décrit donc comme une succession de cycles identiques qui se perpétuent depuis la nuit des temps et pour toujours. Chaque cycle comprend 3 phases se succédant progressivement (voir le chapitre 1).

Certes, la Terre selon Hutton change mais dans des limites compatibles avec l'accueil des êtres vivants et selon des processus qui conduisent à retrouver des états précédemment rencontrés (réversibilité). C'est comme si le système Terre oscillait perpétuellement autour d'un état moyen jamais tenu (Hooykaas, 1970, p. 51 ; Gould, 1990, p. 133-134). Tant que les causes actuelles s'exercent, il n'y a aucune raison que cet équilibre dynamique se rompe. On a affaire à une Terre sans histoire : tout ce qui s'y passe s'inscrit dans un "mouvement" cyclique (en fait deux cycles qui vont de pair : un cycle de destruction et un cycle de rénovation, Gould, 1990, p. 135), sans rien de singulier, autrement dit sans évènement.

En résumé, nous pouvons dire que Hutton admet **une relative uniformité d'état de la Terre** (stationnarisme). Cette uniformité est continûment compromise et restaurée par l'action de **causes géologiques de tout temps égales et régulières** (uniformité temporelle de la nature et de l'intensité des causes géologiques) et dont les effets se concrétisent dans la **durée**. L'actualisme méthodologique se conjugue bien à un uniformitarisme doctrinaire.

²² Hutton inscrit la Terre dans la finalité d'être habitable en permanence par les êtres vivants.

On remarque donc que Hutton, par la causalité téléologique, n'a pas à se poser le problème de renouvellement des espèces. De tous temps, la vie peut exister et se maintenir. D'autre part, et en cela il est un pionnier, il donne une explication à la formation des montagnes : elles résultent d'un soulèvement des couches provoqué par l'échauffement et la fusion engendrés par l'accumulation de sédiments au fond des mers.

4.2. La Terre est dans un état stationnaire ou *steady state*²³ (Lyell)

Le géologue écossais Lyell (1797-1875) pense que la Terre présente une stabilité d'aspect qui concerne à la fois le monde physique (géologique) et le monde biologique. Tout comme Hutton, il est sensible aux changements qui s'y produisent continûment et qui remettent en cause cet état stationnaire. Pour le monde géologique, Lyell les rapporte à deux types de causes encore agissantes : **des causes "aqueuses"** de destruction progressive des reliefs (rivières, torrents, sources, courants et marées) et **des causes "ignées"** qui les régénèrent tout aussi progressivement (volcans et tremblements de terre) (Gould, 1990, p. 234). Pour le monde vivant, Lyell estime que, compte tenu de la permanence de l'état physique de la Terre, sa diversité et sa complexité a été de tout temps la même. S'il reconnaît que des espèces ont changé au cours des temps géologiques, il envisage des disparitions d'espèces compensées par des créations d'espèces équivalentes ou de même niveau de perfectionnement (Gould, 1990, p. 238). Disparition et création sont uniformément distribuées dans le temps et dans l'espace et elles contribuent à une uniformité du monde vivant.

Lyell, et d'une façon un peu différente de Hutton, lève donc la difficile tension entre un état stationnaire de la Terre qu'il imagine et les changements incessants qui l'affectent et qu'il observe, en considérant les changements (et donc l'action des causes) comme graduels, locaux et se compensant à l'échelle du globe.

- au niveau local, il décrit les changements selon un cycle avec des phases (destruction des reliefs/ accumulation/ restauration des reliefs). Localement, la Terre de Lyell a une histoire cyclique sans catastrophe.
- au niveau de la planète, il conçoit que, d'un lieu à un autre, toutes les phases du cycle sont à l'oeuvre simultanément. Globalement, la Terre de Lyell n'a pas d'histoire. En passant d'un petit espace (une partie de la surface de la Terre) à un plus grand (la Terre entière), Lyell évacue l'histoire de la Terre.

Finalement, Lyell admet aussi bien l'uniformité du monde physique que du monde vivant. Mais des changements graduels l'affectent (uniformité du rythme des changements ou gradualisme) qu'il explique par l'uniformité des lois de la nature et des modes opératoires (Gould, 1990, p. 192 ; Gohau, 1999, p. 20 : il fait référence à Gould, 1965).

Malgré la cohérence de son système explicatif, il est un problème qui embarrasse Lyell : c'est celui de la formation des montagnes. A défaut de pouvoir tenir la continuité et le gradualisme orogéniques à l'échelle d'une région, il les mobilise à l'échelle de la Terre. Des périodes de bouleversement et de repos se succèderaient dans chaque région (donc pas de continuité locale parfaite de l'activité orogénique). Il retrouve l'uniformitarisme en prenant là encore la Terre entière : les périodes de calme et de mouvement se déplaceraient graduellement d'une région à une autre et l'énergie de l'activité orogénique serait constante dans son intensité et son existence (Gohau, 1990, p.326).

²³ C'est le paléontologue et historien britannique M. Rudwick qui est à l'origine du qualificatif de *steady state model* (Gohau, 1987a, p. 160).

4.3. Mise en fonctionnement de l'outil "uniformitarisme" (= outil "actualisme") dans le cadre du steady state

Dans un cadre théorique de steady state (explicite ou implicite), quelles traces prennent de l'importance et comment sont-elles interprétées avec l'outil méthodologique qu'est l'uniformitarisme ?

On est en droit de penser que toute trace ancienne a un équivalent actuel. Travaillons sur un exemple : une couche (roche) sédimentaire contenant un type de fossile. On peut imaginer deux types de raisonnement :

4.3.1. Un actualisme méthodologique de premier niveau (ou actualisme d'analogie) qui nie le temps

Puisque la Terre ne change pas globalement, l'espèce fossilisée a un équivalent actuel en un milieu particulier. Le passé (le fossile = ce qui est à expliquer) s'ajuste à un équivalent actuel (êtres vivants qui ont une coquille comparable = ce qui sert d'appui pour expliquer). Par projection de ce présent dans le passé, quel que soit l'éloignement dans le temps de ce 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 (coquille de l'espèce fossile/ coquille de l'espèce actuelle). C'est **un actualisme méthodologique de 1er niveau**, car **de simple analogie**. De plus, il projette une partie d'actuel dans un passé aussi bien lointain que proche : c'est un actualisme qui nie le temps.

Mais que faire alors si on ne trouve pas d'équivalent actuel ? On peut s'en sortir en invoquant l'incomplétude de notre connaissance du monde actuel.

4.3.2. Un actualisme de deuxième niveau, qui exige du temps long

Prenons maintenant la roche ou la strate sédimentaire qui contient le fossile. Pour expliquer ce passé, l'analogie avec du présent peut nous paraître insuffisante. En effet, nous pouvons mettre cet échantillon en correspondance directe avec de l'actuel (boues au fond d'un bassin : même coquille dans la roche et dans la boue, même "grain" de la roche et de la boue) et reconstituer dans le passé des dépôts sédimentaires au fond d'un bassin. Mais ces dépôts sont mous, non indurés. Il nous faut expliquer la transformation de la boue en roche (ce que l'on appelle la diagenèse), avec compaction, élimination de l'eau entre les grains et soudure des grains. Si nous nous référons à ce qui se passe actuellement, l'équivalence est moins immédiate : il n'y a pas, à l'échelle du temps humain, de lieu de "compaction" des boues tel que nous récupérons des roches sédimentaires. Cela ne veut pas dire que la diagenèse ne s'effectue pas. Si, elle se fait mais elle prend beaucoup de temps. Pour expliquer la diagenèse qu'a subie la boue (et aussi l'ampleur de la couche sédimentaire ancienne), il nous faut recourir à de l'actualisme assorti de longues durées. Nous dirons qu'il s'agit d'**un actualisme méthodologique de 2è niveau** : il mobilise de l'analogie mais aussi **du temps long**.

4.3.3. L'actualisme de 2è niveau peut se compliquer

En effet, comment expliquer par exemple la discontinuité d'une couche sédimentaire à une autre (une strate marine sur une strate lacustre). Il y a problème parce que cela s'oppose à la

permanence des causes : on devrait avoir une transition graduelle de l'une à l'autre. Ce cas s'est présenté à Lyell (Gould, 1990, p. 213) qui, en uniformitariste pur et dur, propose de regarder derrière les apparences concrètes : *"les transitions insensiblement accomplies ont été dégradées, émiettées, jusqu'à donner l'impression d'une discontinuité"* écrit Gould en se faisant son interprète (Ibidem, p.214). L'explication s'enrichit de processus encore à l'oeuvre actuellement (l'érosion) mais dont les effets ne se comprennent là encore qu'avec du temps long.

4.3.4. Conclusion

En résumé, les explications géologiques dans le cadre du steady state mettent en jeu **deux niveaux d'actualisme** :

- **Un actualisme de premier niveau** qui réfère directement la trace à un équivalent actuel (**actualisme d'analogie**). Cet équivalent actuel va servir d'appui pour l'explication.

- **Un actualisme de deuxième niveau** qui va faire partie de l'explication. Pour passer d'un environnement aquatique ancien avec êtres vivants à une strate fossilifère, l'explication fait intervenir de la diagenèse et de la fossilisation progressive, référée à un processus se produisant encore de nos jours mais non perceptible à l'échelle humaine. Pour le rendre possible, l'explication se dote du temps long. Et si, de toute évidence, la trace permise par ce processus présente encore un caractère à valeur de discontinuité (exemple : passage brutal d'un type de couche à un autre) ou si elle ne se superpose pas exactement à la trace réelle, l'explication va tenter de transformer cette discontinuité en une continuité, ou de transformer la trace espérée en trace réelle, en ajoutant à l'explication un autre phénomène encore actuel nécessitant du temps long (exemple : érosion qui sape une transition progressive entre strate), ou en modifiant l'échelle d'étude et donc en ajoutant de l'espace (ce qui paraît discontinu en un lieu ne l'est pas d'un lieu à l'autre ou à l'échelle de la Terre). Il y a là une reconsidération de la trace, vue comme un legs imparfait (Gould, 1990, p. 216). Elle est prise avec ce qu'elle montre mais aussi avec ce qui lui manque (bien sûr, si elle est par trop incomplète ou trop sommaire, il convient d'abord de l'enrichir) ou ce qu'elle cache.

On le voit, **cet actualisme de 2^e niveau est plus complexe**. Il dépasse le simple recours à des analogies à de l'actuel, et il considère la trace comme un témoin du passé porteur du fardeau d'une histoire.

5. Uniformité des causes géologiques et directionnalisme

Hormis le stationnarisme, il est un autre pari (réfutable par les archives) que l'on peut tenir sur la physionomie de la Terre : c'est de penser qu'elle évolue, qu'elle change par accumulation des effets des causes géologiques. On est alors dans un schéma directionnaliste (ou évolutionniste), qui nécessairement inscrit la Terre dans une flèche du temps irréversible. Plusieurs cas peuvent se présenter et l'histoire de la géologie nous en donne des exemples.

5.1. Les différents types de directionnalisme

Il est possible de distinguer deux types de directionnalisme.

5.1.1. Le directionnalisme régressif

La Terre a évolué jusqu'à son état actuel, qui représente l'achèvement de cette évolution. Le courant neptunien (J. A. De Luc, 1727-1817) , D. G. de Dolomieu (1750-1801) et A. G. Werner (1749-1817) participe de ce directionnalisme : les roches crustales sont le produit d'une précipitation échelonnée qui a eu lieu au sein d'un océan en retrait progressif. Tout va dans le sens d'une régression : baisse du niveau marin, enfouissement de roches jusqu'à épuisement des eaux. *"L'histoire de la terre de Buffon et celle des neptuniens avait quasiment son terme dans l'état actuel du globe. La flèche du temps venait se briser sur notre époque"* (Gohau, 1990, p. 328 ; 1987, p. 169). En fait, on est plus sur l'idée d'une formation de la Terre que sur son histoire. (Gohau, 1987, p. 123)

5.1.2. Le directionnalisme progressif

Dans un schéma de directionnalisme progressif, l'évolution de la terre a existé, existe et existera encore. Le présent n'est qu'un point d'une histoire évolutive dans laquelle la terre a un passé mais aussi un avenir qui comporte sa part d'édification de roches, de structures terrestres, de renouvellement des espèces d'êtres vivants.

Pour ce qui est de la formation des chaînes de montagnes, les propositions d'Elie de Beaumont s'inscrivent dans un tel directionnalisme. On peut dire la même chose des explications de Cuvier sur le renouvellement des espèces. Nous en reparlerons plus loin.

Nous avons écrit que l'actualisme était nécessairement pris en compte par tous les géologues. Mettons en fonctionnement cet outil et voyons son opérationnalité dans le cadre du directionnalisme. Pour cela, les propos de Gohau (1990, p. 328) nous orientent : *"D'une certaine façon, le directionnalisme progressif est actualiste, puisque, à la différence du régressisme delucien, il postule l'uniformité des lois de la nature. Simplement, il ne peut se résoudre à étendre ces lois aux "coupures" entre époques. La fonction de l'uniformitarisme sera de contraindre l'esprit à pareil effort "*. Approfondissons-les dans le cas des deux directionnalismes.

5.2. Difficulté de tenir la méthode actualiste dans un directionnalisme régressif

La théorie neptunienne exprime un directionnalisme régressif. Elle rassembla bon nombre de savants de la deuxième moitié du 18^e siècle (le système neptunien naît vers le milieu du 18^e siècle mais l'idée est ancienne (Lucrèce). Ellenberger, 1994, p. 268). Werner (1749-1817), en est un des plus prestigieux porte-parole et De Luc (1727-1817) est un neptuniste convaincu. Cette conception explique la formation et la superposition de toutes les roches de la croûte (y compris les granites, les gneiss et les basaltes) par une précipitation échelonnée des constituants d'un grand océan en retrait progressif. Les roches sont donc toutes les filles de l'eau et du temps. Dans un tel cadre théorique, avec une telle loi d'évolution de la Terre et même si l'on admet la constance des lois physiques, on ne peut perpétuer dans le temps les causes géologiques car les circonstances ont changé continuellement. Sans forcément être hostile a priori à l'actualisme (Gohau écrit que Werner n'était pas anti-actualiste ; Gohau, 1987a, p. 123), on ne peut le tenir. Le liquide océanique actuel n'a plus les mêmes caractéristiques que le liquide primordial. Ce qui s'y passe ne peut pas nous renseigner sur ce qui s'y est produit autrefois. Les roches anciennes ont été formées *"par des causes primordiales qui ne subsistent plus"* (propos de De Luc repris par Gohau, 1987a, p. 122).

Ce que nous remarquons donc, c'est qu'avec le pari directionnaliste, on peut difficilement tenir le principe méthodologique de l'uniformitarisme, même si on met en jeu une certaine

continuité dans les processus et même s'il n'y a pas véritablement mise en jeu de cataclysmes. Ce qui change, c'est la nature et l'intensité des causes géologiques (exemple : la nature et peut-être même l'intensité de la précipitation océanique). De Luc met l'accent sur *"la variation de la nature des causes plutôt que sur le changement de leur intensité"* (Gohau, 1997, p. 145). De Luc est un non actualiste-non catastrophiste (Gohau 1997, p. 145) : les causes géologiques passées étaient différentes des causes actuelles, mais sans intensité démesurée.

5.3. L'uniformitarisme dans un directionnalisme progressif

Nous allons montrer que dans un cas de directionnalisme progressif, la géologie utilise les deux types d'actualisme définis précédemment (1er niveau, 2è niveau). Cela présente des difficultés qui établissent des tensions qui ont un rôle important dans la construction des problèmes géologiques.

5.3.1. Elie de Beaumont et la formation des chaînes de montagnes

Le début du 19è siècle est marqué, nous l'avons dit, par le souci de proposer une explication rationnelle à deux grands problèmes : la formation des chaînes de montagnes et le renouvellement des faunes. E. de Beaumont (1798-1874), qui s'intéresse à la formation des montagnes, a construit une théorie mettant en jeu des systèmes, ou phases tectoniques selon la terminologie actuelle (Gohau, 1987a, p. 172), autrement dit des crises de soulèvements brusques à l'échelle des temps géologiques. Pour établir ces systèmes et leur durée, il se base sur des zones où les strates rocheuses présentent des figures de discordance angulaire²⁴ et sur des zones où les mêmes strates rocheuses sont en place. Brutalité et sporadicité des mouvements, pas d'équivalent actuel de ceux-ci : on pourrait penser qu'Elie de Beaumont est de ce point de vue catastrophiste. Et pourtant, il n'est pas possible de le ranger aussi vite dans ce "camp" et de le mettre en rupture de l'uniformitarisme, et ceci pour plusieurs raisons :

- Elie de Beaumont distingue et fait alterner des périodes de calme et des périodes révolutionnaires, ces dernières ayant existé dans le passé et pouvant se reproduire à l'avenir (directionnalisme progressif). Mais quelles que soient les périodes, les causes passées sont les mêmes que les causes actuelles (les agents à l'oeuvre sous nos yeux) ; seule leur intensité change. Elie de Beaumont **s'appuie bien sur de l'actuel**. Hooykaas (1970, p. 22) le qualifie de catastrophiste actualiste.

- Elie de Beaumont, comme une partie de la communauté géologique du 19è siècle (Aubouin & al., 1968, Tome 3, p. 230), admet que la Terre se refroidit lentement et continûment (ce que ne retiennent pas les stationnaristes). En conséquence, il y a une lente et progressive rétraction de son volume (raccourcissements radiaux et périmétriques). Ce refroidissement se traduit en surface par des mouvements de réajustement de blocs crustaux : affaissements et soulèvements, pincements et déversements de formations rocheuses superficielles engendrant notamment des chaînes de montagnes. L'image d'une pomme qui se ride est souvent sollicitée, à la différence près que les rides (les reliefs) qui la marquent sont réparties au hasard alors que Elie de Beaumont voyait une émergence des chaînes de montagnes selon des directions privilégiées. Par la mise en jeu d'un refroidissement progressif de la Terre, **une cause toujours existante et d'intensité constante (voir la mesure du flux géothermique)**, dont il

²⁴ Hutton trouva, dans les discordances angulaires qu'il fut le premier à prendre en considération, une validation de sa conception cyclique de l'évolution de la Terre (dégradation/ soulèvement) (Gould, 1990, p. 100 - 105).

reconnaît une régularité rationnelle (Ellenberger, 1987), Elie de Beaumont ancre donc son explication des orogénèses dans un cadre actualiste.

- Ce que le présent ne nous offre pas, ce sont des phases orogéniques que l'on pourrait assimiler à des catastrophes. Mais cette convocation de catastrophes par Elie de Beaumont ne relève pas d'une solution de facilité ; elle vient quand l'actualisme est porté à ses limites. Car Elie de Beaumont montre son souci de se rattacher autant qu'il le peut à cette doctrine mais il déplore l'intransigeance des *"partisans exclusifs des causes actuelles"*. Des discussions ont d'ailleurs existé sur les catastrophes, mettant en jeu notamment C. Prévost (1787-1856) et Elie de Beaumont : doit-on les considérer comme fortuites ou comme des régularités ? Dans ce dernier cas, elles participent des causes actuelles. Voici, en 1850, le point de vue de Prévost, jusqu'alors actualiste convaincu et chef de file de l'école actualiste française (cité par Ellenberger, 1987, p. 203) : *"Les causes actuelles ne sont pas seulement celles que journellement nous voyons agir d'une manière lente et continue, ce sont aussi celles qui, accidentellement, violemment et subitement, produisent des effets insolites qui n'ont cependant rien de contraire aux lois qui paraissent actuellement régir le monde physique..."*. On voit se construire un **uniformitarisme englobant les catastrophes qui se démarque de celui de Lyell**. Cet uniformitarisme prend des libertés avec le gradualisme et la continuité des changements : pour reprendre l'expression d'Ellenberger, c'est de l'actualisme non quantitatif (Ellenberger, 1987, p. 202).

- Elie de Beaumont se rapproche de l'actualisme non quantitatif de C. Prévost quand il reconnaît au cours de l'avancée de ses travaux, et sur la base de multiples observations de terrain, de plus en plus de phases orogéniques (4 systèmes en 1829, 12 en 1833, 22 systèmes en 1852 et à la même époque un pronostic de plus d'une centaine). Comme l'écrit Gohau (1995b, p. 81), Elie de Beaumont *"fait une concession en matière de discontinuité : si le nombre des catastrophes s'accroît, la violence de chacune diminue, et le phénomène d'ensemble est quasiment continu"*. En d'autres termes, que le catastrophisme devient modéré quand on multiplie ainsi le nombre de phases orogéniques ! (Gohau, 1987, p. 172-173),

En résumé, au milieu du 19^e siècle, on assiste à une installation de la communauté des géologues dans un directionnalisme progressif (et donc à la mise à l'écart du directionnalisme régressif et du stationnarisme = uniformitarisme doctrinaire). Ce positionnement théorique sur l'évolution de la Terre s'accompagne d'un réaménagement du principe méthodologique de l'actualisme. Ellenberger écrit que, à partir de 1830, *"la thèse d'une différence de nature entre le monde ancien et le monde actuel s'estompe et cède en France le pas devant celle de "causes" globalement semblables mais d'énergie pouvant être considérablement différente"*. (Ellenberger, 1987, p. 202). Elie de Beaumont, en traitant du problème prégnant de la formation des chaînes de montagnes, inscrit la Terre dans un cadre directionnaliste progressif. Son appui sur l'outil uniformitariste nous semble être de tous les instants. S'il s'en dégage, c'est contraint et forcé et pour un catastrophisme qu'il n'a de cesse de raccrocher à de l'uniformitarisme. En d'autres termes, Elie de Beaumont construit un catastrophisme méthodologique de 2^e niveau, en tension avec l'actualisme de 2^e niveau, qui se démarque d'un catastrophisme de 1^{er} niveau, purement de circonstance.

Un autre problème géologique confronta les chercheurs de la fin du 18^e siècle et du 19^e siècle aux limites d'un uniformitarisme méthodologique. Il s'agit de l'explication des blocs erratiques du Nord de l'Europe et du pourtour des Alpes, des vallées alpines et écossaises en U, et celle des vastes terrasses à gros galets. Il est difficile en effet, devant l'ampleur de ces traces à expliquer, d'y voir seulement l'action (érosion, transport, dépôt) même prolongée des eaux

courantes (**actualisme de 2è niveau**). D'où la nécessité d'augmenter au moins pendant un certain temps leur volume et leur intensité, bref d'adjoindre à l'histoire **une catastrophe**. C'est pourquoi beaucoup d'auteurs envisagèrent d'énormes flux diluviens (Ellenberger, 1994, p. 46-47). Les phénomènes périglaciaires étaient alors inconnus. Ils ne seront vraiment compris qu'au 20è siècle.

5.3.2. Cuvier et le renouvellement des faunes (et de la flore)

Un autre problème fort se pose à la communauté scientifique de la fin du 18è et du début du 19è siècle : c'est celui du renouvellement des faunes.

De nombreuses observations de terrain montrent en effet que d'une époque géologique à une autre, les faunes ont changé. Cela présente de l'intérêt dans la datation des terrains, mais cela pose aussi les problèmes de la disparition de faunes (et de flore) et celui de la création de faunes (et de flore) nouvelles. La plupart des géologues de la fin du 18è et du début du 19è siècle ont pris en charge le premier de ces problèmes, reléguant le deuxième dans le terrain de Dieu ; et devant l'apparente brutalité des disparitions, ils ont été amenés à remettre en cause l'uniformitarisme (Gohau, 1997, p. 146) au profit d'agents naturels plus puissants que ce qu'ils connaissaient. Ce fut le cas de Cuvier (1769-1832), quand il chercha à comprendre l'alternance de dépôts marins et de formations d'eaux douces du Bassin parisien. Ainsi par exemple la succession de bas en haut des couches suivantes : couche de craie marine, gypse de Montmartre formé hors de la mer, dépôt marin, meulière d'eau douce. Il n'est plus question de mettre en jeu le retrait unique d'un océan universel, il faut envisager plusieurs allers et venues de la mer (Gohau, 1990a, p.289). Ces changements de faunes, d'une couche à l'autre, vont être les supports du catastrophisme de Cuvier : il envisage des révolutions subites qui ont tantôt asséché des terrains recouverts d'eau, tantôt inondé des régions sèches : *"Ces phénomènes brutaux détruisent les faunes qui ne peuvent plus vivre dans les nouvelles conditions"* (Gohau, 1987a, p.150). Certes, même si Cuvier reste évasif quant à la nature de ces catastrophes, il n'envisageait pas vraiment des causes autres que celles qui peuvent encore se produire (avancée et retrait de la mer). Herbert Thomas, dans la préface au "Discours sur les révolutions de la surface du globe" de G. Cuvier (1985, p. 22), écrit que Cuvier *"est uniformitariste sans le savoir quand il parle des causes, et catastrophiste au regard de l'instantanéité postulée pour ces bouleversements"*. C'est un autre cas d'aménagement du cadre uniformitariste strict pour y intégrer des catastrophes. Car Cuvier, comme Elie de Beaumont, s'ancre dans l'uniformitarisme méthodologique. Illustrons cela à partir des réflexions de Hooykaas :

- G. Cuvier rejette catégoriquement les systèmes cosmogoniques de ses prédécesseurs. Pour lui la géologie est devenue scientifique quand *"elle a préféré des richesses positives données par l'observation, à des systèmes fantastiques, à des conjectures contradictoires sur la première origine des globes"* (Cuvier, Discours ..., 1825, p. 145, cité par Hooykaas, 1970, p. 19-20). Cuvier reproche donc deux choses aux cosmogonistes : leur non-recours à des données empiriques, à des "faits" ; leur absence d'appui sur les phénomènes physiques du présent. En cela, il rejoint les uniformitaristes pour rejeter le catastrophisme farfelu des cosmogonistes.

- C'est en articulant des données empiriques (exemple : couches géologiques et variation parfois rapide de ce contenu paléontologique, dislocation et renversement de masses montagneuses dans les Alpes), et agents en oeuvre actuellement (altération superficielle, sédimentation, volcanisme) même appliqués sur des temps longs et les modifications

"ordinaires" qu'ils provoquent, que Cuvier et ses disciples recourent aux catastrophes, à des causes anciennes plus intenses ou de nature différente. Cuvier infère donc autant qu'il le peut à partir de l'actuel. Cela le conduit à admettre qu'il y a des causes dont l'action se poursuit de tous temps. Mais cela ne suffit pas : il lui faut compléter cette palette de causes anciennes ayant cessé d'agir à la surface de la Terre. Ces causes anciennes sont soit plus intenses soit de nature différente que les causes actuelles.

5.3.3. Conclusion

Dans un cadre directionnaliste progressif, le catastrophisme s'oppose à l'uniformitarisme (voir plus haut), en ce sens qu'il conçoit que des phénomènes géologiques ont pu avoir à un moment donné de l'histoire de la Terre une intensité différente et de plus grande ampleur que celle que nous leur connaissons actuellement (ainsi les changements sont le fait de catastrophes, périodes d'activité paroxysmique représentant de véritables discontinuités entre périodes plus tranquilles) ou encore que des phénomènes géologiques différents, que nous ne voyons plus à l'oeuvre aujourd'hui, ont pu exister. Mais on se doit de trop caricaturer l'opposition de ces deux outils méthodologiques. En effet, **le catastrophisme trouve sens sur une base uniformitariste**, quand ce dernier atteint ses limites. Le pari catastrophiste, pour reprendre l'expression d'Ellenberger, est un choix contraint et forcé : *"Finalement, les auteurs qui s'éloignent du strict actualisme, prétendent ne le faire que contraints et forcés"* (Gohau, 1997, p. 142).

6. Conclusion

Les approfondissements précédents n'épuisent pas la réflexion sur l'actualisme et le catastrophisme, ni les exemples sur lesquels elle peut s'appuyer²⁵. Retenons cependant plusieurs points qui seront utiles pour la suite de notre étude.

6.1. Le présent joue un rôle complexe

Dans les problèmes de géologie qui mettent en jeu l'actualisme, le présent est à la fois ce que l'on explique (il porte les traces, les monuments, les archives du passé) et ce qui peut servir à les expliquer (nous pouvons y rechercher des causes encore agissantes qui nous permettraient d'expliquer les traces).

6.2. L'utilisation du présent, pour reconstituer le passé de la Terre, ne va pas de soi

L'actualisme (ou uniformitarisme) méthodologique consiste à penser que les **causes géologiques**²⁶ des changements géologiques passés ont existé et existent encore dans la nature actuelle. Son utilisation, pour interpréter des traces anciennes, se heurte à plusieurs difficultés :

²⁵ L'explication de la discontinuité faunistique et floristique des formations de la limite Crétacé/ Tertiaire aurait pu être étudiée. Elle est l'objet d'un débat actuel où l'on retrouve l'actualisme et le catastrophisme.

²⁶ Une distinction est à faire entre les causes physiques (les lois physico-chimiques), de tous temps valables et les causes géologiques (érosion, volcanisme, sédimentation, ...), discutables quant à leur permanence temporelle (Gohau, 1997, p. 140 et p.142).

- On ne peut pas exiger que la nature actuelle contienne toutes les causes géologiques ayant existé, notamment parce que les conditions de la surface de la Terre ont changé (sous l'influence des êtres vivants...): changement des circonstances, changement des causes géologiques. Il est donc possible que certaines causes géologiques se soient "éteintes". Pensons aux conditions ayant permis l'émergence de la vie. Tout laisse à penser qu'elles n'existent plus. **Le principe méthodologique de l'actualisme est donc en tension avec le directionnalisme**, qui conduit à envisager des **causes anciennes** d'une autre nature, sans qu'elles soient forcément d'une autre intensité que les causes actuelles.

- des causes encore agissantes nous paraissent insuffisantes pour expliquer certains phénomènes géologiques (exemple : le plissement des couches, la formation des chaînes de montagnes). N'est-il pas plus tentant de recourir à des causes différentes soit en nature, soit en intensité ? **L'actualisme méthodologique tente d'évacuer un catastrophisme trop immédiat**. L'introduction de longues durées d'action des causes peut aider à contrer cette tendance (actualisme de 2^e niveau).

- Gohau écrit que l'uniformitarisme combat sur deux fronts : le catastrophisme et le directionnalisme (Gohau, 1999, p. 184). Ajoutons qu'on ne peut pas exclure les causes rares (improbables). Un impact météoritique en est un exemple. C'est bien une cause "géologique" qui ne peut être ignorée, maintenant que l'on connaît mieux le système solaire (Courtilot, 1995, p. 245). **L'actualisme méthodologique peut donc se "heurter" aux causes rares**.

Le recours à l'actualisme méthodologique ne va donc pas de soi ; il présente même des limites. Mais **il est nécessaire pour penser les problèmes de la géologie** : s'il n'est pas question de l'abandonner car il permet des reconstitutions solides du passé, on doit cependant introduire une certaine souplesse dans son usage.

6.3. Deux sortes d'actualismes méthodologiques

Il paraît possible de distinguer deux sortes d'actualisme méthodologique :

6.3.1. Un actualisme de 1^{er} niveau : actualisme de simple analogie

La trace ancienne à un analogue actuel qui l'explique (par exemple une structure qui renvoie à une structure actuelle équivalente et à un processus actuel bien défini). Grâce à cette identification, on projette une structure ou un processus dans le passé, et en n'importe quel point de ce passé. **Cette première forme de l'actualisme relève de l'analogie et le temps géologique n'a pas d'importance**.

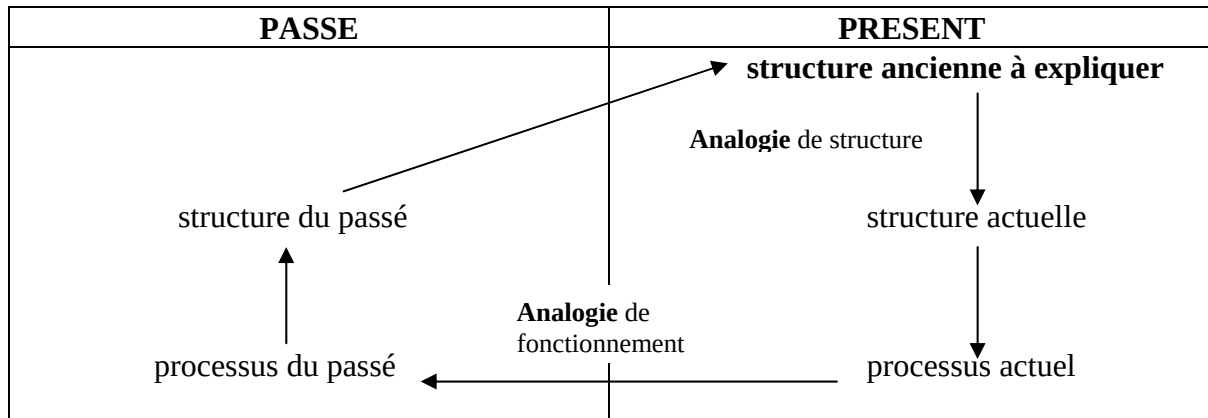


Figure 2.2. Mise en fonctionnement de l'actualisme de premier niveau (actualisme d'analogie)

6.3.2. Un actualisme de 2è niveau qui nécessite le temps long

L'actualisme de 2è niveau conjugue nécessairement les causes actuelles à du temps long. La trace ancienne renvoie à de l'actuel, qui en quelque sorte représente son état initial. C'est cet état initial que l'on projette dans le passé. Mais pour obtenir l'état actuel de la trace, il faut envisager un ou des processus (certes actuels ; exemple : fossilisation, émergence, diagenèse...) mais dont les effets palpables se produisent sur une durée qui dépasse le temps humain.. Car le processus auquel renvoie la trace, même s'il se produit actuellement, n'est pas perceptible à l'échelle du temps humain. Pour qu'on obtienne la trace que l'on cherche à expliquer, on est obligé d'admettre qu'il a fallu beaucoup de temps : **l'actualisme de 2è niveau nécessite du temps long.**

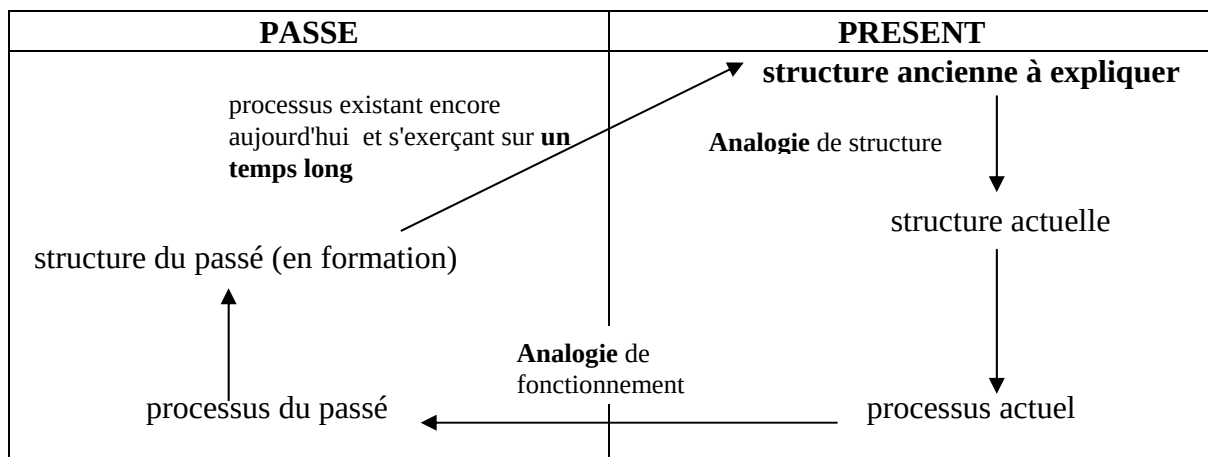


Figure 2.3 : Mise en fonctionnement de l'actualisme de 2è niveau (actualisme à temps long)

Ce deuxième type d'actualisme n'est pas sans poser problème. Il est vraisemblablement plus délicat d'emploi que l'actualisme d'analogie : il est difficile d'imaginer que de petites choses donnent un résultat si énorme. L'invocation d'une catastrophe est peut-être plus immédiate et, dans certains cas, on ne peut pas faire autrement que la convoquer. D'autre part, on peut

imaginer qu'il y a plusieurs sortes de temps long : un temps long à contenu uniforme mais peut-être aussi un temps long rempli d'autres phénomènes ou évènements.

6.4. Et deux sortes de catastrophismes

De la même manière que nous l'avons fait pour l'actualisme méthodologique, il paraît possible d'envisager deux types de catastrophisme :

- **un catastrophisme de 1er niveau** qui met en jeu une cause ad hoc 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). Certains géologues souhaiteraient y voir des régularités. Ne rejoint-on pas d'une certaine manière le cycle et donc un uniformitarisme plus sophistiqué ?

Cette clarification montre la complexité du principe méthodologique de l'actualisme et ses rapports avec le temps. Nous l'utiliserons dans l'étude du savoir savant en jeu dans les situations de classe étudiées ; nous tenterons également de repérer à quel(s) niveau(x) d'actualisme recourent les lycéens. D'une façon indirecte, cela doit nous permettre de mieux connaître certaines de leurs utilisations du temps.

Chapitre 3

PROBLEME, EXPLICATION ET TEMPS EN SCIENCES DE LA TERRE

Sommaire

1. La place de l'explication en sciences
2. Explication et modélisation
3. Explication et modélisation dans les sciences historiques
4. Problématisation dans les sciences de la Terre
5. Conclusion

Nous nous intéressons aux lycéens confrontés à la production d'explications en sciences de la Terre. Pour clarifier et comprendre leurs difficultés d'un point de vue didactique, il est nécessaire d'interroger les problèmes et les savoirs en jeu dans cette discipline. C'est pourquoi nous cherchons dans ce chapitre à caractériser les problèmes que les sciences de la Terre construisent, les explications qu'elles fournissent, les rôles du temps qui s'y jouent.

Mais nous ne pouvons nous limiter aux seuls points de départ (les problèmes qui se posent) et d'aboutissement de l'activité scientifique (les explications vues comme des solutions). Nous cherchons également à comprendre comment le géologue passe de l'un à l'autre, autrement dit comment il construit des problèmes géologiques.

1. La place de l'explication en sciences

De nombreux auteurs²⁷, philosophes et scientifiques, mettent l'explication au coeur de l'activité scientifique. Ainsi K. Popper (1991, p. 297) écrit : *"Je propose de dire que le but de la science, c'est de découvrir des explications satisfaisantes de tout ce qui nous étonne et paraît nécessiter une explication"*. F. Jacob, à la suite de Popper, compare les sciences et le mythe : *"Il s'agit toujours d'expliquer le monde visible par des forces invisibles"* (1981, p. 29). Et il précise ce qui les distingue : *"Pour la pensée scientifique, au contraire (du mythe), l'imagination n'est qu'un élément du jeu. A chaque étape, il lui faut s'exposer à la critique et à l'expérience pour limiter la part du rêve dans l'image du monde qu'elle élabore. La démarche scientifique confronte sans relâche ce qui pourrait être à ce qui est. C'est le moyen de construire une représentation du monde toujours plus proche de ce que nous appelons "la réalité"."* (Jacob, 1981, p. 30). Mais si ces auteurs mettent en avant l'explication, il ne leur est pas aisé de la définir et il existe plusieurs courants pour la penser : L. Apostel (1993, p. 207) rappelle qu'un certain positivisme a voulu la réduire à la description, qu'un positivisme plus raffiné, et il renvoie à Hempel, l'a ramenée à de la déduction à partir de prémisses générales et que certaines écoles de pensée (Meyerson, le matérialisme dialectique) se sont révoltées

²⁷ Nous citons quelques figures marquantes. D'autres pourraient également être sollicitées. Par exemple : S. Toulmin (p. 40) ou C. Hempel (1972, p. 73, pour les sciences de la nature).

contre ces tendances "réductionnistes", notamment celle qui assimile l'explication à la description.

Dans le cadre non positiviste et non empiriste qui est le nôtre, l'explication ne se réduit pas à la description et à la prédiction. C. Orange (2000a, p. 24) le rappelle, comme il souligne la nécessaire liaison entre explications et problèmes scientifiques.

Nous nous plaçons donc a priori dans la position suivante : le rôle général de la science est de produire des explications, au sein d'une communauté scientifique critique. En revenant à la classe, il nous faut penser la construction d'explication par l'élève au sein de la communauté classe, et l'étudier dans ses dimensions épistémologiques, psychologiques et socio-psychologiques. Mais comme notre recherche se limite au champ des sciences de la Terre, nous tenterons de particulariser cette position à ces sciences dont nous savons par ailleurs (chapitre 1) qu'elles existent dans une tension entre un pôle fonctionnaliste et un pôle historique.

D'un autre côté, les programmes d'enseignement des sciences de la vie et de la Terre au lycée insistent sur l'importance de faire entrer le lycéen, quelle que soit son orientation future, dans une culture scientifique élémentaire (M.E.N., 1992, p. 48 ; 1999, p. 5). C'est une finalité qui met l'enseignement des Sciences de la vie et de la Terre en rapport avec la pratique sociale de référence qu'est la recherche scientifique, et en rapport avec les enjeux éthiques et sociaux de notre époque. Pour atteindre cet objectif, les textes officiels précisent qu'il s'agit de faire que l'élève s'engage, à partir de problèmes scientifiques, dans des démarches explicatives et critiques lui permettant de construire des connaissances scientifiques rationnelles et plus largement d'être capable de choix responsables. Par l'activité scientifique qu'elles préconisent, les Sciences de la vie et de la Terre, en tant que discipline d'enseignement, reconnaissent donc l'importance de la prise en charge de problèmes explicatifs et de l'explication.

C'est donc aux problèmes explicatifs des Sciences de la Terre et aux explications qu'ils engendrent que nous allons porter de l'intérêt, car ils sont pour nous fondamentaux. Mais des recherches pourraient également être poursuivies sur d'autres problèmes, comme les problèmes techniques, dans la mise au point des expérimentations par exemple, qui peuvent mobiliser parfois longtemps un chercheur ou une équipe (C. Orange & al, 1999), et des élèves.

2. Explication et modélisation

2.1. L'importance de la modélisation en sciences

Les travaux récents en épistémologie (S. Bachelard, 1979) ou en didactique des sciences (Martinand, 1992 ; C. Orange, 1994, 1997, 2000) soulignent les relations fortes entre explication et modélisation. Ils légitiment cette position de deux façons : en étudiant l'émergence du concept de modèle dans l'histoire des sciences et en s'intéressant aux caractéristiques de la science actuelle.

- Historiquement, c'est au 19^e siècle que des modèles conçus explicitement comme des instruments d'intelligibilité du monde font leur apparition : *"Le modèle, comme concept thématique, est né de la nécessité de certains scientifiques de se représenter le réel pour résoudre des problèmes"* (C. Orange, 1997, p. 46). Pour illustrer leur émergence, on peut penser aux travaux de la thermodynamique (science de la chaleur et de l'énergie) de la fin du 19^e siècle, mettant en jeu des modèles tentant d'augmenter les possibilités explicatives de la physique classique (Boltzmann, Gibbs). Au cours de ce siècle, la physique newtonienne subit

une première crise qui aboutit à une physique des principes et à un certain positivisme. C'est dans ce contexte que Boltzmann propose, pour expliquer l'accroissement d'entropie d'un système isolé, un modèle mettant en jeu des atomes dont l'existence n'est pas alors établie (Serres & Farouki, 1997, p. 717). La modélisation procède d'un choix, parfois violemment contesté, et on comprend que la thématization de la modélisation ait alors pu se faire (C. Orange, 2000a, p. 25). La biologie n'échappe pas à ce "mouvement", sans forcément nommer modèles ce qu'elle construit (C. Orange, 1997, 45-). Ainsi, le problème de la transmission des caractères héréditaires conduit-il les biologistes de la fin du 19^e et du début du 20^e siècle à échafauder des constructions théoriques qui mettent en jeu des unités génétiques (les gemmules de Darwin, les pangènes de De Vries, les gènes de Johannsen). Ces constructions théoriques ont toutes les caractéristiques heuristiques et explicatives des modèles. Mais ce n'est pas tout : dans cette modélisation, transparait le refus de l'explication mécaniste, qui inféode trop la biologie aux sciences physiques, et aussi la crainte de retomber dans des conceptions préformistes. C'est donc que la modélisation comporte plusieurs dimensions : celle d'expliquer des problèmes du monde mais aussi celle d'affirmer une position épistémologique et philosophique. C. Orange ouvre vers cette complexité du processus quand il écrit que *"Construire des modèles c'est donc utiliser, pour la maîtrise de problèmes, des outils intellectuels liés à une représentation et associés à l'idée qu'on se fait d'une explication"* (C. Orange, 1997, p. 46).

- Pour ce qui est de la science actuelle, Martinand met en avant l'idée que *"les sciences physiques sont constructrices et utilisatrices de modèles"* et que *"la biologie et les sciences de la terre et de l'univers, dans leurs développements plus récents ne le sont pas moins"* (1992, p. 8). Et il constate que, malgré l'importance de la modélisation en sciences, les démarches de modélisation dans les activités scientifiques du collège et surtout du lycée conservent une place mineure. Certes, les modèles ne sont pas absents, mais ils sont davantage imposés, donnés comme *"des vérités indiscutables"* (Martinand, 1992, p. 8) que compris comme des constructions élaborées hypothétiques servant à prédire ou expliquer.

Les programmes de sciences de lycée (1992 et 1999) prennent de plus en plus en considération la modélisation ; ils le faisaient discrètement en 1992, mais de façon marquée à partir de 1999. Ainsi, le chapitre introductif des programmes de sciences (M.E.N., 1999, p. 5) souligne que *"L'exercice de modélisation du réel est sans doute la démarche la plus importante et aussi la plus difficile dans la démarche scientifique"*. Les développements qui sont faits définissent la modélisation dans un va-et-vient entre le concret et l'abstrait, un va-et-vient coûteux intellectuellement en ce sens qu'il exige l'extraction d'une représentation simplifiée du monde réel et le recours à des langages symboliques qui peuvent être élaborés (diagrammes, schémas, ou expressions mathématiques).

Nous retenons de ces investigations historiques et didactiques (Martinand, C.Orange mais également Johsua et Dupin, 1989 et 1993) que, l'explication et la modélisation sont au coeur de l'activité scientifique et que la construction d'explications scientifiques se comprend comme une activité de modélisation ; d'autre part, alors que les programmes deviennent de plus en plus incitatifs et explicites en la matière, il y a un grand décalage entre la signification que prend cette activité en classe de sciences au lycée (et au collège) et dans la recherche scientifique. Dans son exportation à la classe, le concept de modèle semble faire l'objet d'une "chosification" et d'une "dogmatisation", ce qui met à l'écart toute la dynamique de sa construction, ce qui le vide de sa fonction heuristique ou prédictive, ce qui lui enlève son caractère évolutif mais aussi ce qui le déconnecte de ses fondements métaphysiques. Nécessairement, ce paradoxe nous conduit à interroger ce que recouvre la modélisation.

2.2. Les caractères de la modélisation dans les sciences fonctionnalistes

Pour les didacticiens des sciences, modéliser c'est **construire et mettre en relation dynamique deux registres** : un registre empirique et un registre des modèles (Martinand, 1992).

- **Le registre empirique** (ou "*monde des faits et des phénomènes*" ; C. Orange, 2000b), est constitué de faits et de phénomènes du monde que l'on doit prendre en compte ou expliquer dans le cadre du problème étudié.

- **Le registre des modèles** (ou "*monde des explications*" ; C. Orange, 2000b) imaginés, c'est-à-dire des constructions explicatives rendant raison de certains faits et phénomènes du registre empirique.

De la mise en relation des deux registres, il résulte **une construction explicative (une explication, un modèle)** qui représente une solution au problème explicatif.

Il est important de noter que le registre empirique et le registre des modèles ne sont pas donnés, mais qu'ils sont construits. Leur co-construction et leur mise en relation se fait dans le cadre de **références explicatives** (Canguilhem, 1988), sorte de panoplie d'explications générales (car non inféodées à un domaine précis) et de modèles possibles, disponibles (on sait habituellement les manier), envisageables dans le cadre du problème pris en charge, même s'ils sont en grande partie implicites car non conscientisées. C. Orange (1994, 1997) en fait un troisième registre : **le registre explicatif** : "*c'est le monde qui donne sens au modèle et permet de le manipuler*".

Le schéma suivant présente les différents registres en jeu dans la modélisation, ainsi que les relations qu'ils entretiennent. Il s'inspire du schéma de mise en relations de ces registres de C. Orange (1997, p. 40) : il en reprend les interactions entre le registre empirique et le registre des modèles. Il s'en distingue par le placement du registre explicatif, pour nous plus englobant. C. Orange établit des relations entre le registre explicatif et le seul registre des modèles. Dans la mesure où le registre empirique est un registre construit, il y a à penser qu'il a aussi à voir avec le registre explicatif.

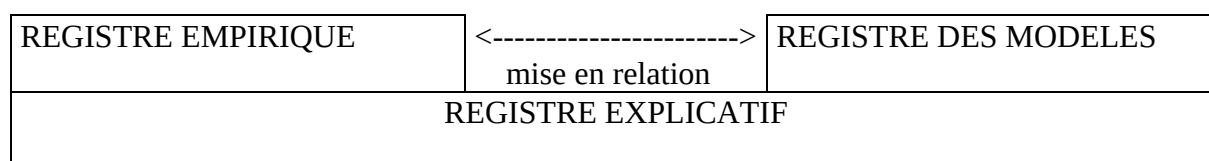


Figure 3.1. Les différents registres en jeu dans la modélisation

Les développements précédents montrent que nous nous situons dans un courant de recherches qui privilégie l'approche épistémologique de la modélisation. En l'état actuel des travaux en didactique des sciences de la vie et de la Terre, nous remarquons que ces approfondissements sur la modélisation ont surtout concerné les sciences fonctionnalistes et plus particulièrement la biologie. Cette façon de voir s'applique-t-elle aux Sciences de la Terre dans leur double composante, fonctionnaliste certes, mais aussi historique (chapitre 1) ? Y a-t-il des différences ? Essayons maintenant de caractériser la modélisation, en revenant plus précisément aux sciences de la Terre. Nous nous proposons de le faire par le biais de

l'étude de deux exemples, un en rapport avec la géologie fonctionnaliste et un en rapport avec la géologie historique.

2.3. Un exemple de modélisation en géologie fonctionnaliste

La recherche d'une explication au volcanisme des zones de subduction (Andes, Japon, Antilles : montagne Pelée, Soufrière, ...) est du ressort de la géologie fonctionnaliste. Ce volcanisme constitue en effet une des manifestations du fonctionnement actuel de la Terre. En quoi s'agit-il de modélisation ?

Parler de volcanisme des zones de subduction c'est déjà s'inscrire dans un cadre théorique, celui de la tectonique des plaques, actuellement partagé par la communauté scientifique. Dans ce cadre, les zones de subduction sont des portions de la partie superficielle de la Terre où une plaque lithosphérique plonge sous une autre plaque lithosphérique. La bordure ouest du Chili est considérée comme telle : là, la plaque de Nazca s'enfonce sous la plaque supportant l'Amérique du Sud. Dans ces zones de subduction, ce qui pose problème aux scientifiques n'est pas tant la remontée du magma (sa moindre densité par rapport aux roches environnantes, l'individualisation des gaz qu'il contient, et l'existence de fissures la permettent) que sa formation. Car les plaques en jeu sont solides comme le manteau asthénosphérique sur lequel elles reposent et dans lequel elles s'enfoncent. Les études sismiques de la première moitié du 20^è siècle valident cet état du manteau. Pourtant des magmas proviennent du manteau. Comment est-ce possible ? Les géologues actuels pensent qu'à l'aplomb des édifices volcaniques, la température assez élevée ne suffit pas à faire fondre car elle est contrée dans ses effets par la pression, elle-même assez forte. Ils conjuguent à ces deux paramètres (température et pression assez élevées) un troisième paramètre, l'eau issue de la déshydratation de la plaque plongeante, et c'est cet ensemble de paramètres qui déterminerait la fusion partielle de la roche du manteau (la péridotite). Ce modèle de fusion partielle s'appuie sur des travaux expérimentaux qui permettent, à partir de roches et dans des conditions thermodynamiques contrôlées, d'obtenir des magmas : *"Une péridotite, morceau de manteau "normal", ne fond qu'à 1200° (à pression ordinaire), un basalte fond dès 1000°. On a pu constater aussi l'influence de l'eau. Une roche mouillée fond à une température plus basse qu'une roche sèche"* (Allègre, 1987, p. 107).

L'explication de la formation du magma des zones de subduction consiste donc en **un modèle** faisant intervenir une fusion partielle locale de roches, dans les conditions géodynamiques (température, pression lithostatique et pression en eau) régnant à quelques dizaines de kilomètres à la verticale des volcans. Cette explication, ce modèle, s'articule avec de nombreuses données de terrain ou de laboratoire, directes ou indirectes, et il représente **une solution** au problème du volcanisme des zones de subduction. Comme l'écrit M. Fabre (1999, p.187) *"Résoudre le problème, c'est échafauder une explanatio (un modèle, une hypothèse) et la référer à l'explanandum (ce qui est à expliquer). C'est si l'on veut la construction et le test d'un modèle. Le problème est considéré comme résolu quand l'explanatio recouvre l'explanandum"*.

Cette mise en relation des registres empirique et des modèles se fait dans un cadre explicatif mécaniste au sens large. Le modèle construit par les chercheurs met en jeu le comportement de la matière (ses variations d'état, les caractères de la fusion partielle) parfaitement expliqués par la physico-chimie. Il s'articule sur un sous-ensemble du registre empirique, que l'on

pourrait appeler **registre de laboratoire**²⁸, de plus en plus fourni depuis les années soixante où il se constitue²⁹.

Sans prétendre être exhaustif, faisons maintenant la part de ce qui relève du registre empirique, du registre des modèles et du registre explicatif. Le tableau suivant tente cela :

REGISTRE EMPIRIQUE volcans des zones de subduction magma des zones de subduction manteau solide expériences de laboratoire (exemple : expériences portant sur le domaine de stabilité de roches ou d'assemblages minéralogiques)	<-----> mise en relation	REGISTRE DES MODELES fusion partielle de la péridotite contrôlée par 3 paramètres, et plus particulièrement rendue possible par l'apport d'eau
REGISTRE EXPLICATIF "mécanisme", physique des solides, ...		

Figure 3.2. Les différents registres dans la modélisation de la formation du magma des zones de subduction (expert)

2.4. Discussion

A partir de cet exemple portant sur le volcanisme des zones de subduction, tentons de dégager quelques caractéristiques de la modélisation fonctionnaliste en Sciences de la terre et son rapport au temps.

2.4.1. L'hétérogénéité du registre empirique des chercheurs

En nous appuyant sur les travaux de C. Orange (2000a, p. 86), il est possible de discuter le statut épistémologique des éléments du registre empirique :

- 1) L'existence de magma ou la lave relèvent du constat empirique. En revanche, la notion de zone de subduction, prise comme "un fait" dans le cadre de ce problème, est un construit théorique (un modèle) dans un autre contexte problématique (dynamique des plaques, répartition des foyers sismiques). Tous les éléments du registre empirique n'ont donc pas le même statut : certains sont des modèles importés que l'on ne questionne pas, d'autres sont des faits empiriques de terrain.
- 2) Le manteau solide ne relève pas de l'expérience directe. C'est un modèle importé d'une autre problématique, actualisé ici car pris comme tel et non interrogé.
- 3) Les expériences de laboratoire et leurs résultats (exemples : les expériences portant sur le domaine de stabilité de roches ou d'assemblages minéralogiques) sont des éléments du registre empirique, même s'ils ne sont pas directement en rapport avec le terrain. Ce sont des faits de terrain reconstitués, dont la construction ou l'usage relèvent parfois chez le chercheur d'une longue expertise (C. Orange et al., 1999).

²⁸ Dans un de nos travaux antérieurs, nous avons parlé de "réel de laboratoire". (C. Orange et al, 1999, p. 127).

²⁹ Dans les années soixante, des chercheurs tels que T. Ringwood et D. Green à Canberra, M. O'Hara à Edimbourg et I. Kushiro et H. Yoder à Washington cherchent à fabriquer du liquide basaltique à partir de péridotites (C. Allègre, 1983, p. 202-203)

Sur l'exemple du volcanisme des zones de subduction, apparaît donc la complexité du registre empirique des chercheurs : sa nature construite, plusieurs sous-registres. Et, à modèle différent, peuvent correspondre des différences dans chacun des registres. Nous sommes donc en droit d'attendre des décalages dans la constitution et la richesse de ce registre chez le novice (l'élève), le géologue débutant et le géologue chevronné.

2.4.2. L'hétérogénéité des registres entre expert et novice

Les didacticiens mettent l'accent sur le fait que les registres ne sont pas donnés, c'est-à-dire disponibles en l'état, mais qu'ils sont construits, sans toutefois que leur construction ou leur constitution (nous pensons au registre explicatif surtout) soient complètement consciencisées. Les registres sont construits progressivement, dans une articulation entre contraintes empiriques identifiées (expérimentales et/ ou de "terrain") et modèle(s) possible(s) échafaudé(s). La construction et donc la constitution des registres est vraisemblablement en rapport avec l'"expérience" du sujet : "expérience" du laboratoire et du terrain (pour le registre empirique), "expérience" en matière de possibles et de fonctionnement de modèle (pour le registre des modèles et le registre explicatif). Nous savons par exemple que de nombreux lycéens expliquent la fusion locale de la péridotite par une augmentation de la température provoquée par le frottement des plaques (D. Orange, C. Orange, 1993). Ce type de raisonnement est pour nous une façon de connaître leur registre explicatif. Ce dernier met vraisemblablement en jeu du "mécanisme simple", un raisonnement séquentiel (post hoc) mobilisant de la causalité simple (une cause entraîne un effet ; propter hoc).

REGISTRE EMPIRIQUE volcans des zones de subduction magma des zones de subduction manteau solide	<-----> mise en relation	REGISTRE DES MODELES fusion locale de la péridotite contrôlée par un paramètre : la température
REGISTRE EXPLICATIF mécanisme simple , causalité simple		

Figure 3.3. Les différents registres dans la modélisation de la formation du magma des zones de subduction (élève de Première S)

2.4.3. La place du temps dans une telle modélisation

Bien qu'ayant affaire à un exemple de la géologie fonctionnaliste, il paraît intéressant de s'interroger sur la place du temps dans une telle modélisation. Le volcanisme et les séismes sont des manifestations de l'activité actuelle de la Terre perceptibles pour l'homme dans leurs dimensions spatiale et temporelle. Mais ils prennent pour lui deux significations : celle du fait singulier ou celle du fait général. Prenons un exemple : le volcanisme de la Montagne Pelée.

- Pris dans son individualité spatiale et temporelle, par exemple sous l'angle de l'éruption meurtrière de 1902, l'activité de la Montagne Pelée est un "fait" singulier ou **évènement**. Son explication va chercher à comprendre pourquoi il s'est produit une éruption à cet endroit, à ce moment, avec ces caractéristiques. C'est un problème de **science historique**, qui n'est pas nécessairement intéressant scientifiquement.

- En revanche, l'activité de la montagne Pelée peut être considérée comme une des manifestations du volcanisme des zones de subduction, comme le sont aussi celui du Mont Saint-Helens aux Etats Unis et celui du volcan Pichincha dans les Andes. Il n'est pas alors étudié dans sa singularité. Au contraire, il a un caractère répétable dans l'espace (d'autres sites présentent un volcanisme comparable) ou dans le temps (ce type de volcanisme se manifeste

sporadiquement), derrière lequel l'explication cherche des invariants cachés, des régularités. L'activité de la Montagne Pelée, comprise comme du volcanisme de zone de subduction, prend le statut de **phénomène**³⁰. Son explication relève d'une **géologie fonctionnaliste**, où le temps est un paramètre ordinaire.

Sur l'exemple d'un "objet géologique" (le volcanisme des zones de subduction) dont on peut penser que l'explication apparaît comme légitime, tant à l'élève qu'au géologue, nous remarquons que le temps et l'espace peuvent jouer différemment, selon que le chercheur (novice ou expert) considère l'"objet géologique" comme phénomène ou comme événement, et donc selon qu'il se situe dans le cadre d'une science fonctionnaliste ou dans celui d'une science historique.

2.5. Un deuxième exemple

Il est des phénomènes actuels du ressort de la géologie fonctionnaliste dont la perception n'est pas aussi immédiate que celle du volcanisme et dont l'obtention ne relève pas de l'instantané. Prenons le problème de la formation de l'arène granitique. Les géologues expliquent sa formation par l'altération physico-chimique d'un granite sain (formé en profondeur par solidification lente d'un magma) placé dans les conditions de la surface de la Terre.

La modélisation que réalise le géologue construit et met en relation un registre empirique et un registre des modèles dont on peut étudier rapidement la constitution :

- Le registre empirique peut comprendre les contraintes empiriques que sont la nature des minéraux du granite (quartz, feldspaths, micas) et de l'arène (argiles, quartz, feldspaths, micas) ainsi que le développement privilégié de l'arénisation le long des diaclases. Ce sont alors des faits de "terrain" auxquels doit s'attacher l'explication. Le registre empirique peut également mettre en jeu des données de laboratoire (exemple : le comportement des ions vis à vis de la molécule d'eau).
- Quant au registre des modèles, il peut se peupler de plusieurs modèles possibles : l'usure des roches (modèle purement physique), la venue et l'addition d'éléments exogènes (autre modèle purement physique), ou encore la mise en jeu de réactions chimiques de dégradation et/ ou de néoformation de minéraux (modèle chimique). C'est dans le troisième que se reconnaît la communauté géologique actuelle.

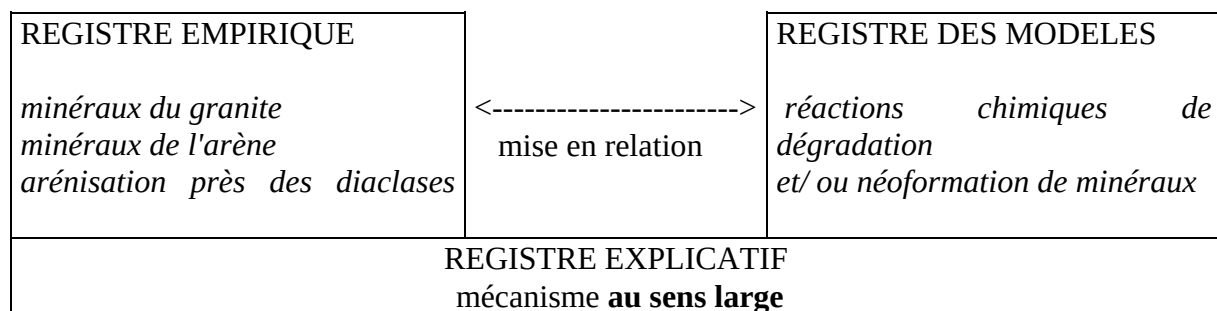


Figure 3.4. Les différents registres dans la modélisation de la formation de l'arène granitique (expert)

³⁰L'historien P. Veyne écrit que "Ou bien les faits sont considérés comme des individualités, ou bien comme des phénomènes derrière lesquels on cherche un invariant caché" (P. Veyne, 1971, p. 13). Les premiers intéressent pour eux-mêmes : ce sont des événements ; les seconds, répétables, sont un prétexte à découvrir une loi.

La modélisation de l'arénisation présente des similitudes avec celle du volcanisme des zones de subduction : elles entrent dans le cadre d'une géologie fonctionnaliste et leur registre explicatif est comparable (registre mécaniste au sens large, c'est-à-dire intégrant la chimie). Ce qui les distingue se trouve dans **la durée** des processus explicatifs des phénomènes : il faut du temps dans la nature comme dans les reconstitutions au laboratoire pour que des minéraux du granite (exemple : les feldspaths) se transforment dans les conditions de la surface de la Terre en minéraux de l'arène (exemple : les argiles) ; alors que la fusion partielle d'une péridotite paraît instantanée. L'appréhension des **processus lents** échappe à la perception humaine. Dans l'exemple de l'arénisation, des modèles correspondant à des processus plus proches de l'"expérience" du sujet mais aussi plus "rapides" dans leurs effets sont disponibles ; ils peuvent être plus spontanément choisis par le novice. C'est d'ailleurs ce que nous avons constaté (C. Orange & al, 1999)

Sur quelques exemples (volcanisme des zones de subduction, formation de l'arène granitique), nous avons montré de quoi les registres peuvent être constitués et les relations qu'ils entretiennent. On peut penser que, d'un élève à un autre, du novice à l'expert, la constitution, la richesse et l'organisation de chaque registre construit peuvent varier, tout comme le nombre et la nature des liens.

3. Explication et modélisation dans les sciences historiques

Les réflexions que nous avons tenues précédemment s'appuient sur des travaux concernant les sciences de la nature fonctionnalistes (biologie et géologie). En quoi sont-elles pertinentes dans les sciences historiques ? C'est cette question que nous nous proposons maintenant d'explorer.

3.1. La question de l'explication historique

De quoi se préoccupe la géologie historique ? Elle cherche à reconstituer, à ordonner entre eux et à comprendre des événements qui se sont produits dans le passé de la Terre. Le paléontologue Gould (1991, p. 308) s'est employé à définir les sciences historiques (la science de l'évolution, cosmologie et géologie), dans une comparaison aux sciences expérimentales. Il nous semble que ces sciences expérimentales peuvent être incluses dans les sciences fonctionnalistes. Les sciences historiques, écrit-il, *"tentent d'expliquer ou de reconstruire des événements extrêmement complexes qui n'ont pu, en principe, se produire qu'une seule fois"* (1999, p. 62). En ce sens, les sciences de la Terre historiques se rapprochent de l'Histoire, mais, contrairement à l'Histoire, qui se limite aux événements *"qui ont l'homme pour acteur"* (P. Veyne, 1971, pp. 10 et 13), elles explorent des périodes d'étude qui vont bien au delà de la présence humaine.

Dans la comparaison qu'il fait entre sciences historiques et sciences expérimentales, Gould relève que toutes tentent de produire des explications et se donnent la possibilité de faire des tests : *"il faut pouvoir décider si nos hypothèses sont définitivement fausses ou probablement correctes"* (Gould, 1991, p. 311). Mais selon lui les sciences historiques se distinguent de plusieurs manières des sciences expérimentales :

- Les sciences historiques ne peuvent pas toujours faire l'objet d'expériences en laboratoire : *"L'expérimentation dans des conditions contrôlées et la réduction de la complexité du monde matériel à un petit nombre de causes générales sont des procédés présupposant que toutes les*

périodes de temps peuvent être traitées de la même manière et simulées adéquatement en laboratoire" (Gould, 1991, p. 308).

- Les sciences historiques construisent *"un mode différent d'explication, fondé sur la comparaison et l'observation d'abondantes données"*, résultats des événements passés (Gould, 1991, p. 311). Cela a une incidence sur les tests auxquelles elles recourent : *"Nous recherchons des modalités qui se répètent, fondées sur des données si abondantes et si variées qu'aucune autre interprétation coordinatrice ne pourrait tenir, bien que n'importe quel fait pris isolément ne puisse être une preuve convaincante"* (Gould, 1991, p. 311).

- Enfin l'explication historique prend la forme de la narration, en ce sens qu'*"elle ne repose pas sur des déductions directement tirées des lois de la nature, mais d'une séquence imprévisible d'états antécédents, dans laquelle tout changement majeur à n'importe quel stade altérerait le résultat final"* (Gould, 1991, pp. 314-315)

Si nous mettons en relation les finalités et les caractéristiques de l'explication historique selon Gould, nous sommes orientés vers deux recherches : **la construction d'événements ou de phénomènes anciens** qui ont marqué la Terre et qui peuvent "expliquer" des états actuels et **l'explication de ces événements ou phénomènes**. Ce qui sert fondamentalement, ce sont les archives de la Terre, les traces vues comme des résultats de ces phénomènes ou événements. Mais pourquoi nous paraissent-elles être dignes d'intérêt ? Parce qu'elles renvoient à des saillances temporelles et/ ou spatiales. Les édifices volcaniques du Massif Central renvoient à des édifices volcaniques actuels et interrogent sur le volcanisme ; de même pour les pillow lavas d'Erquy. La discontinuité faunistique entre les terrains sédimentaires de la fin du Crétacé et les premiers terrains du Tertiaire, repérable en de nombreux affleurements de la planète, questionne sur ce qui peut l'expliquer. Ces quelques exemples nous montrent d'abord que le registre empirique est composite puisqu'il peut relever d'une phénoménologie commune (les édifices volcaniques) ou d'une phénoménologie savante (les pillow lavas comme produits d'un volcanisme aquatique, la lecture d'un affleurement en discontinuité temporelle). Ensuite, nous constatons que des éléments de ce registre empirique, mis ou non en comparaison avec des phénomènes actuels, font que l'on s'interroge sur le fonctionnement terrestre à une époque donnée de son histoire : quels types de volcanisme ? Quels phénomènes sédimentaires ? **C'est donc que l'histoire de la Terre peut se comprendre, au moins par "morceaux", dans le cadre d'une géologie fonctionnaliste**. Mais ces exemples engendrent également une réflexion sur le statut de phénomène ou d'événement que prennent les éléments du passé que nous reconstituons. La discontinuité faunistique de la limite Crétacé/ Tertiaire peut être référée à une crise biologique (un phénomène) comme il y en eut d'autres dans l'histoire de la Terre. Ou bien, elle peut être considérée comme une crise biologique particulière (un événement) de cette époque. Nous pouvons faire l'hypothèse que l'explication et la modélisation n'ont pas les mêmes caractéristiques selon que l'on travaille sur les phénomènes ou sur les événements. Les premiers rapprochent des sciences de la Terre fonctionnalistes³¹, pour lesquelles nous avons quelques outils ; les seconds orientent vers les sciences historiques pour laquelle il nous faut préciser les caractères de la modélisation. **La distinction phénomène/ événement nous paraît être de première importance**.

Gould nous rend également sensibles à la complexité des événements et de leur production. Ces événements sont complexes en ce sens qu'ils ne se réduisent pas forcément à la mise en jeu de quelques lois invariables dans le temps et l'espace. D'autre part, leur survenue ne tient

³¹ Dans lesquelles le temps long peut jouer (actualisme de deuxième niveau).

pas toujours dans la dimension d'un temps humain (sinon, ils seraient tous reproductibles au laboratoire). Impossibilité de ramener les événements complexes à la simple mise en oeuvre de lois de la nature ; nous y voyons une convergence avec ce qu'écrit Gayon (1993) sur les limites des explications causales rapportées aux objets historiques. Mais alors, comment expliquer la survenue des événements historiques ?

Sur cet aspect Gould met en avant **le rôle de ce qui s'est fait avant l'évènement étudié**. Prenons à nouveau l'exemple de la discontinuité faunistique et floristique des formations de la fin du Crétacé et du début du Tertiaire. L'étude qualitative et quantitative des fossiles permet d'établir les taux de survie des grands groupes : chez les vertébrés, il est nul pour les dinosaures, qu'ils soient petits ou grands ; il est variable chez les mammifères, les vertébrés les plus chanceux ayant été les plus petits et ceux qui vivaient dans les eaux douces (Buffetaut, 1996, p. 65). Chez les invertébrés, toutes les espèces d'Ammonites s'éteignent et l'hécatombe est importante chez les espèces de foraminifères planctoniques (J. Smit, 1996, p. 63) ; les diatomées résistent mieux que les coccolithophoridées et les radiolaires (Gould, 1994, p. 97). La biosphère particulière du début du Tertiaire, comparée à celle de la fin de l'ère Secondaire, oblige à envisager une destruction brutale, drastique et hasardeuse il y a 65 millions d'années. Ce fut bien une loterie de la vie, car on ne peut pas comprendre la survie de certaines espèces par la seule possession d'adaptations particulières. Nous sommes sur **une catastrophe ou bifurcation** au sens de Thom, c'est-à-dire qu'il y a eu un changement de régime du système dynamique considéré (la biosphère).

Mais Gould pousse plus loin sa réflexion sur la survenue des événements historiques. Il reconsidère les événements historiques dans une expérience de pensée qui consiste à rembobiner le film de l'histoire et à le redérouler. Et il introduit la contingence : l'évènement E (exemple : la biosphère particulière du début de l'ère Tertiaire) est contingent en ce sens qu'il dépend d'une séquence non déterminée d'états antécédents. Prendre l'histoire dans son cours, c'est se donner, à cause de la contingence, une infinité de parcours possibles. Car à la place de chaque événement qui s'est produit, beaucoup d'autres auraient pu se faire. Tout se passe comme si le cours descendant de l'histoire ouvrait sans cesse de nombreuses bifurcations, dont certaines nous échappent.

Gould marque donc ici la spécificité des sciences historiques par le fait qu'elles mettent en jeu **la contingence**. Au final, l'histoire construite gagne et perd de son importance : elle en gagne parce qu'elle est unique ; elle en perd car elle est une parmi tant d'autres qui auraient pu exister. Les sciences historiques s'occupent de reconstituer les événements singuliers de l'histoire, événements qui auraient pu ne pas se produire. Pourquoi se sont-ils produits à tel moment et en tel endroit ? L'explication ne peut le comprendre complètement, mais elle peut tenter de déterminer leurs conditions de possibilité.

3.2. L'actualisme (et le catastrophisme) comme lien entre explication fonctionnaliste et explication historique

Nous avons vu que dans leur reconstitution du passé de la Terre, les géologues mobilisent l'actualisme comme outil méthodologique (chapitre 2). Nous nous proposons d'étudier les relations entre l'actualisme et les explications historiques.

3.2.1. L'actualisme de premier niveau

L'actualisme de premier niveau ou actualisme d'analogie consiste à référer la trace de phénomènes ou d'évènements passés à une trace actuelle, cette dernière renvoyant à un

phénomène actuel au fonctionnement connu. Prenons un exemple : les pillow lavas d'Erquy sont "lues" comme des structures comparables aux pillow lavas actuelles des dorsales médio-océaniques. Nous pouvons observer la formation des pillow lavas actuelles par refroidissement d'un magma basaltique en milieu aquatique.

L'explication des pillow lavas anciennes est une explication historique qui se ramène à un problème fonctionnaliste actuel que l'on transfère dans le passé. C'est donc **une explication fonctionnaliste**, mais avec déplacement, via le temps, d'un registre empirique à un autre.

3.2.2. L'actualisme de deuxième niveau

L'actualisme de deuxième niveau consiste à référer la trace d'évènements ou de phénomènes passés aux traces d'un phénomène actuel qui n'en sont pas l'exact équivalent. Pour obtenir la trace passée telle que le géologue l'identifie, il est nécessaire d'envisager un processus de transformation s'exerçant sur une longue durée.

Prenons un exemple, celui d'une surface structurale schisto-gréseuse silurienne avec "ripple marks" (marques en ride) comme on en trouve à la Hague, au Nord-Ouest du département de la Manche. Ces rides ont une forme en tout point comparable à celles qu'on observe actuellement sur le sable des zones intertidales, sur le fond marin ou encore dans le lit d'un cours d'eau : ce sont des figures de courants. La formation de ces "ripple marks" peut être exportée au passé, sans qu'il soit possible de préciser la profondeur du dépôt par l'identification des seuls ripple marks. Nous sommes sur de l'actualisme d'analogie. Cependant, celles que l'on trouve sur la roche silurienne sont indurées : les grains de sable sont soudés et les rides sont complètement figées en un ensemble rocheux compact. Nous n'observons pas cette transformation, nommée diagenèse, dans sa totalité à l'échelle du temps humain. Tout comme l'arénisation du granite, elle ne se comprend que dans le temps long.

L'explication d'un banc gréseux à ripple marks est une explication historique qui se ramène à **un problème fonctionnaliste exigeant du temps long**.

Prenons maintenant l'exemple des formations sédimentaires de la fin du Crétacé et du début du Tertiaire. Nous avons vu que leur contenu faunistique et floristique présente une discontinuité. De nombreux affleurements³² de cette limite ère Secondaire/ ère Tertiaire sont maintenant bien connus de par le monde, et des corrélations à distance sont faites. Comment expliquer cette trace du passé ? Avec quelle utilisation de l'actuel ? Il n'y a rien de comparable dans la période actuelle en termes d'extinction massive d'espèces en un temps court, ce qui permettrait de recourir à de l'actualisme d'analogie. Est-il alors possible de recourir à de l'actualisme de 2^e niveau ? Ce serait penser que l'ampleur des extinctions est rapportée à un phénomène encore en vigueur actuellement et qui se déploie sur une grande durée. Mais avec l'ensemble de plus en plus étoffé des traces anciennes de l'époque, et surtout avec l'encadrement temporel de plus en plus précis de cette discontinuité, qui borne un intervalle de temps géologiquement court, il paraît difficile aux géologues de raisonner sur la base d'un actualisme de 2^e niveau avec du temps long. Une "**catastrophe**" est alors convoquée, qui s'exprime dans **deux solutions possibles** : un impact météoritique (l'équipe américaine de L. et P. Alvarez) maintenant identifié dans le Golfe du Mexique (Claeys, 1996, p. 293) ou encore un épisode volcanique en Inde, intense et soutenu sur quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années (l'équipe française de Courtillot ; Courtillot, 2002, p. 11).

³²Citons en exemples les "coupes" de Stevns Klint au Danemark, de Gubbio en Italie, d'El Kef en Tunisie, de Brazos River en Amérique du Nord et de Bidart en France. (V. Courtillot, 1995, p. 41)

- Il ne s'agit pas d'un catastrophisme de 1er niveau, qui consisterait à convoquer une cause "extraordinaire" adéquate, mais bien d'un catastrophisme de deuxième niveau, parce qu'il est sollicité après que les outils des deux actualismes méthodologiques ont été employés. Ce serait un volcanisme plus gigantesque que celui que nous connaissons à l'époque actuelle : *"énormité du volume des laves, brièveté des éruptions, coïncidences des dates"* écrit Courtillet (1995, p. 126).

- Mais pourquoi ne pourrait-on pas parler d'actualisme d'analogie ou d'actualisme de deuxième niveau ? L'écrasement d'une météorite est un phénomène qui dure une fraction de seconde et qui se produit tous les jours. A l'échelle humaine, n'est-il pas possible d'en vivre un mettant en jeu un astéroïde comparable en taille à celui d'il y a 65 millions d'années ? Pour ce qui est du volcanisme, l'actuel propose des exemples moins intenses qui semblent reproduire "en petit" ce qui a pu se produire à la fin du Crétacé. Courtillet cite l'exemple de l'éruption d'El Chichon et celle du Pinatubo (Courtillet, 2002, p. 11). Quels pourraient alors être les effets d'un tel volcanisme sur une période de quelques millions d'années ? L'utilisation de l'actualisme n'est donc pas sans ambiguïté.

En résumé, nous nous demandons si les géologues, par la mise en fonctionnement de l'actualisme méthodologique sous toutes ses formes, et même le catastrophisme de deuxième niveau, ne transforment pas des problèmes de la géologie historique en problèmes de la géologie fonctionnaliste. Mais il n'en reste pas moins que Gould insiste sur le rôle de la contingence des événements historiques. Ce qui s'est passé aurait pu ne pas être. Or si, par l'actualisme, on arrivait à transformer totalement un problème historique en un problème fonctionnaliste, il n'y aurait pas de fonction particulière de la contingence dans les explications historiques. Pourquoi si, dans une "expérience de pensée", on rembobine le film puis on le redéroule, y a-t-il possibilité de ne pas obtenir exactement ce que l'on a eu ?

3.3. La contingence, malgré tout

Il paraît donc paradoxal de ne pas obtenir exactement les mêmes résultats historiques si on remonte dans le passé et si on redéroule le film, alors que l'actualisme transforme les problèmes historiques en problèmes fonctionnalistes. Car ce faisant, on déplace simplement à différents moments du passé un fonctionnement actuel ; il n'y a donc pas de raisons que ce fonctionnement change fondamentalement. Et en recourant au catastrophisme méthodologique, on se débarrasse du temps long et on ramène l'explication à de la causalité simple. Où la contingence peut-elle bien prendre place ? En reprenant nos schémas sur l'actualisme, nous pouvons imaginer qu'elle peut agir à plusieurs niveaux :

- dans le temps long au cours duquel le fonctionnement s'exerce et fait passer la trace ancienne de son état initial à ce qu'elle est devenue. On a mis dans ce temps long un certain nombre de processus pour faire fonctionner à minima le modèle. Mais on peut penser que le fonctionnement imaginé n'est pas le seul processus qui intervient. N'y a-t-il pas d'autres processus ou événements qui ont joué ? Ne peut-on pas imaginer, dans ce temps long, des points de bifurcation où d'autres directions d'évolution se sont présentées, qui auraient pu être empruntées ?

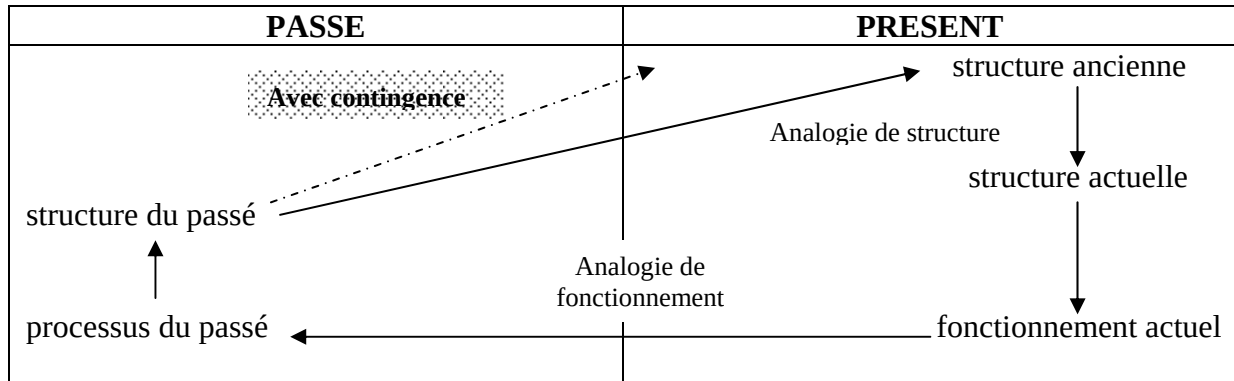


Figure 3.5 : Temps long et contingence

- les traces que le géologue a choisi d'étudier renvoient peut-être à un système plus complexe que celui qu'il a retenu. Les travaux de H. Poincaré (1854-1912) ont ouvert l'étude des systèmes dynamiques aux systèmes instables et chaotiques. Alors que sur les systèmes dynamiques stables, une petite modification des conditions initiales produit seulement de petits effets sur l'état final, pour les systèmes chaotiques, les petites modifications initiales s'amplifient au cours du temps (Ravachol-Orange, 1997, p. 21). Un exemple est donné par Courtillot quand il élargit son propos sur l'extinction de la limite Crétacé/ Tertiaire à d'autres théories explicatives que celles de la météorite ou du volcanisme. Il écrit : *"une autre école pense que les extinctions ont certes été rapides, mais que c'est la dynamique interne des relations entre les espèces qui aurait conduit à une disparition en masse d'espèces"* (2002, p. 11). Et il ajoute que *"Des relations non linéaires entre les paramètres d'un système dynamique peuvent, on le sait, conduire à des évolutions extrêmement brutales : c'est la théorie du chaos déterministe"* (Courtillot, 2002, p. 12). C'est dire qu'on peut considérer la biosphère de la fin du Secondaire comme un système dont la complexité peut prendre différentes formes : une forme privilégiant des relations trophiques "figées" ou une forme prenant en considération des relations "plus fluctuantes" entre les espèces. La deuxième forme laisse vraisemblablement de la place à la contingence.

4. Problématisation dans les sciences de la Terre

Nous avons vu que la recherche d'explication caractérise les sciences et que l'on peut mettre en relation cette recherche d'explication avec la modélisation. Mais la recherche de solution à des problèmes explicatifs ne décrit pas l'essentiel de l'activité scientifique. Le point de vue de la "construction de problème" dans lequel nous nous situons, à la suite de Fabre (1999) et C. Orange (2000), met en effet en avant le fait que les savoirs scientifiques ont une certaine apodicticité.

Dans ce cadre, construire un savoir scientifique revient donc à construire un savoir problématisé par une exploration du champ des possibles et l'identification de nécessités ou d'impossibilités (Orange, 2000, 2002). Des travaux ont été faits dans les sciences biologiques, un peu dans les sciences de la Terre fonctionnalistes, mais pas dans les sciences historiques. Comment penser la problématisation dans les sciences de la Terre fonctionnalistes et historiques ?

4.1. Les caractères généraux de la problématisation

Nous venons d'approfondir ce qui se joue dans **la modélisation** : l'établissement et le test de liens entre différents registres (notamment entre registre empirique et registre des modèles). Pourtant, quelle que soit la constitution des registres qui se construisent pour répondre au problème, leur mise en correspondance se doit de dépasser la simple mise en relation (il y a ces relations mais d'autres sont possibles) pour une véritable **problématisation** ou **mise en tension** (il y a ces relations et pour certaines d'entre elles, il ne peut pas en être autrement) qui débouche sur des nécessités. Dans l'approche tensionnelle entre les registres, le modèle n'est plus qu'une solution réalisant les nécessités. Le schéma suivant (C. Orange, 2000a, p. 27) tente d'explicitier en quoi consiste la problématisation. En effet, il montre une partie de la dynamique du processus de problématisation dans les sciences de la nature, comme dépassement de la connaissance ordinaire et comme organisation d'une tension entre des contraintes empiriques significantes pour le problème et des nécessités sur le modèle (ou conditions de possibilité du modèle) construites. Il manque sur le schéma le registre explicatif : il intervient en permanence pour organiser cette mise en tension.

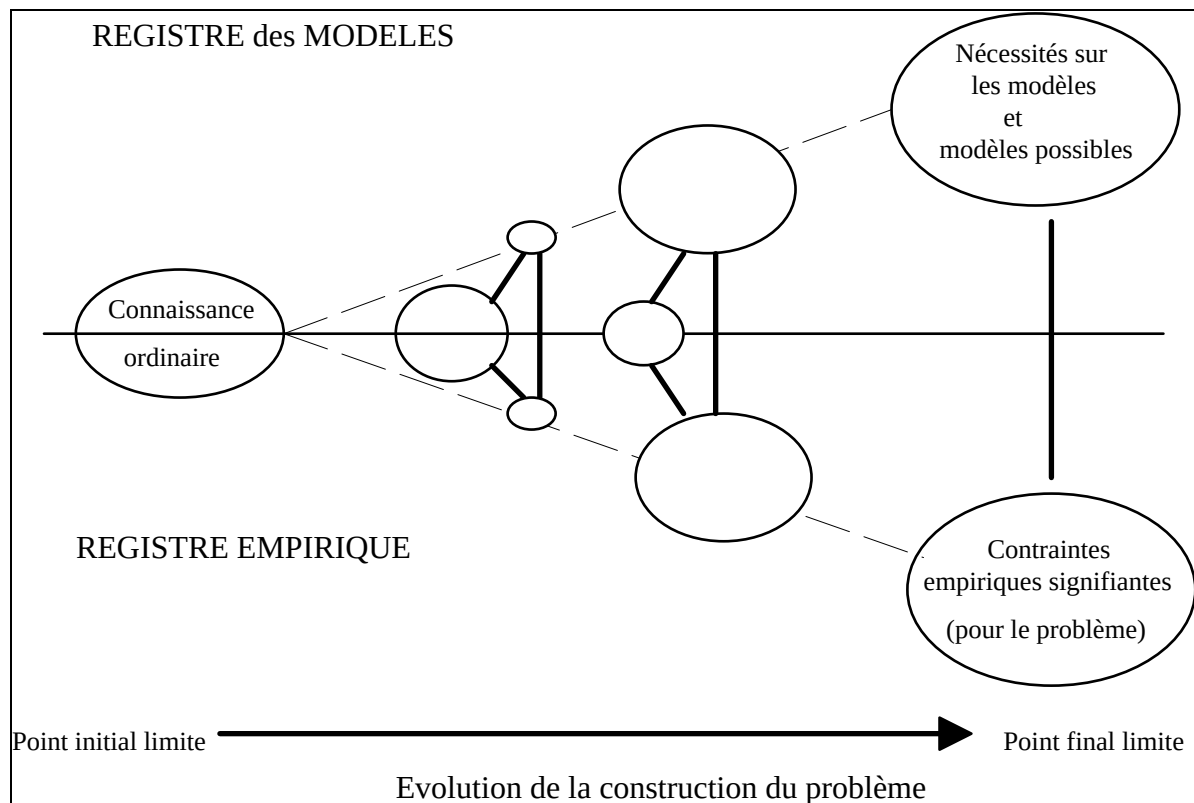


Figure 3.6 : Une représentation de la construction de problème : de la connaissance ordinaire au savoir scientifique (C. Orange, 2000a, p. 27)

C. Orange l'a noté : les conditions de possibilité du modèle peuvent être représentées dans un "espace des contraintes" (contraintes empiriques pertinentes, repères théoriques intéressants, formes d'explications possibles) que l'on construit et où se déploie le problème. Espace des contraintes, nécessités sur le modèle, on peut comparer leur construction à ce que fait un voyageur dont le problème est de se rendre d'un point à un autre. La problématisation serait la construction conjointe d'une carte géographique précise (en termes de reliefs, de routes, d'obstacles naturels, etc. ; c'est **l'espace des contraintes**) et des itinéraires envisageables pour

répondre au problème au regard des contraintes de la carte. Mettre l'accent, dans la modélisation, sur le "modèle solution", c'est risquer de rechercher des "trajets" qui ne seraient que factuels : certes, ils mettent en relation des contraintes de la carte mais cette mise en relation est contingente (il aurait pu en être autrement). Alors que mettre l'accent sur le déploiement du problème dans un espace de contraintes pour construire **des raisons** du ou des "parcours" possibles (modèles apodictiques), c'est se centrer sur le problème et le construire, c'est donner une part de nécessité au modèle. En d'autres termes, problématiser, c'est explorer des possibles avec des "pourquoi" et des "pourquoi cela ne peut pas être autrement". C. Orange présente ainsi la problématisation *"celle-ci consiste, partant d'une question, à la relier à un cadre théorique jugé pertinent, à en explorer les possibles et à identifier des raisons qui contraignent les solutions"* (C. Orange, 2002, p. 31).

4.2. Un exemple en géologie fonctionnaliste

Reprenons l'exemple du volcanisme des zones de subduction, étudié plus haut du point de vue de la modélisation, afin de bien distinguer les conséquences d'une focalisation sur la solution (modélisation vue comme une mise en relation) ou sur les nécessités qui la contraignent (construction d'un problème explicatif ou problème de modélisation).

- Mettre l'accent sur une solution au problème du volcanisme des zones de subduction, c'est expliquer le fonctionnement de ce volcanisme par la fusion des péridotites sous l'action de la température, de la pression et de l'eau. C'est savoir que c'est comme cela : ce savoir est factuel (assertorique). Certes, il est conforme au savoir scientifique actuel et il peut tenir sa légitimité de données dont on dispose et de mises à l'épreuve qui ne le réfutent pas. Mais rien ne le rend nécessaire : on est dans l'ordre du vrai et du faux.
- En revanche, construire le problème du volcanisme des zones de subduction, c'est établir la nécessité d'une fusion partielle du manteau où n'interviennent pas seulement la pression (P) et la température (T) mais où on prend en compte l'état ordinairement solide du manteau (les données sismiques l'attestent) dans ces conditions P, T. Tout cela conduit à une seconde nécessité, celle de "fondant(s)". Problématiser, c'est donc conduire à savoir comment cela ne peut pas être, c'est déterminer les conditions de possibilité des solutions. Dans cet exemple, c'est ouvrir vers la recherche d'autres paramètres conditionnant la fusion, dont l'eau ou le sodium peuvent être des solutions. Comme l'écrit C. Orange (2000a, p. 40), **"les nécessités ne sont pas des solutions » ; elles sont des conditions de possibilité des solutions.** Ce qui est mis en avant n'est pas le vrai/ faux des solutions mais le possible/ nécessaire de celles-ci.

En conclusion, et en nous référant aux travaux de Fabre et C. Orange, la problématisation se fait sur une autre dimension que la seule recherche d'une (de) solution(s) au problème. Elle privilégie la construction d'un espace de contraintes (contraintes empiriques pertinentes et nécessités sur le modèle) qui la ou les contraignent. Cela ne veut pas dire que toute proposition de solution est écartée ; mais s'il y en a, elles sont interrogées dans le sens de savoir pourquoi elles peuvent être ou ne pas être des solutions. D'autre part, le déroulement de la problématisation n'a rien d'un processus "phasé" et linéaire (position du problème, construction du problème, résolution du problème), autrement dit se développant dans une seule dimension temporelle. Selon ces auteurs, le travail du problème se déploie dans deux dimensions qu'elle articule : une dimension assertorique (sélection de données à prendre en compte ou dont il faut rendre compte, proposition d'idées de solutions) et une dimension apodictique (construction de nécessités compte tenu des données et du registre explicatif). Cela fait que l'espace des contraintes en construction a momentanément du jeu : les données

peuvent changer ce qui peut jouer sur les nécessités construites. Nous pensons que le tâtonnement qui existe, tant pour le chercheur que pour l'élève, entre le moment où le problème est perçu et le moment où il y a proposition d'un modèle, peut renseigner sur la problématisation effectuée.

Les développements précédents montrent que la problématisation en géologie fonctionnaliste peut prendre des caractères comparables à celle de la biologie fonctionnaliste. Qu'en est-il de la construction des problèmes historiques ?

4.3. Problématisation et problèmes historiques

Nous avons vu comment est pensée la problématisation dans le cadre de problèmes fonctionnalistes. S'il est possible de penser de la même manière ces processus pour les problèmes historiques sollicitant l'actualisme de premier niveau, il nous semble en revanche qu'un tel transfert ne peut pas se faire sans questions dès lors que nous sommes sur des problèmes historiques, et qu'il mérite d'être discuté et mis en relation avec l'actualisme.

4.3.1. Problématisation et temps long

Il nous faut ici certainement distinguer plusieurs cas de temps long :

- **Le temps long représente un contenu uniforme**, c'est-à-dire qu'il est rempli sur toute sa durée d'un même fonctionnement. La problématisation est comparable à celle d'un problème fonctionnaliste, à la différence qu'il prend place sur une durée qui dépasse la perception humaine. Ce peut être par exemple le cas dans les problèmes de diagenèse ou d'altération du granite.

- Le temps long représente un contenu où joue la contingence

Dans le temps long qui fait passer d'un début à une fin de mise en jeu d'un fonctionnement (diagenèse, altération, création d'une structure), il a pu se produire des phénomènes ou des événements qui ont modifié le cours de cette histoire.

Nous pouvons réfléchir sur le contenu de ce temps long sous l'angle de la problématisation. Pourquoi se distingue-t-il du temps long évoqué dans le paragraphe précédent ? Quelles contraintes aident à problématiser en tenant compte de la contingence ?

4.3.2. Problématisation et contingence

L'histoire accomplie est une et divisible en événements qui l'ont jalonnée et orientée. On peut s'attacher à sérier le plus finement et le plus complètement possible ces événements et phénomènes contenus dans le temps long disponible. C'est possible par une co-consolidation du registre empirique (mise en jeu de nouvelles traces, changement d'échelle d'étude, expérimentations complémentaires) et du registre des modèles (définitions d'événements, mise en jeu de phénomènes nouveaux ayant pris place dans cette durée). Cette mise en relation du registre empirique et du registre des modèles est une modélisation. L'histoire obtenue est un enchaînement d'événements et de phénomènes étayés par des données empiriques. Mais le risque est grand de penser que tout événement est la cause de celui qui lui succède et la conséquence de celui qui le précède. Sans exclure ce type de relation, il paraît important de dégager la reconstitution et l'enchaînement des événements d'un syncrétisme de temps et de causalité.

La tâche est donc plutôt de construire des nécessités dans l'histoire, d'identifier des phénomènes ou des événements vus comme des passages obligés. Cela ne rend pas caduque la recherche des événements ou des phénomènes (voir le paragraphe précédent). Cela cherche à attribuer à certains le caractère de condition de possibilité d'événements ou de phénomènes postérieurs. Comment cela est-il possible ? En quoi cela se distingue-t-il de la modélisation ?

- **Problématiser le contenu du temps long, c'est déjà** se mettre dans l'expérience de pensée de rembobiner l'histoire et de la redescendre (Gould, 1991, 1999). Si tout est déterminé par des lois déterministes, intemporelles et invariables dans l'espace, la redescende de l'histoire est unique et invariable. Mais, parce que nous nous mettons dans un cadre théorique qui reconnaît la part de jeu de la **contingence**, nous considérons que certains événements se sont produits mais que d'autres étaient possibles, qui pourraient donner une histoire différente.

- **Problématiser le contenu du temps long c'est encore** se demander quelles sont les véritables bifurcations de l'histoire, celles qui auraient pu introduire une orientation différente de son cours. C'est aussi s'interroger sur les conditions de possibilité des événements. Cela conduit à raisonner de la façon suivante : étant donné un événement E identifié, quels événements ont été les conditions de possibilité de cet événement E et qui auraient pu être autres ? Quels événements ont rendu possible cet événement E plutôt que d'autres ? Comme cet événement E a eu lieu (l'histoire est faite), qu'il est un possible avéré, remonter à sa ou ses conditions de possibilité rend cette ou ces dernières nécessaires. Elles ont donc valeur de nécessité dégagée à partir de E, qui leur succède dans le temps. Nous constatons que nous établissons "à reculons" les nécessités de l'histoire : c'est un événement ou un phénomène réalisé qui rend nécessaire **des conditions de sa possibilité**. Cette façon de procéder se distingue du raisonnement causal commun, où la cause rend l'effet nécessaire. Elle permet ainsi de particulariser la problématisation historique en lui donnant une dimension nécessairement inverse.

Prenons à nouveau l'exemple de la discontinuité faunistique et floristique de la limite Crétacé/Tertiaire. Envisager une extinction de masse (événement D), avec les caractéristiques que nous avons relevées (paragraphe 3.1), est **une condition de possibilité** du passage de la biosphère particulière de la fin du Crétacé (événement C) à celle particulière du début du Tertiaire (événement E) . Mais D se produisant, il n'était pas sûr que l'on récupère toutes les espèces inventoriées maintenant au début du Tertiaire. Les règles du jeu en termes de survie des espèces étaient tellement bouleversées que d'autres combinaisons d'espèces survivantes auraient pu exister. Nécessairement, l'événement étudié est le résultat d'une seule chaîne événementielle antérieure : si E (une certaine biosphère au début du Tertiaire) s'est produit, c'est parce qu'un événement D s'est produit avant lui, événement D lui-même précédé des événements "critiques"³³ C, B et A. Remonter l'histoire, c'est prendre l'histoire faite et il n'y en a eu qu'une. E ayant existé, cela veut dire que D, C, B et A ont forcément existé. En d'autres termes, **E pris comme un résultat implique D** : E a été possible parce qu'il y a eu D. **Mais D est seulement une condition de possibilité de E**, de même que C est seulement une condition de possibilité de D, parce que si, après avoir "rembobiné" l'histoire, nous la redescendons, il n'est pas sûr que nous obtenions le même film. La survenue de D' au lieu de D aurait pu empêcher l'obtention de E ; et ce n'est pas parce que nous avons eu D que nous devions forcément obtenir E.

³³ "Critique" est pris dans le sens de : ouvrant l'histoire à plusieurs orientations.

Ainsi, tous les évènements ou phénomènes reconstitués n'ont pas forcément la même valeur, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas forcément des conditions nécessaires des évènements qui les ont suivis. Prenons un exemple en rapport avec la crise Crétacé/ Tertiaire :

- La mort des Dinosaures est une condition nécessaire au développement des Mammifères.
- Mais le fait que telle espèce de Dinosaures ait disparu avant telle autre à la fin de l'ère Secondaire n'est pas une condition nécessaire au développement des Mammifères.

Ces éléments de réflexion montrent que la problématisation des évènements ou des phénomènes historiques contenus dans du temps long articulent à la fois une remontée et une redescende dans le temps :

- **En empruntant seulement le cours de l'histoire**, il est difficile, à cause des bifurcations possibles, de construire des nécessités sur le modèle en rapport avec ce qui se passe dans ce temps long. Nous sommes là dans une modélisation qui risque d'en rester à une mise en histoire. On peut cependant penser à enrichir le registre empirique, tenter certaines saturations de ce registre de telle sorte que certains évènements ou phénomènes deviennent nécessaires parce qu'inévitables.

- **Mais à remonter également l'histoire à l'envers**, il est possible de construire des nécessités de phénomène ou d'évènement (voir plus haut dans ce paragraphe). Là encore, ces nécessités gagnent encore de l'importance dans une consolidation du registre empirique. Ainsi, les chercheurs actuels enrichissent le registre empirique d'un "réel de terrain", d'un "réel de laboratoire" à temps court et maintenant de plus en plus d'un "réel de laboratoire" à temps long. Ce dernier "réel" correspond à des simulations numériques dont les performances se développent à la mesure de celles des ordinateurs. Elles "compressent" le temps long et elles jouent qualitativement et quantitativement sur les éléments du registre empirique. Allègre, pourtant facilement conquis par les prouesses de la technique, souligne cependant les limites actuelles de la construction d'un "réel informatique". Il écrit par exemple que *"Si des résultats intéressants ont été obtenus ici ou là, aucune de ces tentatives (de simulation numérique) n'a résolu le problème du mouvement des plaques, et le rapport énergie dépensée sur résultats a été relativement faible"* (Allègre, 2002, p. 72). Il ne met pas en cause l'extraordinaire outil informatique, mais le manque d'"*idée nouvelle*", d'"*hypothèse courageuse*", d'"*intuition*" des chercheurs, conditions indispensables d'une approche théorique consistante. Sachant que les problèmes historiques pris en charge par les chercheurs sont souvent encore plus complexes que celui du mouvement des plaques, il nous semble que les (relatifs) échecs sont plutôt le reflet de la contingence, qui a tant de possibilités de s'exercer sur un temps long.

4.3.3. Evènement, phénomène et contingence

- Lorsque le géologue reconstitue un évènement historique, il travaille par définition sur la singularité dans le temps et l'espace. Il ne peut donc pas multiplier les angles d'attaque ou les exemples. La contingence joue alors un rôle fondamental ; elle prend la forme de bi (poly)furcations dont une seule voie conduit à l'évènement, ce qui en conséquence fait que tout un pan de possibles virtuels tombent pour la suite de l'histoire.

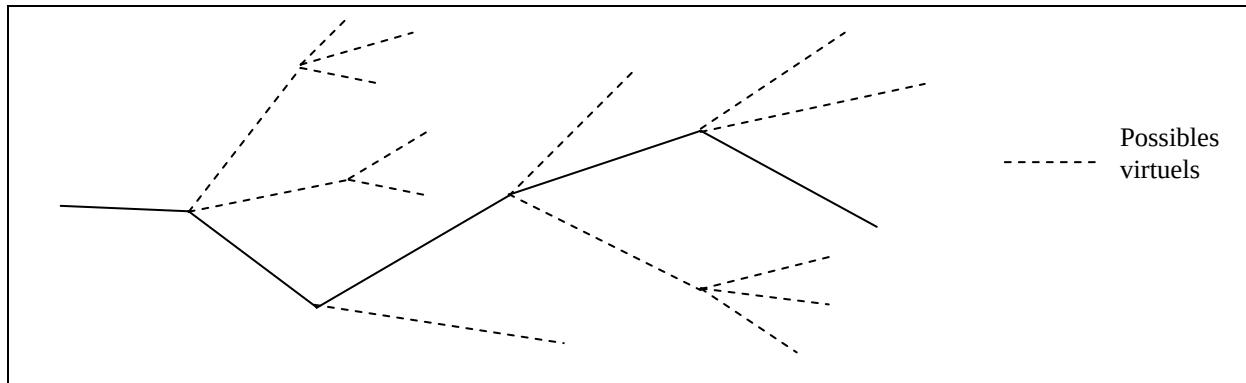


Figure 3.7 : La contingence et les possibles virtuels de l'histoire

Reprenons l'exemple de l'extinction de masse de la limite Crétacé /Tertiaire (K/T). Cette extinction de masse (événement D) a fait qu'une gamme de taxons et pas une autre a survécu, ce qui a conditionné les possibles ultérieurs en matière d'évolution de la biosphère, ce qui a donc eu une influence sur le monde actuel. Selon cette explication, l'extinction de masse K/T et donc la gamme de taxons conservée sont donc **des conditions de possibilité** (au sens de ce qui rend possible) du visage de la Terre actuelle, conditions de possibilités qui s'échelonnent dans le temps, et conditions de possibilité qui ne sont pas des conditions suffisantes. Pouvoir les reproduire n'engendrerait pas forcément le même résultat. Mais, parce que la Terre a son visage actuel, il y a **nécessairement** eu une certaine gamme de taxons au Tertiaire et la crise K/T.

- Lorsque le géologue reconstitue un phénomène historique (exemple: les extinctions de masse), il reconnaît une certaine généralité de ce phénomène dans le temps et l'espace. Dans la problématisation qu'il fait, il construit des nécessités auxquelles doit répondre l'explication du phénomène. S'il lui arrive de faire intervenir la contingence dans la survenue du phénomène, s'il pense que cela aurait peut-être pu se passer autrement, c'est peut-être parce qu'il n'a pas entrevu toutes les nécessités. En d'autres termes, la contingence pourrait être le signe d'une problématisation non achevée. C'est dire que des approfondissements peuvent encore être faits sur ce qui conditionne la survenue de phénomènes historiques : relève-t-elle de la problématisation des sciences fonctionnalistes et/ ou de celle des sciences historiques ?

4.3.4. Conclusion

En résumé, la problématisation dans le cadre de problèmes historiques a pour partie les caractéristiques d'une problématisation dans le cadre de problèmes fonctionnalistes et pour partie des caractères propres. Les nécessités construites se déclinent en termes de phénomènes et d'événements qui se sont produits (nécessité du fonctionnement d'une dorsale, nécessité d'une diagenèse, nécessité d'une catastrophe) mais ces nécessités sont construites dans une sorte de "causalité temporelle inverse".

Les nécessités de l'histoire "faite" sont donc rétrospectives, à la manière d'une causalité inverse : **l'effet rend nécessaire certaines de ses causes.**

- La remontée dans l'histoire construit des événements ou des phénomènes historiques ayant valeur de nécessité par les conséquences qu'ils ont laissées (effet **donc** cause). Mais à redescendre le temps, l'historien ne peut que respecter l'incertitude de l'événement et de l'avenir (condition, **peut-être** effet).

- L'actualisme et le catastrophisme méthodologiques tentent de construire des nécessités dans l'ordre de l'histoire. L'actualisme d'analogie transpose de l'actuel sur un tronçon passé de la flèche du temps (une cause actuelle et son effet). L'actualisme de deuxième niveau procède de même mais il étire temporellement le processus en jeu dans le cours de l'histoire (cause actuelle imperceptible, temps long, et leur effet) ; enfin le catastrophisme en mettant en jeu une causalité "extraordinaire" se débarrasse du temps long (cause gigantesque, effet). A employer l'actualisme et le catastrophisme méthodologiques dans le cadre de la problématisation, il nous semble que nous consolidons les reconstitutions du passé.

5. Conclusion

Le tableau suivant (figure 3.8) tente de récapituler ce qui entre en jeu selon que l'on est, en géologie, sur une problématisation fonctionnaliste ou selon que l'on est sur une problématisation historique. Il montre, dans chacun des cas, la place de l'actualisme (actualisme de 1er niveau ou actualisme d'analogie et actualisme de 2^e niveau) et du catastrophisme méthodologiques (chapitre 2), les caractères du temps qui a alors de l'importance et enfin en quoi consiste la problématisation. On doit imaginer qu'**un problème géologique ne mobilise jamais qu'une seule ligne de ce tableau** : de nombreux problèmes géologiques sont des problèmes mixtes (chapitre 1, paragraphe 3.3), c'est-à-dire relevant à la fois de la géologie fonctionnaliste et de la géologie historique ; et même si un problème s'inscrit plus particulièrement sur un pôle, sa construction peut mettre en jeu plusieurs types de nécessité (nécessités sur le modèle, nécessité du temps long, nécessité de l'histoire).

Notre but est maintenant d'utiliser ces approfondissements théoriques dans notre réflexion didactique. Dans le cadre de quelques problèmes géologiques, nous allons porter notre attention aux explications que produisent, d'un côté, les chercheurs actuels et de l'autre, les lycéens : il s'agit de "démontrer" leurs explications pour accéder aux types d'actualisme ou de catastrophisme qu'ils emploient et aux nécessités qu'ils construisent, ce qui forcément nous ramène au(x) temps. Dans la mesure où la problématisation privilégie l'apodictique (le possible/ nécessaire) et moins l'assertorique (le vrai/ faux), nous allons particulièrement tenir compte des arguments développés par les chercheurs et les élèves pour dégager ce qui a pour eux valeur de nécessités.

Type de problème	Outil méthodologique	Nature du temps	Problématisation
Problème fonctionnaliste		Temps perceptible pour l'homme	- Espace des contraintes - Nécessités sur le modèle = conditions de possibilité des solutions
		Temps long = temps imperceptible pour l'homme	- Espace des contraintes - Nécessités sur le modèle = conditions de possibilité des solutions + Nécessité du temps long
Problème historique	Actualisme d'analogie (on est dans l'ordre de l'histoire)	Temps du passé qui serait perceptible pour l'homme	- Espace des contraintes - Nécessités sur le modèle = conditions de possibilité des solutions
	Actualisme de 2è niveau (on est dans l'ordre de l'histoire)	Temps du passé long et au contenu uniforme	- Espace des contraintes - Nécessités sur le modèle = conditions de possibilité des solutions + Nécessité du temps long
	Catastrophisme (on est dans l'ordre de l'histoire)	Temps du passé affranchi de la longueur	- Espace des contraintes - Nécessités sur le modèle = conditions de possibilité des solutions
	Expérience de pensée consistant à rembobiner l'histoire et à la redescendre	Temps "passé" long où joue la contingence	- Nécessité de l'histoire = événement ou phénomène ayant valeur de nécessité par les conséquences qu'il a laissées

Figure 3.8 : Problématisations fonctionnaliste et historique, actualisme et temps

Chapitre 4

LES PROBLEMES GEOLOGIQUES ETUDIES

Sommaire

1. La complexité du temps en Sciences de la Terre
2. Les problèmes géologiques choisis
3. Méthodologie d'étude

Les approfondissements théoriques des chapitres 1, 2 et 3 préparent l'étude épistémologique et didactique de quelques problèmes des sciences de la Terre du lycée du point de vue de l'utilisation du temps. Après avoir résumé les apports de ces approfondissements, notamment en matière de temps, et avant d'entrer dans l'analyse précise de situations de classe, nous allons présenter les problèmes géologiques retenus et la méthodologie de notre étude.

1. La complexité du temps en Sciences de la Terre

La première partie de notre recherche a permis de pointer quelques particularités des sciences de la Terre, notamment leur tension entre sciences fonctionnalistes et sciences historiques (chapitre 1). Nous avons vu que l'articulation entre la géologie axée sur fonctionnement actuel de la Terre et la géologie préoccupée de reconstituer le passé de la Terre repose sur le principe de l'actualisme (chapitre 2). Ce principe n'est pas monolithique : nous retenons l'intérêt de sa composante méthodologique, **polymorphe dans son rapport au temps**, pour construire une véritable histoire de la Terre. Mais l'usage de l'actualisme ne suffit pas à reconstituer le passé, car l'Histoire se définit aussi par **la contingence** (chapitre 3). Les approfondissements que nous avons faits sous l'angle de la problématisation permettent de clarifier ce qui rapproche ou distingue les explications historiques des explications fonctionnalistes : construire un problème historique, c'est comme pour un problème fonctionnaliste, établir **des nécessités portant sur le modèle** de fonctionnement des phénomènes impliqués (ce sont les conditions de possibilités des solutions) ; mais c'est également retrouver **les nécessités de l'histoire**, autrement dit les conditions nécessaires des traces qui sont leurs conséquences. Si donc, pour les problèmes de la géologie historique, le recours aux différents niveaux de l'actualisme (actualisme de 1er niveau ou actualisme d'analogie, actualisme de 2è niveau à temps long) permet d'établir les nécessités portant sur le modèle de fonctionnement de phénomènes anciens, il faut lui adjoindre des expériences de pensée de rembobinage et de "re-déroulement" de l'histoire, où intervient la contingence. L'actualisme fait entrer dans la complexité du temps, notamment par la construction de la **nécessité du temps long**. La prise en compte de la contingence historique fait également entrer dans cette complexité, pour retrouver **des évènements ou des phénomènes qui auraient pu ne pas être**. Au delà de la chronologie et de la durée, c'est d'une véritable

problématisation du temps dont il est question. C'est aux caractères de la problématisation du temps des chercheurs et des élèves que nous allons donc nous intéresser, dans le cadre de quelques problèmes géologiques.

2. Les problèmes géologiques choisis

Notre choix s'est porté sur quelques problèmes géologiques : les problèmes du fonctionnement et de l'évolution d'un océan (reconstitution du passé d'un océan et évolution de la zone d'une dorsale), le problème des ophiolites, enfin le problème de l'origine de la vie. Trois raisons le justifient que nous allons développer.

2.1. Des problèmes pris en compte par les programmes du lycée

Les problèmes que nous allons étudier s'intègrent au cadre des programmes de Sciences de la vie et de la Terre du lycée de 1992 (pour les classes de Seconde et Première S) et 1994 (classe de terminale S). Les problèmes du fonctionnement et de l'évolution d'un océan et celui des ophiolites sont du ressort de la classe de Première S (M.E.N., 1992, tome II, p. 86-87), le problème de l'origine de la vie est abordé en classe de Terminale S (M.E.N., 1994, p.45).

Les programmes de Seconde comportent une partie où sont mises en évidence quelques originalités de la Terre comparée aux autres planètes du système solaire. Comme dans ces originalités, il y a la présence d'une biosphère (M.E.N., 1992, tome I, p. 55), nous avons "étendu" notre étude didactique du problème de l'origine de la vie à ce niveau.

2.2. Des problèmes qui témoignent a priori d'une diversité des temps

Dans le chapitre 1, nous avons illustré la multiplicité des temps sur quelques exemples choisis dans l'histoire des sciences. Les problèmes que nous retenons sous-tendent également une multiplicité des temps.

2.2.1. Les problèmes du fonctionnement et de l'évolution d'un océan

Les problèmes du fonctionnement et de l'évolution d'un océan s'intègrent dans la partie du programme de Première S consacrée à l'"*expansion et genèse de la lithosphère océanique*" (M.E.N., 1992, tome II, p. 86) et son cadre théorique est celui de la tectonique des plaques.

Etudier l'évolution d'un océan, c'est implicitement mettre en jeu du **temps sagittal** et du **temps long** : le fond océanique change puisqu'il s'agrandit, et ces changements se font sur des millions d'années.

Les programmes précisent que "*Les anomalies magnétiques, l'âge de la croûte ou des premiers sédiments qui la surmontent permettent de suivre l'évolution de la dynamique des fonds océaniques*" (M.E.N., 1992, tome II, p. 86). On sait que des anomalies magnétiques ont été détectées sur les fonds océaniques. Elles forment des bandes parallèles à l'axe de la dorsale "médio"-océanique et sont symétriques par rapport à cet axe. Enfin, elles ont été datées. Avec la prise en compte de ces bandes, on peut convoquer **les datations absolue et relative**, les **discontinuités temporelles** liées aux "brusques" inversions du champ magnétique terrestre. Avec la prise en compte des sédiments surmontant les plaques, on articule un processus d'expansion des fonds océaniques et un processus de sédimentation.

On saisit la multiplicité des temps **sous-jacente** dans ces problèmes.

2.2.2. Le problème des ophiolites

Les programmes de Première S demandent d'étudier les ophiolites en tant que "*témoins de l'histoire océanique des plaques entrées en collision*" que l'on retrouve au sein des chaînes de montagnes comme les Alpes et l'Himalaya (M.E.N., 1992, tome II, p. 87). Plus haut dans la même partie du programme, dans la partie relative à "*l'expansion et à la genèse de la lithosphère océanique*", il est suggéré dans les activités envisageables de comparer la croûte océanique aux ophiolites.

Le problème des ophiolites est donc envisagé selon plusieurs entrées, qui cachent des temps différents. A titre d'illustration, la comparaison des formations rocheuses ophiolitiques et océaniques montre de grandes ressemblances, ce qui conduit à les rapporter à un même processus (le magmatisme d'une dorsale) : c'est une façon de **"gommer" le temps**.

Les considérer maintenant dans l'histoire d'une chaîne de collision, c'est faire intervenir, dans le rapprochement des plaques, l'affrontement des masses continentales, la formation de structures de compression, du **temps sagittal et du temps long** ; c'est construire des **"épisodes"** de cette histoire.

Le problème des ophiolites appelle donc différentes figures du temps, certaines moins évidentes que d'autres, pas exactement les mêmes que le problème de fonctionnement et d'évolution d'un océan.

2.2.3. Le problème de l'origine de la vie

En Terminale S, le problème de l'origine de la vie trouve sa place dans la partie consacrée aux "*aspects de l'histoire et de l'évolution de la terre*", que les instructions officielles conseillent de faire en 2 semaines, et plus précisément dans le paragraphe intitulé "*formation de la terre et premières étapes de l'évolution de la vie*" (M.E.N., 1994).

Sans entrer dans le détail de l'origine de la vie, notons d'abord que les chercheurs la situent il y a environ moins 4 milliards d'années : c'est un événement **extrêmement éloigné dans le temps**. Portons notre attention sur quelques activités envisageables et aux formes du temps qu'elles masquent :

- "*Etude, sur documents, (...) des molécules organiques des météorites*" : si une telle activité est suggérée, c'est parce que les météorites représentent des fragments de planète éclatée, d'un âge comparable à la Terre, tombées en "pluie" aux premiers temps de la Terre, et dont les molécules organiques ont pu prendre part à l'évolution moléculaire conduisant aux premiers êtres vivants. Traduisons cela en termes de temps, sans prétendre être exhaustif : **datation** absolue, **décroissance temporelle** du bombardement météoritique de la Terre, **enchaînement** de réactions chimiques, ... Force est de constater la multiplicité des temps et ... la diversité des échelles spatiales.

- "*Analyse des expériences de Miller, Oparine, ...*" : il s'agit là d'expériences, réalisées au laboratoire, visant à tester des hypothèses sur l'évolution moléculaire prébiotique. Elles cherchent à reproduire l'origine de la vie donc à **"gommer" le temps** et elles situent **dans un temps perceptible à l'homme un processus pensé dans le temps géologique**.

C'est une nouvelle fois montrer la diversité et la complexité des temps.

2.2.4. Conclusion

Le choix de ces quelques problèmes géologiques se justifie donc dans leur rapport au temps : ils témoignent d'une diversité des temps sous-jacents, pour un même problème et d'un problème à l'autre. Ajoutons qu'ils présentent également de l'intérêt car les premiers

(problèmes de fonctionnement et d'évolution d'un océan) paraissent s'intégrer en partie dans la géologie fonctionnaliste, les autres (ophiolites, origine de la vie) participant de la géologie historique. Mais ce n'est pas parce qu'ils sont davantage sur le pôle fonctionnaliste qu'ils éliminent le temps ; et ce n'est pas parce qu'ils sont plutôt sur le pôle historique qu'ils l'utilisent en permanence.

2.3. Des problèmes plus ou moins familiers des élèves

Il nous a paru intéressant pour notre étude de soumettre aux élèves des problèmes pour lesquels ils n'avaient pas le même degré de familiarité.

- Ainsi, pour ce qui est des problèmes de fonctionnement et d'évolution d'un océan, nous savons que les lycéens ont déjà travaillé dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques (programmes de l'école primaire, programmes du collège).

- En revanche, le problème de l'origine de la vie leur est vraisemblablement plus étranger.

Il y a fort à penser que des décalages existent, en matière d'utilisation du temps notamment, selon le degré de maîtrise qu'a l'élève d'un domaine.

3. Méthodologie d'étude

Chaque problème géologique sera traité selon la même démarche : d'abord une étude épistémologique visant à faire un état du savoir actuel et de son établissement ; puis des analyses a priori et a posteriori de situations de classe ayant donné lieu aux productions des élèves étudiées. Dans toutes les étapes de cette démarche, nous privilégierons, **pour explorer les fonctions du temps dans les explications**, les deux angles d'attaque établis dans les chapitres précédents, à savoir les actualismes méthodologiques (actualismes de premier et de deuxième niveau, vs catastrophismes) et la problématisation. Nous faisons ainsi le choix **d'entrer avec des points de vue bien définis dans les utilisations du temps des élèves**.

3.1. Les deux angles d'attaque

Les deux angles d'attaque que nous privilégions, pour étudier le savoir savant comme les productions des élèves du point de vue du temps, sont l'actualisme (chapitre 2) et la problématisation (chapitre 3). Rappelons leurs caractéristiques.

3.1.1. L'actualisme méthodologique

La géologie s'emploie à expliquer le fonctionnement de la Terre et à reconstituer des phénomènes et des événements de son passé : elle construit ainsi des explications fonctionnalistes et des explications historiques (chapitres 1 et 3).

Le passé de la Terre, qui peut se compter en milliers, millions voire milliards d'années, ne lui parvient que par des traces géologiques qu'il s'agit de sélectionner, d'identifier et d'interpréter. Pour cela, il faut des outils. **Le principe de l'actualisme**, qui sous-entend que le fonctionnement passé de la Terre peut être expliqué par des causes géologiques encore agissantes, en est un auquel recourent tous les chercheurs. Mais, et nous l'avons vu, il existe dans une tension dialectique avec le catastrophisme, le directionnalisme et le recours à des causes rares (chapitre 2). D'autre part, nous avons distingué deux niveaux de signification de l'actualisme : un premier niveau que nous qualifions d'**actualisme d'analogie** et un 2^e niveau que nous appelons **actualisme à temps long**.

L'actualisme de 1er niveau ou actualisme d'analogie

L'utilisation de l'actualisme de premier niveau (actualisme d'analogie) pourra être repérée dans la pensée du scientifique ou dans celle de l'élève quand la trace ancienne est référée à un analogue actuel et à un ou des processus actuels bien définis qui le produisent. C'est un actualisme d'analogie directe, **qui n'a pas besoin du temps géologique**, puisque la projection peut se faire aussi bien dans une période récente que plus ancienne.

L'actualisme de 2è niveau ou actualisme à temps long

On pourra repérer la mise en jeu de l'actualisme de 2è niveau chez le scientifique ou chez l'élève quand la démarche qui consiste à référer la trace ancienne à un analogue actuel, à le projeter ensuite dans le passé les oblige à recourir à un temps long créateur, à partir de processus actuels, d'un phénomène non perceptible dans le temps humain. En termes de problèmes, il s'agit d'expliquer non seulement l'origine de la trace mais également sa transformation pour obtenir l'état actuel. Sans cette construction d'un temps long à rôle qualitatif, on peut penser qu'on a affaire à du catastrophisme.

3.1.2. Une approche par la problématisation

Des travaux de didactique des sciences portant sur la modélisation (J. L. Martinand, 1992) et la construction de problèmes (C. Orange & al, 1999), nous reprenons l'idée que les problèmes ne sont pas donnés (Bachelard, 1938) mais qu'ils sont construits dans une interaction entre un registre empirique et un registre des modèles (chapitre 3). Ainsi, dans une explication, les contraintes empiriques (les faits signifiants dont on doit rendre compte) et les modèles n'existent qu'en tension les uns avec les autres : **les contraintes empiriques** doivent être prises en compte par le modèle ; le modèle répond à **des nécessités tenues pour incontournables** dans le cadre du registre explicatif adopté (et pas toujours conscientisé).

Notre travail va donc consister, pour chacun des problèmes retenus, à reconstituer l'espace des contraintes, en termes de **contraintes empiriques** et de **nécessités sur le modèle** construites, et d'éléments du registre explicatif (dont par exemple le type d'actualisme mis en jeu). Nous utiliserons les entretiens avec des chercheurs ou des élèves, car ils peuvent rendre compte des contraintes, au travers des arguments développés et des impossibilités signifiées : une nécessité sur un modèle n'est-elle pas en effet la "contre-empreinte" d'une impossibilité ? Pour les problèmes historiques, il s'agira également de retrouver des **nécessités de l'histoire**, soient des événements ou phénomènes ayant valeur de nécessité par les conséquences qu'ils ont laissées (chapitre 3). Entrer dans les explications par la problématisation, c'est donc bien se donner des moyens de "retrouver" le temps.

3.2. Une étude épistémologique

Pour chaque problème géologique, nous ferons d'abord état du savoir actuel dans les relations qu'il entretient avec le temps, comme on ferait l'étude "orientée" d'une question. Puis nous situerons ce savoir dans l'histoire de la géologie. Depuis quand prend-il ces caractéristiques ? Avec quoi établit-il une rupture ? Quelles incidences cela a-t-il eu en termes d'utilisation du temps ?

Nous consacrerons ensuite une partie à son analyse des points de vue de l'actualisme et de la problématisation. Nous avons rappelé dans le paragraphe précédent que ce sont des façons d'accéder au temps. Nous baserons notre étude sur des entretiens avec trois chercheurs qui, non seulement sont des spécialistes des domaines que nous étudions mais qui, par leur formation initiale différente, illustre en partie la diversité des disciplines constituant les sciences de la Terre actuelles (chapitre 1). Le tableau suivant les présente et leur compte rendu ou leur transcription³⁴ figurent dans les annexes 1, 2 et 3.

Entretien avec :	Date :	Entretien portant sur :
André BRACK chimiste Directeur de recherche CNRS	Jeudi 1er février 2001 Centre de biophysique moléculaire (ORLEANS)	Le problème de l'origine de la vie Transcription : Annexe 3
André MICHARD tectonicien, Professeur émérite	Mardi 6 février 2001 Ecole Normale Supérieure (PARIS)	Le problème des ophiolites Compte rendu : Annexe 2
Xavier Le Pichon, géophysicien Professeur au Collège de France	Mercredi 12 décembre 2001 Ecole Normale Supérieure (PARIS)	Les problèmes de l'histoire des fonds océaniques et du fonctionnement d'une dorsale Transcription : Annexe 1

Tableau 4.1 : Récapitulatif des entretiens avec des spécialistes des domaines étudiés

Les entretiens avec des spécialistes ont, dans notre recherche, les fonctions suivantes :

- Ils doivent permettre de pousser notre réflexion sur l'actualisme et les utilisations du temps dans les explications géologiques, plus qu'on ne pourrait le faire à partir de leurs publications.
- De même, ils permettent des explicitations d'arguments et de raisons pas toujours présents dans les articles (car évidents pour la communauté scientifique).
- Ils rendent ainsi possible la construction de l'espace des contraintes des chercheurs et ouvrent vers une comparaison avec ceux des élèves. Nous avons en effet réalisé des entretiens d'élèves et des confrontations orales de travaux d'élèves.

3.3. Une étude didactique

L'étude de productions des élèves occupe une place importante dans cette deuxième partie. Nous disposons, pour chaque domaine, d'un corpus fourni de productions écrites d'élèves dont nous rappellerons la constitution. Comme nous l'avons écrit précédemment, il s'y ajoute des entretiens d'élèves, mais aussi des enregistrements audio de présentations et de confrontations de modèles d'élèves. Notre choix a été de ne pas questionner les élèves directement sur le temps. C'est pourquoi, notre analyse des productions des élèves, d'abord "large", tentera de se resserrer progressivement sur les utilisations du temps. Certaines situations (c'est le cas pour le problème de l'origine de la vie) ont été aménagées d'année en année pour un meilleur accès à l'utilisation du temps.

Avant d'entrer dans les productions des élèves, nous réalisons une analyse a priori des situations, en termes d'actualisme(s) et de problématisation en jeu dans les situations de classe proposées. Le point de vue est celui de l'expert. Les approfondissements théoriques (chapitres 1, 2, 3) et épistémologiques (chapitre portant sur le savoir savant) aident ainsi à construire des grilles de lecture des productions des élèves.

³⁴ Compte rendu et transcriptions ont été revus par ces chercheurs

Puis nous étudions les productions des élèves de façon à identifier les écarts entre ce que produit l'élève et le point de vue de l'expert. A nous focaliser sur l'utilisation du principe méthodologique de l'actualisme et sur la problématisation, nous éclairons nécessairement les utilisations du temps dans les explications des élèves.

Un dernier chapitre tente une mise en perspective des résultats obtenus pour chacun des problèmes étudiés ; il complète les études de cas par le "suivi" de quelques élèves, en termes d'utilisation du temps : un petit nombre d'élèves a en effet réalisé, sur deux niveaux différents (Seconde/ Première S ou Première S/ Terminale S) plusieurs de nos situations.

PREMIERE ETUDE

LA RECONSTITUTION DU PASSE D'UN OCEAN ET LE FONCTIONNEMENT D'UNE DORSALE

L'actuel extrapolé et la mise à l'écart du temps

Chapitre 5

LE FONCTIONNEMENT D'UN OCEAN

Un état du savoir

Sommaire

1. Les grands ensembles océaniques et leur signification géologique
2. La complexité géologique des fonds océaniques
3. Caractéristiques comparées de la sédimentation et de l'expansion
4. Quelques éléments d'histoire des sciences
5. Mobilisation de l'actualisme par les chercheurs actuels
6. Problématisation du fonctionnement des fonds océaniques par les géologues et les géophysiciens
7. Conclusion

Les premiers problèmes géologiques que nous étudions portent sur la reconstitution du passé d'un océan et sur le fonctionnement de la zone d'une dorsale. Cette première partie concerne le savoir savant en matière de fonctionnement d'un océan (les parties suivantes seront consacrées à l'étude didactique de situations de classe au lycée) : nous allons d'abord faire état de la compréhension de ce fonctionnement par les géologues³⁵ actuels et rappeler des éléments de l'histoire de la géologie relatifs à l'établissement de ce savoir. Ensuite nous analyserons le savoir actuel sous l'angle de l'actualisme et de la problématisation. Ce sera un moyen de repérer plus précisément les utilisations du temps dans les explications. Notre étude s'appuiera sur l'entretien que nous avons eu avec Xavier Le Pichon, géophysicien, le 12 décembre 2001.

1. Les grands ensembles océaniques et leur signification géologique

1.1. Morphologie et pétrologie des fonds sous-marins

Morphologiquement, chaque grand océan (Atlantique, Indien, Pacifique) se divise en trois grandes provinces (Pomerol, 2000, p. 488). Nous les présentons de façon à mieux localiser ensuite les zones que nous étudierons plus particulièrement d'un point de vue géologique :

- à la périphérie d'un océan, **les marges ou bordures continentales**. Certaines sont stables, comme les marges circum-Atlantique ; d'autres sont actives car pourvues d'une activité volcanique et sismique : c'est le cas de la plupart des marges circum-Pacifique. Ces marges actives sont en général bordées d'une fosse océanique profonde ;

³⁵ au sens large (voir le chapitre 1)

- au sein d'un océan et à la manière d'une balafre, un relief étroit et allongé appelé **dorsale océanique**, siège d'une activité volcanique et sismique soutenue ;
- enfin entre marges continentales et dorsales, **des plaines abyssales**, parsemées parfois d'alignements volcaniques, comme c'est le cas dans le Pacifique central.

D'un point de vue pétrologique, dorsale et plaines abyssales peuvent être regroupées car elles sont revêtues d'une croûte océanique de composition basique (basalte en surface, gabbro en profondeur) alors que les marges sont faites de croûte continentale de nature granitique et métamorphique (Juteau, Maury, 1999, p. 4-5). Des sédiments surmontent ces parties crustales : si, dans la partie axiale de la dorsale, la croûte est à nu, la couverture sédimentaire devient une réalité et s'épaissit quand on s'en éloigne (Nicolas, 1990, p. 19). Cela n'est pas sans poser problème puisque les grands ensembles physiques ne se distinguent pas par une singularité pétrologique.

Dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, quelle signification prennent ces grands ensembles océaniques ?

1.2. La signification géologique actuelle des grands ensembles océaniques

Dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, la partie superficielle de la Terre appelée lithosphère (sphère des roches) est découpée en plaques rigides (**plaques lithosphériques** ; 13 plaques majeures, Pomerol et al, 2000, p. 229), solides et mobiles sur un fond lui-même solide mais plus plastique appelé asthénosphère (sphère sans force). La lithosphère comprend la croûte (océanique ou continentale) et le manteau supérieur. Dorsales et marges actives représentent **des frontières de plaques**, alors que plaines abyssales et marges passives font partie intégrante de plaques. Détaillons un peu en nous limitant toujours aux entités océaniques :

- Chaque **dorsale océanique** est à la fois comprise comme étant la frontière entre 2 plaques lithosphériques divergentes et *"un centre d'accrétion, le long duquel se produit l'expansion continue du plancher océanique"* (Juteau, Maury, 1999, p. 6), c'est-à-dire une zone d'agrandissement de ces 2 plaques. Dans ce modèle, du magma formé par fusion partielle de péridotite à la verticale de son axe (vers 50-60 km de profondeur) remonte et se solidifie, participant ainsi à la construction de nouveaux pans de croûte océanique. De la péridotite résiduelle contribue à édifier la partie basale mantellique de ces pans. Les parties nouvellement formées subissent ensuite une dérive latérale les éloignant de l'axe de la dorsale, à la manière d'un double tapis roulant. On trouve des marques de ce fonctionnement dans les caractéristiques du fond basaltique des océans et dans celles des sédiments qui le surmontent. Citons-en quelques-unes :

- * La disposition et l'âge des anomalies magnétiques mesurées au niveau du basalte : ces anomalies sont en bandes "parallèles" et symétriques par rapport à l'axe de la dorsale ; elles sont d'autant plus vieilles qu'elles sont éloignées de cet axe. Cette donnée empirique fut (voir annexe 1, XLP, intervention 230) et demeure un argument fort d'attestation de ce fonctionnement :

- * l'épaisseur des sédiments déposés sur le fond basaltique : elle augmente avec l'âge du fond basaltique.

- * l'âge des premiers sédiments déposés sur le fond basaltique : plus le fond est ancien, plus ces sédiments sont anciens. On constate que plus on s'éloigne de l'axe de la dorsale, plus l'âge de ces sédiments augmente.

Toujours dans ce cadre théorique, **les plaines abyssales** sont donc constituées de fonds océaniques engendrés par la dorsale : de ce fait, elles se caractérisent par leur mobilité et leur hétérogénéité d'âge (elles sont d'autant plus jeunes que l'on se rapproche de la dorsale).

- **Les bordures continentales actives**, souvent bordées de grandes fosses océaniques, signalent des zones de subduction, zones où de la lithosphère océanique s'enfonce et se résorbe dans le manteau sous-lithosphérique. Ces limites océaniques sont donc des frontières de plaques convergentes. La "disparition" de lithosphère océanique qui s'y produit est aussi une "disparition" de fond océanique.

- **Les bordures continentales passives**, telles celles qui limitent une partie de l'Atlantique, ne sont que la périphérie de continents ancrés dans certaines plaques et participant passivement à leur mouvement.

En résumé, placée dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, la signification, le fonctionnement et l'histoire des fonds océaniques ne sont plus problématiques pour les chercheurs actuels³⁶.

2. La complexité géologique des fonds océaniques

A conjuguer la réalité d'un fond océanique au concept de plaque lithosphérique, **un fond océanique prend le statut d'un objet complexe** dans sa structure (plusieurs plaques) mais aussi dans son fonctionnement.

2.1. Une complexité dans leur rapport aux plaques

1) L'enveloppe terrestre la plus externe significative n'est **pas la croûte** (océanique ou continentale) **mais la lithosphère**, une entité réunissant la croûte et le manteau supérieur.

2) Il n'y a **pas adéquation entre plaque, océan ou continent**. L'Atlantique Nord, par exemple, appartient à 2 plaques en partie continentales : une qui va de la dorsale médio-océanique jusqu'à la bordure ouest de l'Amérique du Nord, l'autre qui s'étend de la dorsale jusqu'au continent Euroasiatique compris.

2.2. Une complexité dans leur fonctionnement et dans leur âge

1) **Un fond océanique est en continu et en graduel agrandissement** puisque, au niveau de la dorsale, l'une et l'autre des deux plaques qu'elle limite s'agrandissent par remontée de matériel mantellique. Mais **un fond océanique est également voué à une disparition**. Car, vu que le globe terrestre n'est pas en expansion, la nécessité des zones de subduction, zones où du fond océanique disparaît par enfouissement dans la Terre, s'impose comme complément du processus d'accrétion et de collision. De plus la subsidence thermique, affaissement de la lithosphère océanique consécutif à son refroidissement, conduit inexorablement à sa plongée dans l'asthénosphère. A. Nicolas (1990, p. 25) pense que c'est le lot d'une lithosphère océanique de plus de 150 Ma (Millions d'années) d'âge.

³⁶ Les propos de X. Le Pichon le confirment (voir entretien en annexe 1).

2) Il y a uniformité de nature et d'organisation des roches magmatiques, pour le fond d'un même océan ou d'un océan à un autre, mais il n'y a **pas uniformité d'âge** de leurs parties. On relève d'ailleurs une augmentation progressive de l'âge dès lors que l'on s'éloigne de l'axe de la dorsale, sans aller au delà de 200 millions d'années (Pomerol & al, 2000, p. 177 ; Nicolas, 1990, p. 27). Les fonds océaniques n'ont pas partout le même âge et, globalement, sont géologiquement jeunes. C'est en effet du passé de la Terre qui disparaît lorsqu'ils s'enfoncent dans le manteau.

3) Un fond océanique est engagé dans deux sortes de mouvements :

- **des mouvements horizontaux** dans une direction d'éloignement perpendiculaire à l'axe de la dorsale. Ces mouvements sont ceux des plaques divergentes qui établissent une frontière à l'axe de la dorsale. Leur quantification (pour une plaque) donne des vitesses allant de 0, 5 cm/an (plaques de la Mer Rouge) à 11 cm/an (plaque Pacifique) (Pomerol & al, 2000, p.227), autrement dit des valeurs perceptibles à l'échelle humaine. En multipliant par deux ces vitesses, on trouve la vitesse d'expansion du fond océanique. Les mouvements des plaques sont expliqués par des courants de convection du manteau solide sous-jacent.

- **des mouvements verticaux** d'enfoncement. En s'écartant de l'axe de la dorsale, la lithosphère se refroidit progressivement et voit sa densité augmenter (un objet plus froid est moins dilaté). Ce qui la conduit à s'enfoncer : c'est ce que l'on appelle la subsidence thermique (Nicolas, 1990, p. 22 ; Pomerol & al, 2000, p. 495-496).

4) Les processus d'accrétion et de subduction se font **continûment** : il n'y a pas à proprement parler d'à-coups. Les estimations de vitesses d'expansion des fonds océaniques de 1 à environ 20 cm par an (voir plus haut) confirment cela, même s'il y a des vitesses d'expansion variables d'une dorsale à une autre (dorsale lente et dorsale rapide) et d'un tronçon à un autre d'une même dorsale (Pomerol & al, 2000, p.176).

5) Un fond océanique basaltique reçoit **continûment** des sédiments. Cette couverture sédimentaire est d'une épaisseur d'autant plus grande que le fond basaltique est ancien. Autrement dit, cette épaisseur augmente avec l'éloignement de l'axe de la dorsale.

Comme les processus d'accrétion, de subduction et de sédimentation se font continûment, on ne peut pas distinguer d'épisodes dans l'histoire d'un fond océanique. A tout le moins peut-on s'interroger sur le début (la mise en place d'une dorsale) et la fin (disparition totale de l'océan) de cette histoire (Juteau, Maury, 1999, p. 341, Nicolas, 1990, p. 175).³⁷

6) De la continuité dans un cycle.

La lithosphère océanique et plus particulièrement sa partie supérieure ou croûte océanique qui constitue véritablement le fond océanique sont engagées dans une histoire cyclique comprenant plusieurs grandes étapes (Juteau, Maury, 1999, p. 14 et pp 341-342) :

a) une genèse, au niveau d'une dorsale, par solidification d'un magma issu du manteau (ce qui donne une couche basaltique de 2 km environ d'épaisseur et une couche gabbroïque de 4-5 km environ d'épaisseur).

b) une modification de la partie basaltique au cours de son "voyage" en position de fond océanique, "voyage" qui dure plusieurs dizaines de millions d'années : interaction basalte-eau de mer (d'où des transformations minéralogiques) ; chargement en sédiments et en produits magmatiques provenant du volcanisme intra-plaque (d'où un enfoncement des basaltes et des gabbros lié à cette surcharge, amenant des recristallisations métamorphiques).

³⁷ Les lycéens posent régulièrement des questions sur ces sujets.

c) un retour dans le manteau, au niveau d'une zone de subduction, d'une croûte un peu différente de celle qui est née à la dorsale. En effet, aux changements liés à sa "vie" comme fond océanique (voir le paragraphe b), s'ajoutent ceux qui se sont produits au cours de sa descente, car la croûte océanique peut partiellement fondre et alimenter le volcanisme des zones de subduction (Pomerol & al, 2000, p. 520). Le manteau récupère ainsi ce qu'il a fourni plus tôt dans le temps, avec quelques variations cependant.

d) des centaines de millions d'années plus tard, une remontée des éléments impliqués dans cette histoire (ils sont alors des constituants du manteau), par le biais d'un panache ascendant ou sous une dorsale pour construire une nouvelle croûte océanique. Un cycle est ainsi bouclé, un autre peut commencer.

Des questions se posent sur la régularité des cycles et sur l'évolution géochimique du manteau qui paraît linéaire.

En résumé, un fond océanique a une histoire (où interviennent accréation, mouvements, sédimentation) qui s'intègre dans un fonctionnement crusto-mantellique plus général mobilisant cycles (cycles de la croûte océanique ou de la lithosphère océanique), catastrophes (changement du régime de convection mantellique), évolution géochimique du manteau. Si nous nous limitons au fonctionnement "en routine", il relève plus de l'explication fonctionnaliste déterministe que de l'explication historique. En effet, à remonter le temps depuis l'actuel ou à se projeter dans l'avenir, nous reconstituons un fond océanique par la seule application de lois d'évolution considérées comme invariables dans le temps. Il y a une loi concernant l'expansion du fond basaltique et une loi relative à la sédimentation :

- **A l'axe d'une dorsale**, à tout moment, avec le même rythme, il se forme des pans de fond océanique. Il y a ensuite une double dérive des pans nouvellement formés.

- **En tout point du fond océanique** et à tout moment, il y a de la sédimentation. Le dépôt qui s'effectue à un moment donné se superpose au dépôt du moment précédent.

3. Caractéristiques comparées de la sédimentation et de l'expansion

Ce que nous venons de développer nous donne un "état des lieux" de la connaissance scientifique à la fin du 20^e et au début du 21^e siècle. Il est bien clair qu'en ce qui concerne la formation d'un fond océanique, **les chercheurs conjuguent "naturellement" des processus de géodynamique externe (la sédimentation) et de géodynamique interne (l'accréation)**. Pour préparer notre réflexion sur ce que produisent les élèves dans ce domaine, faisons bien ressortir les ressemblances et les différences entre ces deux processus du point de vue du temps et de l'espace :

3.1. Des processus simultanés, continus et réguliers

La formation de la lithosphère océanique (roches magmatiques et revêtement sédimentaire) n'admet pas d'épisodes individualisés : à chaque instant, il y a production de roches magmatiques et de dépôts sédimentaires. Cette continuité est "palpable" actuellement puisqu'on enregistre une sismicité et un volcanisme permanents au niveau du rift (zone axiale de la dorsale), ainsi qu'une accumulation de sédiments sur les fonds océaniques. Gohau (1990, p. 235) souligne d'ailleurs que *"la tectonique des plaques vient à l'appui du continuisme"*. De plus, pour ce qui est d'un bassin océanique donné, la vitesse de ces processus est assez faible et elle varie peu : c'est petit à petit, graduellement, qu'il y a des changements significatifs. Sédimentation et accréation sont marqués par **la continuité et la régularité**.

3.2. Des processus qui s'excluent dans l'espace

Accrétion et sédimentation ne s'exercent pas aux mêmes endroits : la formation des roches magmatiques se fait là où la sédimentation n'a pas eu encore le temps et l'espace de se faire (puisque dans l'axe du rift, le fond basaltique vient juste de se faire).

Ces processus ajoutent chacun leurs effets à un moment donné aux effets du moment précédent, sans que ces derniers soient perturbés.

- * Ainsi les sédiments qui se déposent actuellement se mettent-ils sur ceux déposés il y a peu.
 - * De même, dans un plan vertical, les nouveaux pans de lithosphère se juxtaposent-ils aux pans formés précédemment.
- On a donc maintien d'une bonne lisibilité du terrain malgré les ajouts au cours du temps.

Cela conduit les chercheurs à penser une représentation en termes de **juxtaposition** d'une infinité de nouveaux pans de fonds basaltiques océaniques à partir de la dorsale et à une **superposition/ juxtaposition en biseau de sédiments sur le fond océanique**. Illustrons cela :

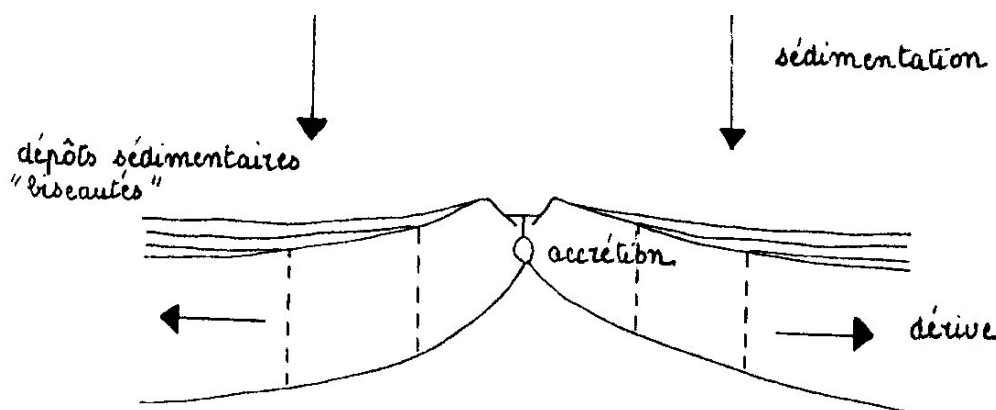


Figure 5.1 : Dérive, accrétion et sédimentation océaniques

3.3. Des processus qui "marquent" le temps, mais pas exactement dans la même direction spatiale

L'accrétion s'accompagne d'une dérive latérale des pans lithosphériques nouvellement formés. De part et d'autre de l'axe de la dorsale, l'âge du fond océanique basaltique augmente. **L'expansion marque le temps horizontalement**³⁸, comme si l'on pouvait dessiner deux flèches temporelles horizontales, divergentes, mais ayant la même origine : la partie médiane de la dorsale (âge zéro = actuel).

³⁸ Ce marquage du temps se concrétise par les "bandes d'anomalies magnétiques".

La sédimentation nous conduit à obtenir, en tout point, des dépôts d'autant plus jeunes qu'ils sont proches de la surface. **Elle marque le temps verticalement.** Nous pouvons imaginer une flèche temporelle verticale, pointant vers le bas, et dont l'origine (âge zéro = actuel) est au fond de l'eau. Ce qui complique cette flèche, c'est que, selon la verticale par rapport au fond basaltique que l'on considère, cette flèche dont l'actuel est toujours au fond de l'eau, ne nous conduit pas au même âge des plus vieux sédiments. Et c'est là que nous la conjugons à la flèche du temps du fond basaltique : les plus vieux sédiments sont d'autant plus vieux que le fond basaltique est ancien, autrement dit que nous sommes loin de l'axe de la dorsale. En fait, il nous faut considérer une infinité de flèches du temps verticales.

En complément de ce que nous venons d'écrire, nous pouvons noter que **la sédimentation marque également le temps horizontalement.** En effet, les sédiments reposant directement sur le fond basaltique sont d'autant plus anciens qu'ils sont loin de l'axe de la dorsale. Tout se passe comme si on pouvait dessiner deux nouvelles flèches temporelles horizontales, divergeant à partir de l'axe de la dorsale (âge zéro = âge actuel).

En résumé, les deux processus que nous étudions nous permettent de construire 2 sortes de flèches du temps (voir la figure 5.2) :

- pour chacun des deux processus, des flèches horizontales dont le zéro (synonyme d'actuel) est représenté par le plan axial de la dorsale ;
- pour la sédimentation seulement, une flèche verticale dont le zéro (lieu de la sédimentation actuelle) correspond au fond de l'eau mais dont le bout de la pointe butte sur le fond basaltique et correspond à un âge d'autant plus vieux qu'on est loin de l'axe de la dorsale. Soulignons enfin le fait que le zéro de chacune de ces flèches n'est pas un zéro "absolu" ; il se rapporte à l'actuel du moment.

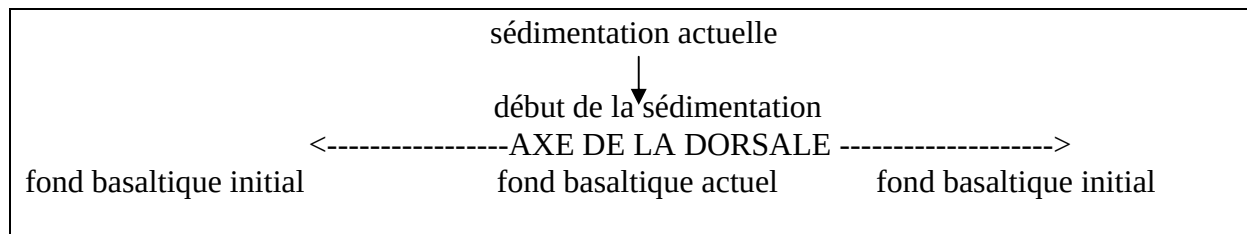


Figure 5.2 : Dérive/accrétion, sédimentation et marquage spatial du temps

4. Quelques éléments d'histoire des sciences

L'explication actuelle de la formation et du fonctionnement des fonds océaniques prend place, depuis la fin des années 1960, dans le cadre théorique de la tectonique des plaques. On peut se demander ce qu'il en était de la compréhension des océans dans le ou les cadres théoriques précédents et de quelle manière le temps intervenait dans les explications.

4.1. Un état des lieux à la fin du 19^e et au début du 20^e siècle

Pendant longtemps, c'est-à-dire jusqu'à la deuxième guerre mondiale, les océans restèrent peu connus directement par manque de techniques d'exploration et de théorie pertinente. Cependant, indirectement, cela n'empêcha pas qu'il y eut des spéculations sur leurs fonds et leur histoire. Ainsi par exemple, l'identification de strates marines au sein des chaînes de montagnes méritait-elle d'être expliquée.

Quoique essentiellement continentale et limitée à l'Europe occidentale et à l'Amérique du Nord Est, la géologie ne pouvait pas ignorer totalement les océans.

A la fin du 19^e siècle, le géologue autrichien Eduard Suess (1831-1914) entame la publication d'une grande synthèse sur la face de la Terre (*Das Antlitz der Erde* dont le premier fascicule paraît en 1883) qui fait référence dans la communauté scientifique européenne du moment. Comme Elie de Beaumont (1798-1874), il raisonne en admettant le refroidissement (et la solidification) progressif du globe terrestre. Conséquence de ce refroidissement, la contraction de la Terre à la manière d'une pomme qui se ride. Mais Suess reconsidère les mouvements crustaux provoqués par cette contraction. Certes il y a des affaissements de l'écorce (mouvements radiaux) accompagnés en surface de mouvements horizontaux compressifs à l'origine de plissements et de la formation de reliefs ; mais il y a aussi en surface des mouvements horizontaux distensifs dans les régions voisines des zones compressées. Mouvements tangentiels et mouvements radiaux ne sont pas indépendants : *"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). E. Suess explique de nombreux phénomènes : la formation des chaînes de montagnes, la formation des océans et des continents (par l'effondrement de certaines parties de la surface de la Terre, quand d'autres restent surélevées) ; les transgressions et les régressions (Hallam, 1976, p. 22).

Mais puisque, par le jeu des affaissements, océans et continents peuvent s'échanger, **il y a nécessité à considérer que la croûte terrestre est partout de même nature**. L'existence de roches sédimentaires marines sur les continents en témoigne. C'est ainsi que Suess, et avec lui de nombreux géologues, ne fait pas de distinction de nature entre croûte océanique et croûte continentale : il définit une croûte superficielle légère, faite de roches de type granitique, riches en silicium et aluminium, qu'il nomme SAL (dénomination qui sera ensuite abandonnée au profit de SIAL) surmontant une enveloppe de roches de type basaltique, riches en silicium et magnésium, appelée SIMA.

Suess est un actualiste convaincu (d'ailleurs il ouvre son ouvrage par une étude sur les *"mouvements actuels de la croûte extérieure du globe"*, Gohau, 1990b, p. 238) mais il ne peut se contenter des seuls mouvements réguliers pour expliquer le visage de la Terre. Pour lui des phénomènes exceptionnels par leur violence y participent aussi. Comme Elie de Beaumont, il conjugue actualisme et catastrophisme (Gohau, 1987, p. 197).

En résumé, à la fin du 19^e siècle et au début du 20^e siècle, le modèle d'une Terre en contraction (parce qu'en progressif refroidissement) rend compte de nombreux phénomènes géologiques. C'est le cas notamment de la formation des océans, expliquée par l'affaissement de grosses parties crustales. Ce modèle met l'accent sur des mouvements verticaux et appelle une identité de nature entre croûte continentale et croûte océanique. 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.

4.2. La fragilisation du modèle contractionniste

Au début du 20^è siècle, un certain nombre de données fragilisent les conceptions de E. Suess et conduisent Wegener à proposer l'hypothèse d'une dérive des continents. Ce sont tant des données géophysiques (gravimétrie, sismologie, radioactivité) que des données géologiques (sédimentologie, tectonique, pétrologie). Les données gravimétriques notamment remettent en cause la nature des fonds océaniques et les types de mouvements de la croûte possibles (Hallam, 1976, p. 25). Précisons ce que ces données remettent en question à propos de la croûte :

- le sous-sol océanique serait fait de roches plus denses que le sous-sol continental : c'est dire que la croûte océanique est simique et non plus sialique.
- des affaissements importants de bloc continentaux sont impossibles. La théorie de l'isostasie issue des travaux de Airy (1801-1892), de Pratt (1800-1871) et de Dutton ((1841-1912) met à mal cet aspect important de la synthèse de Suess. Selon elle, les continents plus légers flottent sur une couche visqueuse et plus dense ; leurs mouvements verticaux souscrivent alors au 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 ; mais de là à devenir un fond abyssal !

Enfin, les "quantifications" des mouvements radiaux et tangentiels invoqués par Suess pour expliquer les imposantes nappes de charriage que l'on reconnaît maintenant dans les chaînes de montagnes conduisent à un phénomène de contraction proprement excessif.

En résumé, il émerge au début du 20^è siècle une représentation de l'écorce terrestre sensiblement différente de celle de Suess. Il y a deux types de croûtes, toutes deux rigides :

- la croûte océanique basaltique (c'est du SIMA), sur laquelle se déposent des sédiments ;
- la croûte continentale subdivisible en deux parties : une partie superficielle granitique (du SIAL) et une partie profonde basaltique (du SIMA).

Les deux croûtes sont donc en continuité par leur partie basaltique (le SIMA de Suess). En revanche, le SIAL n'est plus limité qu'aux continents. Il ne forme plus une enveloppe continue.

Quant au fonctionnement de cette partie superficielle crustale, elle est contestée dans ses mouvements verticaux.

4.3. La théorie des translations continentales (1912)

C'est dans un contexte de controverse sur l'organisation et le fonctionnement de la partie superficielle du globe (Gohau, 1990b, p. 240-241) que le météorologue et géophysicien allemand Wegener³⁹ (1880-1930) propose le glissement du SIAL sur le SIMA. Les continents, à la manière de radeaux sur l'eau, se meuvent sur le SIMA. Si la distribution relative des océans et des continents de Suess tenait à des mouvements verticaux, celle de Wegener se comprend par des mouvements horizontaux. C'est sur les conditions d'un tel glissement des continents que vont l'attaquer ses contradicteurs.

La première moitié du 20^è siècle va donc "contenir" toute une opposition au mobilisme de Wegener. Wegener était géophysicien mais pas géologue : la critique viendra des deux flancs.

³⁹ En 1910, l'américain F.B. Taylor développe dans un article l'hypothèse d'une dérive des continents. Il se base sur la configuration des chaînes montagneuses Tertiaires d'Eurasie. Hallam (1976, p. 16) écrit que Taylor avait "*manifestement subi l'influence d'Edward Suess*", qui décrivait de façon détaillée ces chaînes.

Ainsi les idées wégenériennes furent critiquées par le paléontologue L. Joleaud (1880-1938), partisan des ponts continentaux mais aussi par le géophysicien anglais Jeffreys⁴⁰. Pour Jeffreys, il était impossible que les continents puissent se déplacer sur le SIMA, parce que ce dernier se comporte comme un solide et que les continents ne sont soumis à aucune force horizontale.

Pourtant des modèles, comme celui du géologue A. Holmes (1890-1965), pouvaient le soutenir. Holmes s'interroge alors sur l'évacuation vers la surface de la chaleur terrestre d'origine radioactive que le volcanisme ne suffit pas à expliquer. En 1929, il propose l'existence de courants de convection dans le manteau fluide située sous l'écorce et par là-même vient en appui des idées de Wegener. Ascendants sous les continents, les courants de convection provoquent leur éclatement et la création de croûte océanique nouvelle entre les blocs en dispersion. Comme Holmes pense que la surface terrestre est un espace fini, il admet que s'il y a distension en certains lieux, il y a compression ailleurs. Ces zones de compression se trouvent là où en profondeurs les courants de convection s'enfoncent, aspirant en quelque sorte la croûte océanique dans le manteau et donnant en surface des fosses océaniques profondes. Il y a dans le modèle de Holmes l'embryon de la théorie de la tectonique des plaques, avec les idées de jeunesse et de renouvellement des fonds océaniques. Mais paradoxalement, les idées théoriques de Holmes ne relancent pas le mobilisme.

Terminons en notant que, dans le modèle wégenérien comme le modèle de Suess, le temps est seulement créateur de sédiments mais pas de fonds océaniques (ils existent déjà). En revanche, le modèle wégenérien introduit une dimension temporelle horizontale au processus de "dévoilement" de nouveaux fonds océaniques et à la sédimentation.

4.4. Une "révolution" un peu après le milieu du 20^e siècle

Hallam (1976, p. 61) écrit que *"L'une des principales raisons pour lesquelles la controverse d'avant-guerre s'était montrée si peu féconde était notre ignorance totale de la constitution des fonds océaniques qui, compte tenu des mers intérieures ne couvrent pas moins de 70 % de la surface de la planète"*. C'est effectivement après la seconde guerre mondiale, quand les explorations océaniques s'intensifient que le mobilisme va reprendre de la vigueur.

Dans les années 1960, les sciences de la Terre vivent une véritable "révolution" scientifique puisqu'elles passent d'un paradigme fixiste relatif⁴¹ à un paradigme mobiliste que nous avons présenté dans les paragraphes 1 et 2 de ce chapitre et que nous allons approfondir dans les parties qui viennent.

5. Mobilisation de l'actualisme par les chercheurs actuels

Nous cherchons maintenant à préciser et à comprendre l'utilisation explicative du temps des chercheurs actuels en charge des fonds océaniques et de leur fonctionnement. Nos angles d'attaque sont leur mobilisation de l'actualisme (voir le chapitre 2) puis la façon dont le temps intervient dans leur problématisation (voir le chapitre 3). Nous choisissons de prendre le cas de Xavier Le Pichon, géophysicien, Professeur au Collège de France (chaire de géodynamique), pour deux raisons :

⁴⁰ H. Jeffreys a déterminé les variations de la vitesse des ondes sismiques selon la profondeur de la croûte et du manteau. Il en a déduit que le manteau se comporte comme un solide. (Achache, 1990, p. V).

⁴¹ Les nappes supposent en effet des déplacements latéraux.

- Xavier Le Pichon est un des chercheurs à avoir vécu activement la bascule dans la théorie de la tectonique des plaques à la fin des années 1960. Il était alors au Lamont Geological Observatory de l'Université Columbia à New York, un laboratoire américain dirigé par M. Ewing. Il préparait alors sa thèse sur la structure de la dorsale médio-Atlantique.

- nous avons eu un entretien avec Xavier Le Pichon. Il a eu lieu le mercredi 12 décembre 2001, 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. On trouvera, en annexe 1, la transcription de l'entretien.

Sans aller à une généralisation hâtive engageant toute la communauté scientifique, nous pensons que le regard porté par Xavier Le Pichon nous ouvre aux pratiques et aux discussions qu'elle abrite.

En préambule de notre étude, précisons dans quel cadre théorique évolue la communauté scientifique en ce début de 21^e siècle. Selon Xavier Le Pichon, elle est dans son ensemble acquise à la théorie de la tectonique des plaques : *"A l'heure actuelle, on n'arrive plus à trouver quelqu'un qui publie contre la tectonique des plaques"*, nous dit Xavier Le Pichon (XLP, 14)⁴². Mais comme l'émergence et la consolidation de cette théorie mobiliste sont récentes (depuis la fin des années 1960), nous aurons à la situer par rapport au cadre fixiste qui l'a précédée et qui fut partagé par de nombreux chercheurs dans les années 1950 et 1960. M. Ewing et une partie du Lamont étaient de ceux-là dans les années 1960.

5.1. L'utilisation du passé par Xavier Le Pichon

Il y a dans les propos de Xavier Le Pichon la marque de l'inscription de la Terre dans un cadre directionnaliste. Il nous dit l'importance de connaître les processus physiques et leurs constantes de temps pour reconstruire une histoire de la Terre qui ne soit pas fausse (XLP, 214). Quand nous l'interrogeons sur ce à quoi il pense, lorsqu'il nous parle de processus (DO, 217), il répond : *"A tout ce qui fait que la Terre n'est pas la même chose en ce moment qu'elle l'était il y a une minute ou 100 000 ans ou 1 million d'années"* (XLP, 218). Et il nous donne des exemples de processus : *"l'érosion, les mouvements des plaques, la fréquence des séismes etc... Etc..."* (XLP, 220). Il se situe donc dans le cadre général d'une Terre qui évolue.

Dans le cadre théorique partagé de la tectonique des plaques rigides, des points de controverse existent encore : *"il y a encore une discussion sur comment se fait la déformation à l'intérieur des parties de plaques couvertes par un continent"* (XLP, 24). Comment se caractérisent ces zones ? En quoi font-elles problème ? *"Ce sont des zones entières de déformation très larges dans lesquelles la déformation est distribuée. Donc la notion d'ensemble rigide à l'intérieur de ça ne s'applique plus"* (XLP, 26). A suivre Xavier Le Pichon, ces zones couvrent peut-être entre 5 et 10% de la surface terrestre et se rencontrent dans le domaine continental et dans le domaine océanique (XLP, 28). Il semble cependant qu'elles se trouvent davantage dans le domaine continental, sans concerner entièrement ce domaine. Il nous donne l'exemple de la zone continentale de déformation asiatique, *"celle qui fait 3 000 km par 3 000 km, qui comprend l'Himalaya, le Tibet, le Tien Chan, toute la partie Chine etc."* (XLP, 42).

⁴² Comme dans le chapitre 1, (XLP, 14) ou encore (DO, 217) renvoient à la transcription de l'entretien qui figure en Annexe 1: les initiales permettent d'identifier celui qui parle : XLP pour Xavier Le Pichon ; DO pour Denise Orange. Le nombre correspond au numéro de l'intervention dans l'entretien.

Nous retenons donc que, dans un cadre global directionnaliste, il y a un consensus dans l'explication du domaine océanique. Xavier Le Pichon nous dit même que pour le géophysicien Dan MacKenzie, la tectonique des plaques se réduit à la cinématique des plaques rigides : *"elles (les plaques) fonctionnent très, très bien dans le domaine océanique et on a plus de mal dans le domaine continental"* (XLP, 64). Les problèmes actuels sont donc continentaux, dans les zones dans lesquelles la déformation est distribuée, et vont semble-t-il jusqu'à remettre en cause la notion de plaque rigide. Cela justifie que nous portions notre attention sur la place et le rôle donnés à l'actualisme par des chercheurs comme Xavier Le Pichon, en distinguant si nécessaire le domaine océanique du domaine continental.

5.2. La mobilisation de l'actualisme

En sa qualité de géophysicien, Xavier Le Pichon nous dit qu'il est un chercheur qui se focalise sur les processus (XLP, 260, 262, 264). La géologie historique ne l'intéresse que par les processus physiques en jeu (processus sédimentaires par exemple ; XLP, 262). Il exprime d'ailleurs le rôle de l'actuel dans ses recherches : *"Je travaille toujours à partir des processus actuels et je m'en sers pour expliquer des situations antérieures"* (XLP, 266). C'est dire qu'il recourt à de l'actualisme méthodologique. Il est alors nécessaire de voir quel actualisme il utilise (actualisme de 1er niveau ou d'analogie ? Actualisme de 2è niveau ?) et comment il l'utilise, quand nous savons combien cette utilisation peut être difficile dans un cadre directionnaliste (voir le chapitre 2).

5.2.1. Le temps long pour les géologues et les géophysiciens

Une façon d'entrer dans l'utilisation de l'actualisme des chercheurs est de préciser le rapport qu'ils entretiennent avec le temps. Or Xavier Le Pichon oppose les besoins des géophysiciens aux besoins des géologues. Quand nous lui demandons le rôle que les chercheurs donnaient au temps au milieu du 20è siècle (DO, 207), il nous rappelle d'abord qu'après la seconde guerre mondiale, la communauté scientifique dispose d'une estimation fiable de l'âge de la Terre et de ses principales époques *"donc on avait l'idée de l'importance du temps"* (XLP, 210). Puis il nous dit la nécessité du temps long qu'avaient les géologues, alors que cela n'était pas une exigence des géophysiciens :

" Les géologues avaient toujours dit qu'il fallait beaucoup de temps. Au contraire des géophysiciens d'ailleurs qui s'étaient complètement trompés tant qu'ils n'ont pas connu la radioactivité." (XLP, 210). La teneur de "l'erreur" des géophysiciens confirme l'idée que la durée préoccupe les géologues et moins les géophysiciens. Cette "erreur" remonte à la fin du 19è siècle, quand le physicien Sir William Thomson (1824-1907), plus connu sous le nom de Lord Kelvin, calcule l'âge de la Terre (plus précisément l'âge écoulé depuis la consolidation du globe) en utilisant ses recherches sur la transmission et la perte de chaleur. Il parvient au fait que l'âge de la croûte est vraisemblablement compris entre 98 et 200 millions d'années. Cette estimation est alors contestée par les géologues *"qui avaient pris l'habitude de raisonner sur des durées supérieures"* (Gohau, 1987, p. 193) et les héritiers de Darwin qui travaillaient sur l'évolution des espèces. A la fin du 19è et au début du 20è siècle, la découverte de la radioactivité naturelle (H. Becquerel, 1896), les travaux des Curie et de Rutherford (datation absolue des roches grâce à leurs éléments radioactifs) vont conduire à la réfutation des calculs de Kelvin et de leur assise⁴³ au profit des longues durées.

⁴³ J. Joly (1909) montre dans son ouvrage *Radioactivity in Geology* que la chaleur de la Terre comprend sa chaleur résiduelle augmentée de la chaleur produite par la radioactivité de ses roches (Gohau, 1987, p. 193).

Selon Xavier Le Pichon, les géologues ont donc absolument besoin du temps long, les géophysiciens pas nécessairement. Nos approfondissements sur l'actualisme (chapitre 2) pourraient expliquer cet état de fait : les géologues feraient jouer l'actualisme de 2^e niveau qui exige le temps long. Qu'en est-il alors des géophysiciens ?

5.2.2. L'actualisme des géophysiciens

Les priorités géologiques des géophysiciens

Xavier Le Pichon pose les limites à étudier la Terre dans la seule posture de géologue. Il nous dit ce que faisaient les géologues : ils observaient et décrivaient qualitativement, des strates par exemple, et ils essayaient de reconstruire une histoire qualitative, comme l'histoire d'une chaîne de montagnes (XLP, 190, 198). Mais il y a selon lui un grand problème : *"Les géologues reconstruisaient dans le temps mais sans avoir une idée précise de la vitesse des processus"* (212) puis il ajoute *"Le temps... Ca ne veut rien dire de dire que telle roche a, je ne sais pas, 30 millions d'années etc... si on ne sait pas quelles sont les constantes de temps des processus physiques qui vous permettent de passer du niveau de cette roche à la situation actuelle, quand vous parlez en termes de compréhension de l'histoire de la Terre. C'était ça le grand problème."* (XLP, 214) Nous comprenons que les géologues replacent dans le passé des objets ou des processus physiques sans toujours suffisamment connaître la teneur de ces processus et prendre en compte leur constante de temps. Voici la fin de son intervention : *"C'est que les constantes de temps des processus physiques, pas seulement les constantes de temps mais les processus physiques eux-mêmes, n'étaient souvent pas connus et quand ils étaient connus, on se trompait complètement sur leurs constantes de temps"* (XLP, 214). Xavier Le Pichon nous donne des exemples de processus : érosion, mouvements des plaques, glaciation, déglaciation ... (XLP, 220, 222) ; pour leur constante de temps, ses propos orientent vers leur vitesse (XLP, 222). En fait, il dit la nécessité de tirer le travail du géologue du côté de la quantification des processus physiques, ce que font les géophysiciens. La suite de ses propos est à ce sujet instructive : *"Le temps, c'est pas seulement connaître une échelle. C'est connaître quels sont les processus qui font que vous passez d'une étape à l'autre. Et quelles sont leurs constantes de temps"* (XLP, 216).

Xavier Le Pichon place donc la recherche géologique entre un pôle géologique et un pôle géophysique, avec une mise en valeur du rôle du pôle géophysique : en accordant de l'importance à la quantification, le pôle géophysique renforce le pôle géologique. Il nous semble cependant que Xavier Le Pichon limite les apports du pôle géologique. Car nous l'avons vu, le géologue ne se contente pas de construire une échelle de temps ; il reconstitue des événements et des phénomènes passés. Quant au pôle géophysique, nous souhaitons en préciser les rôles, toujours dans le but de comprendre la nature de l'actualisme en jeu.

Quantifications chez les géophysiciens

A plusieurs moments de l'entretien, nous pouvons nous faire une idée du travail des géophysiciens, préoccupés d'expliquer la physique de la Terre (XLP, 188). Ils quantifient : *"une quantification continue"* (XLP, 228). Ils choisissent et **mesurent des paramètres dans un cadre problématique** (XLP, 286) : champ magnétique, champ gravimétrique, flux de chaleur, passage des ondes acoustiques dans la Terre (sismique réflexion et sismique réfraction) (192) ; ou encore ils mesurent des vitesses (vitesse des plaques, des déformations) (XLP, 18, 22). De là, il déduisent la répartition des propriétés physiques et précisent la structure actuelle de la Terre (XLP, 192, 194). S'ils s'intéressent à l'histoire de la Terre, c'est

pour dresser **l'évolution temporelle des paramètres qu'ils mesurent** : les géophysiciens ne vont pas *"sur l'histoire de la terre en tant que telle sauf une histoire par exemple l'histoire d'un point de vue flux de chaleur ou des choses comme ça"* (XLP, 196). A propos de l'histoire thermique de la Terre, Xavier Le Pichon nous donne des précisions sur le mode d'appréhension par les géophysiciens de cette évolution temporelle (XLP, 212) : *"ils connaissaient (les géophysiciens) les constantes radioactives donc ils faisaient des modèles qui étaient une évolution dans le temps de la thermique de la Terre"*. Les mesures du flux thermique actuel participent de cette construction de modèle quantitatif d'évolution. C'est leur façon de se projeter dans le passé et de construire de l'histoire : par la quantification.

Extrapolation à partir de l'actuel et actualisme

Il y a dans la mise en avant du quantitatif l'expression de l'intérêt de le généraliser à toutes les composantes de la géologie (par exemple la paléontologie, XLP, 224), sans toutefois rompre avec les apports des méthodes géologiques classiques, mais pour faire des recoupements qui consolident les résultats. A propos des anomalies magnétiques, ce que dit Xavier Le Pichon montre une coopération entre géophysique et géologie. Etudions ses propos quand nous l'interrogeons sur la manière dont s'est faite la datation des anomalies magnétiques des fonds océaniques (DO, 239). Il nous précise que ce que l'on a d'abord daté, ce sont les inversions du champ magnétique *"en prenant des séquences en général de laves mais quelquefois de sédiments, enfin de roches volcaniques qui étaient bien datées et dans lesquelles on mesurait c'est normal, inverse, normal, inverse, et on a reconstruit l'histoire des inversions du champ magnétique"* (XLP, 240). Au début des années 1960 en effet, les Anglais Vine et Matthews (et le canadien Morley) mettent en relation l'échelle des inversions magnétiques définie sur les continents et l'hypothèse du "tapis roulant" des fonds océaniques de Hess⁴⁴ pour expliquer les profils d'enregistrement des anomalies magnétiques en milieu océanique : les anomalies seraient dues à des laves tantôt émises en période de champ normal (anomalies positives) et tantôt pendant des époques de champ inverse (anomalies négatives). Cela a vraisemblablement permis aux chercheurs de calculer des taux d'expansion océaniques. Mais le problème s'est posé lorsqu'il a fallu étendre cette échelle à des âges plus anciens. *"Quand on a étendu beaucoup plus loin, alors là, ça devenait très difficile, quand on se retrouvait à des âges de 15-20 millions d'années, on n'arrivait plus à avoir la séquence à partir de la terre donc c'était trop difficile. Il y avait trop d'inversions. Donc là, on l'a fait... On a vérifié les âges qu'on avait extrapolés en supposant des taux comparables et en comparant les séquences d'anomalies d'un océan à l'autre. Donc on disait, donc là, avec ce taux là, on doit arriver à ce moment là à 35 millions d'années alors on forait et puis on vérifiait qu'on était bien dans l'Oligocène. Voilà. Donc après, ça a été vérifié comme ça. En général, on datait les sédiments qui étaient juste au-dessus parce que c'est très facile à faire avec les fossiles dedans"* (XLP, 244). Qu'ont donc fait les chercheurs ? Ils ont extrapolé à des anomalies plus anciennes les résultats obtenus de l'étude de plus récentes. Pour chaque océan, la connaissance de la vitesse d'expansion, en faisant l'hypothèse de sa constance, leur a permis d'estimer l'âge des anomalies très anciennes situées beaucoup plus loin de l'axe de la dorsale. Cet âge a été confronté d'un océan à l'autre et à celui donné par les fossiles des sédiments reposant directement sur le fond. Et il y a eu convergence des résultats.

⁴⁴ En 1960, Hess reprend l'hypothèse des courants de convection déjà envisagée par Holmes et Ewing, qu'il fait parvenir jusqu'à la surface ; le fond des océans serait ainsi un double tapis roulant qui émerge au rift (Le Pichon, 1984, p. 418).

En définitive, les chercheurs ont extrapolé des mesures obtenues sur une partie récente de l'océan à une partie plus ancienne de ce même océan. C'est bien de l'utilisation de l'actuel pour comprendre le passé. Est-ce de l'actualisme d'analogie ? Pas tout à fait en ce sens que le chercheur travaille sur un même domaine, l'océan Atlantique par exemple. Il ne projette pas les résultats d'un océan actuel sur un océan ancien différent : actuel ou passé, c'est toujours le même océan en jeu. S'agit-il d'un actualisme de 2^e niveau où le temps long est nécessaire ? Il est vrai que retracer l'histoire d'un océan requiert du temps long, plusieurs dizaines de millions d'années, que la quantification par extrapolation reconstitue. Mais il s'agit d'un temps long "banalisé" en ce sens que les phénomènes qui s'y passent se constatent aujourd'hui (expansion océanique) ; on étend en continuité vers le passé des processus actuels. Dit autrement, ce temps long ne produit pas du qualitativement différent, comme ce serait le cas pour expliquer un charriage par exemple ; il ne produit que du quantitatif. Ce n'est donc pas le temps long de l'actualisme de 2^e niveau.

En résumé, Xavier Le Pichon nous met en présence **d'un actualisme d'extrapolation**, qu'on peut considérer comme une sorte d'actualisme d'analogie qui fait jouer la durée. 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.

5.3. Intérêts et limites de l'actualisme d'extrapolation

A plusieurs reprises, Xavier Le Pichon rappelle la bonne intégration des fonds océaniques au cadre théorique de la tectonique des plaques (XLP, 62, 64), même dans une définition stricte de celui-ci (XLP, 62, 64). Nous comprenons que si les océans ne posent pas de problème aux géophysiciens, c'est parce qu'ils sont rigides. *"Il y a 90% de la Terre où c'est clairement rigide. On n'a pas de problème"* (XLP, 28).

En revanche, certaines parties de plaque avec domaine continental, en tant que zones mobiles où la déformation est distribuée, prêtent à discussion. (XLP, 24, 42, 62, 64, 66).

D'autre part, Xavier Le Pichon nous met en garde sur les risques à étudier de la même manière le domaine océanique et le domaine continental : *"c'est sûr que si vous êtes habitué à travailler à terre et que vous transportez sans faire attention votre méthode de penser dans le domaine océanique, vous allez complètement vous planter"* (XLP, 296) et inversement (XLP, 310). Xavier Le Pichon nous précise pourquoi : les processus (érosion, volcanisme) changent, leurs constantes dans le temps changent (vitesse d'érosion) parce que les conditions environnementales ne sont pas les mêmes (XLP, 298, 302, 308).

Nous pensons qu'il est possible d'éclairer cette distinction océan/continent par les formes d'actualisme nécessaire à leur compréhension. L'étude des océans serait **un champ d'application aisé de l'actualisme d'extrapolation**. En revanche, cette utilisation ne serait pas exactement la même pour les continents :

- si jamais une extrapolation est possible en milieu continental, elle ne repose pas sur les mêmes constantes de temps que dans les océans (XLP 298).
- les mêmes processus physiques (exemple : le volcanisme) ne sont pas soumis aux mêmes contraintes environnementales (exemple : contamination du magma par la croûte en milieu continental. XLP, 308).

- entre leur naissance et leur mort, les océans ont une stabilité structurelle et leur fonctionnement "en double tapis roulant" s'apparente au cycle : n'est-ce pas une forme de steady state ? Ce n'est pas la même chose pour les continents : leur "ballet" relève du cycle mais leur structure change par accumulation des "cicatrices" (déformations, érosion) de leur histoire (qui remonte aux débuts de la Terre soit plus de 4 milliards d'années) et leur volume tend à augmenter (ils ne s'enfoncent pas dans les zones de subduction)⁴⁵. Par leur structure et leur volume, les continents sont dans une histoire sagittale, et plus précisément dans un directionnalisme progressif (chapitre 2).

Dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, si pour les océans le recours à l'actualisme d'extrapolation est donc aisé, c'est vraisemblablement parce que le temps ne produit que du quantitatif : de nouveaux pans de fonds océaniques, de nouvelles couches de sédiments. En revanche, pour les continents, il produit non seulement du quantitatif (exemple : le raccourcissement du Japon ; Le Pichon, 2002, p. 72), mais aussi du qualitatif, à savoir des événements et des phénomènes qui donnent des inflexions à l'histoire.

6. Problématisation du fonctionnement des fonds océaniques par les géologues et les géophysiciens

A partir du milieu du 20^e siècle, les chercheurs connaissent de mieux en mieux les fonds océaniques, notamment grâce aux recueils de données des géophysiciens. M. Ewing et son laboratoire du Lamont en sont des artisans reconnus. Xavier Le Pichon rappelle (XLP, 124) que ce chercheur a basé *"sa réputation scientifique un peu sur le fait que la structure des océans et des continents étaient radicalement différentes et que les océans n'avaient rien à voir avec les continents"* (XLP, 116) et qu'il a apporté *"beaucoup de nouvelles données techniques au monde"* (XLP, 124). Or paradoxalement M. Ewing était fixiste et des données obtenues par son laboratoire ont formé une partie du terreau de la tectonique des plaques : *"on peut dire que, d'une certaine manière, la tectonique des plaques est arrivée parce qu'il y a une partie des méthodes qui ont été inventées à temps..."* (XLP, 226, voir aussi 228) Voyons les caractères de la problématisation de l'histoire des fonds océaniques selon le paradigme de la tectonique des plaques et selon le paradigme fixiste.

6.1. Méthodologie

En référence aux travaux de C. Orange (1999, 2000) sur la problématisation fonctionnaliste, nous cherchons à préciser les espaces des contraintes qui ont servi dans les années 1960 les modèles fixiste (les géophysiciens M. Ewing et X. Le Pichon) ou mobiliste (les géologues Heezen et Hess). Les témoignages écrits ou oraux de Xavier Le Pichon (Le Pichon, 1984, 2001 ; entretien 2001, annexe 1) vont particulièrement être étudiés dans la mesure où leur auteur a basculé d'une position de fixiste "convaincu" à une position de mobiliste "tout aussi convaincu". A partir des contraintes empiriques mises en jeu, notamment celles qui ont servi la controverse, nous tentons de retrouver les nécessités sur les modèles et de clarifier les registres explicatifs sous-jacents.

⁴⁵ ... *"les continents ne sont pas engloutis dans le tourbillon infernal orchestré par le manteau et, tels l'écume de la Terre, flottent à sa surface, mémoire éternelle de son histoire mouvementée"* (Allègre, 1983, p. 298).

6.2. L'espace des contraintes construit par les fixistes des années 1960

Il nous paraît utile de bien décrire le contexte des recherches de Xavier Le Pichon dans les années 1960. Il est dans un laboratoire versé dans l'étude des océans dans lequel deux courants de pensée s'affrontent : un courant mobiliste et un courant fixiste. *"Mobilists were either expansionists, followers of Carey⁴⁶, or drifters, followers of Alfred Wegener"*. (XLP, 2001, p. 204). Heezen, du Lamont est alors mobiliste expansionniste. M. Ewing est fixiste : *"he preferred to explain the tectonic activity of the rift by deep convection currents that did not reach the surface but were the cause of extension and volcanism, without wholesale movement of the crust"* (Le Pichon, 2001, p. 204). M. Ewing envisage donc des courants de convection profonds qui n'occasionnent pas de véritables mouvements de la croûte.

Dans les années 1960, alors qu'il est au Lamont, Xavier Le Pichon est aux prises avec un ensemble de données de "sismique réfraction". Ces données concernent la dorsale médio-atlantique (Le Pichon, 2001, p. 209) et elles sont considérées comme bizarres par les chercheurs du laboratoire (XLP, 88). Voici ce que dit Xavier Le Pichon de cette bizarrerie : *"Parce que le problème était que sur les dorsales, la croûte ne s'épaississait pas. L'altitude augmentait vers le rift"... "Or il n'y avait pas d'anomalie gravimétrique. Donc ça voulait dire qu'il y avait une compensation"* (XLP, 88, 92). Xavier Le Pichon construit le problème en référence à la notion d'équilibre isostatique. Comme la croûte a une densité inférieure à celle du manteau, l'équilibre isostatique des zones à relief est réalisé grâce à une racine crustale importante (c'est le cas sous les chaînes de montagnes : *"Sous l'Himalaya, vous avez 70 km de croûte alors qu'il y a 35 ou 40 sous l'Inde"*, XLP, 92). Faut-il remettre en question l'interprétation des profils sismiques qui avance une remontée du Moho (le Moho est la limite croûte-manteau) ? Est-on devant un cas de violation du principe d'Archimède ? Xavier Le Pichon réfute ces deux hypothèses (XLP, 92 ; Le Pichon, 2001, p. 209) et il recourt à **la nécessité d'un manteau localement anormal** : *" C'est que la compensation, la masse négative, relativement négative si vous voulez, est dans le manteau. Ce qui est vrai. On le sait maintenant. C'est parce que le manteau était chaud"* (XLP, 92).

Si le manteau est proche, chaud et léger sous les dorsales, cela doit se traduire par un flux de chaleur anormalement élevé à cet endroit. Or, il est plutôt bas. Xavier 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 (XLP, 92). Et les premières sont très différentes des secondes : *"Why then was the heat flow three times smaller than expected for sea floor spreading ?"* (Le Pichon, 2001, p. 212). C'est ce qui le retient du côté du fixisme (Ibidem, 2001, p. 210) : *"Dans ma thèse, je disais que je démontrerais que les continents ne bougeaient pas. Et c'était parce que, du point de vue flux de chaleur en particulier, ça ne marchait pas du tout"* (XLP, 92). Mais Xavier Le Pichon prend en compte d'autres données, qu'il met toujours en balance entre le cadre fixiste et le cadre mobiliste (XLP, 92) :

- **les anomalies magnétiques** : Xavier Le Pichon connaît les résultats d'enregistrements au Sud de l'Islande et sur la dorsale Juan de Fuca à l'Ouest de Vancouver (XLP, 238). Mais ces enregistrements sont alors pris avec précaution par les chercheurs : ils hésitent à reconnaître une dorsale à l'Ouest de Vancouver (XLP, 238) ; d'autre part, la symétrie des anomalies étudiées dans l'Atlantique, en terme de largeur des bandes et d'intensité, n'est pas probante : *"This proved that the flank anomalies could not be displaced axial anomalies moved laterally"*

⁴⁶ Carey est un spécialiste australien de la géologie structurale. En "redressant" les ceintures orogéniques, il aboutit à une Terre où les océans auraient été rassemblés à la fin du Paléozoïque. Ils se seraient ensuite séparés (mais n'auraient pas dérivé), du fait de l'augmentation du rayon terrestre (Hallam, 1976, p. 82).

by the sea floor spreading. Our computations showed that the deepening of the sea floor was not sufficient to explain this difference" (Le Pichon, 2001, 209)

- **les sédiments et leur distribution.** Xavier Le Pichon, en collaboration avec les frères Ewing, met en évidence une variation latitudinale des sédiments océaniques et un contraste significatif entre la dorsale, sans sédiments et les plaines abyssales, revêtues d'une fine pellicule sédimentaire non déformée. *"This was a phenomenon quite different from the regular thickening proportionnal to the âge of the sea floor, as predicted by Hess. We thought that these anomalies were not compatible whith the idea of steady sea floor spreading ;"* (Le Pichon, 2001, p.210). Mais ce qui retient assurément Xavier Le Pichon du côté du fixisme, c'est l'absence de sédiments déformés dans les fosses océaniques, là où selon le modèle de Hess, la croûte océanique devrait s'enfoncer. *"Why was the sediment fill in the trenches undisturbed ?"* (Le Pichon, 2001, p. 212).

C'est donc par un ensemble de données empiriques (flux de chaleur, anomalies magnétiques, sédiments) que Xavier Le Pichon construit "dans sa thèse" **l'impossibilité du sea floor spreading** de Hess autrement dit l'impossibilité d'un double tapis roulant océanique ; parallèlement, il relègue en profondeur les courants de convection et construit la **nécessité d'un manteau supérieur rigide sur une grande épaisseur**, qui dispose d'une petite marge de manoeuvre verticale et horizontale, mais qui en aucun cas n'est engagé dans des déplacements horizontaux de grande envergure. Cela rejoint l'avis d'autres chercheurs opposés au mobilisme dont Harold Jeffreys (XLP, 152).

La figure 5.3 tente de représenter l'espace des contraintes des fixistes, avec les contraintes empiriques fortes et les nécessités sur le modèle qu'un chercheur comme Xavier Le Pichon semblait construire.

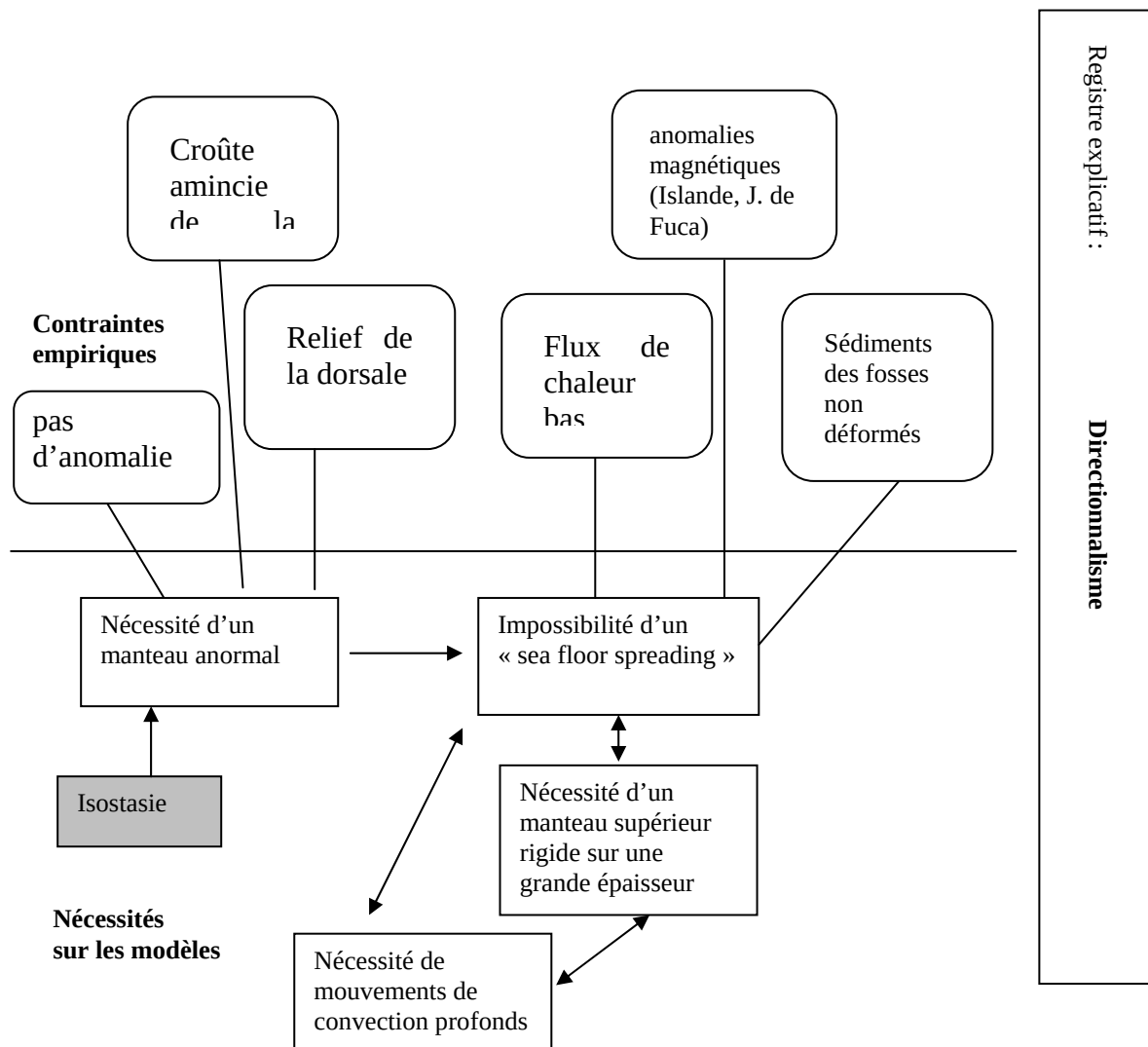


Figure 5.3 : L'espace de contraintes des fixistes (années 1960)

6.3. D'un espace de contraintes à un autre

Fin avril 1966, Xavier Le Pichon ne rencontre que des "convertis" à l'expansion des fonds océaniques, lorsqu'il retourne au Lamont après avoir soutenu sa thèse à Strasbourg (Le Pichon, 2001, 211-212). Et douloureusement (XLP, 96), il succombe à son tour. A l'origine de la conversion des fixistes, le profil magnétique "magique" obtenu au-dessus de la dorsale du Pacifique Sud : c'est un enregistrement des anomalies magnétiques sur 1000 km de fond océanique qui *"révélaient une symétrie parfaite dans les moindres détails, par rapport à l'axe de la dorsale"* (X. Le Pichon, 1984, p. 421). Comme l'écrit malicieusement Hallam (1976, p. 99) à propos du Lamont : *"La conversion de ses membres les plus éminents ne fut pas moins soudaine et totale qu'une inversion du champ magnétique."* Nous avons demandé à Xavier Le Pichon pourquoi les anomalies magnétiques ont eu une telle force (DO, 229). Voici ce qu'il a répondu : *"Parce que c'était un phénomène tout à fait inexplicable. Il n'existait pas d'autre*

méthode d'inventer des structures qui avaient une symétrie parfaite sur 2000 km⁴⁷ de large par rapport à un axe. Ca n'existait pas, ce genre de structure, donc il fallait quelque chose qui puisse l'expliquer. C'était la seule hypothèse qui était là pour les expliquer" (XLP, 230). Cette conversion est éminemment psychologique parce qu'il y a des données qui ne vont toujours pas avec le nouveau cadre paradigmatique. Ainsi le flux thermique! Xavier Le Pichon nous donne une clé pour mieux comprendre sa bascule et peut-être celle d'autres fixistes : *"Ce passage (d'un paradigme à un autre) se produit lorsque le pouvoir explicatif et prédictif du nouveau paradigme est supérieur à celui de l'ancien pour l'ensemble des faits observés par les chercheurs"* (Le Pichon, 1984, p. 416). C'est peut-être moins sur la grosseur et la solidité du "tas" de données disponibles que se fait le choix que sur la capacité heuristique des paradigmes. *"D'un seul coup, le bilan des phénomènes expliqués et inexpliqués par l'hypothèse de Hess apparaissait comme positif, pour n'importe quel chercheur connaissant l'ensemble du dossier"* (Le Pichon, 1984, p. 422)

6.4. L'espace de contraintes construit par les mobilistes

La problématisation est un effort de rationalisation. Essayons de voir, au delà de la conversion singulière de X. Le Pichon, quel espace des contraintes construisent les chercheurs dans le cadre mobiliste : quelles contraintes empiriques ? Quelles nécessités sur le modèle ? Quel registre explicatif ?

Pour répondre à ces questions, nous nous appuyons sur les travaux des mobilistes de "la première heure" des années 1960, sur le témoignage et les écrits de Xavier Le Pichon qui les côtoya, enfin sur l'ensemble de plus en plus étoffé de données océaniques auquel ils recouraient. Les mobilistes d'alors sont 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"*.

Le schéma de la figure 5.4 tente de représenter l'espace des contraintes des mobilistes :

⁴⁷ Dans ses articles (1984, p. 421 ; 2001, p. 212), Xavier Le Pichon écrit que le profil magnétique couvre une distance de 1000km seulement.

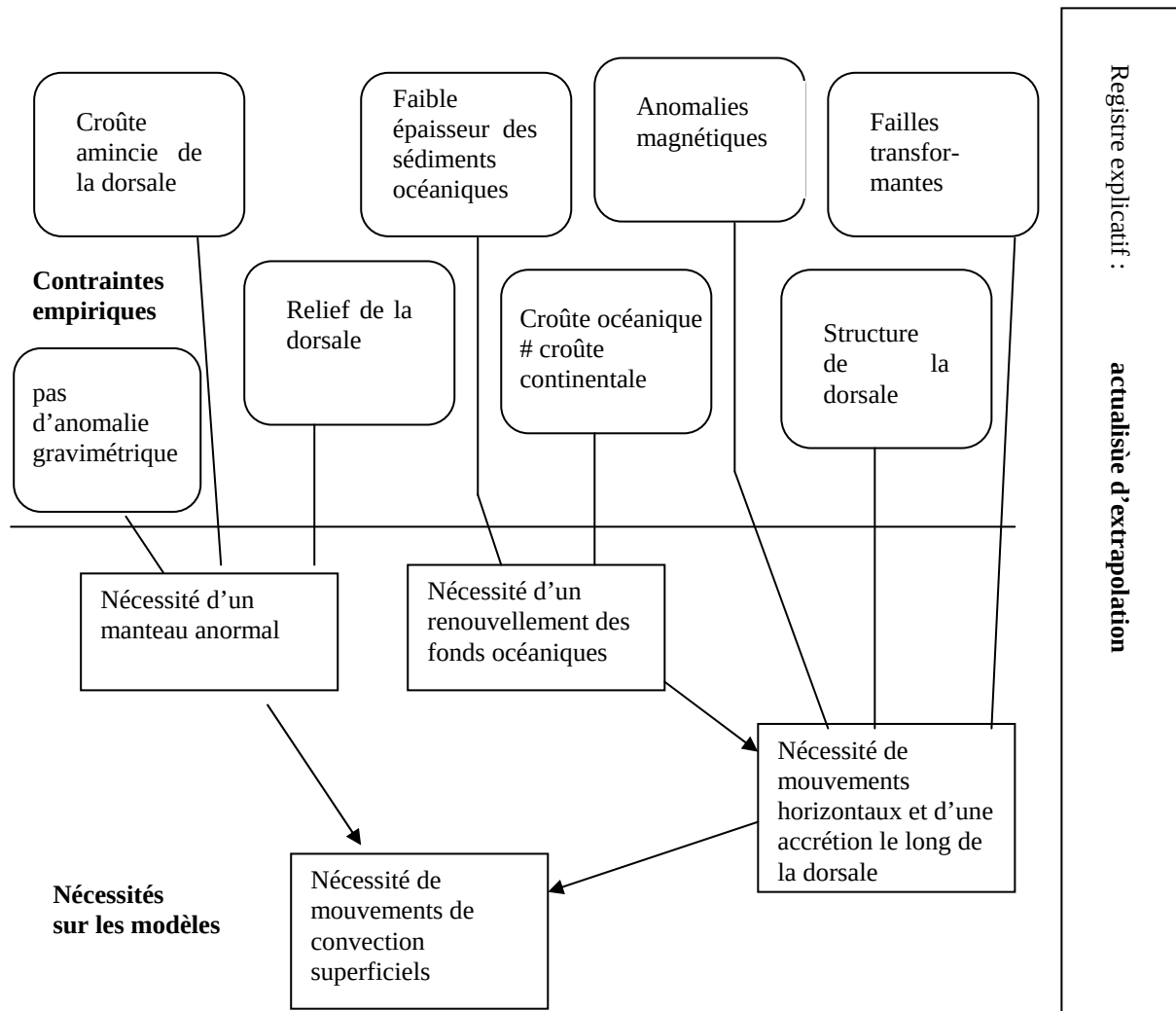


Figure 5.4 : L'espace de contraintes des mobilistes

7. Conclusion

L'histoire récente des Sciences de la Terre témoigne d'une véritable rupture épistémologique en matière de savoir sur la formation et le fonctionnement d'un océan. La communauté scientifique est passée d'un modèle fixiste à un modèle mobiliste, dont les rapports au temps ne sont pas exactement les mêmes :

- un modèle "fixiste" qui suppose que les fonds océaniques "existent déjà" et que leur formation relève plutôt de mouvements verticaux d'affaissement de zones crustales, à défaut de l'expliquer comme un dévoilement lié à une certaine mobilité continentale. Le temps n'est pas créateur de fonds océaniques. Il est seulement créateur de sédiments.
- un modèle mobiliste où les fonds océaniques se renouvellent dans un régime de mouvements horizontaux. Le temps est à la fois créateur de sédiments mais aussi de fonds océaniques, et il se déploie dans les deux dimensions de l'espace : une dimension horizontale en rapport avec la mobilité des fonds océaniques et une dimension verticale pour l'accumulation des sédiments.

L'étude de la problématisation dans chacun des cadres montre nettement la co-construction des différents registres. Elle interroge sur la "force" qu'ont prise certaines contraintes

empiriques (voir les anomalies du Pacifique Sud pour Le Pichon) dans l'évolution de l'espace de contraintes des experts. Dans quelle mesure peut-on transposer à la classe ?

Enfin, dans le cadre théorique mobiliste (ou théorie de la tectonique des plaques) maintenant admis par la communauté scientifique, la reconstitution du passé d'un océan (et la prévision de son évolution future) met en jeu de l'**actualisme d'extrapolation**, qui étire un actuel perceptible par l'homme (expansion océanique, sédimentation) vers le passé (ou vers l'avenir). Il se construit un temps long, qui concerne un même domaine, et qui est rempli des mêmes phénomènes. On peut penser que l'actualisme d'extrapolation, tout comme l'actualisme d'analogie, peut être utilisé spontanément par les élèves.

Chapitre 6

LE PASSE D'UN OCEAN

Analyse didactique a priori des situations

Sommaire

- 1. Le contexte général des situations de classe mises en place**
- 2. Les situations de classe et les intentions du professeur**
- 3. Analyse didactique a priori de la situation**
- 4. Conclusion**

Les situations de classe que nous allons étudier portent sur les fonds océaniques et plus précisément sur l'histoire qui a conduit à ce qu'ils sont. Elles ont été conçues dans le cadre de la partie consacrée à l'expansion et à la genèse de la lithosphère océanique du programme de Première S de 1992 (M.E.N., 1992, p. 86)⁴⁸. Les documents d'accompagnement des programmes indiquent que cette partie a *"pour point de départ un exemple d'océan, pour dégager les informations relatives à son évolution"* (documents d'accompagnement du programme de Première S, p. 40). L'océan est donc à considérer comme un objet évolutif. Si l'on se réfère au savoir actuel en la matière (chapitre 5), deux processus simultanés et continus sous-tendent son évolution : l'accrétion qui se produit au niveau de l'axe de la dorsale et la sédimentation qui s'exerce partout. Ces deux processus marquent spatialement le temps, mais de façon différente : l'accrétion le marque horizontalement, la sédimentation le marque verticalement et horizontalement. On peut se demander comment les lycéens vont s'approprier cette double dimension du temps.

1. Le contexte général des situations de classe mises en place

Les situations de classe sur lesquelles porte notre réflexion ont été mises en place, à une année d'intervalle, dans deux classes de Première S du lycée Camus de Nantes : une classe de Première S de 23 élèves en 1998/99 et une classe de Première S de 33 élèves en 1999/00. Dans tous les cas, elles prennent place après que les élèves ont réfléchi au fonctionnement global de la Terre et à son organisation interne :

- La recherche d'une explication à la répartition des volcans et des séismes a permis de s'inscrire dans le cadre général de la théorie de la tectonique des plaques : subdivision de la partie superficielle de la Terre en plaques rigides, zones d'accrétion matérialisées par les dorsales océaniques, zones de subduction, zone de collision continentale.

⁴⁸ Dans les derniers programmes de Première S, on retrouve cette étude dans la partie "Structure, composition et dynamique de la Terre" (M.E.N., 2000)

FICHE DE TRAVAIL n° 1 : L'HISTOIRE DES FONDS OCEANIQUES

Il s'agit d'en établir les grands traits. Cette étude se fera à partir de l'étude de quelques documents et de vos connaissances. On rappelle que le fond des océans est fait de basaltes surmontés de sédiments.

Le basalte est une roche qui provient du refroidissement d'un magma et qui a la particularité d'acquérir une aimantation lors de sa formation. Cette aimantation modifie la mesure du champ magnétique terrestre (CMT) faite au niveau du basalte.

- Si le basalte s'est formé quand le CMT avait la direction actuelle, la valeur du CMT mesurée est plus grande que celle attendue: il y a une anomalie magnétique positive (+).
- Si le basalte s'est formé quand le CMT avait une direction opposée à celle qu'il a actuellement, la valeur du CMT est inférieure à celle attendue: il y a une anomalie magnétique négative (-).

Le Document 1 est un schéma en 3 dimensions du plancher océanique basaltique sur lequel ont été placées les zones d'anomalies magnétiques positives et négatives.

Q1. En vous basant sur la définition des anomalies magnétiques, dites pourquoi on a une anomalie positive au niveau de la dorsale.

Q2. Mettez un ordre de formation aux différentes bandes de basaltes (1 = basalte formé en premier, 2 = basalte formé en deuxième etc.). Les chiffres seront placés en dessous des bandes.

Le Document 2 (reproduit volontairement en 2 exemplaires) donne l'âge du plancher océanique basaltique de l'Atlantique Nord. Ce plancher est ici représenté en coupe. Son âge a été établi à partir de l'étude des anomalies magnétiques et d'une échelle de datation absolue.

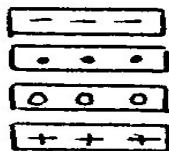
Q3. A quand remonte le début de la formation de l'Océan Atlantique? Justifiez brièvement votre réponse.

Q4. Par un découpage de la coupe 1, reconstituez l'Atlantique il y a 135 MA (= fin du Jurassique). Vous collerez la coupe obtenue dans le cadre 1.

Q5. Par un découpage de la coupe 2, reconstituez l'Atlantique il y a 65 MA (= fin de l'ère secondaire). Vous collerez la coupe obtenue dans le cadre 2.

On se propose de compléter maintenant les coupes du Document 2 en plaçant les sédiments qui se sont déposés sur le plancher basaltique.

Q6. Placez sur les coupes 1, 2 et 3 les sédiments tels qu'ils devaient se présenter à chaque époque. Vous prendrez les figurés suivants pour indiquer:



Les sédiments déposés entre 0 et 23 MA

Les sédiments déposés entre 23 et 65 MA

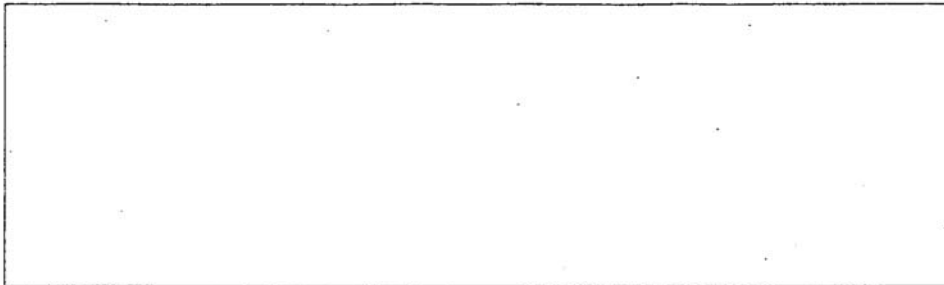
Les sédiments déposés entre 65 et 135 MA

Les sédiments déposés entre 135 et 190 MA.

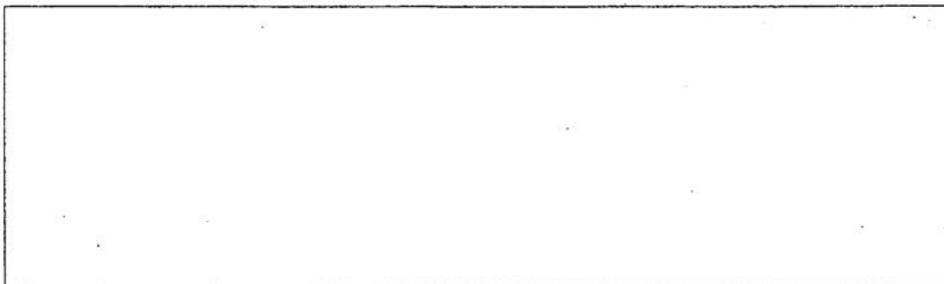
Q7. Placez schématiquement les sédiments, tels qu'on les voit de dessus, sur la carte de l'Atlantique Nord (Document 3). Vous utiliserez les mêmes figurés que pour la Q6.

Figure 6.1 (page 1/3)

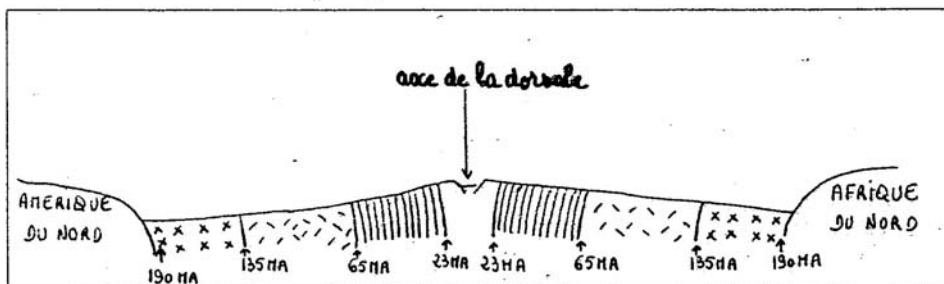
Fiche de travail sur l'histoire des fonds des océans



Cadre 1: Coupe de l'Atlantique Nord il y a 135 MA



Cadre 2: Coupe de l'Atlantique Nord il y a 65 MA



Cadre 3: Coupe de l'Atlantique Nord aujourd'hui

DOCUMENT 3

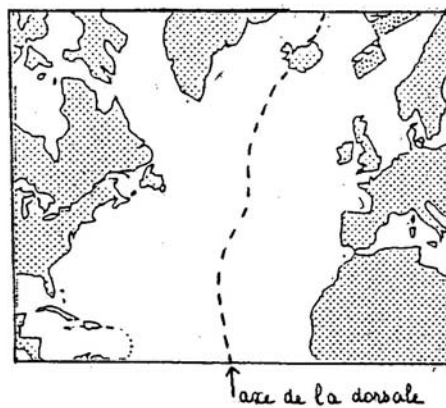


Figure 6.1 (page 3/3)
Fiche de travail sur l'histoire des fonds des océans

- Ensuite le recours à des données de nature diverse (densité des roches, données sismiques, apports de la connaissance des météorites) a permis de préciser la nature et les caractéristiques des enveloppes terrestres. L'accent a été mis sur le fait qu'il n'y a pas "un bain de magma" sous une enveloppe superficielle solide, ce que pensait initialement une majorité des élèves (leurs productions avant enseignement en témoignent). Les notions de lithosphère solide, comprise comme étant la croûte et le manteau supérieur, d'asthénosphère solide ont été précisées ainsi que la distinction croûte océanique/ croûte continentale.

Dans un chapitre intitulé "Expansion et genèse de la lithosphère océanique", le professeur souhaite que les élèves réinvestissent certains des points précédents dans un travail sur l'histoire d'un fond océanique avant de s'attaquer au problème de l'origine du magma qui alimente les dorsales. L'accrétion et la sédimentation sont donc connues des élèves par leurs effets (accroissement du plancher océanique ; dépôt au fond d'un bassin), sans que leurs mécanismes n'aient encore été approfondis.

2. Les situations de classe et les intentions du professeur

Les situations étudiées reposent sur une fiche d'activité (figure 6.1 reproduisant la fiche de l'année scolaire 1998/99) construite par le professeur. Cette fiche comporte trois grandes parties : si la première partie met en jeu un océan quelconque, les deux autres s'intéressent plus particulièrement à l'Océan Atlantique.

- La première partie (questions 1 et 2 de la fiche) concerne l'expansion océanique. Par le recours aux anomalies magnétiques, elle doit permettre aux élèves de faire fonctionner des plaques dans le contexte plus limité d'un océan. Plus précisément, il s'agit pour eux de retrouver le mécanisme du double tapis roulant : les bandes les plus éloignées de l'axe ont été formées en premier. Le professeur prévoit une correction collective de cette première partie après un temps de réflexion individuelle.

- La deuxième partie s'appuie sur des coupes transversales de l'Océan Atlantique (document 2 de la fiche). Les élèves ont à reconstituer, par découpage/ collage, des fonds océaniques basaltiques à quelques époques (questions 4 et 5 de la fiche). C'est un moyen de matérialiser des états successifs de l'Atlantique en liaison avec le fonctionnement de la dorsale médiane. C'est aussi une façon de bien installer l'élève dans l'histoire expansionniste du fond océanique. Une correction collective est prévue avant que les élèves "s'attaquent" à la troisième partie.

- La troisième partie met en jeu la sédimentation, qu'il s'agit de représenter sur les coupes transversales des fonds basaltiques précédemment reconstituées (question 6). C'est donc une situation où les élèves ont à conjuguer le phénomène d'accrétion (et d'expansion) et celui de la sédimentation. La fiche se termine par une carte de l'Atlantique sur laquelle doivent être placés les sédiments (question 7). Cette dernière question est proposée pour confirmer ou non la nature de la liaison que fait l'élève entre accrétion et sédimentation.

Le tableau suivant (tableau 6.2) résume les grandes phases du travail qui sera demandé aux élèves, les éléments de réponse attendus, et les mécanismes sous-jacents en rapport avec le fonctionnement des fonds océaniques.

Fiche	Réponse attendue	Mécanisme sous-jacent :
Q1- Q2	des bandes d'autant plus âgées qu'elles sont éloignées de l'axe de la dorsale	le double tapis roulant
Correction collective		
Q3.Q4. Q5	un océan inexistant petit grand un océan plus vieux sur ses bords qu'en son centre	la création de "bandes" de fond basaltique à l'axe de la dorsale
Correction collective		
Q6	des ensembles sédimentaires biseautés et d'âge différent	partout, et de tous temps, de la sédimentation sur le fond basaltique
Q7	en surface, seulement des sédiments récents	partout, actuellement, de la sédimentation sur le fond basaltique

Tableau 6.2 :
Les étapes de la reconstitution par les élèves du passé d'un fond océanique

3. Analyse didactique a priori de la situation

La situation est conçue pour savoir de quelle manière les élèves, avant enseignement, reconstituent l'histoire d'un océan, comment ils mettent en jeu les deux processus que sont la dérive/ accréation et la sédimentation.

3.1. Un contexte "déterministe"

La fiche, en termes de tâche, exige des allers et retours entre l'actuel et différents moments du passé. Les résultats de la tâche (les coupes) ainsi que les justifications associées nous renseignent sur la compréhension par les élèves des deux grands processus en jeu (l'accréation et la sédimentation). Dans toutes les périodes considérées, les phénomènes d'accréation et de sédimentation se déroulent avec les mêmes caractéristiques : il n'y a pas de changement de régime. On est dans le fonctionnement "de routine" d'un océan, qui exclut les moments que sont l'origine et la mort d'un océan. Dans ce laps de temps considéré, deux "règles de base" s'appliquent, qui découlent des caractéristiques des deux processus et qui permettent de reconstituer chacun des états de l'océan, que l'on remonte ou que l'on redescende son histoire. Connaissant donc l'état du système à un moment donné, son évolution est parfaitement déterminée que l'on se projette dans le passé ou dans l'avenir. Rappelons ces règles :

- | |
|--|
| <p>1) - A l'axe d'une dorsale, à tout moment, avec le même rythme, il se forme des pans de fond océanique.</p> <p>- Il y a ensuite une double dérive des pans nouvellement formés.</p> <p>2) - En tout point du fond océanique, à tout moment et avec la « même intensité », il y a de la sédimentation.</p> <p>- Le dépôt qui s'effectue à un moment donné se superpose au dépôt du moment précédent.</p> |
|--|

L'énoncé de ces "règles" montrent bien en quoi elles se ressemblent (intemporalité, continuisme, gradualisme) et en quoi elles diffèrent (leur espace d'application : la première régit l'axe de la dorsale ; la deuxième, le fond océanique entier). A ce stade de notre étude, nous retenons qu'elles mettent le temps à l'écart puisqu'elles s'appliquent de la même manière à toutes les époques. Mais ce n'est peut-être pas si simple car ces règles servent deux histoires qui, si elles prennent place dans des lieux juxtaposés, se conjuguent dans le temps : c'est en effet sur tout l'espace cumulé produit par l'accrétion au cours du temps (il augmente continûment au cours du temps) que se fait la sédimentation.

En conclusion, la remontée dans le temps qui est demandée aux élèves doit les conduire à articuler deux histoires, l'histoire expansionniste des fonds océaniques et leur histoire sédimentaire, concevables par la mise en jeu de règles intemporelles. Mais compte tenu des particularités spatiales de ces règles, les deux histoires sont liées. Comment les élèves s'en sortent-ils ? La réflexion sur le "double tapis roulant" qu'on leur propose en début de fiche est conçue comme une aide : on fixe les fondements de l'histoire expansionniste pour mieux installer l'histoire sédimentaire.

3.2. L'importance de l'actuel

Ce cas laisse penser a priori que le principe de l'actualisme peut être employé avec aisance, et ceci pour deux raisons :

1) Parce que le temps et l'espace ne brouillent pas les effets de ces "causes géologiques" que sont l'accrétion et la sédimentation. Ce qui est occasionné à un moment donné par une de ces causes se maintient en l'état quand survient ce qui est provoqué un peu plus tard par cette même cause. Ceci est valable aussi bien pour l'accrétion que pour la sédimentation :

- Pour l'accrétion : chaque pan basaltique ancien existe en tant que tel ; il est seulement disposé à une certaine distance de la dorsale, du fait de la dérive.
- Pour la sédimentation : chaque couche ancienne existe en tant que telle ; elle est seulement enfouie sous d'autres plus récentes et elle est moins étendue que celles qui lui succèdent (car le fond basaltique était alors plus petit).

2) Parce que les deux processus en question (accrétion, sédimentation) sont bien identifiés dans la nature actuelle, qu'ils sont quantifiés et que l'on admet leur continuité et leur « constance » dans le temps. Ce sont deux "causes géologiques actuelles" qui s'appliquent chacune à un même domaine et sont extrapolables au passé à partir de l'actuel. En d'autres termes, il semble que seul l'actualisme d'extrapolation est nécessaire (voir le chapitre 5).

Pour comprendre la position d'une zone située en plaine abyssale, et **pour l'accrétion seulement**, il est nécessaire de mettre en jeu sur une certaine durée une dérive latérale, un phénomène que l'on perçoit encore aujourd'hui (une "autre cause actuelle") et qui concerne un même domaine. Nous utilisons l'**actualisme d'extrapolation**. Le temps long dont on a besoin est donc relativement simple, pour plusieurs raisons :

- ses effets sur une petite durée sont visibles pour l'homme ;
- ses effets sur une grande durée sont visibles : c'est l'océan actuel avec l'ampleur qu'on le connaît ;
- par un simple calcul, on trouve le temps long nécessaire pour obtenir l'océan entier.

En définitive, le temps long est ici représenté par de l'espace, ce qui semble souvent être le cas en géologie (C. Orange & al., 1999, p. 114).

Le schéma suivant représente la manière dont l'actualisme entre en jeu dans l'explication du fond basaltique d'une plaine abyssale.

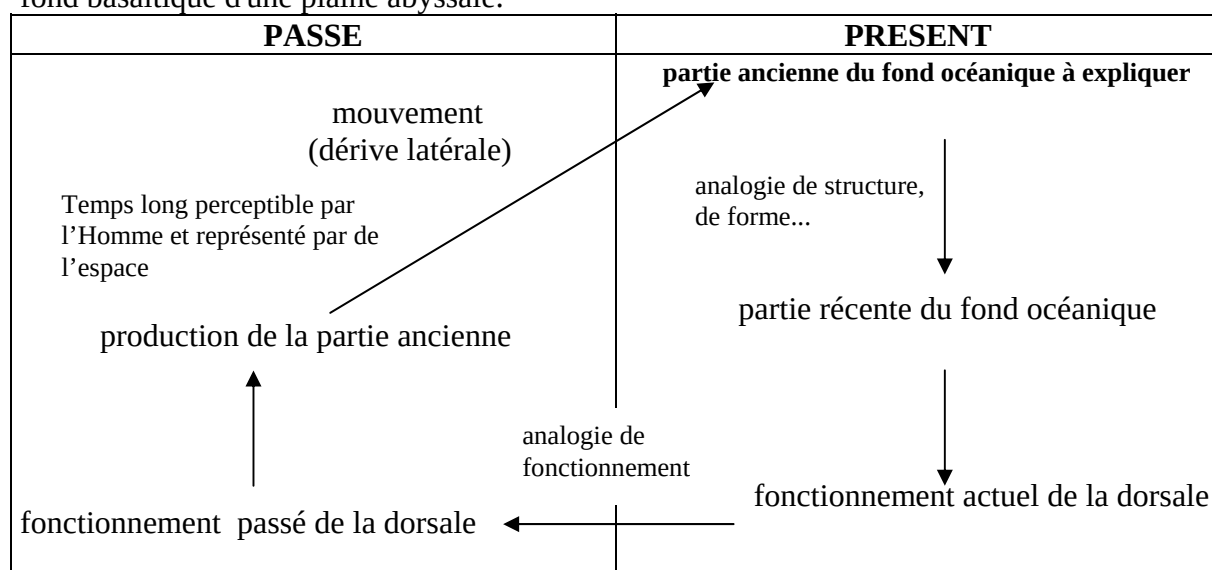


Figure 6.3 :

Actualisme d'extrapolation et explication du fond basaltique d'une plaine abyssale

En ce qui concerne la sédimentation, pour expliquer une couche sédimentaire profonde en un lieu de plaine abyssale, on doit également mobiliser "une cause actuelle", la sédimentation, et par extrapolation envisager une sédimentation ancienne. Mais cela ne suffit pas : il nous faut expliquer l'enfouissement sous d'autres sédiments. Ce qui nous ramène à "suivre" la sédimentation pendant une certaine durée, de façon à superposer d'autres sédiments sur cette couche (principe de superposition que nous pouvons percevoir actuellement à l'échelle humaine). Donc, tout comme pour l'accrétion, expliquer l'existence d'une couche sédimentaire ancienne et sa position demande de mettre en jeu **de l'actualisme d'extrapolation et du temps long représenté par de l'espace**.

Le schéma suivant représente la manière dont l'actualisme entre en jeu dans l'explication des sédiments reposant sur le fond basaltique d'une plaine abyssale.

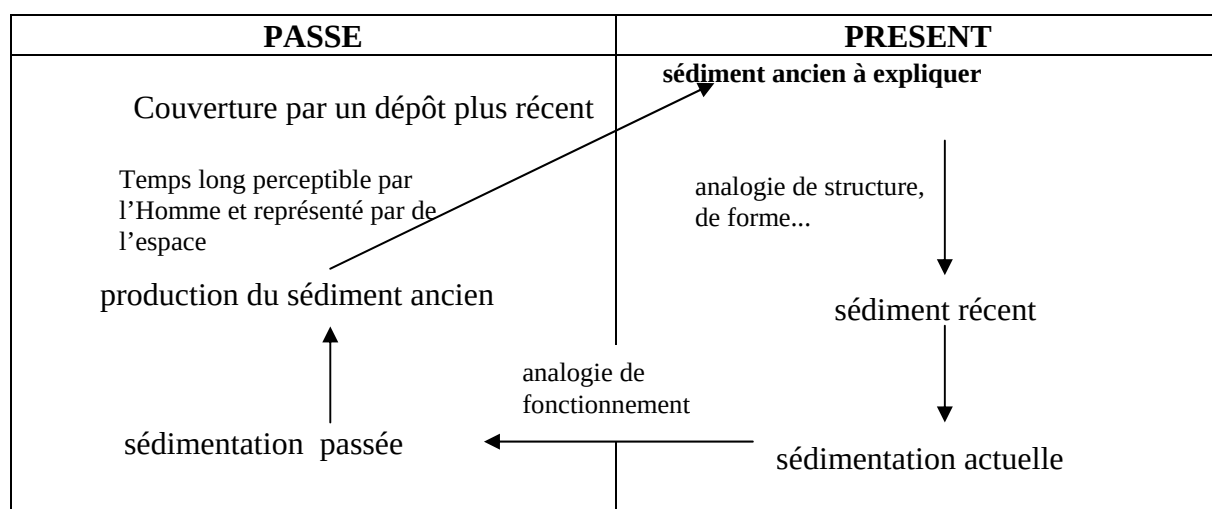


Figure 6.4 :

Actualisme d'extrapolation et explication des sédiments reposant sur le fond basaltique d'une plaine abyssale

3.3. Une esquisse de l'espace des contraintes pour l'expert

Construire une représentation des fonds océaniques **passés**, 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 tout à la fois **la nécessité d'un fond océanique plus petit et celle d'un dépôt sédimentaire moins épais et biseauté** en allant vers l'axe de la dorsale. Quelles contraintes empiriques peuvent être articulées à ces nécessités, parmi celles disponibles pour les élèves ?

- Les anomalies magnétiques et leur ordre de formation, la dérive des fonds océaniques et l'accrétion à l'axe de la dorsale sont des contraintes empiriques liées à la nécessité d'un fond océanique passé plus petit et d'un accroissement "par la dorsale" ;

- Le dépôt de particules sur le fond océanique, permanent et en tous ses points, et la nécessité définie ci-dessus, sont liés à la nécessité d'une surface des dépôts de plus en plus large et à celle d'un biseau sédimentaire. C'est à la fois parce que la sédimentation est ubiquiste et permanente et parce que le fond océanique ne cesse de s'agrandir, que l'épaisseur des sédiments diminue en allant vers l'axe de la dorsale.

La figure 6.5 représente l'espace des contraintes ainsi défini :

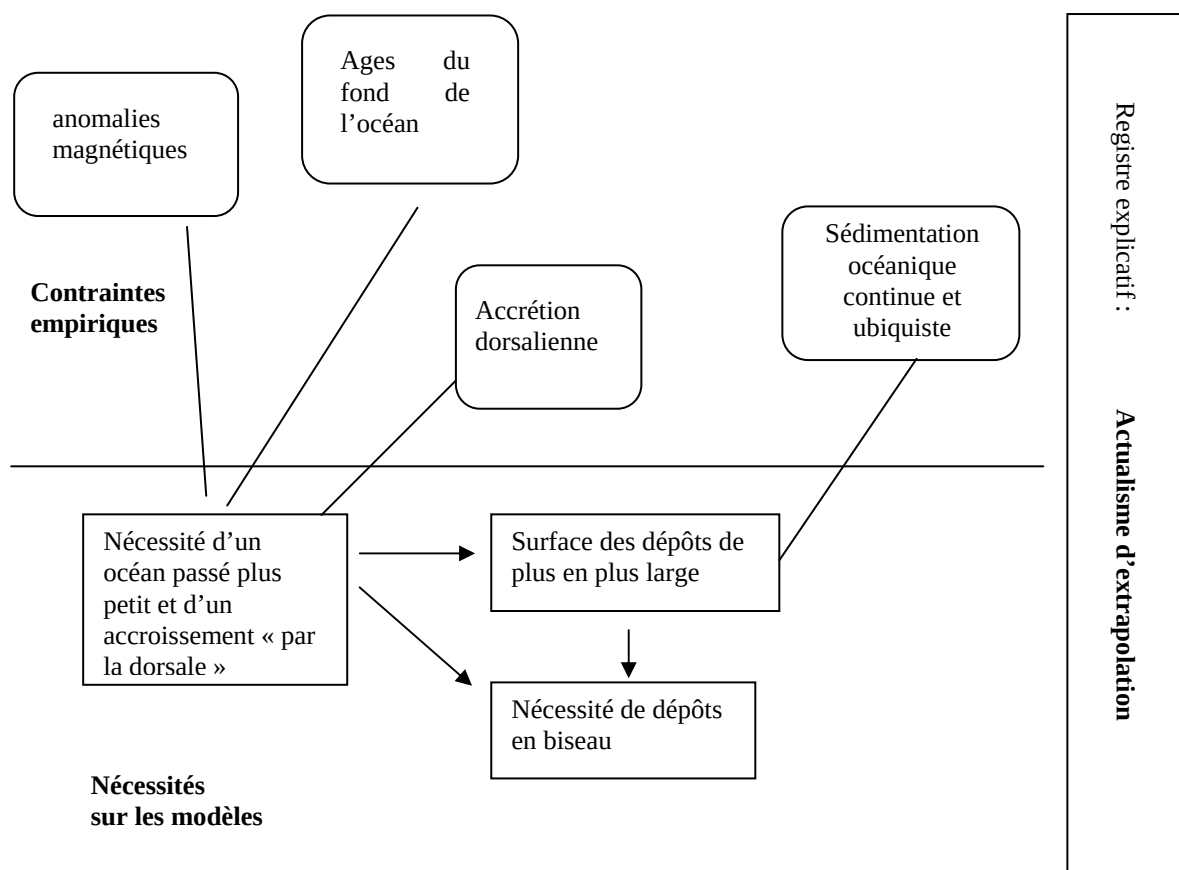


Figure 6.5 :
L'espace des contraintes en jeu dans la reconstitution du passé d'un fond océanique

4. Conclusion

L'analyse a priori de cette situation laisse penser que la reconstitution d'un état antérieur de l'océan n'est pas triviale. Certes, les processus en jeu peuvent chacun avoir du sens pour l'élève. Mais, si la projection dans le passé (comme dans le futur) met en jeu uniquement un

actualisme d'extrapolation, qui lie explicitement du temps à de l'espace, cela ne suffit pas : il y a à articuler les deux phénomènes, ce qui n'est pas évident. En effet, ces deux processus se produisent en même temps, de façon continue et dans des directions de l'espace différentes. On sait la tendance de l'élève à transformer le simultané en séquentiel (Viennot, 1993, 1996 ; C. Orange, D. Orange, 1995 ; D. Orange, 2000). On peut penser qu'il lui sera difficile d'articuler deux séquences synchrones.

Chapitre 7

Le passé d'un océan

Explications des élèves et utilisation du temps

Sommaire

1. Le corpus de données
2. La compréhension par les élèves des processus de dérive/ accréation
3. La compréhension par les élèves de la sédimentation océanique
4. Conclusion

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié ce que sous-tend, a priori et pour l'expert, la reconstitution de l'histoire antérieure d'un fond océanique. Il y a à considérer **l'articulation** de deux processus, l'accréation et la sédimentation. L'expert a une bonne connaissance de ces processus : leur déroulement s'effectue encore dans les océans ; il est perceptible à l'homme et est l'objet d'une quantification (vitesse d'expansion des fonds océaniques ; vitesse de sédimentation) ; de plus, leurs traces s'excluent dans l'espace (la sédimentation concerne le fond océanique ; l'accréation, l'épaisseur des plaques à l'axe de la dorsale). Pour remonter dans le passé des océans, l'expert utilise, sans changer de domaine, ce qui s'y produit encore à l'heure actuelle et il l'extrapole : c'est un actualisme particulier que nous avons qualifié **d'actualisme d'extrapolation**.

En utilisant les apports de l'analyse a priori, en matière d'articulation des processus, d'actualisme mais aussi de problématisation, nous tentons maintenant de comprendre comment fonctionnent les lycéens en situation de reconstituer l'histoire de fonds océaniques.

1. Le corpus de données

Deux années de suite, nous avons demandé à des élèves de Première scientifique d'établir les grands traits de l'histoire des fonds de l'Océan Atlantique. La réflexion des élèves est balisée par les questions d'une fiche (chapitre 6, figure 6.1), des supports documentaires (représentation d'un fond océanique basaltique avec la répartition des anomalies magnétiques, coupes géologiques transversales de l'Atlantique, carte de l'Atlantique Nord). Il est également fait appel à leurs connaissances.

Plus précisément, le corpus de données que nous utilisons concerne deux classes de Première S aux caractéristiques suivantes :

Année scolaire	Classe et caractéristiques	Lycée
1998/99	Une classe de Première S : - 23 élèves - non dédoublée en travaux pratiques	Lycée Camus, NANTES
1999/00	Une classe de Première S : - 33 élèves - dédoublée en travaux pratiques (une demi-classe de 17 élèves et une autre de 16 élèves) ; 56 élèves	Lycée Camus, NANTES

Figure 7.1 : Reconstitution du passé d'un océan : les classes concernées

Ces classes se sont donc succédé dans le temps, sans que la plus récente ne comprenne des redoublants de la première. Nous avons proposé la même fiche de travail, intitulée "L'histoire des fonds océaniques"(voir le chapitre 6, figure 6.1), à quelques aménagements près, la deuxième année : en 1999/00, des figurés ont été mis pour la zone de la dorsale. Cependant, les deux classes 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. Les réponses écrites brutes des élèves (leur "brouillon") aux questions de la fiche

Il s'agit des réponses aux questions de la fiche que les élèves ont d'abord traitées individuellement. Il y a :

- en 1998-99 : 22 productions individuelles sur 23 (un élève absent).
- en 1999-00 : 33 productions individuelles.

1.2. Les transcriptions d'entretiens particuliers d'élèves en cours de réalisation de questions de la fiche

En 1999/00, nous avons interviewé deux élèves en train de travailler les questions 4 et 5 de la fiche (il s'agit de reconstituer l'Atlantique à différentes époques). C'est pourquoi nous parlons d'entretiens particuliers. Nous avons choisi des élèves dont la réponse immédiate s'écartait de la réponse attendue. C'est après avoir obtenu leur accord que nous avons procédé à un enregistrement audio.

1. 3. Les transcriptions de la présentation et de la confrontation des réponses des élèves à la question 6 de la fiche (il s'agit de placer les sédiments sur les fonds océaniques reconstitués à différentes époques).

Nous nous proposons d'analyser les réponses des élèves selon les deux grands processus qui marquent l'histoire des fonds océaniques :

- la dérive/ accréation qui construit le fond océanique basaltique ;
- la sédimentation, qui se produit sur ce fond basaltique.

Nous porterons une attention particulière aux relations établies entre ces deux processus.

2. La compréhension par les élèves des processus de dérive/ accréation

Les questions 1 à 5 de la fiche concernent les processus de dérive/ accréation, de même que les deux entretiens particuliers. Leur analyse doit nous permettre de "mesurer" l'appropriation par les élèves de ces processus.

2.1. Etude des réponses écrites aux questions 1 à 5 de la fiche

2.1.1. Analyse des réponses à la question 1

La question 1 demande de dire *"pourquoi on a une anomalie positive au niveau de la dorsale"*. En rapport avec la définition des anomalies magnétiques, elle s'intéresse à une anomalie récente et doit servir à rappeler la jeunesse du fond basaltique au niveau de la dorsale.

Nous répartissons en **trois catégories** les réponses écrites des élèves à cette question.

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

* les réponses qui mettent en relation l'acquisition, par le basalte, d'une anomalie positive sous l'effet du Champ Magnétique Terrestre (CMT) actuel.

mais aussi :

* les réponses où l'anomalie positive qu'on mesure dans la zone de la dorsale est rapportée à un Champ Magnétique Terrestre (CMT) avec une direction actuelle et où il y a également l'expression de la jeunesse ou du renouvellement du basalte dans la zone de la dorsale.

Exemple : " La basalte au niveau de la dorsale à été formé ressement quand la direction du CMT était celle actuel" (Julien, 1999-00).

Par l'un ou l'autre de ces types de réponses, nous admettons que l'élève se représente bien la mise en place actuelle de basalte dans la zone de la dorsale.

- **La catégorie 2** est constituée des réponses qui mettent **seulement** en relation la formation du basalte de la dorsale à la direction actuelle du CMT. Ces réponses ne nous permettent pas de savoir si l'élève envisage une formation actuelle ou subactuelle de ce basalte.

Exemple : "On a une anomalie positive au niveau de la dorsale car quand le basalte s'est formé, le CMT avait la direction actuelle, du moment" (Nadine, 1998-99)

- **La catégorie 3** faite de réponses qui ne font pas référence au CMT avec une direction actuelle. Les formes sont multiples :

* Il y a reprise de façon plus ou moins complète d'éléments de définition des anomalies magnétiques.

Exemple : "Le magma en se refroidissant acquière une aimantation qui modifiera la mesure du CMT. Or le CMT change de valeur au bout d'un certain temps" (Sylvain, 98/99)

* Il y a une relation compliquée entre formation du basalte et anomalie positive.

Exemple : " L'hors de la format° du bsalte il c'est produit un changemt du CMT. Par ce changement les 2 plaques s'attirent et ont formées une dorsale c'est pourquoi nous avons une anomalie + au niveau des dorsales" (Donia, 99/00) .

* Il y a seulement reprise d'éléments de la question :

Exemple : "On a une anomalie positive au niveau de la dorsale" (Danièle, 98/99)

Le tableau 7.2 récapitule les résultats de la mise en catégories :

Catégories de réponses à la question 1 :	98/99 sur 22	99/00 sur sur 17 16	TOTAL sur 55
Catégorie 1 : La formation du basalte est récente et elle est mise en relation avec la direction actuelle du CMT.	7	5 12	24
Catégorie 2 : La formation du basalte est mise en relation avec la direction actuelle du CMT	9	9 2	20
Catégorie 3 : La formation du basalte ne fait pas référence au CMT avec une direction actuelle.	4	3 2	9
Réponses manquantes	2	0	2

Figure 7.2 : Les différentes catégories de réponses (question 1 de la fiche)

Selon nous, seules les réponses de la catégorie 1 certifient que l'élève admet la formation récente du basalte situé au niveau de la dorsale. Nous ne pouvons pas nous prononcer pour les réponses des autres catégories, que ce soit la catégorie 2 ou la catégorie 3. Cette dernière catégorie nous interroge. La question des inversions du champ magnétique terrestre (CMT) n'avait pas été abordée auparavant. Nous nous demandons si la difficulté de se représenter ce que sont les anomalies magnétiques n'a pas égaré des élèves. Des questions orales témoignent d'ailleurs du mystère que font pour eux les anomalies magnétiques et de leur difficulté à les comprendre. En voici quelques-unes qui ont rapidement émergé, tant en 98/99 qu'en 99/00 : *"C'est quoi la direction actuelle du champ magnétique terrestre ?"* (1999-00, groupe 1 comme groupe 2). *"Pourquoi y-a-t-il eu des inversions du CMT et à quoi sont-elles dues ?"* (1999-00, groupe 2)

A ces interrogations, le professeur a brièvement répondu, pensant que des connaissances approfondies sur le magnétisme ne sont pas indispensables à la construction, par les élèves, de l'histoire des fonds océaniques. Sa réponse, volontairement brève, s'est basée sur la comparaison de la Terre à un gros aimant avec un pôle Nord magnétique et un pôle Sud magnétique, qui correspondent à peu près aux pôles Nord et Sud géographiques. C'est le noyau qui est responsable du champ magnétique terrestre. La boussole donne les pôles magnétiques Nord et Sud. Au cours de l'histoire de la Terre, il y a eu des inversions du CMT (le pôle Nord magnétique est devenu le pôle Sud magnétique et inversement). Ces inversions ont été rapides à l'échelle des temps géologiques.

En résumé, cette première question conduit à une bonne proportion de réponses d'élèves qui ne relient pas explicitement de l'espace (la zone de la dorsale) à du temps (l'actuel). Aussi, allons-nous maintenant nous appuyer sur leurs productions aux questions 2, 3, 4 et 5 pour éclairer leur compréhension de la mise en place du fond basaltique.

2.1.2. Analyse des réponses à la question 2

La question 2 de la fiche demande aux élèves d'affecter les bandes de basalte d'un chiffre indiquant leur ordre de formation (1 = basalte formé en premier ; 2 = basalte formé en deuxième etc.). Les chiffres sont portés directement sur le document 1 de la fiche. Ainsi, une réponse exacte a les caractères suivants :

- des chiffres d'autant plus élevé que l'on se rapproche de l'axe de la dorsale ;
- une symétrie des chiffres par rapport à l'axe de la dorsale.

Les réponses des élèves des deux classes de première S que nous étudions se répartissent en quatre catégories :

- **Catégorie 1** : les réponses dont le schéma du document 1 porte une chronologie relative exacte.

Nous partons de l'idée que ceux qui donnent une chronologie exacte mettent en jeu une formation de fond océanique au niveau de l'axe de la dorsale et une dérive latérale de ceux-ci. La majorité des justifications reprend cette mise en fonctionnement du fond océanique. Mais nous trouvons deux types d'accrétion des fonds océaniques basaltiques :

1) une accrétion "latérale" c'est-à-dire une addition de basalte nouveau limitée à la bordure des fonds déjà formés. En voici un exemple : *"Le basalte n°1 s'est formé au niveau de l'axe de la dorsal puis a dérivé. Et s'est formé un second basalte etc."* (Angélique, 99/00).

2) une accrétion "verticale" c'est-à-dire une addition de basalte nouveau au dessus des fonds déjà formés. C'est ce qu'exprime la réponse suivante : *"Quand le magma sort, il coule sur les côtés, s'étale et le magma le plus éloigné de la dorsale est le premier formé. Au fur et à mesure qu'on se rapproche de la dorsale le basalte est donc le plus récent."* (Sabrina, 98/99)

De plus, un assez grand nombre d'élèves complète cette mise en fonctionnement par la précision de la cause de la dérive. Nous constatons une diversité de ces causes. La cause de la dérive peut être :

1) la poussée du basalte récemment formé par le magma qui parvient à la surface : *" Le magma arrive au niveau de l'axe de la dorsale. Il pousse alors le magma refroidit qui se trouvait au niveau de cette axe. De telle sorte que de part et d'autre de l'axe, le basalte s'écarte et s'éloigne de l'axe. Le basalte le plus éloigné est donc le plus vieux."* (Sylvain, 98/99)

2) une propriété des plaques. Ce peut être la propriété des plaques à bouger : *"La première bande de basalte s'est formé au niveau de l'axe de la dorsale et a ensuite dérivée car les plaques s'écartent"* (Valérie B., 99/00). Ou encore la propriété des plaques à se repousser : *"Dorsale : 2 plaques qui se repoussent donc 1er basalte formé est le basalte le plus éloigné de l'axe (nb identique de chaque côté de l'axe)"* (Aïda, 99/00). Nous nous demandons si cette dernière propriété ne découle pas de la prise en compte par l'élève des anomalies magnétiques, représentées par des + et des - sur le document.

3) les séismes se produisant dans la zone de la dorsale : *" Lors du séisme, il y a écartement des roches et le magma coule le long du plancher océanique, c'est ainsi que le basalte formé en premier se retrouve le plus éloigné de l'axe de la dorsale et que le basalte formé récemment se retrouve plus près de l'axe de la dorsale"* (Kevin, 98/99)

Nous avons croisé ces deux sortes de caractéristiques (type d'accrétion, cause de l'écartement) en nous limitant aux réponses explicites sur le sujet. Voici le tableau du croisement :

Cause de l'écartement	Propriété des plaques	Poussée du magma	Séismes à l'axe de la dorsale	TOTAL
Type d'accrétion				
Accrétion "latérale"	1 12	7 5	0 0	8 17
Accrétion "verticale"	0 0	0 0	2 0	2 0
TOTAL	13	12	2	27

Figure 7.3 :

Croisement des réponses selon deux variables : le type d'accrétion et la cause de l'écartement des plaques

Dans chaque case, la première ligne de chiffre correspond à l'année 98/99, alors que la seconde concerne l'année 99/00.

Sous le couvert d'une datation relative exacte des fonds océaniques, nous détectons donc des différences qui portent sur ce qui permet la dérive et sur la compréhension de l'accrétion :

- En ce qui concerne la dérive des fonds océaniques, une proportion non négligeable d'élèves l'attribue à la poussée du magma à l'axe de la dorsale. Ce n'est pas ce que pensent les scientifiques : pour eux les plaques sont "tirées" et non pas "poussées".

- Quelques élèves raisonnent en mettant en jeu une accrétion "verticale" qui épaissit les plaques à l'axe de la dorsale et qui renvoie à la conception de ces élèves du volcanisme, avec coulées et éruption, comme ce qui se passe sur les flancs d'un édifice volcanique aérien. Quatre élèves en tout sont dans ce cas pour l'ensemble des deux classes étudiées. Deux nous proposent une cause à l'écartement, et il s'agit de séismes (voir la figure 7.3). Devons-nous y voir l'expression commune du volcanisme et de la sismicité dans un contexte de mouvements de plaques ?

- **Catégorie 2 :** les réponses dont le schéma fait valoir une chronologie inverse de celle attendue. Les justifications expriment un fonctionnement des fonds océaniques avec accrétion et dérive "latérales". Une réponse parle explicitement de poussée du magma. Voici cette réponse : *"Le magma arrive au niveau de l'axe de la dorsale. Il pousse le magma refroidi qui se trouvait au niveau de cette axe. De tel sorte que de part et d'autre de l'axe, plus on s'éloigne de l'axe et plus c'est ancien"*. (Hamza, 98/99). C'est pourquoi nous pensons à un détournement du sens des chiffres demandés : le chiffre 1 ne signifie pas "basalte formé en premier" mais "basalte le plus récent".

- **Catégorie 3 :** les réponses où le schéma est manquant, les élèves ayant oublié de le rendre. Nous nous intéressons alors à la justification fournie, de façon à voir si elle est mise au service d'une chronologie exacte ou d'une chronologie inverse.

- **Catégorie 4 :** les réponses où schéma et justification sont manquants, les élèves ayant oublié de les rendre.

Le tableau suivant rassemble les résultats de la mise en catégories pour les deux classes de Première S étudiées :

Types de réponses à la question 2 :	98/99 sur 22	99/00* sur 17	sur 16	TOTAL sur 55
Catégorie 1 : schéma avec une chronologie relative des bandes de basalte exacte	17	13	12	42
Catégorie 2 : schéma avec une chronologie relative des bandes de basalte inverse (entre parenthèses le nombre de ceux dont la justification est mise au service d'une chronologie exacte)	3 (2)	0	0	3 (2)
Catégorie 3 : schéma manquant (entre parenthèses le nombre de ceux dont la justification est mise au service d'une chronologie exacte)	2 (0)	4 (3)	1 (1)	7 (4)
Catégorie 4 : schéma et justification manquants	0	0	3	3
TOTAL	22	17	16	55

Figure 7.4 : Les différentes catégories de réponses (question 2 de la fiche)

2.1.3. Etude croisée de réponses aux questions 1 et 2

Pour les élèves des catégories 2 et 3 de la question 1⁴⁹, dont les réponses sont peu précises ou décalées, nous avons mis en correspondance les réponses à la question 1 et à la question 2, dans le but de nous assurer de leur compréhension ou non des mécanismes de dérive/accrétion. Produisent-ils à nouveau des réponses décalées à la question 2 ?

Le tableau suivant croise les résultats de ces élèves aux questions 1 et 2. Les nombres du tableau expriment des nombres de réponses.

⁴⁹ Catégorie 2 : La formation du basalte est **mise en relation** avec la direction actuelle du CMT, sans plus
Catégorie 3 : la formation du basalte ne fait pas référence au CMT avec une direction actuelle

Catégories de la question 1-->	catégorie 2		catégorie 3		Total
	98/99	99/00	98/99	99/00	29
Catégories de la question 2	9	11	4	5	
Catégorie 1 Schéma avec chronologie exacte	9	9	2	2	22
Catégorie 2 Schéma avec chronologie inverse +justification en rapport avec : * chronologie exacte * chronologie erronée			1 <i>1</i>		1 <i>1</i>
Catégorie 3 Schéma manquant +justification en rapport avec : * chronologie exacte * chronologie erronée		1		1 <i>1</i>	2 <i>1</i>
Catégorie 4 Schéma et justification manquants		1		1	2
TOTAL	9	11	4	5	29

Figure 7.5 : Croisement des réponses des élèves aux questions 1 et 2 de la fiche

Mises à part les réponses manquantes à la question 2 (2 élèves), nous remarquons que 25 élèves sur 29 s'inscrivent dans une chronologie exacte. Il reste deux cas (ils apparaissent en italiques dans le tableau) où la chronologie est inverse. Voici les justifications associées :

- 98/99 : *"Le basalte s'est tout d'abord formé juste au niveau de l'axe de la dorsale avec une anomalie positive, puis il y a eu encore du basalte avec une anomalie cette fois négative."*

- 99/00 : *" Les plaques s'écartent, formant des différentes zones, certaines positives et d'autres négatives. Ces zones s'écartent d'années en années".*

Il nous semble que la première justification souffre par son incomplétude : elle exprime le rôle géniteur itératif de la dorsale (cela renvoie à l'accrétion) sans évoquer explicitement la dérive latérale. En revanche, la seconde (99/00) parle d'un écartement (cela renvoie à la dérive) qui conditionnerait la formation de nouvelles zones. Mais rien de précis sur cette formation et sa localisation. A tout le moins peut-on supposer que cette formation se produit entre les plaques. D'autre part, il y a prégnance des anomalies magnétiques dans ces deux réponses. Tout se passe comme si ces élèves tentaient d'articuler absolument une "histoire" d'anomalies magnétiques" à une "histoire" de fond océanique.

A ce stade de notre analyse des réponses des élèves, nous pouvons écrire que la presque totalité des élèves fait fonctionner le double "tapis roulant" des fonds océaniques basaltiques de façon pertinente.

2.1.4. Analyse des réponses aux questions 3, 4 et 5

Après une correction aux questions 1 et 2 réalisée en collectif, les élèves répondent individuellement aux questions 3, 4 et 5 qui situent dans le temps le début de la formation de l'Atlantique (question 3), et demandent de reconstituer cet océan, par découpage de coupes transversales à la fin du Jurassique (question 4) et à la fin de l'ère Secondaire (question 5).

Etudions les productions écrites des élèves recueillies au bout du temps imparti (une bonne dizaine de minutes) pour ce travail.

Question 3 : Le début de la formation de l'océan Atlantique

En 98/99 comme en 99/00, tous les élèves des classes de première S étudiées fournissent, sans exception, une datation exacte au début de l'Atlantique soit 190 MA.

Les justifications ou commentaires fournis sont de deux types :

- Certains (**type 1**) mettent l'accent sur l'âge des basaltes et leur éloignement de la dorsale.
Exemple :

"D'après la question 2, on sait que les bandes de plancher océanique les plus anciennes sont celles qui sont le plus éloignées de la dorsale. En observant le document 2, on voit que le début de la formation de l'océan Atlantique remonte à 190 MA. (99/00, Elise)

Ces réponses sont une déduction de la règle suivante : plus le basalte est loin de la dorsale, plus il est vieux. Elles mobilisent également la règle selon laquelle l'âge du plus vieux basalte correspond à l'âge de l'ouverture océanique. Ces réponses renvoient donc au fonctionnement de la dorsale et à la dérive latérale.

- d'autres (**type 2**) mettent d'abord en jeu un évènement : la séparation des continents africain et américain ou des plaques.

Exemple : *"La formation de l'océan atlantique remonte à 190 mA lors de la séparation de l'amérique du Nord et de l'afrique du nord" (98/99, Julien G.)*

- Quelques réponses (**type 3**) donnent un âge "sec", c'est-à-dire sans justification.

Le tableau 7.6 rassemble les résultats des deux classes étudiées :

Type de justification du début de l'Atlantique :	98/99 sur 22	99/00 sur 33	TOTAL sur 55
1) Datation par une règle liant l'âge des fonds basaltiques à l'éloignement de la dorsale et qui renvoie au fonctionnement de cette dorsale	19	26	44
2) Datation par la propriété d'écartement des continents ou des plaques	2	7	9
3) Pas de justification	1	0	2

Figure 7.6 : Mise en catégories des réponses (question 3 de la fiche)

En définitive, tous les élèves datent le début de formation de l'Atlantique.

Question 4 et 5 : La reconstitution de l'Atlantique il y a 135 et 65 MA

Le document 2 de la fiche présente deux coupes identiques de l'Atlantique aujourd'hui. Individuellement, les élèves ont découpé puis collé des éléments de chacune de ces coupes afin de donner un état de cet océan à la fin du Jurassique (il y a 135 MA) et à la fin de l'ère secondaire (il y a 65 MA).

La reconstitution des fonds océaniques

Nous nous intéressons aux productions obtenues (soit deux coupes) après ce travail, ce qui néglige les essais/erreurs qui ont pu exister : nous avons en effet observé que certains élèves commencent par enlever les parties les plus vieilles (exemple : le fond océanique daté de 190 à 135 millions d'années) pour "remonter dans le temps" avant de revenir à une réponse plus canonique. Ce fut le cas de quelques élèves en 1998-99 et en 1999-00 : pour preuves, les collages/décollages lors de la réalisation de la réponse ou encore leur trace sur la fiche rendue. Au final cependant, nous constatons que tous les élèves ont évidé les coupes des parties plus récentes que 135 MA (première reconstitution) et 65 MA (deuxième reconstitution). En d'autres termes, tous les élèves ont compris que remonter dans le temps, c'est faire une ablation plus ou moins importante de fonds océaniques médians, et rapprocher les éléments restants.

En 99/00, le professeur a demandé une justification du découpage que 25 élèves sur 33 ont produite. La quasi-totalité (24 sur 25) fait référence au fonctionnement des fonds océaniques, en relevant par exemple le plus jeune âge des bandes océaniques médianes et le fait qu'à l'époque de la reconstitution, elles n'étaient pas "nées". Un élève centre sa justification sur le comportement des continents, comme il l'avait déjà fait pour la question 3. Voici sa réponse à la question 4 : *" Il y a 135 MA, les continents étaient peu éloignés donc les zones (des différents basaltes) n'étaient pas aussi nombreuses".*

Il est deux justifications aux questions 4 et 5 à relever, qui laissent penser que les élèves ne considèrent pas la dorsale et sa "permanence" de la même façon :

- la première exprime l'idée du renouvellement permanent de la zone de la dorsale, où seul l'axe est fixe : *"L'indication de 135 MA doit se situer à l'emplacement de la dorsale car le basalte s'est formé toujours au même endroit, l'axe est fixe c'est le basalte qui se déplace et les 2 continents, l'amérique du nord et l'afrique, se sont écarter pour former l'océan."* (Julien P.)

- la seconde laisse imaginer une construction en cours de route ou progressive de la dorsale : *"Il y 135 millions d'années le plancher océanique venait juste de commencer à se former, la dorsale n'existait pas. Donc l'océan Atlantique qui séparait l'Amérique du Nord à l'Afrique du Nord n'était pas encore très étendu"* (Sarah). Que veut dire cette élève quand elle écrit que la dorsale n'existait pas ? Ses découpages suppriment la zone de la dorsale. Est-ce la dorsale en elle-même qui est supprimée ? Ou la dorsale dont l'âge est trop récent pour être gardée ?

Nous avons vu que, sous une compréhension apparemment maîtrisée du double tapis roulant des fonds océaniques, pouvaient se cacher des conceptions erronées du volcanisme. Nous faisons maintenant l'hypothèse qu'il s'y cache également des approches différentes en termes de stabilité structurelle ou non de ces zones.

L'importance donnée à la dorsale

Comme la dorsale océanique revêt une importance particulière dans le mécanisme de l'accrétion, nous avons analysé plus finement les coupes des élèves selon la place qu'ils donnent à la dorsale. Nous distinguons deux grandes catégories de reconstitution fondées sur la présence ou non d'une dorsale.

* Catégorie 1 : reconstitution sans dorsale

Si nous prenons l'exemple de la reconstitution il y a 135 millions d'années, les élèves entrant dans cette catégorie ont découpé de chaque côté sur la ligne "135 Ma", ont évidé les formations situées au centre, donc plus récentes, puis ont rapproché les 2 limites "135 Ma" **jusqu'à les confondre** et ils ont collé.

* Catégorie 2 : reconstitution avec dorsale

Nous mettons dans cette catégorie plusieurs types de reconstitutions, celles caractérisées :

a) par un espace, souvent petit, entre les deux bords (les élèves de la catégorie précédente les ont totalement ajustés). Il n'y a pas représentation de la morphologie de la dorsale (rift).

b) par un espace en haut duquel a été ajoutée la morphologie d'une dorsale.

Dans ces sous-catégories a) et b), on peut affiner la répartition des élèves selon qu'ils ont ou non mis un figuré à la zone de la dorsale.

c) par la surimposition d'une forme de dorsale, dans la partie superficielle d'une coupe identique à celles de la catégorie 1.

Dès lors qu'un ajustement bord à bord n'existe pas sur les deux reconstitutions demandées, autrement dit qu'il y a un petit espace, nous plaçons la réponse de l'élève dans la catégorie 2. Nous supposons que l'élève a dû s'interroger sur le rôle de la partie axiale et sur sa conservation.

Si une des deux reconstitutions (135 MA et 65 MA) présente ce petit espace "dorsale" et pas l'autre, nous mettons l'espace sur le compte d'un ajustement approximatif des morceaux de fond océanique et plaçons la réponse dans la catégorie 1.

Nos catégories ainsi définies, voici, le bilan que nous obtenons :

Catégories	98-99 (22)	99-00 (gr. 1, 17)	99-00 (gr. 2, 16)	TOTAL
Catégorie 1 : reconstitution sans dorsale	3	6	6	15
Catégorie 2 : reconstitution avec dorsale	19	10	10	39
Réponse difficile à classer	0	1	0	1
TOTAL	22	17	16	55

Figure 7.7 : Mise en catégories des réponses des élèves selon l'importance donnée à la dorsale (questions 4 et 5)

Même si nous sommes sur deux études de cas, ces effectifs (39 réponses sur 55) nous semblent significatifs de l'importance donnée par les élèves à la dorsale à toutes les époques.

Les façons de donner de l'importance à la dorsale

En 1998-99, un figuré particulier était associé à chaque tranche d'âge du fond océanique, à l'exception de la période allant d'il y a 23 MA à l'actuel qui était maintenue en blanc (figure 6.1). Un certain nombre de reconstitutions anciennes de l'Atlantique conservait la zone de la dorsale, en blanc, telle qu'elle figurait initialement sur les coupes ou bien un peu plus petite. Nous nous sommes interrogée à ce sujet :

- les élèves remettent-ils à une autre époque la dorsale qui existe encore maintenant ? Cette éventualité sous-tendrait la permanence d'une même dorsale. Or, si au milieu de l'Atlantique, on a bien toujours une dorsale, ses éléments ne sont jamais les mêmes puisque, tôt ou tard, ils sont enrôlés dans la dérive.

- y-a-t-il eu oubli d'un rajout du figuré de l'époque de fonctionnement de la dorsale ? Dans ce cas, on peut écrire que l'élève considère que chaque époque a "sa" dorsale.

Lorsque le professeur s'est étonné auprès des élèves du maintien de la dorsale dans certaines coupes, ceux-ci ont insisté sur l'existence d'une dorsale à l'époque. C'est pour cela qu'ils l'ont gardée. A son questionnement sur l'absence de symbole pour la partie dorsale (ce qui revient à dire qu'elle est actuelle), des élèves ont proposé d'ajouter le figuré de l'époque, en référence au fonctionnement de celle-ci à l'époque en question.

En 99-00, il nous a semblé judicieux de ne pas maintenir en blanc la zone de la dorsale et de lui mettre un figuré très particulier (des petits carrés), datant ainsi ses parties d'il y a 23 MA à l'actuel. Voici comment se répartissent les élèves ayant donné de l'importance à la dorsale :

figuré → forme ↓	pas de figuré	figuré de l'époque de la recons- titution	figuré de l'époque suivante	figuré nouveau	plusieurs figurés	
pas de forme en surface précise	10	0	0	2	0	12
forme en surface précise	0	5	2	0	2	9
	10	5	2	2	2	21

Figure 7.8 : Répartition des réponses selon l'importance donnée à la dorsale

Nous constatons que les deux tiers des élèves de la classe 99/00 (21 sur 33) accordent une importance à la dorsale en lui réservant un espace ou en marquant sa forme en surface. Sept d'entre eux, ceux qui lui attribuent le figuré de l'époque de la reconstitution ou de l'époque suivante, s'inscrivent vraisemblablement dans un processus de renouvellement de la zone qu'elle occupe. Mais qu'en est-il des autres, et ils ne sont pas rares (12), qui lui donne un figuré particulier (pas de figuré ou un figuré nouveau) ? La partie suivante de notre travail, qui porte sur la stabilité structurelle de la zone de la dorsale, nous permettra de poursuivre cette réflexion.

2.2. Etude des transcriptions d'entretiens particuliers d'élèves en cours de réalisation des questions 4 et 5 de la fiche

En 1999-00, les élèves ont accepté que le professeur réalise, pour les besoins de sa recherche et afin de mieux connaître leur façon de procéder, des entretiens privés enregistrés (enregistrements audio) lorsqu'ils construisaient leurs réponses. Cette demande du professeur fut faite collectivement avant que les élèves démarrent leur réflexion sur la fiche. Elle ne donnait aucune information sur les choix d'élèves qui seraient faits.

Deux entretiens privés eurent lieu lorsque les élèves travaillaient les questions 4 et 5 : celui de Donia et celui de Romain (année scolaire 99-00, groupe 1). Notre choix s'est porté sur eux quand nous avons repéré qu'ils ne construisaient pas une réponse exacte.

2.2.1. Le cas de Donia

Nous avons suivi Donia en train de travailler individuellement aux questions 4 et 5 pour lesquelles nous tenons sa réponse spontanée et sa réponse finale exécutée après un petit

entretien particulier (voir la transcription de l'entretien en annexe 4 et ses productions écrites en annexe 5). Spontanément, Donia n'a pas découpé, elle a reproduit, dans les cadres appropriés, la coupe du document 2. Ses réponses présentent plusieurs caractéristiques :

- la coupe reconstituée (à 135 MA comme à 65 MA) se superpose et s'ajuste en taille à la coupe actuelle.

- pour remonter le temps, Donia a recouru à l'ablation des parties océaniques médianes d'âge inférieur à 135 MA (première coupe) ou à 65 MA (deuxième coupe). Cependant au lieu de faire cette ablation par découpage de la partie médiane, Donia a seulement modifié les fourchettes d'âge correspondant à chacun des figurés. Ainsi la période 65 MA-23 MA (figuré à rayures) est devenue la période 190 MA-135 MA. Conservant en l'état la largeur de l'Atlantique, Donia est conduite à donner un âge plus ancien encore (de 190 à 250 MA ; ceci par rapport à ce que fournit la coupe initiale) à la bande océanique la plus externe.

- la zone de la dorsale est conservée, dans sa forme de surface et dans son figuré. L'âge qui limite cette zone est celui du moment de la reconstitution.

Donia doute de la validité du résultat de son travail individuel. C'est alors que nous la questionnons sur sa façon de procéder, sur le pourquoi de la conservation du figuré actuel (petits carrés) de la dorsale, de façon à déterminer les raisons de son insatisfaction. Ce qu'elle répond montre qu'elle met bien en fonctionnement les fonds océaniques à la manière d'un tapis roulant, qu'elle lie l'extension des fonds à leur âge et qu'elle mobilise **en même temps remontée et redescende du temps** : elle remonte le temps en enlevant les pans, elle le redescend en en ajoutant. Deux de ses interventions l'expriment bien :

4	<i>D. Oui, en fait, ce qui (ne) me plaît plus, c'est le plancher océanique ici il est toujours de la même longueur alors qu'en fait, on nous demande la coupe de l'Atlantique Nord il y a 135 milliards d'années donc normalement elle est plus petite (remontée dans le temps) vu que ici on a de nouvelles plaques qui se sont reformées donc le magma en fait il est remonté donc on a une, donc on a une, il s'est refroidi donc on a une plaque en plus donc le plancher océanique il s'est agrandi (redescende du temps).</i>
6	<i>D. Maintenant il s'est agrandi (descente du temps) et là on nous demande d'aller en arrière donc en arrière automatiquement il était plus petit. (remontée du temps).</i>

Il y a donc une contradiction entre le résultat de son travail, qui maintient la largeur de l'océan, et ce qu'elle dit, qui fait varier la taille de l'océan.

Nous avons vu précédemment que, dans la classe où est Donia, aucune réponse n'utilise, pour la zone de la dorsale, le figuré correspondant à l'intervalle de temps allant de 23 MA à l'époque actuelle (petits carrés). Pourtant Donia le reprend dans la première réponse qu'elle fournit, et il en est de même pour les figurés des autres zones. L'échange sur la conservation du figuré de la zone de la dorsale (les petits carrés) montre qu'elle **transforme la signification d'âge absolu en âge relatif** : le figuré ne signifie pas "plancher formé entre 23 et 0 MA" (datation absolue) mais "plancher le plus récent" (datation relative de cette zone du plancher par rapport aux zones périphériques).

10	<i>D. Déjà ce qui montre c'est déjà les petits carrés là. Les petits carrés ça représente un nouveau, un nouveau, un nouveau plancher on dirait.</i>
26	<i>P. Et pourquoi tu avais gardé les petits carrés au milieu ? Là parce que tu vois, tu avais quand même gardé, tu t'étais arrêtée à 135 et t'avais pas mis ça, t'avais pas mis ça. Pourquoi t'avais gardé ça ?</i>
27	<i>D. Parce qu'on sait que ben ici c'est l'axe de la dorsale. C'est le plancher au niveau de l'axe de la dorsale donc il est plus important puisqu'il est plus jeune donc ... faut bien le mettre en valeur.</i>

Nous pouvons penser qu'elle tient le même raisonnement pour les autres tronçons de fonds océaniques dont elle garde le figuré mais modifie l'âge absolu. En fait, Donia **superpose les époques**. Elle est sur de la stabilité structurelle (ses coupes le prouvent) dynamique (son discours le montre). Pour elle, toutes les époques se valent parce que le fond océanique fonctionne de la même manière, et elle le traduit par : tout change (les âges le prouvent) et rien ne change (la structure). Donia gomme le temps alors que dans l'espace océanique considéré, il joue sur l'importance de la surface océanique.

Ce que dit Donia montre l'importance que revêt pour elle la dorsale et peut nous aider à comprendre la diversité des figurés qu'ont adopté les élèves de cette classe pour cette zone. Les écarts à la réponse attendue (cas où il n'y a pas de figuré ou des figurés de l'époque suivant le moment de la reconstitution) s'expliquent peut-être par la primauté qu'a chez les élèves la dynamique des fonds océaniques et par la continuité de cette dynamique : **tout choix de figuré alors peut se justifier**. Ainsi, lorsque l'élève emploie les figurés correspondant à l'époque suivant celle que ponctue le moment de la reconstitution, c'est parce qu'il considère que le processus de dérive/accrétion se poursuit continuellement et qu'on va très vite entrer dans l'époque suivante. Dans ses propos, Donia nous dit bien la fugacité qu'elle attribue aux figurés. Écoutons-là :

28	<i>P. Et il y a 135 millions d'années ces petits carrés ils y étaient ?</i>
29	<i>D. Oui, ils étaient, oui, ils étaient en petits carrés puis ensuite petit à petit ils se sont ... peut-être, ils se sont peut-être décomposés. Ils étaient petits carrés, maintenant ils deviennent petits traits.</i>

Il en est de même des extrémités de l'océan que Donia, sur sa coupe 1, a étendu à des âges plus anciens. Voici ce qu'elle nous répond quand nous l'interrogeons à ce sujet :

22	<i>P. Et pourquoi, toi tu avais mis 250.</i>
23	<i>D. Euh, ben en fait, ... en fait, ... en fait je sais pas.</i>
24	<i>P. Tu sais pas.</i>
25	<i>D. Oui, je me suis dit, y-aurait peut-être une suite. Oui, je sais pas du tout.</i>

Donia est capable d'extrapoler au delà des limites océaniques : du côté continent, elle imagine des morceaux plus anciens ; du côté dorsale, elle peut faire apparaître des morceaux plus récents. Mais tout se passe comme si elle reconnaissait une stabilité structurelle de l'ensemble de l'océan.

En définitive, ce que fait ou dit Donia nous montre que, dans ce problème de reconstitution des fonds océaniques à différents moments, il peut y avoir plusieurs utilisations du temps :

- une utilisation où le temps n'a pas d'importance puisqu'il garde la structure et ne crée pas d'espaces nouveaux ;

- une utilisation où le temps a de l'importance parce qu'il crée de l'espace. Les fonds océaniques s'agrandissent au fur et à mesure que le temps passe.

Ce que montre également cet exemple, c'est que l'une ou l'autre de ces utilisations s'ancrent dans une connaissance comparable du fonctionnement des fonds océaniques (dérive/accrétion continues).

Terminons cette étude de cas par l'étude de la réponse finale de Donia aux questions 4 et 5. Après l'entretien, et sans que nous ayons donné des éléments de correction, nous avons remis à Donia deux nouvelles coupes. Elle nous a proposé des reconstitutions exactes, sans dorsale (catégorie 1), dont on trouvera la reproduction en annexe 5.

2.2.2. Le cas de Romain

Si nous avons enregistré Romain⁵⁰, c'est parce qu'il avait construit une reconstitution fautive de l'Atlantique il y a 135 MA (question 4) et il y a 65 MA (question 5) : Romain avait extrait ce qu'il fallait garder et conservé ce qui devait être évidé. Nous lui avons demandé de préciser sa façon de faire. Voici ce qu'il dit :

2	<i>R. En fait, j'ai découpé à 195 Ma, entre 195 Ma et 135. J'ai enlevé cette partie pour pouvoir coller après.</i>
3	<i>P. La question c'était ...</i>
4	<i>R. ...Reconstituer l'Atlantique il y a 135 Ma.</i>
5	<i>P. D'accord.</i>
6	<i>R. Et pour le deuxième, j'ai fait la même chose mais là j'ai coupé à 65 ... entre 65 Millions et 190 Ma.</i>

Il dit ensuite quelles données lui ont servi et de quelle manière : ce sont les âges du plancher océanique, qui délimitent des parties qui existaient ou n'existaient pas aux dates des reconstitutions.

9	<i>P. D'accord. Donc tu t'es référé toi ici ... Quel est l'indice que tu as pris ou quels sont les indices que tu as pris ?</i>
10	<i>R. Ben les indices de datation des différents plateaux océaniques basaltiques...</i>
11	<i>P. Oui et le chiffre le plus déterminant a semble-t-il été... alors attends... pour ici tu t'es surtout basé sur...</i>
12	<i>R. Ben sur 190 et 135.</i>
13	<i>P. Sur 190 et 135. Parce que il y a 135 Ma ...</i>
14	<i>R. La partie entre 135 et 190 n'existait pas...</i>
15	<i>P. A cette époque.</i>
16	<i>R. Oui.</i>

Poursuivant dans la logique de Romain (âge absolu, existence ou non de portions océaniques), nous lui avons demandé si une partie avec un âge précis (-23 Ma) existait à un autre moment précis (-135 Ma). Il s'agit d'une mise en relation de deux âges absolus avec en arrière plan, une convocation du fonctionnement des fonds océaniques. C'est alors que nous avons assisté à

⁵⁰ La transcription de l'entretien figure en annexe 4.

la bascule de Romain (premier extrait suivant) et à sa mise en mouvement des fonds océaniques (deuxième extrait suivant). Voici l'échange :

21	<i>P. ... Et tu penses qu'il y a 135 Ma, ce qui a 23 Ma était fait ?</i>
22	<i>R. Ben oui... Ah ben non! Ah, j'ai du me tromper là!</i>
26	<i>R. Ah non, en fait c'était cette partie là qui devait venir jusqu'ici! En fait il fallait enlever la partie qui va de 23 Millions à 135.</i>
27	<i>P. Et pas la partie, que la partie de 23 millions à 135.</i>
28	<i>R. En fait, ça allait... Ben, la partie 190-135, elle se trouvait au niveau de la dorsale.</i>

Il nous semble que Romain a fonctionné d'une manière différente de celle de Donia : il dit qu'il a privilégié l'âge absolu du fond océanique, a délimité des segments de ce fond s'excluant à une époque donnée (certains existent ; d'autres pas) et il a élagué. C'est peut-être parce que cette procédure ne prend pas en compte les rapports entre les segments et le fonctionnement de l'ensemble du fond océanique, qu'il s'est trompé. On remarque qu'il conjugue la reconnaissance de son erreur à la remédiation à apporter à sa réponse : il est nécessaire de rapprocher les tronçons océaniques âgés de l'axe de la dorsale (interventions 26 et 28).

2.2.3. Discussion

Nous venons de mettre en évidence deux modes de raisonnement différents conduisant à des difficultés :

- celui de Donia qui a privilégié l'**âge relatif** des parties du fond océanique. Cela la conduit à considérer les reconstitutions océaniques de chaque époque comme équivalentes structurellement. Pour tenir la contrainte de la largeur océanique constante, elle est obligée d'inventer des fonds plus anciens qui n'existent pas. En d'autres termes, elle se représente et fait fonctionner le tapis roulant mais au delà des caractéristiques de l'Atlantique : en effet, ce qu'elle fait "remonter" de fond océanique ancien (de 250 MA à 190 MA) ne serait acceptable que si les marges atlantiques étaient comprises comme des zones de subduction. Or ce n'est pas le cas. Donia se trompe **de possible géologique**.
- celui de Romain, qui est entré par l'**âge absolu** des fonds océaniques au détriment de la représentation du tapis roulant. L'erreur qu'il fait, à enlever ce qu'il faut laisser, est **une erreur de logique**. Dès lors que Romain se fait "le cinéma" du tapis roulant, il comprend son erreur.

En termes de validité des réponses construites, nous nous rendons compte que la réponse de Donia, qui s'appuie sur "l'histoire du tapis roulant" est plus puissante que celle de Romain. D'autre part, c'est l'entrée dans cette "histoire du tapis roulant" qui transforme la réponse de Romain. On peut donc dire que "la mise en histoire" est utile.

2.3. Conclusion

L'analyse des réponses écrites aux questions de la fiche s'intéressant à la construction/ dérive du fond océanique basaltique (Question 1 à Question 5) montre que globalement les élèves se sont appropriés le modèle du double tapis roulant. Elle met également en évidence le caractère masquant de cette appropriation. Il y a en effet, sous-jacents :

- des conceptions sur le volcanisme variées, dont la conception commune du volcanisme aérien ; cela a de l'importance dans la problématisation de l'histoire des fonds océaniques.

- de réelles difficultés des élèves à mobiliser comme telle la contrainte empirique des anomalies magnétiques. Il nous semble que l'élève a tendance à faire interférer l'histoire des anomalies magnétiques à celle des fonds océaniques.

- des contraintes empiriques comme celles de l'âge du basalte qui font sens pour les élèves, mais pas forcément de la même manière. Le double tapis roulant est une façon de mettre le temps en espace ; mais il est également le moyen de gommer le temps en servant la stabilité structurelle.

L'utilisation du temps, qui peut être différente d'un élève à l'autre, est forcément articulée avec ses connaissances géologiques (conceptions).

3. La compréhension par les élèves de la sédimentation océanique

Les questions 6 et 7 de la fiche sur "L'histoire des fonds océaniques" concernent la sédimentation océanique. Elles sont prises en charge par les élèves après la correction des questions 4 et 5. Leurs supports sont les 3 coupes du document 3 :

- le cadre 1 contient la reconstitution (coupe transversale) du fond océanique il y a 135 MA ;
- le cadre 2 présente la reconstitution (coupe transversale) du fond océanique il y a 65 MA ;
- le cadre 3 correspond à la coupe de l'Atlantique aujourd'hui.

La question 6 demande de placer les sédiments portés à chaque époque par ces fonds océaniques basaltiques, figurés en coupe transversale. La question 7 fait placer les sédiments "tels qu'on les voit de dessus", à notre époque.

Les figurés des sédiments, qui correspondent aux fourchettes de temps de leur dépôt, sont imposés. Nous les avons choisis différents des figurés qui datent le fond basaltique, afin d'éviter des confusions. Nous avons cependant conservé les mêmes fourchettes de temps que pour les fonds basaltiques de façon à bien voir comment dans une même durée, sont pris en considération les processus d'expansion et de sédimentation océaniques.

Rappelons que, pour le scientifique, les processus que sont la dérive/ accréation et la sédimentation sont indépendants, simultanés, et continus dans le temps et qu'ils n'ont pas les mêmes caractéristiques spatiales (voir le chapitre 5). En termes de représentation schématique, l'expansion (dérive/ accréation) se traduit par **une juxtaposition** de fonds basaltiques de plus en plus vieux dès lors que l'on s'éloigne de la dorsale, alors que la sédimentation s'exprime par **une superposition de biseaux sédimentaires de plus en plus étendus** : en effet de part et d'autre de la dorsale, il s'est déposé un ensemble de couches sédimentaires de plus en plus jeunes lorsque l'on s'éloigne verticalement du fond basaltique (et donc que l'on se rapproche de l'eau de l'océan) ; d'autre part toute couche sédimentaire située au-dessus d'une autre est forcément plus étendue que cette dernière puisque le fond océanique ne cesse de s'agrandir du côté de l'axe de la dorsale ; enfin toute zone du fond basaltique, si petite soit-elle, est considérée comme un peu plus ancienne que sa proche voisine située du côté de la dorsale ; elle s'est donc couverte d'un peu plus de sédiments. De proche en proche, cela conduit à construire des biseaux de couches sédimentaires dont la pointe se trouve du côté de la dorsale.

Notons que pour les fonds océaniques basaltiques étudiés, le choix d'intervalles de temps assez importants gomme la continuité du processus d'accréation. En revanche, les biseaux des couches sédimentaires rendent bien compte de la continuité de la sédimentation.

Nous faisons porter notre réflexion sur deux types de travaux d'élèves :

- les 22 productions écrites de 1998-99 et seulement les 16 productions écrites du groupe 2 de 1999-00. En effet, celles du groupe 1 de 1999-00 ne sont pas informatives dans la mesure où, prenant en compte la présentation et la confrontation des réponses à la question 6, les élèves se sont empressés de corriger leurs coupes défectueuses avant que nous les ramassions. Les précautions prises par le professeur avec le deuxième groupe de TP ont permis d'éviter cette perte de données. Cela fait en tout **38 (22 + 16) réponses d'élèves de Première S.**

- les transcriptions de la présentation et de la confrontation des réponses des élèves à la question 6 de la fiche. Ce sont les élèves du groupe 2 de la classe de première S 99/00 (annexe 6).

3.1. Etude des réponses écrites à la question 6

3.1.1. Mise en catégories des réponses des élèves

La mise en catégories des réponses des élèves repose sur l'analyse du savoir savant et sur la mise en correspondance des réponses des élèves et de la réponse attendue (une superposition de couches sédimentaires de plus en plus étendues). Plusieurs critères nous guident a priori :

- **la superposition** des couches sédimentaires d'âges différents ou leur **juxtaposition** sur le fond basaltique.

- lorsque la superposition existe :

* la superposition de **couches d'autant plus grandes qu'elles sont récentes** ou la superposition de **couches de même étendue quel que soit leur âge.**

* l'aspect **biseauté ou non** des couches sédimentaires du côté de l'axe de la dorsale.

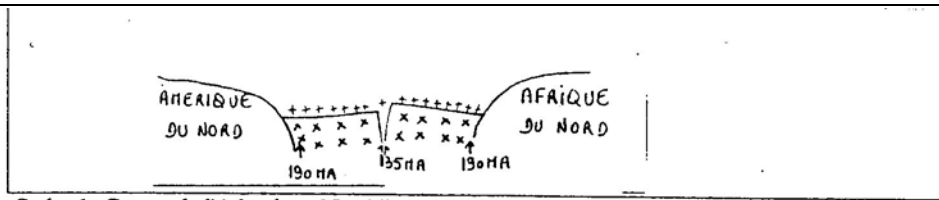
Ces critères servent la prise en considération de l'espace de la sédimentation (ubiquiste ou localisée), et sa continuité ou non dans le temps ; ils doivent permettre également d'évaluer le degré d'inféodation de l'histoire sédimentaire à l'histoire accrécionnelle.

Sur la base de ces critères, nous définissons les 4 catégories suivantes :

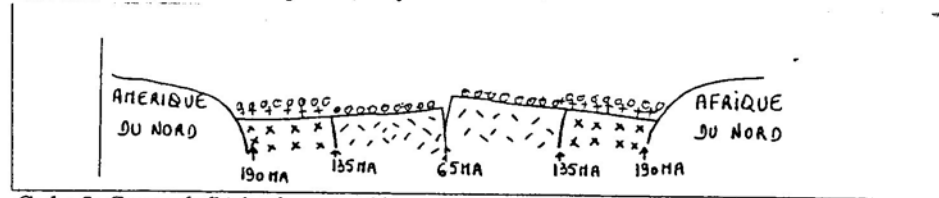
Catégorie 1 (SJb) :	elle regroupe les réponses montrant, pour chaque époque de reconstitution, une superposition de couches sédimentaires biseautées de plus en plus étendues.
Catégorie 2 (SJ) :	elle regroupe les réponses montrant, pour chaque époque de reconstitution, une superposition de couches sédimentaires de plus en plus étendues ; mais ces couches ne sont pas biseautées.
Catégorie 3 (SE) :	elle comprend les réponses avec, pour chaque époque de reconstitution, une superposition de couches sédimentaires de même extension.
Catégorie 4 (J) :	elle est constituée des réponses dans lesquelles il y a "juxtaposition" de couches sédimentaires".

Figure 7.9 :

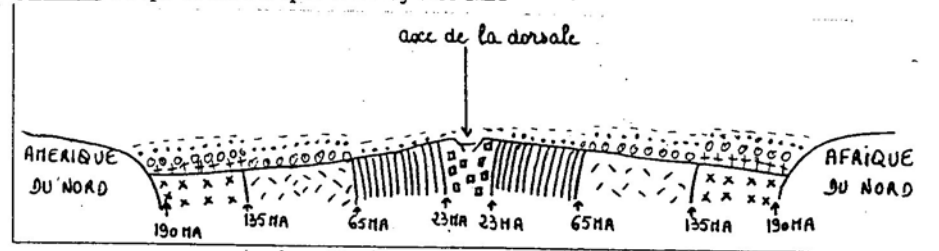
Les grandes catégories de réponses en matière de sédimentation océanique



Cadre 1: Coupe de l'Atlantique Nord il y a 135 MA



Cadre 2: Coupe de l'Atlantique Nord il y a 65 MA



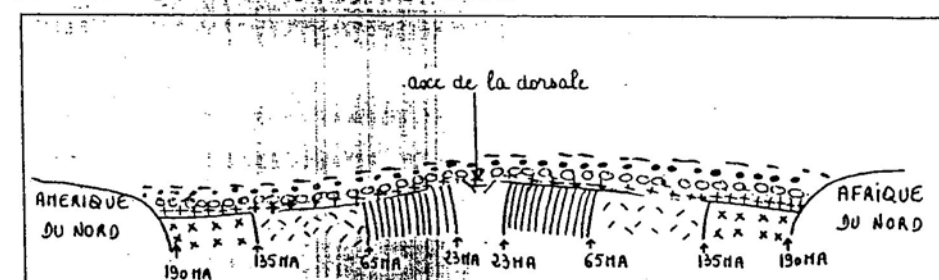
Catégorie 2: "Superposition de couches sédimentaires de plus en plus étendues mais sans biseaux" (SJ) Réponse de Tanguy



Cadre 1: Coupe de l'Atlantique Nord il y a 135 MA



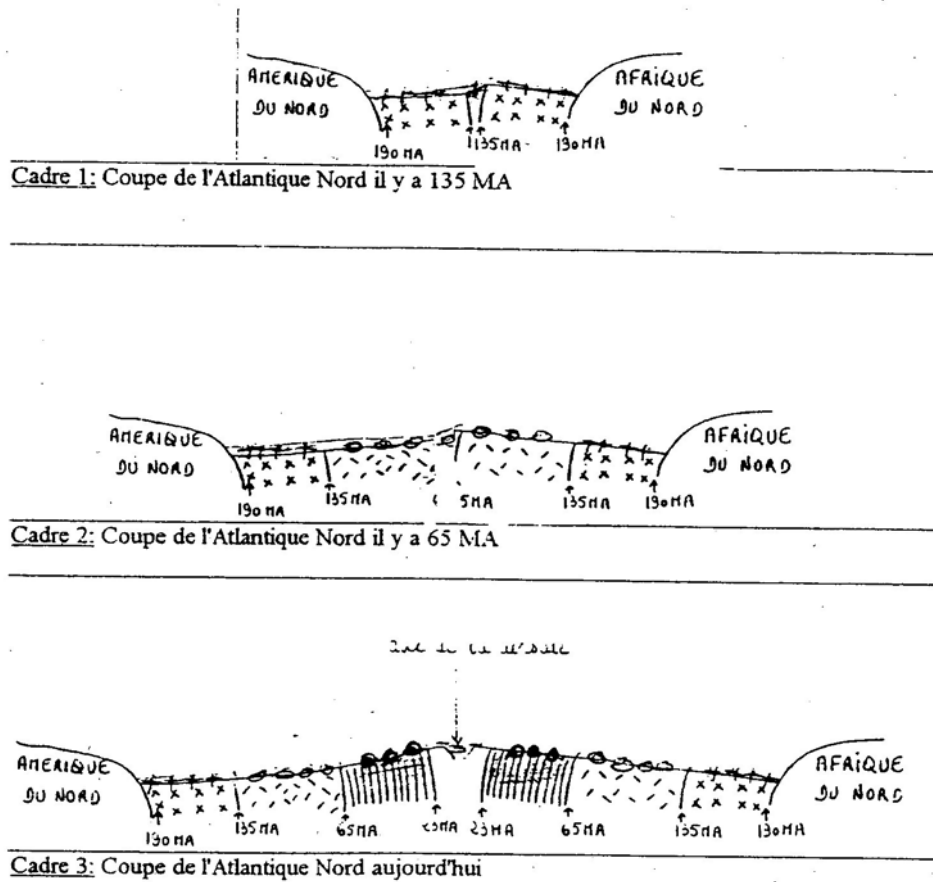
Cadre 2: Coupe de l'Atlantique Nord il y a 65 MA



Cadre 3: Coupe de l'Atlantique Nord aujourd'hui

Catégorie 3: "Superposition de couches sédimentaires de même extension" (SE) Réponse de Julien

Figure 7.10a
Sédimentation océanique : réponses prototypiques
Catégories 2 (SJ) et 3 (SE)



Catégorie 4: "Juxtaposition de sédiments d'époques différentes sur le fond océanique (J)
Réponse de Romain

Figure 7.10b
Sédimentation océanique : réponses prototypiques
Catégories 4 (J)

Catégorie 1 : "Superposition de couches sédimentaires biseautées de plus en plus étendues" (SJb)

Nous mettons dans cette catégorie les réponses qui présentent les 3 caractères suivants :

- une **Superposition (S)** de sédiments de plus en plus jeunes quand on s'élève à la verticale à partir du fond basaltique.
- une **Juxtaposition (J)** sur le fond basaltique de sédiments d'âges différents à savoir : des sédiments datés de 135 à 190 MA reposent sur le fond basaltique daté du même âge ; les sédiments datés 65 à 13MA reposent sur le fond basaltique du même âge, etc.. Cela fait qu'en parcourant le fond basaltique, dont l'âge augmente quand on s'éloigne de la dorsale, on rencontre une succession de sédiments reposant directement sur lui dont l'âge est également croissant.
- un aspect en **Biseau (b)** des couches sédimentaires du côté de l'axe de la dorsale.

Ces réponses prennent en compte l'ubiquité et la continuité de la sédimentation. Elles sont conformes au savoir scientifique actuel (voir la figure 5.1). Elles font fonctionner simultanément et continûment l'histoire accréionnelle et l'histoire sédimentaire.

Catégorie 2 : "Superposition de couches sédimentaires de plus en plus étendues mais sans biseaux" (SJ)

Nous rangeons dans cette catégorie les réponses ne présentant que les caractères de **Superposition (S)** des couches sédimentaires et de **Juxtaposition (J)** de formations sédimentaires d'âge différent sur le fond basaltique. Il n'y a pas de biseaux.

Les coupes de la figure 7.10a, pages précédentes, (réponse prototypique, Tanguy, 99/00) illustrent cette catégorie Juxtaposition/ Superposition telle que nous venons de la définir.

Cette catégorie comme la précédente prend en compte l'ubiquité de la sédimentation mais elle s'en distingue pour ce qui est de la continuité. En effet, placer une couche sédimentaire de même épaisseur sur une bande de fond océanique revient à imaginer une sédimentation discontinue. Mettons en texte le processus qu'expriment les coupes de cette catégorie : après qu'une bande basaltique s'est formée, elle reçoit **une couche uniforme de sédiments** (comme on mettrait une couche de peinture ; voir la première coupe) ; comme l'épaisseur de la couche est la même partout, nous sommes conduit à penser que le temps de la sédimentation a lieu après le temps de l'accrétion. Ensuite une autre bande basaltique s'ajoute, puis **une couche uniforme de sédiments** s'applique sur cette bande récente et sur la précédente, déjà surmontée de sédiments (comme on mettrait une couche uniformisante de peinture) etc. C'est donc une sédimentation discontinue qui se produit.

Notons cependant que, vu l'échelle des coupes, l'élève peut être confronté à des problèmes de représentation des biseaux. Cela pourrait également expliquer les réponses de cette catégorie.

Catégorie 3 : "Superposition de couches sédimentaires de même extension" (SE)

Les réponses de cette catégorie se caractérisent par :

- un même type de sédiments sur le fond basaltique ; il s'agit des sédiments les plus anciens (de 135 à 190 MA) qui recouvrent les fonds basaltiques de cet âge mais aussi les plus récents. C'est comme si ces sédiments les plus anciens s'étaient à chaque fois sur les fonds basaltiques nouvellement créés. Nous n'avons plus juxtaposition **sur le fond** de sédiments

d'âges différents mais **un même type de sédiments**, en l'occurrence ceux formés entre 190 et 135 millions d'années, qui par **étalement (E)** recouvrent la totalité de la surface.

- une **Superposition (S)** de sédiments de plus en plus jeunes quand on s'élève à la verticale à partir du fond basaltique, avec là encore la particularité que chaque couche sédimentaire s'étale sur tout l'espace océanique d'une époque.

Les coupes de la figure 7.10a, reprises d'une réponse prototypique (Julien G., 98/99), illustrent cette catégorie SE (Superposition Etalement) telle que nous venons de la définir.

Comme nous l'avons fait pour la catégorie précédente, mettons en texte le processus que représentent les coupes. Nous obtenons une succession de superposition et d'étalement :

1) formation d'une bande basaltique de fond océanique (de 135 à 190 MA)

2) recouvrement de cette bande par des sédiments

3) formation d'une nouvelle bande basaltique de fond océanique

4) recouvrement de cette nouvelle bande d'un dépôt identique à 2

5) recouvrement de l'ensemble du fond par de nouveaux sédiments ;

6) formation d'une nouvelle bande basaltique de fond océanique

4) recouvrement de cette nouvelle bande d'un dépôt identique à 2

recouvrement de cette nouvelle bande d'un dépôt identique à 5

Etc.

Une réponse (Elise) suggère "*l'éparpillement des sédiments*" au fond des océans. D'autres réponses (Sabrina, Aurélie P.) de cette catégorie présentent des dépôts en biseau, ce qui pourrait laisser penser que la continuité de l'expansion océanique a été prise en compte. Nous nous interrogeons sur leur signification.

Catégorie 4 : "Juxtaposition de sédiments d'époques différentes sur le fond océanique (J)

Cette catégorie regroupe les réponses dans lesquelles :

- il y a **juxtaposition** de sédiments d'âges différents sur le fond basaltique. La zone basaltique datée de 135 à 190 MA porte des sédiments de cet âge ; la zone basaltique datée de 65 à 135 MA porte des sédiments de cet âge etc.

- il n'y a pas de sédiments d'âges différents superposés. Sur quelque verticale où l'on se place, on ne trouve, en âge, qu'un seul type de sédiments.

Les coupes de la figure 7.10b, reprises d'une réponse prototypique (Romain, 98/99) illustrent cette catégorie J (Juxtaposition) telle que nous venons de la définir.

Dans ce type de réponse, tout se passe comme si la formation de la couverture sédimentaire se faisait juste après la formation du plancher océanique (une sorte de couverture sédimentaire "livrée avec").

3.1.2. Répartition des réponses des élèves dans les différentes catégories

Le tableau suivant rassemble les résultats de la mise en catégories de l'ensemble des réponses des élèves à la question 6 de la fiche de travail sur l'histoire des fonds océaniques :

	cat.1 : SJB	cat.2 : SJ	cat.3 : SE	cat.4 : J	Autres	TOTAL
1998-99 (22)	0	9	3	9	1*	22
1999-00 (16)	0	4	0	12	0	16
TOTAL (38)	0	13	3	21	1	38

* : En 1998-99 : une réponse énigmatique (Sylvain)

Figure 7.11 : Mise en catégories des réponses des élèves (questions 6)

Deux sortes de réponses nous ont posé un problème de mise en catégorie :

Les réponses mobilisant des "calculs"

En 1999-00, plusieurs élèves (3 sur 16) ont proposé une disposition des sédiments du type juxtaposition avec plusieurs particularités :

- il n'y a pas ajustement, mais décalage, de la calotte de sédiments au fond océanique sous-jacent, sauf pour la coupe 3 (époque actuelle). Comme nous avons fait des tranches d'âges similaires pour les sédiments et pour les fonds basaltiques, ce décalage nous a surpris.
- la région de la dorsale porte toujours le même type de symbole, à savoir celui de sédiments ayant entre 0 et 23 millions d'années.

L'explication que nous donnons à ce type de réponses met en jeu une compréhension particulière des symboles et des "calculs" qu'ont effectués les élèves pour chaque époque (135 et 65 millions d'années). Ceux-ci ont en effet compris les symboles comme donnant l'âge des sédiments à chaque époque. Ce qui fait que le "récent" (0 à 23 millions d'années) représente le "aujourd'hui" **de chaque époque**. Ils l'expriment d'ailleurs dans leur justification. Citons deux de ces élèves :

1) Aurélie Q. : *"Sur le doc cadre 3- Les sédiments sont placés du plus récent au plus vieux à partir d'aujourd'hui.*

Sur les cadre 1 et 2, l'année il y a -65 MA st considérée comme "aujourd'hui" les sédiments qui se déposent près de la dorsale sont donc récents".

2) Simon : *"La coupe 1 représente les sédiments formés entre 190 MA et 135 MA c'est à dire durant $190 - 135 = 55$ MA. On représente donc sur le schéma des sédiments formées entre 0 et 23 MA et (ratures non lisibles) entre 23 MA et 65 MA. La coupe 2 représente les sédiments formés durant $190 - 65 = 125$ MA. On présente donc 3 sortes de sédiments. La coupe 3 représente les sédiments formés durant 190 MA."*

En nous référant à leurs schémas, nous en concluons que, malgré les complications introduites par les calculs, ces réponses appartiennent à la catégorie 4 (Juxtaposition de sédiments d'époques différentes sur le fond océanique (J)).

Les réponses avec quelques biseaux (99/00, Kévin, Julie)

Ces réponses se caractérisent par la présence de quelques biseaux de sédimentation du côté de l'axe de la dorsale. Comme ils n'existent pas systématiquement, nous mettons en doute leur construction raisonnée et rangeons ces productions dans la catégorie 2 : Superposition de couches sédimentaires de plus en plus étendues (SJ).

3.1.3. L'utilisation du temps et de l'espace dans les réponses des élèves

Deux grands modèles de répartition des sédiments

Le tableau récapitulatif ci-dessus (tableau 7.11) montre tout d'abord, qu'en matière de sédimentation, aucune réponse d'élève ne peut être mise dans la catégorie 1. Or ce qui distingue la catégorie 1 de la catégorie 2, c'est l'aspect biseauté des couches de sédiments du côté de l'axe de la dorsale. Faut-il vraiment y voir une difficulté de représentation ?

Le tableau montre aussi que les réponses des élèves se répartissent essentiellement dans les catégories 2 et 4 :

- La catégorie 2 est celle où il y a "**Superposition de couches sédimentaires de plus en plus étendues (SJ)**"

Un tiers des réponses (12 réponses sur 37) se rangent dans cette catégorie.

- La catégorie 4 est du type "**Juxtaposition de sédiments d'époques différentes sur le fond océanique. (J)**"

Presque deux tiers des réponses (21 réponses sur 37) s'inscrivent dans cette catégorie.

Essayons d'approfondir la comparaison entre ces deux types de réponses.

Deux types d'histoires séquentielles des fonds océaniques

Reprenons la mise en texte des processus (dérive/accrétion, sédimentation) mis en jeu dans les catégories 2 et 4. Nous sommes devant deux histoires constituées des épisodes suivants :

Histoire SJ	Histoire J
1) Formation d'une bande de plancher basaltique	1) Formation d'une bande de plancher océanique
2) Dépôt d'une couche uniforme de sédiments sur ce plancher nouvellement formé	2) Dépôt d'une couche uniforme de sédiments sur ce plancher nouvellement formé
3) Formation d'une nouvelle bande de plancher océanique	3) Formation d'une nouvelle bande de plancher océanique
4) Dépôt d'une couche uniforme de sédiments sur le plancher océanique nouvellement formé et sur le plancher océanique plus ancien	4) Dépôt d'une couche uniforme de sédiments sur ce seul plancher nouvellement formé.
5) Formation d'une nouvelle bande de plancher océanique	5) Formation d'une nouvelle bande de plancher océanique
6) ...	6) ...

Figure 7.12 : Deux types d'histoire séquentielle des fonds océaniques

- Dans les histoires SJ et J, il y a transformation de deux phénomènes simultanés en une succession de séquences dans lesquelles les deux processus se produisent alternativement, ce qui peut permettre de les inscrire dans des cycles : les élèves séquentialisent et mettent en cycle les deux phénomènes et pour eux **deux processus continus et simultanés deviennent deux processus alternatifs et saccadés**.

- Mais si l'accrétion est comprise de la même manière (par formation rythmique de nouvelles bandes au niveau de la dorsale), la sédimentation qui se fait **partout** dans l'histoire SJ, prend un statut **local** dans l'histoire J. La représentation des couches sédimentaires ne souffre là d'aucune ambiguïté. C'est donc en termes d'espace que l'histoire J se démarque de l'histoire JS : dans l'histoire J, la sédimentation **se calque sur l'accrétion/dérive**. Les calculs engagés par certains élèves appuient cela : ils montrent que les élèves envisagent la disposition des sédiments sur un axe horizontal dont l'origine est l'axe de la dorsale ; cet axe représente l'actuel de chaque époque. Le processus de sédimentation perd toute sa spécificité spatiale pour se conformer aux règles de la dérive/ accrétion.

- Nous pouvons nous interroger sur le lien qui unit dans chaque cycle l'accrétion/dérive et la sédimentation, dans ce contexte d'induction d'orientation de la sédimentation par l'accrétion/dérive. Est une succession simple ("post hoc") ou de la causalité simple ("propter hoc") ?

3.2. Etude des réponses à la question 7

La question 7 demande aux élèves de placer les sédiments tels qu'on les voit de dessus, sur la carte de l'Atlantique Nord. Les figurés sédimentaires disponibles sont ceux de la question 6. Rappelons qu'ils désignent les sédiments d'une fourchette d'âge. Compte tenu du fait que la sédimentation se produit sur toute la surface océanique disponible, un seul type de figuré est à représenter, celui correspondant aux sédiments déposés de 23 MA à nos jours. Ces sédiments recouvrent et empêchent de voir les sédiments déposés auparavant.

Les réponses des élèves se classent en deux grandes catégories :

- les réponses où le fond océanique vu de dessus ne montre que les sédiments récents, superposés à de plus anciens (figure 7.13a). Nous disons que leur logique repose sur la **superposition des sédiments**. A titre d'exemple, voici la justification de Julien R. (99/00) :

" Si on regarde juste au dessus de la roche basaltique on verra des sédiments d'age différents doc3/A mais si on regarde juste à la surface des sédiments on trouvera des sédiments très récents".

- les réponses où le fond océanique vu de dessus montre une **juxtaposition de bandes de sédiments** d'âges différents (figure 7.13b). Les justifications lient l'âge des sédiments à leur distance à l'axe de la dorsale. Voici l'exemple de la réponse de Maria : *"Plus l'on s'éloigne de l'axe de la dorsale et plus les sédiments sont anciens".*

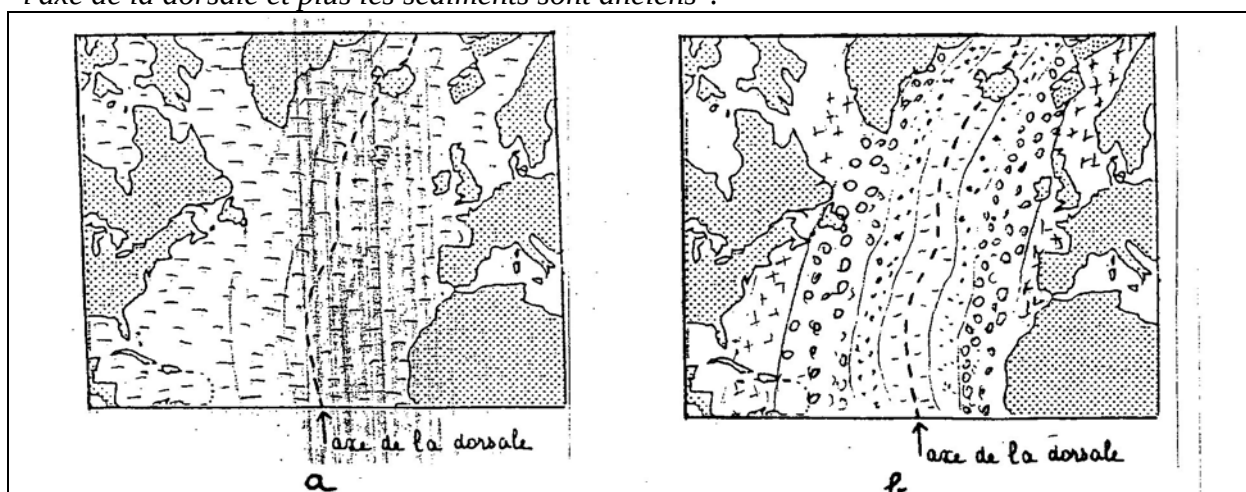


Figure 7.13 :
Sédimentation océanique (de dessus) : deux types de réponse

Le tableau suivant rend compte de la mise en catégories des réponses.

	superposition des sédiments	juxtaposition de bandes de sédiments	autre
Classe 98/99	15	7	0
Classe 99/00 (groupe 2)	4	11	1
TOTAL (sur 38)	19	18	1

Figure 7.14 : Mise en catégories des réponses des élèves (question 7)

Dans le groupe 2 de la classe 99/00, trois réponses ne s'inscrivent pas d'emblée dans les deux catégories que nous avons définies :

- deux réponses (Tanguy et Cyril) se caractérisent par une superposition de figurés, d'autant plus nombreux que l'on s'éloigne de l'axe de la dorsale. A l'axe, seul subsiste le figuré des sédiments récents. Près des côtes américaines, européennes et africaines, les 4 figurés sont mis. Ces deux réponses ne donnent pas de justification écrite à cette représentation. Nous nous sommes donc reportée aux réponses de la question 6 pour comprendre sa signification. Elles témoignent d'une bonne compréhension de la sédimentation océanique. Voici ce qu'écrit Tanguy :

"Les couches de sédiments sont plus importantes pour les bandes basaltiques les plus vieilles. En effet, la bande basaltique entre 135 et 190 millions a reçu 4 couche de sédiments différents. Au contraire, la bande entre 0 et 23 millions d'années n'a qu'une seule couche de sédiments".

C'est un texte de même nature que nous fournit Cyril :

"Il y a 190 MA, il y a les premiers sédiments mais aussi tous les autres car c'est le plus vieux basalte. Plus les basaltes sont récents, moins il y aura de sédiments.*

** car les sédiments ne se déposent pas qu'à un seul endroit".*

Nous pensons donc que, grâce à la réponse à la question 6, ces élèves peuvent être mis dans la première catégorie (Superposition des sédiments). Dans leur réponse à la question 7, ils placent les derniers sédiments déposés mais également, comme par transparence, tous ceux qui se sont accumulés auparavant. Nous relevons d'ailleurs un questionnement des élèves en rapport avec la représentation sur la carte. Voici l'annotation portée par Tanguy sous sa carte (question 7) : *"Le document est trop petit pour représenter 4 figurés (comme à certains endroits)".*

- une réponse, celle de Sarah, pose problème. Elle est construite sur le mode "juxtaposition" de bandes de sédiments. Mais, au lieu de s'en tenir aux quatre grandes bandes de sédiments allant d'il y a 190 MA à nos jours, elle les répète (on a ainsi, au total, 9 bandes de chaque côté de la dorsale). De plus, elle place des bandes d'âge récent sur les parties les plus anciennes de l'océan. Aucune justification écrite n'accompagne la carte ce qui rend difficile son interprétation. En revanche, la justification de la question 6 montre une bonne compréhension de la sédimentation océanique : *" Je pense que les sédiments devaient se présenter ainsi car par exemple les sédiments qui se sont formés entre 0 et 23 MA c'est à dire en derniers ont été déposés sur tout le plancher océanique basaltique. Par contre les sédiments qui se sont formés entre 135 et 190 MA c'est à dire en premier ont été déposés juste sur la première bande du plancher océanique basaltique".* Nous pensons qu'il y a eu un réel problème de représentation des sédiments sur la carte. Compte tenu du décalage de la question 7 par rapport à la question 6, nous n'avons pas mis cette réponse dans la catégorie 2 (juxtaposition des sédiments), ni même dans la catégorie 1.

Nous nous sommes intéressée à la cohérence qui peut exister entre la réponse des élèves à la question 6 et celle qu'ils proposent à la question 7. Sont-elles sur le même mode sédimentaire ? Voici les résultats que nous obtenons en croisant ces deux types de réponses :

Classe 1998/99

Catégorie Q6 Catégorie Q7	cat.1 : SJB	cat.2 : SJ	cat.3 : SE	cat.4 : J	Autre	TOTAL
superposition des sédiments	0	9	3	3	0	15
juxtaposition des sédiments	0	0	0	6	1	7
autre	0	0	0	0	0	0

Classe 1999/00

Catégorie Q6 Catégorie Q7	cat.1 : SJB	cat.2 : SJ	cat.3 : SE	cat.4 : J	Autre	TOTAL
superposition des sédiments	0	3	0	1	0	4
juxtaposition des sédiments	0	0	0	11	0	11
autre	0	1	0	0	0	1

Figure 7.15 : Croisement des réponses aux questions 6 et 7

Pour la question 6, nous avons regroupé les catégories (SJ) et (SE), en négligeant la catégorie (autre) et rassemblé les résultats des deux classes. Les résultats prennent la forme suivante :

Q7	Q6	Superposition	Juxtaposition	
Superposition	15	4	19	
Juxtaposition	0	17	17	
	15	21	36	

Figure 7.16 : Croisement des réponses aux questions 6 et 7

Nous remarquons que seuls 4 élèves (sur 36) ne semblent pas cohérents dans leur réponse. Pour les autres élèves, il est net qu'il y a une grande cohérence entre leurs réponses aux questions 6 et 7, de même qu'il y a une grande cohérence dans les catégories retenues.

En définitive, il est possible de distinguer **deux catégories fondamentales de la pensée des élèves** quant à l'articulation dans le temps et dans l'espace des processus de dérive/ accrétion et de sédimentation océaniques. L'articulation de ces processus que fait une moitié des élèves pose problème.

3.3. Analyse des transcriptions de la présentation et de la confrontation des réponses des élèves à la question 6 de la fiche

En 1999-00, le travail sur fiche a été complété d'une confrontation des modèles, sans que des éléments de correction aux questions 6 et 7 aient été préalablement donnés. Cela s'est fait par demi-classe, dans l'espace des travaux pratiques. Le professeur a demandé à un élève auteur du modèle J puis à un élève auteur du modèle SJ de présenter leur travail à la classe. Ensuite, il a demandé à quelques élèves de se positionner par rapport aux deux grands modèles présentés. L'étude de cette confrontation présente un intérêt didactique car elle permet de

mieux comprendre la façon de raisonner et les difficultés des élèves qui envisagent la juxtaposition des sédiments.

Nous avons enregistré (enregistrement audio) et transcrit ce qui s'est dit dans la classe (voir annexe 6, demi-classe 1 et demi-classe 2). Pour poursuivre notre étude sur l'appropriation par les élèves des phénomènes de dérive/ accrétion et de sédimentation, nous allons nous appuyer sur la transcription de cette activité avec la demi-classe 2 de Première S 99/00. Les raisons de ce choix se trouvent dans le fait que nous disposons des productions écrites initiales des élèves (voir plus haut), que chaque modèle est soutenu par plusieurs élèves (alors que dans la demi-classe 1, une élève seulement est sur le modèle SJ, les autres étant sur le modèle J)⁵¹, enfin parce que la confrontation dans la demi-classe 2 est plus riche en arguments que celle de la demi-classe 1, ce qui est plus intéressant pour l'étude de la problématisation.

Milad a d'abord présenté son modèle (modèle J), puis ce fut le tour de Julien P. (modèle SJ). Le professeur a ensuite demandé à Richard (modèle J dans sa réponse écrite à la question 6) de se positionner vis à vis des deux modèles présentés. D'autres élèves, comme Maria, ont ensuite pris librement la parole⁵².

3.3.1. L'intervention de Milad (modèle J)

Sur ses coupes, Milad a réalisé une superposition exacte de sédiments d'une tranche d'âge au basalte de la même tranche d'âge. Ainsi, le fond basaltique pris dans son ensemble supporte-t-il des tranches de sédiments juxtaposées, se distinguant les unes des autres par leur âge. Voici la justification écrite qu'il donne pour la question 6 :

"Les sédiments qui se sont déposés sur le plancher basaltique se déplace avec le plancher. Quand il y a un nouveau plancher qui se forme les planchers se déplacent et les sédiments aussi. Chaque plancher correspond à une zone d'anomalie +/- donc quand les planchers océaniques bougent les sédiments sont en mouvement également".

La réponse de Milad entre bien dans la catégorie 4 (Juxtaposition, figure 7.10b). Il en est de même de sa réponse à la question 7. La carte est assortie du texte suivant : *"Les planchers sont rangés parallèlement à l'axe de dorsale"*.

Ce qui ressort d'emblée et nettement de la présentation orale de Milad est l'association étroite entre les sédiments et les morceaux de plaques qui les portent : les premiers sont plaqués sur les seconds et entraînés par eux. Voici ce qu'il dit :

2	<i>Bon ben les sédiments qui sont posés sur les, sur les plaques ils se déplacent en même temps que les, ben les plaques quoi. Quand il y a une nouveau plaque, le nouveau plaque il pousse les vieilles et en même temps les sédiments qui sont dessus ils se déplacent avec.</i>

Nous nous interrogeons sur cette relation sédiments/plaque : les sédiments sont-ils congénitaux du plancher ou sont-ils déposés alors que le plancher est encore jeune ?

Sur l'insistance du professeur à savoir les raisons d'un tel placement des sédiments, Milad exprime d'abord le respect scrupuleux de la consigne :

⁵¹ On trouvera cependant en annexe 6 la transcription de la présentation et de la confrontation des modèles de la demi-classe 1.

⁵² On trouvera en annexe 7 les réponses écrites de ces 4 élèves.

6	<i>M. Pourquoi je les ai placés là ?</i>
8	<i>M. Parce qu'ils sont sur cette plaque et dans l'énoncé ils nous disent que les sédiments déposés entre 150, euh 135 et 190 milliards d'années, ça correspond à cette plaque-là.</i>

Ses dires ne cessent ensuite de confirmer la liaison des sédiments au basalte, dans l'âge comme dans l'éloignement à l'axe de la dorsale.

16	<i>Ben les, les sédiments qui sont sur les, les nouveaux planchers, ils sont, ils se trouvent plus près de la dorsale océanique, de l'axe de la dorsale, ben, au fur et à mesure, ben, plus on s'éloigne de l'axe, plus les sédiments correspondent au plancher qui sont plus vieux, qui sont plus écartés.</i>

Pour Milad, l'histoire de la sédimentation se confond donc avec celle de la dérive/accrétion. C'est plus tard dans la confrontation qu'il précise la nature de cette liaison : la sédimentation a à voir avec le magmatisme. Écoutons Milad :

151	<i>M. Mais, mais les sédiments, c'est c'est la déposition des des déchets organiques ou c'est autre chose ? On est sûr que c'est ça ?</i>
152	<i>P. Alors ?</i>
153	<i>M. C'est ça les sédiments ?</i>
154	<i>P. Parce que...</i>
155	<i>M. Je crois que les sédiments c'est, c'est ... comme ils ont dit dans la, dans la première phrase de XXX "On rappelle que le fond des océans est fait de basalte surmonté de sédiments".</i>
156	<i>P. Oui.</i>
157	<i>M. Mais surmonté de sédiments, ça c'est ... Moi je crois que ça vient du magma qui est, qui est refroidi.</i>

Milad trouve l'origine des matériaux sédimentaires dans le magma. Il n'est donc pas étonnant que sa réponse soit juxtapositionniste.

3.3.2. L'intervention de Julien P. (modèle SJ)

Julien P. intervient juste après Milad. Comme Milad, il met en jeu les sédiments et les plaques qui les portent mais introduit la couverture incessante des vieux dépôts par des nouveaux.

24	<i>J. Ben, j'ai représenté les sédiments les plus anciens ils restent sur, sur les plaques les plus anciennes. Ils se sont formés là et puis ça s'est déplacé, les sédiments ils sont restés dessus. <u>Ils se sont faits recouvrir par les autres sédiments</u>⁵³ qui sont sortis par la suite. Ces sédiments ils se sont étalés sur, dessus les anciens et ça les a recouverts et ainsi de suite. Comme ça on voit que à la surface ici on voit que les sédiments les plus récents.</i>

Le propos de Julien contient une part d'ambiguïté sur la sédimentation :

- Il parle de sédiments qui "sont sortis" ? Est-ce à dire qu'il réfère le processus sédimentaire à l'axe de la dorsale ?

⁵³ Souligné par nous.

- Il précise que "ces sédiments ils se sont étalés ... dessus les anciens". Quelle signification accorde-t-il à "étalement" ?

Pour tenter de lever ces ambiguïtés, le professeur a questionné Julien sur le processus sédimentaire. Voici ses réponses :

42	<i>J. Ben c'est les plantes qui sont mortes... C'est les animaux qui sont morts tout ça ...</i>
43	<i>P. Que des animaux... Que des animaux et des plantes qui sont mortes ?</i>
44	<i>J. Oui, ou des, ou des, ou du sable ou des petits trucs qui se sont déposés.</i>
45	<i>P. Et il était où ce sable avant de se déposer ? Et, ils étaient où ces petits animaux et ces petits végétaux avant de se déposer ?</i>
46	<i>J. Ben, ils étaient dans l'eau! Quand ils sont morts, ils sont tombés par terre.</i>

Nous pensons pouvoir dire que Julien maîtrise les différents aspects de la sédimentation : nature des dépôts (restes d'êtres vivants marins ou particules minérales), ubiquité et verticalité du processus, répétition et superposition des dépôts. De même, il nous semble que Julien sait articuler ce phénomène à la dérive/accrétion.

3.3.3. L'intervention de Richard (modèle J)

Ce qui nous a surpris, c'est que, malgré la mise au point de Julien sur la sédimentation, qui reprenait ce qui avait été dit collectivement avant le travail sur la fiche, certains élèves sont restés sur une position largement calquée sur le processus de dérive/ accrétion. Ce fut le cas de Richard, sollicité juste après l'intervention de Julien.

Richard a fourni une réponse écrite appartenant à la catégorie Juxtaposition. Et il maintient cette position, alors qu'il admet une sédimentation comme celle qu'a décrite Julien. Les propos suivants montre qu'il place résolument la sédimentation dans les repères spatiaux et temporels de l'accrétion/ dérive.

102	<i>P. D'accord, bon. Euh... Dans quelques millions d'années, ces petits... ces sédiments qui ont la forme de petits, de petits tirets, ils seront où ?</i>
103	<i>R. Et ben, ils vont s'écarter de la dorsale.</i>
104	<i>P. Ils vont s'écarter et alors au niveau de la dorsale, qu'est-ce qu'il va se passer ?</i>
105	<i>R. Ben, il y aura de nouveaux, de nouveaux sédiments et de nouveaux basaltes.</i>
106	<i>P. D'accord. Y-aura de nouveaux sédiments et il y aura du nouveau basalte. Mais alors, si je comprends bien, ... si je comprends bien, avec ce que tu dis, ... hein, au niveau de la dorsale, ... et seulement là, actuellement, des petits déchets organiques, des petites particules sableuses se déposent ?</i>
107	<i>R. Oui.</i>

Pourquoi cet ancrage fort de la sédimentation dans l'accrétion/dérive ? Peut-être trouvons-nous des éléments de réponse dans ce que Richard dit un peu plus tard :

115	<i>R. Moi je pensais qu'en fait que les sédiments y-en avais que sur le basalte le plus jeune.</i>

Richard sait que l'origine des matériaux des sédiments se trouve dans l'eau des océans. Cela ne l'empêche pas de calquer la sédimentation aux particularités de l'accrétion/dérive. Il y a donc un risque, lorsque deux phénomènes s'articulent, à calquer l'un sur l'autre.

3.3.4. L'intervention de Maria (modèle J)

Après l'intervention de Richard, Maria souhaite se positionner : elle a fourni une réponse écrite entrant dans la catégorie J et choisit le modèle de Julien. Ce qu'elle dit témoigne d'une bascule raisonnée dans le modèle SJ :

126	<i>Ma. Ben en fait <u>je pense que c'est plutôt le schéma numéro 2</u></i> ⁵⁴ <i>(il s'agit du schéma de Julien). Parce que ben, les sédiments les plus anciens restent en dessous. Mais chaque année, à tous les coups que les plaques s'écartent les nouveaux sédiments qui tombent ils retombent au-dessus puis une fois que ça s'écarte les nouveaux sédiments ils retombent encore par dessus et comme ça s'écarte on a les, <u>on a seulement les derniers sédiments qui sont tombés à la surface</u>, ce qui fait que vu de dessus, on voit seulement les nouveaux sédiments.</i>

L'extrait suivant le confirme, quand elle met en jeu le principe de superposition :

144	<i>Ma. Sur le schéma 2, c'est beaucoup plus logique parce que quand on veut retrouver de vieux sédiments, on est obligé de traverser tous, tous les sédiments qui sont par dessus. On se rend compte que les vieux sédiments, ils sont seulement en dessous et plus on avance, et plus on se rend compte que les sédiments sont récents.</i>

4. Conclusion

L'analyse de situations de classe demandant de reconstituer le passé d'un océan permet de dégager plusieurs points qui éclairent l'utilisation du temps des élèves :

- Dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, la reconstitution de l'histoire des fonds océaniques ne pose pas de véritable problème aux lycéens : le fonctionnement en "double tapis roulant" est globalement maîtrisé tout comme son extrapolation au passé (actualisme d'extrapolation) ; la transformation du temps en espace qui s'y passe est d'une appropriation aisée pour l'élève. Mais nous notons que cela peut conduire l'élève à "gommer" le temps, lorsqu'il envisage une stabilité structurelle de tout l'océan.

Cette apparente aisance n'est pas sans masquer des points de décalage avec le savoir actuel, et des problématisations différentes. Cela se traduit, chez certains élèves, par :

- **la mise en jeu de conceptions "erronées"**, en rapport avec le volcanisme aérien. Cette conception situe les phénomènes magmatiques de la dorsale non seulement sur l'épaisseur existante de la plaque mais aussi au dessus d'elle (nous avons parlé d'accrétion "verticale"). Le temps joue selon plusieurs directions de l'espace (verticale et horizontale) mais aussi en plusieurs endroits de l'espace, et davantage au-dessus de la plaque que dans l'épaisseur de la plaque. Ce n'est pas sans conséquence sur la problématisation de l'histoire de l'océan. Il en est de même de certaines conceptions de la sédimentation (exemple : la conception dans laquelle la dorsale forme les sédiments)⁵⁵.

⁵⁴ Souligné par nous.

⁵⁵ Les figures 7.17 et 7.18 tentent de rendre compte de deux problématisations différentes d'élèves de 1^{ère} S.

- **La difficulté à utiliser certaines contraintes empiriques** comme les anomalies magnétiques. Cette contrainte est "mise en histoire" par certains élèves, ce qui peut les conduire à une problématisation décalée de l'histoire des fonds océaniques. Cette difficulté est récurrente, nous semble-t-il : des approfondissements sont à envisager.

- **La difficulté à articuler deux histoires simultanées.** Dans notre exemple, elle s'exprime dans l'articulation d'une part de la dérive/ accréation et d'autre part de la sédimentation. Nous constatons, chez un nombre non négligeable d'élèves qu'une histoire prend de l'importance sur l'autre et la guide temporellement et spatialement : ainsi la sédimentation, quand elle est comprise comme une juxtaposition de sédiments d'époques différentes, se calque-t-elle sur les règles de l'accréation/ dérive ; le fonctionnement (et le mouvement) du fond basaltique conditionne(nt) et situe(nt) la sédimentation. Un autre exemple réside dans la prise d'importance de l'histoire des anomalies magnétiques au détriment de celle de l'accréation/ dérive.

- **la difficulté à penser et à représenter la continuité des processus :** le "en même temps" de la dérive/ accréation et de la sédimentation devient "et puis". Remarquons cependant que, dans les situations étudiées, l'absence de traduction en biseaux de la sédimentation dans les productions des élèves est vraisemblablement à mettre en rapport avec la petitesse des supports. Mais aucune justification écrite ou orale ne fait référence explicitement à cette continuité.

Figure 7.17
Le passé d'un océan
Espace de contraintes de Milad (première S)

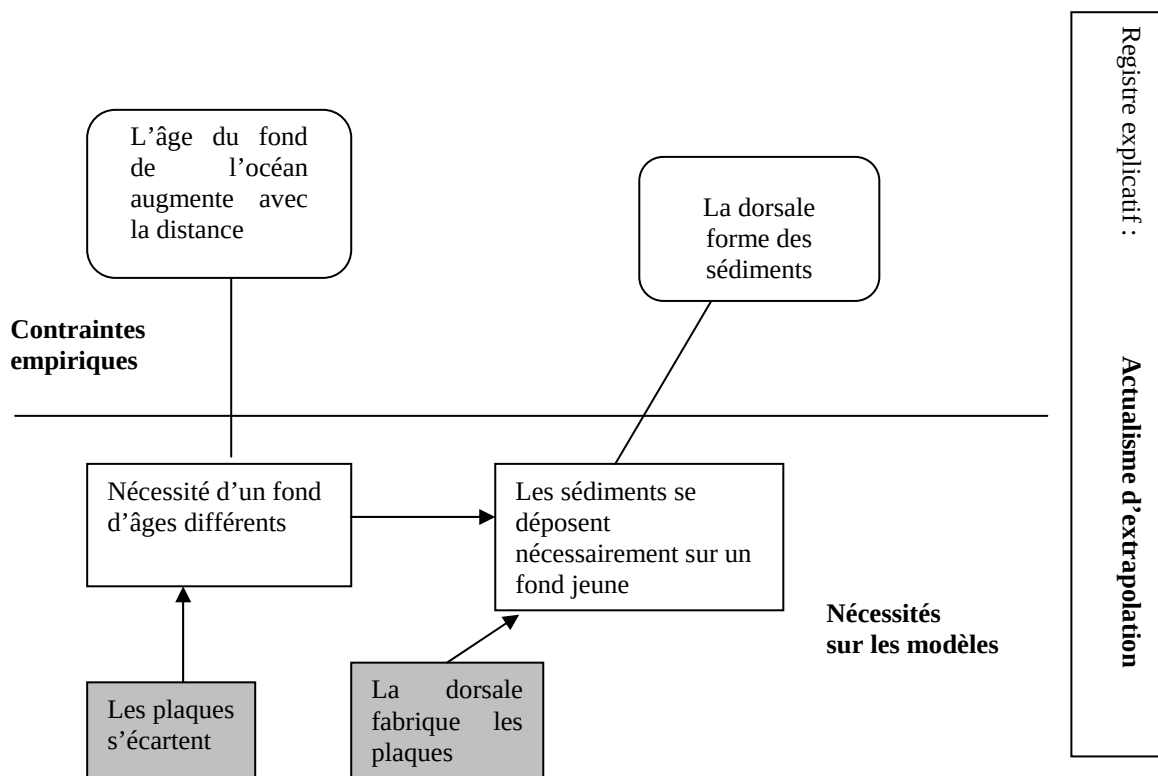
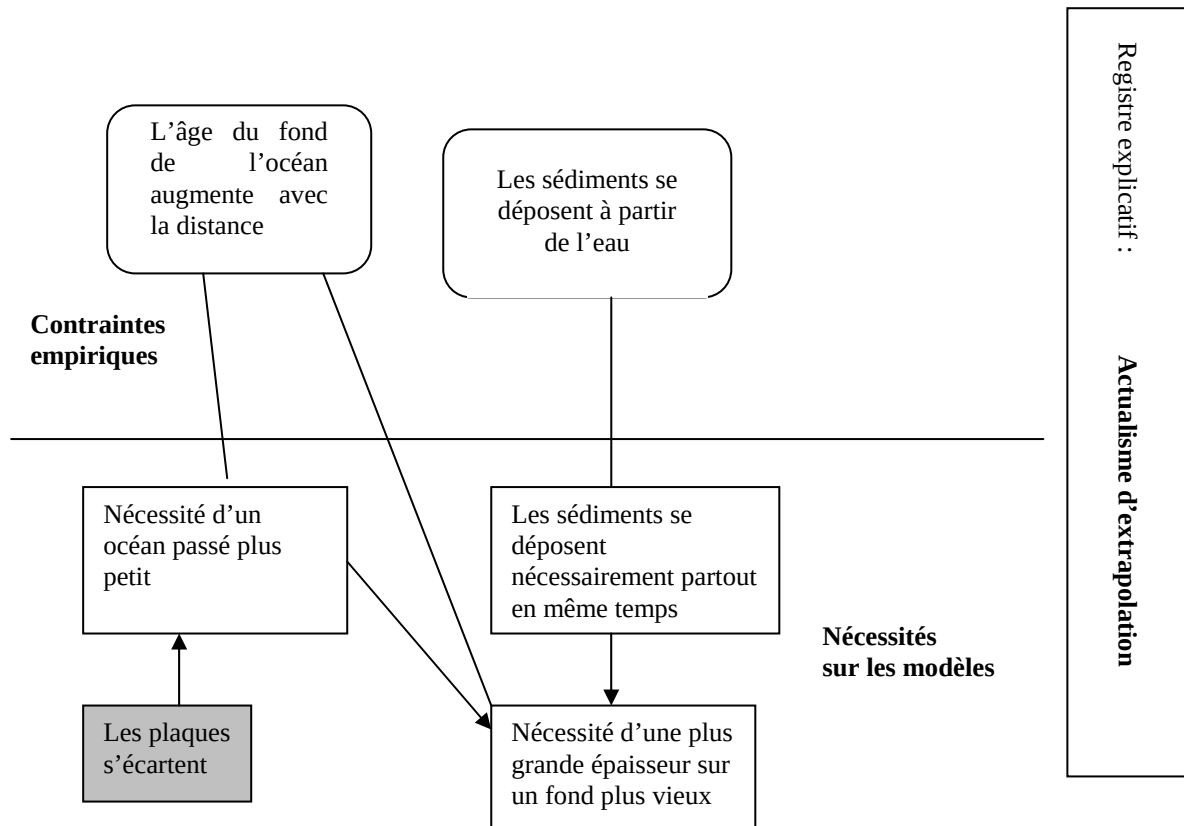


Figure 7.18
Le passé d'un océan
Espace de contraintes de Julien (première S)



Chapitre 8

L'EVOLUTION DE LA ZONE D'UNE DORSALE

Analyse didactique a priori des situations

Sommaire

- 1. Le contexte général de la situation de classe mise en place**
- 2. La situation de classe et les intentions du professeur**
- 3. Analyse didactique a priori de la situation**
- 4. Conclusion**

La situation que nous allons étudier s'intègre dans le cadre du programme de géologie de Première S (programme de 1992 ; M.E.N. (1992), tome II, p.86)⁵⁶ et plus précisément dans le cadre de l'étude de l'expansion et de la genèse de la lithosphère océanique. Mais, à la différence de la situation que nous venons d'analyser dans les chapitres précédents, dont le but était de reconstituer l'histoire passée d'un océan, cette nouvelle situation s'intéresse au devenir d'un fond océanique, elle se projette dans l'avenir en essayant de prévoir ce que sera la zone d'une dorsale dans quelques millions d'années.

1. Le contexte général de la situation de classe mise en place

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, d'établir les grands traits de l'histoire d'un océan (voir les chapitres 6 et 7), et de réfléchir sur l'origine et la formation du magma qui alimente une dorsale. Les élèves connaissent l'organisation et le fonctionnement actuel d'une dorsale ; si le mécanisme de l'accrétion a été approfondi, celui de la sédimentation ne l'est pas encore et il fera l'objet d'un chapitre ultérieur.

2. La situation de classe et les intentions du professeur

La situation qui est proposée aux élèves a comme supports **deux** coupes schématiques identiques de la région d'une dorsale (Figure 8.1).

⁵⁶ Dans les programmes de Première S 2000 (M.E.N., 2000), ce problème s'intègre au thème général « Structure, composition et dynamique de la Terre ».

La réponse attendue est conforme au savoir actuel, construit dans le cadre théorique de la tectonique des plaques. Elle exprime l'idée de **stabilité structurelle** de la dorsale par le jeu compensé de **l'accrétion** (ou agrandissement des plaques) et de **la dérive** latérale (l'écartement) des deux plaques qu'elle limite, ce que les géologues valident notamment par le suivi (observation in situ avec des submersibles, profils sismiques obtenus à partir de bateaux, suivi satellitaire) et la quantification de plus en plus fournie (en couverture spatiale et en fréquence des mesures) des processus océaniques d'accrétion et de dérive des fonds océaniques. Xavier Le Pichon nous le rappelle dans son intervention 18 : *"Vous pouvez avoir à tout moment toutes les mesures par satellite du mouvement entre les plaques et donc de la déformation"*. La vitesse de déplacement d'une plaque est comprise entre 0,5 à 2 cm/an pour les moins rapides (Antarctique, Eurasie et Afrique) à environ 10 cm/an pour les plus rapides (plaque Pacifique, de Nazca) (Pomerol et al, 2000, p. 227 et 229). Et au niveau de toutes les dorsales du globe, il n'est point constaté de "balafres profondes" qui s'agrandissent parce que la dérive des plaques serait plus importante que le colmatage magmatique. Il y a donc simultanément éloignement des plaques et création de nouveaux pans sur toute leur épaisseur à l'aplomb du rift. C'est pour la zone dorsaliennne un **état stationnaire dynamique**, sans cesse perdu et retrouvé : *"Tout change et pourtant tout reste pareil"*. Le schéma attendu des élèves peut être de la forme suivante (Figure 8.2).

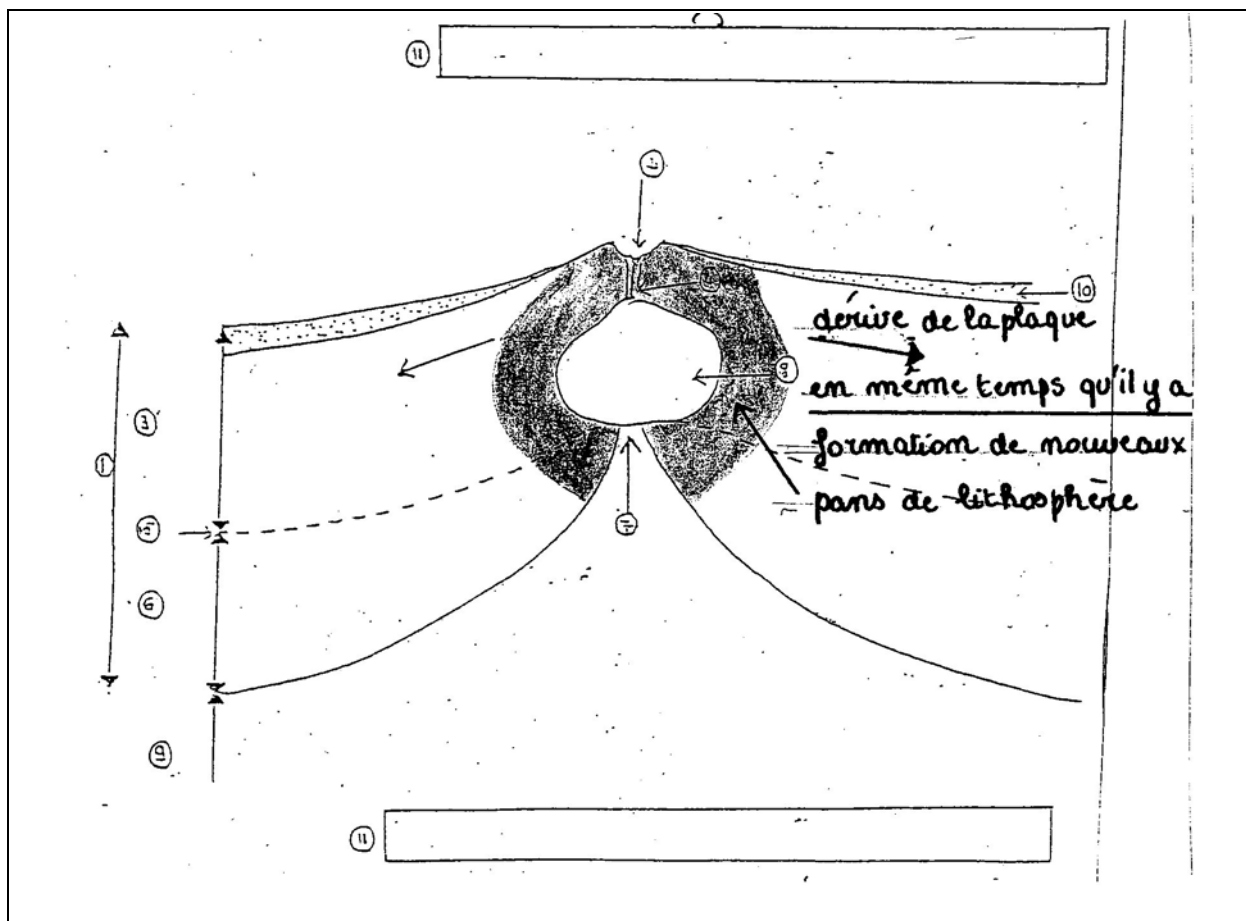


Figure 8.2

Schéma de l'évolution d'une dorsale attendu des élèves

3. Analyse didactique a priori de la situation

Dans notre étude sur le temps, cette situation de classe nous intéresse. Elle peut permettre de comprendre comment les lycéens prennent en compte spontanément la dérive et l'accrétion, deux phénomènes affectant les plaques qui s'inscrivent dans le temps, et dans quelle mesure ils parviennent à **construire la nécessité d'une stabilité structurelle**, où il y a en quelque sorte "annulation" du temps. L'analyse a priori que nous faisons vise à clarifier ce que sous-tend la nécessité d'une stabilité structurelle, ainsi que ses rapports avec l'actualisme.

3.1. Deux processus quantifiables

Comme nous l'avons développé précédemment (Chapitre 5), cette situation s'inscrit dans un contexte "de routine" de fonctionnement d'un océan, c'est-à-dire dans l'espace de temps compris entre son ouverture ("sa naissance") et sa fermeture (sa "mort"). Nous pouvons alors dire que l'évolution du système océanique considéré, qui comprend deux plaques divergentes, est à chaque instant parfaitement déterminée, qualitativement et quantitativement, dès lors que nous en connaissons son état à un moment donné. Précisons : il y a **deux processus en jeu** (dérive et accrétion), **quantifiables et prévisibles** dans leurs effets. Il est en effet possible de ramener leur déroulement à deux "règles" qui s'énoncent aussi bien dans une projection vers l'avenir que dans une remontée dans le temps. Voici une formulation possible de ces "règles" pour se représenter le futur :

Dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques :

- pour la dérive latérale des plaques, la prévision de l'avenir repose sur la "règle" qu'à tout moment, avec la même vitesse, chacune des deux plaques se déplace latéralement.
- pour l'accrétion, la prévision de l'avenir repose sur la "règle" qu'à l'axe de la dorsale, à tout moment, avec la même vitesse, il se forme des pans de lithosphère océanique.

Mettons plus précisément en comparaison les deux règles précédemment énoncées :

- Les deux "règles" ont des caractéristiques générales communes : leur intemporalité ; le continuisme de leur application et de leurs effets, la quantification de leurs effets. Dans la situation proposée aux élèves, elles permettent ainsi d'étirer vers un futur lointain ce qui se passe aujourd'hui.
- Les deux "règles" diffèrent et s'excluent dans leur espace d'application : celle relative à l'accrétion régit l'axe de la dorsale ; celle relative à la dérive concerne toute la plaque. Mais il y a cependant **une interférence spatiale** car la dérive dégage un espace disponible pour l'accrétion.

Notons cependant qu'une plaque "réelle" est découpée sur une enveloppe sphérique. Le chercheur qui prend en considération cet aspect est conduit à envisager pour une même plaque, et un certain nombre de données le prouve (exemple : les données de la géodésie spatiale et satellitaire ; Pomerol et al, 2000, p. 226-227), une différence des vitesses absolues selon les endroits où il se place. La situation proposée aux élèves écarte ce problème de rotondité des plaques ; comme elle s'appuie sur une coupe transversale de la zone de la dorsale, elle porte sur un secteur limité, ne concerne la dorsale qu'en un point, ce qui nous fait dire que les plaques en jeu ont partout la même vitesse.

En résumé, l'expert considère que la situation proposée aux élèves mobilise deux plaques soumises à **deux processus** (la dérive et l'accrétion) **actuels** qu'il s'agit de faire fonctionner sans interruption dans un même lieu jusqu'à obtenir un état de ce lieu dans un futur lointain (quelques millions d'années). Si nous reprenons la consigne et la coupe données aux élèves, nous remarquons qu'un seul des processus (la dérive) est explicitement indiqué au départ, sous forme de flèches placées sur la coupe. Nous nous demandons si les élèves vont faire intervenir le deuxième processus (l'accrétion) et comment ils vont combiner les temps respectifs de ces processus.

3.2. La stabilité structurelle et le temps

3.2.1 Entre temps et non-temps

Ce qui particularise cette situation, c'est qu'elle se focalise sur une partie du système océanique, la zone de la dorsale, qui bien qu'affectée par les processus de dérive et d'accrétion, ne va pas changer de structure. Pour l'expert, cette stabilité structurelle repose non seulement sur la mise en jeu des deux processus mais également sur **la simultanété et l'équivalence quantitative de leurs effets**. C'est un véritable paradoxe puisqu'il y a à la fois évolution dans le temps de la zone de la dorsale et annihilation des changements qui se produisent. Entre changement et absence de changement, entre histoire et non temps, la difficulté de construire et de se représenter la conservation en elle-même d'une structure est réelle et ceci indépendamment de sa projection dans un passé ou un futur lointains.

Revenons alors aux lycéens qui prennent en compte les deux processus. De quelle manière vont-ils les articuler ? En quoi cela peut-il jouer sur la construction de la nécessité d'une stabilité structurelle ?

- Nous savons la tendance des élèves à calquer un processus sur un autre : nous avons vu, dans le cas de la reconstitution des fonds océaniques (chapitre 7) que certains élèves ajustent l'histoire sédimentaire à l'histoire accrétionnelle. Cela est-il gênant pour l'accès à la stabilité structurelle ? Nous ne le pensons pas puisque cette tendance peut servir la complémentarité et la simultanété des effets des deux phénomènes.

- Il est également possible que les lycéens s'orientent vers une séquentialisation des phénomènes (Viennot, 1993, 1996 ; C. Orange, D. Orange, 1995 ; D. Orange, 2000), par exemple en faisant fonctionner d'abord la dérive puis l'accrétion etc. (ou l'inverse). Ou encore qu'ils les relient, dans un enchaînement causal par exemple : la dérive est la condition d'une venue du magma par l'espace qu'elle libère ; ou inversement, la poussée du magma provoque la dérive des plaques (chapitre 7).

Cela compromet-il la construction de la nécessité de la stabilité structurelle ? Pas forcément, si l'espace libéré ou provoqué lors d'une phase est complété par un équivalent matériel dans la phase suivante. La "mise en histoire", assortie ou non d'une liaison causale des deux processus, n'empêche pas a priori l'accès à la stabilité structurelle.

3.2.2. La banalisation de l'instant

La dorsale sera, dans quelques millions d'années, semblable en organisation et en nature de ses matériaux (même s'ils ont été renouvelés) à ce qu'elle est aujourd'hui. Et elle est aujourd'hui semblable à ce qu'elle était, il y a plusieurs millions d'années. Ces considérations participent de la théorie de la tectonique des plaques dans laquelle les fonds océaniques sont assimilés à la surface d'un double tapis roulant. Ce double tapis garde une stabilité structurelle

au niveau de la dorsale, où il se forme, ainsi qu'au niveau des fonds océaniques, où il se déploie.

En conséquence, étudier l'évolution de la zone de la dorsale, c'est étudier la formation et le déroulement continus d'une partie du double "tapis roulant". Et, sur cet espace limité, dans le laps de temps qui exclut la naissance et la mort de l'océan, force est de constater qu'**aucun instant n'est singulier**, ne se démarque des autres. La stabilité structurelle de la zone de la dorsale dépouille donc chaque instant d'une quelconque originalité.

3.2.3. Les rapports entre le futur, l'actuel et le passé

Considérer l'instant comme équivalent des instants qu'il précède ou qui lui succèdent aide-t-il à entrer dans la stabilité structurelle ? Sans doute mais au risque de tout figer, de négliger ce qui se passe d'un instant à l'autre. On peut en effet penser que chaque instant nous montre la même structure, parce que l'objet même est immuable. Le renouvellement continu est alors écarté, ce qui n'est pas le cas dans **une stabilité structurelle dynamique**. Penser les quelques millions d'années à venir, c'est comme penser les quelques millions d'années qui ont conduit à aujourd'hui. Il y a plusieurs millions d'années, la zone de la dorsale ressemblait structurellement à ce qu'elle est aujourd'hui. Que s'est-il passé entre cette époque et aujourd'hui ? Il y a eu déroulement continu du "double tapis roulant" (les anomalies magnétiques par exemple en témoignent), ce qui fait que ce qui était à l'axe en est maintenant loin, mais a été remplacé par des morceaux lithosphériques équivalents. Que voulons-nous faire quand nous nous projetons dans quelques millions d'années à venir ? Nous voulons reproduire ce qui s'est fait entre il y a quelques millions d'années et maintenant. En d'autres termes, nous effectuons **une translation**, sur un avenir qui démarre maintenant, d'une "tranche de passé" avec processus de dérive/ accréation en marche et aboutissant à la zone telle que nous la connaissons actuellement. Ainsi, nous remplissons le temps futur de changements qui conservent la structure de la zone. Dans sa nouvelle position, notre "tranche" est limitée par de l'actuel à ses deux extrémités. Mais ces "actuels" ne se comprennent pas de la même façon : l'actuel de la limite inférieure représente le début de notre projection dans l'avenir ; l'actuel de la limite supérieure est l'état actuel de la zone, vu comme le résultat de ce qui a eu lieu dans le passé. Déplacer cette "tranche de passé" avec cette bordure supérieure "actuelle" contraint à la stabilité structurelle de demain.

En fin de compte, la nécessité d'une stabilité structurelle dynamique repose sur la translation, sur une "tranche d'avenir" commençant maintenant et encore géologiquement vide, d'une "portion de passé" dans laquelle la stabilité structurelle est attestée (figure 8.3).

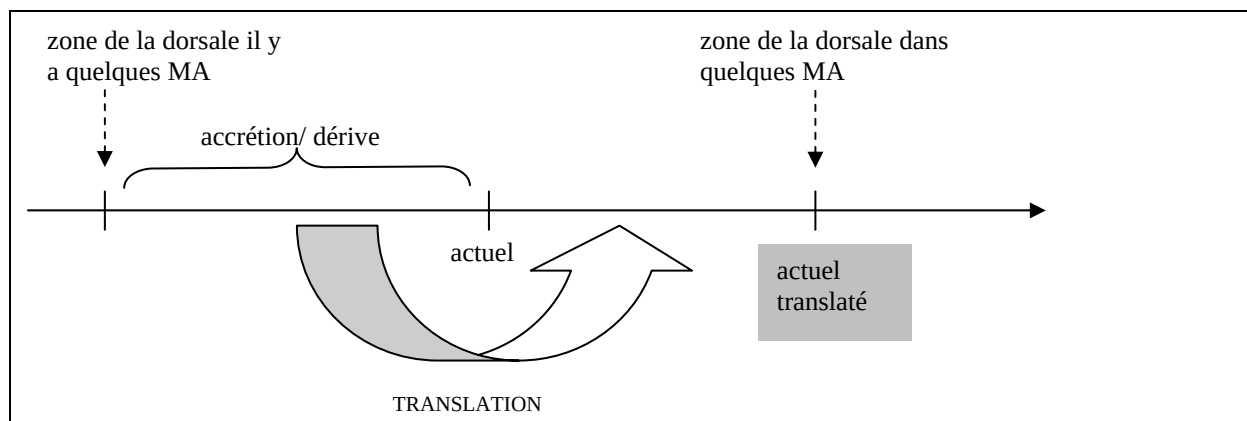


Figure 8.3 :
La stabilité structurelle comme une translation de passé sur l'avenir

Cette situation montre alors la complexité de l'utilisation du temps. En effet, l'avenir n'est pas le symétrique du passé ; il est le produit de la translation du passé. Et l'actuel, tout en étant banal par le fonctionnement et la structure dorsaliennne qu'il offre, n'en est pas moins particulier puisqu'il est une extrémité du tronçon temporel qui va être translaté.

Dans ces conditions, construire une réponse à la consigne proposée repose implicitement sur **la prise en considération du présent** (utilisation de l'actuel pour expliquer le futur) **mais en association avec le passé** (l'avenir est ce qu'est maintenant l'actuel au passé), pour comprendre le mécanisme de la dérive/accrétion mais aussi construire le concept de stabilité structurelle.

3.3. Et l'actualisme ?

Cette situation avec stabilité structurelle nous rappelle le *steady state* de Lyell (1797-1875), cadre doctrinaire dans lequel il fait fonctionner l'actualisme méthodologique. A plusieurs différences près cependant :

- ici, le *steady state* est localisé, à l'échelle de la zone de la dorsale ; or Lyell conçoit le *steady state* à l'échelle de la Terre entière alors qu'il définit des cycles au niveau local.
- d'autre part, l'état stationnaire se comprend ici par **la compensation en un même lieu et simultanément de deux sortes de changements**. Ce n'est pas la logique de Lyell : si la Terre garde le même aspect, c'est parce que d'un lieu à l'autre, ce sont des phases différentes du cycle qui se produisent. C'est au prix de **la complémentarité de séquences en des lieux différents** que Lyell construit la stabilité globale. Mais en un même lieu, il n'y a pas permanence de la structure.

Malgré ces différences, l'outil actualiste a-t-il encore sa place ? Une discussion s'impose car :

- Notre situation propose de reconstituer un état à venir très lointain (quelques millions d'années) dont nous n'avons bien évidemment aucune trace. C'est par bien des côtés hors du champ de l'actualisme méthodologique qui sert à expliquer **un passé** éloigné dans le temps, qui nous parvient par **des archives de la nature**.
- Mais notre situation s'appuie sur une projection de deux processus actuels. Cela nous rappelle l'actualisme d'analogie. A la différence près que nous restons dans le même domaine océanique et au même endroit de ce domaine. Nous serions donc plus près de l'actualisme d'extrapolation que nous avons envisagé à partir des propos de Xavier Le Pichon (chapitre 5).

Ces premières réflexions montrent qu'il n'est pas simple de faire fonctionner l'actualisme dans cette situation. De plus, nous avons vu que la stabilité structurelle se comprend dans une translation dans le futur d'une "tranche du passé" s'achevant sur l'actuel. Dans la tâche proposée aux élèves, pour expliquer le futur, il faut se représenter le passé avec le fonctionnement actuel et l'évolution de l'actuel avec le passé. La référence qui est faite à l'actuel "ne tient pas toute seule". Elle s'articule au passé. N'y a-t-il pas un double actualisme d'extrapolation, vers le passé mais aussi vers le futur ?

3.4. Une esquisse de l'espace des contraintes pour l'expert

Si nous revenons au plus près des effets de la dérive et de l'accrétion, **la nécessité d'une stabilité structurelle** peut se décomposer en deux sous-nécessités : celle de **combler l'espace qui se forme** entre les deux plaques et celle de **faire un ajout de matériaux sur toute**

l'épaisseur de chaque plaque. Sur la coupe fournie aux élèves, quelles contraintes empiriques peuvent être reliées à ces nécessités ?

- le mouvement des plaques (signalé par des flèches), leur support d'application (notamment les parties lithosphériques proches de l'axe), les fractures au-dessus de la chambre peuvent être liées à la nécessité de combler l'espace qui se forme.

- les parties lithosphériques éloignées de l'axe (donc plus anciennes) et les parties lithosphériques proches (récentes) peuvent être liées à la nécessité de faire des ajouts lithosphériques sur toute l'épaisseur des plaques. Dans le repérage de ces contraintes, nous considérons bien un ensemble représentant une tranche d'âge allant d'un passé récent à l'actuel.

Cela nous conduit à esquisser l'espace des contraintes suivant (figure 8.4) :

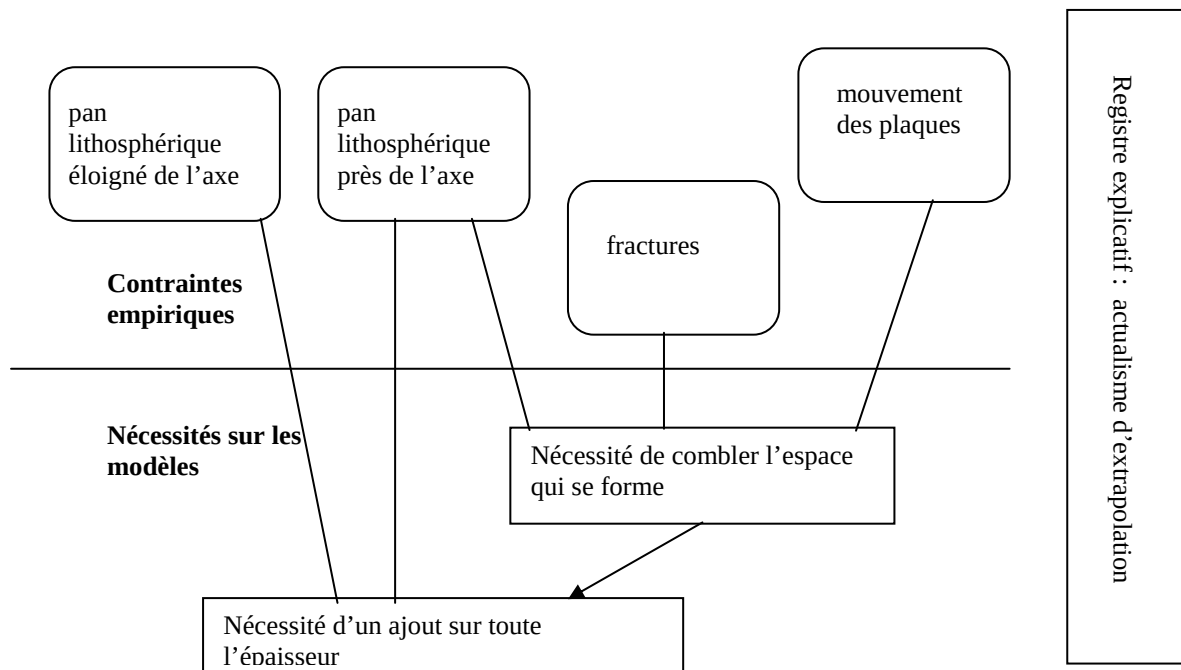


Figure 8.4 : L'espace des contraintes (évolution de la zone d'une dorsale)

4. Conclusion

L'analyse que nous venons de proposer paraît compliquer une situation qui somme toute semble relativement simple. L'étude des productions des élèves va nous permettre de justifier et de poursuivre cette analyse.

Chapitre 9

L'EVOLUTION DE LA ZONE D'UNE DORSALE

Explications des élèves et utilisation du temps

Sommaire

- 1. Le corpus de données**
- 2. Analyse des réponses écrites des élèves**
- 3. Etude des transcriptions de la confrontation des deux grands types de modèles d'élèves**
- 4. Conclusion**

Dans le chapitre précédent, nous avons réalisé l'étude a priori d'une situation de classe portant sur l'évolution de la zone d'une dorsale. Rappelons qu'en ce lieu deux plaques s'écartent et s'agrandissent. Mais comme les effets de ces deux processus se compensent, la zone se caractérise par une stabilité structurelle dynamique. Notre point de vue a été celui de l'expert, mais des hypothèses ont été posées quant aux façons de procéder des élèves. Nous avons mis en évidence, dans ce problème de stabilité structurelle, la complexité de l'utilisation du temps et construit un espace de contraintes de l'expert de façon à pouvoir, par comparaison, analyser les productions des élèves du point de vue de la problématisation, ce que nous allons faire dans le présent chapitre.

1. Le corpus de données

Plusieurs années de suite nous avons demandé à des élèves de Première scientifique, avant l'étude de cette question, d'imaginer l'aspect de la zone d'une dorsale dans quelques millions d'années. Les élèves disposent pour cela d'un schéma de dorsale en coupe (une représentation déjà travaillée avec eux) qu'ils doivent aménager (voir le chapitre précédent). Nous disposons de productions d'élèves de 6 classes de Première S, obtenues au long de 6 années scolaires. Il y a :

1.1. Les réponses écrites brutes des élèves, réalisées individuellement ou en binômes selon les années. Ces réponses comprennent toujours la coupe de la dorsale aménagée par les élèves. Pour les 4 dernières années, la coupe est assortie d'un commentaire (un texte de quelques lignes).

1.2. Pour la classe 1999/00, la transcription de la présentation et de la confrontation des grands types de réponses des élèves (débat collectif). Comme cela s'est fait en séance de TP, où la classe est dédoublée, cela nous permet d'avoir deux confrontations, chacune concernant une demi-classe.

Le tableau suivant rend compte de la constitution de notre corpus de données.

année scolaire	nombre de productions	nature des productions
1993/94 Lycée Le Brun, COUTANCES	29 productions individuelles	productions écrites (coupe aménagée)
1994/95 Lycée Le Brun, COUTANCES	18 productions individuelles	productions écrites (coupe aménagée)
1995/96 Lycée Le Brun, COUTANCES	24 productions individuelles	productions écrites (coupe aménagée+ commentaire)
1996/97 Lycée Le Brun, COUTANCES	29 productions individuelles	productions écrites (coupe aménagée+ commentaire)
1998/99 Lycée Camus, NANTES	19 productions (individuelle ou de binômes)	productions écrites (coupe aménagée et/ou commentaire)
1999/00 Lycée Camus, NANTES	9 productions de binômes	productions écrites + transcription de la présentation et de la discussion des 2 grands types de modèles
Lycée Camus, NANTES	8 productions de binômes	productions écrites (coupe aménagée + commentaire) + transcription de la présentation et de la discussion des 2 grands types de modèles
Total : 6 années scolaires	136	

Dans le tableau ci-dessus, les classes support d'une analyse plus poussée sont en grisés.

Figure 9.1 : Le corpus de données (Evolution de la zone d'une dorsale)

2. Analyse des réponses écrites des élèves

2.1. Cas de la classe de Première S 95/96

2.1.1. Le déroulement de la situation de classe

Nous étudions d'abord, pour la variété des réponses, le cas d'une classe de Première S de 24 élèves de l'année scolaire 1995/96. Cette classe a précédemment travaillé les aspects globaux de la théorie de la tectonique des plaques (accrétion, subduction, collision) et réfléchi à la formation du magma à l'aplomb des dorsales. C'est alors que le professeur leur propose la consigne suivante :

Le document ci-joint (figure 8.1) représente, en coupe transversale, une dorsale aujourd'hui. Prévoir, à l'aide de la deuxième coupe fournie, comment sera cette zone dans quelques millions d'années.

Chaque élève élabore **individuellement** une réponse en une dizaine de minutes environ. Les productions obtenues comprennent **la coupe de dorsale aménagée assortie d'un petit texte**.

2.1.2. La grille de lecture des réponses écrites des élèves

Sur la base de l'étude a priori de la situation (chapitre 8), nous avons classé les coupes aménagées par les élèves en deux grandes catégories, selon qu'elles prennent en compte ou non **la stabilité structurelle** de la zone de la dorsale. Mais nous avons vu que deux nécessités correspondent à la stabilité structurelle : **la nécessité de combler l'espace** que tend à ménager la dérive des plaques et **celle d'un ajout de matériaux sur toute l'épaisseur de chaque plaque**. C'est pourquoi nous avons ensuite tenu compte du respect par l'élève de ces deux nécessités.

Pour la mise en catégories, le texte accompagnateur vient en renfort de la coupe annotée ou découpée : nous nous y reportons lorsque nous doutons de la signification de la coupe aménagée.

Enfin, dans la mesure où nous centrons notre étude sur les processus de renouvellement des plaques à l'axe de la dorsale, nous laissons de côté les processus sédimentaires, même si des élèves y ont porté attention.

2.1.3. Les explications avec stabilité structurelle de la zone de la dorsale

Nous distinguons deux catégories d'explication avec stabilité structurelle, selon qu'elle est dynamique ou selon qu'elle est figée.

Une stabilité structurelle dynamique

Nous plaçons dans cette catégorie les réponses qui mettent en jeu l'écartement des deux plaques et l'agrandissement de chaque plaque par ajout, à l'axe de la dorsale et sur toute leur hauteur, d'un morceau néoformé : "tout reste pareil et tout change". Ces réponses prennent donc en compte **les deux processus** (dérive et accrétion) et **les deux nécessités** (comblement de l'espace et ajout de matériaux sur toute la hauteur des plaques) qui découlent de la stabilité structurelle. En conséquence, la coupe prévue dans quelques millions d'années est identique à

ce qu'elle est aujourd'hui, même si les plaques sont renouvelées. Cette explication est conforme au savoir actuel.

Avant d'étudier précisément les coupes rendues par les élèves, notons que quelques-uns d'entre eux ont réagi immédiatement à la situation en faisant remarquer au professeur qu'"il n'y a rien à faire!". C'est sur l'insistance du professeur qu'ils ont concédé quelques annotations de leur coupe. Au final, nous distinguons chez les élèves plusieurs façons de faire aboutissant à la prise en compte de la stabilité structurelle :

a) une coupe schématique dont le contour des plaques a été **découpé, écarté et complété de nouveaux pans**, pour chaque plaque, dans l'espace les séparant après dérive. La chambre magmatique conserve sa taille. Cinq élèves sur 24 répondent de cette manière :

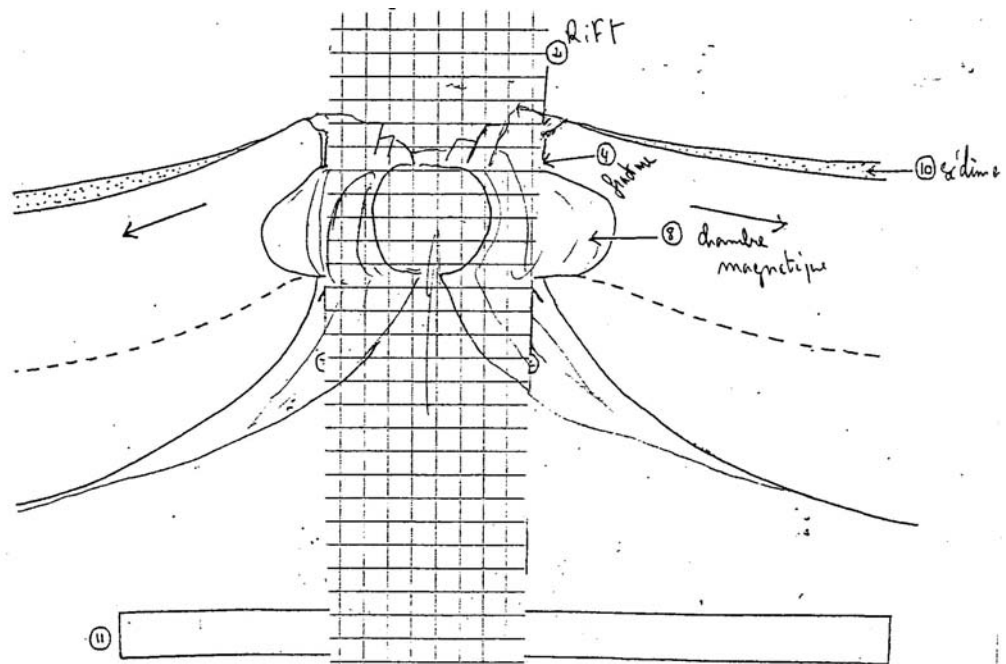


**Figure 9.2a : Réponse avec stabilité structurelle dynamique
(réponse prototypique 9, avec découpage)**

b) une coupe schématique **non découpée** mais sur laquelle ont été portés des légendes ou des figurés exprimant que la partie des plaques située près de l'axe de la dorsale a été renouvelée. De fait, la chambre magmatique conserve sa taille. 9 élèves sur 24 proposent un tel type de coupe. Voici les cas que nous rencontrons (voir également l'annexe 9) :

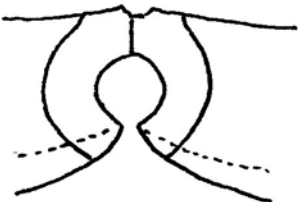
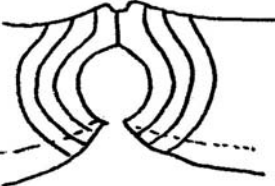
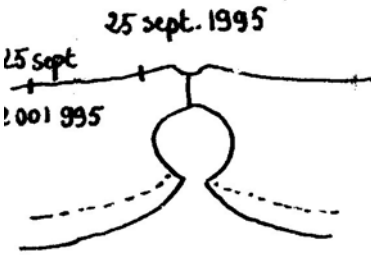
Réponse 2 (un pan)	Réponse 20 ("écaillés d'oignon")	Réponse 15 (repères temporels)
		

Figure 9.2b : Autres façons de représenter la stabilité structurelle dynamique (réponses prototypiques 2, 20 et 15, sans découpage)

Au total, 14 des 24 élèves de la première S 1995/96 fournissent une coupe aménagée que nous rangeons dans cette catégorie "stabilité structurelle dynamique". Deux éléments aisément repérables sur les schémas nous servent de critères : l'ajout de pans néoformés sur toute la hauteur des plaques et la conservation de la taille de la chambre magmatique.

Cependant quelques réponses, finalement placées dans cette catégorie, nous ont posé problème :

- La réponse 6 dont le schéma pose problème puisque l'élève limite les pans néoformés à la croûte, soit au-dessus et sur les côtés de la chambre magmatique, or ils concernent aussi le manteau supérieur, au-dessous de la chambre magmatique. Si nous classons cette réponse dans la catégorie "stabilité structurelle dynamique", c'est parce que son auteur écrit qu'il *"ne pense pas que la poche grossisse tellement"* et que *"ce sont surtout les plaques qui grandissent, et sur toute leur épaisseur"*.

- Les réponses dont le schéma présente des aménagements du modelé de surface qui font que le rift s'agrandit (la moitié des réponses soient 7 sur 14) . Ces aménagements se rencontrent quelle que soit la façon de procéder des élèves (découpage ou non). Ils ne nous paraissent pas remettre en cause la compréhension de la stabilité structurelle, mais plutôt être une façon de témoigner de l'écartement de la zone : les fractures actuelles sont reléguées un peu plus tard plus loin de l'axe. Reprenons par exemple le cas de la réponse 6, dont la coupe et le texte montre que *"le rift s'agrandi"*, et qui est malgré cela bien ancrée dans la stabilité structurelle.

L'étude plus approfondie des textes accompagnateurs de la coupe aménagée montre qu'il y a parfois un décalage : le commentaire n'apporte pas exactement les mêmes informations que la coupe aménagée. Nous pensons pouvoir reconnaître deux grandes fonctions à ces textes :

a) Mettre en fonctionnement le schéma.

C'est le cas de la réponse 9 (voir la figure 9.2a) :

"Les plaques 1 et 2 s'écartent. au fur et à mesure des années le magma de la chambre magmatique comble et se solidifie sur toute l'épaisseur des plaques"

L'élève auteur de ce texte propose un fonctionnement de la zone de la dorsale dans lequel l'écartement des plaques est associé à un comblement magmatique. Il prend en compte la quasi-simultanéité des processus mais aussi leur continuité (*"au fur et à mesure des années"*), ce que n'exprime pas exactement la coupe correspondante. En effet, sur cette coupe, l'élève

séquentialise davantage, en plaçant plusieurs pans successifs à la manière des écailles d'un oignon. D'autres textes séquentialisent explicitement les processus, à la manière d'une "mise en histoire" : le texte de la réponse 5 raconte la mise en place d'une *"nouvelle couche de roche"* de millions d'années en millions d'années ; le texte de la réponse 6 envisage trois moments : 1) la poussée du magma 2) l'écartement 3) le durcissement sur les bords. Ces exemples montrent que la séquentialisation n'empêche pas forcément l'inscription dans la stabilité structurelle.

b) Exprimer les rapports au temps des explications.

Au regard de notre analyse a priori, nous remarquons que certains textes n'expriment qu'une projection dans l'avenir. C'est le cas de la réponse 6 que nous avons étudiée dans le paragraphe précédent.

D'autres textes mettent en jeu le transfert d'un fonctionnement passé sur l'avenir. La réponse 2 en est un exemple :

"Le document dans quelques millions d'années sera toujours le même. La dorsale restant en action continue son écartement des plaques mais reformera des couches qui se synderont avec les plaques. En fait le début de l'atlantique à vue cette même dorsale la créé. C'est une formation qui ne changera "jamais"." Il y a, dans les deux dernières phases de cette réponse, un retour en arrière dans l'histoire de l'océan qui conduit à une généralisation à toutes les époques dont le futur. Notons que la coupe aménagée correspondante (voir le paragraphe précédent) ne résulte pas d'un découpage. Elle présente en hachures les nouveaux pans lithosphériques fabriqués pendant les quelques millions d'années à venir. Leur limite externe porte la légende suivante : *"formation qq MA plus tôt"*. Cette légende est ambiguë : elle correspond aussi bien au résultat d'un intervalle de temps passé qu'à celui d'un intervalle de temps à venir. Nous nous demandons si cet aménagement sans découpage n'est pas une façon de dire la translation du passé sur l'avenir.

Notons enfin que des élèves n'ont pas fourni de texte ou bien un texte très court. Est-ce parce que la coupe aménagée leur a paru suffisante ? Nous le pensons et le mettons en correspondance avec les remarques immédiates d'élèves disant qu'il n'y a rien à faire.

Une stabilité structurelle "figée"

Trois réponses (les réponses 1, 10, 23) conservent véritablement la structure de la zone de la dorsale, puisqu'elles font fonctionner cette zone en ne renouvelant pas les matériaux des deux plaques : *"Tout reste pareil parce que rien ne change"*. Le schéma suivant (figure 9.3, réponse prototypique 1) illustre ce type de réponse. Il est accompagné du texte de la réponse 1, qui explique comment cela se passe :

"Au fur et à mesure du temps, la chambre magmatique reçoit de plus en plus de magma (grâce au cycle étudié ds le doc 5, qui est continu), cette chambre "gonfle" et émet une pression de + en + forte sur les 2 plaques ---> les plaques s'écartent ---> les fractures deviennent des failles ---> le magma s'écoule par les failles et forme une espèce de dorsale (mais plus importante) lorsqu'il refroidit, (voir schéma) ce qui ramène la chambre magmat. à retrouver sa taille normale et ainsi de suite."

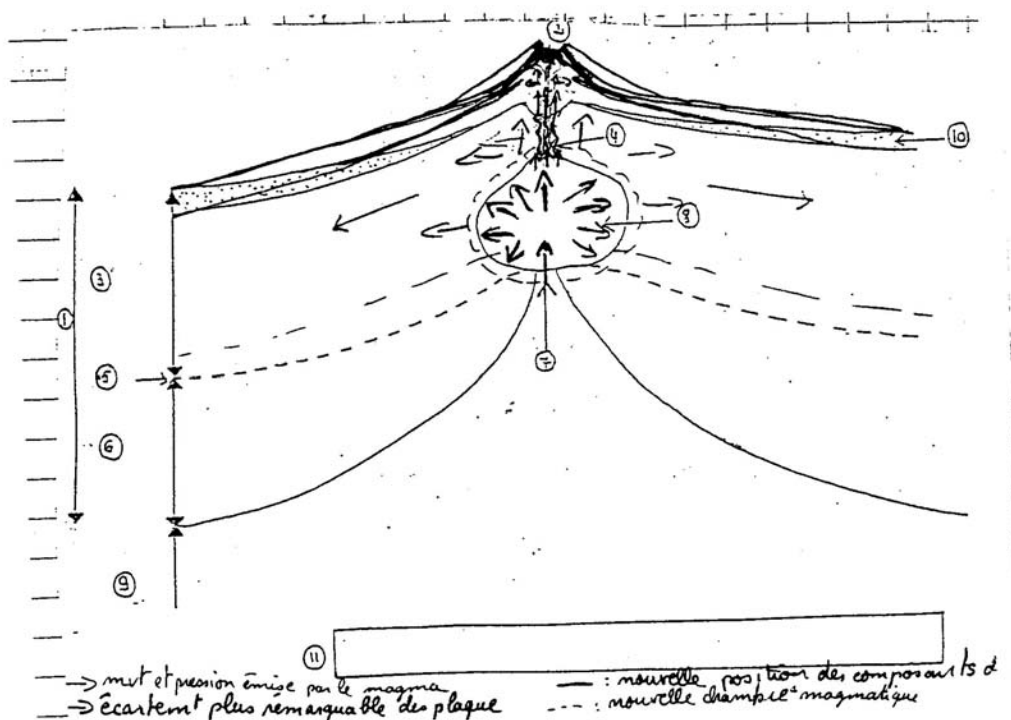


**Figure 9.3 : Réponse avec stabilité structurelle "figée"
(réponse prototypique 1)**

Cette réponse 1, tout comme la réponse 23 (voir annexe 9), distingue plusieurs moments : 1) un gonflement de la chambre magmatique par venue de magma, 2) un écartement et une fracturation par le haut des plaques sous l'effet de la pression de la chambre, 3) une expulsion vers le haut d'une partie du magma et une restauration de la taille de la chambre magmatique, un gonflement de la chambre magmatique etc. Ces différents moments s'enchaînent temporellement et causalement, comme dans une "mise en histoire". Ensemble, ils forment un cycle qui se répète. Ce fonctionnement pulsatile conserve les plaques en l'état, malgré quelques fluctuations dans leur position. Elles ne se renouvellent pas ; seule la dorsale en tant que chaîne volcanique sous-marine grossit un peu.

Nous remarquons que, dans ce type de réponse, la stabilité structurelle est obtenue en minimisant **la dérive latérale des plaques et l'accrétion**. Il y a bien production de fissures et de petits mouvements horizontaux des plaques ; mais ils se font sous la pression du magma de la chambre, et n'ont rien à voir avec le mouvement des plaques. Il y a bien du magmatisme, mais il n'interfère pas avec la structure existante ; il ne bouche pas les fractures, il va en surface pour se solidifier. La structure en jeu, immuable, a seulement un rôle de voie de passage et d'accumulation transitoire du magma. Elle permet ainsi l'édification d'une structure volcanique conique en surface.

La réponse 10 rend également compte d'une stabilité structurelle figée, c'est-à-dire conservant la structure existante, avec expulsion vers le haut de magma. La coupe mentionne qu'il n'y a aucun changement de taille de la chambre magmatique. Sans modifier son schéma, l'élève note que les fractures au-dessus de la chambre s'agrandissent ; en revanche, il dessine sur le fond marin des coulées de laves de part et d'autre de l'axe de la dorsale. Le contenu du texte qui accompagne la coupe nous permet d'approcher le mode de raisonnement de l'élève. Le voici :

" Dans quelques MA, on pourra observer un simple renouvellement du sol marin ainsi qu'un faible écartement des plaques dû à l'augmentation du nombre de fractures et de leur taille.

Pour qu'un écart important des plaques est lieu, il faudrait qu'un changement important dans la morphologie du remplissage de la chambre magmatique se produise.

Ceci n'est valable que si aujourd'hui il y a une similitude entre la quantité de magma sortant et la quantité de magma entrant."

Ce texte montre que l'élève considère que l'écartement des plaques est une conséquence directe du remplissage plus ou moins important de la chambre magmatique. C'est également le cas des autres élèves de cette catégorie. Mais ce qui est nouveau, c'est qu'il appuie explicitement son explication sur **une comparaison de flux entrant et sortant** de la chambre magmatique : pour lui, la stabilité structurelle "figée" de la zone tient à l'égalité de ces flux verticaux de magma. Imagine-t-il une expulsion cyclique ou continue du magma de la chambre ? Il est difficile de l'affirmer même si la représentation de plusieurs coulées suggère de la rythmicité.

En résumé, cette étude des cas appartenant à la catégorie "stabilité structurelle figée" montre que le processus d'accrétion est totalement négligé. Ce n'est pas tout à fait le cas de l'écartement des plaques, considéré comme possible, mais limité et directement tributaire de la pression du magma de la chambre. S'il y a stabilité structurelle, c'est soit parce qu'un petit écartement est suivi d'un resserrement équivalent, soit parce que la sortie compense l'entrée de magma dans la chambre. Tout se passe comme si les élèves se focalisaient sur **un problème de volcanisme** (les conditions et les conséquences de l'évacuation du magma jusqu'au fond de l'océan) au détriment d'**un problème de mobilisme** (la dérive inexorable des plaques et la formation de fonds océaniques). Et en termes d'accrétion, c'est l'**accrétion "verticale"** des plaques (c'est-à-dire une addition de basalte nouveau au-dessus des fonds déjà formés, voir chapitre 7) qui est prise en compte, au détriment de l'accrétion latérale. Peut-on alors vraiment parler de stabilité structurelle ?

2.1.4. Les explications sans stabilité structurelle

Nous distinguons deux catégories sans stabilité structurelle, selon qu'il y a ajout partiel de pan lithosphérique aux plaques ou pas d'ajout du tout.

Avec ajout partiel d'un pan lithosphérique

Nous mettons dans cette catégorie les réponses prenant en compte la dérive des plaques et le comblement **partiel** de l'espace qu'elle libère : en effet, seule la partie au dessus de la chambre magmatique est colmatée. Comme il n'y a pas d'ajout aux plaques sur les bords et en dessous de la chambre magmatique, elle ne cesse de s'élargir. La stabilité structurelle n'est donc pas réalisée. 6 réponses d'élèves appartiennent à cette catégorie que la coupe de la réponse prototypique 12 illustre.

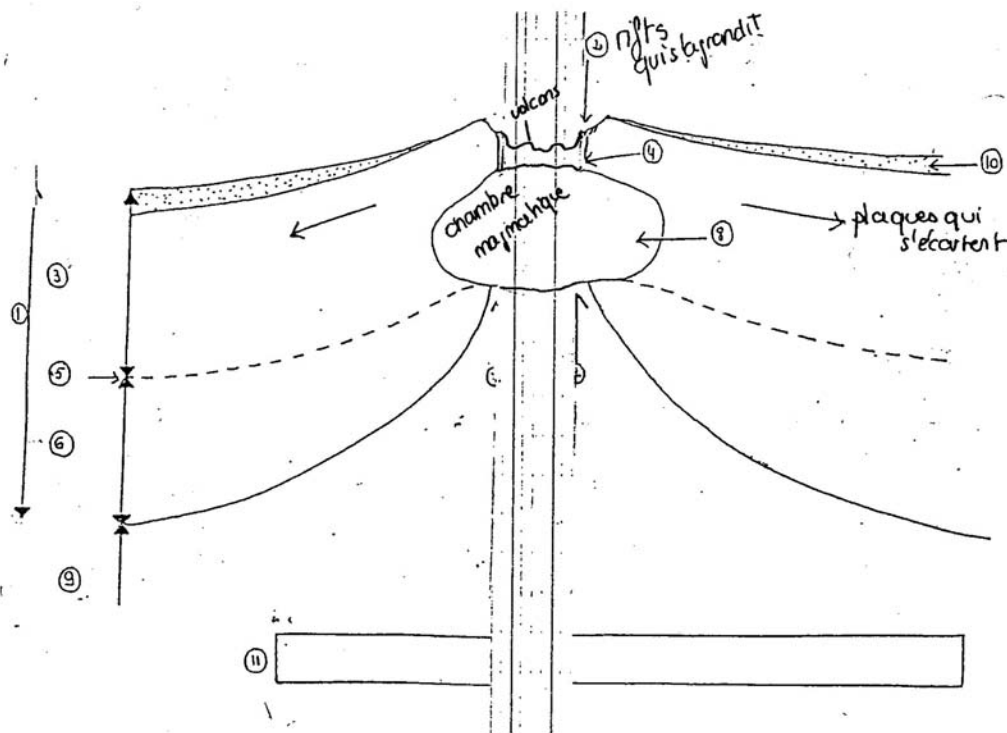


Figure 9.4 : Réponse avec ajout partiel d'un pan lithosphérique (réponse prototypique 12)

Le texte accompagnateur, présent en 1995/96 chez la majorité des élèves de cette catégorie, expose le fonctionnement de la coupe. Plusieurs réponses expriment la nécessité de boucher le trou que l'inexorable écartement provoque. C'est le cas de l'exemple suivant (réponse 18), où il est à la fois question de simultanéité et de succession des processus d'écartement des plaques et de solidification du magma.

"On observerait un agrandissement du rift, une accumulation des sédiments sur les côtés. Le magma se solidifie au moment où⁵⁷ les plaques s'écartent. La chambre magmatique s'agrandit. La fissure s'agrandit puis se bouche " (réponse 18, dont certains passages sont soulignés par nous).

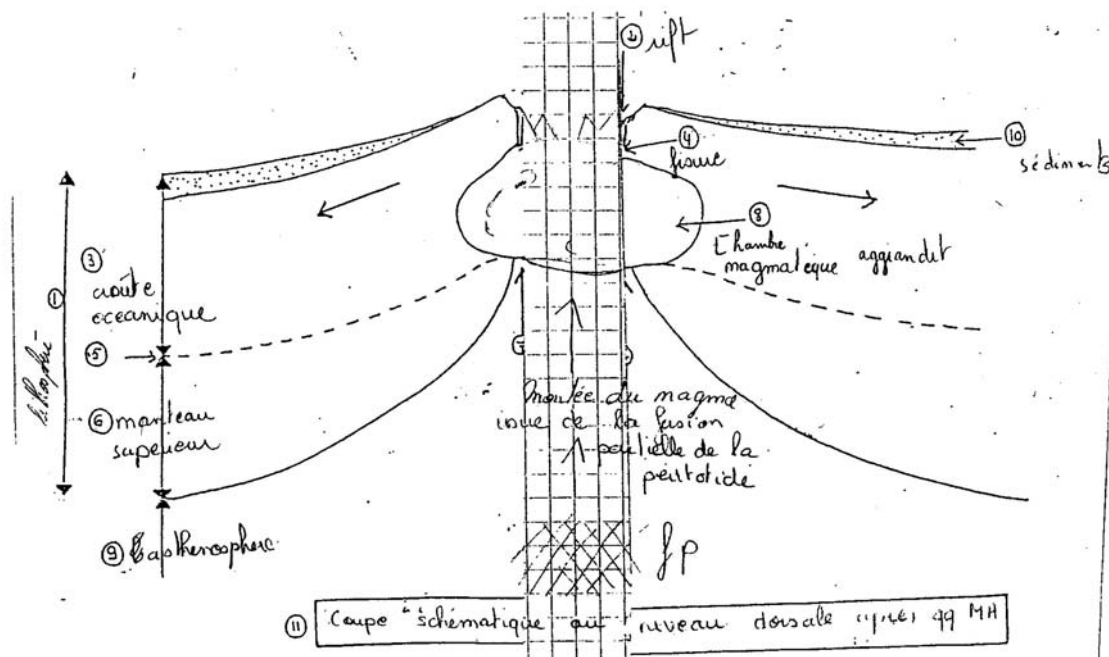
Nous notons également que certains élèves recourent à leurs connaissances du volcanisme aérien pour colmater l'espace que l'écartement génère. La réponse suivante (réponse 12) montre cela :

"Sous l'effet du mouvement des plaques qui s'écartent, le rift s'agrandit et s'approche peu à peu du magma. Lors de ce mouvement, il y a formation de collines de terres (volcans). Ils se trouvent donc tout près de cette chambre magmatique. Puis sous l'effet encore de l'écartement des plaques, la pression va changer et cela va entraîner la montée du magma dans les volcans (volcan en fusion)." (réponse 12)

Sans aucun ajout ou avec ajout d'un pan lithosphérique très limité

Une réponse, la réponse 11, fait s'écarter les plaques jusqu'à donner une chambre magmatique béant vers le haut. Voici cette réponse :

⁵⁷ Souligné par nous.



9.5. Réponse avec ajout d'un pan lithosphérique très limité (réponse 11)

"Ds qq millions d'années, je suppose que le mouvement des plaques va s'écarter, donc il y a un écartement du rift. Plus le rift va s'écarter, plus la chambre magmatique va augmenter. A un certain moment le rift va toucher la poche magmatique. La poche magmatique va s'ouvrir pour laisser s'enfuir le magma donc volcanisme"⁵⁸.

Cette réponse se différencie de la réponse 12 : il n'y a pas de construction d'un toit à la chambre magmatique. Par un enchaînement temporel et causal d'évènements (une "mise en histoire"), l'élève fait évoluer la zone jusqu'à la transformer en un énorme volcan s'ouvrant dans l'océan.

2.1.5. Bilan pour la classe de Première S 95/96.

Le tableau suivant donne la répartition des élèves dans les différentes catégories définies précédemment :

⁵⁸ Souligné par nous.

Catégories de réponses		Repérable par :	Nécessités prises en compte
1. Stabilité structurelle dynamique	14	- la conservation de la taille de la chambre magmatique ; - l'ajout de pans néoformés sur toute la hauteur des plaques	- comblement du "trou" - ajout sur toute la hauteur des plaques
2. Stabilité structurelle cyclique et figée	3	- l'expulsion périodique ou continue du magma de la chambre - pas d'ajout de pans néoformés latéraux aux plaques - développement de formes volcaniques de surface (cône, coulée)	- expulsion en surface du magma de la chambre
3. Pas de stabilité structurelle et des ajouts partiels	6	- l'agrandissement de la chambre magmatique ; - l'ajout de pans néoformés seulement dans la partie supérieure des plaques	- comblement du "trou"
4. Pas de stabilité structurelle et pas d'ajout	1	- l'agrandissement de la chambre magmatique ; - formation d'un "trou" au-dessus de la chambre magmatique - évolution de la zone vers un édifice volcanique	
TOTAL D'ELEVES	24		

Figure 9.6 :

Mise en catégories des réponses (Evolution de la zone d'une dorsale, Première S 95/96)

On remarque que 7 élèves sur 24 (catégories 3 et 4) n'entrent pas dans le problème de la stabilité structurelle des scientifiques, auxquelles on peut rajouter les 3 élèves qui mettent en jeu une stabilité structurelle sans renouvellement des fonds océaniques (catégorie 2). La tendance est alors à une mise en histoire, syncrétisme de temps et de causalité, au sein ou non de cycles qui se répètent.

2.2. Cas de la classe de Première S 99/00.

Nous choisissons maintenant d'étudier les productions écrites d'une classe de Première S 99/00 car nous disposons, en complément, de l'enregistrement audio de la présentation et de la confrontation ultérieure des modèles qu'elles expriment.

Commençons par les productions écrites des élèves. Quelques précisions préalables s'imposent sur leur obtention. La situation prend place dans **le même contexte** que pour la classe 95/96 et son lancement s'appuie sur l'annotation de la coupe de la zone de la dorsale, l'identification des deux plaques (cette fois-ci avec coloriage de ces plaques), la localisation

de l'endroit de la fusion partielle. **A la différence de la classe précédente**, un document complémentaire est fourni aux élèves : il s'agit d'un profil sismique (sismique réflexion) obtenu au niveau de la Dorsale Pacifique. Ce profil est commenté : collectivement, et avec l'aide du professeur, il y a repérage du fond océanique et identification de ce qui pourrait être une poche magmatique. L'échelle permet de donner des dimensions à cette poche : une dizaine de kilomètres environ de largeur, la moitié moins en hauteur. Puis les élèves sont invités, cette fois ci **en binômes**, à réfléchir à la configuration de cette zone dans quelques millions d'années.

Nous obtenons 9 (demi-classe 1) plus 8 (demi-classe 2) productions écrites de binômes constituées d'une coupe aménagée et d'un petit commentaire.

Nous nous sommes servi des catégories construites en 95/96 pour analyser les réponses des binômes 99/00. Elles permettent de classer la totalité des productions. Notons que deux binômes (le binôme 1 de la demi-classe 1, le binôme 13 de la demi-classe 2) rendent chacun deux réponses appartenant à des catégories différentes. Le tableau suivant récapitule nos résultats :

Catégories de réponses	Demi-classe 1 (9 binômes)	Demi-classe 2 (8 binômes)	TOTAL (nombre d'élèves)
1. Modèle à stabilité structurelle dynamique	3 binômes	2 binômes 1/2 binôme	11
2. Modèle à stabilité structurelle figée	1/2 binôme	0	1
3. Modèle sans stabilité structurelle et des ajouts partiels	5 binômes 1/2 binôme	4 binômes	19
4. Modèle sans stabilité structurelle et sans ajout	aucun binôme	1 binôme 1/2 binôme	3
TOTAL D'ELEVES	18	16	34

Figure 9.7 :

Mise en catégories des réponses (Evolution de la zone d'une dorsale, Première S 99/00)

C'est ici plus de la moitié de la classe qui n'entre pas spontanément dans la stabilité structurelle.

Avec cette deuxième étude de cas, nous confirmons la pertinence des catégories définies avec la classe de 95/96. Ces catégories sont en effet opérationnelles avec la classe 99/00. C'est le cas des catégories 3 (pas de stabilité structurelle et où l'accrétion est limitée à la partie supérieure des plaques) et 1 (stabilité structurelle dynamique, où l'accrétion concerne toute la hauteur des plaques), où nous classons toujours une majorité des réponses. Mais c'est aussi le cas des catégories rares, à savoir les catégories 2 et 4.

2. 3. Etude de l'ensemble des données

2.3.1. Aperçu général

Le tableau suivant récapitule les mises en catégories des réponses d'élèves obtenues durant 6 années en classe de Première S. Toutes les productions écrites des élèves ont été étudiées avec la grille de catégories établie avec les productions 1995/96.

Années scolaires (nombre d'élèves)	Catégorie 1 : modèle à stabilité structurelle dynamique	Catégorie 2 : modèle à stabilité structurelle figée	Catégorie 3 : modèle sans stabilité structurelle avec ajouts partiels	Catégorie 4 : modèle sans stabilité structurelle et sans ajout
	dérive/accrétion	volcanisme	dérive/accrétion localisée	dérive/volcanisme
93/94* (29)	19	0	6	3
94/95 (18)	7	0	11	
95/96 (24)	14	3	6	1
96/97 (29)	22	3	3	1
98/99** (22.)	11	6	0	3
99/00 (32)	9	1	19	3
154	82 (53%)	13 (9%)	45 (29%)	11 (7%)

* une réponse dans laquelle l'élève hésite entre stabilité structurelle (cat.1) et pas de stabilité structurelle (cat.3).

** un binôme ne se range dans aucune catégorie

- en blanc : mise en catégories reposant sur l'étude de la coupe

- en grisé : mise en catégories reposant sur l'étude de la coupe et du texte accompagnateur

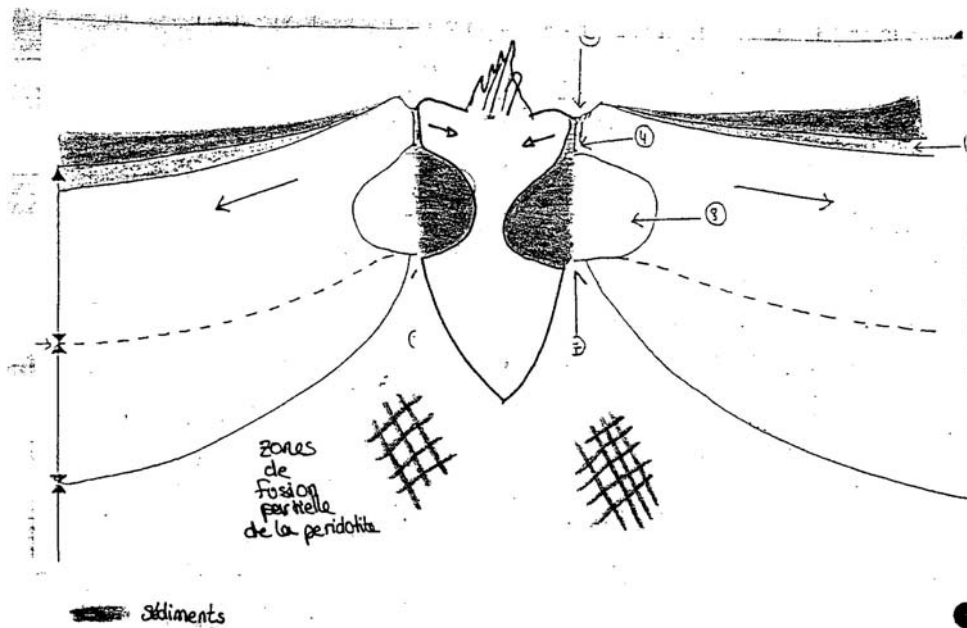
Figure 9.8 :

Mise en catégories des réponses (Evolution de la zone d'une dorsale, ensemble des données de Première S)

Sur un nombre d'élèves important (154), et bien qu'il y ait des fluctuations d'une année à l'autre, on confirme le fait que près de la moitié des élèves ne construisent pas spontanément le problème de la stabilité structurelle des scientifiques, et qu'une bonne partie d'entre eux limitent l'accrétion à la partie supérieure de la chambre magmatique.

2.3.2. Une nouvelle catégorie

La réponse d'un binôme 98/99 ne conserve pas la stabilité structurelle de la zone de la dorsale. Mais nous ne pouvons pas la ranger dans les catégories 3 et 4 car elle prévoit le dédoublement de la chambre magmatique et la formation d'une île dans la partie entre les 2 plaques. Voici cette réponse :



" La chambre magmatique se scinde en 2, ce qui a pour effet de créer 2 dorsales. Le mouvement des plaques crée l'entrechoquement de la zone entre les 2 nouvelles dorsale, ce qui provoque l'émergence".

**Figure 9.9 : Réponse avec dédoublement de la chambre magmatique
(Anne & Sophie, 98/99)**

Il est sûr que cette réponse envisage l'écartement des plaques initiales, ce qui explique le dédoublement de la dorsale, et que cet écartement se poursuit de part et d'autre de chaque dorsale. Pour preuve, des flèches rajoutées sur la coupe, de part et d'autre de l'axe des dorsales. Quant à l'accrétion, il nous semble qu'elle l'envisage, ne serait-ce que pour construire la partie intermédiaire entre les deux dorsales. Nous nous interrogeons sur ce résultat. Ce qui nous étonne cependant, c'est le maintien de l'aspect des deux zones de dorsale obtenues. Elles se ressemblent entre elles comme elles ressemblent à la dorsale initiale. Nous posons l'hypothèse qu'il s'agit d'un moyen qu'ont trouvé ces élèves pour ne pas aboutir, avec l'écartement, à la constitution d'une chambre magmatique énorme. Des couleurs sur la coupe signalent d'ailleurs les parties de chambre magmatique néoformées.

2.3.3. Remarques sur l'ensemble des données

Stabilité structurale et magmatisme

Le tableau ci-dessus nous montre que 82 réponses sur 154, soit un peu plus de la moitié de l'ensemble construit d'emblée une stabilité structurale dynamique de la zone (catégorie 1). Cette stabilité est permise par la solidification de magma sur la hauteur des plaques (en fait seulement sur la partie crustale des plaques, de la péridotite résiduelle complétant au niveau du manteau supérieur). En d'autres termes le magmatisme n'est pas réduit à des phénomènes de surface (volcanisme) mais il comprend également du plutonisme.

Stabilité structurelle et volcanisme

Si nous nous intéressons maintenant aux réponses des autres catégories (catégories 2, 3 et 4), nous remarquons qu'elles se limitent à l'aspect volcanisme du magmatisme, avec ce qu'il sous-entend de formes caractéristiques (édifices coniques, coulées) et de conceptions (la chambre magmatique comprise comme une citerne de magma renvoie à la conception locale du volcanisme). En conséquence, on peut identifier des problèmes retenus par les élèves :

- la montée du magma de la chambre magmatique : dans les réponses des élèves, l'éloignement des plaques qui crée une cheminée, ou la poussée du magma qui écarte les plaques et libère un passage en seraient des indicateurs ;
- le devenir du magma au-dessus de cette chambre : le remplissage de fissures, les cônes volcaniques ou les coulées ajoutés sur la coupe en témoigneraient ;
- la rythmicité des injections de magma en surface reconnaissable sur la coupe par superposition de coulées.

3. Etude des transcriptions de la confrontation des deux grands types de modèles d'élèves

En 99/00, suite à la réalisation du travail écrit, le professeur a demandé à un élève ayant produit le modèle avec accréation limitée à la partie supérieure (catégorie 3) et à un élève ayant produit un modèle avec stabilité structurelle (catégorie 1) de présenter successivement leur travail à la demi-classe. Cet ordre d'intervention a été choisi de façon à ce qu'une discussion ait lieu, notamment sur le modèle erroné (catégorie 3).

3.1. Méthodologie

Nous allons analyser plus précisément ces confrontations de modèles explicatifs, et les argumentations produites, de façon à dégager les contraintes empiriques construites ainsi que les nécessités portant sur les modèles, et à voir comment elles prennent en compte et articulent le passé, l'actuel et le futur. Nous nous intéresserons au cas de la demi-classe 1, pour limiter le volume de l'étude empirique (la deuxième demi-classe a fourni des argumentations moins riches). Anne-Sophie, formant le binôme 1 avec Donia, présente d'abord son modèle que nous rangeons dans la catégorie 3 ("avec ajout partiel d'un pan lithosphérique"), puis c'est au tour de Virginie (binôme 4), dont l'explication appartient à la catégorie 1 ("stabilité structurelle dynamique"). On trouvera, en annexe 10, les schémas que les binômes 1 et 4 ont mis au tableau et la transcription de la présentation et de la confrontation de ces modèles.

3.2. L'espace des contraintes en rapport avec le modèle d'accréation limitée à la partie supérieure des plaques (catégorie 3)

Le modèle d'Anne-Sophie et de Donia limite l'accréation au toit de la chambre magmatique. La présentation et la controverse que Virginie installe permettent d'identifier les contraintes empiriques que ce modèle prend en compte : le mouvement divergent des plaques (AS, 2), la sortie en surface du magma (AS, 2 ; D, 56 et 66 : *"le magma, il se dirige que vers le haut"*) et la situation de la chambre "concrétisée" par l'étude du profil sismique (*"dans le manteau supérieur"*, D, 66). Elles permettent de voir que le binôme construit l'impossibilité d'un renouvellement de la partie mantellique (et bas-crustale) des plaques. Car ce qui gêne Donia, dans le modèle d'un renouvellement des plaques sur toute leur hauteur, *"C'est qu'on voit que la croûte, que le manteau supérieur se renouvelle lui-aussi"* (D, 58) et plus loin on voit bien

qu'elle résiste à admettre cette idée : "*Oui, mais alors, le manteau, comment qui fait ? Alors, si le manteau, il se renouvelle...*" (D, 81). Cette impossibilité peut se dire en termes de nécessité d'un agrandissement de la chambre magmatique et de renouvellement de son toit (AS, 2, 48). On trouvera sur la figure 9.10 une représentation schématique de l'espace de contraintes ainsi défini.

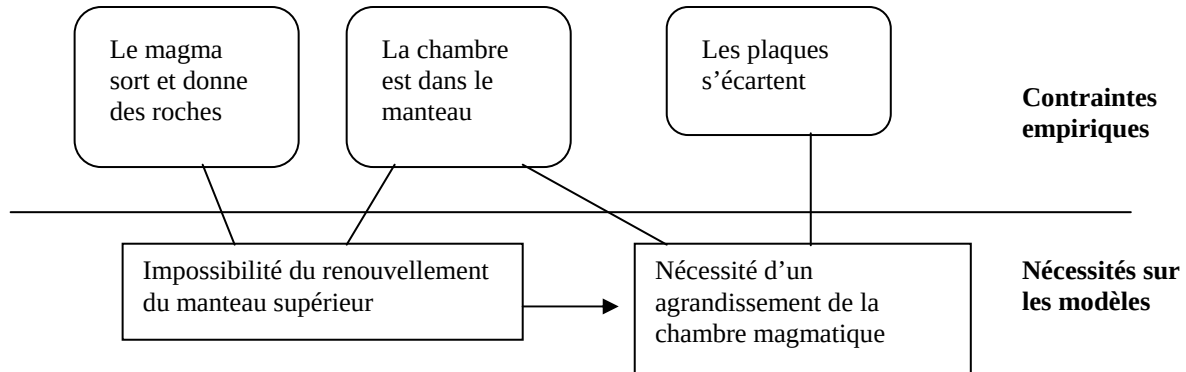


Figure 9.10 : L'évolution de la zone d'une dorsale
L'espace de contraintes du binôme 1 (Anne-Sophie et Donia)

3.3. L'espace des contraintes en rapport avec le modèle d'accrétion sur toute l'épaisseur des plaques (catégorie 1)

Virginie (binôme 4) conçoit un modèle d'accrétion sur toute l'épaisseur des plaques. Pour elle, il est impossible que cela soit autrement (V, 80). En opposition au modèle du binôme 1, elle affirme que ni la chambre magmatique, ni le rift ne grandissent (V, 6, 13) : c'est impossible qu'il en soit ainsi. Son raisonnement montre qu'elle fait fonctionner le système étudié du passé vers l'actuel : "*C'est pas possible (que le rift grandisse) parce que sinon, y-a des endroits où il y avait pas d'océan et ça s'est écarté. Ça veut dire que le rift, il fait tout l'océan. Ce serait bizarre!*" (V, 10). Virginie construit par des impossibilités la nécessité d'une accrétion sur toute l'épaisseur des plaques. Typhaine propose une solution en rapport avec cette nécessité : un "durcissement" du magma pas seulement sur le haut de la chambre magmatique mais aussi sur ses bords (T, 89). En termes de contraintes empiriques, Virginie prend en compte l'écartement des plaques (V, 6) et la largeur constante du rift (V, 13). L'espace de contraintes qu'elle construit est représenté ci-dessous (figure 9.11). On reste encore étonnée de la conviction qu'a Virginie de la stabilité structurelle et la difficulté qu'elle a à la justifier.

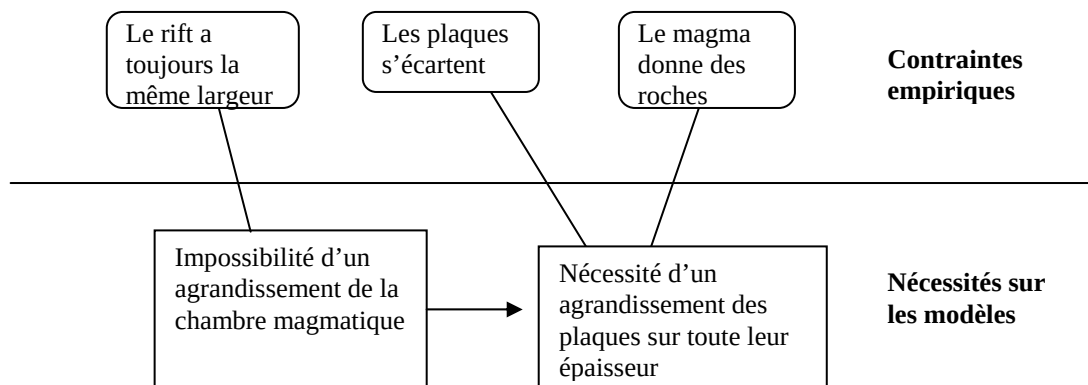


Figure 9.11 : L'évolution de la zone d'une dorsale
L'espace de contraintes du binôme 4 (Virginie)

4. Conclusion

Au terme de cette étude, que peut-on dire des modes de raisonnement des élèves et de leurs utilisations du temps ? Sans prétendre épuiser cette question, on peut faire ressortir plusieurs points :

- La projection dans l'avenir, sans utilisation explicite du passé, tout comme la "mise en histoire" des processus en jeu, n'est pas l'apanage des seuls élèves qui envisagent une accréation localisée. Elles se rencontrent aussi chez des élèves qui sont sur la stabilité structurelle (Exemple : Aurélie, demi-classe 2, 1999/00).
- En revanche, la mise en jeu de certaines conceptions, notamment en matière de volcanisme, semble être un facteur décisif d'entrée ou non dans la stabilité structurelle. Lorsque la conception du volcanisme aérien est prégnante, l'élève n'entre pas dans la stabilité structurelle.
- Il est souvent difficile pour les élèves de justifier la stabilité structurelle, quand ils la retiennent. Ils en viennent à dire avec force que c'est comme cela, qu'il est impossible que ce soit autrement. Est-ce à dire que, sans l'avoir vraiment conscientisé, ces élèves replacent la situation dans un contexte qui prend non seulement en compte l'avenir mais aussi le passé ? Et de ce fait, ils sont sensibles à la transposition du passé dans l'avenir. Cela leur permet d'éviter les erreurs inhérentes à l'utilisation instinctive d'un raisonnement séquentiel et de conceptions erronées. La prise en compte implicite d'une transposition du passé dans l'avenir serait une façon de se surveiller intellectuellement. Les élèves problématisent donc, mais leur problématisation n'est pas thématisée.

Ainsi, l'étude des productions des élèves montre bien les interventions compliquées du temps dans cette situation, ce que nous pressentions dans l'analyse didactique a priori (chapitre 8).

DEUXIEME ETUDE

LE PROBLEME DES OPHIOLITES

Actualisme de deuxième niveau et construction du temps long

CHAPITRE 10

LA MISE EN PLACE DES OPHIOLITES

Un état du savoir

Sommaire

1. La compréhension des ophiolites par les géologues actuels
2. Quelques éléments d'histoire des sciences
3. Mobilisation de l'actualisme par les chercheurs actuels
4. Problématisation de la mise en place des ophiolites par les chercheurs actuels
5. Conclusion

Nous nous intéressons maintenant au problème des ophiolites, ou "pierres serpent", que l'on trouve au sein de nombreuses chaînes de montagnes. Comme pour les problèmes précédemment étudiés, nous consacrons une première partie à la présentation de la solution actuelle de ce problème, notamment dans les liens qu'elle entretient avec le temps. Elle prend place dans le cadre théorique de la tectonique des plaques. Comme la mise en place de ce cadre théorique est récente (fin des années 1960), nous rapportons quelques éléments d'histoire de la géologie de façon à enrichir nos repères en matière de signification de ces roches. Enfin, nous étudions plus précisément le savoir actuel sous les angles de l'actualisme et de la problématisation : pour ce faire, nous nous référons à l'entretien que nous avons eu avec A. Michard, tectonicien, le 6 février 2001. Tous ces approfondissements doivent nous permettre d'entrer ensuite avec des "outils" dans l'analyse des productions des élèves confrontés à ce problème.

1. La compréhension des ophiolites par les géologues actuels

1.1 La nature des ophiolites

Depuis une réunion spéciale de la Penrose Conference organisée en 1972 par la Geological Society of America, les géologues s'accordent pour appeler "ophiolite" **un assemblage de roches bien précises**, mafiques à ultramafiques⁵⁹ (Anonyme, 1972). Voici la définition qui sert actuellement de référence (Juteau, Maury, 1999, p. 131-132) :

"Dans un assemblage ophiolitique complet, les faciès-types se rencontrent suivant la séquence suivante, de bas en haut :

⁵⁹ Une roche mafique (roche basique) est une roche magmatique pauvre en silice (d'où l'absence de quartz) et riche en magnésium, fer et calcium. Exemples : les basaltes, les gabbros.

Une roche ultramafique (roche ultrabasique) est une roche magmatique pauvre en silice (d'où l'absence de quartz) et très riche en magnésium, fer et calcium. Exemple : la péridotite. (A. Foucault., J.-F. Raoult, 2001).

- Le *complexe ultramafique*, consistant en harzburgites, lherzolites, dunites⁶⁰ en proportions variables, généralement avec une fabrique tectonique.
- Le *complexe gabbroïque*, le plus souvent avec des textures de cumulats, contenant communément des cumulats de péridotites et pyroxénites, et généralement moins déformé que le complexe ultramafique.
- Le *complexe filonien basique* ("dyke complex").
- Le *complexe volcanique basique*, généralement à *pillow-lavas*."

A ces faciès types, s'ajoutent des faciès-types associés comprenant notamment *"une série sédimentaire sus-jacente incluant typiquement des cherts⁶¹, de fins interlits argileux et des calcaires subordonnés"*.

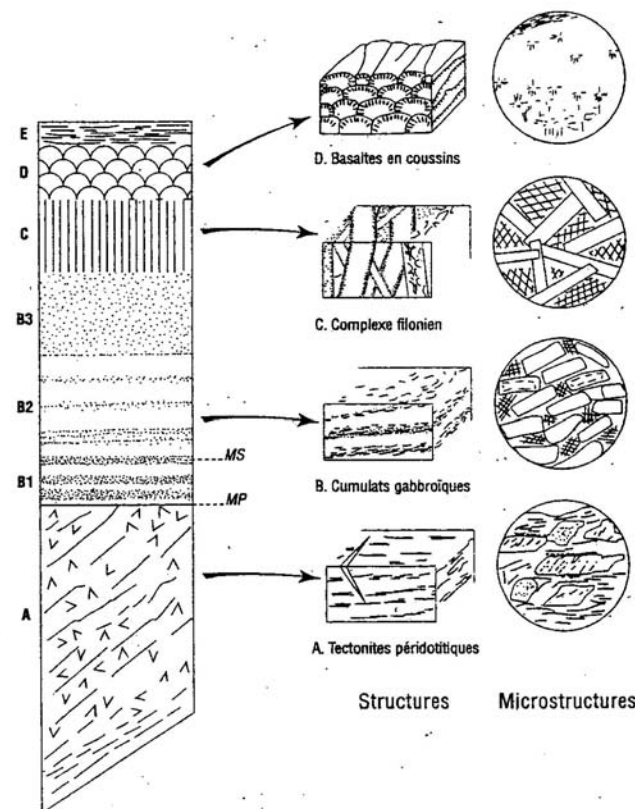


Figure 10.1 :

Le "log" ophiolitique, tel qu'il fut défini dans le "manifeste ophiolitique" de la Penrose Conference de 1972 (Juteau, Maury, 1999, p. 131)

Adolphe Nicolas reprend plus simplement cette définition et écrit (Nicolas, 1990, p. 92) qu' *"on admet maintenant qu'une ophiolite complète, c'est-à-dire dont les éléments n'ont pas été séparés par les déformations⁶² tectoniques est constituée par un empilement plus ou moins stratifié qui comprend de la base au sommet des péridotites plus ou moins altérées par hydratation en serpentinites, des gabbros présentant communément un beau litage, des essaims de filons basaltiques emboîtés les uns dans les autres constituant le complexe*

⁶⁰ Harzburgites, lherzolites et dunites sont des péridotites, roches magmatiques composées principalement d'olivine et de pyroxène(s).

⁶¹ Chert est un mot anglais désignant une roche sédimentaire siliceuse.

⁶² L'ophiolite d'Oman, qui n'est pas encore prise en étau lors de la collision de 2 masses continentales, a ces qualités. Elle est *"Actuellement posée sur la marge orientale du continent arabe"* (A. Nicolas, 1990, p. 95).

filonien, des laves basaltiques en coulées mais aussi souvent en gros oreillers ou tubes empilés les uns sur les autres et enfin des sédiments siliceux, les radiolarites"⁶³.

Pour notre étude, un complexe ophiolitique⁶⁴ est une association typique de roches avec, de bas en haut, des péridotites plus ou moins serpentinisées, des gabbros, des basaltes avec des figures de pillow lavas auxquels s'ajoutent éventuellement des formations sédimentaires.

1.2 La localisation des ophiolites

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).

1.3 L'explication des ophiolites

Les scientifiques actuels se placent dans le cadre de la théorie de la tectonique des plaques. Ils reconnaissent les ophiolites comme des **vestiges d'un plancher océanique ramené à la surface, sous forme de lambeaux, et charriés sur une bordure continentale**. L'explication se ramène donc à une histoire en 2 actes : la formation des roches des ophiolites qui relève du magmatisme d'une dorsale océanique (et de la sédimentation océanique), leur charriage sur une marge continentale (ce que l'on appelle encore obduction) qui relève de la tectonique. Développons un peu les particularités de chacun de ces actes :

1.3.1 De la nature des ophiolites à leur genèse

Les ophiolites sont **une association de roches magmatiques typiques** constituée, de bas en haut, par des péridotites plus ou moins serpentinisées, des gabbros, et des basaltes en pillow-lavas. Cette composition (type de roches, disposition de ces roches les unes par rapport aux autres, propriétés physico-chimiques de ces roches, épaisseur) rappelle **celle de la lithosphère océanique**, maintenant bien connue grâce aux études sismiques et aux explorations sous-marines.

Dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, la formation des roches des fonds océaniques se comprend par **le modèle de fonctionnement d'une dorsale océanique (modèle de l'accrétion)**. Une dorsale représente la frontière entre deux plaques divergentes. Là, du magma, formé un peu plus bas par fusion partielle de la péridotite du manteau, remonte et se solidifie plus ou moins rapidement selon qu'il parvient ou s'arrête à proximité de la surface ; ainsi, se mettent en place de nouveaux pans de lithosphère océanique, ce qui permet à chacune des deux plaques de s'agrandir (accrétion veut dire accroissement ou agrandissement). De haut en bas **il se met en place simultanément** :

⁶³ Termes ou expressions soulignés par nous.

⁶⁴ Nous prenons pour des synonymes les expressions ou les termes suivants : complexe ophiolitique, cortège ophiolitique, ophiolites, ophiolite.

- **une partie basaltique** (laves en coussins et filons). Les basaltes supérieurs, qui "tapissent" le fond des océans, présentent des figures de coussins typiques de la solidification du magma en milieu aquatique.
- **une partie gabbroïque**, de même composition chimique globale que les basaltes puisque issus du même magma parental, mais entièrement cristallisée du fait d'un refroidissement plus lent de ce magma.
- **une partie faite de péridotite résiduelle.**

Ces trois formations rocheuses sont **superposées et quasiment horizontales**. Du fait de la divergence des plaques, les nouveaux pans de lithosphère océanique ne tardent pas à être relégués à la périphérie de la dorsale pour constituer dans toute leur épaisseur le plancher océanique. Des **failles normales** hachent les bords du rift et traduisent les phénomènes de distension qui la concernent. Dès lors que de nouveaux morceaux de plancher océanique existent, il se dépose sur eux des sédiments marins, comprenant notamment des tests de micro-organismes planctoniques siliceux. La diagenèse de ces sédiments est à l'origine de **roches sédimentaires** siliceuses appelées cherts ou encore radiolarites.

La mise en tension de contraintes empiriques (roches des ophiolites tenues pour homologues des roches des fonds océaniques) et du modèle de l'accrétion impose **une première nécessité** au modèle de la formation des ophiolites : **une genèse de leurs roches comparable à celle de la lithosphère océanique**. Comme un certain nombre des caractéristiques des roches des ophiolites (nature et aspect des roches, propriétés physiques, voire épaisseur) sont comparables à celles des roches des fonds océaniques actuels, elles représentent un état initial préservé : ce sont des **invariants** dans le temps.

1.3.2 De la situation des ophiolites à leur lieu d'origine

Une autre caractéristique des ophiolites tient à **leur localisation et à la disposition de leurs éléments** : ce sont d'imposantes formations rocheuses, à l'air libre et parfois déformées, en position atypique sur ou au sein de lithosphère continentale⁶⁵. Si l'on reconnaît dans l'ophiolite un morceau de lithosphère océanique, il n'est pas aisé d'expliquer cette position. En effet, dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, le devenir "classique" de la lithosphère océanique, de part sa densité, est un enfoncement au niveau des zones de subduction. Comment expliquer, sans contredire la règle, une *telle "erreur de la nature"* ? (Michard, 1987, p. 313) Cela suppose de prendre en compte un certain nombre de données empiriques jugées pertinentes et de construire un modèle qui rende possible **une extraction, un déplacement et un charriage des fonds océaniques** dans le cadre théorique accepté. Les faits significatifs retenus forment un ensemble étoffé mobilisant toutes les échelles : **position émergée, contacts anormaux, inclinaison des formations rocheuses, position relative des différentes unités ophiolitiques, identification d'une semelle métamorphique, déformations de roches et de minéraux ...** Par comparaison avec de la lithosphère océanique actuelle, ce sont autant de données qui traduisent une modification par rapport à la situation initiale. Ces variants imposent au modèle **deux nécessités : sans préjuger de leur chronologie, celle d'une émergence et celle de phénomènes tectoniques**. Le modèle explicatif actuel y répond en mettant en jeu des phénomènes de compression occasionnant une rupture au sein d'une lithosphère océanique, puis l'extraction et le charriage d'une nappe

⁶⁵ L'ophiolite d'Oman a 500 km de long, 80 à 100 km de large, 10 à 15 km d'épaisseur. Elle est très accessible à l'observation car en région désertique et pas encore prise dans l'étau d'une collision continentale. (A. Michard, 1987).

ophiolitique. Entre le premier acte de l'histoire des ophiolites et le second, il est nécessaire d'envisager une inversion des mouvements : d'un régime de mouvements distensifs (acte 1), on passe à un régime compressif (acte 2).

Les dernières dizaines d'années ont vu la proposition par les scientifiques de plusieurs modèles de charriage des ophiolites :

- des modèles liant la formation des ophiolites à une subduction

Ces modèles envisagent la délamination d'une plaque plongeante : sa partie supérieure passe sur la croûte continentale, sa partie inférieure s'enfonce normalement. Ou encore une subduction 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. Si le premier modèle est maintenant délaissé, A. Michard écrit que celui de la subduction bloquée, introduit en 1971 par les Américains Davies et Smith et par les Anglais Dewey et Bird, est encore couramment admis. Sa force tient certainement au fait qu'il mobilise les deux concepts fondamentaux de la tectonique des plaques à savoir l'accrétion océanique et la subduction (A. Michard, 1987, p. 315-316).

- un modèle qui s'affranchit du processus de subduction. Dans le prolongement des travaux d'Armstrong et Dick (1974), des recherches françaises ont sérieusement étayé un modèle d'obduction sans rapport avec une subduction continentale. Ce modèle envisage l'obduction d'une **lithosphère océanique jeune** sur une autre lithosphère (océanique jeune ou continentale). Ce processus de charriage s'initierait à la faveur d'une rupture de la lithosphère océanique jeune survenant soit au niveau d'une dorsale soit dans la zone de transition entre une lithosphère océanique jeune et un continent (Michard, 1987, p. 318), suite au passage brusque d'un régime de divergence à un régime de convergence. Plusieurs sortes de données empiriques consolident ce modèle par rapport à celui d'une subduction bloquée : plan de rupture de la lithosphère faiblement incliné et en forme de cuillère, qui isole au-dessus de lui un coin de lithosphère océanique qui va fournir l'ophiolite ; faible épaisseur donc jeune âge de la lithosphère impliquée ; absence de volcanisme typique d'une zone de subduction.

2. Quelques éléments d'histoire des sciences

Actuellement, dans le paradigme de la tectonique des plaques, les ophiolites sont donc comprises comme étant des lambeaux de lithosphère océanique charriés sur de la lithosphère continentale. Mais leur origine a longtemps été l'objet de controverses et elle a suscité des modèles variés (Whitechurch, Ernwein, 1999). Quelles significations des ophiolites marquent l'histoire de la géologie ?

2.1 D'une roche à un ensemble de roches

C'est le naturaliste A. Brongniart qui en 1813 baptise les ophiolites. A l'origine, la "pierre serpent" est synonyme de **serpentinite**, une roche dont l'aspect rappelle la peau d'un serpent. Mais A. Brongniart s'aperçoit rapidement que les serpentinites sont associées à des roches volcaniques, des gabbros et des radiolarites. Le terme d'ophiolites est alors élargi à **un cortège de roches typiques**, qu'on appelle aussi "roches vertes", dont la serpentinite ; il est repris et développé au 19^e siècle et au début du 20^e par les géologues européens qui étudient les Alpes et les Apennins. Voici la première définition précise qu'en donne Gustav Steinmann en 1923 : les ophiolites sont *"l'association consanguine de roches essentiellement ultrabasiques composées surtout de péridotites (souvent serpentinisées) et, en quantités*

*subordonnées, de gabbros, diabases, spilites ou aussi norites*⁶⁶ *et roches associées*". (Whitechurch H., Ernewein M., 1999). Ce géologue allemand insiste non seulement sur l'assemblage de différentes roches magmatiques mais également sur leur parenté génétique : ces termes magmatiques se seraient différenciés au sein de vastes "laccolithes", lentille magmatiques de plusieurs kilomètres intrusives dans des sédiments géosynclinaux siliceux (Juteau, Maury, 1999, p. 129).

2.2 Le modèle des grands épanchements ophiolitiques sous-marins

A la moitié du 20^e siècle (entre 1930 et la fin des années 1960), les géologues découvrent de nouveaux massifs ophiolitiques en Méditerranée orientale (Grèce, Chypre, Syrie,...) dont la structure est moins tectonisée et métamorphisée que ceux qu'ils connaissent déjà. Leur étude va de pair avec le développement en Europe du modèle des grands épanchements ophiolitiques sous-marins, dont parlait G. Steinmann, dans le cadre de la théorie des géosynclinaux (Juteau, Maury, 1999, p. 129-130). La notion de géosynclinal qui a été "*mise en évidence par J. Hall (1811-1898), puis baptisée par J.D. Dana (1813-1895) dans les Appalaches, développée par E. Haug (1861-1927) à propos des Alpes, généralisée par H. Stille (1876-1966), est au coeur même de la pensée géologique*" (Aubouin et al, 1967, tome 2, p. 280)⁶⁷. Les géosynclinaux correspondent à des bassins océaniques subsidants sur l'emplacement desquels prennent naissance la plupart des chaînes de montagnes. Ce qui les caractérise est leur organisation et leur évolution dans le temps. Chaque géosynclinal se définit par un domaine bordant le continent (espace miogéosynclinal, espace externe) et un domaine au delà de ce premier espace (espace eugéosynclinal, espace interne). Chacun de ces espaces comprend un sillon (une sorte de fosse) et une ride (une saillie sous-marine). La formation d'une chaîne de montagnes s'explique par la fermeture du géosynclinal, dans une logique d'élévation et de serrage de ses unités ; elle démarre par un soulèvement de la ride eugéosynclinale qui se propage ensuite aux unités plus proches du continent. Mouvements en compression et soulèvements conduisent à un déversement des unités géosynclinales internes sur les unités les plus externes. Dans ce contexte théorique, les ophiolites se forment avant la période orogénique, alors que le géosynclinal est bien différencié (il en est à son stade d'état). Leur mise en place se fait sur la marge interne du sillon eugéosynclinal, voir sur le flanc de la ride eugéosynclinale. Il se produit d'imposants épanchements magmatiques sous-marins, à la faveur de grandes déchirures dans ces zones (Aubouin et al, 1968, tome 3, p. 178-179 ; Juteau, Maury, 1999, p. 129-130).

Il y a donc à peine 50 ans, le modèle retenu par les géologues européens⁶⁸ expliquait la formation des ophiolites par la mise en place d'imposantes masses magmatiques en bordure de bassins appelés géosynclinaux, quand des phénomènes distensifs les affectent encore. Selon eux, les roches des ophiolites (des péridotites aux basaltes) proviennent de la solidification d'un même magma très basique. La partie externe de la masse magmatique se fige au contact de l'eau de mer et donne les termes rocheux basaltiques ; la partie interne, protégée par la

⁶⁶ Péridotite = roche magmatique plutonique ; gabbro = roche magmatique plutonique ; diabase = dolérite = roche magmatique intermédiaire entre les gabbros et les basaltes ; spilite = roche magmatique effusive proche du basalte ; norite = une sorte de gabbro.

⁶⁷ Dans un article intitulé "*A propos d'un centenaire : les aventures de la notion de géosynclinal*", J. Aubouin fait un substantiel résumé historique des principales conceptions du géosynclinal (1958-59)

⁶⁸ Les géologues nord-américains ont longtemps ignoré les ophiolites (Nicolas, 1990, p. 92) ; et lorsqu'ils les cartographiaient, c'était en distinguant les assemblages grenus (péridotite, gabbros) des basaltes à pillow lavas (T. Juteau, R. Maury, 1999, p 130).

chape basaltique, est l'objet d'une différenciation lente qui conduit aux autres formations rocheuses en disposition ordonnée (Aubouin et al, 1968, tome 1, pp. 565-568).

2.3 Le modèle de fragments de lithosphère océanique fossile

La théorie de la tectonique des plaques s'installe durablement dans la communauté scientifique à la fin des années soixante. L'explication des ophiolites est reprise. De nouveaux massifs sont étudiés de façon détaillées, notamment celui d'Oman (*"La plus belle ophiolite du monde"*, Nicolas, 1990, p. 89). A la fin des années 1960, plusieurs études concluent à la *"mise en place tectonique de fragments de lithosphère océaniques"* (Juteau et Maury, 1999, p. 129) et à la distinction à faire entre la partie basale péridotitique et les roches magmatiques qui la surmontent. Leurs déformations ne sont pas les mêmes, la première portant des traces de déformations de haute température alors que les secondes sont peu déformées : c'est donc qu'il y a à envisager une différence de formation de ces roches. C'est ce que prend en compte le modèle de l'origine des ophiolites maintenant admis par la communauté des géologues et que nous avons développé plus haut.

Devant cette réinterprétation récente des ophiolites, on ne peut s'empêcher de souligner l'importance des travaux de E. Suess (1831-1914) et de M. Bertrand (1847-1907) qui, à la fin du 19^e siècle, ont réussi à faire accepter l'absurde et l'impensable pour la communauté géologique d'alors : les grandes nappes de charriage. Le premier a mis en valeur les mouvements latéraux, le second a non seulement interprété magistralement certains contacts anormaux entre terrains d'âge différents comme de grands recouvrements (Gohau, 1987, p. 199-200) mais il a aussi pensé l'orogénèse⁶⁹ comme un phénomène lent, graduel (actualisme de 2^e niveau) et répétitif (Gohau, 1987, p.199- ; Ellenberger, 1994, pp. 317, 331).

3. Mobilisation de l'actualisme par les chercheurs actuels

Les géologues actuels ne se mettent pas dans le cadre du steady state : pour eux, la physionomie de la Terre change au cours des temps géologiques. Ceux qui s'intéressent plus particulièrement aux chaînes de montagnes, avec ou sans ophiolites, ne dérogent pas à la règle et sont, comme leur illustre prédécesseur L. Elie de Beaumont (1798-1874), dans un cadre directionnaliste progressif. Essayons de voir comment ces chercheurs utilisent (et de quelle manière) l'actualisme méthodologique, quand nous savons qu'il est difficile à tenir dans ce cadre (voir le chapitre sur l'actualisme). Notre étude s'appuie principalement sur le compte rendu⁷⁰ de l'entretien que nous a accordé A. Michard, tectonicien, Professeur émérite à l'Université de Paris XI, le mardi 6 février 2001.

3.1 Méthodologie

Une façon pour nous d'apprécier la place, le rôle et les limites de l'actualisme est de repérer, dans l'entretien que nous avons eu avec A. Michard, pour quelle(s) partie(s) de l'histoire des ophiolites ce chercheur relève des difficultés d'appréhension des mécanismes. Nous faisons l'hypothèse que ce qui "va de soi" dans l'histoire que construit le chercheur mobilise essentiellement de l'actualisme d'analogie, autrement dit qu'il peut être mis en correspondance avec des phénomènes actuels perceptibles par l'homme ; en revanche, dès lors que le

⁶⁹ On appelle orogénèse, tout processus conduisant à la formation de reliefs (A.Foucault., J.-F.Raoult, 2001).

⁷⁰ Le compte rendu de notre entretien avec A. Michard figure en annexe 2 de cette recherche. A notre demande, A. Michard en a fait une lecture critique. Le document présenté prend en compte ses remarques.

chercheur signale des difficultés de temps et/ou d'espace, c'est que le recours à l'actualisme d'analogie fait problème. A quoi recourent alors les chercheurs ? A de l'actualisme de 2^e niveau ? A du catastrophisme ? Et comme nous ne pouvons pas nous limiter au seul point de vue d'un spécialiste, nous compléterons notre étude par l'éclairage d'autres chercheurs actuels et par les enseignements qu'apporte l'histoire de la géologie.

3.2 La place de l'actualisme d'analogie dans l'histoire des ophiolites

Dans la mesure où A. Michard ne soulève pas de difficultés pour la formation des roches des ophiolites, qui relève du magmatisme d'une dorsale océanique, nous pouvons penser que la compréhension de cette formation met en jeu de l'actualisme d'analogie. A. Michard nous dit que *"La communauté scientifique actuelle dans son ensemble reconnaît une origine océanique aux ophiolites"* (compte rendu p. 1) ; et lorsqu'il caractérise tout scénario de mise en place des ophiolites, nous retenons qu'il y a d'abord un *"Régime de divergence de plaques et fabrication d'un océan"* (compte rendu pp. 1 et 2). Mais il ajoute que des controverses existent entre chercheurs, notamment sur la largeur de l'océan géniteur, sur la nature de la dorsale (lente ou rapide) et sur la présence ou non d'un arc insulaire (compte rendu p. 1). Nous pensons pouvoir écrire que ces points de discussion ne remettent pas en cause le processus général de formation des roches ophiolitiques magmatiques. Notons également qu' A. Michard, après avoir parlé du scénario complet de mise en place des ophiolites d'Oman pointe la difficulté possible *"de se représenter les millions d'années nécessaires à la réalisation de tels phénomènes"* (compte rendu p. 2). Ce scénario se décompose en 3 moments (dont le premier est la fabrication d'un océan) et sa *"durée totale est estimée à quelques dizaines de millions d'années, dont une dizaine pour les épisodes 2 et 3 (de 90 Ma à 80 Ma pour Oman)"* (compte rendu p. 2). Cela fait au moins une dizaine de millions d'années pour le fonctionnement de la dorsale impliquée. Il nous semble que dans ces propos, ce qui peut faire problème n'est pas tant la compréhension du déroulement des processus que l'appropriation de l'ampleur de leur durée.

3.3 L'actualisme et le charriage de la lithosphère océanique

C'est à propos du charriage de la lithosphère océanique qu'A. Michard prend des précautions :

- en termes de cadre théorique et de tâches : *"Reconstituer un scénario tectonique, c'est retrouver des événements et de l'espace vraisemblables dans le contexte de la paléodynamique des plaques"* (compte rendu p. 3) ;
- en termes de résistance des chercheurs. *"Actuellement, certains chercheurs minimisent de tels déplacements : cela les conduit à donner une origine autochtone aux ophiolites et à voir autant de petits océans qu'il y a d'alignements ophiolitiques"* (compte rendu p. 3).
- en termes de vigilance du chercheur vis à vis des contraintes empiriques : *"Le terrain sert à convaincre mais son interprétation n'est pas neutre. Ainsi, parce que des formations géologiques récentes recouvrent les plus anciennes, tout n'est pas directement accessible à l'étude. Il faut procéder à des interpolations entre affleurements pour "combler les blancs". Cela fait qu'il entre toujours une part de subjectivité"* (compte rendu p. 3).

On a là des indicateurs pour dire que l'actualisme d'analogie n'apparaît pas suffisant pour le phénomène de charriage. Pourtant A. Michard nous donne des références dans la nature actuelle : les géologues identifient des zones *"où il existe un cisaillement intra-océanique et même des zones où une obduction est en cours"*. Cela se passe notamment dans l'Ouest du Pacifique (Nouvelle Calédonie, Nouvelle Guinée ou Taïwan (compte rendu p. 5). Mais en fait, le chercheur ne voit pas une obduction se faire en totalité sous nos yeux. C'est parce qu'il a en tête le modèle "entier" de l'obduction qu'il interprète le cisaillement comme un début

d'obduction ou qu'il comprend d'autres observations actuelles comme de l'obduction en cours. Pour obtenir la totalité de l'obduction, il faut du temps long. L'actuel n'offre donc au chercheur que quelques "images" éparpillées que celui-ci reconnaît comme éléments d'un film infiniment long qu'il a construit et qui ne se déroulera jamais entièrement sous ses yeux. Ce qui se passe actuellement nous renseigne en référence à un modèle et à la condition d'adjoindre **du temps long**.

D'autres chercheurs font également référence à l'actuel. L. Jolivet écrit qu'*"on connaît un petit nombre d'exemples de déformations intraocéaniques compressives en cours de formation"* (Jolivet, 1997, p. 220). Il cite la ride de Zenisu, au large du Japon, dont la géométrie actuelle laisse envisager la mise en place de petites nappes ophiolitiques. Mais pour trouver une nappe ophiolitique en préparation comparable en ampleur à celle d'Oman, il renvoie à une zone située au sein de la plaque indo-australienne : *"Il s'agit de la seule zone connue à l'heure actuelle d'une déformation compressive intraocéanique dont l'échelle soit comparable à celles des nappes ophiolitiques Crétacé supérieur"* (Jolivet, 1997, p. 221). Ces exemples ont deux particularités :

- ils se distinguent les uns des autres par leur ampleur spatiale. Un certain nombre préparent de petites obductions ; un seul peut être à l'origine d'une grande obduction.
- ils ne donnent, comme ceux d'A. Michard, que le démarrage ou qu'une infime partie du phénomène d'obduction.

Par ces deux aspects, l'actualisme d'analogie est mis en défaut. Pour saisir l'obduction dans sa totalité, il est bien nécessaire de mettre en jeu une longue durée : les chercheurs recourent à l'actualisme de 2^e niveau. C'est ce qu'exprime A. Nicolas, pour qui le charriage de morceaux de lithosphère océanique sur une marge continentale est un événement difficile à reconstituer mentalement tant son ampleur est grande et parce que *"contrairement aux autres manifestations passées de la tectonique des plaques, pour lesquelles on peut observer une activité actuelle correspondante, nous ne connaissons aucun exemple montrant clairement l'extraction actuelle d'une ophiolite à partir d'un océan"* (Nicolas, 1990, p. 94). Et cette difficulté de représentation mentale est encore majorée parce que dans le modèle de la tectonique des plaques, le devenir "classique" de la lithosphère océanique est son enfoncement dans la Terre au niveau des zones de subduction.

3.4 L'actualisme et le changement de régime de mouvements

Nous venons de voir que, pour le géologue, la formation des roches des ophiolites se comprend en mobilisant un actualisme d'analogie alors que l'explication de leur charriage requiert un actualisme de 2^e niveau. Il est un dernier point que nous souhaitons envisager à la lumière des propos d'A. Michard. C'est le changement des mouvements des plaques qui fait, dans son modèle, basculer d'un régime de divergence à un régime de convergence. A. Michard dépasse le cas des ophiolites pour celui de la formation des chaînes de montagnes (compte rendu p. 4). Il nous rappelle que des roches magmatiques se forment pendant les périodes de divergence, des roches métamorphiques pendant les périodes de convergence. Il nous précise que le découpage du temps emploie notamment l'évolution d'associations de minéraux du métamorphisme et l'étude des déformations (plissement...). Ces études permettent, pour une unité donnée de la chaîne de montagnes, de *"repérer des marques d'un enfoncement continu ou d'une remontée continue et envisager entre ces différentes périodes d'évolution un changement de régime (exemple : inversion d'un mouvement), qui s'installe avec une certaine progressivité..."* (compte rendu p. 5). Puisqu'il est nécessaire d'envisager la formation de roches dans un contexte de divergence (nécessité 1), et d'imaginer la transformation et/ou la déformation ultérieure de certaines de ces roches dans un contexte de

convergence (nécessité 2), le changement de régime est une nécessité (nécessité 3) résultant des nécessités 1 et 2. Quelles références avons-nous dans la nature actuelle qui nous aident à comprendre le changement de régime ? Il nous semble que les deux actualismes sont en jeu explicitement :

- l'actualisme d'analogie, mais il s'opère vis à vis des travaux de laboratoire sur les domaines P, T de stabilité des minéraux.

- l'actualisme de 2^e niveau, avec nécessité du temps long qui rend compte d'une bascule progressive d'un régime à l'autre, *"à la manière de la période du solstice pour les saisons"* (compte rendu p. 5).

Mais le chercheur n'exclut pas une modification du rythme et même des bascules plus catastrophiques. Il ne les convoque que sous la pression des données empiriques et sous la contrainte de la durée disponible.

4. Problématisation de la mise en place des ophiolites par les chercheurs actuels

Dans ce paragraphe, nous cherchons à comprendre comment les géologues actuels construisent le problème de la mise en place des ophiolites.

4.1 Méthodologie

Notre analyse repose sur les travaux de Fabre et de C. Orange (1997 ; 1999) qu'elle tente d'appliquer au travail du spécialiste représenté par le géologue tectonicien A. Michard. Pour construire le problème de l'origine des ophiolites, il est nécessaire d'identifier les contraintes empiriques pertinentes, c'est-à-dire les faits signifiants qu'il faut expliquer, les contraintes théoriques valables (les types d'explications envisageables, les règles que l'on se donne) et les nécessités portant sur les modèles explicatifs possibles. En notant bien que contraintes et nécessités n'existent qu'en tension les unes avec les autres : les contraintes empiriques pertinentes n'ont de sens que dans une certaine problématisation ; les nécessités auxquelles doit répondre le modèle sont liées aux contraintes empiriques retenues. Pour ce qui est de l'explication des ophiolites, **un modèle** prévaut actuellement : A. Michard nous dit en effet que *"La communauté scientifique actuelle dans son ensemble reconnaît une origine océanique aux ophiolites et admet que leur mise en place sur les marges continentales (obduction) se fait dans un contexte de subduction au sens large."* (Compte rendu, p. 1). Nous allons donc nous attacher à **retrouver les contraintes empiriques et les nécessités sur le modèle** qui se cachent derrière cette solution partagée.

4.2 Les nécessités sur le modèle

L'explication générale des ophiolites que donne A. Michard nous ramène à un scénario général en deux actes précédemment développés :

- 1) leur formation dans un contexte de dorsale océanique ;
- 2) leur charriage sur une marge continentale.

Compte tenu de la diversité des contextes des massifs ophiolitiques (posé sur une plateforme continentale comme l'ophiolite d'Oman ou en étau au sein de chaînes de montagnes comme le Massif du Chenaillet), A. Michard précise que la caractéristique de tout scénario se définit entre deux pôles extrêmes : *"une mise en place hors collision continentale (exemple : Oman)"* ou *"une mise en place synchrone d'une collision (exemple : Alpes)"* (compte rendu, p. 1-2). Mais nous retrouvons dans ces deux pôles les deux actes précédemment énoncés (formation, charriage) et le passage de l'un à l'autre par un changement de régime des mouvements. Et, même si A. Michard nous dit que des points de controverse entre chercheurs portent sur

l'océan géniteur (largeur, type de dorsale ; compte rendu p. 1), il ressort que leur préoccupation majeure concerne le deuxième acte : elle est fondamentalement de *"comprendre comment s'est faite réellement la mise en place des ophiolites et d'estimer la dimension de leur charriage"* (compte rendu p. 2).

En termes de contraintes sur le modèle, il y a **une première nécessité de formation conjointe (de par l'organisation) des roches des ophiolites** : c'est une genèse comparable à celle des roches de la lithosphère océanique ; **la deuxième nécessité est celle d'un charriage de ces roches océaniques sur une marge continentale**. Enfin, **une troisième nécessité, le passage d'un régime de divergence à un régime de convergence de plaques**, résulte des deux premières. C'est semble-t-il la construction de cette deuxième nécessité qui pose problème aux géologues. D'ailleurs, A. Michard nous rappelle qu' *"historiquement, le concept de charriage s'est imposé avec difficulté. il était encore discuté au début du 20^è siècle"* ⁷¹. Et il ajoute qu' *"actuellement, certains chercheurs minimisent de tels déplacements"* (compte rendu p. 3).

Notons enfin qu'à plusieurs reprises (compte rendu pp.1, 3, 4), A. Michard met la construction des scénarios sous la tutelle des *"contraintes imposées par la paléodynamique des plaques"* (compte rendu p. 1). La construction des nécessités sur le modèle par les chercheurs met donc en jeu des contraintes fortes que nous allons maintenant développer : les contraintes de la paléodynamique des plaques et des contraintes empiriques fournies par le terrain et le laboratoire (compte rendu p. 3).

4.3 Les contraintes théoriques

Nous qualifions de contraintes théoriques les contraintes imposées par la théorie de la tectonique des plaques. Car *"La toile de fond reste cependant le cadre de la tectonique des plaques"* (compte rendu p.4). Ces contraintes pèsent sur le modèle en termes d'évènements et d'espace vraisemblables (compte rendu p. 3), de temps de réalisation des phénomènes (exemple : vitesse de déplacement des plaques ; compte rendu p.2), de raccrochement des scénarios locaux avec le *"grand ballet des plaques"* (compte rendu p. 4). Mais A. Michard nous dit que le géologue a un peu de souplesse :

- en termes d'espace : *"le cadre général (fixé par les anomalies magnétiques des océans actuels) laisse une marge de manoeuvre allant jusqu'à quelques centaines de kilomètres"*. (compte rendu p. 4)

- en termes de vitesse des phénomènes : *"La brutalité des phénomènes géologiques existe (voir les séismes) et on peut également imaginer l'accélération brusque d'un phénomène continu. On conçoit par exemple que des phénomènes plus catastrophiques aient contribué à une modification du mouvement des plaques, ou aux inversions des pôles magnétiques du globe"* (compte rendu p. 5)

D'autre part, le chercheur dispose maintenant de modèles informatiques comme autant de modèles explicatifs possibles (compte rendu p. 2) auxquels ils confrontent les données empiriques propres au massif qu'il étudie. Ces modèles satisfont aux contraintes de la théorie de la tectonique des plaques.

⁷¹ Le concept de charriage date de la fin du 19^è siècle. M. Bertrand le développe en 1884, dans une communication à la Société géologique et en 1887, quand il propose une nouvelle explication de l'anomalie stratigraphique du Beausset dans le Var (Gohau, 1987, pp. 199 et 206). Ellenberger (1994, p. 317) précise bien que ce n'est que contrainte et forcée que la communauté géologique a accepté le fait des charriages.

Le chercheur qui reconstitue un scénario de mise en place d'ophiolites respecte donc des règles imposées par le cadre de la tectonique des plaques. Il y a dans ces contraintes une certaine marge de manoeuvre, mais tout n'est pas possible. D'autre part, les discussions entre pairs qui participent en permanence du travail du chercheur (compte rendu p. 3), les caractéristiques des publications de qualité (compte rendu p. 6) ont sûrement un rôle de limitation des écarts incontrôlés.

4.4 Les contraintes empiriques

A un moment donné de l'entretien, A. Michard explique comment les chercheurs construisent l'histoire d'un massif ophiolitique encore peu étudié, par exemple : un massif de l'Alaska (compte rendu p. 3). C'est pour nous une façon de faire un repérage des contraintes empiriques qu'ils identifient.

Le chercheur qui entame l'étude d'un massif ophiolitique encore peu étudié (exemple : un massif de l'Alaska) épuise tout d'abord la bibliographie sur le sujet : cela consiste à reprendre les travaux déjà existants. Les exemples que nous donne Michard (ophiolites d'Oman, ophiolites des Alpes et de l'Himalaya...) montrent l'exhaustivité de la recherche car ce sont tous les types d'ophiolites qui sont revisités (ophiolites mises en place hors d'une collision ou ophiolites synchrones d'une collision). C'est vraisemblablement une façon de se doter d'une riche gamme de scénarios possibles et de prévoir une panoplie fournie de contraintes empiriques. C'est le moment ensuite *"de recueillir un ensemble fourni de données de terrain (mesures de pendages, position des plans de schistosité et linéation, étude des fossiles, prélèvement d'échantillons...) complété d'un long travail au laboratoire (étude des nanofossiles, des minéraux métamorphiques avec identification au microscope et à la microsonde, des micas à des fins de datations au K/Ar, des zircons pour les traces de fission, des échantillons orientés pour mieux comprendre les relations schistosité/métamorphisme, des échantillons utiles pour faire du paléomagnétisme...)"* (compte rendu p.3). Voilà donc des contraintes empiriques dont nous relevons les caractéristiques suivantes.

4.4.1 Un registre empirique de terrain et un registre empirique de laboratoire

Les contraintes empiriques appartiennent à deux registres complémentaires : **un registre empirique de terrain** (exemple : la mesure in situ du pendage des formations rocheuses, l'identification au microscope de minéraux du métamorphisme)⁷² et **un registre empirique de laboratoire** (exemple : les domaines de stabilité pression/température des minéraux du métamorphisme). Ces deux registres se complètent. A. Michard nous le précise : *"Le "terrain" complété par le "laboratoire" est indispensable"* (compte rendu p. 3) ; il cite l'exemple du glaucophane, un minéral du métamorphisme, dont la présence signe un contexte de haute pression/basse température. Le champ de stabilité Pression/Température du glaucophane, comme celui d'autres minéraux, est connu expérimentalement : c'est une donnée empirique de laboratoire.

⁷² C. Chopin, spécialiste du métamorphisme alpin de haute pression, range les données pétrographiques (de l'oeil nu au microscope) dans les données de terrain (intervention 72, entretien du 1er avril 1997 ; C. Orange (dir.), 1998, p. 38).

4.4.2 Des contraintes empiriques à expliquer et des contraintes empiriques qui servent à expliquer

Les contraintes empiriques de "terrain" et de "laboratoire" peuvent être **des données que l'on cherche à expliquer** (en cela elles sont sources de problème) ou **des données qui donnent une contrainte sur l'explication** (compte rendu p. 3). A. Michard montre que l'identification de glaucophane à l'oeil nu et au microscope (donnée empirique de terrain) est, pour les chercheurs actuels, une donnée qui sert à expliquer. Sa présence, mise en relation avec son domaine de stabilité pression/température (donnée empirique de laboratoire), *"signe une subduction ou l'obduction d'une masse lourde"* (compte rendu p.3) et aide donc à la construction du modèle.

4.4.3. Les contraintes empiriques et les nécessités du scénario

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

Certains *"prélèvements d'échantillons"*, le *"prélèvement d'échantillons utiles pour faire du paléomagnétisme"* et l'*"étude des fossiles et des nanofossiles"* servent la nécessité d'une formation des roches (compte rendu p. 3). Nous remarquons qu'A. Michard **ne nous parle pas explicitement de l'assemblage caractéristique de roches** (serpentinites, gabbros, basaltes en coussins et roches sédimentaires). Peut-être est-ce sous-entendu dans les prélèvements d'échantillons. Il nous semble cependant que cette contrainte relève de l'évidence première du massif et que les investigations empiriques du chercheur la prennent en compte mais se positionnent au delà de cette reconnaissance. Ceci est confirmé par la référence implicite aux basaltes que le chercheur utilise pour faire du paléomagnétisme. En revanche, nous constatons **un intérêt du chercheur pour les fossiles à toutes les échelles**, de l'oeil nu au microscope électronique. Les fossiles se trouvent dans les roches sédimentaires (radiolarites) associées aux roches magmatiques des ophiolites et dans les roches sédimentaires au sein desquelles ou sur lesquelles se trouvent les ophiolites. Il y a notamment des fossiles de faciès qui témoignent d'un milieu de vie particulier et permettent de reconstituer un paléoenvironnement. A. Michard nous dit plus tard (compte rendu p. 4) que les fossiles (fossiles stratigraphiques et de faciès) sont sans doute les éléments les plus fiables dans le domaine des reconstructions paléogéodynamiques.

- la nécessité d'un charriage de lithosphère océanique sur une marge continentale

C'est en rapport avec cette nécessité, dont le mécanisme devient un "sous-problème", qu' A. Michard nous donne le plus d'exemples de contraintes empiriques (compte rendu p. 3). Il y a les *"mesures de pendages"*, la *"position des plans de schistosité et linéation"*, la prise en compte *"des minéraux métamorphiques avec identification au microscope et à la microsonde, le prélèvement d' "échantillons orientés pour mieux comprendre les relations schistosité/métamorphisme"*. Tout se passe comme si la priorité était donnée à la compréhension des phénomènes tectoniques et métamorphiques en jeu dans ce contexte, ce que nous avons déjà relevé plus haut. Il est vrai que cette reconstitution est difficile, car quel que soit le type de massif ophiolitique ou plus globalement de formation d'une chaîne de montagnes, *"les processus de transformation de minéraux ou de création de structures n'ont pas été partout synchrones"* (compte rendu p. 4) et qu'il y a à *"déjouer les pièges tectoniques tardifs qui cachent ce qui s'est passé"* (compte rendu p. 2).

Enfin terminons par des données empiriques qui selon nous servent les deux types de nécessités.

- les contraintes empiriques qui permettent une datation des différentes formations rocheuses : l'"étude des fossiles et des nanofossiles" à valeur de fossiles stratigraphiques (c'est-à-dire de fossiles "marqueurs du temps") des roches sédimentaires ; les "*micas à des fins de datations au K/Ar*" et les "*zircons pour la méthode U/Pb ou pour les traces de fission*" qui permettent une datation des roches magmatiques et métamorphiques. A. Michard nous dit que l'estimation de la durée totale d'un scénario ophiolitique ou de celle de ses épisodes est permise notamment par un "*encadrement temporel des ophiolites grâce à des données stratigraphiques et isotopiques*" (compte rendu p. 2). Les chercheurs procèdent notamment à la datation des couches les plus récentes de la nappe océanique (sédiments de la marge continentale ayant été raclés et poussés et ophiolites) et datation des dernières couches déposées sur le continent et qui ont été recouvertes par le matériel océanique de la nappe (A. Michard, 1987, p. 316).
- la cartographie (compte rendu p. 2 et 3) qui positionne géométriquement et géographiquement les corps ophiolitiques étudiés.

En résumé, les contraintes empiriques que prend en compte le chercheur sont nombreuses, diverses et sophistiquées, en ce sens qu'elles mobilisent un recueil et des moyens d'étude outillés. Nous notons l'importance de celles en rapport avec le deuxième acte du scénario des ophiolites (le charriage de lithosphère océanique).

5. Conclusion

L'explication de la mise en place des ophiolites par les chercheurs actuels peut se comprendre comme la construction de trois nécessités importantes : la nécessité d'une formation conjointe des roches des ophiolites, celle de leur charriage sur une marge continentale et celle d'un changement de régime des mouvements (passage d'un régime de divergence à un régime de convergence). Elle mobilise les deux niveaux d'actualisme que nous avons définis (chapitre 2) :

- L'actualisme de 1er niveau (actualisme d'analogie), pour lequel le temps n'a pas d'importance, sous-tend la construction de la nécessité d'une formation conjointe des roches ; mais il intervient aussi dans la construction des deux autres nécessités, au travers notamment du recours à un "registre empirique de laboratoire".
- L'actualisme de 2è niveau intervient dans la construction de la nécessité du phénomène de charriage, mais aussi dans celle d'un changement de régime des mouvements. L'actuel ne fournit pas d'obduction perceptible à l'homme. Si malgré cela, il est une référence en la matière pour le géologue, c'est parce que ce dernier conçoit un modèle d'obduction que le temps long rend possible : ce temps long ne fait pas que contenir un phénomène actuel que l'on étire sur une plus ou moins grande durée (actualisme d'extrapolation) ; il engendre un phénomène (l'obduction) dont la nature actuelle n'offre que quelques "images" éparses à celui qui l'invente.

La figure 10.2 propose l'espace de contraintes que l'on peut construire en se basant sur les propos d'A. Michard. On retrouve les deux types d'actualismes dans leurs rapports avec les nécessités sur le modèle de mise en place des ophiolites.

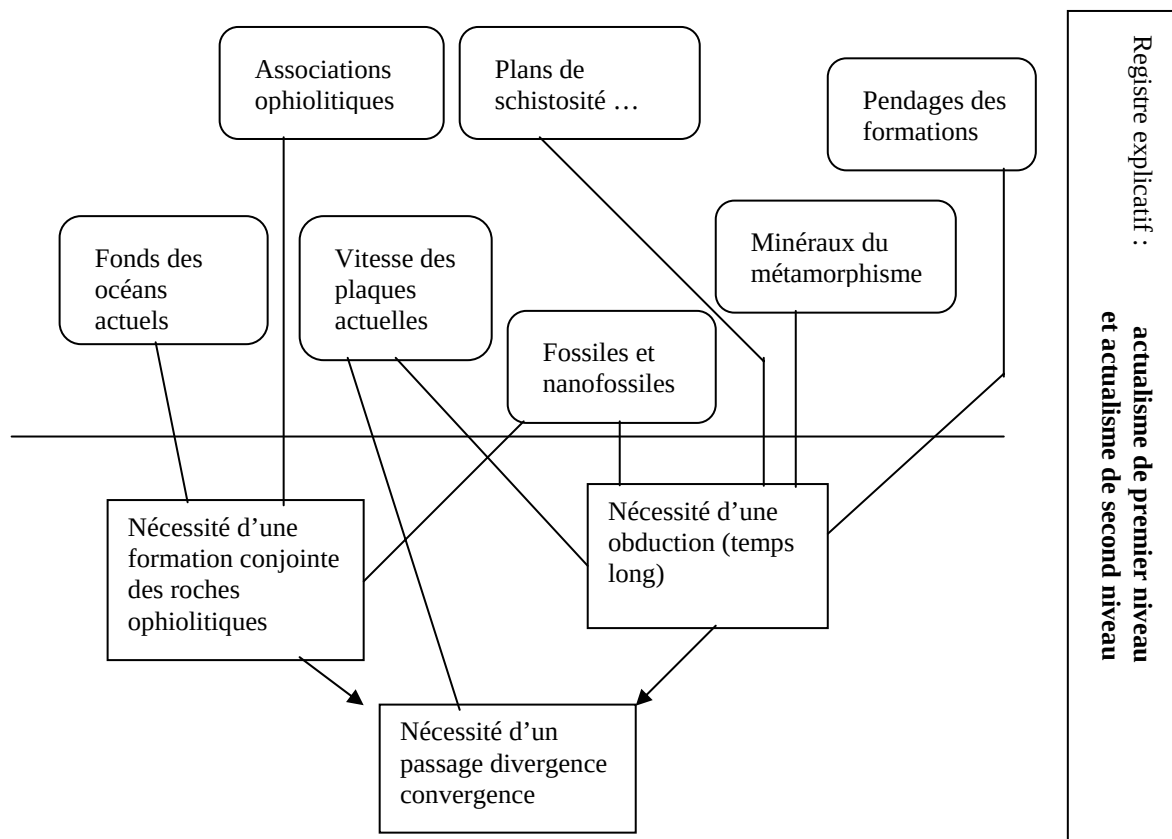


Figure 10.2 :
La mise en place des ophiolites
Espace de contraintes d'un géologue

Cette analyse du savoir savant sur la mise en place des ophiolites, notamment dans ses rapports au temps, doit nous permettre d'étudier les explications des lycéens.

Chapitre 11

LA MISE EN PLACE DES OPHIOLITES

Analyse didactique a priori des situations

Sommaire

- 1. Le contexte général des situations mises en place**
- 2. Les situations de classe et les intentions du professeur**
- 3. Analyse didactique a priori des situations**
- 4. Inventaire des contraintes empiriques disponibles, actualisme et problématisation**
- 5. Conclusion**

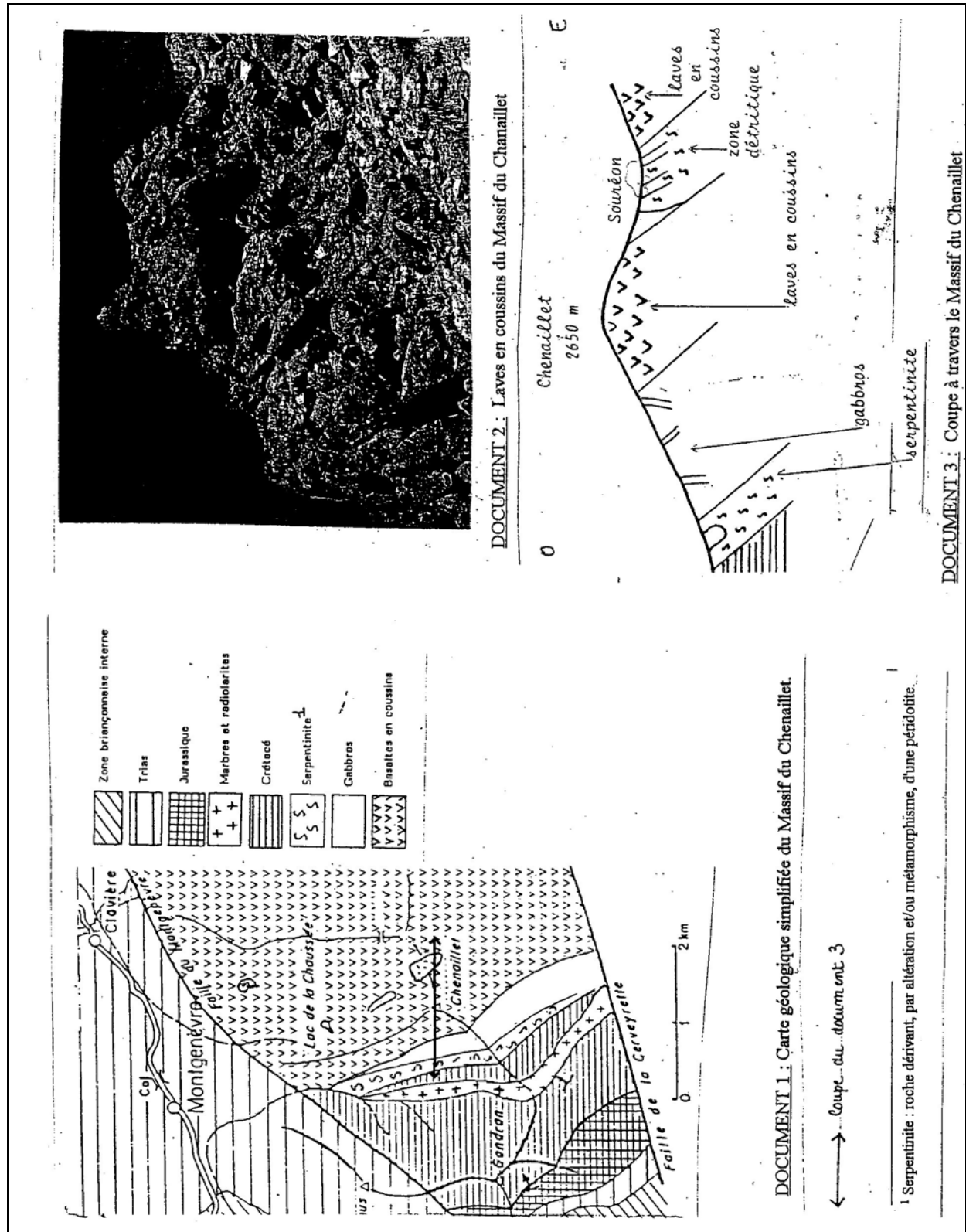
Après avoir fait un état des lieux du savoir actuel sur les ophiolites et de son histoire, nous cherchons maintenant à comprendre comment les lycéens s'approprient ce problème. Pour cela nous avons construit et mis en oeuvre des situations en classe de Première S. Ce chapitre est consacré à l'analyse didactique a priori de ces situations. Notre étude va se faire sur la base de documents que le professeur a proposé aux élèves, avec le regard du chercheur en didactique qui tente de faire fonctionner un outil (actualisme de 1er niveau, actualisme de 2è niveau, catastrophisme) dans le cadre théorique de la problématisation. Nous pensons, par ces biais, mieux cerner les utilisations du temps dans les explications.

1. Le contexte général des situations mises en place

Les situations mises en place concernent trois classes de Première S : une classe en 1998/99, une classe en 1999/00, et une classe en 2001/02⁷³. Les situations de 1998/99 et 1999/00 sont comparables, à quelques différences près que nous signalerons. Elles prennent place alors que les élèves n'ont pas encore étudié les ophiolites mais qu'ils ont travaillé sur les aspects globaux de la théorie de la tectonique des plaques : accréation, subduction, collision.

La situation 2001/02 ne fait pas véritablement partie d'une séquence d'apprentissage. Très proche dans son contenu des situations précédentes, elle vient après que les élèves ont étudié l'organisation du globe terrestre et l'expansion océanique.

⁷³ Il s'agit, pour les années 1998/99 et 1999/00, de classes de Première S du Lycée Camus, à Nantes, dont je suis le professeur de SVT. Pour l'année 2001/02, il s'agit d'une classe du Lycée Lesage, à Vannes, dont Monique Michaud est le professeur de SVT.



L'étude a priori va plus particulièrement porter sur la situation de l'année 1998/99, dont les situations des années suivantes s'inspirent. Elle est proposée à une classe de Première S de 23 élèves, dans l'espace du module⁷⁴ car la classe est alors dédoublée.

2. Les situations de classe et les intentions du professeur

En 1998/99, nous avons sélectionné trois documents sur les ophiolites du Chenaillet, situées au sein des Alpes françaises (voir figure 11.1) :

- une carte géologique simplifiée de la région (Document 1),
- une photographie du Chenaillet montrant un relief constitué de pillow lavas (Document 2),
- enfin une coupe de la région présentant les différentes formations rocheuses et leur disposition ; cette coupe inclut le mont Chenaillet présenté sur la photographie⁷⁵ (Document 3).

Un texte introductif définit les ophiolites comme un assemblage de roches : basaltes, gabbros et serpentinites (roche dérivant de la péridotite). Voici ce texte :

Dans certaines parties des Alpes comme le Massif du Chenaillet, on rencontre des ophiolites constituées par des basaltes, des gabbros et des serpentinite⁷⁶. La structure des basaltes en coussins est parfois très bien conservée.

En utilisant vos connaissances et les données des documents proposés ci-dessous, dites quelle peut être l'origine des ophiolites.

Le texte introductif, mais aussi la légende de la carte du document 1 précisent que les basaltes présentent des figures en coussins. Les documents 2 et 3 n'utilisent pas le terme de basaltes mais de laves en coussins. Les laves en coussins ou pillow lavas sont les formes de refroidissement d'une lave basaltique en milieu aquatique. Des expéditions sous-marines ont filmé la production de telles structures au niveau de dorsales actuelles. Toutes les classes de Première S auxquelles nous nous intéressons ont vu un court extrait d'un documentaire reprenant ces images. Quant à l'ensemble des roches ophiolitiques, il est équivalent à celui d'un fond océanique actuel, dont l'organisation et la nature pétrologique sont connues des élèves.

En 1998/99, le choix des 3 documents tente de reproduire pour partie la diversité des supports des géologues confrontés à l'étude d'un massif ophiolitique⁷⁷, en limitant cependant leur nombre pour que la recherche des élèves puisse se faire dans un temps court. En 1999/00 et en 2001/02, il n'y a plus que 2 documents : nous supprimons la carte géologique du Massif du Chenaillet, difficile à lire pour des novices (voir l'annexe 11).

⁷⁴ Le module, à raison d'une heure tous les quinze jours permet "de développer des activités plus autonomes" (BOEN, 1992, p. 70). Il s'articule avec le cours ou le TP et concerne tous les élèves. Il n'a pas été reconduit avec la mise en oeuvre des nouveaux programmes de Première S (rentrée 2001).

⁷⁵ Ces types de documents (coupe, carte géologique) sont relativement familiers des élèves. Ils ne doivent pas présenter de difficultés de "lecture" majeures.

⁷⁶ On précise aux élèves que la serpentinite est une roche dérivant, par altération et/ou métamorphisme, d'une péridotite (voir la planche de documents de la figure 11.1).

⁷⁷ A. Michard, lors de l'entretien qu'il nous accorde en 2001, donne un aperçu de cette diversité des ressources (compte rendu présenté en annexe 2, p. 3)

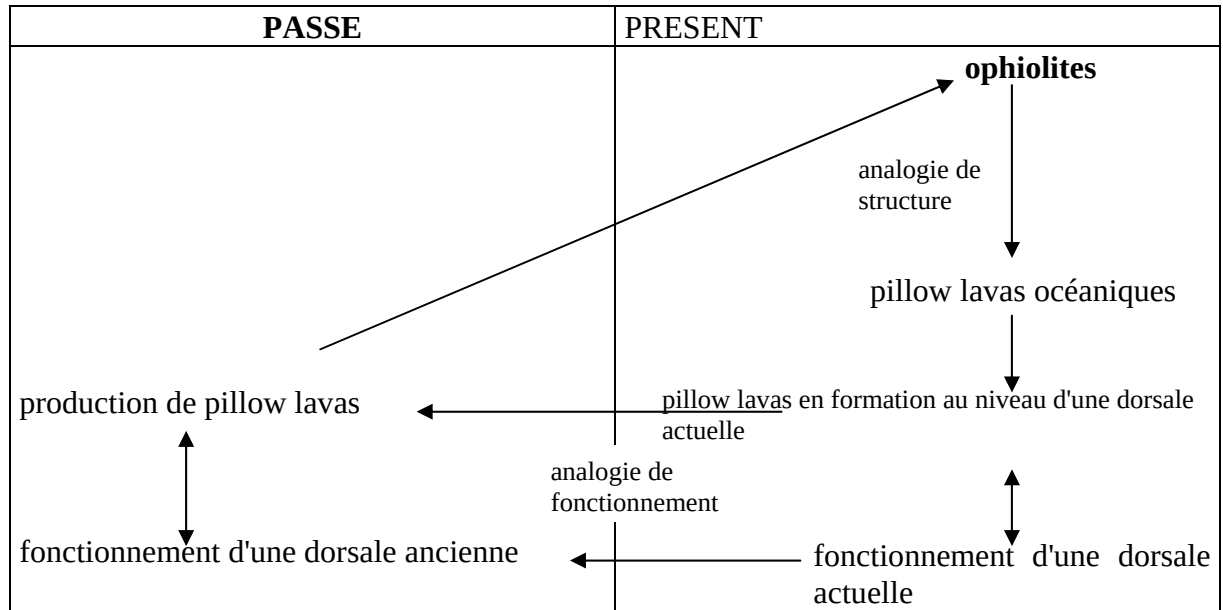


Figure 11.2a :
Actualisme de premier niveau dans le problème de l'origine des ophiolites (expert)

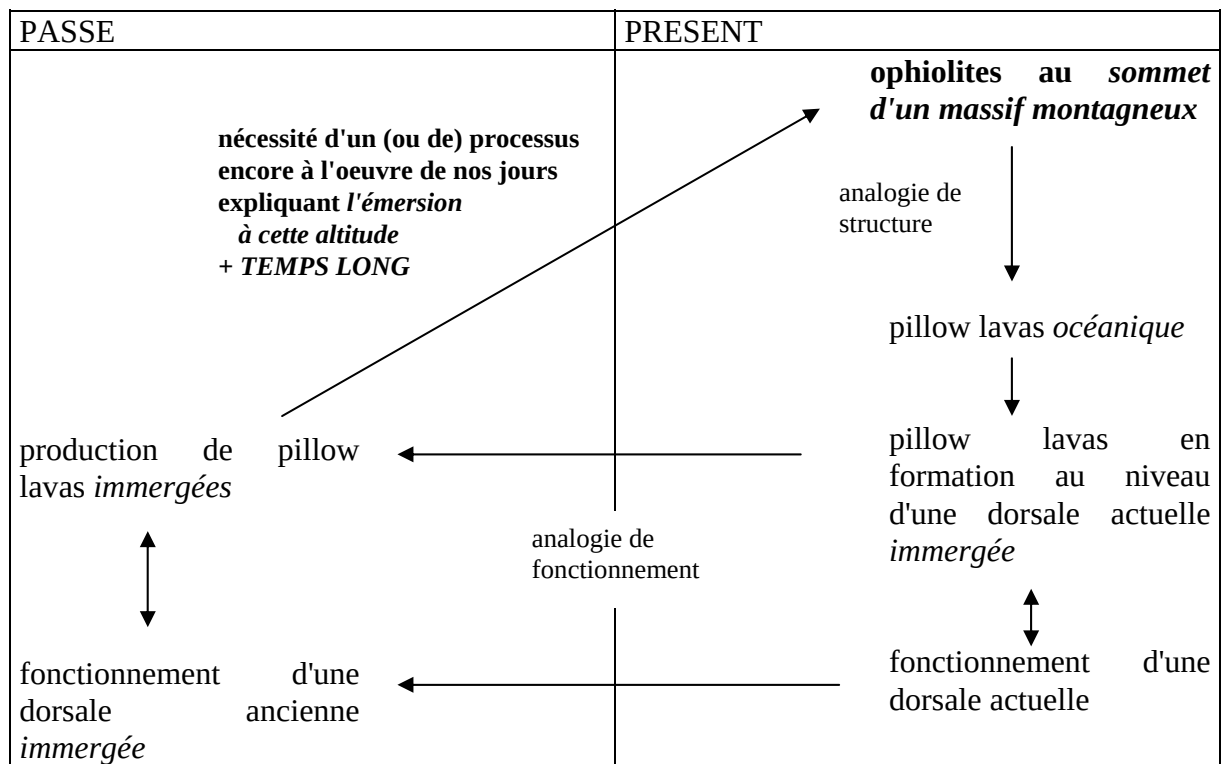


Figure 11.2 b
Actualisme de second niveau et mise en place des ophiolites (expert)

La construction du problème attendue est proche du savoir actuel (voir le chapitre précédent) : elle prend place dans le cadre théorique de la tectonique des plaques et elle est fondée sur la construction de plusieurs nécessités : la nécessité d'une formation de roches comparable à celle de la lithosphère océanique, celle d'une émergence et celle de phénomènes tectoniques. Compte tenu de l'état d'avancement de l'enseignement dans les classes 1998/99 et 1999/00, et avec en arrière plan les obstacles qu'ont représentés les phénomènes tectoniques dans l'histoire de la géologie, on peut s'interroger sur le positionnement des élèves vis à vis de la tectonique. Quant aux élèves de la classe 2001/02, ils ont préalablement étudié les structures tectoniques (faille normale, faille inverse, plis). En quoi cela a-t-il une incidence sur leur problématisation ?

3. Analyse didactique a priori des situations

L'analyse didactique a priori peut se faire sous le double angle de l'actualisme méthodologique et de la problématisation.

3.1. Mise en jeu de l'actualisme de 1er niveau

Les laves en coussins du Chenaillet (contraintes empiriques à expliquer) peuvent être comparées à celles qui se forment dans l'axe des dorsales actuelles (contrainte empirique appui pour l'explication) . **Par analogie** à une structure actuelle dont nous connaissons l'origine, puis grâce à une projection dans le passé, on peut imaginer l'existence d'une dorsale ancienne : cela met donc en jeu de l'actualisme de 1er niveau ou actualisme d'analogie. La figure 11.2.a propose une schématisation du raisonnement avec l'actualisme de 1er niveau.

La projection effectuée dans le passé peut se faire plus ou moins loin ; **il n'est pas nécessaire de mettre en jeu du temps profond**. Pour preuve, le fait que nous pourrions tenir le même raisonnement si la situation proposait un fond océanique en place et quelque peu éloigné de la dorsale ; or ce fond océanique a toutes les chances d'être plus récent que les ophiolites.

En termes de problématisation, les contraintes repérées ci-dessus devraient permettre de construire une portion d'espace de contraintes, dont le schéma de la figure 11.3.a rend compte.

Nous remarquons, dans cette problématisation avec actualisme de 1er niveau, que l'accent est mis sur l'explication de contraintes empiriques (les pillow lavas) qui n'ont pas varié au cours du temps : nous les qualifierons d'**invariant temporel** .

Le problème construit est **un problème de formation de structures** (la formation des pillow lavas des ophiolites), par analogie à des structures que l'on voit aujourd'hui se former dans un temps court.

Figure 11.3a

Contraintes empiriques	Ophiolites du Chenaillet : actuelle : *des pillow lavas *pillow lavas en formation	Dorsale océanique
Nécessités sur le modèle	nécessité d'une dorsale ancienne en fonctionnement	
Eléments du registre explicatif	ACTUALISME 1er niveau (= actualisme d'analogie)	

Figure 11.3b

Contraintes empiriques	Ophiolites du Chenaillet : *des pillow lavas *position émergée altitude élevée	Dorsale océanique : *pillow lavas en formation * en milieu aquatique au fond d'un océan
Nécessités sur le modèle	nécessité d'une dorsale ancienne en fonctionnement	nécessité d'une émergence + nécessité du temps long
Eléments du registre explicatif	ACTUALISME 1er niveau	ACTUALISME 2è niveau

Figure 11.3c

Contraintes empiriques	Ophiolites du Chenaillet : *des pillow lavas *position émergée haute altitude *formations rocheuses obliques *formations rocheuses "en double"	Dorsale océanique : *pillow lavas en formation * immergée au fond d'un océan * formations rocheuses horizontales * formations rocheuses uniques
Nécessités sur le modèle	nécessité d'une dorsale ancienne en fonctionnement	nécessité de phénomènes tectoniques et orogéniques + nécessité du temps long
Eléments du registre explicatif	ACTUALISME 1er niveau	ACTUALISME 2è niveau

Explication des invariants**Explication des variants****Figures 11.3****Portions d'espaces de contraintes que la situation permet de construire (a priori)**

3.2. Mise en jeu de l'actualisme de 2^e niveau

Nous avons vu quelles contraintes empiriques identifiées dans les documents fournis pouvaient permettre de construire le problème de l'origine des ophiolites en mobilisant l'actualisme de 1^{er} niveau : il s'agit des laves en coussins (pillow lavas), des structures encore "fabriquées" de nos jours, mais dans un contexte précis, le milieu aquatique, ce qui s'oppose au fait que les ophiolites sont émergées, et même qu'elles se trouvent au sommet de hautes montagnes du massif Alpin. Si la position émergée des ophiolites est retenue, elle fait problème et mérite d'être expliquée. De quelle manière ?

3.2.1. Les limites d'un actualisme de 1^{er} niveau

Pratiquer l'actualisme d'analogie signifie trouver des pillow lavas fabriquées aujourd'hui à l'air libre. Cela ne peut pas exister mais nous connaissons des zones émergées terrestres dont la structure correspond à un fossé d'effondrement comparable à la zone axiale d'une dorsale. C'est le cas de l'est africain où des laves basaltiques parviennent à la surface, et où des incursions d'eau salée en provenance de l'océan indien existent. Alors pourquoi pas des pillow lavas "presque aériennes" dont l'explication se suffirait de l'actualisme de 1^{er} niveau ? Ce qui rend cette explication impossible, c'est que, dans les Alpes, les ophiolites ne sont pas localisées à une altitude proche du niveau de la mer : elles sont véritablement perchées.

3.2.2. Les nécessités construites par le recours à un actualisme de 2^e niveau

Le problème est donc d'expliquer la position aérienne et en altitude des ophiolites du Chenaillet. Deux solutions sont possibles : une régression marine postérieure à la formation des pillow lavas (hypothèse "eustatique"⁷⁸ qui consiste à envisager des mouvements du niveau marin) ou une surrection du fond océanique par le biais de mouvements de l'écorce terrestre (hypothèse "épirogénique"⁷⁹ envisageant la montée de blocs crustaux ou hypothèse "orogénique et tectonique" mettant en jeu une construction de relief et de structures). C'est l'hypothèse orogénique et tectonique qui est retenue par les scientifiques actuels. Si on raisonne en actualiste, on recourt à un ou des processus actuels. Il est bien évident que l'on ne voit pas à l'échelle du temps humain des massifs se départir de l'eau qui les recouvre (régression marine) ou surgir jusqu'à atteindre une altitude élevée (surrection épirogénique ou surrection orogénique). D'autre part, compte tenu de la profondeur à laquelle on trouve les fonds océaniques actuels, il ne paraît pas réaliste qu'un seul retrait des eaux positionnent ces mêmes fonds aux sommets des reliefs. En définitive, l'hypothèse "épirogénique" ou l'hypothèse "orogénique" paraissent s'imposer. Et même plus précisément l'hypothèse "orogénique et tectonique" car il y a formation d'un relief et également bouleversement de la disposition des formations rocheuses (elles passent d'une position horizontale à une position inclinée ; voir le document 3 fourni aux élèves). Comment alors penser des mouvements

⁷⁸ La notion d'eustatisme est introduite par E. Suess en 1888 pour qualifier les changements d'ensemble du niveau des mers et rendre compte des transgressions ou régressions marines contemporaines sur tous les plateaux continentaux). (A. Foucault, J.F. Raoult, 2001, p. 128)

⁷⁹ G.K. Gilbert, en 1886, introduit la notion d'épirogenèse (épeirogenèse). Selon A. Foucault et J.F. Raoult (2001, p. 124), l'épirogenèse correspond aux "*lents mouvements de montée ou de descente des domaines continentaux se traduisant par des régressions (quand le continent se soulève) ou par des transgressions (quand il s'enfonce)*". Ces mouvements s'accompagnent de variations du niveau marin (eustatisme). C'est également à G.K. Gilbert que l'on doit la notion d'orogenèse (1890) dans le sens de processus conduisant à la construction de reliefs. Epirogenèse et orogenèse ne sont donc pas des synonymes.

faisant passer d'un fond océanique immergé à des ophiolites constituant des sommets d'une chaîne de montagnes ? En recourant à de petites modifications insensibles dont la sommation sur une longue durée produit un grand effet. Et la formation des pillow lavas, qui pouvait être placée à n'importe quelle époque du passé avec le seul actualisme de 1er niveau, est nécessairement positionnée au delà de **la durée minimale** de réalisation de l'émersion par des mouvements tectoniques. En d'autres termes, cette explication nécessite une certaine durée. On peut noter que l'hypothèse "eustatique", si elle était retenue, exigerait également une certaine durée.

La figure 11.2.b présente une schématisation d'un raisonnement actualiste de 2è niveau cherchant à expliquer les deux contraintes empiriques que sont les pillow lavas et la position des ophiolites au sommet d'un massif montagneux.

En termes de problématisation, nous avons l'espace des contraintes de la figure 11.3.b.

Nous sommes en présence de deux types de contraintes empiriques :

- une contrainte à valeur d' **invariant temporel** : les pillow lavas ;
- une contrainte à valeur de **variant temporel** : la position des pillow lavas.

Nous remarquons que le variant retenu a quelque chose à voir avec l'invariant ; ici il situe l'invariant dans un contexte (altitude, milieu aquatique ou aérien). D'autre part, nous constatons que deux problèmes sont construits : **un problème de formation de structures** (la formation des pillow lavas des ophiolites) qui utilise l'actualisme d'analogie et conduit à **la nécessité** du fonctionnement d'une dorsale ancienne ; mais aussi **un problème d'explication de la localisation atypique de ces structures** qui recourt à de l'actualisme de 2è niveau (actualisme à temps long) assorti de **deux nécessités nouvelles** : la nécessité d'une émersion et la nécessité du temps long. Nous devons ajouter que ce deuxième problème pourrait avoir un règlement plus économique en temps en mettant en jeu du catastrophisme, par exemple un bouleversement crustal tel que des fonds océaniques deviendraient les sommets des montagnes.

Il est enfin d'autres contraintes identifiables sur les documents fournis aux élèves qui ont valeur de variants et permettent de construire la nécessité de phénomènes tectoniques et orogéniques. Il s'agit par exemple du pendage oblique des formations rocheuses, bien visible sur la coupe ; en effet, les formations rocheuses équivalentes qui se forment actuellement sont disposées horizontalement. Il s'agit encore du redoublement de certaines formations rocheuses comme le niveau de laves en coussins (voir la coupe) ; dans les fonds océaniques actuels, il n'y a qu'un seul niveau. Dans une démarche comparable à celle que nous avons utilisée plus haut dans ce paragraphe, nous pouvons construire l'espace des contraintes de la figure 11.3.c.

En résumé, la construction du problème des ophiolites dans la situation prévue, et peut-être de tout problème d'explication de traces en géologie, pourrait commencer, surtout pour le novice, par la mise en jeu (spontanée) d'un actualisme d'analogie qui permettrait l'identification d'invariants et la proposition d'une explication à leur origine. Ces invariants prendraient le statut de contraintes empiriques à expliquer fondamentales. Cette problématisation pourrait se compléter d'un repérage de variants en rapport avec ces invariants dont l'explication ouvrirait sur ce qui s'est passé entre l'origine des invariants et notre époque.

4. Inventaire des contraintes empiriques disponibles, actualisme et problématisation

Nous nous sommes focalisée sur les contraintes empiriques fondamentales dans la construction des nécessités portant sur le modèle. On peut maintenant faire l'inventaire de toutes les contraintes empiriques signifiantes pour l'expert et de celles aisément accessibles aux élèves, dans les documents fournis dans la situation étudiée, et compte tenu de l'état d'avancement de l'enseignement dans la classe considérée.

Dans le tableau de la figure 11.4, notre analyse a priori repère ainsi un registre empirique pour l'expert constitué de 12 contraintes (première colonne du tableau), tandis que celui des élèves en comprend au maximum neuf (deuxième colonne du tableau). Ces contraintes sont mises en catégories selon les nécessités qu'elles servent. Ainsi, le repérage dans le Chenaillet d'un ensemble de roches typiques (basaltes en coussins, gabbros) analogues aux roches des fonds océaniques impose, tout comme la prise en compte des seules pillow lavas (voir le paragraphe précédent), au modèle la nécessité d'une formation de ces roches dans une zone d'accrétion (dorsale océanique). De même, la position émergée de ces roches, sans indication d'altitude, contraint à la nécessité d'un processus d'émersion. Enfin, la position en altitude (voir le paragraphe précédent) mais aussi les "anomalies" structurales de ces formations rocheuses (obliquité, présence en double) déterminent la nécessité de phénomènes tectoniques et orogéniques.

CONSTRAINTES EMPIRIQUES	expert	attendu
1. Basaltes (laves) en coussins (carte, photo et coupe)		
2. Association de roches typiques (carte et coupe)		
3. Zone émergée (carte, photo et coupe)		
4. Zone montagneuse (carte, photo et coupe)		
5. Proximité lithosphère océanique/lithosphère continentale (carte et coupe)		
6. Relief (dôme, massif) du Chenaillet (photo et coupe)		
7. Disposition des roches par rapport au relief (coupe)		
8. Obliquité des formations rocheuses (coupe)		
9. Redoublement de certaines formations (coupe)		
10. Zone détritique intercalée dans les laves en coussins (coupe)		
11. Failles (carte)		
12. Roches altérées ou métamorphisées (serpentinites) (carte et coupe)		

	liée à la nécessité d'une formation des roches		
	liée à la nécessité d'une émersion		liée à la nécessité de phénomènes tectoniques et orogéniques
	non évoquée		

Figure 11.4

Analyse a priori des contraintes empiriques

Les contraintes empiriques rapportées à la formation des roches correspondent à des invariants, celles rapportées à l'émersion et/ou à des phénomènes tectoniques ont valeur de variants : elles traduisent une modification de caractéristiques initiales.

5. Conclusion

On peut penser que le problème de formation des structures sera aisément réglé par les élèves à l'aide de l'actualisme de 1er niveau. L'actualisme d'analogie peut également intervenir dans la construction de la nécessité de l'émersion ou celle de mouvements tectoniques. Mais la réponse acceptable (car la plus proche de celle des scientifiques) serait celle qui construirait le deuxième problème avec de l'actualisme de 2è niveau.

Enfin, on ne peut pas exclure, chez les élèves, la mise en jeu du catastrophisme par l'intervention de processus qui par leur nature et/ou leur puissance et/ ou leur brutalité n'ont pas d'équivalents actuels.

Ainsi, les différents cas de problématisation présentés dans la figure 11.3 peuvent servir de grille de lecture des réponses des élèves, en sachant que l'actualisme d'analogie et le catastrophisme peuvent prendre le pas sur l'actualisme de 2è niveau, et ainsi faire l'économie du temps long.

Chapitre 12
LA MISE EN PLACE DES OPHIOLITES
Explications des élèves et utilisation du temps

Sommaire

- 1. Le corpus de productions d'élèves**
- 2. Analyse des réponses écrites des élèves de la classe de Première S 98/99**
- 3. Analyse des réponses écrites des élèves de la classe de Première S 99/00**
- 4. Analyse des réponses écrites des élèves de la classe de Première S 2001/02**
- 5. Conclusion**

Dans le chapitre précédent, nous avons fait fonctionner **a priori** les différents niveaux de l'actualisme dans le cadre du problème des ophiolites alpines tel que nous pensions le proposer à des élèves de première S en 98/99. Nous allons maintenant étudier les productions des élèves obtenues cette année-là, sous les angles de la problématisation et de la mobilisation de l'actualisme. Nous compléterons cette étude avec l'analyse de travaux d'élèves obtenus en 98/99 et 01/02, dans des situations de classe proches de celle de 98/99.

1. Le corpus de productions d'élèves

Le corpus de données dont nous disposons provient de **3 classes de Première S :**

Année scolaire	Classe et caractéristiques	Lycée :
1998/99	Une classe de Première S : - 23 élèves - non dédoublée en travaux pratiques	Lycée Camus, NANTES
1999/00	Une classe de Première S : - 33 élèves - dédoublée en travaux pratiques (une demi-classe de 17 élèves et une autre de 16 élèves)	Lycée Camus, NANTES
2001/02	Une classe de Première S : - 30 élèves - dédoublée en travaux pratiques (une demi-classe de 15 élèves et une demi-classe de 15 élèves).	Lycée Lesage, VANNES
	86 élèves	

Figure 12.1 : Le corpus de données (ophiolites)

Nous avons proposé à chacune de ces classes une réflexion sur les ophiolites du Chenaillet (voir chapitre 11). L'analyse a priori, faite dans le chapitre précédent, concerne principalement la situation proposée à la classe 1998/99. C'est globalement la même situation qui a été proposée aux classes des années suivantes, à quelques modifications près, sur lesquelles nous reviendrons. Cette situation, que nous avons construite et aménagée, fut mise en oeuvre avec nos propres classes en 98/99 et 99/00. En 2001/02, nous avons demandé à une enseignante⁸⁰ d'un autre établissement de la soumettre à sa classe de Première S. Il n'y eut jamais d'élève à faire deux années de suite ce travail.

Nous avons recueilli les types de productions suivants :

1.1. Les réponses écrites brutes des élèves (individuelles ou de binômes selon les années) après un temps de réflexion.

- 1998/99 (23 élèves) : 12 productions de binômes (en fait 11 productions de binômes et une production individuelle).
- 1999/00 (17 et 16 élèves) : pour la première demi-classe, 9 productions de binômes (en fait 8 productions de binômes et une production individuelle) ; pour la deuxième demi-classe, 8 productions de binômes.
- 2001/02 : 30 productions individuelles.

1.2. La transcription de la présentation et de la confrontation des réponses des binômes de la première et de la deuxième demi-classe 1999/00.

2. Analyse des réponses écrites des élèves de la classe de Première S 98/99

2.1. Le déroulement de la situation de classe

En 1998/99, le problème des ophiolites est soumis aux 23 élèves d'une classe de Première S maîtrisant les aspects globaux de la théorie de la tectonique des plaques (accrétion, subduction, collision). Les élèves sont alors répartis en binômes. L'enseignant fournit aux binômes trois documents sur les ophiolites du Chenaillet, situées au sein des Alpes françaises (figure 11.1) et leur demande, sous la forme d'un texte assorti éventuellement de schéma(s), de répondre en binômes à la question suivante :

En utilisant vos connaissances et les données des documents proposés ci-dessous, dites quelle peut être l'origine des ophiolites.

Afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïté sur le sens du terme "origine", il précise oralement qu'il convient de comprendre l'origine des ophiolites comme l'histoire des ophiolites. En fait, le professeur ne veut pas que les élèves se limitent à l'origine des roches des ophiolites. En ramenant l'"origine" à l'"histoire" des ophiolites, il pense que les élèves vont prendre en compte les ophiolites de leur formation à ce qu'elles sont aujourd'hui. Les binômes disposent d'une demi-heure pour élaborer une réponse, sous la forme d'un texte accompagné éventuellement de schémas. L'enseignant n'intervient pas dans cette phase. Une réflexion critique sur quelques réponses représentatives est prévue ensuite avec la classe.

Notre étude s'intéresse aux productions des binômes obtenues au bout d'une demi-heure. Ce "premier jet" doit renseigner sur la construction du problème des ophiolites par les lycéens,

⁸⁰ Il s'agit de Monique Michaud, professeur de SVT au Lycée Lesage de Vannes.

repérables par les solutions proposées. En conformité avec les approfondissements du chapitre précédent, on peut tenter d'identifier les grands types d'explications, de les caractériser quant à l'utilisation de l'actualisme, de rechercher les contraintes implicites conduisant à ces explications (contraintes empiriques en jeu, nécessités sur les modèles), enfin de pointer et d'interroger les décalages qui apparaîtraient avec l'analyse a priori.

Rappelons que nous avons affaire à une étude de cas, qui veut ouvrir vers des hypothèses plus précises sur le fonctionnement des élèves et se garder de toute généralisation trop hâtive.

2.2. La grille de lecture des réponses écrites des élèves

Nous avons vu dans le chapitre précédent que, selon l'expert, la problématisation de l'origine des ophiolites par l'expert s'accompagne de la construction de plusieurs nécessités. Dans une approche simple, il y a la **nécessité d'une formation des roches** par une dorsale autrefois en fonctionnement permettant la mise en place de pillow lavas et d'une association synchrone mais ordonnée dans l'espace de roches magmatiques ; et la **nécessité d'une émergence** qui permet le passage de formations rocheuses formées dans l'eau en milieu aérien. Dans une approche plus élaborée, la **deuxième nécessité se traduit en mouvements tectoniques conduisant à l'émergence** et au positionnement en altitude de lambeaux de fonds océaniques. Nous avons vu également que si la première nécessité mobilise un actualisme d'analogie, la construction des deux autres exige un actualisme à temps long.

C'est en nous référant à ces trois nécessités explicites pour l'expert (dorsale en fonctionnement, émergence seule ou émergence/tectonique) que nous avons mis en catégories les réponses écrites des binômes. Mais nous ne pouvons pas garantir de leur construction par les élèves, parce que l'écrit ne fournit pas les arguments qu'ils ont utilisés et qui attesteraient d'une problématisation. A tout le moins pouvons-nous, à partir de l'écrit de chaque binôme, faire ressortir **les éléments du modèle** construit et les analyser par rapport aux nécessités prises en compte. Nous étudions donc la **modélisation** effectuée par les binômes, comme trace de raisons qui y sont incluses, à défaut de pouvoir entrer dans leur problématisation.

En résumé, notre grille d'analyse des réponses des binômes de Première S 98/99 se fonde sur les nécessités construites par l'expert confronté au même problème des ophiolites (voir l'analyse a priori dans le chapitre 11). Ces nécessités donnent un éclairage sur des éléments des modèles construits par les binômes et les types d'actualisme en jeu.

2.2.1. La nécessité d'une formation des roches des ophiolites (tous les binômes)

Tous les élèves 98/99 sans exception envisagent la **formation de tout ou partie des roches du Massif du Chenaillet**. Ces roches figurent sur le document 3 de la planche documentaire mise à leur disposition : ce sont les basaltes (laves) en coussins, les gabbros et la serpentinite, mais aussi les roches de la zone détritique intercalée entre les 2 niveaux de laves en coussin. **Ce qui nous paraît important**, c'est l'identification d'un ensemble de roches (au minimum basaltes et gabbros mais cela peut-être basalte/ gabbro/ serpentinite, cette dernière vue comme dérivée de la péridotite) ou de pillow lavas et l'accent mis sur leur formation (au minimum, le renvoi explicite ou implicite au fonctionnement d'une dorsale mais il peut y avoir en complément le processus de transformation des roches formées). Nous admettons que la reconnaissance en ces roches d'un plancher océanique sous-entend une origine "dorsalienne".

Des exemples de réponse⁸¹

Voici tout d'abord la réponse du binôme B10, qui respecte ces critères et répond ainsi à la nécessité de la formation des roches des ophiolites :

BINOME 10 (réponse complète)

" Les ophiolites constituées de gabbro, basalte et de serpentinites⁸², proviennent du refroidissement du magma. En effet, ces trois minéraux⁸³ ont la même composition chimique. Provenant du refroidissement à différentes profondeurs de ce magma, on obtient les ophiolites. Le basalte se situe au sommet du massif. Le gabbro se trouve juste en dessous du basalte. De plus, la serpentite est roche formée à partir de péridotite. Ns pouvons en conclure (selon le doc 3) que celle-ci se trouve entre le gabbro et la péridotite."

Cette réponse s'appuie sur la reconnaissance d'une association de roches typiques ("gabbro, basalte et de serpentinites"), que le binôme dote (à tort pour les serpentinites) d'une composition chimique identique et qu'il explique par le refroidissement, à différentes profondeurs, d'un même magma. Cela rappelle le fonctionnement d'une dorsale actuelle, étudiée précédemment avec la classe. C'est pourquoi nous pensons que, sans la nommer, ce groupe met en jeu implicitement une dorsale (**actualisme d'analogie sur le fonctionnement d'une dorsale**). La nature mais aussi la position relative d'une partie des roches (basaltes, gabbros) est considérée comme un **invariant temporel** : cette disposition dans l'espace correspond aux différentes profondeurs de refroidissement du magma.

La justification de la localisation de la serpentinite se trouve dans son origine : elle est un **produit d'une variation dans le temps** de la péridotite. Il y a donc dans la réponse de ce binôme prise en compte de l'origine de toutes les roches des ophiolites du Chenaillet. Le tableau suivant (figure 12.2) distingue les contraintes empiriques que le binôme B10 cherche à expliquer de celles qui servent d'appui :

⁸¹ On trouvera en annexe 12 la reproduction de quelques unes de ces réponses.

⁸² Souligné par nous.

⁸³ Le binôme confond roche et minéral.

BINOME 10	contrainte à expliquer	contrainte appui (dans l'actuel)
Contraintes empiriques	ophiolites : 1) Un ensemble de roches - basalte, gabbro, serpentine- superposées 2) La serpentine et sa position	- basalte, gabbro et serpentinites ont la même composition chimique ⁸⁴ - (dorsale océanique actuelle) : formation actuelle de roches superposées - basalte, gabbro, péridotite- à partir d'un même magma Péridotite
Eléments du modèle	Prise en compte d'une formation passée des roches (au niveau d'une dorsale océanique)	
Elément du registre explicatif	actualisme d'analogie	

Entre parenthèse () : ce qui est implicite dans la réponse du binôme B10

Figure 12.2
La modélisation des ophiolites (binôme B10)

Prenons un autre exemple : la réponse du binôme 12.

BINOME 12 (réponse complète) <i>" La présence de <u>basaltes en coussin</u>⁸⁵ prouve que cette roche magmatique s'est refroidit sous l'eau. Les <u>laves en coussin</u> prouvent qu'il y avait une dorsale océanique d'autant plus qu'on peut constater la présence de failles (ex : La faille de la Cerveyrette). Le changement de relief a découvert les roches qui se trouvaient autrefois en profondeur de la dorsale (ex gabbro, péridotite) A quoi est du le retirement de la mer et la formation des montagnes ?"</i>

Pour le binôme 12, ce sont les basaltes en coussins qui sont immédiatement et explicitement mis en relation avec le fonctionnement magmatique d'une dorsale océanique (**actualisme d'analogie sur le fonctionnement d'une dorsale**). Ce sont eux qui propulsent vers un état initial et dont on explique la formation. Plus loin dans la réponse, il y a mention d'autres roches (gabbro, péridotite) identiques directement aux constituants de profondeur d'une dorsale.

⁸⁴ Le basalte et le gabbro ont la même composition chimique et proviennent de la solidification plus ou moins rapide d'un même magma. La serpentine et la péridotite dont elle est issue sont chimiquement différentes. D'autre part, la péridotite que l'on a là ne provient pas de ce magma ; il s'agit de la péridotite résiduelle suite à la formation de ce magma.

⁸⁵ Souligné par nous.

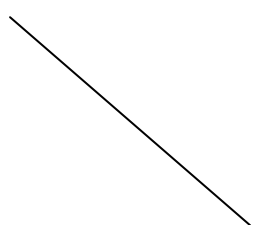
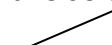
BINOME 12	contrainte à expliquer	contrainte appui (dans l'actuel)
Contraintes empiriques	ophiolites : basaltes en coussins 	- une lave en coussins est une figure de refroidissement dans l'eau - formation actuelle de laves en coussins au niveau d'une dorsale océanique 
Eléments du modèle	Prise en compte d'une formation passée des basaltes au niveau d'une dorsale océanique	
Elément du registre explicatif	actualisme d'analogie	

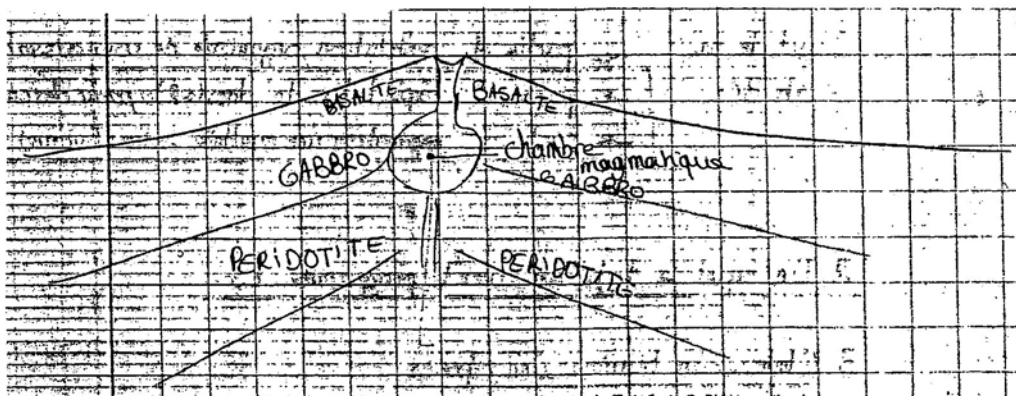
Figure 12.3 :
La modélisation des ophiolites (binôme B12)

Ces deux exemples illustrent les façons des élèves de répondre à la nécessité d'une formation des roches, le premier en privilégiant l'ensemble des roches, le second se focalisant sur un des types. Il est cependant une majorité des binômes (9 sur 12) qui envisagent à la fois l'ensemble des roches et le cas des laves en coussins. C'est le cas de la réponse du binôme B11 dont voici des extraits :

BINOME 11 (extrait)

"BASALTES en COUSSINS"⁸⁶ ---> refroidissement dans l'eau
---> caractéristiques d'une dorsale

GABBRO ---> magma en profondeur
---> avant les Alpes étaient sous l'eau. "



La réponse B11 explique non seulement la formation des basaltes en coussins mais aussi celle des gabbros. Le texte (mais aussi les schémas associés) témoignent d'une origine magmatique commune aux deux types de roches, dans un contexte de dorsale fonctionnant comme une dorsale actuelle (actualisme d'analogie).

⁸⁶ Souligné par nous

Les différences entre les réponses des binômes

Tous les binômes 98/99 prennent en compte, nous l'avons dit, la formation de roches des ophiolites. Ils le font en mobilisant **les contraintes empiriques en jeu dans la problématisation experte** (basalte en coussins et/ou association de roches typiques ; voir le paragraphe précédent). Mais ils se réfèrent également à **d'autres contraintes** (les failles, le relief du Chenaillet, ou encore la disposition des roches par rapport au relief) que les géologues rapportent à la tectonique compressive ultérieure.

- Les binômes (B1, B7, B9, B11, B12) reconnaissent dans **les failles** de la région (failles du Montgenèvre et de la Cerveyrette ; voir le document 1) des caractéristiques de la zone de la dorsale. Comme le binôme 12 (voir le paragraphe précédent), le binôme B1 écrit que *"La présence de failles sur le doc 1 montre qu'il existait auparavant des dorsales océaniques"*. Le binôme B9 note qu'*"On peut remarquer que la montagne du Chenaillet étant composé de couche de roche : serpentinite (= à la péridotite), de gabbro et de basalte, (DOC 3). On peut aussi remarquer des failles dans le paysage : faille de Montgenèvre (DOC 1) et la faille de Cerveyrette. On peut alors en déduire que le Massif du Chenaillet est une ancienne dorsale"*. Nous ne pensons pas trahir ces réponses en écrivant qu'elles identifient les failles mais aussi le relief du Chenaillet à des éléments d'une dorsale ; elles les projettent dans le passé sur une dorsale ancienne : c'est de **l'actualisme d'analogie**. Les experts mettent ces deux contraintes empiriques sur le compte des phénomènes orogéniques et tectoniques ultérieurs. Ainsi, des contraintes empiriques qui ont valeur de variants pour les géologues sont des invariants pour les élèves.

- Les binômes B1, B3, B6, B7, B8, B9 mettent **le relief du Chenaillet** en rapport la formation des roches, ce que ne font pas les experts. Plusieurs y reconnaissent la forme d'une ancienne dorsale :

* le binôme B3 fait un schéma titré *"Dorsale au niveau du Chenaillet pendant le Jurassique"* et le binôme B6, qui écrit que *"Le massif était une dorsale océanique donc une zone d'agrandissement des plaques"*, relève son organisation qui est *"à l'inverse de l'organisation habituelle et normale d'une dorsale océanique en activités"*.

* le binôme B8 se projette dans un contexte ancien aquatique avec divergences de deux plaques et accréation. Pour lui, le massif du Chenaillet correspond au relief particulier d'une plaque sur lequel le magma refroidit différemment ; c'est ainsi qu'il explique la position des roches par rapport au relief (basaltes au sommet, gabbros sur les flancs, serpentinites en bas de pente) :

BINOME 8 (extrait)

"Cette plaque a la particularité de posséder un relief particulier qui lui donne des hauteurs différents. Sur ces différentes hauteurs, la même matière chaude issue de la terre refroidit différemment. Au point le plus haut le refroidissement est plus rapide contrairement à celui le bas".

Des légendes, portées sur la coupe du document 3, précisent qu'au sommet du Chenaillet *"C'est en altitude donc c'est plus froid"*. C'est donc que le relief du Chenaillet existait au moment de la formation des roches (il est donc un invariant temporel) et qu'il s'est comporté comme un moule dont les caractéristiques d'altitude ont conditionné la nature et **la**

disposition en surface des roches magmatiques obtenues. Ce binôme combine la règle qui lie la nature des roches à la vitesse de refroidissement du magma à la règle commune d'évolution de la température avec l'altitude.

* Mais un autre binôme, B1, ne raisonne pas comme B8 ; le relief est la conséquence de cette formation des roches :

BINOME 1 (extrait)

"...Le basalte ne pouvait s'étendre le long des flancs de la dorsale. Au fur et à mesure que le magma sortait, il créait une sorte (de) dôme, actellemnt le sommet du massif du Chenaillet.."

Et la **disposition des roches en surface** résulte d'un avatar des processus magmatiques dans un contexte de relief du Chenaillet :

BINOME 1 (extrait)

"Quand les plaques s'agrandissaient le basalte ne se renouvelait pas et le gabbro arrivait à la surface. Pendant ce tps la péridotite continuait sa fusion partielle et se transformait tjs en magma. L'axe de la dorsale étant recouvert par le basalte. Le magma s'infiltrait par le gabbro et en se solidifiant la péridotite arrivait à la surface."

Les deux schémas suivants tentent de représenter ce qui se joue en termes de succession (PUIS) ou de causalité simple (DONC) dans les réponses des binômes B8 et B1. Nous cherchons simplement à interpréter les explications des élèves, sans entrer dans une analyse de leurs schémas argumentatifs.

Binôme B8 :

	avec		donc	
Venue de magma	---	règles de solidification	---	une certaine disposition des roches en surface
		dans le contexte du relief du Chenaillet		

Binôme B1 :

	donc		puis		donc	
Venue de magma	---	formation du relief du Chenaillet	---	modif. des processus magmatiques	---	une certaine disposition des roches en surface
				dans le contexte du Chenaillet		

Figure 12.4 :
Chronologie et causalité simple dans deux réponses (Binômes 1 et 8, ophiolites)

Sur ces quelques exemples, nous constatons que lorsque les élèves mettent le relief du Chenaillet en relation avec la formation des roches, ils ne lui donnent pas forcément le même rôle : en tant qu'élément déjà là, il conditionne la nature et/ ou la disposition des roches formées ; ou bien il résulte de la formation de certaines roches.

Enfin les binômes se démarquent les uns des autres par **la complexité de l'histoire** qu'ils construisent pour la formation des ophiolites. Montrons cette diversité sur quelques exemples.

- Le binôme B9 se cantonne au fonctionnement d'une dorsale donc à la formation des roches magmatiques des ophiolites.
- Nous avons vu que le binôme B10 construit une histoire en deux temps des roches des ophiolites avec d'abord la formation des roches magmatiques puis celle de la serpentinite. Le binôme B5 fait de même mais il reconstitue explicitement une histoire en plusieurs étapes. Voici la réponse du binôme B5 :

BINOME B5 (réponse complète)

" On sait que la lave en coussin est du basalte formé par un refroidissement brutal à l'eau, contrairement au gabbro et à la serpentinite. Ces deux dernières étant formées par un refroidissement lent à l'air.

On en conclue que ces roches ont été formées à des époques différentes.

A l'aide du document 2, on précise cette conclusion par le fait que les roches sont séparées en différentes couches qui s'amoncellent.

On peut donc croire que les ophiolites sont des amoncellements de roches issu d'un même magma et formées à des périodes différentes. En effet, la serpentinite, le gabbro et le basalte sont des dérivés de la péridotite."

* le binôme B5 met en avant une origine magmatique aux différentes roches allant jusqu'au recours à un même magma parental, et il est sensible à *"l'amoncellement"* de ces roches. D'autre part, il utilise une règle empirique liant la nature des roches à la vitesse de refroidissement du magma : un refroidissement brutal permet d'obtenir du basalte ; un refroidissement plus lent conduit à la formation de gabbro et de serpentinite. La position émergée actuelle, en tant que telle, ne semble pas être une contrainte à expliquer.

* Mais plusieurs éléments de sa réponse montre qu'il place cette fabrication de roches à **la surface** de la croûte terrestre, dans l'eau ou dans l'air : le binôme B5 assimile explicitement le refroidissement rapide à un refroidissement dans l'eau et le refroidissement lent à refroidissement dans l'air⁸⁷. En cela, il se distingue du binôme B10 qui met en relation la vitesse de refroidissement à la profondeur : on peut penser que pour B10, le refroidissement rapide se fait en surface alors que le refroidissement lent se fait en profondeur. De plus, quand le binôme B5 écrit que *"les roches sont séparées en différentes couches qui s'amoncellent"*, cela paraît renvoyer à la superposition échelonnée dans le temps de coulées de laves.

Il nous semble qu'il y a dans la réponse B5, non pas tant la mise en jeu du fonctionnement d'une dorsale que l'expression de la représentation commune du volcanisme : **l'actualisme d'analogie** se fait par rapport à l'expression superficielle du volcanisme actuel (volcanisme aérien et aquatique, édifice volcanique, coulées de laves) et non par la mise en jeu privilégiée de la dorsale, bien que B5 en donne certains aspects (ainsi il rappelle que gabbro et le basalte sont des dérivés de la péridotite). C'est certainement pour cela que le binôme explique la disposition des roches par leur formation échelonnée dans le temps (*"ces couches ont été formées à des époques différentes"*). Mais, si chaque époque se particularise par ses conditions (aérienne ou aquatique), rien n'est dit sur le passage de l'une à l'autre.

⁸⁷ En séance de travaux pratiques, c'est une règle liant vitesse de refroidissement du magma et degré de cristallisation de la roche magmatique qui a été établie.

BINOME 5	contrainte à expliquer	contrainte appui (dans l'actuel)
Contraintes empiriques	ophiolites : - un ensemble de roches- basalte, gabbro, serpentinite- amoncelées	Une règle empirique actuelle : - la nature d'une roche magmatique dépend de la vitesse de refroidissement de la lave - Une règle dont on peut penser qu'elle est empirique : Dans l'eau, le refroidissement est brutal ; dans l'air, le refroidissement est lent. - (l'accumulation de laves par superposition de coulées) - (dorsale océanique actuelle ?) la parenté des roches -basalte, gabbro, serpentinite- avec la péridotite
Eléments du modèle	prise en compte d'une formation passée de roches prise en compte d'une formation échelonnée des roches prise en compte d'un changement de milieu	
Eléments du registre explicatif	actualisme d'analogie	?

Figure 12.5 : La modélisation des ophiolites (binôme B5)

Conclusion

Au terme de cette étude, nous remarquons que l'explication de l'origine des roches des ophiolites peut prendre plusieurs formes, distinguant ainsi les binômes des géologues ou les binômes entre eux. Cela tient au fait que les contraintes empiriques retenues ne sont pas exactement les mêmes ou parce qu'il n'y a pas sollicitation des mêmes éléments de l'actuel. Les réponses de B5 et B10 nous paraissent exprimer cela, même si toutes deux font jouer de l'actualisme d'analogie et se cantonnent dans la construction du problème de la formation des roches ophiolitiques. Mais elles construisent des contraintes empiriques un peu différentes (exemple : ensemble de roches typiques superposées pour le binôme B10, amoncelées pour le binôme B5) et les analogies qu'elles font ne portent pas sur les mêmes éléments de l'actuel (magmatisme d'une dorsale océanique pour B10, expression superficielle du volcanisme pour B5). Plus généralement, c'est comme s'il y avait, en toile de fond et en matière de formation de roches magmatiques, **un espace de contraintes actuel suffisamment fourni en parcours possibles**. Certes, chaque binôme n'a pas la maîtrise de cet espace mais il n'est pas vraiment démuné pour s'y construire un parcours.

2.2.2. La nécessité d'une émergence des roches des ophiolites (10 binômes sur 12)

Si toutes les productions-élèves prennent en compte, avec des variantes que nous venons de voir, la formation des roches des ophiolites, il n'en est pas de même de la prise en compte d'une émergence : le binôme B10 en reste au seul problème de la formation des roches. Il ne cherche pas à expliquer la localisation actuelle des ophiolites. En revanche, les onze autres binômes envisagent une émergence des roches des ophiolites, et de plusieurs manières :

- par la prise en compte d'une part de la formation des roches en milieu océanique et de l'autre par le constat de la position émergée du Massif du Chenaillet. C'est donc qu'entre les deux, il y a une émergence mais son mécanisme n'est pas approfondi. Un exemple est donné par la réponse du binôme B4. Cette réponse relève l'association de roches caractéristiques et l'existence de pillows-lavas ; elle met explicitement en relation ces données aux caractéristiques d'un fond océanique et au fonctionnement d'une dorsale (**actualisme d'analogie portant sur des structures et un fonctionnement**) : *"nous savons que les "pillow lavas" sont dûs au refroidissement rapide du magma en surface au niveau d'une dorsale océanique"*. Et la projection dans le passé apparaît bien dans les propos suivants *"le Massif du Chenaillet pendant la formation de ses roches, était recouvert d'un océan"*. Le binôme est sensible à la position émergée de la région étudiée et il envisage donc la nécessité d'une émergence. Mais rien ne nous permet de dire comment il se représente cette émergence.

BINOME 4	contrainte à expliquer	contrainte appui
Contraintes empiriques	ophiolites : un ensemble de roches laves en coussins (émergée)	croûte océanique et dorsale océanique actuelles : un ensemble de roches pillow lavas en formation recouverte d'un océan
Eléments du modèle	prise en compte d'une dorsale ancienne immergée en fonctionnement prise en compte d'une émergence	
Eléments du registre explicatif	actualisme d'analogie	?

Figure 12.6 : La modélisation des ophiolites (binôme B4)

Pour 7 binômes sur 12 (B1, B4, B6, B7, B8, B9, B11), seule l'émergence est abordée sans caractériser son processus. Les autres binômes ont mobilisé davantage de contraintes que le binôme B4. La plupart d'entre elles ont servi la prise en compte d'une dorsale. Ainsi plusieurs comparent la montagne du Chenaillet à une ancienne dorsale (analogie de forme). Avec cet exemple, nous voyons que ce qui pour l'enseignant, est le produit de transformation (le relief), a valeur d'invariant temporel pour les élèves.

Pour ces binômes, l'émergence s'impose parce que la dorsale ou le fond océanique sont ordinairement en milieu aquatique (binômes B1, B4, B6, B7, B8, B9, B11) ou parce que c'est en milieu aérien que l'on peut obtenir certaines roches magmatiques (binôme B5). Seul le binôme 11 donne quelques précisions sur l'émergence :

"Pour une cause qui n'est pas mentionnée sur les documents, l'activité de cette faille a cessé, et l'eau s'est retirée au cours des différentes ères de notre Histoire (glaciation, etc...)"

Par la suite, l'érosion a permis l'affleurement du gabbro et de la serpentinite (dérivée de la péridotite), selon le schéma proposé par le doc.3."

Le binôme 11 explique l'émersion par des changements du niveau marin, plus précisément par une régression marine, et il en trouve une cause (la glaciation) ; quant au relief, son façonnement est assuré par l'érosion. Il n'y a pas de mouvements de la croûte terrestre dans cette explication. Nous nous demandons si ce binôme utilise de manière implicite l'actualisme de 2^e niveau. Considère-t-il l'érosion comme un processus rapide ou lent ? Comment voit-il la durée d'installation d'une glaciation ?

Pour les autres binômes, nous nous interrogeons sur les raisons de l'absence d'explicitation de l'émersion, sans pouvoir y apporter une réponse immédiate.

2.2.3. La nécessité de phénomènes tectoniques

Après la formation des roches ophiolitiques, trois binômes sur 12 recourent à des phénomènes orogéniques (construction de relief) et/ou tectoniques (construction de structures tectoniques telles que les plis, les failles, les modifications de l'inclinaison des formations rocheuses) : ce sont les binômes B2, B3, B12.

Le binôme B3, par exemple, construit une histoire avec accréation en milieu océanique, émersion mais aussi phénomènes tectoniques. Les basaltes en coussins et leur position au sommet d'un relief sont référés à une ancienne dorsale océanique. Le premier schéma est en tout point analogue à celui que les élèves ont construit en cours/TP pour une dorsale océanique actuelle. Nous pouvons penser qu'ils mettent en jeu là un **actualisme d'analogie en matière de structure et de fonctionnement**. Nous notons que la montagne du Chenaillet est assimilée au relief de la dorsale : le relief est vu comme un **invariant temporel**. Nous remarquons que l'actualisme d'analogie s'étend jusqu'au fonctionnement de la chambre magmatique d'une dorsale : la dorsale et la chambre magmatique ne fonctionnent qu'en milieu aquatique. C'est vraisemblablement pour cela que le groupe a considéré la chambre magmatique comme *"inutile"* dès lors qu'il y a eu émersion. Mais ce qui semble interroger le binôme sont **les variants** qu'ils trouvent dans la disposition des roches en surface et l'existence de la serpentinite. D'où leur proposition que *"Après disparition de l'océan (ou mer), la chambre magmatique, alors inutile, se divise en deux pour s'élever dans des directions opposées. La péridotite qui arrive à la surface est alors altérée et se transforme donc en serpentinite"*. Pour ce binôme, la disposition des roches par rapport au relief et l'altération des péridotites ont exigé une explication qui repose sur des mouvements. Il est difficile de savoir si, pour l'émersion et les mouvements qui la suivent, le groupe use du catastrophisme ou de l'actualisme de 2^e niveau.

BINOME 3	contrainte à expliquer	contrainte appui
Contraintes empiriques	ophiolites : basaltes (laves en coussins) au sommet du massif du Ch <i>(émergé)</i> disposition des roches (basaltes, gabbros, péridotite (serpentinite)) en surface (exprimé dans un schéma)	dorsale océanique : - organisation et fonctionnement - forme <i>océanique</i> basalte, gabbro, péridotite superposés, seul le basalte est en surface
Eléments du modèle	prise en compte d'une dorsale ancienne en fonctionnement <i>prise en compte d'une émergence</i> prise en compte de mouvement tectonique centrés sur la chambre magmatique	
Eléments du registre explicatif	actualisme d'analogie	?

Figure 12.7 :
La modélisation des ophiolites (binôme B3)

Le binôme 12 se limite à s'interroger sur *"A quoi est dû le retrait de la mer et la formation des montagnes ?"*

Enfin, le binôme 2 se place dans le cadre général de la tectonique des plaques : *"La présence d'un massif indique le fait qu'il y ait eu un mouvement de convergence"* et les roches océaniques (basaltes, gabbros) au sein du massif s'expliquent par *"un mouvement d'obduction entre la croûte océanique qui serait passée sur la croûte continentale ce qui expliquerait"*.

Ce binôme construit une réponse qui articule un registre empirique assez limité (deux contraintes empiriques : le *"massif"* et des *"roches océaniques au sein du massif"*) et un modèle qui semble largement dépasser ce registre empirique. Il nous semble que nous retrouvons là un fonctionnement des élèves que nous avons rencontré lors d'une sortie sur le terrain (Massif de Flamanville) : devant la difficulté à repérer ou à expliquer des contraintes empiriques, les élèves *"se débrouillent beaucoup mieux avec les modèles explicatifs du cours qu'avec les informations du terrain"*. (C. Orange et al, 1999, p. 122).

2.2.4. Bilan

L'analyse des réponses des élèves de Première S 98/99 au problème de l'origine des ophiolites nous conduit à définir 4 grandes catégories d'explications. Ces explications prennent en compte des contraintes empiriques, c'est-à-dire des données des documents, que les binômes ont retenues et mises au service d'éléments d'un modèle.

Catégorie "Formation"	- Formation des roches des ophiolites uniquement	1 binômes
Catégorie "Formation/Emersion"	- Formation des roches des ophiolites et émersion sans explication	7 binômes
Catégorie "Formation/Eustatisme"	- Formation des roches des ophiolites et émersion par eustatisme	1 binôme
Catégorie "Formation/Tectonique"	- Formation des roches des ophiolites et émersion par tectonique (et orogénèse)	3 binômes

Figure 12.8 : Les quatre grandes catégories d'explication des ophiolites

Le tableau de la **figure 12.9** (page suivante) compare les contraintes empiriques significantes pour l'expert (figure 11.4, colonne 1) et celles prises en compte par les binômes. Elles prennent leur sens dans la comparaison avec la croûte océanique en place actuellement. Ainsi, le repérage dans le Chenaillet d'un ensemble de roches typiques (basaltes en coussins, gabbros) analogues aux roches des fonds océaniques impose au modèle la nécessité d'une formation de ces roches dans une zone d'accrétion (dorsale océanique). De même, la position émergée de ces roches contraint à la nécessité d'un processus d'émersion. Enfin les "anomalies" structurales de ces formations rocheuses (obliquité, présence en double) déterminent la nécessité de phénomènes tectoniques.

Le registre, repéré a priori, des 9 contraintes empiriques aisément accessibles aux élèves figure dans la colonne 2.

Les quatre dernières colonnes (colonnes 3, 4, 5, 6) donnent les contraintes empiriques retenues par un binôme typique de chaque catégorie : le binôme 10 illustre la catégorie "Formation" ; le binôme B4 la catégorie "Formation/ Emersion" ; le binôme B11 la catégorie "Formation/Eustatisme" et le binôme B3 la catégorie "Formation/Tectonique".

Le tableau montrent des décalages, que nous allons maintenant étudier, entre les grandes catégories de réponses des binômes de la classe 1998/99 et les éléments de l'espace des contraintes attendu ou encore celui de l'expert.

2.3. Comparaison des explications des élèves avec les modèles des experts

Après avoir analysé les réponses écrites des élèves, récapitulons les points importants tirés de la comparaison des 4 grandes catégories de réponses d'élèves au modèle attendu et au modèle des experts :

2.3.1. Le nombre relativement faible de contraintes empiriques retenues par les élèves

L'étude de l'ensemble des réponses montre que les élèves ont retenu moins de contraintes empiriques (de 3 à 7, en moyenne 4 à 5) qu'il n'y en a d'accessibles a priori dans les documents fournis par l'enseignant (9) : l'obliquité des formations rocheuses par exemple n'est pas relevée alors qu'elle est bien visible sur la coupe ; de même, la présence en double d'une zone de pillow-lavas est ignorée.

CONTRAINTES EMPIRIQUES	prof.	atten du	B3	B4	B10	B11
1. Basaltes (laves) en coussins (Documents 1 et 3)						
2. Association de roches typiques (Documents 1 et 3)						
3. Zone émergée (Documents 1, 2 et 3)						
4. Zone montagneuse (Documents 1, 2 et 3)						
5. Proximité lithosphère océanique/lithosphère continentale (Documents 1 et 3)						
6. Relief (dôme, massif) du Chenaillet (Documents 2 et 3)						
7. Disposition des roches par rapport au relief (Document 3)						
8. Verticalité des formations rocheuses (Document 3)						
9. Redoublement de certaines formations (Documents 3)						
10. Zone détritique intercalée dans les laves en coussins (Document 3)						
11. Failles (Document 1)						
12. Roches altérées ou métamorphisées (serpentinites) (Documents 1 et 3)						

 rapporté à la formation des roches des ophiolites (ex: fonctionnement d'une dorsale)

 rapporté à une émergence ou mention à l'immersion à un moment donné

 rapporté à un changement du niveau marin

 rapporté à de la tectonique

Figure 12.9 : Contraintes et nécessité sur le modèle (ophiolites)

2.3.2. L'existence de contraintes empiriques considérées à juste titre comme des invariants

Presque toutes les réponses des binômes reconnaissent dans les ophiolites un morceau de la lithosphère océanique, en s'appuyant sur la présence de pillow-lavas et/ou l'association gabbros/ basaltes, et lient cela à une formation en milieu aquatique, 8 des 12 groupes faisant intervenir explicitement une dorsale océanique. Donc certains invariants de l'explication des scientifiques sont construits par les élèves. La réponse du binôme 4 illustre cela : *"... on remarque que les laves en coussins sont les principales formes de roches de ce massif. Par ailleurs, nous savons que les "pillows lavas" sont dûs au refroidissement rapide du magma en surface au niveau d'une dorsale océanique"*.

2.3.3. Des contraintes empiriques considérées à tort comme des invariants

Il ressort que d'autres contraintes empiriques, au lieu d'être mises en rapport avec la tectonique et donc de prendre le statut de résultats d'une variation, sont mises au service de la formation des roches et comprises ainsi comme des invariants. C'est le cas de :

- la forme du Chenaillet donnée par la moitié des élèves comme la forme de la dorsale initiale. Le binôme 3, par exemple, écrit : *"... nous pouvons expliquer la présence de basalte (laves en coussins) au sommet du Massif du Chenaillet, qui se trouvait être une ancienne dorsale océanique."* ;

- les failles qui hachent la région du Chenaillet. Elles sont mentionnées sur la carte géologique du Document 1. Il s'agit des failles du Montgenèvre et de celle de la Cerveyrette. Presque la moitié des binômes les compare aux failles d'une dorsale : *"La présence de failles sur le doc 1 montre qu'il existait auparavant des dorsales océaniques"* écrit le binôme 1.

- la disposition des roches par rapport au relief.

La moitié des binômes s'intéresse à cette contrainte, dont deux la considèrent comme un invariant. Voici comment ces binômes l'expliquent :

- * le binôme 8 y voit une différence dans solidification d'un même magma parvenant à la surface au sommet du Chenaillet (une flèche rajoutée par le groupe au document 3 l'indique). Au sommet du Chenaillet, il fait plus froid et la solidification est plus rapide qu'en bas : *"Cette plaque a la particularité de posséder un relief particulier qui lui donne des hauteurs différents. Sur ces différentes hauteurs, la même matière chaude issue de la terre refroidit différemment. Au point le plus haut le refroidissement est plus rapide contrairement à celui le bas"*.

- * le binôme 10 évoque le refroidissement à différentes profondeurs d'un même magma pour expliquer cette répartition dans l'espace des roches.

Ces réponses ne se fondent pas exactement sur les mêmes appuis. La première utilise deux règles empiriques : une qui lie la vitesse de refroidissement à la température et l'autre qui établit une relation entre la température et l'altitude. La deuxième réponse restitue simplement la mise en place des roches à l'aplomb d'une dorsale (emploi du modèle général de fonctionnement d'une dorsale actuelle).

2.3.4. Des contraintes empiriques considérées à raison comme des résultats d'une variation, mais ne construisant pas les mêmes nécessités que les experts

La disposition des roches par rapport au relief est pour 4 binômes le résultat d'une variation qui trouve son origine dans :

- une modification dans le temps du fonctionnement de la dorsale. Pour le binôme 1, elle rejette d'abord du basalte qui ne s'étend pas et forme un dôme. Et *"quand les plaques s'agrandissaient le basalte ne se renouvelait pas et le gabbro arrivait à la surface"*.

- les effets de l'érosion après l'émersion (binôme 11) : suite au retrait de l'eau, *"l'érosion, a permis l'affleurement du gabbro et de la serpentinite (dérivée de la péridotite), selon le schéma proposé par le doc. 3."*

- les effets du changement de relief (binôme 12) : *"Le changement de relief a découvert les roches qui se trouvaient autrefois en profondeur de la dorsale (ex gabbro, péridotite)"*.

- des mouvements tectoniques après l'émersion. C'est le cas du binôme 3 dont nous avons déjà analysé la réponse.

Ce qui surprend, c'est la variété des processus de variation invoqués et le fait qu'un certain nombre ne servent pas la nécessité de mouvements tectoniques mais qu'ils approfondissent ou prolongent les deux autres nécessités (fonctionnement d'une dorsale avec formation de roches magmatiques ou émergence).

Tout se passe comme si les élèves manifestaient **une résistance à envisager des modifications des structures géologiques, autrement dit à recourir à certains possibles tectoniques**. Si quelques binômes tentent d'expliquer l'émergence, les phénomènes retenus sont l'eustatisme (binômes 11 et 12), la convergence de plaque (binôme 2), des mouvements locaux (binôme 3 et 12). Nous nous interrogeons sur ce qui fait que les élèves convoquent certains possibles et pas d'autres et sur la signification plus précise qu'ils leur accordent : sont-ils banals ou non ? Prennent-ils ou non du temps long pour se faire ? Ce sont de telles questions qui ont justifié les situations de classe suivantes.

3. Analyse des réponses écrites des élèves de la classe de Première S 99/00

3.1. Le déroulement de la situation de classe

3.1.1. Le contexte

La situation de classe 1999/00 prend place dans un contexte comparable à celle de 1998/99 à une différence près : en 99/00, le problème des ophiolites est donné aux élèves alors qu'ils ont entamé en cours l'étude de la formation des chaînes de montagnes de collision. Ils ont dégagé les points communs de la formation de deux chaînes de montagnes, les Alpes et l'Himalaya. Ils disposaient pour cela de plusieurs coupes de ces zones, avec les plaques en jeu, à différents moments de leur histoire. Une des coupes était la coupe actuelle des Alpes, et sa légende signalait des ophiolites avec un figuré identique à celui de la croûte océanique. Au cours du travail sur ces coupes, un élève de la classe a demandé des précisions sur les ophiolites. Le professeur s'est limité à dire qu'il s'agit de lambeaux de croûte océanique voire de lambeaux de lithosphère océanique.

De plus, une autre différence existe, cette fois entre la demi-classe 1 et la demi-classe 2 de 99/00 : la demi-classe 2, dont le module s'est situé un peu plus tard que pour la demi-classe 1, disposait d'un chapitre sur les chaînes de montagnes plus avancé.

En résumé :

- la demi-classe 1 s'engage dans le problème des ophiolites en sachant qu'il s'agit de lambeaux de lithosphère océanique ;
- la demi-classe 2 l'aborde en sachant également cela mais en ayant aussi réfléchi sur les traces en rapport avec une collision continentale (exemples : plissements, failles).

Nous voyons donc que les élèves 99/00 ne prennent pas en charge le problème des ophiolites dans les mêmes conditions qu'en 98/99. En effet, ils disposent déjà d'éléments de l'histoire des ophiolites, **d'un germe de leur modèle d'explication** : la filiation croûte océanique/ophiolites ; le contexte de convergence de plaques et de collision continentale. Malgré cela, la situation 99/00 nous intéresse pour voir comment les élèves articulent les données des documents sur les ophiolites aux éléments du modèle dont ils disposent déjà. En 98/99, la réponse d'un binôme (binôme 2) avait mis en rapport des éléments du même ordre sans vraiment les articuler et au détriment des données empiriques.

3.1.2. La consigne et les supports (annexe 11)

La consigne donnée aux binômes en 99/00 est un peu différente de celle de 98/99 : elle parle d'**histoire** des ophiolites et non plus d'origine des ophiolites. La voici :

"En utilisant vos connaissances et les documents ci-joints, racontez l'histoire des ophiolites".

Rappelons que l'année précédente, la consigne parlait d'origine des ophiolites mais que le professeur, oralement, avait étendu à l'histoire.

Les documents fournis sont en 99/00 moins nombreux : il n'y a plus la carte géologique de la région, que le professeur juge difficile pour les élèves, mais seulement la photographie et la coupe du Chenaillet. De plus, la coupe fournie en 99/00 est épurée : à l'Ouest, le figuré qui renvoyait aux formations Crétacé de la carte géologique générale est enlevé. A l'Est, les formations situées entre les deux niveaux de laves en coussins ne sont pas légendées ; à tout le moins, leur figuré est conservé, qui peut évoquer la serpentinite.

Enfin le temps donné aux binômes pour construire un premier écrit est un peu plus court qu'en 98/99 : ils disposent en effet d'une quinzaine de minutes.

Le professeur demande aux élèves, dans cette première phase, qu'ils réalisent un déballage des idées, éventuellement complété des questions qui se posent, et qu'ils fournissent un plan détaillé de la réponse.

3.2. Mise en catégorie des réponses des élèves

3.2.1. Méthodologie.

Nous avons choisi de reprendre les catégories précédemment définies avec la classe de Première S 98/99. La limitation à deux documents ne remet pas fondamentalement en cause les contraintes empiriques à expliquer. **Trois contraintes du tableau (figure 11.4) sont cependant écartées : il s'agit** des contraintes 5, 10 et 11.

- la contrainte 5 : proximité lithosphère océanique/lithosphère continentale. Elle prenait du sens sur la carte géologique et sur la coupe de Chenaillet sur lesquelles des formations de la lithosphère océanique jouxtaient des formations Crétacé de la croûte continentale. Il ne reste plus que la coupe sur laquelle les formations Crétacé ne sont plus mentionnées.

- la contrainte 10 : zone détritique intercalée dans les laves en coussins. Cette contrainte pouvait être prise en considération sur la coupe. Son figuré demeure sur la coupe mais sans la légende "zone détritique". Comme il est en partie comparable à celui des péridotites, il peut servir la contrainte 9 (Redoublement de certaines formations).

- la contrainte 11 : failles. Elle correspondait aux failles de Montgenèvre et de la Cerveyrette de la carte géologique. Elle n'a donc plus de raison d'être.

Ajoutons enfin que deux de ces contraintes (la 5 et la 10) étaient considérées, en 98/99, comme difficilement accessibles aux élèves. Leur suppression ne doit pas nous gêner dans la compréhension du fonctionnement des élèves. Car il nous semble a priori que ces derniers sont à même de mobiliser un certain nombre des contraintes restantes dans la mesure où ils disposent cette année-là de germes de modèle (pour tous, la signification des ophiolites ; pour la moitié, l'histoire d'une chaîne de collision) qui pourraient être une aide.

Quatre catégories de réponses sont donc envisagées a priori :

- La catégorie 1 où seule la formation des roches des ophiolites est expliquée

- La catégorie 2 où la formation des roches des ophiolites et leur émergence sont prises en compte
- La catégorie 3 où la formation des roches des ophiolites est suivie d'une émergence par changement du niveau marin (régression)
- La catégorie 4 où la formation des roches des ophiolites est suivie de phénomènes tectoniques et orogéniques.

La mise en catégories des réponses 99/00 s'avère en première approche un peu moins aisée qu'en 98/99. En effet, les "brouillons" récupérés se présentent comme une mosaïque d'éléments de réponses, de questions et d'ébauche de plan.

Nous avons procédé comme suit pour les étudier : pour identifier les contraintes empiriques prises en compte et inférer les éléments du modèle qu'elles servent, nous avons pris en considération l'ensemble de la production écrite de chaque binôme, quelle que soit sa forme (phrase affirmative, questions, titre). Prenons quelques exemples :

- La contrainte "Zone montagneuse" (contrainte 4). Nous admettons qu'elle est prise en compte dans l'affirmation : *"La roche qui était à l'origine sous l'eau fait donc partie de la chaîne de montagne"* (binôme 3, demi-classe 1), dans la question *"Quelle est l'origine de cette montagne ?"* (binôme 7, demi-classe 1), dans le titre de paragraphe *"Formation de la chaîne de montagnes"* (binôme 3, demi-classe 1).
- La contrainte "Zone émergée". Nous estimons que cette contrainte est prise en compte implicitement quand des binômes écrivent : *"Comment cet océan a disparu ?"* (binôme 1, demi-classe 1) ou *"Il y a plusieurs million d'année, grace au doc 1 qui est le témoignage du croute océanique on déduit qu'il a eut un océan séparant deux plaques continentales"* (binôme 6, demi-classe 1).
- Enfin la contrainte "Obliquité des formations rocheuses". Il nous semble que les élèves y ont été sensibles quand dans un schéma de subduction et de collision continentale, ils représentent explicitement **plusieurs formations rocheuses** du complexe ophiolitique pincées entre deux masses continentales (binôme 8, demi-classe 1 ; binôme 10, demi-classe 2) même si l'inclinaison n'est pas exactement conforme (binôme 14, demi-classe 2).

3.2.2. Répartition des élèves dans les différentes catégories

Le tableau suivant rend compte de la répartition des productions écrites des binômes 99/00 dans les différentes catégories. Il rappelle également les résultats obtenus pour la classe 98/99. En 99/00, compte tenu des différences de contexte, nous avons séparé les résultats de la demi-classe 1 et de la demi-classe 2.

	Première S 98/99 (binômes)	Première S 99/00 Demi-cl.1 Demi-cl.2
Catégorie 1 : Formation des roches des ophiolites uniquement	1	1 0
Catégorie 2 : Formation des roches des ophiolites et émergence sans explication	7	1 0
Catégorie 3 : Formation des roches des ophiolites et émergence par eustatisme	1	0 0
Catégorie 4 : Formation des roches des ophiolites et émergence par tectonique (et orogénèse)	3	7 8

Figure 12.10 : Mise en catégories des réponses (ophiolites, Premières S 98/99 et 99/00)

Il y a deux différences marquées entre les réponses de la classe 1998/99 et celles de la classe 1999/00 :

- La presque disparition de la catégorie 2.
- La prise d'importance de la catégorie 4.

* Pour la demi-classe 1 :

7 binômes sur 8 mettent en jeu la convergence de 2 plaques : 6 parlent explicitement de zone de subduction. Voici un extrait de la réponse du binôme 4 (demi-classe 1) : *"Où se forme-t-elle (l'ophiolite) ? ---> zone de subduction. par le mouvement des plaques ramène un morceau de croûte océanique"*. Un binôme ne met pas en jeu explicitement la subduction. Est-il dans ce contexte quand il écrit (le binôme 3) : *"Les 2 continents Africains et Européen se sont rapprochés"*

Vue que les 2 plaques étaient aussi dense l'une que l'autre elles se sont plissées. L'océan s'est asséché et la roche contenue sous l'eau s'est aussi plissée avec la pression des deux plaques" ?

* Pour la demi-classe 2 :

Tous les groupes se placent dans un contexte de zone de subduction, avec 2 plaques porteuses chacune d'un continent. Voici un extrait de celle du binôme 14 (demi-classe 2) : *"Les ophiolites sont les vestiges d'un océan disparue. Les ophiolites sont issues d'une collision de deux masses continentales...²Au fur et à mesure du temps, ces deux continents se rapprochent par un phénomène de subduction."*

A mesure qu'ils se rapprochent, les ophiolites sont écrasées et émergent de l'eau.

Et les ophiolites finissent écrasées entre les deux continents. "

Notons qu'un binôme (le binôme 14) envisage explicitement le passage d'un régime de divergence à un régime de convergence au sein de l'océan alpin.

Les ophiolites sont donc considérées comme des restes de fond océanique pincés, écrasés, voire remontés à un moment donné du fonctionnement d'une zone de subduction. Cela se fait quand les deux masses continentales portées par les plaques se rapprochent. Leur position intramontagneuse est donc la conséquence de mouvements horizontaux.

3.3. La signification des différences entre la classe 99/00 et la classe 98/99

La classe de Première S 99/00 dispose au préalable d'éléments de l'histoire des ophiolites. Malgré cela, nous remarquons des décalages entre la réponse attendue et certaines réponses obtenues. Ce sont eux que nous allons développer et interroger.

3.3.1. Le nombre relativement faible de contraintes empiriques retenues par les élèves

Avec la méthodologie de repérage des contraintes empiriques et après comptage, nous remarquons que les binômes de la demi-classe 1 comme ceux de la demi-classe 2 recourent en moyenne à environ 3 contraintes empiriques (de 2 à 5 contraintes empiriques selon les binômes) sur les 8 considérées a priori comme aisément accessibles par le professeur. **C'est globalement un peu moins que la classe 98/99** dont les binômes avaient retenu en moyenne 4 à 5 contraintes sur les 9 accessibles.

Nous avons recherché quel type de contraintes était moins pris en compte. Nous avons distingué d'un côté les contraintes considérées, à tort ou à raison, comme des invariants (elles ramènent à la formation des roches des ophiolites), et celles prises comme des variants (elles servent l'émersion ou la tectonique). En termes de moyenne, les réponses 99/00 mobilisent moins de contraintes des deux types, mais **c'est surtout du côté des invariants que se fait la baisse**. Nous nous souvenons qu'un certain nombre de contraintes à valeur de variants avaient été considérées à tort comme des invariants par les élèves 98/99 : le Massif du Chenaillet par exemple, pris comme la forme d'une dorsale, participe davantage en 99/00 de la chaîne de montagne. **Pour ce qui est des variants**, nous notons en 99/00 que la reconnaissance d'une "zone émergée" ou d'une "zone montagneuse" vient en tête : 11 (demi-classe 1) + 10 (demi-classe 2) = 21 fois sur $(13 + 18) = 31$ variants au total. Cela montre que les élèves en sont restés à du "banal" quant à la saisie de données empiriques sur les documents.

	Première 98/99 (nombre total divisé par le nombre de binômes)	Première 99/00	
		Demi-classe 1	Demi-classe 2
Invariants	$36 : 12 = 3$	$15 : 9 = 1, 7$	$8 : 8 = 1$
Variants	$21 : 12 = 1, 75$	$13 : 9 = 1, 4$	$18 : 8 = 2, 25$
	$57 : 12 = 4, 75$	$28 : 9 = 3, 1$	$24 : 8 = 3$

Figure 12.11 : Quantité et qualité des contraintes empiriques des élèves (98/99 et 99/00)

Cette meilleure appropriation par les élèves des invariants et des variants peut être mise en relation avec les éléments de l'histoire détenus par eux au préalable.

3.3.2. Peu de contraintes empiriques considérées à tort comme des invariants

Seul le binôme 2 de la demi-classe 1 considère la forme du Chenaillet et la disposition des roches par rapport au relief comme des caractéristiques de la formation des roches qui se sont maintenues ensuite :

- le relief du Chenaillet est certainement pris comme l'édifice volcanique le long duquel dévale la lave. La réponse parle de "*lave des volcans*", de basalte "*situé au sommet du volcan*", de roches (gabbro et serpentinites qui "*s'écoulent de part et d'autre du basalte*". Nous pensons que ce binôme, comme le binôme B5 98/99, pratique un actualisme d'analogie

qui renvoie au fonctionnement d'un édifice volcanique conique avec coulée de laves et non au fonctionnement spécifique d'une dorsale.

3.3.3. Le rapport à la tectonique des élèves

La presque totalité des binômes 99/00 introduit de la tectonique dans l'histoire des ophiolites (voir plus haut). Il s'agit de mouvements horizontaux de convergence de plaques ou de continents. Mais le nombre limité d'appuis sur les documents proposés étonne.

- Le redoublement de certaines formations n'est quasiment pas pris en compte. Le binôme 10 de la demi-classe 2 semble y être sensible quand sur ses schémas, il met en jeu deux plaques portant un continent, l'une plongeante, l'autre chevauchante. Mais contrairement à tous les binômes qui schématisent une zone de subduction, il y a un fond océanique sur les deux plaques⁸⁸.

Cela prépare à notre avis un redoublement ultérieur des formations tel qu'il apparaît sur la coupe. Cette supposition est confortée par la question que pose le binôme 10 : *"Est-ce que le basalte le plus haut sur le relief provient de deux plateaux océaniques distincts ?"*.

- La verticalité des formations rocheuses est davantage retenue par les élèves, notamment dans la demi-classe 2. Un seul binôme de la demi-classe 1 (binôme 8) la prend en compte sur son schéma et s'interroge dans son texte à ce sujet : *"Pourquoi cette disposition ? (écrasement, plissement lors de la formation du massif)"*. Dans la demi-classe 2, 6 binômes le font, par le texte et/ou les schémas ; mais sur les 4 schématisations rendues où figurent les différentes formations rocheuses, seulement deux ajustent bien le pendage de ces formations à celui de la coupe. Cela nous conduit à envisager **une restitution de schémas proches de ceux faits en cours** (rappelons que ces élèves disposent déjà d'un germe du modèle d'explication des ophiolites).

En conclusion, en 99/00, le cours a certainement incité les élèves à recourir à de la tectonique, mais sans que les élèves construisent vraiment sa nécessité. Qu'ont fait certains élèves ?

- Ils ont surtout sélectionné et importé certains aspects du modèle de la cinématique des plaques : une ancienne zone de subduction fonctionnant jusqu'à une collision continentale. Mais ils ont peu fait fonctionner un état initial du Chenaillet, au demeurant assez bien identifié par eux, jusqu'à récupérer l'état figuré sur la coupe. Comme nous l'avons déjà vu précédemment, **le modèle n'a pas suffisamment interagi avec les données empiriques ; il s'y est substitué**.

- D'autre part, ils ont eu tendance à doter les plaques d'une mobilité aussi aisée que celle des pièces d'un puzzle : les mouvements horizontaux (mouvements des plaques) sont faciles à obtenir, tout comme les mouvements verticaux (surrection des reliefs).

- Que devient alors le temps dans les explications ? Très peu de productions parlent explicitement du temps. Pourtant, il nous semble que, de ce point de vue, nous pouvons ranger les réponses des élèves en deux ensembles différents :

⁸⁸ On trouvera en annexe 12 ces deux types de modèles ;

- Les réponses mobilisant le temps de l'histoire

La production du binôme 3, par exemple, raconte l'histoire d'un océan séparé par deux continents. A cause du rapprochement des continents, cet océan "s'est asséché" et une chaîne de montagnes s'est formée. A première vue, nous trouvons les deux grands actes retenus par les chercheurs pour l'histoire des ophiolites, mais sans aucune référence aux documents : c'est une "mise en histoire", dès le départ située dans une période lointaine ("*140 millions d'années*", une précision temporelle certainement importée du cours car aucun des documents ne la contient), et dont le déroulement nous permet de suivre les aventures de 3 personnages, certains avec des attributs. Ainsi l'océan a une dorsale : "*vu qu'il y avait un océan -> une dorsale*". Le temps long de l'histoire n'a d'intérêt que par les événements qu'il contient et leur enchaînement. Nous constatons d'ailleurs que leur survenue s'apparente à du catastrophisme de 1er niveau. Nous retrouvons une forme de raisonnement, déjà identifiée en sciences physiques (Viennot, 1996) et en Sciences de la vie et de la Terre (C. Orange, D. Orange, 1995).

- Les réponses comportant une ébauche de problématisation du temps

C'est le cas de la production du binôme 5. Ce binôme s'interroge sur le phénomène qui a fait passer le fond océanique au sommet du Chenaillet et sur sa durée :

"Par quel moyen les laves en coussins se sont retrouvées ds le Massif du Chenaillet.

** Quel phénomène les a amené jusque là*

** en combien de temps cela s'est fait"*

Cela va à l'encontre d'une utilisation malléable du temps comme dans la mise en histoire. C'est selon nous l'expression d'une problématisation en marche. L'ensemble où la durée des phénomènes sont questionnés, de même que leur liaison.

4. Analyse des réponses écrites des élèves de la classe de Première S 2001/02

4.1. Le déroulement de la situation de classe

4.1.1. Le contexte du recueil de données

Le recueil de données que nous étudions maintenant concerne une classe de Première S de 30 élèves d'un autre établissement, avec un autre professeur⁸⁹. Contrairement aux recueils précédents, il ne fait pas partie d'une séquence d'apprentissage. Il vient après que les élèves ont étudié l'organisation du globe terrestre et l'expansion océanique, dans le cadre des nouveaux programmes de SVT de la classe de Première S. Il est obtenu à la fin d'une séance de travaux pratiques, alors que la classe est dédoublée. Les deux demi-classes n'entrent pas dans ce recueil avec le même bagage notionnel : en effet, la demi-classe 1 a visionné un petit film présentant les ophiolites d'Oman à la fin de sa séance de travaux pratiques sur les fonds océaniques ; ce n'est pas le cas de la demi-classe 2. En revanche, tous ont réfléchi sur les différents types de failles (faille normale, faille inverse). Cela justifie que nous distinguons les productions de la demi-classe 1 (15 élèves) de celles de la demi-classe 2 (15 élèves). Comme dans les recueils précédents, le professeur se garde de donner des éléments de réponse.

⁸⁹ Il s'agit d'une classe de Première S du Lycée Lesage à Vannes. Monique Michaud en est le professeur.

4.1.2. La consigne et les supports (annexe 11)

Le questionnement et les supports que nous avons construits en 2001/02 présentent quelques différences avec ce que nous avons donné aux élèves des classes antérieures.

Après une présentation analogue des ophiolites du Massif du Chenaillet, il y a cette fois-ci **deux questions** qui sont fournies successivement ; la seconde vient après que les élèves ont répondu à la première. Voici ces questions :

- Première question (environ 30 mn) : *" En utilisant vos connaissances et les documents 1 et 2, racontez l'histoire des ophiolites du Chenaillet depuis leur formation jusqu'à aujourd'hui."* C'est une consigne qui ressemble à celle de 99/00. Elle demande **l'histoire des ophiolites** mais elle précise les limites temporelles de cette histoire, depuis la formation des ophiolites jusqu'à aujourd'hui, de façon à contraindre les élèves à ne pas limiter en durée leur histoire et à envisager une certaine complexité de cette histoire (plusieurs épisodes...).
- Deuxième question (environ 10 mn et sur une autre feuille que celle utilisée pour répondre à la première question) : *"Quelles difficultés avez-vous eues pour répondre à cette question ?"*. Il s'agit pour nous de tester la conscience et la difficulté qu'ont les élèves à appréhender la tectonique.

Les documents qui servent d'appuis aux questions sont les mêmes que ceux donnés en 1999/00 : il y a une photographie et une coupe du Chenaillet.

- Mais l'ordre de présentation est inversé : c'est la coupe qui a le statut de document 1 ; c'est une façon de lui donner une plus grande importance ; en conséquence, la photographie (document 2) dont la qualité en photocopie est variable (voir l'entretien avec A. Michard), n'a plus qu'une fonction illustrative.
- D'autre part quelques aménagements ont été faits sur la coupe, dans une logique de simplification (voir l'entretien avec A. Michard, annexe 2) :
 - * Nous avons remplacé la légende "laves en coussins " par "basalte en coussins" ;
 - * La zone avec gabbro a maintenant un "figuré" homogène (elle est totalement blanche) ; nous avons supprimé les filons qui s'y trouvaient et qu'il était difficile d'expliquer sans apports nouveaux.
 - * Enfin, nous avons simplifié la nature de la formation rocheuse située entre les deux niveaux de basalte en coussin. Cette formation se situe à l'Est du Chenaillet, dans le replat (le replat du Soureou) qui le sépare du sommet suivant (Le grand Charvia) à basaltes en coussins. Les géologues identifient là un complexe détritique avec des fragments de roches ophiolitiques dont de la serpentinite (Lemoine & al, 1995, p. 63). Nous avons assimilé ce niveau à de la serpentinite seule. Ce qui nous intéresse est en effet de voir comment les élèves réagissent devant ce "redoublement" de formations, que les chercheurs lient à de la tectonique, même si ce ne sont pas exactement celles que l'on observe sur le terrain.

4.2. Les nécessités construites par les élèves

4.2.1. La nécessité d'une formation des roches

Tous les élèves de la classe de Première S 2001/02 prennent en compte l'origine océanique des roches des ophiolites et mettent au service de cette nécessité des contraintes empiriques conformes à celles attendues : ils sont nombreux à reconnaître une croûte océanique dans l'association que forment le basalte et le gabbro et plusieurs disent explicitement que les figures de pillow lavas caractérisent un volcanisme aquatique.

Cependant, il est une donnée qui préoccupe un tiers de la classe (10 élèves sur 30) : il s'agit de **l'absence de gabbro** intercalé entre serpentinite et basalte en coussins dans la partie Est de la coupe. Tous les élèves ne l'expliquent pas de la même manière :

- la majorité d'entre eux (6 sur 10) imagine que cette formation gabbroïque a existé et qu'elle s'est formée avec le basalte encore présent. Depuis, elle a été évincée en profondeur, par le biais de phénomènes tectoniques. Voici en exemple un extrait de la réponse 5 : *"Une force a donc dû agir et faire disparaître la couche présente de gabbro. Peut-être est-ce une faille inverse agissante en cassant la couche de gabbro plus fragile qui a formé cette incohérence entre les roches"* (réponse 5).

- trois élèves (17, 21, 27) pensent qu'il n'y a pas eu formation de ce niveau à gabbro et pour l'expliquer, ils se réfèrent à la vitesse de cristallisation du magma : *"Il n'y a pas de gabbro dans la deuxième partie car le magma n'a pas eu le temps de se cristalliser"* écrit l'élève 21. En toile de fond, il y a dans deux de ces réponses (la 17 et la 27) des phénomènes tectoniques qui mettent le magma dans l'impossibilité de donner du gabbro : *"Au fond d'un océan, il y avait une faille. Suite à de la distension (en fait, de la compression comme l'indiquent les schémas illustratifs), la partie située à l'est de cette faille est passé brutalement au dessus de la partie ouest. Cela a dû être brutal puisque la gabbro n'a pu cristalliser dans la partie est."* (élève 27)

4.2.2. La nécessité de phénomènes tectoniques

Dans la classe de Première S 2001/02, tous les élèves recourent à des phénomènes tectoniques pour expliquer la position et la disposition des roches ophiolitiques.

Les contraintes empiriques à expliquer

Tous les élèves ont retenu sur les documents des données empiriques qu'ils ont mis justement en rapport avec de la tectonique (si l'on excepte le niveau à gabbro manquant rapporté par quelques uns à des conditions de refroidissement particulières ; voir plus haut). Et ce sont surtout la verticalité (obliquité) des formations ou leur redoublement qu'ils ont cherché à expliquer. Nous constatons une différence dans le nombre de ces données selon qu'ils sont dans la demi-classe 1 ou 2 :

- Demi-classe 1 (demi-classe qui a vu le petit film sur les ophiolites d'Oman) : 2 à 3 contraintes empiriques sont mobilisées, principalement la verticalité (obliquité) des formations rocheuses et le redoublement de certaines formations ; vient ensuite l'absence de formation gabbroïque à l'Est.

- Demi-classe 2 (demi-classe qui n'a pas vu le film sur les ophiolites d'Oman) : 1 à 2 contraintes empiriques sont expliquées ; les élèves, comme dans l'autre demi-classe, ont surtout été sensibles à la verticalité des formations rocheuses et au redoublement de certaines ;

Les possibles tectoniques

Nous savons que cette classe a étudié les différents types de failles. Leurs réponses montrent une mobilisation de ces structures tectoniques ; elles envisagent aussi des plissements ou des glissements de formations rocheuses. Mais ce qui surprend tient à la diversité et à la plasticité des possibles tectoniques. Tout est possible en termes de mouvements et de déformations, même son contraire. Développons et illustrons ce que proposent les élèves.

- De la distension ou de la compression

Les explications de cette disposition des formations rocheuses (obliquité, redoublement) mettent aussi bien en jeu des phénomènes de divergence que des phénomènes de convergence.

* Un exemple d'explication par des mouvements horizontaux divergents :

Deux élèves (16 et 21) prennent l'analogie du paquet de cartes à jouer pour expliquer le glissement des formations les unes par rapport aux autres :

" En temps normal, ces roches appartiennent à la croûte océanique or ici, elles se trouvent sur le continent. On peut donc penser que ceci est dû à un phénomène d'expansion et grâce au système du paquet de carte la péridotite du manteau se retrouve à coté du basalte". La divergence au sein des fonds océaniques entraîne une séparation naturelle des différentes formations rocheuses et provoque leurs mouvements verticaux.

* Un exemple d'explication par des mouvements horizontaux convergents :

L'élève 14 propose, schémas à l'appui, une confrontation de deux parties de planchers océaniques, de densité égale, ce qui empêche l'enfoncement de l'un sous l'autre ; l'intensité de l'affrontement plisse puis casse les formations rocheuses ; elles "explosent" et se réorganisent vers le haut à la manière des fleurs d'un bouquet. Voici cette réponse :

Figure 12.12 : réponse de l'élève 14 (Thomas)

" Le Mont Chenaillet observé comporte les 3 sortes de roches formant le plancher océanique, dans un ordre identique, sauf pour une couche de gabbro qui manque entre la péridotite et le basalte en coussins.

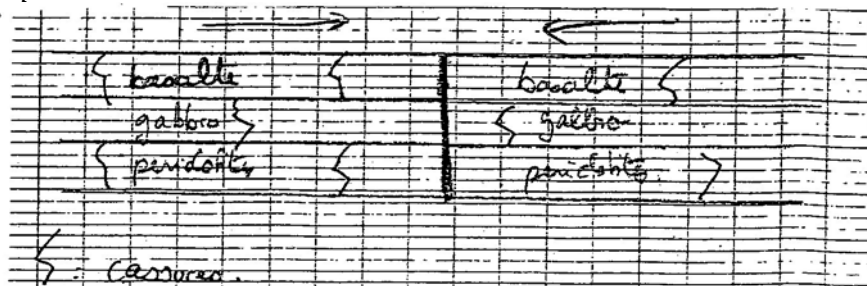
Vu la forme et la disposition des différentes strates, on peut penser qu'il y a eu modification dans la disposition de ces couches par un phénomène géologique...

Une confrontation entre deux parties de plancher océanique peut se dérouler ainsi :

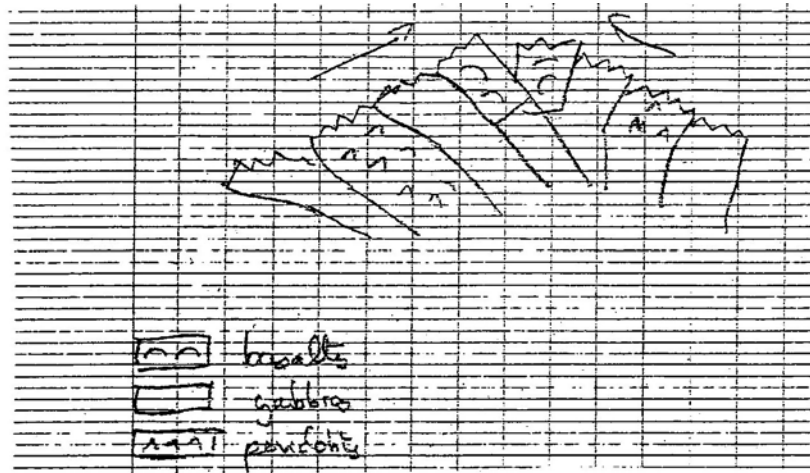


La confrontation des deux parties (de densité équivalente, puisque de même composition) crée des mouvements de compressions énormes (aucune ne passe dessus ou dessous l'autre).

Cette très forte compression fait onduler la roche petit à petit et provoque des cassures au niveau de chaque couche :



Les "blocs" brisés de chaque roche deviennent de plus en plus indépendants et le mouvement continu de compression les oriente alors plus facilement.



L'ordre reste celui du plancher mais peut aussi différer (voir gabbro de droite avec un mauvais emplacement).

L'érosion façonne les roches et forme la montagne lisse".

Dans cette réponse, c'est la compression intense et prolongée qui est à l'origine de la disposition des différentes formations du Chenaillet. Comme dans le type précédent, le modèle fonctionne en partant de mouvements horizontaux et en admettant que les formations rocheuses sont capables de glisser indépendamment des autres lorsqu'elles quittent la position horizontale. Mais ici, ce sont des mouvements convergents qui déclenchent tout, soient des mouvements totalement opposés à ceux qui existent dans une distension.

- Du local ou du global

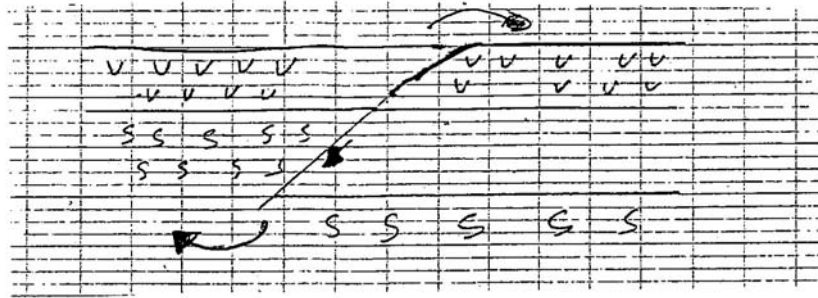
L'explication de la disposition des formations rocheuses passe soit par des phénomènes tectoniques locaux (échelle locale) soit par la mise en jeu de plaques (échelle globale). Prenons deux exemples illustrant cela :

* Un exemple d'explication par une zone de subduction :

L'élève 28 envisage le plongement d'une plaque océanique sous une autre plaque océanique jusqu'à blocage et rotation :

Figure 12.13 : Réponse de l'élève 28 (Marc)

" Les ophiolites du Chenaillet se sont formé a partir de deux plaques de croûte océanique. Au départ, une plaque est passé sous l'autre (zone de subduction).



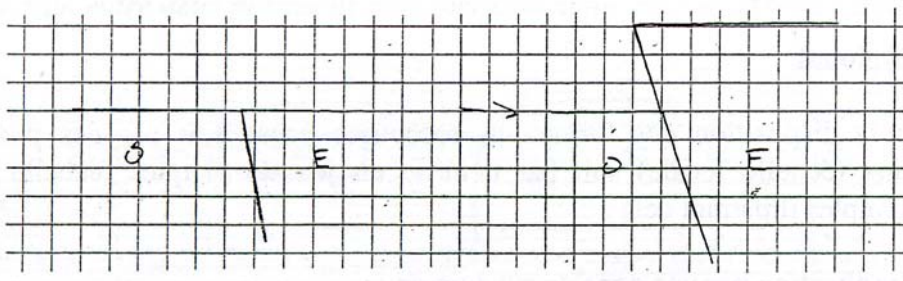
Les deux plaques ont coulissé jusqu'à un moment où les 2 plaques ont bloqué et formé une montagne, ainsi les plaques ont tourné".

* Un exemple d'explication par une faille inverse :

Une faille inverse ou faille de compression se définit lorsque, suite à un phénomène de compression, il y a rupture et déplacement relatif des blocs fracturés : un des blocs tend à chevaucher l'autre. L'élève 27 explique les ophiolites du Chenaillet de cette façon :

Figure 12.14 : Réponse de l'élève 27 (Pierre Antoine, extrait)

"Au fond d'un océan, il y avait une faille. Suite à de la distension (en fait il s'agit de compression si l'on se réfère aux schémas de l'élève), la partie située à l'est de cette faille est passé brutalement au dessus de la partie ouest.



... Ensuite par compression la partie ouest est passé en dessous de la partie est puisque celle-ci se situe au dessus des pillow lavas sur le schéma."

Nous voyons avec ces deux exemples que l'explication peut se faire à grande échelle (zone de subduction) ou à petite échelle (emplacement d'une faille inverse), enrôler des plaques d'une certaine superficie (zone de subduction) ou des blocs de taille plus réduite (emplacement d'une faille inverse), et obtenir des chevauchements par le ploiement (zone de subduction) ou par la cassure (zone d'une faille inverse).

- De la subduction ou de la surrection

Nous venons de voir que des élèves (exemple : l'élève 28) se placent dans un contexte de zone de subduction, où une plaque océanique plonge sous une autre plaque océanique. Il en est d'autres pour qui la rencontre de deux plaques océaniques ne se traduit pas par une subduction mais par une surrection des deux plaques. C'est ce qui se passe pour l'élève 14 (voir plus haut) mais aussi pour l'élève 30 : "Au début du Mont Chenaillet on peut penser qu'une rencontre (choc) entre 2 croûtes océanique a eu lieu. La collision a entraîné la formation progressive d'une chaîne de montagne (où se trouve le Mt Chenaillet)."

Dans un même contexte de convergence, nous remarquons que deux directions possibles des plaques, enfoncement dans la subduction ou orientation vers le haut avec la surrection, sont à même d'expliquer la disposition des couches. Certains élèves (c'est le cas de l'élève 2) propose d'ailleurs les deux possibilités.

- Des changements de régime de tous ordres

Il est des productions où les élèves font intervenir des changements de régime des mouvements, en donnant l'impression de les banaliser. Citons l'élève 20, qui passe aisément d'un régime de divergence, dont l'installation relève presque de la génération spontanée, à un régime de convergence sous la tutelle de mouvements de convexion. Notons, comme nous l'avions déjà remarqué (classe 1999/00) que cette réponse prend aussi les traits d'une mise en histoire.

Figure 12.15 : Réponse de l'élève 20 (Aurélie, extrait)

"I. Création d'une mer.

Il y a très longtemps, une mer se créa (peut-être la mer Méditerranée). Celle-ci naissa dans le continent en l'élargissant. L'eau apparut et au fur et à mesure que les deux parties du continent s'éloignaient, s'est formé de la matière la où a débuté la mer. Cette matière est de la lave en fusion qui a remonté à la surface et qui provient du manteau. La croûte océanique et le manteau supérieur s'éloignaient donc du nouveau rift en flottant sur l'asthénosphère (régime de divergence).

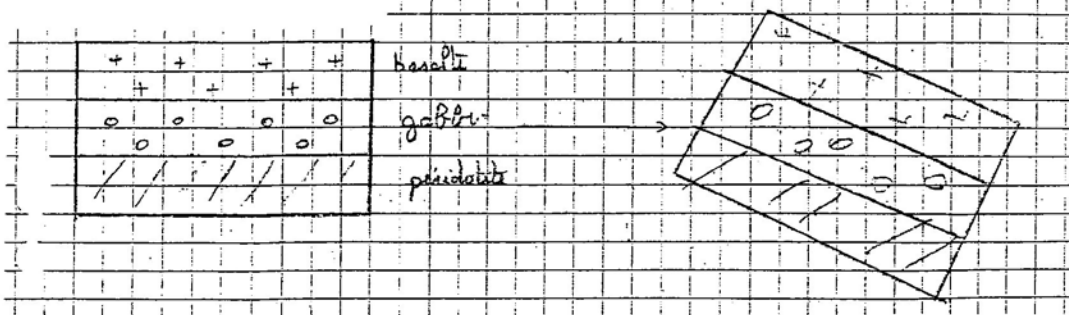
II. Disparition de cette mer.

Puis des mouvements de convection fit rapprocher les deux parties du continent (régime de convergence). La lithosphère océanique au lieu d'aller sous la croûte continentale, se plissa et créa des montagnes"...

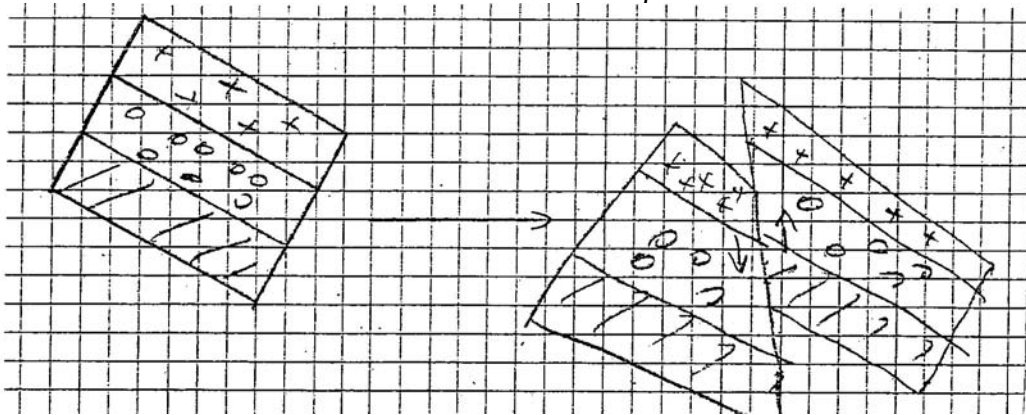
Ce n'est pas la seule production qui s'accommode de changements de régime dont l'origine n'est pas forcément interrogée. Dans l'exemple ci-dessus, ils sont vus à l'échelle des plaques. Il en est d'autres qui se comprennent à l'échelle locale, avec un côté ad hoc évident. Ainsi, à une échelle locale, reprenons tous les changements de régime de la réponse 1. En premier lieu, cette production reconstitue et schématise un fond océanique dans lequel les formations sont en position horizontale : *"on peut voir que le Mont Chenaillet était sûrement ainsi (c'est-à-dire un fond océanique avec des niveaux rocheux horizontaux) il y a de nombreuses années mais que celui-ci a subit une déformation, un glissement"* (premier changement de régime)... *"Le terrain a subit ensuite une rotation"* (deuxième changement de régime). La réponse s'achève sur le rôle de l'érosion qui polit l'ensemble et *"permet ensuite de donner la forme à la montagne"*. La tectonique des élèves est **une tectonique de bricoleurs** : ils inventent avec les matériaux (fonds océaniques, plaques,...) et des outils (rapprochement, écartement, affrontement, failles inverses,...) le montage du Chenaillet. Du fait des enseignements ayant précédé cette situation, les élèves de la classe 2001/02 étaient mieux équipés que ceux des classes étudiées précédemment pour définir des phases de fragmentation de la région (failles), des phases de déformations diverses (rotation, plissement, glissement) et enfin un temps de ponçage (érosion). Ce sont ces opérations qui sont pour eux importantes et qu'ils peuvent organiser de différentes manières. En revanche, il y a peu de justification des changements de régime. **Tout est orienté par rapport à la figure à obtenir.** Les opérations et les transitions de l'une à l'autre paraissent faciles : la panoplie est grande et le changement d'outils aisé. La réponse 3 peut être comparée à un bricolage du Chenaillet :

Figure 12.16 : Réponse de l'élève 3 (Emmanuel)

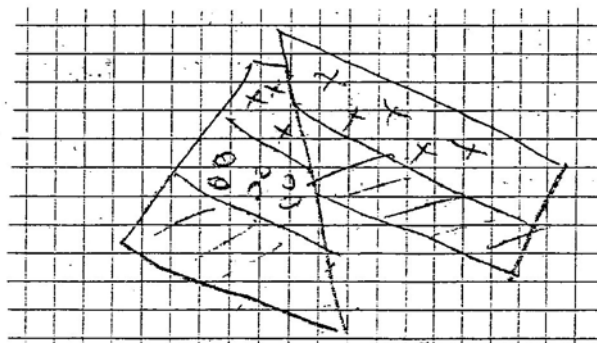
"Au premier abord, on remarque une couche de péridotite située au dessus de la couche de gabbro. Hors on sait que la litosphère océanique est composée de la couche supérieur à la couche inférieur de basalte, puis de gabbro et enfin de péridotite. Il y a donc ici une anomalie que l'on peut traduire par une déformation dans cet espace.



On peut tout d'abord penser à une rotation de ce milieu de l'ouest vers l'est, un basculement, comme sur le schéma précédent.



On peut imaginer que le gabbro situé à droite de la faille est coulissé à cause de la forme du milieu, ce qui amène à ce schéma :



Cette réponse est complétée d'une interrogation : "Je n'arrive pas à comprendre comment le péridotite situé à l'Est a pu se retrouver là."

D'autres réponses, comme la réponse 4, participent de ce type. Notons enfin que les processus de compression ou de distension ne permettent pas à tous les élèves d'obtenir le résultat de la coupe. C'est alors que des phénomènes complémentaires jouent. Ce peuvent être une rotation terminale des plaques ou des blocs ; en effet subduction et faille inverse peuvent superposer des formations de même nature mais sans les redresser autant que dans le Chenaillet (réponse 28 ci-dessus mais aussi réponse 1).

4.2.3 Conclusion

Cette dernière situation (2001/2002) se distingue des précédentes par le fait que les élèves disposent d'une panoplie de possibles tectoniques beaucoup plus fournie : elle comprend non seulement les mouvements des plaques mais également des processus conduisant à des structures tectoniques telles que les failles. Mais tout se passe comme si les élèves se permettaient alors tous ces possibles tectoniques, sans règle ni contrôle. Contrairement aux chercheurs (voir l'entretien d'A. Michard), la dynamique des plaques ne donne aux élèves que des possibles et pas des impossibles. C'est **la marque évidente d'une absence de problématisation**. Les élèves proposent seulement des solutions à l'obtention d'une "figure" géologique. En conséquence, le temps n'est pas non plus problématisé, en particulier le temps de l'actualisme de deuxième niveau : c'est en général le temps de la "mise en histoire".

5. Conclusion

L'étude de ces trois cas relatifs aux ophiolites montre la difficulté que les élèves ont à entrer dans la tectonique (à tout le moins la banalisent-ils) et à construire la nécessité du temps long. De quelles manières les élèves s'en sortent-ils alors ? Il nous semble qu'ils contournent la difficulté par le recours fréquent à de l'actualisme d'analogie et au catastrophisme de premier niveau, par la construction d'espaces problématiques différents, et enfin par la réduction de l'explication historique à une "mise en histoire".

5.1 Le recours à de l'actualisme d'analogie

C'est aisément que les élèves comparent certains aspects du Chenaillet à une dorsale actuelle et expliquent ainsi la formation des différentes roches. Plusieurs types d'analogies sont réalisées :

- des analogies de structure : pillow lavas, cortège de roches, faille.
- des analogies de forme entre le Mont Chenaillet et une dorsale actuelle
- des analogies de fonctionnement : le modèle de fonctionnement de la dorsale ancienne est celui d'une dorsale actuelle ; le décapage de formation ancienne peut ressembler à de l'érosion actuelle.
- des analogies de règles empiriques ou de règles du sens commun. Par exemple : une lave qu'elle soit ancienne ou actuelle, donne des figures en coussins lorsqu'elle refroidit dans l'eau ; ou encore plus on est en altitude, plus la température est basse, plus le refroidissement est rapide.

Ce type d'explication constitue non seulement **un obstacle à la construction de la nécessité du temps long mais aussi à celle de l'Histoire géologique**. Implicitement, cette explication sous-tend un cadre immuable par bien des côtés : cela tient pour les règles physico-chimiques mais que dire de la fixité des formes du relief ou des conditions environnementales ?

5.2. La construction d'espaces de contraintes particuliers

Nous avons montré que, chez un certain nombre de binômes, la disposition des roches par rapport au relief est assez souvent rapportée à la formation de roches magmatiques par solidification d'un magma donc au fonctionnement de la dorsale. C'est une mise en jeu d'un actualisme d'analogie. Au contraire, les chercheurs l'expliquent comme le résultat des phénomènes tectoniques et de l'érosion (actualisme de 2^e niveau). Mais cette analogie avec de l'actuel que font les élèves **ne se réalise pas point par point**, ce qu'ils règlent de différentes manières, ce qui joue sur les espaces problématiques construits :

5.2.1. Par la mobilisation de règles empiriques ad hoc, comme par exemple une relation entre altitude, température et vitesse de refroidissement de la lave ; ou encore celle liant la vitesse de refroidissement de la lave au milieu aqueux ou aérien.

5.2.2. Par une inversion de causalité

En 1999/00, nous avons enregistré la présentation et la confrontation des travaux des binômes (voir la transcription en annexe 13). L'étude des propos de deux élèves nous permet d'envisager chez l'une, Aline, une inversion de la causalité.

- Aline explique la disposition des roches par rapport au relief : au sommet du Chenaillet, il y a du basalte, sur les flancs du gabbro et dans les creux de la serpentinite. Son explication met donc en jeu deux contraintes empiriques, l'association de roches et leur disposition, et la règle empirique suivante : plus une roche se refroidit vite, moins elle s'écoule. Elle dit en effet (A, 2) : *"le basalte il se refroidit immédiatement, donc il est au sommet du volcan comme on le voit là et il peut, il se forme en laves en coussin. Et ensuite, y a le gabbro qui se refroidit moins vite donc, il remonte, il a le temps de s'écouler, il se refroidit là. Et les serpentinites qui se refroidissent encore moins vite, et ils ont le temps de s'écouler, pareil. Eux, ils vont dans les creux"*.

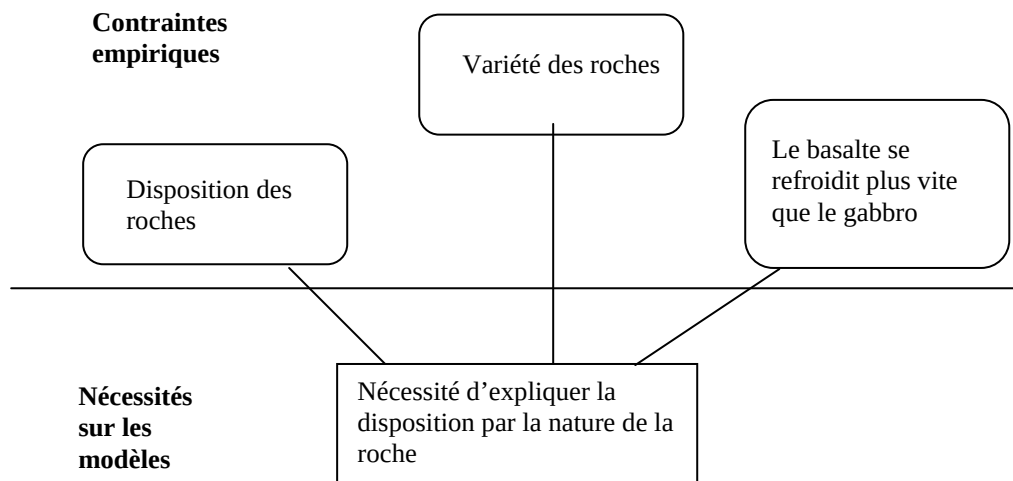
- Une autre élève, Donia, intervient pour dire son scepticisme : *"Moi je vois pas comment il fait pour se refroidir, d'abord en haut et puis ensuite en bas ? Parce qu'en fait c'est le même magma, avec la même composition, je vois pas pourquoi il se refroidirait plus vite à un moment donné que..."* (Do, 31). La suite de son propos montre que, tout en reprenant les mêmes contraintes empiriques, elle est sur une autre règle : plus il fait froid, plus le magma se refroidit vite (règle des chercheurs).

En conséquence, ces deux élèves construisent des nécessités sur le modèle totalement opposées : **Aline construit la nécessité d'expliquer la position des roches par leur nature ; Donia, celle d'expliquer la nature des roches par leur position**. La figure 12.17 présente des « fragments » de l'espace des contraintes de ces deux cas.

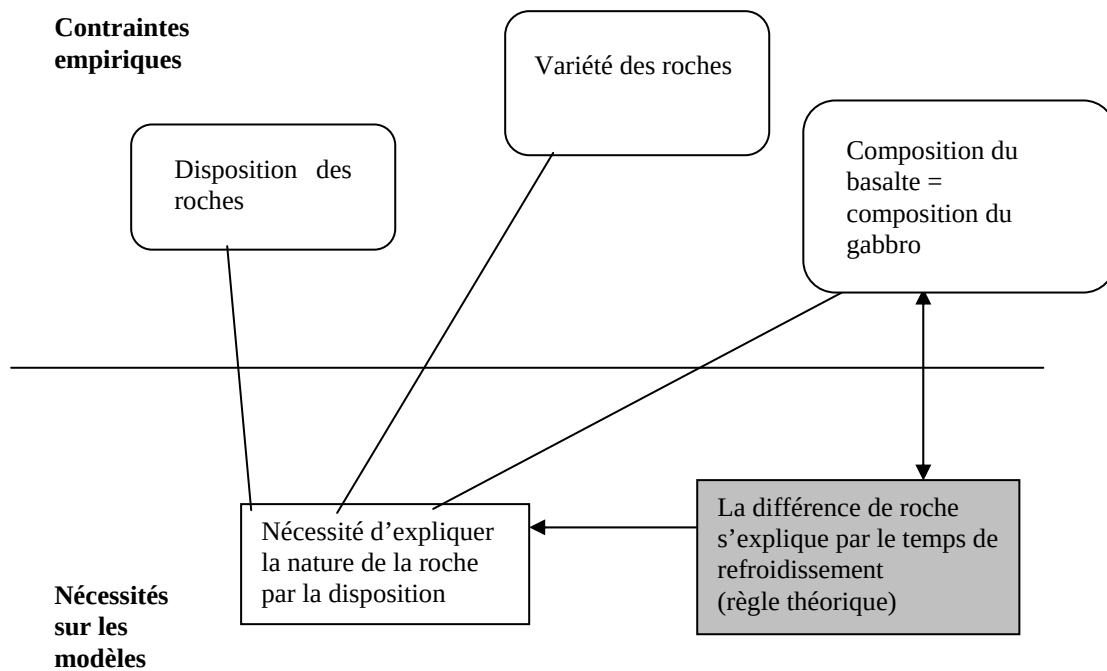
5.3. La mise en histoire de la formation des roches

Ce qui ne relève pas de l'analogie directe, ce qui visiblement met en jeu une variation (exemple : la disposition des roches en surface), peut s'intégrer sous la forme d'épisodes dans le cadre de la nécessité convoquée par l'actualisme d'analogie.

Enfin, nous nous interrogeons sur les conditions d'une véritable entrée des élèves en tectonique et **sur la construction du temps long** : dans le cas des ophiolites, l'enrichissement du registre des modèles en possibles tectoniques ne peut suffire.

**Figure 12.17a**

Mise en place des ophiolites : « fragment » d'espace des contraintes d'Aline

**Figure 12.17b**

Mise en place des ophiolites : « fragment » d'espace des contraintes de Donia

TROISIEME ETUDE

LE PROBLEME DE L'ORIGINE DE LA VIE

Evénement ou phénomène ?

CHAPITRE 13

LE PROBLEME DE L'ORIGINE DE LA VIE SUR LA TERRE

Un état du savoir

Sommaire

1. La compréhension du problème de l'origine de la vie par les chercheurs actuels
2. Quelques éléments d'histoire des sciences
3. Mobilisation de l'actualisme par les chercheurs actuels
4. La construction du problème de l'origine de la vie par les scientifiques actuels
5. Conclusion

La communauté scientifique actuelle comme la plupart des lycéens s'accordent pour dire qu'il n'y a pas toujours eu des êtres vivants sur la Terre et que leur apparition s'est faite il y a longtemps. D'un point de vue général, là s'arrêtent les ressemblances. En effet, il s'agit pour la première d'un véritable problème, difficile certes, mais auquel elle s'attaque en fédérant toutes les sciences de la nature : astronomie, planétologie, sciences physiques et chimiques, biochimie et géochimie, biologie et géologie (M. C. Maurel et S. Tirard, 1999, p. 713 ; F. Raulin & al, 1997, p. 31) ; tandis que les lycéens, comme nous le verrons, semblent le banaliser (quand les conditions étaient bonnes, la vie est apparue) ou l'esquiver au profit de l'histoire de la vie.

Comme dans les autres problèmes étudiés dans ce travail, nous allons tenter de caractériser le plus précisément possible les différentes utilisations du temps des chercheurs et des élèves. Pour cela, nous nous intéressons d'abord à la manière dont la communauté scientifique actuelle construit le problème de l'origine de la vie. Que cherche-t-elle à expliquer ? Quels processus envisage-t-elle ? Que met-elle en débat ?

Nous nous proposons d'approfondir ces questions pour comprendre les conditions de possibilité de ce problème et ainsi éclairer le relatif détachement que lui témoignent les élèves. Nous nous appuierons en particulier sur l'entretien que nous avons eu, le 1er février 2001, avec le chimiste A. Brack, dont les travaux portent sur l'origine de la vie.

1. La compréhension du problème de l'origine de la vie par les chercheurs actuels

1. 1. La situation dans le temps et dans l'espace de l'origine de la vie

En l'état actuel du savoir, l'apparition de la vie sur la Terre est **un évènement historique unique** qui se serait produit entre -3,8 et -4 Ga (Ga = Giga-année)⁹⁰. Les chercheurs font référence aux plus anciennes traces connues d'êtres vivants identifiées sans ambiguïté : il

⁹⁰ Ga = Giga-année = milliard d'années

s'agit de micro-organismes analogues aux cyanobactéries, datées de -3,5 à -3,6 Ga et présentes dans des formations rocheuses du Nord Ouest de l'Australie (F. Raulin & al, 1997, p. 37). Mais ils ont trouvé des traces de carbone fossile, vraisemblablement d'origine biologique⁹¹, dans des sédiments plus anciens (-3,8 et -3,85 Ga, Groenland) ; ces traces suggèrent l'existence d'êtres vivants ayant une activité photosynthétique (A. Brack, 2002a, pp.72-73). Ces données du registre empirique de terrain, identifiées et interprétées par comparaison avec des données concernant les êtres vivants actuels, situent donc l'origine de la vie au-delà de -3,8 Ga.

D'autres données de terrain, impacts météoritiques et traces de fusion superficielle associées⁹², ont été relevées sur la Lune et situées dans les premiers âges de la Terre, à savoir ses 500 premiers millions d'années. Il est raisonnable de penser que la Terre proche a subi un bombardement équivalent à cette époque. La vie n'a pas pu apparaître dans ce contexte cataclysmique de surface. F. Raulin (1994, p. 46) écrit que *"la vie a eu besoin, pour apparaître, d'une Terre stabilisée"* et que *"Cette contrainte conduit à supposer que l'évolution chimique terrestre a dû attendre près de cinq cents millions d'années avant de se mettre en place dans toute sa complexité"*.

Comme la Terre a 4,55 Ga d'âge (P.Richet, 1999, p. 331), la fourchette raisonnable de temps au cours de laquelle la vie a pu apparaître va **de près de -4 Ga à environ -3,8 Ga**, soient 200 Ma, ce qui est peu à l'échelle des temps géologiques.

Cette fourchette exprime à la fois l'incertitude que l'on a à dater cet événement, c'est-à-dire à le placer sur la flèche du temps, et la durée disponible pour le processus qui y conduit.

Les scientifiques s'interrogent sur la possibilité qu'une telle durée "contienne" l'émergence d'une vie terrestre. Ils disent ne pas pouvoir honnêtement répondre à cette question (F. Raulin, 1994, p. 46). Dans l'hypothèse d'un commencement de la vie sur la Terre, ils n'ont retrouvé aucune trace de l'épisode prébiotique⁹³ et les expérimentations de la chimie prébiotique ne reproduisent pas toutes les étapes d'une évolution moléculaire s'achevant sur la formation d'êtres vivants ; enfin, ces expériences ne pourront jamais s'inscrire dans les mêmes échelles de durée : leur durée est au maximum de quelques dizaines d'années ce qui n'a rien à voir avec la durée de la période géologique disponible (millions d'années). La fenêtre de temps disponible est-elle gigantesque en durée ou au contraire trop réduite pour permettre l'apparition de la vie ? Malgré l'incertitude, les chercheurs tranchent : ils choisissent de raisonner **sur l'émergence terrestre de la vie** et font de la panspermie, c'est-à-dire l'ensemencement de la Terre par des êtres vivants venus de l'espace, une porte de sortie qu'ils tentent le plus possible d'éviter. Aucune donnée ne vient pour le moment conforter cette théorie qui ne ferait que repousser plus loin dans le temps et ailleurs dans l'espace le problème de l'origine de la vie.

Il y a donc un consensus pour réfléchir sur une émergence terrestre de la vie à partir d'un processus d'évolution moléculaire. Mais il y a aussi des points de controverse, qui mobilisent la fenêtre de temps disponible et les conditions de la Terre primitive. Nombreux sont en effet les chercheurs qui pensent maintenant que l'atmosphère primitive était dominée par du

⁹¹ Les êtres vivants fixent mieux les isotopes les plus légers , ce qui fait que la matière organique biologique a un rapport 12C/13C plus élevé que la matière organique non biologique (A.Brack, b, 1999, p. 51).

⁹² Il s'agit des cratères d'impact météoritiques et des "mers de laves" lunaires, accessibles à l'observation et à la datation car bien préservés.

⁹³ Nous appelons épisode prébiotique la période précédant l'apparition des premiers êtres vivants et contenant tout le processus d'évolution moléculaire qui y conduit.

dioxyde de carbone. L'étude des atmosphères de Vénus et de Mars, des planètes telluriques du système solaire comparables à la Terre, l'analyse des roches lunaires et celle des enclaves gazeuses des roches terrestres archéennes⁹⁴ permettent de dire que l'atmosphère primitive comprenait du dioxyde de carbone, de la vapeur d'eau, du dioxyde de soufre et du gaz sulfureux et dans des proportions faibles, de l'oxyde de carbone, du méthane et de l'azote, mais pas d'oxygène (Maurel, 1994, p. 60). Cette composition fait qu'*"elle ne pouvait être la source exclusive de la matière organique nécessaire à l'émergence de la vie terrestre"* (A. Brack, 2002a, p. 74). D'où la nécessité d'envisager d'autres sources d'approvisionnement en petites molécules organiques nécessaires à l'émergence du vivant :

- certains chercheurs pensent l'origine de la vie s'est faite **entièrement sur Terre**. Ils intègrent les contraintes de durée et de conditions environnementales dans un modèle explicatif où ils envisagent que d'autres lieux que l'atmosphère ont contribué à la réalisation des synthèses des molécules organiques primordiales (exemple : les sources hydrothermales des abysses océaniques).

- d'autres chercheurs ne pensent pas que toutes les étapes conduisant aux premiers êtres vivants se sont forcément réalisées sur la Terre. Ils envisagent que **des étapes ont pu se faire avant et ailleurs**. La Terre aurait récupéré des matériaux prébiotiques. Certaines météorites, les chondrites carbonées (exemples : la météorite de Murchison, tombée en Australie et les micrométéorites, dont celles collectées au Groenland et en Antarctique par Maurette ; Brack (2002a), p. 76), contiennent des matières organiques. Il en est de même des comètes (exemple : la comète de Halley⁹⁵), objets célestes les plus riches que nous connaissions en matières carbonées, dont le parcours peut rencontrer une planète.

Si donc la panspermie est momentanément mise à l'écart par les chercheurs dans la construction du problème de l'origine de la vie, il y a discussion sur les lieux de formation d'une partie des composés organiques prébiotiques : *"Les composés organiques nécessaires au vivant ont-ils été formés sur Terre ou ont-ils été apportés par des météorites ? Les sources chaudes sous-marines ont-elles contribué à l'apport en matière organique indispensable à la vie ?"* (M.C. Maurel, 2002, p.96-97)

1.2. La "recherche" d'un (voire de plusieurs) ancêtre(s) primordial(iaux)

Dans le prolongement des travaux de Darwin, les chercheurs actuels admettent l'idée d'une parenté entre toutes les espèces actuelles et passées. Ils reconnaissent l'extrême diversité macroscopique du monde vivant mais aussi sa grande unité microscopique (tous les êtres vivants sont faits de cellules) et moléculaire (rôle majeur des protéines et acides nucléiques, nature lipidique des membranes). Cela les conduit à imaginer **un ancêtre commun** et à penser une évolution et une diversification à partir de cet ancêtre commun, autrement dit à rassembler tous les êtres vivants dans un même arbre phylogénique. De cette façon, **expliquer l'origine de la vie, c'est se limiter à une seule origine, et c'est comprendre le début de l'évolution** (Cairns-Smith, 1990, p. 11-12).

⁹⁴ La période archéenne est la période la plus ancienne des temps géologiques ; elle est antérieure à 2,5 Ga (A. Foucault, J.-F. Raoult., 2001, p. 24)

⁹⁵ A partir de 1986, l'étude chimique des comètes se précise, grâce notamment aux données recueillies par les vaisseaux européens Giotto, soviétiques Vega et japonais Suisei et Sakigake, qui rencontrent alors la comète de Halley. C'est la sonde Giotto qui est passée le plus près de la comète de Halley, à 605 km seulement du noyau, le 14 mars 1986 (de la Cotardière, Penot, 1995, p. 125).

La reconstitution de l'arbre phylogénique du vivant se fait en tension entre la recherche et l'étude de traces d'êtres vivants anciens (paléontologie) et l'étude des êtres vivants actuels (comparaison de l'anatomie et de la physiologie des êtres vivants actuels et anciens ; recours à la phylogénie moléculaire, particulièrement intéressante car elle peut aussi prendre en compte les microorganismes). Dans les années 1980, Carl Woese et Gary Olsen proposèrent un arbre universel du vivant basé sur l'étude de l'ARN 16S des ribosomes d'êtres vivants actuels. Sur cet arbre, des ramifications buissonnantes relient les espèces actuelles à des ancêtres communs, pour converger vers un ancêtre commun à tous, aux allures d'une cellule procaryote⁹⁶. Cependant, si la dernière décennie du siècle, forte d'un grand nombre de comparaisons moléculaires, confirme cet arbre dans sa partie supérieure, elle le remet en question dans sa partie basale : à partir de l'évolution d'un "*conglomérat de cellules primitives*" différentes par leurs gènes, il y aurait eu émergence de plusieurs lignées distinctes à l'origine de trois groupes primitifs : les bactéries, les archéobactéries et les eucaryotes (F.Doolittle, 2000, p. 89).

La communauté scientifique actuelle trouve dans la conception évolutionniste une entrée dans le problème de l'origine de la vie : les racines ultimes de l'arbre généalogique des espèces vivantes ne sont rien d'autres que les formes de vie primitives.

Mais ce n'est pas tout. Cette approche évolutionniste, conjuguée à l'utilisation de repères paléontologiques datés de façon absolue et aux travaux sur la fréquence des mutations tente également de **fixer dans le temps l'arbre du vivant et de préciser le rythme de l'évolution**. Les recherches actuelles (par exemple sur la variabilité des fréquences mutationnelles) montrent combien cela est difficile et discutable (Forterre, 1999, p. 41). Par ailleurs, les travaux de Gould et Eldredge (1972) s'appuyant sur la paléontologie, ont remis en question l'idée, chère à Darwin, d'évolution graduelle, par "petits pas réguliers", des êtres vivants (chapitre 1). Ils lui substituèrent la théorie des équilibres ponctués, dans laquelle les espèces connaissent de longues périodes de quasi stabilité et des périodes courtes d'intenses modifications (Gould, 1994, p.96). De l'histoire évolutive de la biosphère à l'évolution moléculaire qui l'a précédée, il y a des parallélismes que certains chercheurs établissent. Ainsi Thuan écrit que : "*Pour reprendre un terme de la physique des atomes, l'évolution procéderait par "sauts quantiques". C'est probablement à l'occasion de l'un de ces "sauts" que l'étincelle de vie est apparue.*"(Thuan, 1998, p. 466)

L'origine de la vie pourrait être une des discontinuités ou un des changements de rythme d'une flèche du temps englobant non seulement l'histoire de la biosphère mais également le prébiotique qui l'a précédée.

1.3. "Portrait robot" de l'ancêtre primordial (ou des ancêtres primordiaux)

Quelle que soit l'histoire évolutive reconstituée, la communauté scientifique s'accorde pour dire que l'ancêtre primordial (ou les ancêtres primordiaux) s'apparente à un procaryote, autrement dit une cellule sans noyau, mais avec un équipement génique plus réduit que les cellules actuelles procaryotes. Le problème étant d'élucider l'origine de la vie, demandons-nous en quoi cet ancêtre commun représente les caractéristiques minimales d'un être vivant. Cette question ne peut alors faire l'économie d'une définition de la vie et des êtres vivants.

⁹⁶ "*Ce terme ne s'applique donc pas aux premières cellules apparues sur notre planète, mais à une cellule déjà très élaborée présentant toutes les caractéristiques communes à ses descendants, les eucaryotes et procaryotes actuels (génome à ADN, code génétique universel, etc...)*" (P. Forterre, 1999, p. 36).

F. Raulin exprime toute la difficulté de la tâche quand il écrit que *"les définitions de la vie sont quasiment aussi nombreuses que les disciplines scientifiques"* (Raulin, 1994, p.19). Comment nous en sortir quand nous savons que le problème de l'origine de la vie fédère justement plusieurs disciplines scientifiques (Tirard, 2000a) ? Il nous semble que les propos suivants de F. Raulin peuvent représenter, compte tenu du registre explicatif utilisé par les chercheurs, une sorte de consensus actuel pour la définition du vivant et de la vie : *"Pour beaucoup de physico-chimistes s'intéressant au domaine de la biologie et à l'origine de la vie sur Terre, le vivant est un système complexe, riche en information, capable de se dupliquer, d'évoluer tout en conservant et même en faisant fructifier cette information"* et plus loin *"C'est la complémentarité de toutes les caractéristiques fonctionnelles des systèmes vivants qui doit être considérée dans la définition de vie : métabolisme, reproduction, sélection et évolution"* auxquels il ajoute l'homéostasie, *"capacité d'autorégulation face aux variations des contraintes du milieu extérieur"* (F. Raulin, 1994, p. 20). C'est donc à la vie comme organisation et comme information (Canguilhem, 2000) que recourt la communauté scientifique. Et fondamentalement, un être vivant peut être considéré comme **un système ouvert complexe ayant deux propriétés fondamentales : celle de se reproduire et celle d'évoluer**. Détaillons un peu ces caractéristiques car elles nous permettront de mieux positionner ensuite les conceptions des lycéens :

1.3.1. Un système ouvert car en relation/séparation avec le milieu extérieur (A. Pichot, 1993, p. 941) ; un être vivant est distinct de son milieu (séparation) mais il réalise avec lui des échanges (relation en termes d'échanges). Cela avait déjà été nettement pointé par C. Bernard (1865). Thuan (1998, p. 464) le résume de la manière suivante : *..."les organismes vivants sont par excellence des systèmes ouverts. La vie n'existe jamais isolée. Elle échange continuellement de l'énergie (et de la matière)⁹⁷ avec son environnement, que ce soit pour absorber de la nourriture ou rejeter des déchets"*.

1.3.2. Un système complexe parce que stable et pourtant loin de l'équilibre (Prigogine, 1979, p. 193).

Un tel type de système implique **des processus** qui maintiennent loin de l'équilibre et assurent ainsi une certaine autonomie par rapport à l'environnement (Delsemme, 1994, p. 177) mais également **une structure** qui contient et entretient ces processus par des échanges avec l'environnement et des réactions chimiques rendant possibles les transformations. La structure de base par excellence est la cellule dont la membrane isole un compartiment intérieur du milieu extérieur.

1.3.3. Un système complexe capable de se reproduire

Un être vivant est capable de donner une "copie" de lui-même, par la reproduction asexuée ou sexuée. *"Ce processus de copie est avant tout basé sur une transmission d'information, suivie des mécanismes indispensables pour l'utilisation chimique de cette information"* (Delsemme, 1994, p.176). L'information en question est l'information génétique détenue par les acides nucléiques (ADN, ARN) dont l'expression conduit à la synthèse de protéines ; parmi elles, les enzymes, molécules indispensables à la réalisation du métabolisme.

1.3.4. Un système capable d'évoluer

La capacité à se reproduire n'est pas limitée au vivant. Un cristal placé dans une solution saturée peut le faire et pourtant il est considéré comme inerte. C'est la capacité d'évolution qui

⁹⁷ Rajouté par nous.

particularise le vivant. Elle est à rapporter à la possibilité de modification (mutations par exemple) de l'information génétique. Cela fait que ce qui est transmis aux "copies" de la génération suivante peut être un peu différent de ce qui existait à la génération précédente. En définitive, les systèmes vivants sont capables de se reproduire, mais les "copies" sont parfois différentes et plus riches en information que les originaux (Raulin, 1994, p. 20).

Rappelons enfin que le support cellulaire de tous les êtres vivants se construit et se renouvelle à partir des mêmes petites molécules, que sa diversité et sa complexité s'exprime dans l'arrangement de ces petites molécules en macromolécules et que cette complexité est la base même du fonctionnement (voir les acides nucléiques et les enzymes). Il est tout autant difficile d'envisager un être vivant primordial trop rudimentaire que de voir dans toute la complexité des cellules actuelles le résultat de la sélection naturelle : dès l'émergence de la vie, il est nécessaire d'imaginer une certaine complexité pour que le système fonctionne. Comment se représenter *"la limite strictement inférieure de la complexité"* (Gould, 1994, p. 93) ?

Le "minimum commun" aux êtres vivants n'est rien moins qu'un système chimique ouvert, stable loin de l'équilibre thermodynamique, capable de se reproduire et d'évoluer. C'est un ensemble très sophistiqué! Comme l'écrit Cairn-Smith (1990, p. 17) *"la vie telle que nous la connaissons relève de la haute technologie"*.

En définitive, rechercher l'ancêtre primordial, c'est rechercher un système déjà complexe, mais vraisemblablement plus simple que les procaryotes que nous connaissons. André Brack (1999a) propose une définition de la vie primitive : *"c'est un système chimique capable de reproduire l'information moléculaire qu'il porte en faisant quelques erreurs accidentelles de copie qui lui permettent d'évoluer"*. Cela rejoint complètement la définition de la vie "minimale" adoptée par la NASA en charge d'un programme d'exobiologie et de nombreux chercheurs : *"La vie est un système chimique autoentretenu capable d'évolution darwinienne"* (P.Luigi Luisi, 2000, p. 27). La communauté scientifique actuelle multiplie les hypothèses sur le type de système répondant à ces conditions : s'agit-il de protocellules (P. Luigi Luisi, 2000, p. 27) ? De systèmes apparentés aux virus (Delsemme, 1994, pp.187-188, Zillig et Arnold, 1999, p.44-48) ? De systèmes minéraux "basse technologie" composés de gènes cristallins, capables de se reproduire et d'évoluer (Cairns-Smith, 1990, p. 168) ? D'une molécule auto-répliquative et évolutive comparable au ribozyme⁹⁸ (un monde à ARN) ? d'un "automate" chimique capable d'autoreproduction et d'évolution (Brack, 2002a, p. 71) ? Le débat existe actuellement dans la communauté scientifique pour le définir. La plupart des chercheurs font l'hypothèse que les premiers êtres vivants étaient des molécules et non pas des cellules. La cellularisation aurait relevé d'une étape postérieure, appartenant à l'histoire évolutive des êtres vivants. Ainsi, l'évolution darwinienne de la biosphère se serait d'abord faite à l'échelle moléculaire (Maurel, 1994, p. 148).

1.4. Mise en jeu d'un matérialisme complexe

Face à un problème très éloigné dans le temps (4 milliards d'années) et pour le moment unique dans le système solaire, la tentation est grande de placer l'origine de la vie hors du champ scientifique. Ce n'est pas la position de la communauté scientifique actuelle. Non plus

⁹⁸ Dans les années 1980, les américains T. Cech et S. Altman démontrent expérimentalement que les acides ribonucléiques ont une activité catalytique. D'où leur nom de ribozymes, contraction des termes ribonucléique et enzyme. (Maurel, 1994, p. 142)

que celle d'y voir une création instantanée, une sorte de miracle. La communauté scientifique actuelle s'approprie le problème, dans une posture méthodologique **matérialiste**, et en raisonnant sur une évolution chimique aboutissant aux premiers êtres vivants. **Cette approche exige de ne faire intervenir que des éléments matériels se combinant ou agissant les uns sur les autres selon des lois rigoureuses** : pas d'attribution aux êtres vivants de propriétés particulières, non réductibles à des lois physico-chimiques. **Etudier l'origine de la vie, c'est expliquer le passage de la matière inerte au vivant en envisageant une évolution chimique** que l'on doit comprendre en plusieurs étapes.

Les chercheurs actuels sont en cela les héritiers des précurseurs que furent Oparine et Haldane⁹⁹ dans les années 1920 et 1930. Leur registre empirique comprend un "réel" de terrain (la planétologie comparée) qui leur permet de préciser les conditions initiales (Raulin et al, 1997, p. 31) et d'un "réel" de laboratoire (dont Stanley Miller¹⁰⁰ a été le précurseur) qui leur permet de tester la pertinence et la faisabilité des processus et des différentes étapes qu'ils imaginent. *"Le concept d'évolution chimique est largement conforté, par l'expérimentation, mais aussi, par l'observation des autres environnements planétaires. La planétologie comparée est en effet un moyen extrêmement puissant pour appréhender les conditions qui régnaient sur la terre primitive et qui sont aujourd'hui totalement effacées"* (Raulin et al, 1997, p. 36). On conçoit que des scénarios d'évolution moléculaire puissent être échafaudés et affinés par interaction de ces différents registres (registre empirique avec « réels » de terrain et de laboratoire et registre explicatif mobilisant le matérialisme).

Mais cette démarche est risquée et difficile, et les chercheurs en sont conscients, tant elle peut être pervertie par des "démons" bien identifiés. De Duve exprime bien cela quand il écrit que le chercheur s'intéressant à l'origine de la vie doit exclure trois "ismes" : le vitalisme, le finalisme et le créationnisme (de Duve, 1995, p.15). Il y a une réelle tension entre le physico-chimique "ordinaire" et ces "démons" identifiés.

- Inscrire l'être vivant dans le seul domaine du physico-chimique porte à croire que l'on nie son originalité. Comme l'écrit Pichot (1993, p. 940) : *"Y a-t-il une spécificité de l'être vivant qui ne soit pas un caractère physico-chimique, ni cependant une force vitale plus ou moins surnaturelle ?"*¹⁰¹ Pichot insiste sur la spécificité des êtres vivants par rapport aux objets inanimés : il la voit non dans leur séparation du milieu selon l'espace (les uns comme les autres ont une forme qui les distingue du milieu) mais dans leur évolution par rapport au milieu : les objets inanimés évoluent avec le milieu ; les êtres vivants ont une évolution disjointe de l'environnement (A. Pichot, 1993, p. 951). Les travaux du chimiste Prigogine sur le fonctionnement et l'évolution des systèmes ouverts en non-équilibre permettent de concilier cadre physico-chimique et particularité des êtres vivants (Prigogine, 1996, pp. 31-32). Voici ce qu'il écrit : *"nous pouvons affirmer aujourd'hui que c'est grâce aux processus irréversibles associés à la flèche du temps que la nature réalise ses structures les plus délicates et les plus complexes. La vie n'est possible que dans un univers loin de l'équilibre"* (Prigogine, 1996, p. 32). Il nous semble que les propos de Pichot vont également dans ce sens : il n'y a pas détournement de l'univers physico-chimique mais reconnaissance du fait que l'être vivant *"canalise" le jeu des lois physico-chimiques dans certaines voies aux dépens des autres*

⁹⁹ L'idée d'une évolution chimique conduisant à la vie fut développée d'abord par le biologiste soviétique Alexandre I. Oparin dans une brève monographie (1924) intitulée *L'origine de la vie* puis dans un ouvrage (1936) du même nom. Le biologiste britannique J.B.S. Haldane parvint de façon indépendante à la même idée (The rationalist annual, 1929). (Tirard, 1996, p. 88- ; p. 103- ; p. 116-)

¹⁰⁰ Les premières expériences, et notamment le dispositif de S. Miller, tentant d'obtenir des molécules organiques dans un contexte reproduisant la Terre primitive eurent lieu au début des années 1950.

¹⁰¹ C'était déjà le problème de C. Bernard.

possibles, alors que l'environnement, lui, évolue en suivant toutes les voies possibles selon les proportions voulues par le libre jeu de ces lois et des équilibres qu'elles régissent" (Pichot, 1993, p. 942).

Travailler sur l'origine des êtres vivants conduit donc à s'interroger sur l'émergence, au sein d'un ensemble de molécules, de systèmes ouverts "canaliseurs des lois physicochimiques". C'est passer d'un monde de l'équilibre à un monde du déséquilibre. La rupture est là qui engendre l'irréversibilité.

- Ce passage de l'inerte au vivant n'est pas facile à concevoir. Toute idée de génération spontanée¹⁰² faciliterait la tâche et liquiderait le problème de l'origine de la vie. Mais admettre la génération spontanée, même si l'on est matérialiste, c'est survaloriser la vie (Canguilhem, 2000) et retomber dans une forme de vitalisme. **C'est parce que la communauté scientifique refuse l'idée de génération spontanée que se pose vraiment le problème de l'origine de la vie.** Mais alors qu'est-ce qui a rendu possible l'émergence de la vie à un moment donné ? Comment s'est-elle produite ? Même si les scientifiques ne font pas, depuis le 19^e siècle, une différence fondamentale entre la matière des êtres vivants¹⁰³ et celle du monde minéral, *"il semble qu'il soit particulièrement insupportable à beaucoup d'esprit humains d'admettre la continuité de nature entre l'inorganique et l'organique, en raison sans doute d'une confusion courante entre science des objets (au coeur de la chimie) et science des relations entre objets ou même entre relations (au coeur de la biologie)"* (Danchin, 1990, p. 25). C'est ce qui fait que des dualités ne tombent pas mais se renouvellent : inertes/vivants ; cristalloïde/colloïde ; et aujourd'hui petites molécules/macromolécules. Il est vrai que de grosses molécules caractérisent le vivant (les protéines et les acides nucléiques), tout comme l'enrichissement isotopique en ¹²C de leurs molécules organiques et l'homochiralité de leurs acides aminés (ils sont tous gauches alors que dans un système non vivant, les formes droites et gauches sont également représentées). La communauté scientifique prend en compte ces spécificités mais se méfie d'une certaine forme de vitalisme. A. Danchin avertit que *"le démon vitaliste se réfugie dans tous les phénomènes où se manifestent des parcelles de l'organisation, de la structure ou de la dynamique du vivant"* (A. Danchin, 1990 ; p. 26). Mais il semble que nous devions nuancer. Canguilhem rend justice au vitalisme pour sa fécondité dans la connaissance de la vie, notamment dans une dialectique entre mécanisme et vitalisme : *"Les renaissances du vitalisme traduisent peut-être de façon discontinue la méfiance permanente de la vie devant la mécanisation de la vie. C'est la vie cherchant à remettre le mécanisme à sa place dans la vie"* (Canguilhem, 1985, p. 99).

Dans ces conditions, comprendre le passage de la matière inerte au vivant c'est rester dans le monde de la matière et des lois physico-chimiques et penser à la fois l'individualisation de systèmes ouverts en non-équilibre et la formation d'édifices moléculaires apparemment complexes (macromolécules). La chimie prébiotique actuelle s'y emploie et *"nos connaissances se sont énormément étendues quant au moyen de synthétiser des composés organiques dans des conditions primitives"* (Maurel, 2002, p. 96).

¹⁰² F. Raulin écrit que *"De l'antiquité à la Renaissance, on est persuadé que la vie est une propriété intrinsèque de la matière et que, dès que les conditions propices sont réunies, elle peut apparaître spontanément à partir aussi bien de systèmes vivants de la même espèce, ou d'espèces différentes, que de matériaux non vivants"*. (F. Raulin, 1994, p.31). L'idée de génération spontanée évoluera ensuite pour ne concerner que les microorganismes. Les travaux de Pasteur lui porteront le coup de grâce.

¹⁰³ On a pensé, jusqu'au 19^e siècle, que la matière des êtres vivants contenait une "force vitale", contrairement à la matière du monde minéral. La synthèse de l'urée (F. Wöhler, 1828) à partir de composés inorganiques met un terme à cette idée.

1.5. Les événements déterminants de l'origine de la vie dans les modèles actuels

L'évènement marquant de l'origine de la vie est sans aucun doute l'individualisation du premier système autorépliatif et évolutif. Sur la base d'études entreprises depuis les années 60, les chercheurs ont focalisé leur attention sur des molécules d'un acide nucléique appelé l'ARN. *"La découverte des ARN-enzymes permettait d'imaginer des molécules d'ARN primitives, capables à la fois de porter une information génétique et de catalyser leur propre réplication, en l'absence de protéines"* (P. Forterre, 2000, p. 35) Même si des discussions existent au sujet d'une cellularisation plus ou moins précoce par la formation d'une membrane, il ressort que cette hypothèse d'un monde à ARN a séduit une partie de la communauté scientifique et a été confortée par de nombreuses recherches sur les ARN des êtres vivants actuels et sur des expérimentations le mettant en jeu. C'est ainsi que De Duve (1996, p. 114) souligne que *"L'émergence de l'ARN fut une innovation véritablement révolutionnaire dans l'évolution de la vie. En ouvrant la voie à la réplication moléculaire, elle rendait possible pour la première fois un mécanisme d'autoperfectionnement évolutif par variation, compétition et sélection. A partir de là, l'historien cherchant à reconstituer l'émergence de la vie est en droit de considérer de nouvelles explications, outre le déterminisme chimique. Un phénomène nouveau était apparu pour guider les événements : la sélection darwinienne"*. Mais des problèmes demeurent car l'ARN est déjà une macromolécule complexe dont la synthèse n'a jamais été réalisée au laboratoire dans des conditions prébiotiques. D'où l'idée retenue maintenant par la plupart des chercheurs de décaler l'apparition de la vie avant l'apparition de l'ARN, par l'émergence d'*"un monde où des molécules plus simples auraient porté le message génétique des premiers êtres vivants"* (P. Forterre, 2000, p. 35). Ce décalage ne remet pas en question la nature de l'évènement et il reste toujours à éclaircir ce qui a précédé ce premier monde vivant autrement dit d'imaginer ce qui a pu se produire au cours de ce que De Duve appelle l'âge de la chimie (De Duve, 1996, p. 42), c'est-à-dire la période abiotique où se forment les constituants de la vie jusqu'aux premières molécules répliatives. La chimie prébiotique conduit à subdiviser cet âge en deux phases, une phase où se produisent des réactions chimiques robustes (le qualificatif est de Miller) et correspond aux réactions *"qui n'ont besoin que de conditions simples pour se produire"* (De Duve, 1996, p. 102) et une phase aux réactions chimiques ayant conduit inévitablement aux premières molécules répliatives. Ainsi **un autre moment paraît important dans l'apparition de la vie : c'est une "catastrophe" biochimique**, à savoir la bascule d'un régime de réactions chimiques à un autre. Voilà ce que dit Thuan (1998, p. 452) de l'évolution moléculaire antérieure à la formation de structures répliatives : *"on peut ainsi imaginer que le système des particules dans la soupe terrestre primitive a traversé une série de bifurcations abruptes qui l'ont amené, niveau après niveau, palier par palier, à des états d'auto-organisation de plus en plus complexes, jusqu'à l'émergence d'une structure sachant se répliquer, puis finalement à la vie"*. Si, tout comme la cellularisation, la localisation de l'évolution moléculaire primitive prête maintenant à discussion - s'est-elle produite au sein d'une "soupe originelle" (De Duve) ou à la surface de particules solides (Wächterhäuser) ? - il semble qu'il y ait un certain accord sur l'idée d'un engrenage de réactions chimiques ayant conduit aux premiers systèmes répliatifs.

1.6. Les rôles du temps dans le problème de l'origine de la vie

1.6.1. L'origine de la vie est un évènement unique mais pas improbable

La compréhension actuelle du problème de l'origine de la vie repose sur une approche pluridisciplinaire. Les travaux de la deuxième moitié du 20^e siècle mettent toujours en jeu une émergence de la vie dans un environnement terrestre particulier (ce qu'avait initié Oparin). Mais ils réduisent les premiers êtres vivants à des molécules autorépliquatives et évolutive (jusqu'au milieu du 20^e siècle, on les concevait comme des cellules). La cellularisation ne vient qu'après et elle appartient à l'histoire évolutive des êtres vivants. Il n'empêche que ces molécules répliquatives sont des structures complexes. D'où plusieurs attitudes vis à vis de cet évènement :

1) L'émergence de la vie est un évènement unique qui n'avait quasiment pas de chance de se produire. Monod (1970, pp.183-187) l'envisage : l'apparition de la vie est le résultat d'**un énorme coup de chance**. Compte tenu **du temps disponible et des conditions de la Terre primitive**, cet évènement avait une probabilité très faible.

2) L'émergence de la vie est un évènement unique qui devait arriver. Voici ce qu'écrit Gould : *"Je soupçonne que l'apparition de la vie sur la Terre était quasiment inévitable étant donné la composition de l'atmosphère et des océans primitifs, ainsi que les principes physiques des systèmes capables d'auto-organisation"* (Gould 1991, p. 323). Dans cette position, l'apparition de la vie ne relève pas de l'extrêmement improbable, mais de **la presque certitude**. La fenêtre des conditions initiales ouvrait nécessairement sur l'émergence de la vie. C'est comme si cette fenêtre représentait un grand nombre de coups à jouer avec une pièce de monnaie et que l'apparition de la vie correspondait à faire un pile. Le coup est facile à jouer. Il nous semble que De Duve exprime cette idée quand il parle de jeu truqué : *"Pour l'assemblage de la première cellule, trucage signifie que la plupart des étapes impliquées ont dû avoir une très grande probabilité de se produire dans les conditions ambiantes"* (de Duve, 1996, p. 40). Pour lui, ce qui a compté, ce sont *"les contraintes du terrain"*. Cela ne veut pas dire qu'un seul scénario ou qu'une seule sorte de vie aient été possible, mais que dans les conditions d'alors, il était presque obligatoire que des formes de vie apparaissent, comme il est inévitable que l'eau de ruisselets gagne la vallée. Si cet évènement ne s'est pas reproduit, c'est parce que dans l'histoire postérieure de la Terre, il y avait justement des êtres vivants. Toute matière organique formée a alors de grandes chances d'être assez vite biodégradée (De Duve, 1996, p. 50-51 ; il cite d'ailleurs Darwin).

3) L'émergence de la vie était **possible, mais pas nécessaire**. La fenêtre des conditions initiales n'est ni extrêmement petite (voir Monod), ni suffisamment grande (voir Gould). L'apparition de la vie se joue dans un espace limité par l'impossible et le certain. Tout dépend alors de la "taille" de cette fenêtre.

* la fenêtre n'est pas très grande. Le scénario biochimique conduisant aux premières molécules autorépliquatives a pu se faire dans ce cadre. Mais, si nous rembobinons le film et que nous le relançons, nous n'obtiendrons pas forcément le même scénario. L'origine de la vie relève de **la contingence**, c'est à dire que cet évènement a eu lieu, mais qu'il aurait pu en être autrement.

* la fenêtre des conditions est trop petite, parce que le temps disponible est réduit, parce qu'il manque des matériaux, parce que les conditions ne permettent pas certaines synthèses etc.. L'apparition de la vie est très peu probable. Pour l'expliquer, il faut recourir à la panspermie.

Les chercheurs actuels écartent les extrêmes pour des raisons méthodologiques : pour eux l'émergence de la vie sur la Terre ne relève ni de l'impossible, ni de la panspermie. Ainsi, la multiplication des missions extraterrestres dans le but notamment de repérer des traces de vie permet de penser qu'ils confèrent une certaine "banalité" à l'apparition de la vie. Nous les voyons sur un " curseur " entre le très peu probable (Monod) et le certain (Gould).

1.6.2. C'est la flèche du temps qui a engendré la vie

Si nous considérons l'histoire de la vie sur Terre dans sa totalité, **son origine revêt les caractères d'un événement unique, à défaut d'être improbable** : on peut donc distinguer un "avant l'origine de la vie" d'un "après l'origine de la vie". Ainsi nous pouvons dire que la vie construit une flèche du temps. Mais ce n'est pas si simple : avec les développements récents sur l'origine de la vie, nous voyons que ce problème est pensé comme un passage d'un régime physico-chimique à l'équilibre (le domaine des réactions chimiques robustes) à des régimes loin de l'équilibre (les systèmes chimiques prébiotiques et les systèmes vivants émergents). Dans le régime d'équilibre, le temps à la fois compte et ne compte pas : il compte puisqu'il oriente la direction de certaines réactions chimiques ; il ne compte pas puisque ce qui est possible l'est à n'importe quelle époque ; seules entrent en compte les conditions initiales et des lois physico-chimiques régissant l'évolution de la matière. En revanche, dès lors que, dans le contexte de la Terre primitive, a eu lieu la première "catastrophe", alors le temps "qui passe" n'a pu que contenir un ensemble d'événements engendrant la complexité et l'organisation. En d'autres termes, " ... la matière est aveugle à l'équilibre là où la flèche du temps ne se manifeste pas ; mais lorsque celle-ci se manifeste, loin de l'équilibre, la matière commence à voir ! Sans la cohérence des processus irréversibles de non équilibre, l'apparition de la vie sur la Terre serait inconcevable. La thèse selon laquelle la flèche du temps est seulement phénoménologique devient absurde. Ce n'est pas nous qui engendrons la flèche du temps. Bien au contraire, nous sommes ses enfants." (Prigogine, 1996, p. 12). La succession d'étapes enclenchée après la première "catastrophe" est devenue inévitable comme l'eau introduite sur la pente se met à descendre sans retour en arrière possible.

1.6.3. Il y a deux (et non pas un seul) événements importants

Tous les chercheurs reconnaissent que l'événement majeur dans l'apparition de la vie est la formation des premières molécules répliquatives. Ils y ajoutent un autre événement antérieur qui est la bascule dans une cascade de réactions chimiques conduisant de façon certaine ou probable à ces molécules répliquatives. Cet événement correspond à un changement de rapport au temps.

	Période 1		Période 2		Période 3
	Système chimique à l'équilibre	"Catastrophe" de la biochimie	Système prébiotique = système chimique maintenu loin de l'équilibre	"Catastrophe" de la vie	Système vivant = système maintenu loin de l'équilibre capable de se reproduire et d'évoluer
Fonctions du temps	Le temps détermine le sens des réactions chimiques	C'est une direction qui a été prise mais d'autres auraient pu être empruntées (contingence)	Dès lors que la catastrophe a eu lieu, une cascade de réactions chimiques inévitables se sont produites	Obtention de molécules répliquatives (ARN ou autres)	" le hasard et la nécessité " (le hasard des mutations et la sélection naturelle par le milieu)
Réversibilité et irréversibilité	Une certaine réversibilité des phénomènes		Irréversibilité des phénomènes		Irréversibilité des phénomènes
Qualité du temps	Une certaine orientation du temps	Evènement	Temps sagittal Temps non porteur de contingence (cela ne pouvait être autrement)	Evènement	Temps sagittal Temps porteur de contingence, continu (évolution néodarwinienne) ou discontinu (équilibres ponctués)
Quantité du temps	Durée qui peut être limitée				Temps long

Figure 13.1 : Le temps et le problème de l'origine de la vie (chercheurs actuels)

1.6.4 Ce n'est pas le temps long qui rend possible l'origine de la vie

Les modèles d'évolution chimiques proposés, dont nous avons seulement repris les caractéristiques générales, n'imposent pas de contraintes de durée énormes. Certains chercheurs voient même certains processus se produire rapidement, exiger en quelque sorte de "l'instantanéité" à l'échelle des temps géologiques. Les 200 millions disponibles (voir plus haut) sont donc largement suffisants pour contenir le fonctionnement des modèles proposés.

1.6.5. Un scénario en plusieurs périodes

Tous les approfondissements précédents nous conduisent à distinguer plusieurs périodes dans l'origine de la vie selon la nature et le régime des systèmes qui nous intéressent. C'est une façon de reconnaître au temps différents rôles.

Le tableau 13.1 présente ces différentes périodes conduisant aux premiers êtres vivants. Il les caractérise par les systèmes chimiques en jeu, les changements de régime qui les articulent, et les différentes "dimensions" prises par le temps.

2. Quelques éléments d'histoire des sciences

La compréhension de l'origine de la vie par les scientifiques actuels est d'une grande complexité, notamment dans ses rapports au temps (voir le paragraphe précédent). Il paraît peu probable que les explications des lycéens atteignent ce degré d'élaboration. De façon à diversifier nos références, pour construire des questions plus précises à l'intention des élèves et pour mieux comprendre ce qu'ils proposent, il nous paraît important de faire un détour dans l'histoire des sciences, sans prétendre en faire une étude exhaustive.

2.1. De l'Antiquité au 19^e siècle

En matière de génération des êtres vivants, la pensée des savants et des philosophes s'organise depuis l'Antiquité autour d'une trilogie de concepts intervenant simultanément : la création primordiale, la génération spontanée et la reproduction grâce à des semences (S. Tirard, 1996, pp. 13 et 23).

- **La création primordiale** : elle correspond à l'émergence du vivant alors qu'il n'y en avait pas. Elle a couramment trouvé sa solution dans l'intervention d'un démiurge. Les croyances religieuses, dont le récit biblique de la genèse, en proposent le récit (Anonyme, 2000, pp. 15-16-17).

- **La génération spontanée** : dans un certain sens, la génération spontanée se comprend comme l'apparition spontanée d'êtres vivants à partir de la matière inanimée. Elle trouve ses fondements dans une certaine forme de vitalisme où la vie est une propriété intrinsèque de la matière. *"Cette théorie de la génération spontanée suppose que le monde n'est qu'un : l'animal peut être engendré par le végétal, et l'un et l'autre peuvent sortir spontanément de la boue"* écrit F. Raulin (1994, p. 31). En termes de matière, la théorie de la génération spontanée établit donc une continuité entre le non vivant et le vivant, ce qui n'est pas le cas en termes de "forme", où il y a une distinction nette entre ces deux mondes. Les savants et philosophes de l'Antiquité à la Renaissance admettent la génération spontanée. Cette théorie perdure jusqu'au 19^e siècle, mais avec les progrès des moyens d'investigations (invention du microscope au 17^e siècle) et des tests expérimentaux, elle limite depuis le 17^e siècle son

champ d'action pour ne plus concerner que les plus petits des êtres vivants (Jacob, 1970, p. 64-65).

- Enfin, **la reproduction grâce aux semences** : elle correspond au problème de la génération ordinaire, c'est-à-dire la naissance d'un individu à partir de un ou deux parents. Par manque de moyens de prospection suffisamment précis, de nombreux cas de reproduction sexuée seront d'abord mis sur le compte d'une génération spontanée (J. Carles, 1966, p. 14).

En résumé, de l'Antiquité au 19^e siècle, l'origine de la vie renvoie à la création primordiale et à la génération spontanée, dans lesquelles il est question d'une apparition spontanée et intemporelle d'êtres vivants à partir de la matière inanimée. Peu importe que la création primordiale ait eu lieu il y a longtemps ou pas ; quant à la génération spontanée, elle peut prendre place à n'importe quel moment. Le rôle donné au temps est minime.

2.2. Au 19^e siècle

Le problème de l'origine de la vie se renouvelle au 19^e siècle, de part notamment l'avènement de la théorie cellulaire et de la théorie de l'évolution, la remise en question de la génération spontanée et le développement de la chimie organique. Sans prétendre à une couverture exhaustive de l'histoire des sciences aux 19^e et 20^e siècles, nous voulons mettre en valeur les conceptions marquantes que les scientifiques ont soutenues sur l'origine de la vie, les filiations qu'elles entretiennent avec ce qui s'est pensé auparavant et leur rapport au temps.

Au début du 19^e siècle, la communauté scientifique a, grâce à l'étude des fossiles, une certaine connaissance de l'histoire de la biosphère terrestre et elle se pose le problème du renouvellement des espèces (chapitre 2). Selon la conception qu'ils ont de l'évolution de la Terre (conception stationnariste ou directionnaliste), les scientifiques sont amenés à envisager une création primordiale assortie ou non d'autres créations postérieures. Trois événements scientifiques majeurs, selon M.C. Maurel et S. Tirard (1999, p. 712), vont les conduire dans le courant du siècle à penser différemment le problème des origines : il s'agit de l'hypothèse de Kant-Laplace, des travaux de Darwin sur l'évolution et enfin des expériences de Pasteur. C'est à partir de 1864, date de ponctuation de la controverse Pasteur/Pouchet, que le problème de l'origine de la vie entre dans une nouvelle définition.

- **La théorie de Kant - Laplace** sur l'origine du système solaire (milieu du 18^e siècle) permet de considérer la planète Terre non plus comme un objet physique immuable mais inscrit dans une histoire assujettie à l'évolution des arrangements de la matière (Maurel, 1994, p. 39 ; Taton, 1995, pp. 505-506). Cette théorie introduit donc du temps sagittal..

- **Les hypothèses transformistes et évolutionnistes** (Lamarck (1744-1829) ; Darwin, (1809-1882)) contribuent à imaginer un ancêtre primordial unique.

* Lamarck conçoit des êtres simples à la base de l'échelle des êtres vivants qu'il propose. Pour lui, cette génération primordiale, et depuis elle la génération spontanée des êtres microscopiques, relève de mécanismes analogues et plus précisément d'une évolution de la matière minérale (S. Tirard, 1996, p. 31).

* Quant à la théorie darwinienne, proposée en 1859 (année de publication de la première édition de *"L'origine des espèces"* de Charles Darwin), elle suppose un ancêtre primordial, unique et unicellulaire. Il est vrai que depuis les travaux de T. Schwann¹⁰⁴ (1810-1882) et de

¹⁰⁴ **La théorie cellulaire** prend forme et consistance avec les travaux de T. Schwann qui publie en 1839 un ouvrage intitulé *"Recherches microscopiques sur la concordance dans la structure et la croissance des animaux"*

R. Virchow (1821-1902), dans la première moitié du 19^e siècle, la communauté scientifique s'accorde à reconnaître dans la cellule l'unité structurelle et fonctionnelle de base de tous les organismes vivants, animaux et végétaux. La théorie cellulaire a eu le grand mérite "*d'abolir la frontière historique entre les deux règnes animal et végétal*" (P. Duris et G. Gohau, 1997, p. 179). Darwin évoque la formation de l'ancêtre dans des mares chaudes contenant toutes sortes de sels ammoniacaux et phosphoriques (S. Tirard, 1996, p. 54). Mais il n'envisage pas qu'une telle formation soit encore possible de nos jours.

En résumé, la théorie darwinienne de l'évolution, conjuguée à la théorie cellulaire, ouvre vers une recherche d'une origine primordiale terrestre, située assez loin dans le passé (chapitre 1), et écartent l'idée de créations successives.

- Les travaux de Pasteur et le dilemme pastorien

La controverse qui oppose, entre 1860 et 1864, Pasteur (1822-1895) et Pouchet (1800-1876) porte sur **l'hétérogénie** (dénomination qu'a prise la génération spontanée depuis 1825 environ), dans un contexte de diffusion de la théorie évolutionniste de Darwin. La communauté scientifique française est alors hostile aux idées de Darwin (B. Latour, 1991, p. 38) et des remous l'agitent suite aux travaux de Pouchet en faveur de l'hétérogénie. En 1860, plusieurs membres de l'Académie des sciences lancent le défi de jeter un jour nouveau sur cette question, en recourant à des expériences bien faites (Duris, Gohau, 1997, p. 117). C'est le début d'une controverse de 4 ans qui sonne le glas de la génération spontanée. Cela a des conséquences sur le problème de l'origine de la vie. Entrons quelque peu dans cette controverse¹⁰⁵ pour mieux comprendre ses incidences sur le problème de l'apparition de la vie.

L'hétérogénie est alors comprise comme la "*production d'êtres vivants sans parents à partir d'une matière anciennement vivante*" (Duris, Gohau, 1997, p. 116). **Pouchet** (1800-1876) défend l'idée d'une génération spontanée des êtres vivants simples, voit en elle un processus qui renouvelle la biosphère après chaque catastrophe, pense et tente de démontrer qu'elle est encore observable aujourd'hui. L'émergence d'êtres vivants est donc possible à partir de la matière organique et son étude appartient au champ de la science, en ce sens qu'elle est reproductible et assujettie au verdict de l'expérimentation. Pour Pouchet, l'hétérogénie est la marque de la continuité entre la vie et la matière et "*son vitalisme (le vitalisme de Pouchet) faisait de la vie une propriété particulière de cette matière, et la dégageait ainsi de toute métaphysique idéaliste*" (A. Pichot, 1994, p. 17). Pouchet est matérialiste et vitaliste.

Pasteur (1822-1895) entre dans la controverse sur l'hétérogénie sans lui être a priori hostile. Mais d'une part, il est convaincu que l'air est peuplé de microbes et d'autre part, il a l'intime conviction que "*toute présence spontanée de micro-organismes résulte d'une erreur de manipulation*" (B. Latour, 1991, p. 43).

Qu'est-ce qui sépare véritablement Pasteur et Pouchet ? Leur opposition dépasse la "rigueur expérimentale". Elle est d'ordre philosophique. Pasteur, contrairement à Pouchet, revendique "*une conception (non scientifique) séparant radicalement le vivant de l'inanimé*" (A. Pichot, 1994, p. 18). Ses travaux sur la dissymétrie moléculaire l'ont conduit à séparer nettement les

et des plantes". Schwann, selon Maurel (1994, p. 43), rejette vigoureusement le vitalisme et la théorie de la génération spontanée, cependant que pour lui, les cellules s'organisent à partir d'une matière amorphe, le cytotlastème. Ce dernier point ne résistera pas aux travaux ultérieurs de R. Remak (1815-1865) et de R. Virchow (1821-1902) pour qui toute cellule provient d'une cellule préexistante. On doit à Virchow (1855) l'aphorisme célèbre suivant : *Omnis cellula e cellula* (Toute cellule provient d'une autre cellule).

¹⁰⁵ Les actes du Muséum d'Histoire naturelle de Rouen (G. Pennetier, 1907) rendent compte de ce débat scientifique.

systèmes vivants des systèmes non vivants : dans les premiers, les formes droites (D) de molécules organiques sont majoritaires alors que dans les seconds, il y a autant de forme droites (D comme dextrogyre) que de formes gauches (L comme lévogyre). D'autre part, ses travaux de chimie montrent la grande difficulté à passer d'un mélange racémique à un mélange où prédomine une forme moléculaire. Comment alors imaginer la génération spontanée de microorganismes ? Là où Pouchet imagine **une continuité** de la matière du non-vivant au vivant, Pasteur dispose d'un critère fort pour faire **une discontinuité**.

En quoi cette controverse nous ramène-t-elle au problème de l'origine de la vie ? Comme l'origine de la vie est le passage du non vivant au vivant, son approche est conditionnée par la position philosophique que l'on a sur ce passage : en fait-on un fossé franchissable ou infranchissable ? En fait-on un phénomène reproductible ou un événement singulier ?

- Pasteur, qui considère comme impossible le passage de l'inerte au vivant, et qui réfute expérimentalement la génération spontanée, ne peut pas mettre l'émergence de la vie dans le champ des sciences.

- Pour ceux qui tout en réfutant la génération spontanée cherchent à expliquer scientifiquement l'origine de la vie, il faut bien convenir que "*Des organismes simples ont dû apparaître sur Terre en l'absence d'organismes préexistants, mais nous n'avons pas de "preuve" que la vie même dans sa forme la plus simple, ait pu se développer à partir de matière inanimée. Comment rendre compte alors de l'apparition de la vie sur la Terre dans des conditions naturelles ?*" (Maurel et Tirard, 1999, p. 712). On voit alors toute la difficulté à utiliser l'actualisme méthodologique dans ce problème.

S. Tirard (1996, p. 36-37) résume ainsi la tension à laquelle sont soumis les scientifiques qui s'occupent de l'origine de la vie à la fin du 19^e siècle : "*D'un côté une approche scientifique objective, qui conduit à l'évolutionnisme, démontre que la vie est apparue sur la Terre sous forme d'un ancêtre simple et primitif (ce à quoi DARWIN lui-même croyait) mais cette même attitude scientifique impose que les mécanismes qui conduisirent à la vie ne peuvent être observés actuellement*". Le cadre évolutionniste impose la nécessité d'un ancêtre primordial et celle de sa formation, vue comme un "fait" qui ne se reproduit plus et dont on n'a plus la trace. L'origine de la vie est un "*fait virtuel*" (Paty M., 1994, p. 31) absolument nécessaire pour la cohérence des théories en jeu.

2.3. A la fin du 19^e siècle

Dans la deuxième moitié du 19^e siècle, il y a deux conceptions de l'origine de la vie en vigueur¹⁰⁶ chez les scientifiques, qui prennent en compte à la fois le dogme pastorien (le fait que le vivant ne peut pas apparaître spontanément sur la terre actuelle ; Tirard, 1996, p. 61) et l'évolutionnisme (car la théorie darwinienne va faire école) : *la panspermie qui considère que la vie est éternelle et la biogenèse évolutive, selon laquelle la vie est apparue progressivement à partir de la matière minérale*" (M.C. Maurel et S. Tirard, 1999, p. 712) .

- La première conception ou **panspermie**, c'est-à-dire l'ensemencement de la Terre par des structures primordiales universelles, est une approche rigide du dilemme pastorien ; elle nie l'origine temporelle de la vie. Svante Arrhenius (1859-1927) défendra avec d'autres cette idée qui repousse temporellement et même spatialement le problème de l'origine de la vie, et qui fait de la vie "*un principe éternel, au même titre que la matière et l'univers*" (G. Gohau et S. Tirard, 1998, p. 91).

¹⁰⁶à défaut de solliciter une intervention divine

- La deuxième conception est **la biogenèse évolutive** selon laquelle l'apparition des êtres vivants sur la Terre est le résultat d'une évolution graduelle de la matière minérale primordiale dans les conditions de la Terre primitive. L'apparition de la vie est un événement extraordinaire dont l'étude entre cependant dans le champ de la science. Le temps a pu être "*créateur de formes*" (M. Paty, 1994, p. 20) à un moment de l'histoire de la Terre, jusqu'à ce que les formes vivantes extrêmement simples émergent et lui échappent pour appartenir au temps de l'évolution des espèces. La réflexion s'installe donc dans une fenêtre de temps située juste avant le "*point de fuite de l'origine des espèces*" (M. Paty, 1994, p. 20).

La biogenèse évolutive prend tout son sens dans un contexte de développement de la chimie organique et des connaissances sur la composition chimique de la matière vivante et de la cellule. Les travaux en chimie ont déplacé la frontière qui sépare le monde du non vivant (le monde des corps minéraux) et le monde du vivant (le monde de la matière organique). Avec notamment la synthèse de l'urée par Wöhler en 1828, on ne peut plus établir un fossé entre les deux types de matières. La "rupture" se trouve maintenant entre d'un côté la matière (minérale et organique) et de l'autre le vivant. Les travaux de Pasteur sur la dissymétrie moléculaire confortent cette rupture.

2.4. Le début du 20^e siècle

Il y a deux figures marquantes au début du 20^e siècle : il s'agit d'Oparin (1894-1981), un biochimiste soviétique et du biologiste britannique Haldane (1892-1964).

- **A. I. Oparin** propose un modèle d'évolution progressive de la matière s'intégrant dans l'histoire de l'évolution du globe terrestre. Il ouvre une voie de recherche qui ne réfère pas la spécificité du vivant à la composition (il y a les mêmes éléments chimiques) ou à l'organisation de sa matière (car la matière minérale peut également présenter une organisation) mais à une combinaison particulière de propriétés (métabolisme, reproduction,...) et de caractéristiques qui, prises isolément, ne le particularisent pas : "*La particularité spécifique des organismes vivants est seulement qu'ils ont rassemblé et intégré en eux une combinaison extrêmement complexe d'un grand nombre de propriétés et de caractéristiques qui sont présentes isolément dans des corps inertes (inorganiques).*" (Oparin, cité par Tirard, 1996, p. 96). Et il s'interroge sur l'avènement, au cours de l'histoire de la terre, de conditions appropriées ayant permis cette conjonction : "*Découvrir ces conditions serait expliquer l'origine de la vie*" (Oparin, cité par S. Tirard, 1996, p. 96).

Le problème de l'origine de la vie pour Oparin appelle la construction d'un modèle d'évolution moléculaire en interaction avec une reconstitution des conditions primitives. C'est dans cette liaison évolution de la matière/ évolution du milieu que le franchissement du fossé qui sépare la matière inerte du vivant est pensable. Oparin propose une explication de l'émergence des premiers êtres vivants en deux points essentiels (Maurel, 1994, p. 96). Il y aurait d'abord eu une longue période au cours de laquelle des molécules organiques nécessaires à la formation des êtres vivants se seraient constituées à partir des éléments présents et dans les conditions de la périphérie terrestre. Cela se serait d'abord passé dans l'atmosphère primitive (formation de composés organiques simples), très différente de celle que nous connaissons, puis dans l'océan primitif (formation de composés organiques complexes comme des hydrocarbures et des protéines), océan chaud apparu suite à l'abaissement de la température. Ensuite, dans cet océan, se seraient individualisés des systèmes physico-chimiques dont le fonctionnement préfigure celui d'une cellule (échange de matière et d'énergie avec le milieu, croissance,

division, ...) . Les "gouttes de matières organiques" hétérotrophes seraient les premiers êtres vivants.

- **Haldane**, au début du 20^è siècle, s'intéresse à l'origine de la vie par le biais des virus bactériophages : sont-ils ou non des êtres vivants ? Comme ces éléments ne peuvent pas se reproduire de manière indépendante, il pourrait représenter une des étapes de l'évolution chimique conduisant à la vie. Sans connaître alors les travaux d'Oparin, il construit un modèle proche de celui-ci.

Oparin et Haldane, en référence à l'actuel, font reposer la vie sur le métabolisme (Maurel, 1994, p. 98). Pour eux, l'apparition de la vie s'est concrétisée dans des formes cellulaires simples à la fois indépendantes du milieu mais échangeant avec lui. Cette émergence est **un évènement ni trop banal, ni trop extraordinaire**. S'il n'y a plus d'émergence de vivant à partir de l'inerte, c'est parce que les conditions d'aujourd'hui ne le permettent plus : on voit donc les limites de l'actualisme méthodologique.

Par rapport aux modèles matérialistes proposés jusqu'alors, ces auteurs se dégagent du vitalisme en donnant **une plus grande importance aux conditions du milieu**. Dans leur sillage, les modèles sur les origines de la vie du 20^è siècle deviennent une réponse à deux questionnements : l'élucidation des conditions régnant sur la Terre au moment de son émergence et la reconstitution de la ou des voie(s) chimique(s) ayant conduit aux premières cellules (S. Tirard, 2000a, p. 109). Et ils font entrer dans une recherche qui tente de dépasser le paradoxe existant entre le refus de la génération spontanée et une mise en scène de "celle" qui, contrôlée par les conditions environnementales, est à l'origine de la vie.

- La chimie prébiotique

A partir des années cinquante, des chimistes tentent de déterminer les conditions de la Terre originelle et de reproduire dans ce contexte les étapes de l'évolution moléculaire conduisant aux premiers êtres vivants. Les premiers essais sont faits avec l'hypothèse d'**une atmosphère primitive réductrice**. Ces conditions géochimiques sont en partie reconstituées à partir de données de planétologie comparée. Parmi tous ces travaux de chimie prébiotique, citons l'expérience fondatrice de cette discipline réalisée par S. Miller (1953), qui en soumettant à des décharges électriques un mélange gazeux reproduisant l'atmosphère primitive, obtint plusieurs acides aminés. A la même époque, les travaux de Watson et Crick (1953) et de la biologie moléculaire montrent l'importance des acides nucléiques (ADN et ARN). De la "*profusion expérimentale*" (le terme est de M.C. Maurel, 1994, p. 109) qu'il y eut au milieu du 20^è siècle, retenons que la chimie prébiotique permet d'obtenir de nombreuses molécules organiques entrant dans la constitution du vivant : Fox et Harada obtiennent en 1958 des protéinoïdes par condensation d'acides aminés ; Oro en 1961 obtient de l'adénine, une des bases azotées des acides nucléiques (Maurel, Tirard, 1999, p. 713). Mais les recherches échouent dans l'obtention de certains composés organiques de première importance : c'est notamment le cas du ribose qui est le sucre des acides nucléiques. Il n'est apparemment pas possible de former des acides nucléiques dans des conditions prébiotiques simples.

Les limites de la chimie prébiotique ainsi que le développement de la planétologie comparée et de la bioastronomie font que, dans les dernières décennies du 20^è siècle, la communauté

scientifique remet en question les conditions primitives et le "portrait robot" des premiers êtres vivants.

- Jusqu'alors, la communauté scientifique envisageait une atmosphère réductrice ; elle penche maintenant pour une atmosphère primitive majoritairement composée de CO₂, d'azote et d'eau.

- Elle pensait que les premiers êtres vivants étaient des structures cellulaires simples. Elle conçoit maintenant que les premières formes de vie aient pu être des molécules auto-répliquatives et évolutives.

- Elle raisonnait sur la base de réactions chimiques prenant place dans l'atmosphère et l'océan ("la soupe" primitive). Elle cantonne maintenant les réactions prébiotiques à des zones particulières et elle s'intéresse aux rôles de supports minéraux comme les argiles (Cairns-Smith) et la pyrite (Wächtershauser). Enfin, elle prend au sérieux la possibilité d'apports extraterrestres de molécules organiques.

2.5. Conclusion

Après ce détour dans l'histoire des sciences, qui confirme la réelle difficulté qu'ont les chercheurs à construire le problème de l'origine de la vie, dès lors qu'il entre dans le champ de la science, et les limites de l'actualisme méthodologique, il paraît important de mettre en perspective les grands types de points de vue, qui nous ramènent à l'utilisation du temps. Le tableau de la page suivante (tableau 13.2) tente cela. Il servira plus tard de grille de lecture des explications des élèves (chapitre 14). Il comprend deux colonnes selon que l'émergence de la vie est considérée comme un événement improbable ou comme un événement ordinaire (ou extraordinaire). Par ses lignes, il situe dans le temps, jusqu'à l'époque actuelle, ces points de vue.

3. Mobilisation de l'actualisme par les chercheurs actuels

Avant d'analyser des situations de classe, et comme nous l'avons fait pour les autres problèmes géologiques étudiés, intéressons-nous plus précisément à l'utilisation explicative du temps d'un chercheur actuel, André Brack, dont les recherches portent sur l'origine de la vie. Nos angles d'attaque sont la mobilisation de l'actualisme (voir le chapitre 2) et la façon dont le temps intervient dans la problématisation (voir le chapitre 3). Ces investigations doivent nous permettre de compléter nos outils de lecture des productions des élèves.

Notre choisissons le cas d'A. Brack, chimiste, Directeur de recherches au centre de biophysique moléculaire du CNRS d'Orléans, pour plusieurs raisons :

- A. Brack étudie un problème de géologie historique. Or d'une part, il est chimiste et non géologue de formation et d'autre part, une partie de ses recherches se font sur un "terrain" extra-terrestre. A. Brack, comme X. Le Pichon, témoigne des évolutions récentes de la géologie (chapitre 1).

- A. Brack est un spécialiste reconnu de l'origine de la vie. On peut rappeler par exemple qu'il est le président du Réseau européen d'Exo/Astrobiologie et qu'il a présidé, de 1996 à 1999, la Société internationale pour l'étude de l'origine de la vie de 1996 à 1999 (Raulin-Cerceau, Léna, Schneider, 2002, p. VIII).

	Le fossé non vivant/vivant est infranchissable ou difficilement franchissable	Le fossé non vivant/vivant est franchissable
16^e 17^e 18^e siècles		Génération spontanée Paré (1517-1590), Van Helmont (1579-1644). Dans les conditions actuelles (et anciennes) : Substances variées (boue, pourriture, grains) ---> un certain nombre d' EV (crapaud, vers, souris, ...)
18^e 19^e siècles	Réfutation de l'hétérogénie Pasteur (1822-1895) Il est impossible que : non vivant -> vivant MO MO (formes D et L) (formes D)	Génération spontanée / Hétérogénie Needham (1713-1781), Buffon (1707-1788), Pouchet (1800-1876) : Dans les conditions actuelles (et anciennes) MO -> EV microscopiques Théorie protoplasmique : (+ évolutionnisme) Huxley (1825-1895), Haeckel (1834-1919) Dans les conditions actuelles et anciennes MM-> MO particulières -> EV simples
20^e 21^e siècles	1) Une probabilité quasi nulle Monod (1910-1976) : (+ évolutionnisme) dans les conditions primitives MM -> MO complexes = EV simples 2) Evènement possible mais pas nécessaire et de la contingence dans les conditions primitives (+ évolutionnisme) MM -> MO -> EV simples 3) Une probabilité quasi nulle : Svante Arrhénius (1859-1927) Dans les conditions primitives : la panspermie	1) Oparin (1894-1981) Dans les conditions primitives (+ temps long + hasard + évolutionnisme) MM -> MO -> EV simples (une cellule) 2) Haldane (1892-1964) : dans les conditions primitives (+ évolutionnisme) MM -> virus -> EV simples (une cellule) 3) Evènement nécessaire : Gould (1941-2002) : Dans les conditions primitives (+ évolutionnisme) MM -> MO -> EV simples

MM = Matière Minérale ; MO = Matière Organique ; EV = Etre Vivant

Les chercheurs actuels comme A. Brack se situent entre "évènement possible mais pas nécessaire" et "évènement nécessaire"

Figure 13.2 : Mise en perspective des différents points de vue dans l'histoire du problème de l'origine de la vie

Nous avons eu un entretien avec A. Brack le jeudi 1er février 2001, à Orléans. La transcription de cet entretien figure en annexe 3. Quand nous citons ce chercheur, nous mettons entre parenthèses ses initiales (AB comme André Brack) et le numéro de son intervention. Il en est de même quand nous mettons en jeu l'intervieweur (DO comme Denise Orange)

3.1. L'origine de la vie selon A. Brack

A. Brack et les chercheurs actuels considèrent l'émergence de la vie comme le résultat d'une évolution chimique dans les conditions de la terre primitive. Il dit que les chercheurs actuels datent cette émergence de la vie terrestre aux environs de moins 4 milliards d'années, au sein d'un océan primitif dont la température était comprise entre 20 et 80°C (AB, 12, 36, 38). Ils échafaudent un scénario d'évolution chimique conduisant aux premiers êtres vivants (DO, 111; AB, 112), compris comme des systèmes chimiques réunissant les propriétés d'autoréplication et d'évolution. A. Brack compare souvent ces premiers systèmes vivants, réduits à des molécules autorépliquatives et évolutives, à des automates chimiques (AB, 12, 52, 66). A. Brack résume les préoccupations actuelles de la communauté scientifique :

- Caractériser les premiers êtres vivants ; pour cela, *"On (les chercheurs) cherche des molécules bifonctionnelles capables d'autocatalyser. En plus il faut, pour qu'il y ait autoreproduction, donc dans le sens de l'évolution, il faut que l'autocatalyse soit en même temps liée à un transfert d'information"* (AB, 66).

- Se représenter les contraintes environnementales dans lesquelles les premiers êtres vivants sont apparus. Dans un schéma d'évolution moléculaire, A. Brack souligne l'importance de l'eau liquide : *"ça permet d'assurer la mobilité des pièces"* (AB, 254), mais pas n'importe où dans l'eau. Cela s'est passé au fond de l'eau, où *"Il y avait peut-être des températures élevées, jusqu'à 80°"* (AB, 258) et on sait qu'une température élevée accélère les réactions chimiques (AB, 258) ; pas trop près de la surface car il y a encore des bombardements météoritiques (AB, 262) ; à proximité de surfaces minérales qui faciliteraient l'assemblage des pièces de l'automate (AB, 314, 316, 322) ; dans *"un milieu plutôt rédox neutre"* (AB, 256) dépourvu d'oxygène mais avec du CO₂, *"qui est un bon réactif"* (AB, 258).

- Construire un scénario plausible de leur obtention. A. Brack donne un panorama des pistes actuellement explorées : *"Les deux grandes pistes, c'est quand même, au niveau de l'information, l'information minérale, l'information organique et dans le cadre de l'information organique, les deux pistes possibles, c'est les systèmes hétérotrophes avec des briques qui sont faites, qui ne sont pas produites sur le lieu de l'apparition de la vie mais qui sont faites soit dans l'atmosphère, soit dans l'espace et l'autre, l'autre hypothèse, l'autotrophe où tout se fait sur le même lieu, les briques, l'automate, tout ça, ça se fait en même temps, à la Wächtershäuser"* (AB, 176). La piste de *"l'information minérale"* renvoie aux travaux de Cairns-Smith, qui a conçu un premier monde d'organismes exclusivement minéraux (AB, 96). Ce pourrait être des argiles (AB, 102). Mais cette piste est peu suivie (AB, 163). La deuxième piste est celle de *"l'information organique"* : les premiers êtres vivants sont des molécules organiques (AB, 96, 163). Cette deuxième piste, qui rassemble la majorité des chercheurs, comporte elle-même deux courants :

- le courant initié par Wächtershäuser, dans lequel les premiers automates sont des molécules organiques autotrophes (AB, 88, 155 ; l'autocatalyse de ces premiers organismes fonctionne en utilisant exclusivement des matières minérales comme le CO₂, AB, 90) ; pour Wächtershäuser, le lieu favorable à l'émergence d'une telle vie sont les fumeurs noirs océaniques (AB, 118, 143) et le CO₂ nécessaire vient du manteau terrestre (AB, 143) ;

- le courant dans lequel se situe Brack (AB, 155), pour qui les premiers organismes sont hétérotrophes (leur autocatalyse nécessite des briques organiques). Pour A. Brack, les briques

organiques nécessaires à la formation et à l'autoréplication de ces premiers organismes viendraient pour la plus grande partie de l'espace (AB, 118, 161). Enfin A. Brack dit que l'émergence de la vie a dû se faire rapidement : *"intuitivement, on pense que ça a dû être assez rapide"* (AB, 258), notamment parce que les contraintes environnementales étaient dures. Plus loin dans l'entretien, il donne avec des réserves des ordres de grandeur : *"Les gens qui donnent des chiffres, 100 millions. Moi, je dirais que des milliers d'années ou un million d'années, c'est largement suffisant"* (AB, 344).

Donc le chercheur ne s'embarrasse pas d'une contrainte de durée pour expliquer l'émergence de la vie. En revanche, le temps qui s'est écoulé brouille véritablement l'approche de cet évènement. A. Brack le dit à plusieurs reprises (AB, 12 ; 178) : *"Sur 4 milliards d'années, là on se heurte à la flèche du temps. Donc on ne pourra pas, on ne peut plus, lorsqu'on essaie de reproduire à l'identique quelque chose, on ne peut plus négliger la flèche du temps, parce qu'en 4 milliards d'années, beaucoup de choses se sont passées et qui ont même effacé les traces de... des collections réelles, donc on ne pourra jamais dire, on ne pourra jamais dire : nous reproduisons à l'identique ce qu'il s'est passé il y a 4 milliards d'années. Parce que la flèche du temps est énorme, donc ça c'est une notion de temps qui est importante, qui est négligée lorsque l'on reproduit une expérience en laboratoire mais qu'on ne peut négliger lorsque l'on essaie de reproduire un évènement qui s'est passé il y a 4 milliards d'années"* (AB, 178).

3. 2. Le nécessaire recours à l'actualisme et la difficulté de le faire

Convoquer l'actualisme dans le problème de l'origine de la vie, ne serait-ce que pour définir ce qu'est un être vivant, semble relever d'une nécessité car le risque est grand de construire une nouvelle géogonie, autrement dit une explication par trop fantastique de ce problème. Souvenons-nous de Cuvier et du problème du renouvellement des faunes. Il reprochait aux cosmogonistes leur non-recours aux données empiriques et à des phénomènes physiques du présent (voir le chapitre 2). Cependant, les chercheurs actuels disposent de bien peu de données empiriques concernant directement l'émergence de la vie terrestre. A. Brack nous dit que, pour identifier les premiers systèmes vivants, une des approches des chercheurs consiste à chercher *"dans les sédiments les plus anciens pour voir s'il n'y aurait pas de traces fossilisées de ces structures"* (AB 12) ; les plus vieux sédiments connus sont datés de 3,8 milliards d'années. Dedans *"Y-a pas de fossiles, pas de bactérie mais il y a de la matière organique qui est enrichie en carbone 12 comme si elle avait été fabriquée par des systèmes vivants"* (AB, 22). Ce qui a valeur de "fossiles" n'est donc pas directement une trace d'une forme vivante mais le produit de son fonctionnement. Nous sommes au niveau moléculaire. De plus, si d'un côté, ces traces ne nous renseignent pas sur l'organisation des premiers êtres vivants, de l'autre, en tant que produit du vivant (et là, il y a bien mise en comparaison avec les matières organiques actuelles), elles montrent une certaine complexité de fonctionnement de ceux qui les ont produites que l'on identifie en référence à des processus actuels : *"ces systèmes récupéraient le carbone du dioxyde de carbone atmosphérique donc il y avait... une sorte de photosynthèse fonctionnait et ça ça demande du temps à être mis en place"* (AB, 22). Cela veut dire que nous nous situons après que l'origine de la vie a eu lieu. En définitive, il n'y a pas de traces terrestres des débuts de la vie, encore moins de ses préparatifs et *"on a peu d'espoir de trouver des automates fossilisés, enfin par automate j'entends, c'est une image, ces automates¹⁰⁷ fossilisés plus anciens parce que on a eu beaucoup, le temps a joué contre nous"* (AB, 12). Comment user de l'actualisme quand, d'une part, il n'y a pas de

¹⁰⁷ A. Brack compare les premiers systèmes chimiques vivants à des automates, en référence à Empédocle (V-VI^e siècle avant Jésus-Christ ; AB, 12 ; et plus précisément v.490-v.435 av. J.-C., Brack, 2002a, p. 90).

données empiriques directes (*"le temps est un facteur d'effacement de ces traces"*, AB, 12) et que d'autre part, il n'est pas de phénomènes actuels reconnus comme pouvant déboucher sur l'émergence de vie ? A. Brack précise qu'une partie des recherches actuelles se transportent hors de la planète Terre, de façon à repérer d'éventuelles traces d'une vie primitive. Mars par exemple est un terrain digne d'intérêt puisqu'elle a présenté à un moment donné de son histoire des conditions comparables à celles de la Terre primitive (AB, 44) : *" Une façon de savoir, d'appréhender cette simplicité ou ces degrés de complexité du système primitif serait de trouver un deuxième exemple de vie apparaissant dans des conditions similaires"* (AB, 182).

3.3. Actualisme et reconstitution des êtres vivants primordiaux

A défaut d'avoir des fossiles des premiers êtres vivants, les chercheurs tentent indirectement d'en dresser "le portrait" et de l'obtenir au laboratoire. Des interactions entre les essais au laboratoire et des données récentes de la biologie moléculaire (exemple : le fait que l'ARN joue à la fois le rôle de mémoire héréditaire et de catalyseur ; AB, 66) conduisent à modifier et à épurer ce "portrait" : d'un premier monde de cellules, les chercheurs sont passés à un monde à ARN puis à un monde plus simple encore. Voici par exemple ce que dit Brack des essais de la chimie prébiotique et des inflexions provoquées par les difficultés rencontrées : *"Alors pendant trente ans, on a essayé de reconstituer d'une manière un peu ambitieuse et naïve une cellule. On s'est dit, tous les systèmes vivants reposent sur l'utilisation de la cellule par conséquent on doit être capable de faire des modèles réduits de protéines, des modèles réduits d'ARN, des modèles réduits de membranes. Alors, membrane, pas trop de problèmes. Pour les enzymes protéiques, ça va assez bien " (...) "Mais par contre comme déjà mentionné, le ribose manque et on n'a pas le plan de montage. On n'a pas la mémoire héréditaire. "*(AB, 66). Et de ce que devient actuellement le "portrait" de ces premiers êtres vivants : *" on a cherché un biais encore plus simple en essayant de trouver quelque chose qui aurait précédé de l'ARN ou ses analogues ou ses cousins et qui aurait été capable soit de préparer le monde de l'ARN, soit d'être déjà vivant, plus primitif. "*(AB, 66).

Il y a donc, dans la démarche des chercheurs, un recours à l'actuel pour se représenter les premiers êtres vivants. Ce recours est double et ses deux facettes interagissent :

- les chercheurs s'intéressent aux caractéristiques qui définissent a minima un être vivant actuel. L'actuel leur permet de dresser un portrait fonctionnel minimal : c'est un système moléculaire autorépliatif et évolutif. Cette façon de faire relève d'un **actualisme d'analogie** : les chercheurs exportent un modèle moléculaire fonctionnel actuellement aux premiers temps de la Terre. Mais ils restent dans l'incertitude quant aux particularités constitutionnelles et structurales de l'automate : *"Fallait-il 10 pièces pour faire l'automate ? Ou fallait-il 10 000 pièces ? "* (AB, 178).

- cet être vivant primordial est également vu comme le début de l'histoire évolutive des êtres vivants. Les chercheurs l'imaginent de telle sorte que, dans **le temps long** qui sépare l'apparition de la vie de l'actuel, l'évolution de cette forme primordiale soit possible et telle qu'elle rende compte de l'unité et de la diversité de la biosphère actuelle. Ils sont là en train de mobiliser un **actualisme méthodologique de 2^e niveau**. La figure 13.3 schématise la mise en jeu des actualismes méthodologiques de 1^{er} et de 2^e niveau dans la reconstitution des êtres vivants primordiaux.

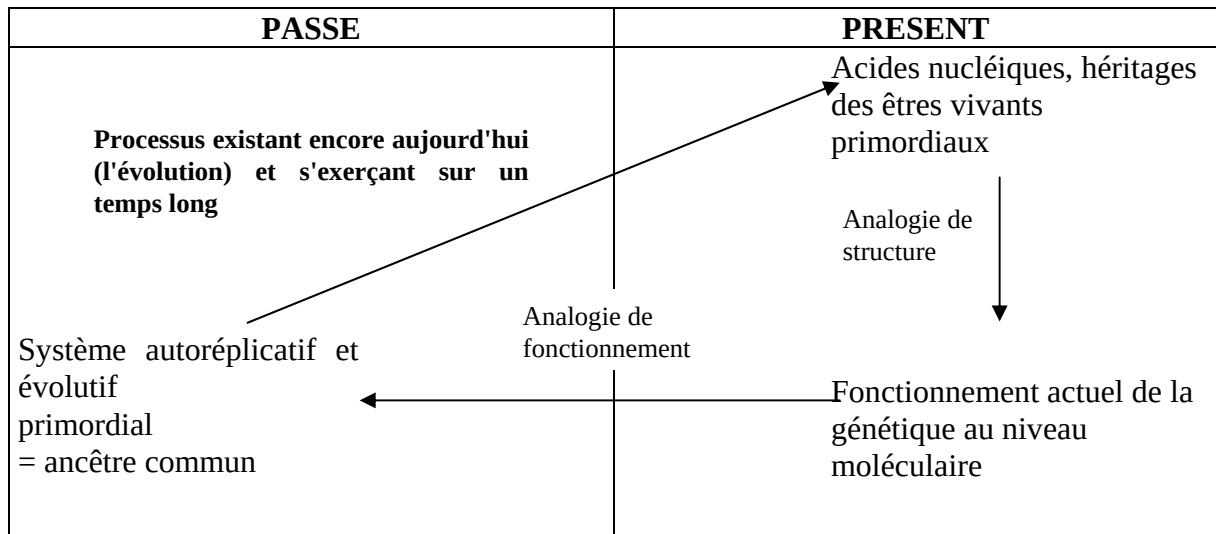


Figure 13.3 : L'actualisme méthodologique et la reconstitution des êtres vivants primordiaux (actualisme de 2^e niveau)

3.4. Actualisme et modèle des réactions robustes

S'il apparaît que la représentation que l'on peut se faire des êtres vivants primordiaux met en jeu de l'actualisme de 1^{er} et de 2^e niveau, qu'en est-il de l'évolution moléculaire qui conduit à les obtenir ?

3.4.1. Actualisme et évènement terrestre unique

A se limiter à notre planète, il paraît impossible d'utiliser l'actualisme méthodologique : ce serait dire qu'il peut y avoir émergence de la vie aujourd'hui ; ce qui paraît impossible parce que le contexte terrestre a changé, notamment parce que la vie a assez rapidement produit de l'oxygène. Depuis 2 milliards d'années, il y a de l'oxygène libre en milieu aquatique et atmosphérique. Or c'est un poison des pièces à bâtir des automates. (AB, 358). *"Donc ça, ça nuit déjà à la génération spontanée de systèmes équivalents à ceux qui se sont formés il y a quatre milliards d'années. A partir de ce moment là, c'était difficile puisque c'est un poison pour ces pièces. Ces pièces... La vie terrestre a réalisé un exploit en s'adaptant à un poison qu'elle a sécrété. Un exploit. On ne devait pas être là. Et d'ailleurs, dès que tout système vivant s'arrête de vivre, il est détruit par l'oxygène, c'est clair. Donc..."* (AB, 358). Mais peut-être y-a-t-il des lieux actuels retirés et indemnes d'oxygène libre, où l'émergence de la vie pourrait se répéter, où pourraient se tenir des réactions chimiques en marche jusqu'à des automates. Brack évoque *"les sédiments profonds, à mille mètres de profondeur, dans les sédiments sous-marins"* (AB, 360), mais il émet des réserves car les volumes d'eau qui s'y trouvent sont réduits et limitent la diffusion. C'est pourquoi, nous dit-il, *"on pense que ce serait extrêmement difficile de recréer une vie de novo aujourd'hui"* (AB, 362).

Les chercheurs sont donc quasiment forcés à raisonner avec des causes anciennes différentes en intensité des causes actuelles ou avec d'autres causes, autrement dit à se placer dans un cadre "catastrophiste" de deuxième niveau (chapitre 2). Depuis les travaux d'Oparin, ils soulignent l'importance des conditions terrestres primitives, fort différentes des conditions actuelles. Le fait même qu'ils reconstituent des conditions primitives différentes des conditions actuelles valide cela. A. Brack rappelle l'expérience de Miller (AB, 48),

reconstituant une atmosphère primitive riche en méthane. Cette composition est depuis remise en cause par les géochimistes qui *"disent qu'il n'y a aucune raison de penser que l'atmosphère de la Terre primitive était dominée par le méthane. C'était essentiellement du dioxyde de carbone"* (AB, 48). Rappelons combien le gaz carbonique est minoritaire en proportion dans l'atmosphère actuelle. A. Brack dit également que *"les gros débats portent aussi sur la température de l'eau"* (AB, 34). Même si *"en général il y a quand même un consensus pour dire que ça s'est passé pas au delà de 80° donc ça peut être entre 20 et 80"* (AB, 36), il n'en reste pas moins qu'on est sur une gamme de température des eaux océaniques au dessus de la fourchette actuelle. Plus loin encore dans l'entretien, A. Brack fait part, à propos d'expériences de chimie prébiotique, des difficultés à bien connaître les conditions de la Terre primitive où s'est produite l'émergence de la vie : *"Le support expérimental n'est accepté que si les conditions sont plausibles. Ça, c'est une autre difficulté. Il faut que ça se passe dans des conditions supposées de la Terre primitive. Qu'on ignore parce qu'on a, sauf les zircons qui sont vieux de 4,4 milliards d'années, on n'a pas d'indication de l'état de l'atmosphère, de l'état des continents. On ne sait pas si... On sait qu'il y avait de l'eau, mais on ne sait pas quand est-ce que les continents sont apparus exactement."* (AB, 169)

Au premier présupposé des chercheurs actuels, qui fait de l'origine de la vie un évènement "ordinaire", il en est un deuxième qui joue contre l'utilisation de l'actualisme méthodologique : il s'agit du directionnalisme engendré par l'existence même de la vie. La vie est à considérer comme une condition "géologique" nouvelle. Il y a la Terre d'avant la vie et la Terre d'après la vie. Ce deuxième présupposé semble écarter l'actualisme.

3.4.2. Un actualisme "de laboratoire" (réactions robustes)

Si la recherche de traces de l'origine de la vie est une première démarche (AB, 12), il en est une deuxième (AB, 44) qui *"consiste à recréer en tube à essais ces automates"* (AB, 44), plus précisément *"les automates simples à partir des pièces que l'on pense avoir été présentes sur la Terre primitive"* (AB, 44). A. Brack dit que ces pièces sont des molécules organiques (AB, 44). D'autre part, il donne les trois origines possibles de ces pièces, en rapport avec trois scénarios différents :

- une formation au sein d'une atmosphère primitive riche en CO₂, donc fondamentalement différente de l'atmosphère actuelle. A. Brack pose le problème de la fécondité en matières organiques de cette source, car les expériences de Miller avec une telle atmosphère ne marchent pas : *"Elle (l'atmosphère) n'est pas une usine à former les pièces de l'automate"* (AB, 48) ;

- une formation au niveau des sources hydrothermales océaniques, là où *"il y a du méthane, il y a du dioxyde de carbone, il y a du monoxyde de carbone et récemment, les chercheurs de l'IFREMER ont montré qu'il y avait de l'hydrogène"* (AB, 48). On remarque qu'on retrouve là de l'actualisme. A. Brack dit que les Japonais et les Allemands ont mimé les conditions des sources hydrothermales ; pour lui, c'est une source possible, peut-être pas la seule.

- une formation dans l'espace d'une partie des briques organiques, *"certainement la source la plus importante"* (AB, 48) : *"tout n'est pas fait à la maison"* (AB, 204) Ces molécules seraient parvenues sur la Terre véhiculées par les météorites et les micrométéorites. A. Brack rappelle que ces objets célestes contiennent plusieurs sortes d'acides aminés, avec *"un excès de formes gauches des acides aminés qui pourrait expliquer l'asymétrie du vivant"* (AB, 48). A. Brack teste actuellement cette hypothèse *"en remplaçant les acides aminés dans l'espace pour voir s'ils sont stables chimiquement, s'ils conservent leur asymétrie etc..."* (AB, 50).

A. Brack fait ainsi un inventaire des travaux de chimie prébiotique s'intéressant aux réactions chimiques robustes, celles qui sont à l'origine des briques organiques nécessaires à la

construction d'un automate. Tous ces travaux sont fondés sur une reconstitution de conditions initiales différentes des conditions naturelles actuelles (sauf peut-être pour les sources hydrothermales). En cela, ces recherches confirment le fait que les chercheurs ne peuvent pas recourir à de l'actualisme méthodologique. Mais en reconstruisant au laboratoire le contexte terrestre initial, ils pallient le manque "d'actuel" en la matière. C'est une façon de retrouver l'actualisme, mais c'est un actualisme qui ne nécessite pas du temps long ; c'est de l'actualisme d'analogie.

3.4.3. Un possible actualisme d'analogie "de terrain" extra-terrestre

A. Brack dit que des recherches actuelles portent sur des objets du système solaire autres que la Terre : la planète Mars et des satellites de Jupiter (Europe, Ganymède et Callisto ; AB, 188, 192). *"Europe a peut-être des fumeurs noirs"* (AB, 192) et pourrait être un modèle actuel de ce qui s'est passé, selon l'hypothèse de Wächtershäuser, dans les océans primitifs (AB, 196, 198). C'est une manière de retrouver l'actualisme, dans un cadre spatial qui dépasse celui de la Terre. Ces prospections préparent la mise en jeu d'un actualisme d'analogie, mais il est un peu particulier dans la mesure où les phénomènes actuels prennent place ailleurs que sur la Terre.

3.5. Actualisme et passage des "briques" à l'"automate"

Le gros problème des chercheurs actuels est de comprendre comment il est possible de passer de briques élémentaires à des systèmes chimiques autoréplicatifs et évolutifs, sachant qu'ils ont des incertitudes fortes sur le nombre de pièces de l'automate (AB, 178, 278). A. Brack dit que le passage des petites briques à l'automate est *"évidemment la question clé"*, *"c'est vraiment l'étape qui nous manque"* (AB, 254). Les chercheurs s'appuient sur la chimie prébiotique en interaction avec la planétologie comparée (AB, 199) et il semble que le rapport au temps des chercheurs conditionne leur prise en compte de l'actualisme.

3.5.1 Une évolution moléculaire improbable ?

La communauté scientifique actuelle n'adopte pas la position de Monod. Elle ne fait pas de l'émergence de la vie un événement unique en son genre, fruit d'un *"hasard fantastique"* (AB, 441), résultat d'une *"rencontre fortuite de milliers de pièces"* (AB, 443-445), ce qui rendrait toute approche expérimentale actuelle illusoire. En effet, le concours de circonstances extraordinaires est difficilement reproductible (AB, 461). Brack nous dit (AB, 262) *"Il semble probable que l'on puisse exclure une origine unique. C'est pas... Nous ne descendons pas tous d'un seul automate. Ca, c'est l'idée de Monod. Monod, c'est de dire la vie est tellement fantastique que ça ne peut être le résultats que d'une rencontre fantastique, en un seul exemplaire, qui ne s'est produite qu'une fois. Nous, on dit que, dans les conditions de la Terre primitive, cela paraît exclu"*. Bien évidemment, si l'émergence de la vie est un événement unique et de plus, le résultat d'un *"énorme coup de dé"*, l'actualisme n'a pas sa place.

3.5.2. Une évolution moléculaire banale ?

A écouter A. Brack, nous comprenons que la communauté scientifique actuelle cherche les moyens de se positionner plus précisément entre une émergence de la vie probable (mais pas certaine) et une émergence de la vie certaine dans les conditions primitives. Quoi qu'il en soit, elle raisonne en faisant de l'origine de la vie un événement "relativement" ordinaire dans certaines conditions, qui a pu se produire quelques fois, sur la Terre à ses débuts mais aussi sur d'autres "corps" du système solaire. Voyons si l'actualisme méthodologique peut alors prendre du sens.

a. La première façon qu'a A. Brack de banaliser l'émergence de la vie est de penser qu'à une époque donnée de l'histoire de la Terre, il y a eu plusieurs émergences terrestres de systèmes chimiques préfigurant le vivant. C'est ce que nous appelons la banalisation terrestre synchronique. Écoutons A. Brack : *"Donc on est plutôt sur une origine multiple "* (AB, 268), *"Des lieux comparables. Avec des briques comparables"* (AB, 270). Certes, A. Brack ajoute que de toutes ces tentatives, il est resté le type de système le plus performant (AB, 266), à savoir le système autocatalytique (AB, 266), celui qui a tenu dans des conditions environnementales dures des débuts.

b. A. Brack parle également de la préoccupation des chercheurs actuels à trouver un deuxième exemple dans le système solaire. C'est une deuxième façon de banaliser l'émergence de la vie. Il parle de l'intérêt d'explorer Mars, petite soeur de la Terre, *"Puisque Mars avait les mêmes conditions que la Terre"* (AB, 186). *"Etant plus petite, les conditions sur Mars étaient plus favorables plus tôt que sur Terre donc on a plus de marge sur Mars et donc la vie aurait pu apparaître plus tôt sur Mars et être apportée sur Terre."* (AB, 44). C'est une banalisation extraterrestre diachronique.

c. A. Brack rend compte également d'autres explorations au sein du système solaire. Nous retenons celles d'Europe¹⁰⁸ parce qu'elles peuvent conduire à identifier un lieu actuel d'émergence de la vie (AB, 196). Nous serions encore dans le cas d'une banalisation extraterrestre diachronique.

En quoi toutes ces banalisations ont-elles à voir avec de l'actualisme méthodologique ? Notons tout d'abord que le repérage d'une évolution moléculaire en marche sur Europe (voir le paragraphe c) permettrait de reconsidérer l'émergence terrestre à la lumière d'un exemple actuel. Nous serions en plein dans l'utilisation de l'actualisme méthodologique (actualisme d'analogie notamment). Pour les autres cas (voir les paragraphes a et b), A. Brack nous donne des éléments de réponse quand il dit qu' *"Une façon de savoir, d'appréhender cette simplicité ou ces degrés de complexité du système primitif serait de trouver un deuxième exemple de vie apparaissant dans des conditions similaires. D'où notre frénésie à rechercher avec acharnement un deuxième exemple de vie indépendant de la vie terrestre. Parce que dès qu'on aura un deuxième exemple apparaissant dans des conditions similaires aux conditions de la Terre primitive, alors on pourra dire que, puisque le système est répétitif...il doit être simple. C'est comme une recette de cuisine."* (AB, 182, 184). Trouver un autre exemple ancien, c'est améliorer la lisibilité de l'évolution moléculaire conduisant au vivant et c'est se donner des conditions plus plausibles de reproduction en tube à essais. En termes d'actualisme, c'est construire un actualisme de laboratoire plus fiable : *"Refaire une recette*

¹⁰⁸ Europe est un satellite de Jupiter

simple, c'est facile. Refaire une recette très complexe, les chances de se tromper augmentent." (AB, 186)

A. Brack envisage jusqu'à la possibilité de ne rien trouver ailleurs que sur la Terre : *"Si par exemple dans 50 ans, on a identifié une centaine de sites possibles pour l'apparition de la vie, sur Mars, Europe et au delà, et si sur ces sites, il n'y a rien du tout, si sur 100 sites possibles, il n'y a rien, alors il faudra revenir à une notion plus... monoïste de l'apparition de la vie"* (AB, 439). Où l'on retombe dans l'hypothèse de Monod (AB, 441, 443).

En conclusion, les chercheurs actuels sont dans l'espoir qu'il y a eu plusieurs "origines de la vie", ce qui leur permet de rendre "plus probable" et donc "plus simple" le processus physico-chimique qui y conduit : *"Pour l'instant, l'hypothèse de travail, c'est que c'est simple, qu'on arrivera à le faire en tube à essai, qu'on en trouvera ailleurs et que tout est pour le mieux dans le meilleurs des mondes"* (AB, 449). Et aussi : *"Et on voudrait bien le deux. Je pense qu'on aura un indice du deux, soit sur Mars, soit en tube à essai, soit sur Mars, soit ailleurs assez rapidement. Dans les décennies qui viennent. Espérons..."* (AB, 543). Cela permettrait d'utiliser l'actualisme.

4. La construction du problème de l'origine de la vie par les scientifiques actuels

Nous cherchons dans cette dernière partie à dresser l'espace de contraintes caractérisant la problématisation des scientifiques actuels. Après l'actualisme, c'est une autre façon d'entrer dans la complexité du problème de l'origine de la vie, notamment du point de vue du temps. C'est également compléter la palette d'outils d'interprétation des productions des élèves.

4.1. Le problème pris en charge par les scientifiques actuels

La communauté actuelle construit le problème du démarrage de la vie sur la Terre. Nous retenons des propos d'A. Brack (et du paragraphe 1 de ce chapitre) que les chercheurs raisonnent sur **une émergence terrestre**, même s'il leur faut recourir à des apports de matière extraterrestre, et qu'ils **écartent la panspermie et la génération spontanée répétitive**.

- la théorie de la panspermie suppose que la Terre a étéensemencée par des micro-organismes venus de l'espace. A. Brack dit que les chercheurs actuels ne rejettent pas cette théorie, qu'elle est possible (des expérimentations dans l'espace la valident ; AB, 44) mais que, de façon consensuelle, *"on n'a pas encore besoin d'elle"* (AB, 40).

- quant à la génération spontanée, A. Brack y recourt mais à une seule époque de l'histoire de la Terre : *"Mon modèle a expérimenté la génération, provient d'une génération spontanée mais d'une seule, il y a 4 milliards d'années. Mon premier automate s'est formé par génération spontanée. Ce sont des pièces qui se sont rencontrées par hasard et qui ont formé le premier robot. D'accord ? Donc génération spontanée mais une fois dans l'histoire de la Terre et après fini"* (AB, 354). A. Brack parle d'une "seule" génération spontanée ; dans ses propos, cela ne veut pas dire une "unique" génération spontanée. Écoutons-le un peu avant : *"Il semble probable que l'on puisse exclure une origine unique. C'est pas... Nous ne descendons pas tous d'un seul automate"* (AB, 262). Cela rend compte de l'idée que, dans une fenêtre temporelle de l'histoire de la Terre primitive, l'émergence du vivant s'est faite d'une façon relativement "banale", à partir de matières abiotiques. D'autre part, nous comprenons que ce qui rend possible la génération spontanée qu'il envisage, ce sont des conditions environnementales exigeantes, qui n'étaient pas réalisées avant, à cause notamment du

bombardement météoritique, qui n'ont plus existé dès lors que la vie a existé : *"Enfin, il y a eu d'autres tentatives mais qui ont avorté parce que, même aujourd'hui, on pourrait, on pourrait encore... Les conditions, alors pour qu'il y ait génération spontanée, il faut qu'il y ait une continuité, il faut que ça puisse se produire n'importe quand."* (AB, 354). Ce qu'A. Brack rejette, c'est la génération spontanée intemporelle, qui est certes inféodée à des conditions du milieu, mais qui néglige l'évolution de ces conditions.

Nous allons tenter de comprendre comment, plus précisément, A. Brack construit le problème de l'origine de la vie. Cela nous demande de dégager l'espace des contraintes empiriques et les nécessités sur le modèle qu'il construit (C. Orange, 1999, 2002).

4.2. Les nécessités sur le modèle du démarrage de la vie sur la Terre

Dans l'entretien, A. Brack met en avant quelques conditions de possibilité de l'apparition de la vie ou nécessités portant sur les modèles (chapitre 3, problématisation historique).

- Les chercheurs pensent nécessaire qu'un processus physico-chimique a conduit à des systèmes chimiques capables d'autoreproduction et d'évolution, les deux fonctions fondamentales du vivant, et que cela s'est fait dans l'eau : *"On pense d'abord que la vie est apparue, d'après ce que l'on croit savoir, il y a environ 4 milliards d'années"... "... ça s'est passé dans l'eau, ça c'est accepté par tous puisque la vie a passé 90% de son histoire dans l'eau donc l'évènement se passe dans l'eau ..."* avec des systèmes chimiques *"qui ont acquis une propriété, enfin deux fonctions fondamentales qui sont la capacité à s'autoreproduire et la capacité à évoluer"* (AB, 12).

- Ce qui, pour les chercheurs doit être expliqué est la constitution et l'obtention de ces systèmes chimiques primordiaux à partir des matériaux disponibles et des réactions chimiques possibles alors, dans un milieu aquatique assez chaud. A. Brack fait l'analogie avec la construction de l'homme par Empédocle : *"Empédocle, donc au V-VI^{ème} siècle avant Jésus-Christ voyait l'origine de l'homme comme des têtes, des troncs, des bras, des jambes qui jonchaient le sol et qui se sont rassemblés par hasard et qui ont formé un être humain. Et donc, nous on transpose cette image aux molécules"* (AB, 12).

Le modèle explicatif du démarrage de la vie sur la Terre revient à comprendre la construction d'automates moléculaires pourvus des propriétés fondamentales du vivant. Mais il n'est pas simple pour les chercheurs de se représenter cette première forme vivante, parce qu'ils n'ont **pas de traces fossiles** d'elle, qu'ils pensent qu'elle est issue d'une **génération spontanée qui n'a pas d'équivalent actuel** et qu'elle **représente le début d'un processus évolutif**, enfin qu'ils ne disposent que de possibles expérimentaux limités. Derrière tout cela, il nous semble que se construit **la nécessité d'une forme particulière des premiers êtres vivants**. Nous la qualifions de "particulière" et non pas de "simple" : en effet, la définition de la vie que mobilisent les chercheurs dont Brack indique une certaine complexité. Brack nous dit qu'un système peut être qualifié d'être vivant s'il remplit à minima deux fonctions : l'autoreproduction et l'évolution (AB, 12, 304) ; il dit aussi que *"La vie terrestre est une rupture de symétrie"* (AB, 224).

Cette nécessité nous paraît ouvrir sur une autre nécessité : ces premiers êtres vivants doivent **nécessairement être des molécules organiques autorépliquatives**. Comment se construit cette deuxième nécessité ?

- Brack dit que les chercheurs ont pendant trente ans tenté de reconstituer *"d'une manière un peu ambitieuse et naïve une cellule"* (AB, 66). Cela allait avec une certaine conception du rôle des constituants cellulaires : des acides nucléiques porteurs de l'information génétique, des protéines assurant structure et catalyse. Mais comme l'écrit Maurel (2002, p. 98), *"Il est*

difficile d'imaginer comment un mécanisme non biologique a pu permettre l'émergence spontanée et simultanée des acides nucléiques et des protéines". La tendance a donc été vers une simplification du système recherché. Pourtant, expérimentalement, on parvient à des synthèses, notamment dans le laboratoire d'A. Brack à Orléans : *"Alors, membrane, pas trop de problèmes. Pour les enzymes protéiques, ça va assez bien. Ici en laboratoire, on a réussi à condenser, donc à former des petites chaînes de protéines à partir des briques comme celles qu'on trouve dans les météorites"* et *"on arrive également à recréer un petit peu l'activité catalytique avec des choses hypersimplifiées"*(AB, 66). Avec cependant une grosse difficulté : *"le ribose¹⁰⁹ manque et on n'a pas le plan de montage"* (AB, 66 mais aussi 56). L'impossibilité d'une émergence simultanée et abiotique de protéines et d'acides nucléiques, et l'existence des ribozymes (ARN catalyseurs) font que les chercheurs construisent la nécessité d'êtres vivants primordiaux sous la forme de molécules autorépliquatives et évolutives.

- Les chercheurs tentent de préciser quel est ce premier système vivant moléculaire. La pauvreté du registre empirique de Cairns-Smith, c'est-à-dire la non obtention de systèmes autorépliatifs minéraux, ainsi que l'existence des ribozymes, systèmes autorépliatifs organiques, conduisent les chercheurs à particulariser les systèmes vivants initiaux : ce ne peut être que **des molécules autorépliatives organiques**. Écoutons A.Brack écartier l'hypothèse de premières formes de vie minérales au profit de formes organiques : *"... pour l'instant ça reste une hypothèse et dans la mesure où on n'arrive pas à trouver d'exemple, parce que les surfaces minérales n'évoluent pas. Les argiles n'évoluent pas. C'est-à-dire que si vous faites des manip de cristallisation, au bout de mille fois, vous ne faites pas apparaître de mutants. Il n'y a que les molécules organiques qui renferment une information de séquence qui peut évoluer par mutations."* (AB, 104). Dans l'espace des contraintes que construit la communauté scientifique, nous sentons bien que de nombreux possibles sont explorés. Certains tombent, comme celui de Cairns-Smith, *"... dans la mesure où il faut quand même un minimum de confirmation expérimentale pour légitimer le scénario. Sinon, ça reste une histoire."* (AB, 165). Notons que l'impossibilité de synthétiser le ribose conduit à envisager que ce n'est peut-être pas l'ARN. Car *"le ribose manque"* (AB, 66), le ribose naturel, celui qu'on trouve dans l'ARN. Non seulement, on ne le trouve pas dans les météorites (AB, 56) et *"on n'arrive pas à le refaire en laboratoire à partir des composés simples que sont par exemple le formaldéhyde"* (AB, 56). Mais nous sommes là, non plus sur une nécessité, mais sur des possibles en matière de solution.

- Il nous semble enfin, à suivre les propos d'A. Brack, que les chercheurs construisent des nécessités en rapport avec la formation de ces premiers systèmes autorépliatifs. Ainsi, par exemple :

* **la nécessité d'un milieu liquide** : A. Brack nous dit qu'il est impossible que cela se passe dans l'air (*"Il n'est pas question de travailler à sec"*, *"La contrainte en phase gazeuse, c'est la diversité, l'inventaire des molécules volatiles stables"*, *"un petit nombre de molécules volatiles"*, AB, 254, *"le bombardement météoritique a pu perturber ça, même dans l'eau"*, AB, 14).

* **la nécessité d'une présence de molécules organiques d'une certaine complexité**. Même s'ils ont des incertitudes sur la constitution des premières molécules autorépliatives (par exemple, nombre de pièces : AB, 178, 182 ; nature des pièces), les chercheurs n'envisagent pas l'émergence de la vie sans la présence (suite à une formation ou à un apport) de molécules organiques d'une certaine complexité. Ils se réfèrent à l'actuel, en termes de molécules (acides aminés, sucre, ...) et de caractéristiques de ces molécules (asymétrie moléculaire, AB, 48).

¹⁰⁹ Le ribose est un sucre présent dans l'ARN

4.3. Conclusion

Le modèle d'un démarrage de la vie par la formation de molécules organiques autorépliquatives et évolutives rassemble les chercheurs. Malgré des points souffrant de controverse (datation du démarrage de la vie, température de l'eau dans laquelle il s'est produit ; AB, 34), il semble que l'on puisse ramener leur problématisation (Figure 13.4, page suivante) à trois grandes nécessités : la nécessité d'une première forme vivante particulière, la nécessité d'une première molécule autorépliquative et évolutive organique, la nécessité de conditions "environnementales" permettant sa construction. On remarque la complexité du registre empirique : il y a un registre empirique de "terrain" biologique et géologique portant essentiellement sur le niveau moléculaire ; il y a un registre empirique de "terrain" terrestre et extraterrestre ; il y a un registre de "laboratoire" diversifié fournissant des possibles et des impossibles en matière de réactions chimiques. On peut noter également la complexité du registre explicatif : il sous-tend des positions philosophiques matérialiste et mécaniste, la mise en jeu de l'évolutionnisme, les actualismes méthodologiques de premier et de deuxième niveau.

On note également qu'une partie des recherches actuelles consiste pour une grande partie à explorer des solutions répondant à ces nécessités : construction du "cousin" du ribose, à savoir le pyranose (AB, 56), recherche d'un système autotrophe ou hétérotrophe (AB, 88, 90) ...

5. Conclusion

L'analyse épistémologique que nous avons tentée témoigne de la grande complexité du problème de l'origine de la vie dans ses rapports au temps. Résumons les principaux aspects de cette complexité, de façon à disposer d'outils plus précis pour analyser, dans le chapitre 14, les productions d'élèves.

5.1. L'origine de la vie est une génération spontanée "nécessaire" à valeur d'évènement

Les chercheurs actuels font de l'origine de la vie une "génération spontanée", à partir de la matière, qui prend le statut de nécessité dans le cadre évolutionniste où ils se placent : il est impossible qu'il n'y ait pas d'ancêtre commun à tous les êtres vivants. Mais c'est une "génération spontanée" singulière dans l'histoire de la Terre : on ne peut en effet la penser que dans une "fenêtre" temporelle et un contexte "environnemental" particuliers. C'est donc **un évènement** dont la probabilité de survenue est discutée (paragraphe 1.6 de ce chapitre).

5.2. L'origine de la vie est un évènement "extraordinaire" mais pas improbable de l'histoire de la Terre

Les scientifiques actuels pensent que l'origine de la vie sur la Terre n'est pas un évènement commun puisqu'il n'a eu lieu qu'*"une seule fois"* dans l'histoire de la Terre. Levons tout de suite l'ambiguïté qu'il y a à parler d'unicité de cet évènement : *"une seule fois"* veut dire qu'il s'est produit à une seule période de l'histoire de la Terre, il y a près de 4 Ga. Cela n'exclut pas cependant que plusieurs tentatives ont existé alors (voir le paragraphe 3 de ce chapitre).

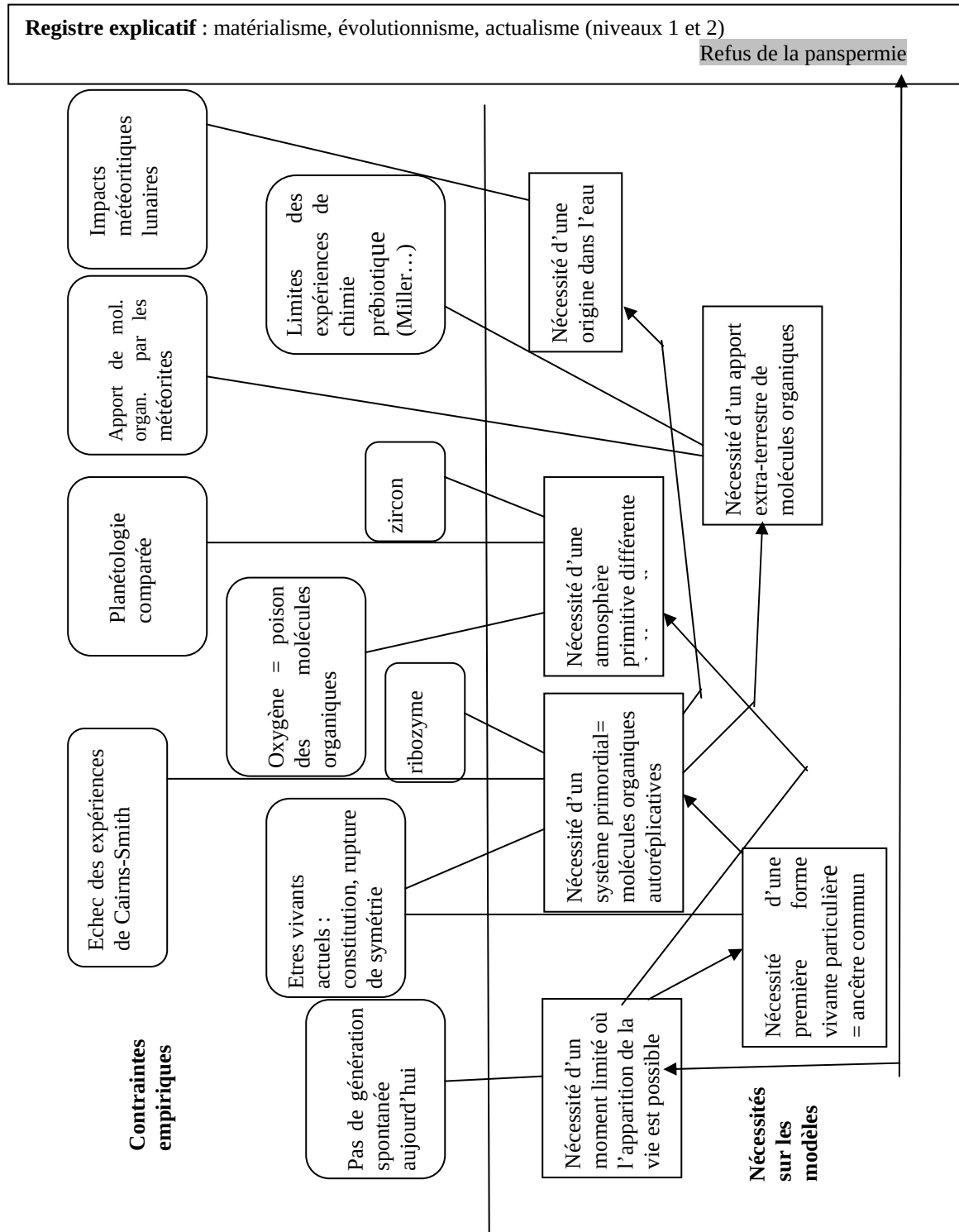


Figure 13.4
Origine de la vie : Espace des contraintes d'un chercheur

D'autre part, les chercheurs actuels semblent considérer l'origine de la vie comme un événement probable à quasi certain dans les conditions de la Terre primitive (voir le paragraphe 1 de ce chapitre) : c'est, semble-t-il, une condition pour rendre son étude pensable dans le champ de la science. En effet, si l'origine de la vie est considérée comme un événement très peu probable, il est illusoire de pouvoir la reconstituer.

Mais l'histoire des sciences montre que, depuis que ce problème est pris en charge par la communauté scientifique, il n'a pas toujours pris le même statut (figure 13.2) : des scientifiques prestigieux ont écarté l'étude du problème de l'origine de la vie du champ de la science, quand d'autres l'ont relativement "banalisé" au point d'en faire **un phénomène** répétable dans le temps et l'espace.

5.3. Un scénario avec une multiplicité des temps

La complexité de l'explication de l'émergence de la vie se traduit dans les scénarios que les chercheurs proposent. Ce n'est pas par un simple mélange que la vie est apparue, ni même dans une succession simple de réactions chimiques. La figure 13.1 montre à quel point le temps y prend différentes fonctions et qu'une grande durée n'est pas nécessaire.

5.4. Le recours "paradoxal" à l'actualisme méthodologique

Les chercheurs actuels lient l'émergence de la vie aux conditions régnant sur la Terre primitive. Certains considèrent même qu'il était inévitable qu'elle apparût. Dans un contexte primordial différent de l'actuel, et en l'absence directe des premiers systèmes vivants ou des étapes qui y ont conduit, il paraît paradoxal de recourir à l'actualisme méthodologique ou en tous cas très difficile (paragraphe 3 de ce chapitre). Nous avons vu qu'il est pourtant sollicité, dans ses premier et deuxième niveaux : par exemple dans la "reproduction" de certaines étapes prébiotiques, ou encore la reconstitution des êtres vivants primordiaux.

5.5. Un espace de contraintes très dense

La problématisation de l'origine de la vie s'accompagne de la construction d'espaces de contraintes très denses dont on ne peut rendre compte qu'en partie (figure 13. 4) ; de nombreuses contraintes empiriques se situent au niveau moléculaire et le registre explicatif mis en jeu est complexe : actualisme de niveau 1 et 2 ; refus méthodologique d'une panspermie etc.

Chapitre 14

Le problème de l'origine de la vie

Explications des élèves et utilisation du temps

Sommaire

- 1. Le contexte général des situations mises en place**
- 2. Premier type d'approche : ce qui explique l'existence de la vie sur la Terre**
- 3. Deuxième type d'approche : une entrée directe dans l'origine de la vie**
- 4. Troisième type d'approche : l'origine des animaux et des végétaux**
- 5. Quatrième type d'approche : la problématisation de l'origine de la vie**
- 6. Conclusion**

Les développements du chapitre 13 montrent la difficulté qu'ont eue et qu'ont encore les scientifiques à construire le problème de l'origine de la vie sur la Terre. En l'état actuel des connaissances, elle est considérée comme un événement "unique" et "extraordinaire", mais pas improbable, dont on ne dispose d'aucune trace directe. A priori, cela semble écarter l'actualisme méthodologique et compromettre l'élaboration d'un espace des contraintes de ce problème. Pourtant, la communauté scientifique actuelle, dans la pluridisciplinarité, construit une explication de l'origine de la vie, dans un certain rapport à l'actuel et au temps.

Devant un problème aussi complexe (chapitre 13), moins familier des élèves que ne le sont les problèmes plus directement en rapport avec la tectonique des plaques (chapitre 4), comment fonctionnent "spontanément" les lycéens ? Nos investigations ont tenté de le savoir en variant les angles d'approche des élèves, avec l'objectif de les conduire au plus près du problème de l'origine de la vie. Les approfondissements épistémologiques ont permis de faire évoluer les situations et d'aider à interpréter les productions des élèves. Ce chapitre présente les différentes situations, justifie leur évolution au cours du temps et propose leur analyse didactique.

1. Le contexte général des situations mises en place

Nous avons mis en place, durant 5 années scolaires (de l'année scolaire 1995-1996 à l'année scolaire 1999/00), plusieurs situations de classe visant à connaître, avant enseignement, les représentations des élèves en matière d'origine de la vie sur la Terre : ces situations ont eu la fonction d'évaluations diagnostiques pour notre recherche. Dans le cadre des programmes de Sciences de la vie et de la Terre de 1992, elles ont concerné des classes de Seconde et de Terminale S. On trouvera dans la figure 14.1 un récapitulatif de ces situations et les classes impliquées (niveau, nombre d'élèves).

Type de test (année scolaire)	Classe de Seconde Contenu du test:	Classe de Terminale S Contenu du test:
Test 1 (1995/96)	<u>Demi-classe 1</u> (binômes 1 à 8) Il y a des êtres vivants sur la Terre, pas sur les autres planètes du système solaire. Comment expliquez-vous cela? (la réponse doit présenter 2 ou 3 idées d'explication) <u>Demi-classe 2</u> (binômes 9 à 17) La vie existe sur la Terre, pas sur les autres planètes du système solaire. Comment expliquez-vous cela? (la réponse doit présenter 2 ou 3 idées d'explication) 10 mn pour répondre	
Test 2 (1996/97)	<u>Demi-classe 1</u> (binômes 1 à 8) = 16 élèves Il y a de la vie sur la Terre depuis 4 milliards d'années. Ce n'est pas la cas sur les autres planètes du système solaire. Comment expliquez-vous cela? Chaque binôme proposera 2 ou 3 idées d'explication. 10 mn en tout pour répondre <u>Demi-classe 2</u> (binômes 9 à 15) = 14 élèves Il y a des êtres vivants sur la Terre depuis 4 milliards d'années. Ce n'est pas la cas sur les autres planètes du système solaire. Comment expliquez-vous cela? Chaque binôme proposera 2 ou 3 idées d'explication. 10 mn en tout pour répondre	

1997/98	Une demi-classe (16 élèves) Une classe entière (23 élèves) Il y a des êtres vivants (de la vie) sur la Terre depuis environ 4 milliards d'années. Ce n'est pas la cas sur les autres planètes du système solaire. Comment expliquez-vous cela? Travail individuel, 10 mn	<u>Demi-classe 1</u> (15 élèves) Il y a des êtres vivants sur la Terre depuis environ 4 milliards d'années. Ce n'est pas la cas sur les autres planètes du système solaire. Comment expliquez-vous cela? <u>Demi-classe 2</u> (15 élèves) 1. Selon vous, comment s'est faite l'apparition de la vie sur la Terre? 2. Pourquoi n'y-a-t-il pas de vie sur les autres planètes du système solaire?
Test 3 (1998/99)	Une classe de 27 élèves Première phase: 1. Racontez comment, selon vous, les animaux et les végétaux sont apparus sur la Terre? 2. Comment expliquez-vous qu'il y ait des êtres vivants sur la Terre, pas sur les autres planètes du système solaire? Justifiez votre réponse. Deuxième phase (après que les réponses aux questions de la première phase sont ramassées): 3. Le tableau suivant présente une liste de propositions. A l'aide d'une croix mise dans la colonne appropriée, dites si vous êtes d'accord, pas d'accord ou en partie d'accord avec chaque proposition. Justifiez en une ou deux phrases votre réponse.	Une classe de 32 élèves

Figure 14.1 : Récapitulatif des situations mises en place en Seconde et en Terminale S (Origine de la vie)

	d'accord	pas d'accord	en partie d'accord	Justification de la réponse
1. Les différentes espèces d'êtres vivants sont apparues en même temps sur la Terre.				
2. Tous les êtres vivants peuvent apparaître directement à partir de matière humide (boue, terre décomposée, fumier par exemple).				
3. Les êtres vivants simples (par exemple les microbes) peuvent apparaître directement à partir de matière humide (boue, terre décomposée, fumier par exemple).				
4. Le premier être vivant de la Terre s'est formé à partir de molécules chimiques contenues dans l'océan.				
5. Des météorites (pierres qui tombent du ciel) ont apporté sur la Terre les premiers êtres vivants.				

Test 4 (1999/00)	Une classe de 29 élèves Première phase: 1. Y-a-t-il toujours eu des animaux sur la Terre? Justifiez. 2. Comment expliquez-vous la présence d'animaux sur la Terre? 3. Comment expliquez-vous qu'il y ait des animaux sur la Terre et pas sur Mars et Vénus? Deuxième phase: (après que les réponses aux questions de la première phase sont ramassées): 1. Y-a-t-il toujours eu des végétaux sur la Terre? Justifiez. 2. Comment expliquez-vous la présence de végétaux sur la Terre? 3. Comment expliquez-vous qu'il y ait des végétaux sur la Terre et pas sur Mars et Vénus? Entretien avec Céline et Caroline	Une classe de 22 élèves A un moment donné, il n'y avait pas encore d'êtres vivants sur notre planète. Pouvez-vous expliquer le plus précisément possible ce qui s'est passé entre le moment où il n'y avait pas d'êtres vivants et le moment où les premiers êtres vivants ont existé sur la planète. Deux entretiens : entretien avec Vincent et Sophie entretien avec Kévin et Gaël
Nombre total d'élèves	159	84

Figure 14.1 : Récapitulatif des situations mises en place en Seconde et en Terminale S (suite) (Origine de la vie)

Nous avons recueilli, pour toutes les situations indiquées, les productions écrites des élèves ; en 1999/00, trois entretiens d'élèves complètent le corpus.

1.1. En classe de Seconde

Une partie du programme conduit à étudier *"Les singularités de la planète Terre"*. Cette première grande partie est conçue comme une entrée en matière pour l'ensemble du programme de seconde. Elle permet d'opposer la Terre aux autres planètes du système solaire par la présence d'eau sous ses trois états (solide, liquide, gazeux) et par l'existence d'organismes vivants à sa surface.

Pour chaque classe de seconde étudiée, la situation d'évaluation diagnostique en rapport avec la présence de la vie sur la Terre ou avec son origine s'est tenue après que les élèves ont brièvement situé le système solaire dans l'univers puis identifié et positionné les différentes planètes du système solaire.

1.2. En classe de Terminale S

Une partie du programme s'intitule *"Histoire et évolution de la terre et des êtres vivants"* (M.E.N., 1992, T.II)¹¹⁰ Dans les contenus que les élèves doivent s'approprier, il y a "(la) Formation de la terre et (les) premières étapes de l'évolution de la vie".

Pour chaque classe de terminale S étudiée, la situation d'évaluation diagnostique inaugure l'entrée dans cette grande partie du programme.

Les situations de classe que nous avons construites et proposées aux élèves se distinguent les unes des autres par leur entrée dans le problème de l'origine de la vie. Il y a quatre types d'approche qui se sont succédés dans le temps, rendant compte ainsi des aménagements pour conduire l'élève au plus près de ce problème : une entrée indirecte par ce qui explique la vie sur la Terre, une entrée directe dans l'origine de la vie, une entrée ciblée sur l'origine des animaux et des végétaux ; enfin une entrée par la problématisation de l'origine de la vie. Nous allons présenter successivement ces types de situations et en faire leur analyse didactique. Dans chaque cas, nous distinguerons, si nécessaire, ce qui a trait plus spécialement à la classe de Seconde ou à celle de terminale S.

2. Premier type d'approche : ce qui explique l'existence de la vie sur la Terre

2.1. Présentations des tests

Le premier type d'approche correspond aux tests 1 et 2 (figure 14.1). Dans l'étude présente, après avoir analysé ces tests, nous nous intéresserons plus particulièrement à la situation dans la forme qu'elle a prise en 1996/97 avec une classe de Seconde. Puis nous élargirons l'analyse à d'autres cas.

¹¹⁰ Les derniers programmes de Terminale S (M.E.N. , 2001) abordent l'origine de la vie dans leur introduction intitulée *"approche du temps en biologie et en géologie"*. Il s'agit de caractériser par leur situation dans le temps et leur durée les événements clés de l'histoire de la Terre. L'origine de la vie en est un.

2.2. Analyse du point de vue de l'expert

Le test 1 est une question ouverte, portant d'une façon générale sur l'existence d'êtres vivants sur la Terre. Dans cette prise d'informations exploratoire auprès des élèves, et du fait de la forme imposée de la réponse, nous nous attendons à ce que l'élève précise les conditions environnementales déterminantes. La mise en comparaison de la Terre aux autres planètes du système solaire (contrainte empirique proposée) veut aider l'élève à prendre du recul vis à vis de "sa" planète. Comme rien n'est dit sur le moment où est fait le constat de la présence d'êtres vivants, le professeur suppose que cette question peut être traduite de deux manières par les élèves :

1) L'élève prend en compte les conditions permettant le maintien des êtres vivants sur la Terre. Il ne raisonne pas sur l'émergence de la vie.

2) L'élève pointe les conditions terrestres ayant permis l'apparition d'êtres vivants. Il est alors **en prise directe avec l'émergence de la vie**. Le professeur s'attend à être renseigné sur la nature des conditions terrestres (conditions abiotiques et conditions biotiques), et/ou leur statut (conditions nécessaires ou des conditions suffisantes), et/ou ce qu'elles disent du contexte terrestre initial comparé au contexte actuel. Cette dernière caractéristique montre l'inscription ou non de la Terre dans un cadre évolutif (directionnalisme ou steady state).

Prenons l'exemple d'une réponse fictive qui dit que la vie est apparue grâce à la présence d'eau liquide, d'oxygène et d'une température modérée.

- Cette réponse paraît exprimer, de la part de l'élève, l'identité des conditions initiales et des conditions actuelles et traduire un état stationnariste de la planète.

- Cette réponse est-elle sur une logique de facteurs abiotiques (indépendant des êtres vivants) ? Il est difficile de le dire. En effet d'où vient l'oxygène pour l'élève ? Est-il une caractéristique physico-chimique terrestre intemporelle ou bien est-il produit par des êtres vivants ?

- Les conditions proposées sont-elles des conditions nécessaires et/ou suffisantes ? En nous référant à J. Gayon (1993, p. 42), une condition suffisante est une condition qui, si elle est présente, provoque le phénomène. Pour les scientifiques, l'eau liquide, par exemple, n'est pas une condition suffisante pour l'apparition de la vie (si on a de l'eau liquide, on n'a pas forcément émergence de la vie). Une condition est nécessaire si, dès lors qu'elle ne s'exerce pas, le phénomène n'existe pas. La présence d'eau liquide est une condition nécessaire à l'émergence de la vie, mais elle n'est pas la seule condition nécessaire. Il y a également la nécessité de petites molécules organiques, d'une surface minérale, d'une température comprise entre 20 et 80°C. Dans la réponse fictive que nous étudions, l'eau liquide, l'oxygène et la température modérée sont des conditions nécessaires mais pas suffisantes.

Le test 2 est comparable au test 1, à quelques modifications près :

- en 97/98, il n'est rien exigé dans la forme de la réponse. Tout en sachant que nous n'avons pas affaire aux mêmes élèves, c'est une façon de repérer si la forme imposée de la réponse dans le test 1 a une quelconque incidence.

- il comporte une indication temporelle, "**depuis 4 milliards d'années**" (1996/97) ou "**depuis environ 4 milliards d'années**" (1997/98), qui a pour but d'installer l'élève dans une perspective "historique" de la vie, et ainsi d'englober l'origine de la vie. Nos attentes sont comparables à celles du test 1. Nous souhaitons que l'aménagement temporel de la consigne permette d'obtenir une réponse distinguant ce qui tient à l'origine de la vie et ce qui rapport à son maintien.

- nous nous sommes demandée si parler de la "**vie**" ou des "êtres vivants" était reçu de la même manière par les lycéens. C'est pourquoi, en 1996/97, chaque demi-classe de seconde n'a pas eu exactement la même consigne.

2.3. Le cas d'une classe de Seconde (30 élèves, 1996/97)

2.3.1. La situation de recueil de données

Nous étudions une classe de Seconde de 30 élèves (1996/97). Avant tout enseignement sur le sujet, mais après avoir replacé simplement la Terre dans le contexte du système solaire, nous avons proposé à la moitié de la classe (demi-classe 2 = 14 élèves) la consigne suivante :

Test 2 :

Il y a des êtres vivants sur la Terre depuis environ 4 milliards d'années. Ce n'est pas le cas sur les autres planètes du système solaire (dans l'état actuel de nos connaissances). Comment expliquez-vous cela ?

Chaque binôme proposera 2 ou 3 idées d'explication.

10 mn en tout pour répondre.

L'autre moitié de la classe (demi-classe 1 = 16 élèves) dispose de la même consigne à la différence près que nous avons substitué "Il y a de la vie ..." à "Il y a des êtres vivants...".

Cette consigne contient une indication temporelle qui a pour but d'installer l'élève dans une perspective "historique" de la vie, et de lui permettre d'englober son origine. Elle présente également une contrainte empirique forte, l'inscription de la Terre parmi les autres planètes du système solaire de façon à banaliser l'évènement qu'est l'émergence de la vie. Nous nous sommes demandé si parler de la "vie" ou des "êtres vivants" était reçu de la même manière par les lycéens. C'est pourquoi, nous n'avons pas donné tout à fait la même consigne à chaque demi-classe.

2.3.2. Le traitement des réponses obtenues

Voici, à titre d'exemple, une réponse obtenue¹¹¹ :

*"- C'est peut-être à cause de l'amplitude thermique qui serai plus ou moin forte par rapport à la distance du soleil (la planète la plus loin du soleil ---> plus froide
(" " " près du soleil ---> plus chaude).*

- Sur les autres planètes, il n'y a pas assez d'oxygène nécessaire à la respiration des êtres vivants.

- Sur les autres planètes, la pression atmosphérique doit être plus ou moins dense, sur tout objets étant sur cette planète". (réponse complète, binôme 15)

Cette réponse met en avant trois conditions nécessaires à la vie différemment précisées et explicitées dans leur rôle : la température modérée, le dioxygène en une certaine quantité, la pression atmosphérique. **Toutes les réponses de la classe, malgré les consignes quelque peu différentes entre la demi-classe 1 et la demi-classe 2, comportent une énumération**

¹¹¹ Orthographe et ponctuation conservées.

de conditions environnementales nécessaires à la vie, en général évoquées comme des manques sur les planètes autres que la Terre, et non ou rapidement justifiées..

Trois binômes sur 15 fournissent une réponse présentant une dimension "historique" (binômes 1, 2, 8).

- Le binôme 8 envisage **l'origine de la vie** (il parle d'"*obtenir la vie*"), parmi un catalogue de conditions qu'il est difficile de rapporter au maintien de la vie ou à son origine :

" Pas d'eau

Les planètes n'ont pas les principales choses (caractéristiques) (éléments) pour obtenir la vie. trop chaud ou trop froid

pas d'oxygène

Pas de nourriture naturelle (végétation).

pas d'atmosphère

météorites bombardant la planète." (réponse complète, binôme 8)

- Le binôme 1, en complément de l'évocation de trois conditions (atmosphère, température, eau), suppose l'existence d'une vie antérieure sur d'autres planètes. Il rapporte son extinction à une évolution de certaines conditions environnementales.

- Quant au binôme 2, il relie l'absence de vie au degré de développement des planètes.

Devant cet état de fait, **nous avons dressé un inventaire des conditions** prises en compte par les lycéens : température modérée, distance au Soleil (souvent reliée par les élèves à la température), atmosphère, oxygène, dioxygène, air, eau, ozone, pression atmosphérique, gravité, sol solide (opposé à gaz et planète gazeuse), végétation, arbres, nourriture...

Pour rendre cet inventaire manipulable tout en restant significatif, nous avons procédé comme suit :

- certains facteurs ont été regroupés en catégorie de sens. C'est le cas de l'air, de l'atmosphère, de l'oxygène, du dioxygène. En effet, lorsque justification il y a, ces éléments sont rapportés à la respiration. De même la distance au Soleil est mise avec la température : lorsque l'élève explicite, il considère généralement que la distance de la Terre au Soleil permet d'avoir une température modérée. Nous rassemblons dans un même ensemble matières nutritives, nourriture, et **la végétation** qui est souvent considérée comme une "*nourriture naturelle*" (binôme 8). Enfin, nous mettons dans les caractères géologiques (au sens large) de la planète Terre ce qui a trait à son sol solide, son activité, sa tectonique des plaques.

- nous avons considéré comme renvoyant au même facteur, l'atmosphère, les deux phrases suivantes :

" Pas d'atmosphère "(binôme 8)

et "Car la terre ... et il y a la couche atmosphérique ..." (binôme 10)

2.3.3. Analyse des résultats

Le tableau suivant récapitule les résultats obtenus dans la classe de seconde étudiée (1996/97) :

	Demi-classe 1 : Consigne avec "vie"	Demi-classe 2 : Consigne avec "êtres vivants"	Classe 96/97 TOTAL (30 élèves) recherche en binôme
Conditions	8 binômes (16 élèves)	7 binômes (14 élèves)	
température	14	12	26
atmosphère	16	10	26
eau	12	8	20
lumière	0	4	4
substances nutritives	6	4	10
ozone	0	2	2
caractères géologiques	4	4	8
autres (météorite, ...)	2	0	2
TOTAL	54	44	98

Figure 14.2. Ce qui explique l'existence de la vie sur la Terre (Seconde 1996/97)

Nous obtenons, dans chaque demi-classe, **un inventaire comparable par la mise en avant de 3 facteurs :**

- la température modérée, souvent liée à la distance "moyenne" de la Terre au Soleil ;
- l'existence d'une atmosphère contenant du dioxygène ; les justifications renvoient à la vie ("*Pas d'oxygène donc pas de vie*", binôme 3) ou à la fonction de respiration ("*oxygène nécessaire à la respiration des êtres vivants*", binôme 15).
- l'eau. Son rôle est en général vu comme une loi du sens commun : "*Personne ne peut vivre sans eau*" écrit le binôme 5.

Deux de ces conditions sont retenues par tous les chercheurs, à quelques différences près cependant :

- **la nécessité de l'eau** : les élèves ne précisent pas toujours son état ; les chercheurs envisagent la nécessité de l'eau liquide : eau de l'océan primitif ou eau contenant les "surfaces solides".
- **une certaine température** : chez les élèves, elle est modérée ; pour les chercheurs, des débats existent sur sa valeur (AB, 34), qui peut aller jusqu'à près de 100°C (AB, 36 ; Forterre, 1999, p. 36).

En revanche, toute la communauté scientifique s'accorde pour faire apparaître la vie dans **un environnement privé d'oxygène** (Maurel, 2002, p. 97). Si les élèves au contraire la retiennent, est-ce parce qu'ils cherchent à expliquer le maintien d'une vie telle qu'ils la connaissent ? Ou bien prennent-ils en compte son origine en considérant que les conditions de la surface terrestre étaient celles de maintenant (**steady state**), ce qui fait que ce qu'ils proposent vient de ce qu'ils connaissent d'aujourd'hui et qu'ils rapportent à toutes les époques (**actualisme d'analogie**) ?

Parmi les facteurs moins représentés dans la classe de seconde 1996/97, il en est un que nous avons rangé dans les substances nutritives et qui nous étonne : il s'agit de **la végétation**. En effet, la végétation comprend les végétaux qui sont des êtres vivants. Qu'ont voulu dire ces 3 binômes qui y recourent ? Considèrent-ils que les végétaux ne sont pas des êtres vivants ? Ont-ils raisonné seulement sur les animaux et les relations trophiques qu'ils entretiennent avec les végétaux ?

La similitude des réponses dans les deux demi-classes de seconde 1996/97 nous montre que les deux consignes ont joué un rôle équivalent : parler de "la vie" ou des "êtres vivants" revêt ici la même signification pour l'élève.

2.4. Elargissement à d'autres cas

La mise en avant de facteurs, notamment la température, l'oxygène et l'eau, se confirme d'une classe à une autre, d'un niveau à un autre (seconde et terminale S), que la consigne **ait ou non une précision temporelle**, qu'elle s'intéresse à **la vie ou aux êtres vivants**, qu'elle **exige ou non une forme de réponse** (par exemple deux ou trois éléments d'explication). A titre d'illustration, le tableau suivant rassemble les résultats de la classe de seconde étudiée, complétés de ceux d'une autre classe de seconde (année 1997/98) et d'une demi-classe de Terminale (année 1997/98) ayant eu des consignes comparables (voir figure 14.1).

Classe année	Seconde 1996/97	Seconde 1997/98	Terminale S 1997/98 demi-classe 1
nombre d'élèves	(30)	(23)	(15)
Température	26	16	11
oxygène	26	16	9
eau	20	17	13
lumière	4	2	3
substances nutritives	10	5	0
ozone	2	2	7
caractères géologiques	8	7	3
autres	2	0	2***
TOTAL	98	65	48

*** éléments chimiques (CHON ou Acides Aminés)

**Figure 14.3 : Résultats de classes de Seconde et de Terminale S
("Ce qui explique l'existence de la vie sur la Terre")**

2.5. Conclusion

Au sortir de cette étude, il se dégage la **tendance des élèves à adopter une logique de facteurs**, c'est-à-dire de paramètres (conditions physico-chimiques, substances ...) jouant un rôle sur l'objet ou le processus étudié. Il s'agit pour nous de comprendre ce que sous-tend cette tendance : est-elle due aux situations ? Concerne-t-elle le maintien de la vie mais aussi son origine ? Dans ce cas, elle corroborerait non seulement notre hypothèse que l'élève a tendance à recourir à du **vitalisme naïf et à la génération spontanée**, mais aussi qu'il existe chez lui une propension à se mettre dans un cadre stationnariste, car les conditions qu'il imagine sont celles qu'il juge indispensables à la vie d'aujourd'hui.

3. Deuxième type d'approche : une entrée directe dans l'origine de la vie

Les questions ouvertes des tests 1 et 2, basées sur *"ce qui explique la vie sur la Terre"*, nous ont paru avoir des limites : elles n'orientent pas forcément vers l'origine de la vie ; elles peuvent conduire à des réponses imprécises. Aussi avons-nous conçu le test 3 (figure 14.1), avec une entrée plus "directe" dans l'origine de la vie.

3.1. La situation de recueil de données

En 1998/99, nous avons proposé, à une classe de seconde et à une classe de Terminale S, un test identique comportant deux parties. La première partie est d'abord proposée aux élèves. Puis nous ramassons les réponses et fournissons la deuxième partie.

- La première partie comprend deux questions. La première porte directement sur l'origine de la vie, puisqu'il s'agit de *"Raconter comment les animaux et les végétaux sont apparus sur la Terre"*. La seconde, déjà posée avec ou sans variantes dans d'autres classes les années antérieures, demande aux élèves d'expliquer le fait qu'il y a des êtres vivants sur la Terre et pas sur les autres planètes du système solaire.

- La deuxième partie, présentée sous la forme d'un tableau, demande à chaque lycéen de se situer vis à vis de plusieurs items en rapport avec l'origine de la vie.

3.2. Analyse du point de vue de l'expert

La question 1 *"Racontez comment, selon vous, les animaux et les végétaux sont apparus sur la Terre"* oblige les élèves à envisager la question des origines de la vie, ce que n'impliquaient pas forcément les tests 1 et 2. Plus précisément, nous cherchons à voir de quelle manière l'élève prend en compte cette question. En utilisant les développements épistémologiques du chapitre 13, mais aussi les éléments possibles de l'espace des contraintes, voici des interrogations que nous posons a priori sur le fonctionnement de l'élève, des éléments du registre explicatif ou de modèles auxquelles elles renvoient, et des rôles du temps sous-jacents :

Interrogations de l'expert :	Hypothèses sur le registre explicatif de l'élève et les modèles qu'il peut proposer :
- Comment l'élève se représente-t-il un être vivant ?	Vie comme animation ? Organisation ? Information ?
-L'élève envisage-t-il une génération spontanée ? - Considère-t-il l'émergence de la vie comme l'aboutissement d'un processus ?	Vitalisme naïf ou mécanisme ? Evènement extraordinaire ? Evènement banal ? Phénomène ? Discontinuité (= "catastrophe de la vie") instantanée ? Avec temps long ?
Article-t-il l'émergence des êtres vivants à des conditions environnementales ? Quelles conditions environnementales ? Sont-elles différentes des conditions actuelles ?	Vitalisme naïf ou mécanisme ? Stationnarisme ou directionnalisme ? Actualisme ou catastrophisme ?
Raisonne-t-il ou non dans un cadre d'évolution des êtres vivants ? Quels types de parenté envisage-t-il ?	Fixisme ou métamorphose ou évolutionnisme ?

Figure 14.4 : Pistes pour l'interprétation des productions d'élèves (Origine de la vie)

La question 2 du test 3 correspond à la consigne du test 1 (figure 14.1). Cependant, il n'est pas là demandé deux ou trois idées d'explication. La forme de la réponse n'est pas imposée et une justification est demandée. Il s'agit de voir si les élèves produisent ou non une réponse comparable à celles d'autres élèves aux tests 1 et 2. Notons que le contexte 1998/99 est différent du contexte 1996/97, puisque nous ne travaillons pas dans le même lycée.

La question 3 vient donc après que les questions 1 et 2 sont faites et que leurs réponses sont ramassées. Les propositions sont construites sur la base d'éléments d'histoire des sciences (chapitre 13). Elle demande à l'élève de prendre position sur des affirmations qui sous-tendent des conceptions particulières. Elle propose à l'élève des possibles explicatifs : ce peut être un moyen de préciser les réponses qu'il a fournies précédemment (question 1) ; l'expert cherche un engagement plus poussé de l'élève sur le problème de l'origine de la vie et se donne la possibilité de pointer d'éventuelles contradictions ou hésitations de l'élève par rapport à la question 1.

- L'affirmation 1 admet une origine simultanée de toutes les espèces d'êtres vivants. Les différentes espèces peuvent être comprises par l'élève comme les espèces animales ou végétales, les espèces simples ou complexes. Cette origine simultanée peut correspondre à une conception "biblique" des origines avec intervention d'un être suprême créateur. L'affirmation prévue initialement : *"Un Créateur suprême a fait apparaître les êtres vivants sur la Terre"*, initialement prévue, a été enlevée pour ne pas porter atteinte aux croyances religieuses des élèves.

- L'affirmation 2 renvoie à la génération spontanée de toutes les espèces à partir de matériaux minéraux ou organiques en décomposition. Elle emprunte à certaines observations ou expériences de savants des 16^e et 17^e siècles (le chirurgien A. Paré, 1517-1590 ; le physiologiste Van Helmont, 1579 ?-1644).

- L'affirmation 3 est une restriction de la génération spontanée aux êtres vivants microscopiques. Elle s'inspire des travaux de Pouchet (1800-1872), hétérogéniste du siècle dernier, qui *"considère que la naissance des animalcules nécessite trois agents : un corps putrescible, de l'eau et de l'air ..."* (Tirard, 1996, p. 33)
- L'affirmation 4 admet que la vie est le fruit d'une évolution moléculaire dans le contexte d'un océan. Elle ne précise rien sur les caractéristiques de cet océan dans la mesure où on cherche à voir comment l'élève se positionne vis à vis du processus chimique.
- L'affirmation 5 correspond à la panspermie, théorie qui considère que la vie existe dans l'univers entier et que la Terre aurait étéensemencée par des "germes", des structures primordiales "voguant dans le cosmos".

L'objectif général est donc de "mesurer" l'importance que prend le problème de l'origine de la vie pour l'élève. Ainsi, l'émergence de la vie n'est pas un problème scientifique pour un élève créationniste. En étudiant le savoir actuel en matière d'émergence de la vie, en rappelant des jalons de sa construction, nous avons montré que plusieurs types d'explication ont existé. Sans admettre un parallélisme strict, il est raisonnable de penser que cette diversité existe chez les lycéens, sans que les types de problématisation des élèves atteignent le degré d'élaboration qu'ils peuvent avoir chez les chercheurs.

Un autre objectif est de cerner le rôle que les élèves donnent au temps : l'émergence de la vie est-elle banale ? Extraordinaire ? Improbable ? Selon quel scénario se décline-t-elle ?

* Si le processus conduisant aux premiers êtres vivants est subdivisé en étapes, on peut penser que pour certains élèves, le temps long rend possible ces étapes, si jamais elles sont jugées difficiles (par exemple parce qu'il faut la succession d'un grand nombre de réactions chimiques) ou improbables (parce qu'il faut que tous les ingrédients et toutes les conditions soient réunies au même moment en un même lieu). Le temps a alors un rôle quantitatif : **le temps long rend possible l'impossible** (voir Gould, 1982, p. 253).

* Si le processus conduisant aux premiers êtres vivants se déroule comme une histoire, il est nécessaire de réfléchir à la nature et à l'enchaînement des événements : se succèdent-ils simplement (post hoc) où sont-ils réunis dans des relations de causalité (propter hoc). L'enchaînement est-il réversible ? Irréversible ?

Enfin, il nous paraît important de repérer de quelle manière les élèves utilisent l'actuel, et quelle sorte d'actuel, dans la reconstitution de cet événement qu'est l'origine de la vie.

Intéressons-nous tout d'abord à la première question de ce test, qui est une façon de conduire chaque élève à penser les origines des animaux et des végétaux, mais également de voir comment il les situe dans un processus évolutif de la biosphère.

3.3. Premier cas : une classe de Terminale S (32 élèves)

3.3.1. Les différentes catégories construites¹¹²

En prenant appui sur l'histoire des sciences en matière d'origine de la vie (voir le chapitre 13), nous construisons 4 catégories :

¹¹² On trouvera en annexe 14 des exemples de productions d'élèves en rapport avec le problème de l'origine de la vie.

Catégorie D comme Dieu

Les réponses de cette catégorie "expliquent" l'origine des animaux et des végétaux par l'intervention d'un Créateur. Voici un exemple de réponse entrant dans cette catégorie :

"Création de Dieu" (réponse 2, complète)

Catégorie E comme Evolution

Nous mettons dans cette catégorie les réponses qui envisagent que les animaux et les végétaux descendent d'une forme vivante simple (bactérie, cellule, algue bleue). L'origine de la vie n'est pas directement envisagée. C'est le cas de la réponse 27 (réponse complète) :

"Il y a d'abord eût des bactéries unie cellulaire aquatique qui ont évoluées et ce sont différenciées.

Les êtres vivants se sont adapté à leur milieu" (réponse 27, réponse complète)

Nous plaçons également dans cette catégorie les réponses qui privilégient l'évolution des êtres vivants mais qui ne la font pas remonter explicitement à un ancêtre simple, mais plutôt à une forme aquatique pouvant être complexe (poisson par exemple). Voici une de ces réponses (réponse 26, complète), dans laquelle il est difficile de se faire une idée exacte de ces ancêtres aquatiques, mais où il apparaît nettement une filiation évolutive entre des êtres vivants aquatiques et les êtres vivants aériens :

"Les êtres vivants étaient tout d'abord présents dans les océans, où il y avait présence O₂ à ce moment là sur Terre, le taux de dioxygène était faible puis, il y eu changement du au rejet de O₂ par les êtres vivants aquatiques qui passa à 21%. et ce qui permet une couche d'ozone. Donc les animaux ont pu sortir de l'eau, tout d'abord des larves car les rayons du soleil n'étaient plus assez forts pour tuer. et donc les animaux et la végétation ont pu apparaître et se développer" (réponse 26, complète)

Catégorie C comme Conditions :

Sont regroupées dans cette catégorie les réponses qui mettent en avant le rôle déterminant de conditions terrestres dans l'émergence des premiers êtres vivants qui, par évolution ont donné des animaux et/puis des végétaux. L'origine de la vie se suffit alors de conditions environnementales clémentes. Comme pour la catégorie précédente, il y a deux façons d'envisager ces premiers êtres vivants :

- pour certains élèves, ce sont des êtres vivants simples. En voici un exemple (réponse 6, complète) :

"L'oxygène, l'eau à l'état liquide et la chaleur ont permis la naissance de bactérie primaire qui à force de mutation se sont transformée en animaux (d'abord marin) ou en végétaux."

- pour d'autres élèves, il semble que ces êtres vivants sont déjà complexes. Ce sont des végétaux pour la réponse 21 (réponse complète).

"Après une période chaude de la Terre, elle a subi un refroidissement de l'atmosphère qui a entraîné l'apparition des végétaux grâce à la présence d'eau et de l'oxygène puis d'animaux marins entraînant celle d'animaux terrestres..." (réponse 21, réponse complète)

Catégorie M comme processus Moléculaire ou assemblage de Matériaux :

Les réponses de cette catégorie expliquent l'émergence de la vie comme une conséquence de la rencontre et de l'association de molécules ou d'éléments chimiques pour donner des êtres vivants simples ou plus complexes engagés dans une évolution ultérieure. C'est le cas de la réponse 8 (réponse complète) :

"Au début un assemblage de molécule formant un être vivant (aquatique) qui par la suite aurait évolué et donc se serait transformer en être de plus en plus complexe. Les êtres aquatiques se seraient mis à ramper sur la terre ferme puis auraient encore évolués. Tout cela en se différenciant les uns des autres de par leur transformation".
(réponse 8, réponse complète)

Dans la réponse 8, les premiers êtres vivants sont sans doute simples, puisqu'il est dit qu'ils vont donner des êtres plus complexes. Pour la réponse 5 (réponse complète), les premiers êtres vivants sont des végétaux. Sont-ils simples ou complexes ?

"Il y a eu apparition des animaux et des végétaux sur terre à l'aide du Big Bang (grande explosion...) qui a alors donné des mol qui en se rassemblant on formé les végétaux et qui eux en se décomposant ont formé d'autres molécules donnant lieu aux animaux (bien sûr tout ceci d'après la science)."

3.3.2. Les résultats de la mise en catégories des réponses des élèves

Le tableau suivant récapitule la répartition des réponses des 32 élèves de la classe de Terminale S étudiée :

Catégories	Terminale S (32) 1998/99
Catégorie D : l'origine de la vie est l'oeuvre de Dieu	4
Catégorie E : l'origine de la vie est négligée au profit de l'évolution des êtres vivants	14
Catégorie C : l'origine de la vie dépend de certaines conditions	8
Catégorie M : l'origine de la vie résulte d'un assemblage de matériaux	4
Catégorie SR : Sans Réponse	2
TOTAL	32

Figure 14.5 : Mise en catégories des réponses (Terminale S 98/99, Origine de la vie)

Les différentes réponses se répartissent sans difficulté dans ces catégories, qui fonctionnent comme des catégories exclusives. Une réponse seulement, la 28, nous a demandé un examen plus attentif. La voici :

"Il y a deux visions de l'apparition des animaux et des végétaux sur la Terre. Un point de vue biblique, c'est Dieu qui aurait créé l'homme puis la femme pour qu'il ne s'ennuie pas. Les animaux sont aussi venus de sa main. Mais il y a une deuxième version les animaux et les végétaux descendraient du Big bang, lors de la formation de la Terre, et s'est après que chaque espèce aurait connu son évolution. C'est la vie qui est apparu avec les animaux et les végétaux". (réponse 28, complète)

Nous écartons la première version qui ne relève pas de la science. En ce qui concerne la deuxième version, nous hésitons entre la catégorie E et la catégorie C, voire même la catégorie M, si le Big bang fournit des matériaux. Dans l'état de cette réponse, nous retenons que le Big bang est présenté comme une condition forte de l'émergence de la vie. C'est pourquoi nous avons opté pour la catégorie C.

En termes de bilan, nous constatons que les deux tiers (22 élèves sur 32) de la classe négligent l'origine de la vie (**catégorie E**, 14 élèves soit près de la moitié de la classe) ou la rapportent à de "bonnes" conditions (**catégorie C**, 8 élèves soit un quart de la classe). Il y aurait donc une tendance de cette classe à écarter l'origine de la vie (catégorie E) ou à ne pas la prendre en compte en tant que processus (catégorie C). Nous avons voulu en savoir davantage sur le contenu des propositions des élèves : y a-t-il une vraie tendance des élèves à s'inscrire dans les catégories E et C ? Ou bien encore ont-ils été "à court" de possibles ? C'est vis à vis de ces questions que la deuxième partie du test prend du sens.

3.3.3. Affinement de l'étude des propositions explicatives des élèves

L'étude des réponses des lycéens de terminale S à la question 3, dans une interaction avec leur réponse à la question 1, doit nous permettre de préciser le poids qu'ils donnent au problème de l'origine de la vie et la façon qu'ils ont de le construire. Nous allons procéder selon une méthodologie qui permet de croiser tout ou partie des réponses à la question 1 et tout ou partie des items de la question 3.

- Dieu ou pas Dieu

4 élèves de la classe de Terminale S étudiée rendent explicitement Dieu responsable de l'apparition des animaux et des végétaux (question 1). Nous nous sommes interrogée sur la solidité de cette proposition. Aussi, avons-nous réparti les réponses à la question 1 de tous les élèves en deux ensembles : celles qui recourent à Dieu et à lui seul (4 réponses) et celles qui ne l'évoquent pas ou le suggèrent comme un autre courant de pensée (28 réponses). Puis nous avons croisé ces types de réponses à la question 1 avec les réponses en rapport avec l'item 1 de la question 3 : *"Les différentes espèces d'êtres vivants sont apparues en même temps sur la Terre"*. C'est une façon de savoir si les élèves qui mettent en jeu Dieu sont fermes dans leurs convictions, et s'ils sont de vrais créationnistes, c'est-à-dire qu'ils écartent également toute idée d'évolution des êtres vivants (J. Arnould, 1999, p. 260). Voici les résultats que nous obtenons :

Question 3 item 1 Question 1	D'accord	Pas d'accord	En partie d'accord
Evocation de Dieu	0	3	1
Pas évocation de Dieu	0	26	0
Pas de réponse	0	1	1

Figure 14.6 : Croisement "question 1/item 1 de la question 3" du test 3 (origine de la vie)

* Trois des quatre élèves mettant en jeu Dieu dans la première question ne sont **pas d'accord** avec l'idée que toutes les espèces sont apparues en même temps sur la Terre : la réponse 2 note que *"Certaines sont apparues par l'intermédiaire d'autres espèces"* ; la réponse 3 précise qu' *"Ils sont apparus peu à peu"* ; enfin la réponse 25 se positionne maintenant du côté des

sciences : "Scientifiquement parlant, il y a des espèces qui sont apparues avant d'autres, tout réside ds le développement de l'espèce qui pour apparaître nécessite plusieurs facteurs : climat, environnement..." .

Le quatrième élève (réponse 1) qui a mis Dieu en jeu **est en partie d'accord** avec l'affirmation 1 que nous proposons : "D'accord, écrit-il, mais pas complètement car certaines espèces nouvelles apparaissent".

Toutes ces réponses admettent l'apparition de nouvelles espèces au cours du temps, pour certaines (réponses 2 et peut-être 3 sur les 4 étudiées) dans une filiation avec d'autres espèces. La réponse 25 oriente assez nettement vers une émergence des espèces dépendant de conditions du milieu. Mais il est délicat d'extrapoler aux origines de la vie. **Peut-être peut-on être évolutionniste et recourir à un être suprême pour l'origine de la vie.** Ce serait faire d'elle un évènement "extraordinaire" échappant à la science.

* Pour les élèves restants (28 sur 32), nous notons que 20 d'entre eux envisagent une parenté des espèces par le jeu de l'évolution. Quatre d'entre eux précisent que les végétaux sont apparus avant les animaux.

- Mise en jeu ou non d'une réunion de molécules

Etonnée par le faible nombre d'élèves à expliquer, dans la question 1, l'origine de la vie par un processus chimique (catégorie M, 4 élèves), qui chez ceux qui y recourent consiste en un simple mécanisme de rencontre et d'association de molécules ou d'éléments chimiques, nous nous sommes demandé s'il n'y avait pas l'effet d'une carence en possibles des élèves. Aussi leur avons-nous proposé l'item 4 de la question 3 : "Le premier être vivant de la Terre s'est formé à partir de molécules chimiques contenues dans l'océan". A partir de leur réponse à la question 1, nous avons rangé les élèves en deux groupes, selon qu'ils expliquent ou non l'origine de la vie par un assemblage de molécules. Voici comment se situent les élèves de ces deux groupes vis à vis de l'item 4.

Question 3 item 4 Question 1	D'accord	Pas d'accord	En partie d'accord
Réunion de molécules (élèves M)	3 (M)	0	1 (M)
Pas de réunion de molécules évoquée (élèves D, E et C)	15 (11 E + 3 C + 1 D)	4 (3 D + 1 SR)	9 (3 E + 5 C + 1 SR)
TOTAL	18	4	10

(M) signifie appartenant à la catégorie (réunion de Molécules)

(D) (mise en jeu de Dieu)

(E) (seule mise en jeu de l'Evolution des êtres vivants)

(C) (bonnes Conditions)

Figure 14.7 : Croisement "question 1/item 4 de la question 3" du test 3 (origine de la vie)

- Les élèves ayant mis en jeu l'évolution moléculaire confirment. Un d'entre eux est en partie d'accord "car il y a aussi mélange avec d'autres mol contenus ds l'air" ; il confirme donc en enrichissant son modèle.

- Les élèves ayant mis en jeu Dieu (catégorie D) n'envisagent pas une origine par un processus moléculaire. L'élève 2, dont la réponse à la question 1 a illustré la catégorie D, écrit : *"C'est Dieu qui l'a créé"*. Seul l'élève (réponse 25), dans la catégorie D à la question 1, dans la catégorie C avec sa justification de l'item 1, se dit d'accord avec l'évolution moléculaire avec la justification suivante : *"Scientifiquement parlant c'est vrai puisque nous provenons d'un poisson qui lui-même vient de l'océan"*. Il semble passer sans difficulté de D à C à M.

- Pour les élèves des autres catégories (catégories E et C), nous remarquons qu'une proportion significative d'élèves de la catégorie E, qui envisageaient l'évolution des êtres vivants au détriment de l'origine de la vie, se range du côté d'une évolution chimique (11 élèves sur 14), le reste étant en partie d'accord. Pour les élèves de la catégorie C, nous constatons l'inverse : 5 d'entre eux sont en partie d'accord, pour des raisons diverses : ils doutent ou bien ils évoquent la nécessité d'une prise en compte d'autres facteurs, ou l'intervention de molécules de l'atmosphère ; les 3 restants étant d'accord.

A ce stade de notre étude, nous nous retrouvons avec 18 élèves acceptant une explication des origines par une "évolution moléculaire" et 10 autres enclins à le penser.

- Génération spontanée ou pas

Dans la question 1, un quart de la classe explique l'origine des animaux et des végétaux par la conjonction de conditions environnementales (température, eau, oxygène pour les plus citées) permettant l'émergence des premiers êtres vivants : ce sont les réponses de la catégorie C. Selon ces réponses, il s'agit d'êtres vivants simples (bactéries, cellules) ou plus complexes (végétaux). Nous nous sommes demandée si cette conception avait un rapport fort avec une génération spontanée de la vie, telle qu'elle est exprimée, **pour tous les êtres vivants, dans l'item 2** de la question 3, *"Tous les êtres vivants peuvent apparaître directement à partir de matière humide (boue, terre décomposée, fumier par exemple)"* et pour **les plus simples d'entre eux dans l'item 3** de la question 3, *"Les êtres vivants simples (par exemple les microbes) peuvent apparaître directement à partir de matière humide (boue, terre décomposée, fumier par exemple)"*.

De façon à repérer ou non un lien, nous avons mis les réponses à la question 1 en deux groupes définis selon qu'ils mettent ou non l'accent sur les conditions permettant l'origine de la vie. Nous avons ensuite croisé ces réponses à la question 1 aux réponses à la question 3 (item 2 et 3). Voici la synthèse des résultats :

- **Pour le croisement question 1/ item 2 de la question 3** (génération spontanée de tous les êtres vivants)

Question3Item 2 Question 1	D'accord	Pas d'accord	En partie d'accord
Conditions adéquates (C)	0 (C)	5 (C)	3 (C)
Autres (D, E, M, SR)	0	16 (3D + 9E + 2M + 2SR)	8 (1D + 5E + 2 M)
TOTAL	0	21	11

**Figure 14.8 : Croisement "question 1/item 2 de la question 3" du test 3
(origine de la vie)**

- Même si les chiffres en jeu sont faibles, les résultats de ce tableau permettent de penser une indépendance entre l'appartenance à la catégorie C et l'adhésion à l'item 2 ($X^2 = 0,04$). Autrement dit, il semble que **l'élève qui met l'accent sur les conditions permettant l'origine de la vie n'est pas plus « spontaniste » pour l'ensemble des êtres vivants qu'un autre d'une catégorie différente.**

- Les deux tiers de la classe se prononcent ouvertement contre la génération spontanée de tous les êtres vivants, le tiers restant étant en partie d'accord. Les justifications sont de plusieurs types, qui se retrouvent que l'on ne soit pas d'accord ou en partie d'accord :

* ce peut être vrai pour certains êtres vivants : les plus simples (exemples : réponses 10 et 11) ou les végétaux (exemple : réponses 20, 22 et 23) ; mais pas pour tous : sont exclus les animaux (exemple : réponses 20 et 22) ou les êtres vivants les plus complexes comme l'homme (exemples : réponses 17 et 28).

* plusieurs réponses d'élèves en partie d'accord pointent le rôle "d'autres facteurs" (réponses 7, 15, 23 et 26).

* enfin quelques réponses explicitent l'impossibilité d'une génération spontanée de certains êtres vivants. Elles font référence à la reproduction ou au mode de nutrition des êtres vivants. En voici respectivement deux exemples :

1) *"Les êtres humains, les animaux. viennent au monde par la reproduction"*, réponse 1, élève D à la question 1 ;

2) *"L'organique ne peut se formé exclusivement à partir de matières minérales (expté les plantes -> mais il leur faut une graine)"*, réponse 4, élève M à la question 1.

- Pour le croisement question 1/item 3 de la question 3 (génération spontanée des êtres vivants les plus simples)

Question3Item 3 Question 1	D'accord	Pas d'accord	En partie d'accord
Conditions adéquates (C)	5 (C)	0 (C)	3 (C)
Autres (D, E, M, SR)	14 (2D + 8E + 4M)	3 (1D + 1E + 1SR)	6 (5E + 1SR)
TOTAL	19	3	9

* l'élève 1 (D) n'a pas répondu. Sa production écrite montre les traces du gommage d'une croix mise dans la case "D'accord".

**Figure 14.9 : Croisement "question 1/item 3 de la question 3" du test 3
(origine de la vie)**

- Une **bonne proportion de la classe** (19 élèves sur 32) **admet l'idée d'une génération spontanée des êtres vivants simples. Une majorité d'élèves de la catégorie C également** (5 sur 8).
- Les élèves qui sont en partie d'accord (9 élèves sur 32) justifient par le fait qu'ils ne sont pas sûrs (réponse 12, E), que d'autres facteurs jouent (réponse 15, E), que cela ne se fait pas seulement là (réponse 32, SR), que ce n'est pas le cas de tous les êtres vivants simples (réponse 22, C) ou que ce n'est pas automatique (réponse 21, C). Enfin deux élèves (réponses 9 et 16, E) complètent par un mécanisme d'enchevêtrement ou d'interaction de molécules.
- Enfin 3 élèves ne l'admettent pas, mêmes pour les êtres vivants les plus simples (réponses 3D, 4E et 30SR). L'élève 3D ne sait pas vraiment, l'élève 4E ne porte aucune justification. Quant à l'élève 30, il écrit "*Cela ne s'est pas fait tout seul*".

Nous pensons pouvoir conclure cette étude en disant que la presque totalité des élèves se reconnaît dans une génération spontanée banale des êtres vivants simples (voire des végétaux). L'origine de la vie en est-elle une comme les autres ? Cela semble être le cas pour de nombreux élèves, parce qu'elle engendre des êtres vivants simples qui vont évoluer, parce qu'elle s'accorde avec la mise en jeu de facteurs ou parce qu'elle peut se comprendre par un processus moléculaire. Enfin, nous constatons, en étudiant les réponses à la question 1 et aux items 2 et 3, que deux élèves (D et SR) n'acceptent aucune génération spontanée.

- La panspermie

Nous savons que les chercheurs écartent pour le moment la panspermie comprise comme la venue sur Terre de germes de l'espace, via des météorites ou sous l'effet de radiations lumineuses (Maurel, 1994, p. 188). Mais ils n'écartent pas, ils jugent même parfois nécessaire (c'est le cas d'A. Brack), l'apport extraterrestre de molécules organiques.

Nous avons proposé l'item 5 de la question 3 en référence à la théorie de la panspermie : "*Des météorites (pierres qui tombent du ciel) ont apporté sur la Terre les premiers êtres vivants*".

- Les deux tiers de la classe écarte la panspermie (22 élèves sur 32).
- Le seul élève (réponse 25) d'accord ne justifie pas. Rappelons que cet élève met Dieu en jeu dans la première question, est en partie d'accord avec la génération spontanée de tous les êtres vivants, admet la génération spontanée des plus simples et conçoit la formation du premier être vivant à partir de molécules contenues dans l'océan. Nous nous demandons si tout cela ne relève pas d'un certain opportunisme.
- Dans les 9 élèves à être en partie d'accord, 6 justifient leur réponse : 3 envisagent la venue d'êtres vivants sous réserve d'une protection dans le voyage, ou d'une chute dans l'océan, ou de l'intervention d'autres facteurs ; 3 voient plutôt l'apport de matériaux ou de "*possibilité de vie*".

Nous avons recherché le degré de liaison entre la prise en compte ou non d'un assemblage moléculaire pour expliquer les premiers êtres vivants (élèves d'accord avec l'item 4) et l'adhésion à la panspermie (item 5). Pour cela, nous avons regroupé les élèves d'accord avec la panspermie avec ceux en partie d'accord : le X2 obtenu, d'une valeur de 0,86 laisse présager une indépendance entre l'option moléculaire et la panspermie.

3.3.4. Conclusion

Les réponses des 32 élèves d'une classe de Terminale S témoignent d'**une tendance spontanée** des lycéens à éluder la question de l'origine de la vie au profit de l'évolution des êtres vivants, ou alors à l'envisager en termes de conditions environnementales. Peu

envisagent un assemblage moléculaire, ce qui pourrait les rapprocher des scientifiques. Et quelques-uns ne se mettent pas dans le champ de la science puisqu'ils font intervenir Dieu. En amenant les élèves à prendre position sur quelques grandes conceptions historiques (une création initiale de tous les êtres vivants, la génération spontanée de tous les êtres vivants, la génération spontanée des plus simples, l'évolution moléculaire et la panspermie), il semble se dessiner comme une relative indépendance entre leurs réponses à une question et leur réponse à une autre : ainsi, ce n'est pas parce qu'ils mettent l'accent sur les conditions initiales dans l'émergence de la vie qu'ils adhèrent davantage à la génération spontanée. Est-ce à dire que les élèves construisent le problème de l'origine de la vie par morceaux, au gré des propositions faites ? Nous l'expliquons plutôt par la prise en compte de possibles qui les font réfléchir. C'est tout à fait différent de la problématisation des scientifiques, qui tissent un réseau de liens (articulations ou oppositions) entre les différentes options.

3.4. Le cas d'une classe de Seconde (27 élèves, 1998/99)

3.4.1. Les résultats de la mise en catégories des réponses des élèves

Nous avons retenu les 4 grandes catégories définies pour les productions écrites de Terminale S. Voici comment se répartissent les 27 réponses des élèves d'une classe de seconde.

Catégories	Seconde (27 élèves)
Catégorie D : l'origine de la vie est l'oeuvre de Dieu	0
Catégorie E : l'origine de la vie est négligée au profit de l'évolution des êtres vivants	6
Catégorie C : l'origine de la vie dépend de certaines conditions	12
Catégorie M : l'origine de la vie résulte d'un assemblage de matériaux	1
Catégorie SR : Sans Réponse	0
Réponses difficiles à classer	8
TOTAL	27

Figure 14.10 : Mise en catégories des réponses (Seconde 98/99, Origine de la vie)

Comme pour la classe de Terminale S, les catégories E et C sont les plus représentées et dans la même proportion globale de deux tiers (19 élèves sur 27).

Ce qui surprend, c'est la proportion de réponses que nous avons eu du mal à mettre dans nos catégories (7 réponses). Une étude approfondie nous permet de relever 2 éléments d'explications à cette difficulté.

D'autres explications de l'origine de la vie sont fournies. Il y a :

- **la panspermie**, c'est-à-dire la venue sur Terre d'êtres vivants en provenance de l'espace. Une réponse (réponse 19) l'envisage. En voici un extrait : *" Les végétaux sont apparus sur Terre grâce aux graines que transportait les météorites qui ont formé la terre".*

- l'existence depuis toujours de la vie sur la Terre et plus précisément une **co-construction de la Terre et de toute sa biosphère**. C'est ce qui est exprimé dans la seule réponse 26 : *"Je pense que la vie sur la terre a toujours existé. La terre s'est formée peu à peu et les animaux et les végétaux ont été formé en même temps".*

Plusieurs réponses sont mixtes :

Indépendamment de l'évolution, ces réponses expliquent l'origine des végétaux d'une manière et l'origine des animaux d'une autre manière. 7 réponses (réponses 5,6,14,18,19,21,23) soit plus d'un quart de la classe ont cette caractéristique. Les voici :

Animaux	Dieu	Evolution mise en avant	Evolution mise en avant	Evolution mise en avant	Bonnes conditions
Végétaux	Bonnes conditions	Bonnes conditions	Panspermie	Apparition naturelle	Depuis toujours
nombre d'élèves	1	2	2	1	1

Figure 14.11 : Les types de réponses mixtes (Seconde 98/99, Origine de la vie)

Il nous semble que ces réponses sont révélatrices d'une difficulté à expliquer l'origine des animaux, alors que pour les végétaux, les explications possibles semblent plus nombreuses.

Il est une réponse (la réponse 5) que nous avons d'abord eu du mal à classer. La voici : *"Selon moi, quelque graine d'herbe ou d'arbres qu'a fait la nature aurait été sous le sable et que un jour ça a poussé et au fur et à mesure du temps les petits insectes auraient apparus et donnée vie, en ce croissant (se croisant) avec d'autre, un insecte d'une autre sorte, ainsi quelque animaux marins serait apparurent des années plus tard, puis fut les oiseaux qui transporterait les graines de fleurs et qui les aurait dissimulé à d'autre endroit! Le vent aussi permet au fleur de les semés"*. Il nous semble qu'elle s'intéresse davantage à l'évolution des animaux, vue comme une reproduction et une métamorphose. L'origine des animaux (matérialisée ici par les insectes) tient aux bonnes conditions de leur subsistance (nécessité de végétaux préexistants). Quant aux végétaux, il semble exister depuis toujours à l'état de graines. Nous rangeons cette réponse dans les réponses mixtes (voir le tableau ci-dessus).

3.4.2. Affinement de l'étude des propositions explicatives des élèves

Comme nous l'avons fait pour la classe de Terminale S, nous avons croisé la réponse à la question 1 à celle fournie pour les différents items de la question 3, de façon à repérer une éventuelle cohérence qui serait un indicateur de la solidité des conceptions des élèves. Comme, dans la question 1, aucun élève n'envisage l'intervention d'un quelconque créateur, nous n'avons pas effectué le premier croisement (question 1/ item 1 de la question 3).

- Mise en jeu ou non d'une réunion de molécules

Une seule réponse à question 1 (réponse 22) envisage l'origine de la vie par une mise en jeu de molécules.

Voici cette réponse :

" Ils sont arrivés il y a des milliards d'années. se sont des molécules qui ce sont formé ce qui les a créés petit à petit puis au fil des années il se sont multipliés par centaines ce qui a donné naissances aux végétaux et aux animaux ou peut-être par le contact de l'eau et de la terre".

Cette réponse paraît mettre l'accent sur l'intervention de molécules avant d'envisager une autre possibilité. Nous avons retenu l'hypothèse moléculaire, incomplètement stabilisée semble-t-il.

Nous avons étudié le positionnement des élèves vis à vis de l'item 4 de la question 3 : *"Le premier être vivant de la Terre s'est formé à partir de molécules chimiques contenues dans l'océan"*. Cela donne :

Question 3 item 4	D'accord	Pas d'accord	En partie d'accord
TOTAL	13	4	9

Un élève ne s'est pas prononcé

Nous remarquons que la presque totalité de la classe adhère (d'accord) ou est disposée à prendre en considération (en partie d'accord) l'hypothèse moléculaire, sans cependant l'avoir proposée à la question 1 : nous trouvons des résultats comparables à ceux obtenus en Terminale S. En revanche, l'élève ayant mis en jeu des molécules dans la question 1 (réponse 22) n'est plus qu'en partie d'accord avec l'item 4 de la question. Il note : *"Je ne peux pas répondre car j'en ai aucune idées"*. Cela confirme ce que nous avions pressenti : l'hypothèse moléculaire n'est pas stabilisée.

- Génération spontanée ou pas

Nous avons distingué d'un côté les élèves pensant que l'origine de la vie tient à certaines conditions (catégorie C, 12 élèves) des autres (M, E et mixtes, 15 élèves). Voici les résultats du croisement de leur réponse à la question 1 avec l'item 2 de la question 3 (génération spontanée de tous les êtres vivants) :

Question 3 item 2 Question 1	D'accord	Pas d'accord	En partie d'accord
Conditions adéquates	0	6	6
Autres	2	9	3
TOTAL	2	15	9

Un élève du groupe "autres" ne prend pas position pour l'item 2

Figure 14.12 : Croisement "question 1/item 2 de la question 3" du test 3 (origine de la vie)

Ces résultats montrent la méfiance des élèves à l'égard de la génération spontanée **de tous** les êtres vivants. Ils montrent également qu'un élève qui met l'accent sur les conditions permettant l'origine de la vie n'est pas plus « spontaniste » qu'un autre.

Si nous mettons en jeu la seule génération spontanée des êtres vivants simples, le positionnement de la classe change, car la majorité des élèves (22 sur 27), et presque tous ceux de la catégorie C, adhèrent à la génération spontanée des êtres vivants simples :

Question 3 item 3 Question 1	D'accord	Pas d'accord	En partie d'accord
Bonnes conditions	11	0	1
Autres	11	2	2
TOTAL	22	2	3

Figure 14.13 : Croisement "question 1/item 3 de la question 3" du test 3 (origine de la vie)

Nous avons des résultats comparables en Terminale. Notons cependant que, contrairement aux Terminales, plusieurs justifications d'élèves de Seconde se rapportent à l'expérience commune. Citons quelques unes d'entre elles : *"C'est pourquoi il y a autant de microbes. Ils se forment très rapidement"* (réponse 4) ; *"Parce que ce sont des être qui sont sales et qui risque de crée des maladies par exemple la boue"* (réponse 22).

- La panspermie

L'examen des réponses à l'item 5 de la question 3 montre que, tout comme en Terminale S, les deux tiers des élèves de seconde refusent la panspermie.

Question 3 item 5	D'accord	Pas d'accord	En partie d'accord
Nombre d'élèves	3	18	6

3.5 Un bilan Seconde/Terminale

Nous mettons en comparaison, dans le tableau suivant, les résultats des mises en catégories des productions des élèves des classes de Seconde et de Terminale S étudiées.

Catégories	Seconde 27 élèves	Term. S 30 élèves	TOTAL
Catégorie D : L'origine de la vie est l'oeuvre d'un créateur	0	4	4
Catégorie E : L'origine de la vie est négligée au profit de l'évolution des êtres vivants	6	14	20
Catégorie C : L'origine de la vie dépend de certaines conditions	12	8	20
Catégorie M : L'origine de la vie résulte d'un assemblage de matériaux	1	4	5
Catégorie P : Panspermie	0*	0	0
Catégorie V : Vie depuis toujours	1	0	1
Catégorie mixte : Origine des végétaux et des animaux différente	7	0	7
Catégorie SR : Pas de réponse	0	2	2
TOTAL	27	32	59

* un élève a eu recours à la panspermie pour les seuls végétaux ; sa réponse appartient à la catégorie "mixte".

Figure 14.14 : Comparaison des mises en catégories en Seconde et Terminale S (Origine de la vie)

- En Terminale S comme en Seconde, ces résultats témoignent de la tendance des lycéens à négliger la question de l'origine de la vie au profit de l'évolution des êtres vivants ou encore à l'expliquer par la réalisation de bonnes conditions. **C'est une première forme d'écart avec les scientifiques.** Les deux niveaux se distinguent par le plus faible recours des élèves de Seconde à une explication moléculaire, et par une certaine propension de leur part à envisager différemment l'origine des animaux et des végétaux.

- L'analyse plus approfondie des données montre qu'une proposition de possibles en matière d'origine de la vie (question 3) conduit de nombreux lycéens des deux niveaux à admettre l'évolution moléculaire, la génération spontanée des êtres vivants les plus simples et à refuser

la panspermie. Comme nous l'avons déjà relevé, ceci est vraisemblablement l'expression d'**une difficulté à envisager spontanément des possibles. C'est une deuxième forme d'écart avec les scientifiques.**

- L'adhésion marquée des élèves à la génération spontanée des êtres vivants les plus simples banalise l'origine de la vie et minimise le rôle du temps : **c'est une troisième forme d'écart.**

4. Troisième type d'approche : l'origine des animaux et des végétaux

Un certain nombre de réponses d'élèves de Seconde 1998/99 ont été qualifiées de réponses mixtes en ce sens que l'origine des animaux diffère de celle des végétaux. Nous nous sommes demandée si ces résultats signalaient une réelle tendance des élèves à distinguer les animaux et les végétaux sur la question de l'origine de la vie. Cela fonde notre troisième approche.

4.1. La situation de recueil de données

Nous nous intéressons à la classe de Seconde 1999/00 (29 élèves). Le test servant de support à notre étude (voir figure 14.1, test 4, Seconde) a été proposé à une classe de Seconde. Il s'agit d'un questionnaire comprenant deux séries de questions, la première relative aux animaux, la deuxième aux végétaux. Ces deux séries sont données séparément. La première, relative aux animaux, est ramassée avant que soit faite la deuxième, relative aux végétaux. Voici l'intitulé des questions de chaque série :

Première série.

Y-a-t-il toujours eu des animaux sur la Terre ? Justifiez.

Comment expliquez-vous la présence d'animaux sur la Terre ?

Comment expliquez-vous qu'il y ait des animaux sur la Terre et pas sur Mars et Vénus ?

Deuxième série

Y-a-t-il toujours eu des végétaux sur la Terre ? Justifiez.

Comment expliquez-vous la présence de végétaux sur la Terre ?

Comment expliquez-vous qu'il y ait des végétaux sur la Terre et pas sur Mars et Vénus ?

Nous pensons que, pour chaque série, **les deux premières questions orientent vers l'origine de la vie.** La troisième question est proche de celle donnée dans la situation précédente, à la différence près qu'elle sépare le cas des animaux et des végétaux ; comme certaines versions précédentes, elle n'oblige pas à une forme de réponse particulière. A tout le moins oralement avons-nous insisté pour que tout soit bien justifié.

4.2. Une mise en catégories selon que l'origine de la vie est un problème ou non

En nous appuyant sur les réponses des élèves aux questions 1 (végétaux et animaux), nous pouvons construire trois catégories de réponses, dans lesquelles le problème de l'origine de la vie ne se pose pas de la même manière :

- Catégorie 1 : Il y a des animaux et des végétaux depuis toujours

Dans ce cas, le problème de l'origine de la vie ne doit pas se poser.

Voici deux exemples de réponses de ce type (réponses complètes) :

Question 1	Animaux	Végétaux
Réponse 8	<i>Oui, je pense qu'il y a toujours eu des animaux sur terre. Que ce soit des animaux vivants dans l'eau, sur la terre, l'air il y en a toujours eu</i>	<i>Oui, il y a toujours eu des végétaux sur terre. cela revient également à la température</i>
Réponse 18	<i>Oui il y a toujours eu des animaux. au départ ils étaient microscopiques puis au fil des années ils ont grandis. la preuve, on sait que certains animaux comme la tortue, les crocodiles, les requins existaient avant les dinosaures ainsi que d'autres espèces, mais ils étaient tous petits et vivaient dans l'eau.</i>	<i>Oui il y a toujours eu des végétaux sur terre car, ainsi que les animaux, ils se trouvaient dans l'eau et avaient une taille microscopique vu qu'à certains endroits l'eau disparaissait ils se sont adaptés à la terre (idem pour les animaux.)</i>

Nous mettons dans cette catégorie des réponses qui, si elles admettent l'existence des végétaux et des animaux, ne portent pas forcément les mêmes conceptions sur l'histoire de la biosphère. Ainsi la réponse 8 nous paraît-elle fixiste alors que la réponse 18 envisage une évolution des êtres vivants.

- Catégorie 2 : Les végétaux existent depuis toujours, les animaux sont apparus après

Il se pose alors la question de l'origine des animaux.

Voici un exemple de réponse :

Question 1	Animaux	Végétaux
Réponse 4	<i>Non, car la première chose qui c'est développé sur terre est la végétation car sans plantes et autres végétations les animaux ne peuvent pas vivre. Les plantes apportent de l'oxygène pour respirer et de l'herbe pour survivre.</i>	<i>Oui, A la création de la terre c'est ce qui a poussé en premier. Ils ont tout d'abord poussé dans l'eau et dans la terre. Il y avait aussi un peu de chaleur.</i>

Nous mettons dans cette catégorie toutes les réponses qui conçoivent qu'il y a des végétaux depuis la formation de la Terre et que l'apparition des animaux est ultérieure. Nous remarquons que, comme la réponse 4, la presque totalité des réponses de cette catégorie comprennent l'apparition des végétaux comme immédiate dès lors qu'il y a de l'eau et/ou de la terre et/ou un peu de chaleur. Une réponse admet que l'eau devait déjà contenir des végétaux

(réponse 7). Quant à l'apparition des animaux, elle est le fait de Dieu (réponse 5) ou reliée à l'évolution (réponses 1, 17, 28).

- Catégorie 3 : Il n'y a pas d'animaux et de végétaux depuis toujours

C'est à la fois l'origine des végétaux et celle des animaux qui sont à expliquer. La réponse 1 illustre cette catégorie.

Question 1	Animaux	Végétaux
Réponse 19	<i>Non, il n'y a pas toujours eu des animaux sur la terre car au début la terre n'avait pas d'oxygène et des animaux ne pouvaient pas survivre sans respirer.</i>	<i>Non, il n'y en pas tjrs eu des végétaux car il n'y avait pas d'eau et des plantes ne pouvaient pas être arrosées, "boire".</i>

Nous mettons dans cette catégorie les réponses dans lesquelles l'apparition des animaux et des végétaux ne correspond pas à la formation de la Terre. Ces réponses expriment une évolution des conditions environnementales de la Terre primitive jusqu'à ce qu'elle devienne hospitalière. Ainsi la réponse 19 n'installe pas les végétaux tant qu'il n'y a pas d'eau.

Nous remarquons qu'aucune réponse n'imagine l'apparition des animaux puis celle des végétaux.

Un bilan

Le tableau suivant rassemble les résultats de la mise en catégories pour la classe de Seconde 1999/00 :

Catégories (question 1)	Nombre d'élèves (sur 29)
Catégorie 1 : Il y a des animaux et des végétaux depuis toujours	12
Catégorie 2 : Il y a des végétaux depuis toujours, les animaux sont apparus après	8
Catégorie 3 : Il n'y a pas d'animaux et de végétaux depuis toujours	9
TOTAL	29

Figure 14.15 : Mise en catégories des réponses des élèves de Seconde 99/00 (prise en compte ou non d'une origine des animaux et des végétaux)

Nous constatons qu'il y a une distribution relativement équitable des réponses dans chacune des catégories. Pourtant une remarque s'impose :

En prenant en considération les réponses des élèves à la question 1 mais aussi à la question 2, nous remarquons que les catégories établies précédemment se recoupent, qu'il y a un recouvrement partiel de certaines. On peut avoir par exemple une réponse qui affirme qu'il y a par exemple des végétaux depuis toujours, et qui ne fait pas forcément l'économie d'une prise en compte de l'origine de la vie (question 1 et/ou question 2) ; elle envisage souvent une sorte

de "démarrage précoce de la vie", ce qui incite à la replacer dans les catégories 2 et 3. Les deux réponses suivantes illustrent cela :

Y-a-il toujours eu des végétaux sur la Terre ? Justifiez	
Réponse 8 = réponse "oui" : <i>Oui, il y a toujours eu des végétaux sur Terre. Cela revient également à la température</i>	Réponse 12 = réponse "non" : <i>Non, au tout début la chaleur était telle que rien ne pouvait pousser sur la terre quand l'atmosphère et les océans ont commencé à se former la vie a été possible</i>
Comment expliquez-vous la présence de végétaux sur la Terre ?	
<i>Les végétaux sont indispensable à la vie animale et humaine. La présence des végétaux sur Terre s'explique grâce à l'eau et la chaleur. Les végétaux ont poussés.</i>	<i>Grâce à l'eau les végétaux ont put se développé et colonisé tous les milieux.</i>

En fait, nous obtenons la même explication environnementale de l'origine des végétaux. Ce qui semble distinguer ces deux réponses, c'est le fait que l'élève 8 ne fait pas évoluer les conditions de surface de la Terre, ce que fait l'élève 12 : admettre qu'il n'y a pas de la vie depuis toujours, c'est admettre que la Terre a évolué jusqu'à pouvoir héberger la vie. C'est donc l'expression d'un certain directionnalisme (voir le chapitre 2).

Cela nous conduit à revoir notre première mise en catégorie de façon à mieux comprendre le rapport des élèves à l'origine de la vie.

4.3. Une deuxième mise en catégorie des réponses des élèves

Nous avons repris les grands types de catégories établies avec les tests 98/99 (voir le paragraphe 3.3.1) : D (comme Dieu), C (comme Evolution), C (comme Conditions), M (comme Matériaux), P (comme Panspermie). Avec la classe de Seconde 99/00, les résultats que nous obtenons, en prenant en compte les questions 1, sont les suivants :

Animaux Végétaux	Dieu	Conditions	Evolution	Matériaux	Autres. Ex : Panspermie	Pas d'indication
Dieu						
Conditions	1		17			3
Evolution			4			
Matériaux			2			
Pas d'indication			2			
			25			

**Figure 14.16 : Mise en catégorie des réponses des élèves de Seconde 99/00
(catégories D, C, E, M, P)**

4.4. Discussion

Ces résultats montrent nettement que **les élèves ne prennent pas le problème de l'origine de la vie de la même manière pour les végétaux et pour les animaux**. En effet, pour la majorité des élèves :

- l'origine de la vie des végétaux est rapportée à de bonnes conditions, initialement présentes ou qui se sont réalisées à un moment de l'histoire de la Terre primitive. Il n'y a pas loin à penser que ce type d'explication de l'origine des végétaux relève d'une **génération spontanée des végétaux** dès lors que les conditions sont bonnes et sans qu'il faille nécessairement beaucoup d'ingrédients. Plus précisément, nous pensons que ce type d'explication traduit la conjugaison d'un **vitalisme naïf et d'une conception de la vie comme animation**. C. Orange (1994, 1997) et M. Goix (1996) l'ont déjà souligné pour beaucoup d'élèves : *"La vie ou la croissance, ou le mouvement, sont des phénomènes vitaux qui vont donc de soi chez les êtres vivants (mouvement pour les animaux, croissance pour les plantes et les animaux). Cela nécessite seulement de bonnes conditions et, en particulier, une alimentation en principes actifs. Ces phénomènes n'ont donc pas à être expliqués par un mécanisme ou une organisation mais simplement justifiés par leur environnement ou leur entretien, par exemple par de l'"énergie" ou des substances nutritives"* (C. Orange, 1997, p. 135). Les résultats que nous obtenons permettent d'**étendre à l'apparition de la vie** ce que ces auteurs ont constaté pour le développement et la croissance. En conséquence, si telle est l'approche de la vie chez les lycéens, notamment celle des végétaux, leur origine ne doit pas faire problème : de bonnes conditions environnementales et nutritionnelles suffisent pour leur apparition et leur maintien.

- l'origine des animaux est expliquée dans leur inscription dans une chaîne évolutive mais sans que la formation de ces maillons initiaux soit toujours expliquée. Dans un certain nombre de réponses (13 réponses sur les 24 qui envisagent une chaîne évolutive des animaux), cette chaîne évolutive commence par des êtres vivants simples (bactéries ou êtres vivants microscopiques). Lorsque justification il y a, elle est comparable à celle que nous obtenons pour les végétaux : ces formes simples sont apparues dès lors que certaines conditions environnementales étaient remplies. En voici un exemple (réponse 19) : *" La terre, à un moment, c'est remplie d'oxygène et d'eau, et de microscopiques bactéries sont installées se qui a donné la vie à des animaux (d'abord des poissons, reptiles qui allaient ds l'eau"*. L'évolution des animaux à partir d'une forme simple règle le problème de leur origine. Il est difficile de penser leur création tant ils sont gros et sophistiqués ; pensons-là pour leur ancêtre vu comme une forme simple et peu exigeante. Pour ces formes simples, on retrouve vraisemblablement l'expression d'un vitalisme naïf conjugué à une conception de la vie comme animation.

Cette difficulté à expliquer l'émergence des animaux se traduit dans d'autres formes de réponses :

- une élève (réponse 5) rapporte l'origine des végétaux à de bonnes conditions alors que celle des animaux est le fait de Dieu.
- Pour trois élèves, rien n'est dit de l'apparition des animaux (réponse 2, 4, 8). Pour deux d'entre elles, nous savons seulement que les animaux apparaissent après les végétaux, l'émergence de ces derniers étant tributaire de bonnes conditions. La troisième réponse est la réponse 8 (voir plus haut), qui affirmait que les animaux et les végétaux existent depuis toujours. Elle précise, en rapport à la question 2, que *"la présence des végétaux s'explique grâce à l'eau et la chaleur"*. Elle se place donc sur le registre des bonnes conditions. Quant à

la présence des animaux, elle la comprend dans son utilité au travail et à l'alimentation de l'homme. Et elle conclut ainsi : *"La présence des animaux sur terre est inexplicable"*.

Enfin, ces réponses interrogent sur le statut que donnent les élèves aux animaux et aux végétaux. Les réponses montrent que très peu d'élèves imaginent une évolution des végétaux (4 réponses sur 29), alors que 25 sur 29 pensent l'inscription des animaux dans une chaîne évolutive. Il y aurait donc une tendance à penser l'apparition des végétaux comme des êtres vivants immuables. Pour les animaux, une étude plus approfondie des réponses montre une orientation de la chaîne évolutive vers un sommet évolutif représenté par l'homme.

4.5. Conclusion

L'analyse des réponses de cette classe de seconde aboutit à l'idée que les élèves n'expliquent pas de la même manière l'émergence des végétaux et celle des animaux.

- Il y a une tendance immédiate des élèves à expliquer la vie et son apparition **par des conditions environnementales**. Nous obtenons inmanquablement ces conditions, que nous les sollicitons fortement ou pas, que nous nous placions ou non dans le contexte de l'origine de la vie. Ce caractère général et invariant des réponses appuie l'idée que les élèves sont sur du vitalisme naïf.
- L'origine des végétaux pose moins de problème aux élèves que celle des animaux : ils la rapportent à une génération spontanée dès lors que les conditions sont bonnes. Nous pensons que cela traduit un vitalisme naïf et une conception de la vie comme animation. Un tel type d'explication confère à **l'origine des végétaux une certaine banalité et peut se faire en un temps court**.
- Mais il est difficile aux élèves de penser l'origine des animaux. Une façon qu'ils ont de s'en sortir est de placer les animaux dans une chaîne évolutive de complexité croissante. **Le maillon initial, simple, peut souffrir d'une explication en termes de bonnes conditions**.

5. Quatrième type d'approche : la problématisation de l'origine de la vie

Prenant en compte le constat que l'origine de la vie ne fait pas nécessairement problème pour les élèves, nous nous sommes demandée comment aller plus loin et tenter de repérer des indices de leur problématisation. C'est pourquoi nous avons fait quelques entretiens d'élèves : deux entretiens avec des élèves de Terminale S (Sophie/Vincent et Gaël/Kévin), un entretien avec deux élèves de Seconde (Céline et Caroline).

5.1. Etude des transcriptions d'entretiens d'élèves de Terminale S (1999/00)

5.1.1. Le contexte de l'entretien en Terminale S (1999/00)

Avant d'entamer la grande partie du programme de Terminale S intitulée *"Histoire et évolution de la terre et des êtres vivants"* (M.E.N., 1992, T.II), nous avons soumis les élèves de la classe étudiée à une évaluation diagnostique dont le support est le test 4 (figure 14.1, test 4, colonne Terminale S).

L'intitulé du test précise qu' *"A un moment donné, il n'y avait pas encore d'êtres vivants sur notre planète"*. Il demande aux élèves d'expliquer le plus précisément possible ce qui s'est passé entre le moment où il n'y avait pas d'êtres vivants et le moment où les premiers êtres vivants ont existé sur la planète.

Bien que nous ayons demandé aux élèves d'expliquer le plus précisément possible l'origine de la vie, nous obtenons des réponses très similaires à celles de 1998/99. Nous avons donc repris les catégories déjà utilisées en 1998, en Terminale et en Seconde.

Catégories	Terminale S (22) 1999/00	Terminale S (32) 1998/99 pour comparaison
1. L'origine de la vie est l'oeuvre de Dieu	0	4
2. L'origine de la vie est négligée au profit de l'Evolution des êtres vivants	6	14
3. L'origine de la vie dépend de certaines Conditions	6	8
4. L'origine de la vie résulte d'un assemblage de Matériaux	3	4
5. Panspermie	4	0
6. Vie depuis toujours	1	0
7. Mixte	1	0
8. Pas de réponse	1	2
TOTAL	22	32

Figure 14.17 :
Mise en comparaison des réponses des élèves de deux classes de Terminale S
(Origine de la vie)

La répartition des élèves en catégories est plus éclatée pour cette classe 99/00 que pour la classe 1998/99.

Nous avons demandé à 4 élèves de prolonger le test 4 par un entretien avec le professeur. **Chaque entretien réunit deux élèves.** Il est fait quelques jours après la passation du test écrit.

Les élèves donnent leur accord pour l'entretien. Ils sont choisis selon la catégorie à laquelle ils appartiennent par leur test écrit. Il y a les deux binômes suivants :

- le binôme constitué d'un élève (Vincent ou V), qui n'a pas fourni de réponse écrite, et d'une élève (Sophie ou S), dont la réponse écrite met en avant l'importance des conditions environnementales dans l'origine de la vie (catégorie C).
- le binôme constitué d'un élève (Gaël ou G) pour lequel l'origine de la vie résulte d'un assemblage de matériaux (catégorie M) et d'un élève (Kévin ou K) qui fait intervenir des conditions environnementales (catégorie C).

Nous tentons de construire **l'espace de contraintes des élèves**. Les questions que nous posons visent d'abord **une explicitation** des réponses écrites quand elles existent, ou une recherche des raisons qui font qu'il n'y a pas de réponse écrite ; ces questions veulent ensuite pousser l'élève à préciser **ses appuis empiriques** et **les possibles/impossibles** qu'il envisage. Nous pensons en effet que les impossibles sont la contre-empreinte d'une **nécessité**. Enfin, il y a des questions permettant de sonder **le registre explicatif implicite** de l'élève : ainsi quand nous lui demandons si l'émergence de vie est encore possible, nous cherchons à savoir s'il retient, et de quelle manière, l'idée d'une génération spontanée.

5.1.2. Méthodologie d'étude des transcriptions

Nous étudions et interprétons les propos des élèves dans une logique de construction d'un espace des contraintes. Cela nous conduit à repérer :

- les éléments constituant leur registre empirique : quels faits, phénomènes, évènements prennent-ils en compte dans leur explication ou cherchent-ils à expliquer ?
- l'organisation de leur registre des modèles : que jugent-ils possible ou impossible ? Des impossibilités qu'ils signalent, nous pensons pouvoir lire en négatif les nécessités sur le modèle qu'ils construisent. Nous plaçons dans ce registre les contraintes théoriques (règles en rapport avec le problème qu'ils se donnent).
- le registre explicatif implicite dans lequel ils raisonnent : sont-ils animistes, vitalistes, mécanistes ? Sont-ils fixistes, transformistes, évolutionnistes ? Sont-ils catastrophistes ou actualistes ? Quelle conception ont-ils de la vie et des êtres vivants ? Sont-ils « spontanistes » ou non ?

5.1.3. Etude de la transcription de l'entretien de Sophie/ Vincent (Annexe 15)

- **Vincent** n'a pas rendu de réponse écrite : *"je sais que c'est difficile et de toutes façons on n'a pas de réponse (...) j'ai pas les données qui me permettent d'avoir un raisonnement"* (V, 6)¹¹³.

Au cours de l'entretien, Vincent développe une explication dans laquelle il admet qu'il y a une chaîne évolutive des êtres vivants, du type êtres aquatiques évoluant en êtres vivants terrestres (V, 10, 27). Il dit : *"je sais comment, concrètement, comment une bête aquatique a pu se transformer en, en être, en humain au bout de sa chaîne, quoi!"* (V, 10), mais aussi *"je comprends pas comment un être vivant peut en devenir un autre"* (V, 10), ce que nous comprenons comme une difficulté de clarifier le mécanisme de l'évolution.

Cela n'empêche pas Vincent d'être conscient du problème de l'origine de la vie. Il l'exprime quand il nous dit que s'il a déjà du mal à expliquer l'évolution des êtres vivants, il lui est impossible de comprendre *"comment une cellule, parce qu'on peut parler d'une cellule, ça a dû, je pense que ça doit être ça au départ, a pu se transformer en être vivant avec des... matières, enfin..."* (V, 10). Derrière ces propos, il semble qu'il y a **la nécessité d'une première forme vivante cellulaire** (*"je pense que ça doit être ça au départ"*). Et plus loin dans l'entretien, lorsqu'il s'interroge au sujet d'une apparition encore possible d'êtres vivants, nous comprenons que ce ne sont pas des cellules banales qui sont en jeu (V, 204, 210), mais plutôt des cellules **particulières**, des *"cellules comme ça qui soient radicalement différentes..."* (V, 210). De plus, nous comprenons qu'il y a également **la nécessité d'une formation de cette première forme cellulaire**. Vincent ne le dit pas explicitement mais il donne une solution possible à la formation de cette première cellule, que nous identifions par des expressions du type *"On peut..."* (V, 39), *"ont pu"* (V, 45), *"ça aurait peut-être pu"* (V, 49). Cette solution consiste en une rencontre de particules de nature différente (V, 10, 43, 45, 57, 210) aboutissant à la formation d'une cellule : *"On peut supposer que l'ensemble de ces particules de nature différente ait pu, je sais pas constituer XXX une cellule (rires) je sais pas du tout, ..."* (V, 43). Vincent propose donc une solution se rangeant dans la catégorie 4 où l'origine de la vie résulte d'un assemblage de matériaux. Mais il le fait non sans questions : *"Et après je sais pas comment ils se sont rencontrés!"* (V, 47). Enfin, une troisième nécessité peut être dégagée de ce qu'il dit en comparant la Lune et la Terre : **c'est la nécessité d'une préservation de la vie émergente**. Pourquoi n'y a-t-il pas d'êtres vivants sur la Lune (V, 63) ? La réponse de Vincent n'exclut pas une apparition de la vie sur la Lune (V, 71), mais

¹¹³ (V, 6) : V comme celui qui parle, ici Vincent ; 6 comme le numéro de l'intervention. On trouvera en annexe 15 la transcription de l'entretien.

l'impossibilité à maintenir cette vie : *"y-a pas d'atmosphère, ... y-a rien pour protéger les êtres vivants"* (V, 67).

Vincent met en jeu un registre empirique et un registre explicatif particuliers :

- Les deux premières nécessités construites (premières formes vivantes faites de cellules particulières, formation de ces cellules) sont en rapport avec ce qu'il connaît des cellules et des êtres vivants. Vincent définit les êtres vivants de la façon suivante : *"Tout être vivant, moi je pense que c'est quelque chose qui contient un **programme génétique** (...) Avec **des fonctions** et puis... qui peut se déplacer par exemple, qui peut se reproduire, ça c'est un être vivant."* (V, 33). Une cellule répond à cela, elle se multiplie (V, 35) et se nourrit (V, 37). Dans les développements qu'il fait, Vincent met davantage l'accent sur les fonctions que sur l'information génétique. Il nous semble qu'il est sur une conception de la vie comme organisation (Canguilhem). Cette première forme de vie pourrait ressembler au **phytoplancton**, compris comme des êtres vivants simples aquatiques (V, 25, 27). Il y a en arrière plan sa représentation de l'évolution dont nous avons déjà vu les caractéristiques, à savoir une transformation d'êtres vivants aquatiques en êtres vivants terrestres (V, 10, 27). Plus loin dans l'entretien (V, 301, 309), Vincent envisage des possibles de différenciation à partir d'une cellule souche : *" y-a une cellule souche qui se met à se différencier en deux sortes, végétale et animale. Je serai plus pour ça"*(301). Et il précise : *"Y-en a une qui s'est différenciée en végétal et après y-en a ... celle qui s'est différenciée en végétal s'est différenciée encore en végétal ou en animal"* (V, 309). La troisième nécessité (préservation de la vie émergente) est mise en rapport avec l'existence d'une atmosphère (V, 65).

Vincent propose une solution en rapport avec la deuxième nécessité (formation de première formes cellulaires) : c'est un mécanisme de fourniture et d'association de matériaux mettant en jeu un registre empirique toujours d'actualité : **les météorites** qui passent (V, 41, 45, 57) dispersent des particules ; la Terre peut capter ces matériaux avec tous les **systèmes d'attraction** (V, 57). Ces apports existent encore aujourd'hui : *" ça se passe encore au niveau des étoiles filantes"* (V, 55), *"On reçoit des météorites tous les jours"* (V, 59), même s'ils sont plus réduits (V, 55) ; tout comme le mélange de particules mais il n'arrive pas à son terme à cause des activités humaines : *"ça dérange la création de nouveaux êtres vivants comme ça sauf vraiment dans les zones où y-a vraiment peu d'activités humaines qui, qui puisse y avoir des développements pareils"* (V, 208) et il donne un exemple de localisation possible, sous terre, dans les zones inaccessibles (V, 210, 216). Vincent **n'exclut donc pas une émergence actuelle de la vie**.

Pour Vincent, l'émergence de la vie n'est donc pas un événement extraordinaire. Tentons maintenant dans un schéma d'esquisser l'espace des contraintes de Vincent (figure 14.18).

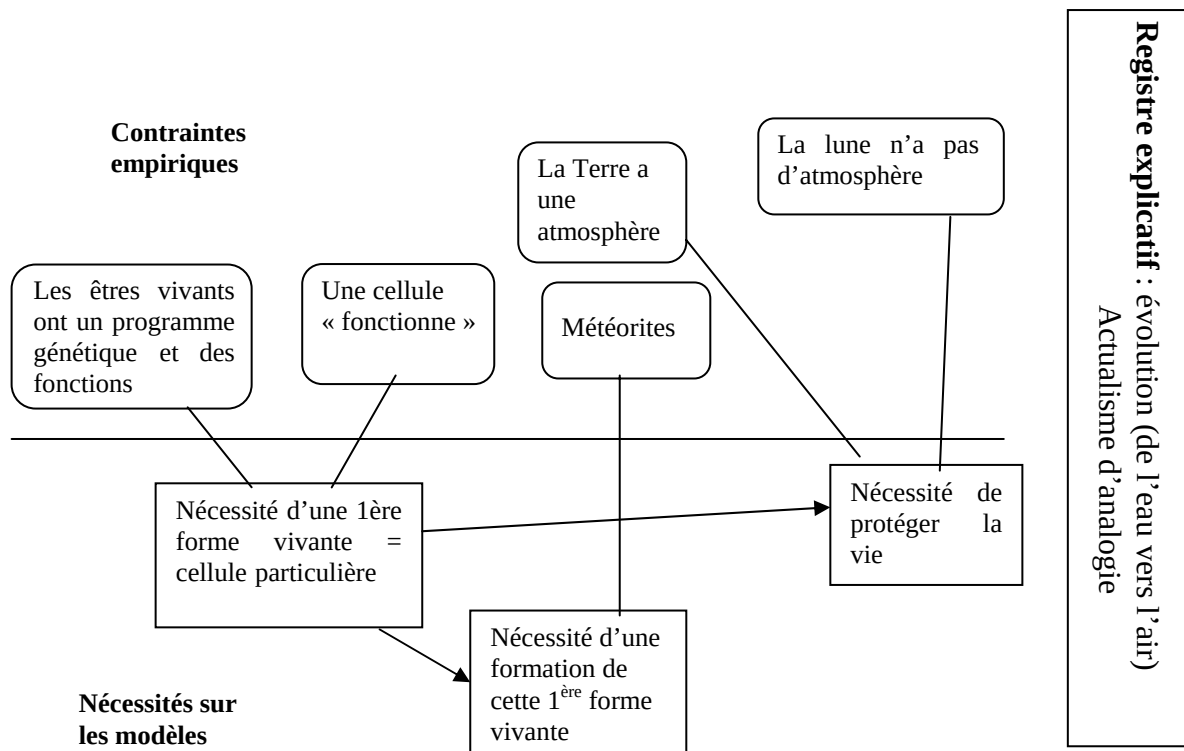


Figure 14.18 : L'espace de contraintes de Vincent

- **Sophie** a fourni une explication écrite (annexe 15) que nous avons classée dans la catégorie C (Conditions) où l'origine de la vie dépend de **conditions particulières**. En effet, selon cette élève, la présence d'eau, de chaleur, et d'air permettent la formation d'êtres unicellulaires engagés ensuite dans un processus de "développement", qui peut être compris comme une évolution. Voici sa réponse :

"- *Présence d'eau, de chaleur, d'air*

-> *formation d'êtres unicellulaires, des protozoaires grâce aux conditions*

-> *développement d'être plus élaborés comme les bactéries"*

Sophie complète sa réponse écrite de questions. Celles qui concernent directement l'apparition de la vie sur la Terre portent sur la présence ou non de végétaux dès le début de l'existence de la Terre, l'influence des types climatiques sur la forme des êtres vivants qui sont apparus et la possibilité d'une panspermie.

Dans l'entretien, Sophie dit d'abord quelle *"n' imagine pas la Terre sans êtres vivants, c'est-à-dire sans des végétaux, des choses comme ça parce que ça aussi c'est des êtres vivants..."* (S, 81). Et là, les questions lui viennent qui l'amènent à penser qu'il est impossible qu'il y ait eu des végétaux depuis toujours, donc qu'il y a eu un moment où il n'y avait rien car la terre primitive *"devait être un peu comme une bouillie"* (S, 93), avec des enveloppes non différenciées, de l'eau un peu partout, et des mouvements de matière dégageant de la chaleur. Par cette évocation du fonctionnement de la Terre primitive, Sophie construit **la nécessité d'une formation des végétaux**. L'importance des végétaux traverse tous ses propos. Pour elle, il est impossible que les animaux soient apparus d'abord : *"Je pense pas que c'était des êtres vivants comme nous, quoi enfin des bêtes quoi. C'était plus des, des*

végétaux parce que les végétaux ils se nourrissent de minéraux ". Et elle nous dit qu'il n'y avait que cela au premiers temps de la Terre, or les êtres vivants comme nous ne *"peuvent pas se nourrir de terre donc ils se seraient nourris des végétaux et ce serait ça qui aurait favorisé leur apparition"* (143). Par ses appuis sur les modes de nutrition des êtres vivants, autotrophie des végétaux et hétérotrophie des animaux, Sophie est plus précisément sur **la nécessité d'une formation préalable des végétaux**.

Quand il s'agit de préciser ce que sont ces premières formes végétales vivantes, Sophie, tout en reconnaissant qu'*"il peut y avoir des êtres vivants à une seule cellule"* (S, 117), dit sa réserve à l'assimiler à une seule cellule, car elle pense qu'*"une cellule toute seule, c'est pas un être vivant"* (S, 117). Sophie met en tension les propriétés d'une cellule et les propriétés d'un être vivant : pour elle, et elle se réfère aux cellules de la peau, (S, 117, 121), une cellule est un élément d'un ensemble ; elle a une spécialité, elle peut se reproduire, mais *"elle a pas de destin"* (S, 121). Sans les cellules alentour, elle n'est rien. Un être vivant a comme une cellule une fonction mais il peut fonctionner tout seul (S, 121, 123). Il nous semble que Sophie sort de cette tension en proposant la solution des protozoaires (Sophie veut vraisemblablement parler de prothalle). Cette solution est déjà présente dans sa réponse écrite et elle la développe dans l'entretien : *" Et les fougères c'est, oui, c'est les petites graines, elles sont protozoaires et après elles deviennent... Ca m'avait.... Et c'est ça en fait qui m'est, qui m'est revenu parce que comme moi j'imagine les débuts de la Terre..."* (S, 137). Ce que nous comprenons à partir de cette solution, c'est que Sophie n'imagine pas un monde végétal initial fait de gros végétaux. En filigrane, elle dit l'impossibilité d'une apparition de gros végétaux et donc **la nécessité d'une émergence de petits végétaux**. Enfin, il y a dans les dires de Sophie son incrédulité à imaginer un processus moléculaire conduisant à ces premiers végétaux : *"Pourquoi, pourquoi est-ce qu'il y-a des choses, des trucs qui se sont assemblés pour faire, pour faire ça, quoi. C'est.. Ca paraît un peu incroyable, quoi."* (S, 160). Alors que Vincent a développé cette idée, elle résiste à admettre ce *"bricolage biologique"* (S, 162, 166). En arrière plan, il y a **la nécessité d'une émergence de la vie autrement que par une rencontre de matériaux**. Sophie lie fortement cette émergence des premiers êtres vivants aux conditions du milieu. Elle dit par exemple qu'elle s'est faite quand les conditions terrestres sont devenues plus hospitalières (S, 93, 103), et même que plusieurs versions sont apparues, en rapport avec des variations régionales de ces conditions (température et ressources variables selon les points de la Terre, S, 266). Dans ce contexte explicatif, il est intéressant de savoir si Sophie pense que l'émergence de la vie peut encore avoir lieu. Elle nous dit qu'elle *"pense qu'il y a des végétaux qui peuvent se former encore comme on le disait tout à l'heure ... des nouvelles bactéries aussi..."* (S, 238). Sophie banalise donc l'émergence de la vie et elle confirme son étroite dépendance aux conditions environnementales. Ce qui se forme est adapté aux ressources du milieu. C'est ainsi qu'elle conçoit une création actuelle de bactéries notamment *"par rapport à notre nouvelle présence sur Terre"* (S, 250). Aux premiers temps de la Terre, seule la création des végétaux était possible parce qu'il n'y avait des ressources que pour eux. Ces propos sont cohérents avec sa vision de l'évolution des êtres vivants, qui elle également se fait par rapport au milieu : Sophie comprend *"que ça ait évolué parce que y-a eu des besoins qui sont apparus"* (S, 176) ; à propos des bactéries, elle admet qu'elle peuvent évoluer, s'adapter au fait qu'on est là (S, 250). C'est une conception lamarckienne de l'évolution.

Voici l'espace des contraintes que l'entretien de Sophie nous permet de construire (figure 14.19).

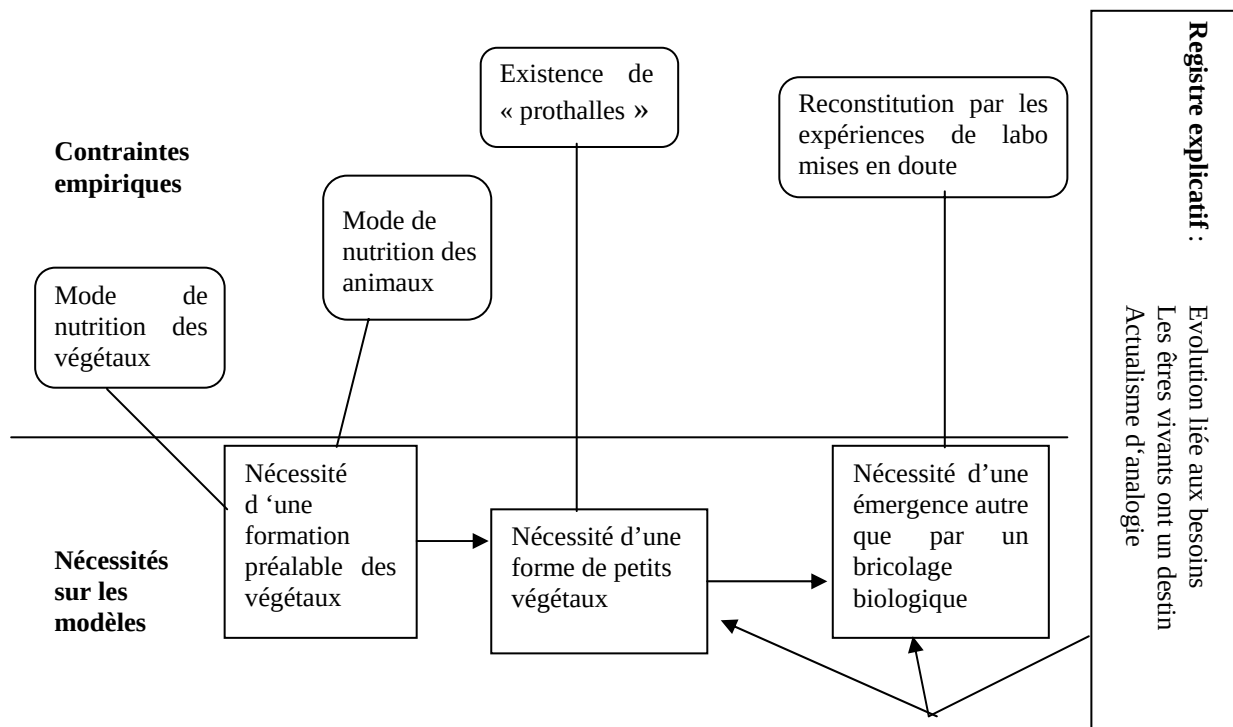


Figure 14.19 : L'espace de contraintes de Sophie

5.1.4. Etude de la transcription de l'entretien de Kevin/ Gaël (Annexe 16)

Kevin a fourni une réponse écrite (annexe 16) dans laquelle il lie l'émergence de la vie à l'évolution des **conditions régnant à la surface de la Terre** (catégorie C comme Conditions). Il y eut un moment où les conditions atmosphériques *"ne permettaient pas de donner vie à des êtres vivants"*. Puis il y eut un moment où elles furent telles que *"la bactérie apparut"*, bactérie engagée ensuite dans un développement qui donnent des végétaux, puis des poissons, les reptiles et enfin les mammifères et les oiseaux.

Dans l'entretien il rappelle ce point de vue (K, 14), en précisant ses difficultés à le construire par organisation de petits bouts de souvenirs (K, 10). D'ailleurs il dit qu'avant l'entretien, il a un peu regardé son manuel de SVT (K, 12). Intéressons-nous aux compléments qu'il apporte à sa réponse écrite. Kevin insiste sur le fait que s'il n'y avait pas d'êtres vivants au début, c'est *" parce qu'il y avait pas d'oxygène à la surface de la terre"* puis il y a eu *"une évolution je sais pas, peut-être chimique qui a fait que du dioxygène est apparu à la surface de la Terre"*. (K, 28, 36). Kevin construit **la nécessité de la présence atmosphérique d'oxygène** pour qu'il y ait émergence de la vie. Il fonde cette nécessité sur des éléments du registre empirique : un registre empirique actuel, quand il met en relation l'oxygénation de l'air et **la respiration des êtres vivants** (K, 42, 48, 83, 144) et quand il évoque **les échanges gazeux entre l'air et l'eau** (52) ; un registre empirique témoin du passé quand il fait référence à **des roches**, qu'étudient peut-être les chercheurs, dont l'analyse montre que l'atmosphère de leur époque de formation n'était pas respirable (K, 159, 161).

Mais il y a d'autres nécessités construites par Kevin. L'une d'elle apparaît quand nous l'interrogeons sur la possibilité d'une émergence actuelle d'êtres vivants. Kevin convient que, d'après de qu'il pense (l'air contient de l'oxygène), c'est possible (K, 93, 99, 122) mais il est gêné : *"... je sais pas, ça voudrait dire qu'on aurait de nouvelles formes animales tout, à chaque fois que ça se ferait quoi. Je sais pas en fait là"* (K, 99). Et il nous dit pourquoi : *"je*

sais pas, on voit tout le temps les mêmes animaux. Je veux dire y-a pas trop d'évolution au niveau des animaux." (K, 101). Nous nous demandons s'il n'y a pas dans le raisonnement de Kévin l'idée d'impossibilité d'avoir en même temps plusieurs chaînes évolutives d'êtres vivants. Or, une nouvelle émergence de la vie, c'est le démarrage d'une nouvelle chaîne évolutive. Dire qu'on voit tout le temps les mêmes animaux, c'est vraisemblablement penser qu'on est dans la même chaîne évolutive. D'autres propos de Kévin consolident notre interprétation. Quand nous lui demandons si l'émergence de la vie ne s'est pas faite qu'une fois, il dit qu'il y a eu *"une deuxième fois"*, avec la disparition des dinosaures (K, 83). Il reconstitue le scénario de cette deuxième fois, qu'il met en fonctionnement actuellement : tout commence par l'écrasement d'une météorite d'un certain diamètre, à l'origine d'une modification de l'air, et, *"avant qu'il y ait d'autres êtres vivants (...) y-aurait un certain nombre d'années qui se passerait (...) à cause de l'air qui serait plus respirable, donc la vie impossible pour, que ce soit les végétaux ou les animaux "* (K, 83). Nous comprenons que, pour l'élève Kévin, la météorite a rendu l'atmosphère irrespirable et en conséquence fait table rase de la vie. D'où sa propension à admettre alors **une deuxième émergence**. En résumé, nous pensons que Kévin exprime **la nécessité d'une seule chaîne évolutive en "marche", en rapport avec une seule origine**. Les développements qu'il fait précisent les filiations dans cette chaîne : bactérie puis végétaux puis poissons et reptiles et enfin mammifères et oiseaux (K, 14, 54) ; il réaménage ces filiations car il *"trouve difficile de passer du végétal au poisson"* (K, 193) et se retrouve bien dans l'idée que la bactérie aurait donné du plancton animal et du plancton végétal à l'origine respectivement des animaux et des végétaux (K, 311). Est-ce à dire que cela remet en cause notre interprétation d'une seule chaîne évolutive en cours ? Nous ne le pensons pas, cela la ramifie mais le buisson évolutif a toujours une seule origine. Enfin Kévin nous donne sa vision des processus évolutifs : il met en jeu une complexification des formes vivantes par des multiplications cellulaires (K, 177, 179, 199). Cela sous-tend **une troisième nécessité** qui est l'impossibilité d'une émergence directe d'êtres vivants (animaux ou végétaux) complexes, que l'on peut traduire par celle d'une émergence d'une forme initiale simple. Kévin la décline en une solution qui prend la forme d'une bactérie, être vivant unicellulaire et microscopique (K, 18). L'espace de contraintes de Kévin est sur la figure 14.20.

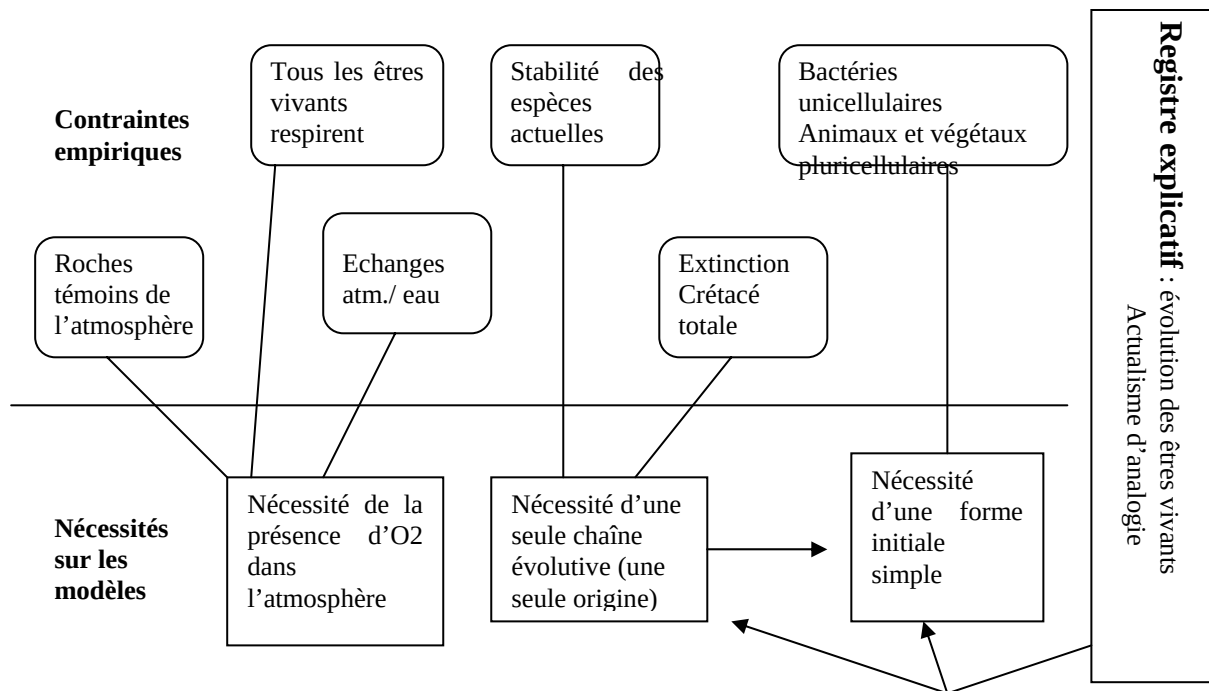


Figure 14.20 : L'espace de contraintes de Kévin

- **Gaël**, dans sa production écrite (annexe 16), se place d'emblée sur une explication de l'origine de la vie par assemblage de matériaux (catégorie 4). Voici sa réponse :

"Mélange de matières (origines volcaniques) et gaz (H₂S) + eau (mer) + certains acides aminés (pas sûr). peut-être pour certains d'origine extraterrestre et arrivé par les météorites - --> premier être unicellulaire qui s'est divisé etc..."

Nous retenons la précision des "ingrédients" qu'il met en jeu, ainsi que leurs sources, et notons qu'il s'interroge sur le mécanisme du "mélange".

Dans l'entretien, Gaël commence par se situer par rapport à Kévin : *"j'avais fait ce qui y'avait un peu avant, c'était comment arriver à un organisme unicellulaire"* (G, 201) et il redonne sa version moléculaire de l'origine de la vie, avec des précisions supplémentaires en termes de caractéristiques des premières formes vivantes (G, 207, 209), de mécanisme permettant leur obtention (des réactions chimiques, G, 205).

Il nous semble que Gaël est sur l'explicitation d'une solution en rapport avec des nécessités du modèle de l'origine de la vie qu'il nous faut retrouver.

Une nécessité "masquée" semble être **celle d'une première forme vivante simple**. Comme Kévin, Gaël pense que les premiers êtres vivants sont unicellulaires (G, 201) et il les voit bien dans la forme d'une bactérie, qui *"serait l'organisme le plus simple possible"* (G, 207), *"juste une cellule avec un noyau, avec de l'ADN dedans, avec un cytoplasme, avec ... Je sais pas, tout ce qui a avec"* (G, 209). Il admet une évolution ultérieure de ces bactéries, voici comment : *"Elle se divise, il y en a plusieurs puis qui se redivisent, qui se redivisent, (...) y-a sûrement au bout d'un moment des modifications de l'ADN et puis y-a une bactérie qui va commencer à être un peu différente (...) Et puis à force de modifications peut-être qu'on va obtenir des organismes qui vont ... qui vont se faire de plusieurs cellules, lors de la division au lieu de se séparer, elles vont rester ensemble."* (G, 271) Gaël imagine l'évolution comme

une complexification cellulaire mais aussi comme des mutations de l'information génétique. Il y a derrière l'idée d'une vie comme organisation et comme information (Canguilhem).

Gaël nous parle plusieurs fois du mélange à l'origine de l'émergence de la vie (G, 201, 203, 240, 247, 310). Ce qui le tracasse, et qui revient dans son propos de manière récurrente, ce sont ses questions sur les ingrédients, le nombre d'étapes du processus, leur nature et leur chronologie. Ainsi, par exemple, il n'est pas trop sûr qu'il faille des acides aminés (G, 240), il se demande si cela ne s'est pas fait d'un seul coup ou peut-être en plusieurs étapes (G, 249). Gaël cherche donc des solutions à un incontournable du modèle de l'origine de la vie qui serait **la nécessité d'un mélange de matières**.

Enfin, Gaël n'exclut pas que l'émergence de la vie puisse se refaire : "*c'est difficile de savoir*" (G, 251) mais "*c'est pas impossible*" (G, 254). Et quand nous lui demandons pourquoi il est difficile de le savoir, il répond que "*ça passe plus inaperçu*" qu'au début (G, 253). Si ce n'est pas impossible actuellement, c'est selon lui parce que des conditions sont remplies pour que le mélange puisse se faire. C'est le cas de l'eau : "*ça devait sûrement être nécessaire à la formation de la bactérie*" (G, 265). Devons-nous envisager une troisième **nécessité**, à savoir celle **de conditions propices** ? La figure 14.21 tente de représenter l'espace de contraintes de Gaël.

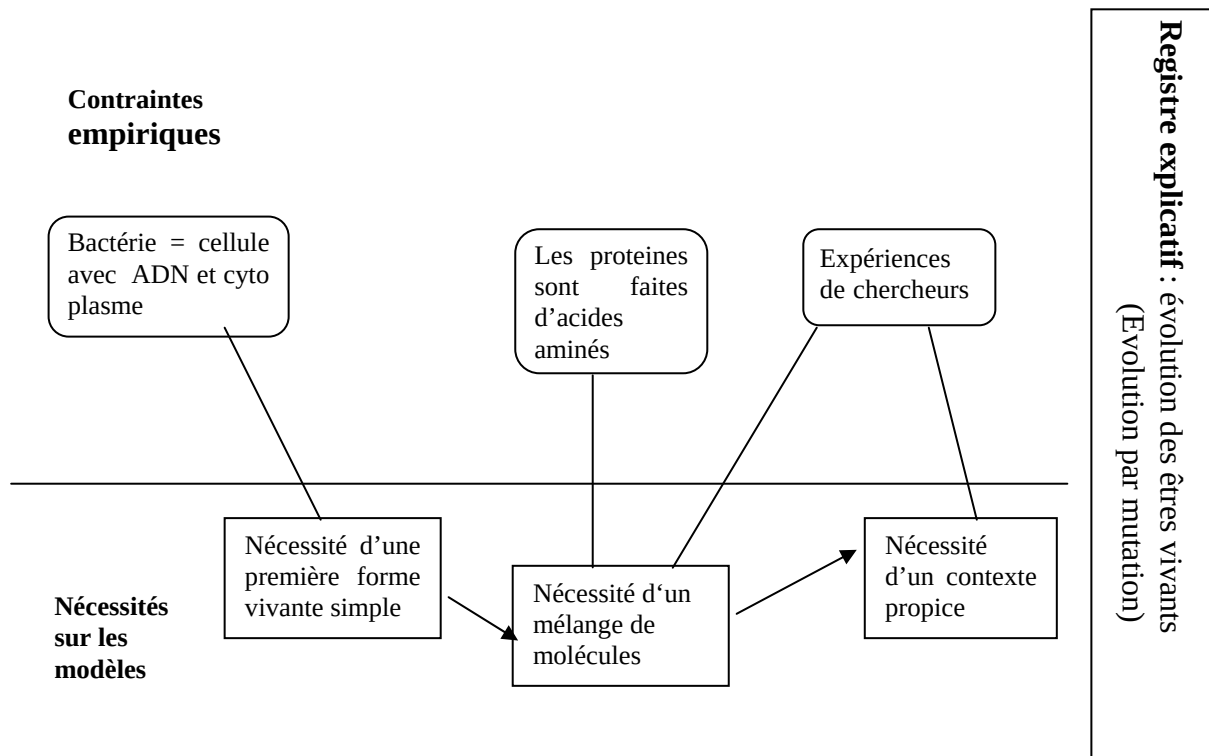


Figure 14.21 : L'espace de contraintes de Gaël

5.1.5. Conclusion

Ces entretiens confirment la distinction, pour certains élèves, du problème de l'origine des animaux de celle des autres êtres vivants. Ils peuvent envisager une origine "simple" des végétaux ou d'êtres vivants unicellulaires, ils ne le peuvent pas pour les animaux, d'où l'inscription de ces derniers dans une chaîne évolutive.

Ces entretiens montrent également qu'il y a chez les élèves **une banalisation** de l'origine de la vie qui se fait de deux manières :

- l'adhésion à l'idée que la vie émerge encore (Vincent, Sophie, Gaël). Si Kévin se démarque, c'est parce qu'il ne conçoit pas le "fonctionnement" simultané de plusieurs chaînes évolutives.
- la conception que l'apparition de la vie engendre des êtres vivants simples (cellule particulière, forme initiale simple, phytoplancton, petits végétaux, ...), peu exigeants en termes de besoins. Nous constatons que ces conditions servent davantage le fonctionnement des êtres émergents que leur formation proprement dite (milieu avec de l'oxygène et respiration). Et ces besoins sont ceux des êtres vivants actuels (actualisme d'analogie appliqué au fonctionnement des êtres vivants).

Enfin la problématisation engagée par les lycéens montre non seulement de grandes différences avec le(s) espace(s) de contraintes des chercheurs (chapitre 13, figure 13.4) mais également d'un élève à un autre.

Nous notons que des réponses écrites d'élèves mises dans la même catégorie masquent **des problématisations différentes**. Les réponses écrites de Kévin et de Sophie appartiennent à la catégorie C ("L'origine de la vie dépend de certaines Conditions") or les problématisations qu'engagent ces élèves sont sensiblement différentes (figures 14.19 et 14.20). Il en est de même pour Gaël, dont la production écrite est mise dans la catégorie M ("L'origine de la vie dépend d'un assemblage de Matériaux") et de Vincent, qui n'a pas rendu de production écrite, mais dont le discours montre qu'il envisage des rencontres de particules. D'autre part, nous remarquons combien les registres explicatifs peuvent être différents. Le cas de Sophie est significatif.

Enfin, force est de constater que **le temps n'intervient quasiment pas**, à part peut-être chez Gaël, lorsqu'il s'interroge sur le processus moléculaire conduisant à la vie, ou encore lorsqu'il parle de l'évolution des bactéries.

5.2. Etude des transcriptions d'entretiens d'élèves de seconde (1999/00, Annexe 17)

Suite à la passation du test écrit (test en deux parties : une partie portant sur les végétaux, une partie concernant les animaux, figure 14.1, test 4, à gauche), nous avons demandé à deux élèves de la classe de seconde 99/00 de nous accorder un entretien. Ces deux élèves ont été choisies parce qu'elles admettent qu'il y a de la vie depuis toujours (ce que ne pensent pas les scientifiques) et parce qu'elles ne construisent pas la même histoire de la biosphère :

- Céline, redoublante, semble être fixiste : la biosphère a été de tous temps comparable à ce qu'elle est actuellement.
- Caroline envisage une évolution des êtres vivants à partir d'une forme initiale simple.

5.2.1. La construction du problème de l'origine de la vie chez Céline

Céline rappelle dans l'entretien ce qu'elle a écrit pour le test (réponse 8, 99/00, annexe 17) : pour elle, il y a toujours eu des animaux et des végétaux sur la Terre. Elle n'imagine pas la planète sans eux vraisemblablement parce qu'elle n'arrive pas à situer dans le temps un début de la vie et à se le représenter (Cé, 5). Elle répète cette difficulté (Cé, 18, 58, 109). Écoutons-la : *"y-a pas de début. Moi, j'arrive pas à le trouver le début, le point de départ, comment*

c'est venu"(Cé, 18) ou encore *" Enfin, pour moi, y-a eu un début mais ... c'est comme l'infini"* (Cé, 109).

Dans le courant de l'entretien, Céline nous dit sa façon de raisonner. Elle procède en remontant le temps : *"J'essaie de ve... de nous et puis de remonter un peu en arrière"* (Cé, 20) et elle trouve *"tout le temps des personnes mais à un moment (...) A un moment, ça doit s'arrêter"* (Cé, 34).

En fait, les végétaux lui posent moins de problèmes que les animaux : elle est sûre qu'ils ont toujours existé (Cé, 26). Mais à réfléchir au cours de l'entretien sur leur origine, elle dit que c'est plus simple (Cé, 218) et elle conçoit que de bonnes conditions permettent leur démarrage tout en se posant le problème de l'origine des graines : *"avec la pluie, avec le temps, tout ça donc, je sais pas, ça aurait pu pousser. Mais avec quoi ?"* (Cé, 164) ; une solution serait leur transport par le vent (Cé, 170, 180).

Le cas des animaux est d'un règlement moins aisé. Elle se réfère souvent à **la reproduction sexuée** et dit l'impossibilité d'avoir un être vivant sans parents : *"... les animaux, je sais pas comment ... Parce qu'il faut qu'il y ait une reproduction mais pour qu'il y ait une reproduction, faut déjà qu'il y ait ... qu'il y ait eu ... Faut toujours qu'il y ait quelque chose en fait!"* (Cé, 26). Elle prend surtout l'exemple de l'espèce humaine : *"C'est comme nous, pour qu'on ait, pour qu'on ait pu être là, c'est que derrière bon, y-a eu nos parents"* (Cé, 28) ou encore *" Un homme et une femme ... Bon, ben des ... Un couple qui ont fait des enfants et bon ben après ça continue .."*(Cé, 64). Et elle transpose cela au passé : au début, *"ben je pense je pense qu'il y avait des hommes, des femmes et puis bon, ben, après, ils ont essayé de vivre comme ils pouvaient. Et, ils sont, ils se sont reproduits"*, (Cé, 134). Lorsque Caroline donne l'hypothèse des bactéries, Céline s'interroge encore sur ce qui les précède : *" pour que ça naisse, il faut bien qu'il y ait eu quelque chose avant qui les aide à naître."* (Cé, 126)

Reprenons le raisonnement de Céline. Si dès le début, elle conçoit qu'il y a des hommes, c'est qu'elle se place dans un cadre fixiste. Alors que Caroline parle d'évolution des êtres vivants, Céline dit son impossibilité à envisager une certaine évolution : *"Pour moi, j'arrive pas à m'imaginer bon ben que les animaux comme le singe ont pu après faire que ça devienne un homme ..."* (Cé, 90) ; et plus loin dans son propos, nous trouvons : *"Qu'il y a eu quelque chose de très petit qui après a poussé mais c'est vrai que l'évolution, bon, ben, on a du mal quand même à se l'imaginer"* (Cé, 212). La seule évolution qu'elle envisage naturellement est celle des modes de vie selon les mentalités (Cé, 134). Enfin il semble que la représentation que se fait Céline de la Terre primitive, avec une masse continentale unique qui s'est disloquée (*"y-avait par exemple un gros bloc de terre et le reste d'eau"* Cé, 307), s'accorde avec sa vision fixiste des espèces : de tous temps, la Terre a offert aux êtres vivants des milieux terrestres et aquatiques.

En résumé, Céline entend le problème des origines comme celui de l'évolution mais elle dit son impossibilité à les construire. A tout le moins concède-t-elle à la discussion la nécessité d'une antériorité de l'origine des végétaux sur celle des animaux : les végétaux peuvent vivre sans les animaux mais la réciproque n'est pas vraie (Cé, 160, 153). La figure 14.22 tente de représenter l'espace de contraintes de cette élève.

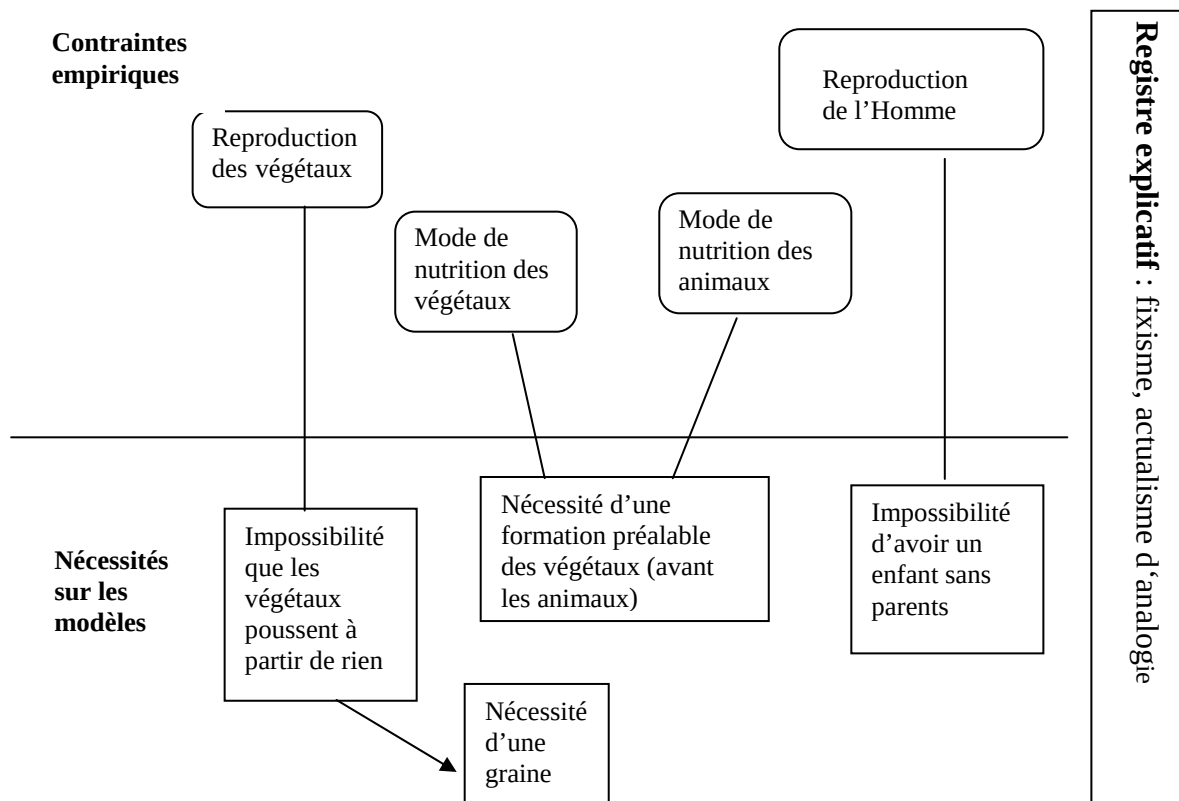


Figure 14.22 : L'espace de contraintes de Céline

5.2.2. La construction du problème de l'origine de la vie chez Caroline

Dans sa réponse au test (réponse 18, 99/00, annexe 17) Caroline écrit qu'il y a toujours eu des animaux et des végétaux sur la Terre : au départ, ils étaient microscopiques et aquatiques, et, au fil des années ils ont grandi et se sont adaptés au milieu aérien (Ca, 2, 14, 124, 187, 191). Dans l'entretien, Caroline reprend cette façon de voir pour les animaux, et confirme que les formes primitives sont des bactéries : "...je sais pas si c'est la vérité mais en fait c'était sous forme de bactéries au départ et... ben... ben.... elles ont grandi..." "... je sais pas, sous forme de bactéries quoi en fait puis en fait après sont devenues des poissons et comme par exemple les ... j'ai vu dans un musée les amphibiens tout ça puis après comme y'avait moins d'eau, ils sont venus sur terre et ben voilà mais je sais pas si..." (Ca, 14, 187). Contrairement à Céline, Caroline se place dans un cadre évolutionniste lamarckien où des êtres microscopiques se transforment au cours du temps en êtres vivants plus gros, plus complexes, et même en êtres vivants aériens quand l'eau s'est raréfiée. Mais elle a des difficultés à envisager la véritable origine des bactéries. Quand nous lui posons la question de cette origine, elle pense d'abord aux végétaux (Ca, 201) puis à l'eau (Ca, 203), avant de montrer son embarras (Ca, 206). Pour ce qui est des végétaux, Caroline ne reste pas sur la position qu'elle tient à l'écrit (une origine bactérienne). A entendre ce que dit Céline des végétaux, qui seraient issus de graines, elle remet en doute ses écrits (Ca, 225) : "j'avais marqué que c'était pareil (que les animaux), mais en réfléchissant, c'est peut-être, oui c'est peut-être, son idée n'est peut-être pas mauvaise non plus" et elle se met à fonctionner comme Céline, en se référant à ce qu'elle connaît de la germination actuelle (actualisme d'analogie). Voici ce qu'elle dit : "une graine, ou je sais pas,

avec l'eau oui c'est sûr que même nous une graine de fleur, on met dans la terre et puis on l'arrose, et puis ça peut pousser. Donc pourquoi pas comme ça ? Mais d'où viennent les graines ? (Ca, 229) Nous comprenons de tout cela que Caroline n'adhère pas fermement à une origine bactérienne et une évolution des végétaux. Cependant, et comme Céline, Caroline a du mal à concevoir une origine végétale à partir de rien (Ca, 229). Caroline dit également l'impossibilité qu'ont les animaux à se maintenir sans végétaux (Ca, 157, 159). Nous pensons retrouver dans son écrit cette idée, quand elle explique la présence d'animaux sur la Terre (question 2) : elle note qu'au début de la Terre, les animaux étaient représentés par des bactéries aquatiques et *"de plus dans l'eau, il y avait de la végétation un peu comme du plancton"*. Enfin, il est une autre impossibilité qui émerge de son discours : celle d'avoir autrefois des êtres vivants comme ceux que nous connaissons, car la surface de la Terre était différente : *"c'était pareil (sur la Terre primitive), y'avait des végétaux et des êtres vivants. Mais peut-être pas pareil, je sais pas (...) c'est pas le même monde en fait"* (Ca, 250). Plus loin elle précise en décrivant une Terre primitive recouverte partout d'une pellicule d'eau, sans continents individualisés (Ca, 303). Caroline semble donc établir des relations entre l'évolution de la Terre et celle des êtres vivants.

En définitive, nous retenons des propos de Caroline la difficulté qu'elle a à construire le problème de l'origine des êtres vivants. A tout le moins nous semble-t-elle construire la nécessité d'une formation préalable des végétaux, la nécessité d'une origine "matérielle" de ces végétaux, enfin celle d'une biosphère initiale différente de l'actuelle.

6. Conclusion

Sur le problème de l'origine de la vie, qui ne leur est pas familier¹¹⁴, les explications des élèves se démarquent nettement de celles des chercheurs. Nous en reprenons ici quelques points forts :

6.1. Chez une majorité d'élèves, il y a une banalisation de l'origine de la vie

Cela se traduit par l'adhésion à la génération spontanée des êtres vivants simples (parties 3 et 3 de ce chapitre) ou encore par la mise en jeu d'un vitalisme naïf (partie 4 de ce chapitre). Spontanément les élèves ont donc tendance à faire de l'émergence de la vie terrestre **un phénomène** alors que les chercheurs actuels construisent un événement (chapitre 13).

6.2. Les élèves, comme les chercheurs, recourent à l'actualisme avec cependant des différences

Les élèves mobilisent **un actualisme de 1er niveau (actualisme d'analogie)** plutôt en rapport avec le fonctionnement d'un organisme ou d'une cellule (respiration, nutrition, reproduction), dans une conception de la vie comme organisation, ou encore en rapport avec les relations qu'entretiennent les êtres vivants actuels (relations trophiques dans les écosystèmes). Les chercheurs se placent au niveau moléculaire, en intégrant aussi la conception de la vie comme information. Cet actualisme de 1er niveau conduit les élèves à imaginer des conditions environnementales de l'émergence de la vie proches de celles que nous connaissons (une atmosphère avec de l'oxygène notamment). Tout se passe comme s'ils installaient la Terre, depuis qu'elle porte des êtres vivants, dans un **steady state**

¹¹⁴ Ce qui est moins le cas pour les problèmes de fonctionnement d'un océan par exemple (voir chapitre 4).

atmosphérique et hydrosphérique. Nous avons vu que les chercheurs construisent l'idée d'une atmosphère primitive différente de l'atmosphère actuelle.

Les élèves utilisent-ils pour ce problème **l'actualisme de 2^e niveau** ? Cela paraît **peu probable** quand nous nous intéressons à leur conception de l'évolution des êtres vivants, souvent ramenée à une chaîne évolutive où intervient la métamorphose de formes vivantes en d'autres formes vivantes. Kévin (Terminale S) écrit par exemple que : *"à partir de la bactérie par développement de celle-ci vinrent les végétaux, puis les poissons, les reptiles et enfin les mammifères et les oiseaux"*. Dans ces conditions, les élèves ne construisent pas le temps long de l'évolution des chercheurs. Or, c'est là que ces derniers mobilisent l'actualisme de 2^e niveau.

6.3. Les problématisations des élèves sont très différentes de celle(s) des chercheurs

Les entretiens d'élèves sur le problème de l'origine de la vie permettent d'avoir des informations sur leur construction du problème de l'origine de la vie. Nous sommes conscients que des approfondissements sont à faire de ce point de vue. Nous remarquons cependant que, d'une part, les espaces de contraintes peuvent varier sensiblement d'un élève à un autre (partie 5 de ce chapitre), et d'autre part, que les écarts avec le(s) espace(s) de contraintes des chercheurs (voir la figure 13.4 pour un exemple) sont d'ordre quantitatif (l'espace de contraintes des scientifiques est très fourni) mais également d'ordre qualitatif. C'est ce que nous constatons pour le registre empirique par exemple ; c'est ce que nous entrevoyons pour le registre explicatif.

SYNTHESE

Chapitre 15

MISE EN PERSPECTIVE ET COMPARAISON DES TROIS ETUDES

Sommaire

1. Diversité des problèmes du point de vue de l'utilisation du temps
2. Les difficultés des élèves
3. Diversité et décalages dans les utilisations du temps : trois études de cas
4. Conclusion

Nous cherchons dans ce chapitre à comparer et à mettre en perspective, du point de vue des utilisations du temps, les cas que nous avons étudiés. Dans un premier temps, nous en resterons au savoir savant actuel, puis nous étudierons les écarts que présentent les explications des élèves avec ce savoir. Enfin, nous nous intéresserons aux productions de quelques élèves qui ont participé, sur deux années scolaires, aux différentes situations que nous avons mises en place ; ce sera une façon d'approfondir la compréhension des décalages d'utilisation du temps.

1. Diversité des problèmes du point de vue de l'utilisation du temps

1.1. La reconstitution du passé d'un océan

Dans un contexte de fonctionnement "de routine" d'un océan, ce qui exclut le problème de son origine ou de sa fin, la reconstitution d'un fond océanique à différentes époques de son passé demande aux scientifiques de prendre en considération conjointement deux types de processus : la dérive et l'accrétion des fonds basaltiques qui déterminent sa superficie ; la sédimentation s'exerçant en surface sur toute la superficie disponible. Les deux types de processus ont la caractéristique d'être continus dans le temps et de marquer le temps par de l'espace, dans la mesure où leurs effets respectifs s'ajoutent à leurs effets antérieurs : chaque nouvelle bande de fond basaltique se juxtapose à celle qui vient de se faire ; chaque pellicule sédimentaire surmonte celle qui vient de se produire. Mais dérive/accrétion et sédimentation **ne marquent pas le temps dans la même direction de l'espace** : les deux premiers processus le marquent horizontalement ; le troisième le marque verticalement. D'autre part, chaque référentiel de temps n'a pas le même type de repère : pour les deux premiers processus, l'axe de la dorsale représente l'âge le plus récent ; pour la sédimentation, c'est toute la surface du fond océanique à un moment donné qui représente l'âge le plus récent des sédiments. On le voit, l'enjeu de la reconstitution d'un fond océanique ancien exige donc **de penser conjointement deux types de processus** liés chronologiquement au temps, synchrones mais avec des caractéristiques spatio-temporelles différentes.

Pour cette reconstitution à une époque plus ou moins reculée, le géologue extrapole un phénomène actuel : il met en jeu de l'**actualisme d'extrapolation**. Cet actualisme a plusieurs caractéristiques qui le distinguent de l'actualisme de 2^e niveau :

- il est employé dans le fonctionnement d'un même domaine (exemple : l'océan).
- il étire dans le passé un (ou des) phénomène(s) actuel(s) (exemple : l'expansion océanique, la sédimentation) dont l'homme perçoit le déroulement, alors que l'actualisme de 2^e niveau construit un (des) nouveau(x) phénomène(s) imperceptible(s) pour l'homme (exemple : l'émersion d'un fond océanique).
- comme le raisonnement auquel il conduit est le même sur une année ou sur 1 million d'années, on peut dire qu'il n'exige pas qualitativement **le temps long**.

En définitive, l'actualisme d'extrapolation est une variante de l'actualisme d'analogie. Bien que la reconstitution du passé d'un océan relève de la géologie historique, sa construction, qui utilise l'actualisme d'extrapolation, le ramène à **un problème de la géologie fonctionnaliste**.

1.2. L'évolution de la zone d'une dorsale

A se placer toujours dans le contexte de fonctionnement "de routine" d'un océan, la zone d'une dorsale évolue en renouvelant ses matériaux tout en restant **structurellement stable**. Par le jeu compensé de la dérive des plaques et de l'accrétion, tout change et pourtant tout reste pareil. Le temps n'est donc pas un repère.

L'enjeu pour comprendre l'évolution dans le temps de la zone d'une dorsale et construire la stabilité structurelle, c'est donc **paradoxalement parvenir à éliminer le temps**. Mais il semble en effet que ce ne soit pas simplement la mise en jeu dans l'avenir des processus de dérive et d'accrétion qui suffisent à écarter le temps, c'est plus précisément l'action de translater une portion de passé contenant les processus de dérive et d'accrétion sur un futur "géologiquement vide". Paradoxalement on constate qu'un raisonnement séquentiel faisant jouer alternativement dérive et accrétion peut permettre d'approcher l'idée de stabilité structurelle.

Prévoir l'état de la zone d'une dorsale plus tard dans le temps (une année, un million d'années...) demande donc d'extrapoler son fonctionnement actuel qui est perceptible à l'homme, vers le passé et vers le futur : comme le problème précédent, ce problème entre dans le cadre de la **géologie fonctionnaliste** et il met en jeu de l'**actualisme d'extrapolation**.

1.3. Le problème des ophiolites

Les ophiolites correspondent à un assemblage particulier de roches magmatiques que l'on trouve au sein de nombreuses chaînes de montagnes. Leur explication, dans le cadre théorique de la tectonique des plaques, repose sur l'**analogie** qui existe entre ces formations rocheuses et la constitution lithologique des fonds océaniques actuels : il s'agirait donc d'une lithosphère océanique ancienne dont il faut comprendre la position actuelle atypique. Alors que les scientifiques peuvent se représenter la formation de fonds océaniques en étudiant le fonctionnement d'une dorsale actuelle (**actualisme d'analogie**), ils leur est impossible de suivre "en direct" le charriage de lambeaux océaniques sur une bordure continentale. Malgré cela, ils convoquent l'actuel qu'ils font fonctionner mentalement sur du temps long pour construire un nouveau phénomène (l'obduction) imperceptible par l'homme : c'est ce que nous qualifions d'**actualisme de 2^e niveau**. Certaines données océaniques actuelles sont interprétées comme des "images" éparpillées d'un film très long : l'espace actuel devient du temps long, qualitativement producteur de phénomènes.

Chez les scientifiques, la construction du problème des ophiolites utilise donc l'actualisme d'analogie et l'actualisme de 2^e niveau. **D'une part elle n'a pas besoin du temps**, lorsqu'il est question de transposer un fonctionnement actuel de dorsale à un quelconque moment du passé ; mais **d'autre part**, elle est étroitement associée à **la construction de la nécessité du temps long**, qui en quelque sorte rend possible l'impossible.

C'est dans la construction de la nécessité du temps long, contre le catastrophisme de premier niveau, que paraît se situer le véritable enjeu de la compréhension des ophiolites.

1.4. Le problème de l'origine de la vie

Les chercheurs actuels comprennent l'origine de la vie comme **un évènement terrestre "unique"** : elle s'est produite dans une fourchette de temps précise de l'histoire de la Terre, dans un contexte précis de la Terre primitive. Ils confèrent à cet évènement une certaine probabilité de se faire, certains le considérant même comme inévitable. Un premier enjeu dans la compréhension de ce problème est d'en faire **un évènement** terrestre, par nature singulier dans le temps et l'espace, et **non un phénomène**, derrière lequel on chercherait des régularités.

L'explication de l'émergence de la vie est délicate :

- il n'y a aucune trace directe de cette émergence.
- la possibilité de recourir à l'actualisme semble devoir être écartée (évènement "unique").
- elle laisse la place à **la contingence**, ce qui la met dans un rapport particulier au temps. Comme un certain nombre de chercheurs ne lui reconnaissent pas une probabilité de survenue totale, l'évènement qu'est l'origine de la vie aurait pu ne pas être. A rembobiner l'histoire, dans une expérience de pensée, et à la redescendre, on n'est pas sûr d'obtenir la vie. Parce que l'origine de la vie est prise comme un évènement accompli, on recherche **ses conditions de possibilités, vues comme des nécessités de l'histoire** ; mais à réemprunter le cours de l'histoire, ces conditions ne sont plus que des conditions nécessaires mais pas suffisantes de sa survenue.

Pourtant les chercheurs proposent des explications : elles reposent sur des scénarios moléculaires où **le temps joue des rôles complexes, qualitativement et quantitativement..** Reprenons quelques aspects de la complexité du temps développés dans notre recherche : il est possible que la contingence ait sa place dans le scénario moléculaire ; si l'émergence de la vie et ses "préparatifs" peuvent se faire dans du temps géologiquement court, ils se situent au-delà du temps long de l'évolution des êtres vivants. En termes d'utilisation de **l'actualisme**, nous remarquons qu'il intervient, **dans tous ses niveaux** : actualisme d'analogie et de 2^e niveau pour se représenter les êtres vivants primordiaux, actualisme d'analogie "de laboratoire", actualisme d'analogie "de terrain" terrestre et extra-terrestre (repérage et étude des fumeurs noirs, exploration de planètes et de satellites naturels).

1.5. Conclusion

- Il y a une variété et une complexité d'utilisation du temps en géologie.

Les problèmes que nous avons choisis d'étudier recouvraient a priori une multiplicité des temps (chapitre 4). L'étude épistémologique confirme cela, en éclairant et en précisant la complexité des utilisations du temps et de l'actualisme dans les explications, au sein d'une même explication, ou d'une explication à une autre.

- Notre étude repose sur quelques cas. Cela ne suffit pas pour prétendre avoir fait une exploration exhaustive des utilisations du temps dans les explications. On peut par exemple

remarquer que la mise en jeu du **temps cyclique**, qui a sa place dans le cadre théorique de la tectonique des plaques et dont on peut reconnaître la fonction heuristique dans l'histoire de la géologie (Hutton, de Beaumont), est ici peu présente. Cela tient vraisemblablement à la limitation temporelle et spatiale de nos exemples. C'est une façon de dire que nous avons initié une recherche qui pourrait se prolonger dans le cadre de ces mêmes domaines mais aussi dans d'autres domaines.

2. Les difficultés des élèves

Après avoir caractérisé la diversité et la complexité des utilisations du temps des scientifiques dans les cas étudiés, essayons de voir de quel ordre sont les utilisations du temps des élèves et leurs difficultés.

2.1. Ressemblances avec l'utilisation du temps des chercheurs

Les lycéens dans leur ensemble fournissent des explications conformes au savoir actuel dans deux situations :

- Le fonctionnement des fonds océaniques à la manière d'un double tapis roulant : Les élèves n'ont pas de difficulté à transformer du temps en espace. **C'est dire que pour ce processus, l'actualisme d'extrapolation fonctionne bien.** Les élèves maîtrisent-ils cependant les ordres de grandeur des vitesses ? Rien n'est moins sûr ; à tout le moins constatons-nous qu'ils s'approprient le mécanisme.
- La formation des roches des ophiolites. Les élèves mettent aisément les pillow lavas ou l'assemblage de roches des ophiolites en relation avec les pillow lavas ou la constitution lithologique d'un fond océanique actuel engendré par le fonctionnement d'une dorsale : **l'actualisme d'analogie fonctionne bien.**

2.2. Différences

Les écarts entre les explications des élèves et celles des scientifiques se traduisent de plusieurs manières :

- La difficulté à articuler des processus inscrits dans des histoires spatio-temporelles différentes : c'est le cas des processus de dérive/accrétion et de la sédimentation. Une histoire (la dérive/accrétion) prend de l'importance sur l'autre (la sédimentation) et la guide spatialement et temporellement. C'est aussi le cas de la conjugaison de l'histoire des anomalies magnétiques à la dérive/accrétion. Alors que les chercheurs n'interrogent pas la première lorsqu'ils en font un outil de validation et de marquage temporel de l'expansion, les élèves ouvrent la "boîte noire" de cette histoire, ce qui gêne la reconstitution du passé d'un fond océanique.
- La résistance à envisager le changement. A ce sujet, le cas des ophiolites est exemplaire puisqu'un certain nombre de contraintes empiriques à valeur de variant (failles, relief) pour le géologue sont considérées comme des invariants par les élèves. Ce n'est pas sans rappeler des thèses géologiques anciennes (Gohau, 1995a, p. 27).
- La non-prise en compte du temps long : c'est encore le cas pour les ophiolites. Les élèves, lorsqu'ils recourent aux mouvements tectoniques et orogéniques, banalisent leur réalisation dans une "mise en histoire" ce qui fait qu'ils n'entrent pas dans une véritable construction de la durée des processus.

2.3. Fausses ressemblances

Dans certaines situations, les élèves sont capables de produire des explications apparemment conformes au savoir actuel mais qui en réalité masquent des écarts de problématisation en rapport avec le temps. Reprenons trois des situations où nous l'avons particulièrement constaté :

2.3.1. Le charriage des ophiolites (l'obduction)

Lorsque les élèves disposent de "possibles" tectoniques ou orogéniques (mouvements horizontaux de convergence de plaques ou de continents, Première S 1999/00 ; failles, plissements ; Première S 2001/02), ils les convoquent et les articulent aisément, à la manière du "bricoleur". En matière de temps, le décalage avec les scientifiques prend deux aspects liés. Dans un souci de clarté, nous les distinguons :

1) Les élèves enchaînent mouvement et construction de structures avec facilité, sans réserve et sans économie de moyens. Il y a en dessous la marque du catastrophisme, c'est-à-dire le recours à des causes brutales, sans équivalent actuel. Les élèves ne construisent pas la nécessité du temps long, comme le font les scientifiques avec l'actualisme de 2^e niveau, ni même le catastrophisme de 2^e niveau. Les solutions des uns et des autres peuvent paraître équivalentes, **alors qu'elles masquent des problématisations différentes.**

2) Les élèves fournissent des explications qui sont des "mises en histoire simple". Cela peut introduire une sorte de temps long, ce qui pourrait sembler en contradiction avec ce que nous venons d'écrire dans le paragraphe précédent. Il n'en est rien, car **il ne s'agit pas du même temps long** : le temps long de la "mise en histoire simple" ne fait que contenir les événements, dont la survenue s'apparente au catastrophisme de 1^{er} niveau, et leur enchaînement (alors que le temps long des géologues produit des phénomènes) ; et s'il met en jeu des phénomènes actuels, ces derniers sont introduits grâce aux actualismes d'analogie et d'extrapolation. Ajoutons enfin la propension de la mise en histoire à linéariser ce qui s'exerce simultanément et à amalgamer le temps et la causalité (C. Orange, D. Orange, 1995).

2.3.2. Le fonctionnement du "double tapis roulant océanique"

En Première S, les élèves sont capables de réaliser une datation relative des différentes parties d'un fond océanique. Mais cette apparente maîtrise du fonctionnement en "double tapis roulant" masque la mise en jeu de conceptions d'élèves décalées par rapport à celles des chercheurs. Ainsi un certain nombre d'élèves pensent que les plaques, au niveau de la dorsale, sont poussées par le magma qui s'extrait vers la surface, alors que les scientifiques estiment qu'elles sont "tirées" (L. Jolivet, H.-C. Nataf, 1998, p. 51). Quelques élèves se représentent le magmatisme d'une dorsale en partie à la manière du volcanisme aérien, avec coulées le long de ses flancs ; les chercheurs conçoivent la formation de segments d'accrétion allongés le long de l'axe de la dorsale et parallèlement à lui (T. Juteau, R. Maury, 1999, p. 85). Enfin, un nombre significatif d'élèves donnent une importance à la dorsale qui laisse penser qu'elle est un objet immuable. Cette interférence du volcanisme aérien, cette place accordée à la dorsale n'a semble-t-il pas de conséquence en matière de datation relative des fonds océaniques. En revanche, elles peuvent être un obstacle à la construction de la stabilité structurelle dynamique de la zone de la dorsale, où il s'agit de convoquer le temps pour mieux l'évincer.

2.3.3. L'origine de la vie

Il est quelques élèves pour qui l'origine de la vie s'explique par la réalisation d'un processus moléculaire aboutissant à des formes primordiales simples (du type cellule ou bactérie par exemple), engagées ensuite dans un processus d'évolution pour donner des formes vivantes plus complexes. Ce modèle paraît refléter celui des chercheurs. Nous trouvons cependant des différences qui mettent en jeu le temps :

- **Le processus moléculaire** est en général conçu comme une rencontre et un assemblage de matériaux en milieu aquatique. Outre le fait que cela renvoie davantage au modèle de "soupe primitive", la prise en compte du temps n'est pas la même que celle des chercheurs : chez les élèves, la difficulté du processus tient surtout à la rencontre au "bon moment" et au "même endroit" des ingrédients et c'est **le temps long** qui rend possible ces rencontres hasardeuses. Les chercheurs construisent une fenêtre de temps, où l'émergence de la vie peut se faire, qui est assez courte à l'échelle des temps géologiques. Comment gèrent-ils la contrainte de durée et la probabilité, pas forcément importante, qu'ils donnent à l'évènement ? En limitant dans l'espace, au voisinage de surfaces minérales par exemple, une partie de la chimie prébiotique ; en revoyant "à la baisse" le modèle des formes vivantes primordiales (des molécules auto-réplicatives et évolutives) ; en envisageant des successions de réactions chimiques inévitables. Pour les chercheurs, ce n'est pas le temps long qui rend possible l'origine de la vie.

- En revanche, les chercheurs ont besoin de temps long dès lors que la vie existe, dans les processus évolutifs qui font passer de l'ancêtre commun à la biosphère actuelle. Ce n'est pas forcément le cas des élèves, dont la conception spontanée de l'évolution est souvent du type "métamorphose".

En résumé, le problème de l'origine de la vie est un nouvel exemple où l'élève pense des bonnes solutions mais sans identifier les bonnes contraintes.

2.4. Conclusion

La mise en comparaison élève/chercheur permet de souligner qu'il y a chez les élèves une variété d'utilisation du temps dans les explications, mais elle est moindre que celle des chercheurs. Nous relevons la difficulté qu'ils ont à construire des changements géologiques avec du temps long, autrement dit à mobiliser l'actualisme de 2^e niveau : leur tendance est de recourir au catastrophisme.

Cette mise en comparaison attire l'attention sur les "fausses ressemblances" : la vigilance s'impose dans l'interprétation des productions écrites des élèves. **Alors qu'elles paraissent conforme au savoir actuel**, ces dernières peuvent cacher des décalages importants avec les scientifiques. Ces écarts tiennent à la mise en jeu de conceptions différentes, d'une utilisation abusive du catastrophisme de 1^{er} niveau, du recours aisé à "la mise en histoire simple", du statut de phénomène donné à des évènements (et réciproquement). Plus fondamentalement, ils témoignent, chez l'élève, d'une **identification différente des problèmes**, avec construction d'un registre empirique et de nécessités sur le modèle différents. Dans un contexte problématique donné, l'élève pense parfois les bonnes solutions, mais il n'est pas sûr qu'il ait construit les bonnes contraintes. Cela va jusqu'au cas où la problématisation en rapport avec une "bonne" solution est très limitée au regard de celle ayant conduit à une "mauvaise" solution (voir le problème de l'origine de la vie)! On voit alors combien l'interprétation didactique est délicate : le risque est grand de ne pas démasquer une problématisation cachée différente.

3. Diversité et décalages dans les utilisations du temps : trois études de cas

Notre recherche montre qu'il y a une diversité et une complexité des utilisations du temps d'un domaine à l'autre des sciences de la Terre et au sein d'un même domaine. Elle aboutit également à faire ressortir qu'il existe, entre chercheurs et lycéens, des convergences et des décalages dans l'utilisation du temps. Terminons cette synthèse en reprenant quelques cas d'élèves qui ont été confrontés à plusieurs des situations de classe que nous avons étudiées : comment se "concrétisent", dans leurs réponses, cette diversité des utilisations du temps et ces décalages ?

3.1. Le choix des cas d'élève

Nous nous limitons aux années scolaires 1998/99 et 1999/00 pour lesquelles nos situations concernant l'origine de la vie deviennent plus précises. Nous écartons les élèves pour lesquels nous ne disposons pas de toutes les productions écrites brutes en rapport avec notre recherche. Dans ces conditions, l'étude de l'ensemble du corpus de données montre que 4 élèves ont fait partie d'une classe de Seconde puis d'une classe de Première S étudiées ; de même, 5 élèves d'une classe de Première S étudiée se sont retrouvés dans une classe de Terminale S étudiée.

Seconde	Première S	Terminale S
L'origine de la vie	- La reconstitution de l'histoire d'un océan - L'évolution de la zone d'une dorsale - L'explication des ophiolites	L'origine de la vie
4 + (1) élèves Lycée Camus, Nantes années scolaires 1998/99 puis 1999/00		
	5 + (1) élèves Lycée Camus, Nantes années scolaires 1998/99 puis 1999/00	

(entre parenthèses) = nombre d'élèves dont nous n'avons pas toutes les productions écrites brutes

Figure 15.1 : Vue d'ensemble des cas d'élèves

3.2. Synthèse par élève des analyses conduites

Les tableaux suivants rappellent les catégories dans lesquelles se placent les productions des élèves selon les différents problèmes étudiés.

3.2.1. Elèves en seconde puis en Première S (Figure 15.2 ci-dessous)

	Origine de la vie	Reconstitution d'un fond océanique		Evolution de la zone d'une dorsale	Origine des ophiolites
		Coupes	Carte		
1. Romain	C	J	J	st.structurelle.	tectonique cata.
2. Cyril	E	SJ	S	pas st. structurelle	tectonique cata.
3. Julien	mixte(E+P)	SJ	S	st. structurelle	tectonique cata.
4. Elise	E	J	J	st.structurelle	tectonique cata.

C = Origine de la vie en rapport avec des Conditions

P = Panspermie

E = Origine de la vie négligée au profit de l'Evolution (voir chapitre 14)

SJ = Superposition/Juxtaposition des sédiments (voir chapitre 7)

J = Juxtaposition des sédiments

S = Superposition des sédiments

St.str. = Stabilité structurelle (voir le chapitre 9)

Cata = Catastrophisme de 1er niveau

En grisés, les décalages avec les chercheurs

3.2.2. Elèves en Première S puis en Terminale S (Figure 15.3 ci-dessous)

	Reconstitution d'un fond océanique		Evolution de la zone d'une dorsale	Origine des ophiolites	Origine de la vie
	Coupes	Carte			
A. Kevin	SJ	S	cyclique	émersion	C +(E)
B. Romain	J	J	St.str.	émersion	E (+C)
C. Julie	SJ	S	cyclique	émersion	E
D. Mathieu	SJ	S	st.str.	émersion	P (ou D)
E. Sophie	SJ	S	2 chambres. magmat.	émersion par eustatisme	C + (E)

Même légende que pour la figure 15.2 avec en plus D = Origine de la vie en rapport avec Dieu

3.2.3. Analyse des tableaux

Les tableaux ci-dessus concernent un petit nombre d'élèves engagés dans la série scientifique du lycée : l'analyse de ce qu'ils présentent ne prétend pas signaler l'ensemble des réussites et des difficultés des élèves. Ces précautions prises, on peut cependant faire ressortir quelques points en rapport avec les utilisations du temps :

- Il n'y pas d'élève dont la réponse est toujours décalée de celles des chercheurs. Si tel était le cas, cela se traduirait, sur les tableaux, par des lignes entièrement grisées.

- Pour la presque totalité des élèves, il y a un décalage avec les chercheurs pour le problème des ophiolites et celui de l'origine de la vie. En revanche, aucun élève n'est en décalage à la fois pour le problème de la reconstitution du passé d'un océan et pour l'évolution d'une dorsale. Il y a donc une réelle difficulté des élèves à construire la nécessité du temps long (ophiolites) ou à penser l'évènement de l'origine de la vie. Les problèmes concernant les océans sont plus simples du fait qu'ils mettent en jeu de l'actualisme d'analogie ou d'extrapolation. Cela semble confirmer **la difficulté des élèves à problématiser dans le cadre de l'actualisme de 2è niveau.**

- Pour le problème de l'origine de la vie, il n'y a pas de véritable différence entre les élèves de seconde et ceux de terminale S. Spontanément, les lycéens ont tendance à "minimiser" ce problème, en le ramenant à la réalisation de bonnes conditions ou encore en l'écartant au profit de l'évolution des êtres vivants.

3.3. Etude des productions de quelques élèves (annexe 18)

Pour compléter l'étude entreprise dans le paragraphe précédent, nous portons plus précisément notre attention sur 3 élèves des groupes précédents :

- pour la catégorie Seconde puis Première S : Julien et Elise
- pour la catégorie Première S puis Terminale S : Romain.

Le choix de ces élèves est fondé sur la diversité de leurs réponses (voir les tableaux 15.2 et 15.3).

3.3.1. Le cas d'Elise (Seconde puis Première S)

- La reconstitution du passé d'un océan

Lorsqu'il s'agit de reconstituer le passé d'un océan, Elise fournit une réponse de type Juxtaposition et non Superposition des sédiments. Elle justifie sa réponse en rappelant qu'*"on sait que le basalte est surmonté de sédiments"* (chapeau de l'énoncé). C'est ce qui prime, indépendamment de ce qui a été discuté oralement sur la sédimentation. Mais elle s'interroge : *"Se peut-il qu'ils (les sédiments) s'éparpillent ?"*, ce qui pourrait remettre en cause la disposition qu'elle leur a donnée. Peut-être envisage-t-elle l'action des courants marins. Pour ce premier problème, Elise entame une problématisation et **le décalage de sa réponse tiendrait davantage de sa conception de la sédimentation** qu'à une mauvaise articulation entre les grands processus en jeu.

- L'évolution de la zone d'une dorsale

Pour ce qui est de l'évolution de la zone d'une dorsale, l'annotation de la coupe témoigne de la stabilité structurelle comme le début du texte accompagnateur : *"Dans quelques millions d'années, la coupe de la dorsale n'aura rien de changé"*. Mais ce qui étonne se trouve dans la deuxième partie de son texte : *"En effet le magma suit un cycle: la partie fondue de la péridotite remonte à la chambre magmatique, puis au rift. Un fois à la surface il refroidit et contribue aussi au renouvellement des plaques. Le changement tient donc dans l'allongement des plaques"*. **La justification de la stabilité structurelle est la "mise en histoire" du magma selon un parcours ascendant : les deux ne s'articulent pas vraiment.** Sommes-nous en présence d'une tension entre une stabilité structurelle qui inconsciemment s'impose et un fonctionnement magmatique que la coupe suggère (raisonnement séquentiel) et qui pourrait s'accorder avec la conception du volcanisme aérien ?

- Le problème des ophiolites

Le cas des ophiolites conduit Elise à noter que ce sont des *"morceaux de lithosphère océanique"* dont elle énumère les roches, *"coincées" entre deux masses continentales qui s'affrontent*. Une flèche signale ensuite que *"ce sont les "restes" d'un fond océanique disparu"*. Il n'y a pas de problématisation claire : la réponse de cette élève paraît partir du modèle qu'elle connaît. Cela nous donne un peu de formation des roches, un peu de tectonique (mouvements horizontaux) facile. Il n'y a que le temps de la mise en histoire et du catastrophisme de 1er niveau non conscientisé par l'élève. Avec cet apport d'une solution que le catastrophisme imprègne, **cette élève est très loin de construire le temps long.**

- L'origine de la vie

Lorsqu'on lui demande de raconter comment les animaux et les végétaux sont apparus sur la Terre, Elise commence par écrire qu'elle croit *"qu'on ne peut pas savoir ce qu'il y avait au tout début, comment la vie est apparue"*. Ce qu'elle développe ensuite montre que l'origine des végétaux tient à des conditions environnementales ; en revanche, celle de certains animaux (dont l'homme) s'explique par l'évolution. Nous avons rangé sa réponse dans la catégorie "mixte". Les précisions qu'elle donne ensuite, par sa situation vis à vis des différents items, confirme l'origine "facile" des végétaux contrairement à celle des animaux : Elise accepte l'idée d'une génération spontanée de certains végétaux, tout comme elle entend que leur formation puisse se faire à partir de molécules. En définitive, cette élève **banalise l'origine** des végétaux, alors que celle des animaux s'inscrit dans un continuum évolutif de complexité croissante.

3.3.2. Le cas de Julien (Seconde puis Première S)

- La reconstitution du passé d'un océan

Julien articule les processus de dérive et de sédimentation. Nous repérons cette articulation dans ses écrits (et aussi dans sa présentation orale) :

"Les sédiments les plus jeunes recouvrent peu à peu les plus anciens et se retrouvent partout dans l'océan (sédimentation ubiquiste). Les (les sédiments) plus anciens peuvent être trouvés que éloigné de l'axe (dérive latérale des fonds océaniques) et enterrés par des sédiments plus jeunes (principe de superposition des sédiments). Les (sédiments) plus anciens ne se trouvent que éloigné de l'axe car comme elle été repartit sur les bandes (de fond basaltique) anciennes elles ont été repoussées (dérive latérale) avec les bandes (de fond basaltique) sur lesquelles elles étaient (sédimentation sur le fond basaltique)."

- L'évolution de la zone d'une dorsale

Pour Julien, *"il n'y aura aucun changement"* et il réfère cela au magma qui *"en remontant est en partie déposé sur les parois où il refroidit"*. Si le *"en partie"* est énigmatique, la coupe qu'il rend ne souffre d'aucune ambiguïté : Julien n'a fait aucun découpage ; il s'est contenté de mettre en grisé un pan de part et d'autre de l'axe de la dorsale avec comme légende : *"magma refroidit se déposant sur les plaques"*.

- Le problème des ophiolites

La réponse de Julien donne un scénario de l'histoire des ophiolites conforme au savoir actuel : deux actes, le premier caractérisé par un régime de divergence des plaques avec formation de fonds océaniques ; le second avec un régime de convergence de deux plaques portant chacune un continent. Mais c'est une **"mise en histoire"**. Plusieurs caractéristiques de cette réponse en témoignent :

- des marqueurs temporels : *"Tout commence(...) peu à peu (...). Puis, brusquement (...) peu à peu (...) pour finalement (...) peu à peu (...). Les ophiolites sont alors formées"*.

- des schémas prenant en compte juste ce qui est nécessaire à l'épisode : pour le premier épisode, Julien fait un schéma comprenant seulement deux plaques séparées à l'axe d'une dorsale (qu'il barre ensuite) ; pour le deuxième épisode, il ne met plus de dorsale mais en revanche il ajoute deux continents et une zone de subduction. Un dernier schéma montre la même zone avec des continents comprimés et déformés. Ceci rappelle les bandes dessinées.

Nous nous demandons **si cette mise en histoire permet vraiment de construire la nécessité du temps long** (que sous-tendent les *"peu à peu"* ?) ; en revanche, il nous semble qu'elle permet, dans une certaine mesure, de construire des changements de rythme et la nécessité

d'un changement de régime des mouvements des plaques. Voici ce qu'il écrit (puis barre ensuite) : *"Puis, brusquement sans savoir pour quelle raison, le mouvement s'inverse passant d'une divergence à une convergence..."*. Il est le seul de sa classe à l'avoir explicitement écrit. Nous notons enfin que jamais Julien ne fait référence aux documents. Il est dans le monde des "histoires".

- L'origine de la vie

Julien fournit une réponse mixte à l'apparition des animaux et des végétaux.

- il met en jeu la panspermie pour les végétaux. Ils sont apparus *"grâce aux graines que transportait les météorites qui ont formé la terre"*.

- quant aux animaux, ils proviennent du *"développement d'être vivant"*, en l'occurrence des bactéries qui elles-mêmes se seraient développées à partir de *"moisissure de végétaux"*. Julien inscrit les animaux dans une chaîne évolutive comportant une génération spontanée initiale, que l'on retrouve dans l'histoire des sciences, mais qui n'est pas "celle" des chercheurs actuels. Il semble tenir à ces idées puisque d'une part, il les développe dans différentes parties du questionnaire. D'autre part, il n'est pas vraiment d'accord avec la proposition d'un processus moléculaire : *"Se ne sont pas les premier les être vivant qui ont été formé à partir de molécule, chimique contenu dans l'océan"*.

Nous notons que Julien adhère à la génération spontanée des êtres vivants simples. Cela voudrait dire qu'il banalise l'origine des animaux, car il ouvre vers l'existence de plusieurs chaînes évolutives aux origines décalées dans le temps. Quant à celle des végétaux, pense-t-il que des météorites apportent encore des graines ?

Julien problématise donc l'origine de la vie d'une autre façon que les chercheurs.

3.3.3. Le cas de Romain (Première S puis Terminale S)

- La reconstitution du passé d'un océan

Romain dispose en juxtaposition les sédiments d'époques différentes sur le fond océanique, que ce soit sur des coupes ou sur une carte. La justification qu'il donne montre qu'au lieu de faire fonctionner les deux processus dans des directions spatio-temporelles différentes, il soumet la sédimentation à direction spatio-temporelle de la dérive : *"Les sédiments se déposent sur les couches entre différentes années (0, 23 MA ; 23 ; 65 MA...). Comme ces bandes se déplacent au cours du temps, les sédiments se déplacent aussi de la même manière (...)"*.

- L'évolution de la zone d'une dorsale

Romain fournit seulement un texte rendant compte de ce que sera la région de la dorsale dans quelques millions d'années : *"La zone n'aura pas changé"* écrit-il. Il exprime donc l'idée d'une **stabilité structurelle** ce qui est conforme au savoir actuel. Il développe et montre qu'il articule dérive et accréation : *"Les bordures des plaques ne seront plus près du rift (mise en jeu de la dérive) mais rentreront dans les plaques car les plaques se renouvellent (mise en jeu de l'accréation près de l'axe)"*. Romain s'intéresse aussi aux sédiments. Il écrit que *"Les sédiments près du rift seront plus récent"*. Alors que cette situation vient après que celle portant sur la reconstitution du passé d'un océan ait été discutée et corrigée, Romain se situe encore spontanément dans un modèle de **"Juxtaposition des sédiments"**. S'il articule dérive et accréation conformément au savoir actuel, il continue à calquer la dérive/accréation et la sédimentation l'une sur l'autre. C'est vraisemblablement l'expression de la difficulté à articuler deux processus synchrones se déroulant dans des dimensions spatio-temporelles différentes.

- Le problème des ophiolites

Pour expliquer les ophiolites, Romain établit un parallélisme entre leurs formations rocheuses (nature, disposition) et celles d'un fond océanique, rapporte les basaltes en coussins à un *"refroidissement dans la mer du magma"*, imagine *"il y a très longtemps"* une dorsale ancienne en fonctionnement et construit la nécessité d'une émergence : *"Les ophiolites sont pour conclure l'organisation d'une ancienne dorsale océanique qui n'est maintenant plus immergée"*. Le recours à l'actualisme d'analogie est aisé. Nous remarquons qu'il signale que les formations rocheuses sont verticales, sans aller plus loin dans l'explication : *" Cette organisation est à l'inverse de l'organisation habituelle et normale d'une dorsale actuelle en activités"*. Est-il à cours de possibles géologiques ?

- L'origine de la vie

Lorsqu'on lui demande d'expliquer le plus précisément possible ce qu'il s'est passé entre le moment où il n'y avait pas d'êtres vivants et le moment où les premiers êtres vivants ont existé sur la planète, Romain propose l'histoire de la vie qui commence par des bactéries qui se créèrent au fond des océans, car l'air était irrespirable, qui prirent ensuite des formes variées et complexes, qui s'adaptèrent aux conditions aériennes. En relation avec cette prolifération bactérienne, *"Chacune des "espèces" de bactérie évolua de façon différente pour s'adapter à leur propre besoin"*. Et *"En même temps que cela la végétation apparue ..."* Romain insiste donc davantage sur l'évolution de premiers êtres vivants simples que sur leur apparition. Nous remarquons qu'il dissocie, comme Elise et Julien, les végétaux des autres êtres vivants. Mais il s'interroge explicitement sur leur origine : *"Comment est apparue la végétation sur la Terre ?"* alors qu'Elise la considérait comme simple et que Julien se servait de la panspermie. Ces élèves sont donc sur un même problème mais ils lui apportent des solutions différentes.

3.4. Discussion

Que peut-on retenir de ce suivi d'élèves dans plusieurs domaines ?

- Nous confirmons la relative **aisance qu'ont les élèves à utiliser les actualismes d'analogie ou d'extrapolation**, et leur **tendance à mettre en histoire**. La "mise en histoire" permet de dépasser certaines difficultés : articuler deux processus synchrones se déployant dans des dimensions spatio-temporelles différentes, mettre en relation des données fragmentaires, faire fonctionner un modèle. Elle paraît terriblement efficace même quand l'élève dispose de possibles géologiques (Julien et les ophiolites) : elle ordonne, relie ce qui est disparate ou que l'on a du mal à faire fonctionner ensemble, comble les "blancs". Adam n'écrit-il pas que, dans le récit, *"les événements semblent se raconter eux-mêmes pour une oreille et un regard inattentifs aux traces du sujet parlant-racontant, inattentifs ou insensibles aux failles énonciatrices qui marquent de leur(s) empreinte(s) l'illusoire nappé narratif"* (Adam, 1984, pp. 10-11). Et par certains côtés, cette mise en histoire est même féconde : Julien ne construit-il pas la nécessité d'un changement de régime des mouvements de plaques ?

- Ce n'est pas l'écart qui sépare une réponse du savoir savant qui mesure le degré de problématisation de l'élève. Romain construit mieux le problème des ophiolites que Julien qui le met en histoire. En effet, il construit un espace de contraintes empiriques et les nécessités d'une formation des roches ophiolitiques et d'une émergence. Il reste "en plan" avec la verticalité des couches vraisemblablement par manque de possibles géologiques (notamment tectoniques et orogéniques) acceptables. Est-ce l'indice d'une entrée dans la problématisation du temps long ? Julien raconte une solution des ophiolites proche du savoir actuel, mais il problématise moins : il construit la nécessité d'un changement de régime des mouvements. En

termes de temps, il accélère ou ralentit le rythme de l'histoire. Ce n'est pas construire le temps long de la géologie.

4. Conclusion

Au terme de cette mise en perspective des 3 études, il semble que les difficultés des élèves à utiliser le "bon temps" viennent de leur tendance à recourir à l'actualisme d'analogie et au catastrophisme de 1^{er} niveau, dans un contexte de "mise en histoire". De cette manière, ils ne reconstituent pas la grande Histoire de la Terre, ils en font la "petite histoire" ; ils utilisent éventuellement le temps long pour y faire se succéder des évènements et se dérouler des phénomènes ; et cela les empêche de construire **le temps long qualitatif**, producteur de phénomènes et d'évènements.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons entamé cette recherche dans l'esprit de préciser et de comprendre les utilisations du temps des élèves de lycée dans les explications en géologie. Le développement de notre cadre théorique nous a conduit à privilégier deux entrées "indirectes" dans le temps : l'actualisme et la problématisation. Pour chaque domaine d'étude, l'étude épistémologique a permis de construire des "outils" d'interprétation des productions des élèves basés sur ces deux entrées. Quel bilan pouvons-nous faire à la fin de cette recherche ? Quelles perspectives de travaux futurs laisse-t-elle entrevoir ?

1. Les apports de notre recherche

Nous disposons au départ de repères sur la multiplicité des formes du temps en géologie et de quelques éléments sur les décalages d'utilisation du temps entre lycéens 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 du temps long qualitatif

La problématisation en Sciences de la Terre est rendue difficile d'un côté par le recours aisé à **l'actualisme de 1er niveau ou actualisme d'analogie, voire à l'actualisme d'extrapolation**, et d'un autre côté par la mise en jeu privilégiée d'une forme d'explication qui est **"la mise en histoire"**. Ces types d'explications, **qui se conjuguent**, constituent des obstacles aux constructions de la nécessité du temps long qualitatif et des nécessités de l'Histoire. **Ils empêchent les élèves d'entrer dans l'actualisme de 2è niveau** (ou actualisme à temps long qualitatif).

- **Le temps long qualitatif** est le temps long producteur de phénomènes et d'événements. S'il est difficile à appréhender, il est fondamental pour la pensée géologique (géologie historique). Dans la mise en place des ophiolites, c'est **le temps long de l'actualisme de 2è niveau** qui construit le phénomène d'obduction ; mais on pourrait prendre d'autres exemples : le temps long qui construit l'orogénèse, le temps long qui construit la diagenèse ... Ce n'est donc pas seulement la durée qui compte.

- **Problématiser le contenu du temps long qualitatif**, c'est aussi se mettre dans l'expérience de pensée de rembobiner l'histoire et de la redescendre et c'est se demander quelles sont les véritables bifurcations de l'histoire, celles qui auraient pu introduire une orientation différente de son cours. C'est s'interroger sur les conditions de possibilité des **événements**. Nous avons montré qu'on établit "à reculons" **les nécessités de l'Histoire** : c'est un événement ou un phénomène réalisé qui rend nécessaire **les conditions de sa possibilité**. Cette façon de procéder se distingue du raisonnement causal commun, où la cause rend l'effet nécessaire. Elle caractérise la problématisation historique en lui donnant un sens inverse.

1.2. Des retombées pour l'enseignement et l'apprentissage des Sciences de la Terre

Les programmes d'enseignement des Sciences de la Terre au lycée s'intéressent aux événements et aux phénomènes géologiques. C'est le cas, par exemple, pour l'enseignement obligatoire en Terminale S, en particulier dans l'introduction consacrée à une *"approche du temps en biologie et géologie"* (M.E.N., 2001, p. 4), et dans la partie intitulée *"La mesure du temps dans l'histoire de la Terre et de la vie"* (p. 8) ; ou encore dans les documents d'accompagnement du thème 1 de l'enseignement de spécialité (*"Du passé géologique à l'évolution future de la planète"*). Au terme de notre étude, il paraît important de questionner la distinction qui est faite entre événements et phénomènes dans ces textes.

Les documents d'accompagnement de Terminale S évoquent explicitement l'actualisme quand *"il s'agit d'initier les élèves aux raisonnements qui permettent la reconstitution des climats de la Terre et les variations du niveau de la mer. Ces raisonnements reposent sur l'application du "principe d'actualisme"*¹¹⁵ (Documents d'accompagnement, introduction du thème 1 de l'enseignement de spécialité). Compte tenu des reconstitutions choisies, il est évident que les différents niveaux de l'actualisme que nous avons clarifiés interviennent, et notamment l'actualisme de 2^e niveau, à temps long producteur de phénomènes. On peut réfléchir sur la prise en compte de toute la complexité du *"principe d'actualisme"* notamment dans l'objectif de faire construire aux élèves le temps long qualitatif. Quelle(s) forme(s) d'actualisme (est)sont mis(es) en jeu dans les enseignements de géologie ? N'y a-t-il pas une tendance à ne faire fonctionner les élèves que sur l'actualisme d'analogie et d'extrapolation, qu'ils utilisent sans trop de difficultés ?

2. Limites et prolongements de notre recherche

Nous voyons dans notre travail des approfondissements à poursuivre et des domaines des Sciences de la Terre où il paraît important de prolonger notre réflexion.

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 situé, nous avons vu que, pour accéder à un savoir scientifique explicatif, il est important de dépasser la mise en relation des registres que l'on construit (registre empirique, registre des modèles, registre explicatif) pour une véritable **mise en tension** de ceux-ci, qui débouche sur des **nécessités**. La problématisation permet donc de construire un savoir ayant une certaine apodicticité : elle explore des possibles avec des "pourquoi" et des "pourquoi cela ne peut pas être autrement".

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 matière d'argumentation et de débat scientifique, mais aussi en termes de conditions d'une construction, par l'élève, de véritables registres (empirique, des modèles, explicatif) géologiques. Nous avons vu en effet que la construction et la constitution des registres est en rapport avec l'"expérience" du sujet : "expérience" du laboratoire et du terrain, "expérience" en matière de possibles et de fonctionnement de modèles.

¹¹⁵ Souligné par nous.

De même, compte tenu de la tendance des élèves à privilégier la "mise en histoire", il nous paraît important de réfléchir aux conditions d'un accès des élèves à un véritable savoir scientifique. Cela demande non seulement d'approfondir la problématisation mais aussi d'étudier plus précisément les "formes" des "petites histoires" que les élèves proposent. Pour cela, nous souhaitons engager une réflexion portant sur le récit (Ricoeur, 1984 ; Bruner, 1991).

2.2. Une ouverture à d'autres domaines de la géologie

Il était nécessaire pour nous de faire des choix. Nous avons plus particulièrement fait porter notre étude épistémologique et didactique sur trois domaines des Sciences de la Terre : le fonctionnement des océans, la mise en place des ophiolites et l'origine de la vie. Ce choix nous paraît fécond a posteriori dans la mesure où il nous a permis de construire, en matière de temps, des outils d'interprétation des productions des élèves d'une certaine variété. Le fonctionnement des océans privilégie les actualismes d'analogie et d'extrapolation que s'approprient bien les élèves. La mise en place des ophiolites met en jeu l'actualisme de 1er niveau et surtout l'actualisme de 2è niveau. Enfin le problème de l'origine de la vie convoque paradoxalement les différentes formes d'actualisme.

Mais nous sommes consciente que des approfondissements sont à poursuivre. En effet, si les exemples choisis permettent de questionner quantitativement et qualitativement le temps long, il nous paraîtrait intéressant de poursuivre des études sur des problèmes géologiques qui recourent au temps cyclique. Historiquement, ce temps a eu une fonction heuristique. Est-ce à dire qu'il présente, comme le temps long, une certaine complexité ?

D'autre part, il est d'autres domaines des programmes d'enseignement intéressants dans leur rapport au temps. Nous pensons plus particulièrement aux problèmes de métamorphisme. Des allègements des programmes de 1992 ne nous ont pas permis de les étudier ; les programmes de Terminale S (M.E.N., 2001, pp. 9-10) les prennent maintenant en compte dans le cadre de l'étude de "*La convergence lithosphérique et ses effets*". Nous pensons également aux problèmes concernant l'évolution des êtres vivants où l'on retrouve la contingence (Première L et ES, M.E.N., 2000).

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.

Le chantier est vaste.

BIBLIOGRAPHIE

- ACHACHE J. (1990). Préface in WEGENER (1990). *La genèse des continents et des océans*. Paris : Christian Bourgois. pp. I-IX.
- ADAM J.-M. (1984). *Le récit*. Paris: PUF, Que sais-je?
- 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.
- AMAUDRIC du CHAFFAUT S. (1999). *Tectonique des plaques*. CRDP de l'Académie de Grenoble.
- ANONYME (1972). Penrose field conference on ophiolites. *Geotimes*. 17.
- ANONYME (2000). *La genèse*. Paris : Le serpent à plumes et mille et une nuit.
- APOSTEL L. (1973). Remarques sur la notion d'explication. In L. APOSTEL et al (1973). *L'explication dans les sciences*. Paris: Flammarion.
- ARNOULD J. (1999). Article "Créationnisme". In D. LECOURT (dir.) *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris : PUF.
- 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.
- AUBOUIN J. (1958-59). A propos d'un centenaire: les aventures de la notion de géosynclinal. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, Volume II, fasc. 3. pp. 135-188
- 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 (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin. (1986).
- BACHELARD G. (1949). *Le rationalisme appliqué*. Paris : P.U.F. (1986)
- 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.

- BERNARD C. (1865). *Introduction à la médecine expérimentale*. Garnier Flammarion. (1966)
- BLANC M. (1990). *Les héritiers de Darwin*. Paris: Editions du Seuil.
- BLOCH M. (1993). *Apologie pour l'histoire ou Métier d'historien*. Edition critique préparée par E. Bloch. Paris: Armand Colin. (écrit avant 1941).
- BOILLOT G. (2000). *Introduction à la géologie*. Paris : Dunod.
- BRACK A. (1999a) , Article "Origine de la vie", *Encyclopaedia universalis*.
- BRACK A. (1999b). Vie extraterrestre: les charmes de l'improbable. *La Recherche*, 317, Février 1999, pp. 50-52.
- BRACK A. (2002a). De la naissance de la vie sur terre à une vie universelle. In F. Raulin-Cerceau, P.Léna & J. Schneider (dir.) *Sur les traces du vivant.*, 71-93. Le Pommier.
- BRACK A. (2002b). La vie: origine et distribution possible dans l'Univers. In *Université de tous les savoirs* 4, La Vie. Paris: O. Jacob. pp. 29-41.
- BRUNER J. (1991). *Car la culture donne forme à l'esprit*. Paris : Eshel.
- BUFFETAUT E. (1996). Tous les gros animaux disparaissent. *La Recherche* n° 293, décembre 1996, pp 65-67.
- CAIRNS-SMITH A.G. (1990). *L'énigme de la vie*. Editions Odile Jacob.
- CANGUILHEM G. (1983). *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences*. Paris : Vrin.
- CANGUILHEM G. (1985). *La connaissance de la vie*. Paris : Vrin.
- CANGUILHEM G. (1988). *Idéologie et rationalité dans l'histoire des sciences de la vie*. Paris : Vrin.
- CANGUILHEM G. (2000) . Article Vie. In *Encyclopaedia universalis*.
- CANTOR M. (1994). *Pouchet, savant et vulgarisateur*. Musée et Fécondité. Nice : Z'éditions.
- CARLES J. (1966). *Les origines de la vie*. Paris : PUF, Que sais-je ?
- CHEVALIER G. (1992). Une révolution dans la conception des programmes. In *Les sciences à l'école: les raisons du malaise*. Sciences et Vie hors série n° 180. septembre 1992. pp. 132-147.
- CLAEYS P.(1996). Chicxulub, le cratère idéal. *La Recherche* n° 293, décembre 1996, pp 60-62.
- COTARDIERE P. de la & PENOT J.-P. (1995). *Dictionnaire de l'espace*. Paris: Larousse.
- COURNOT A. (1851). *Essai sur les fondements de nos connaissances et sur les caractères de la critique philosophique*. Paris: Hachette (édition de 1912).
- COURTILLOT V. (1995). *La vie en catastrophes*. Paris : Fayard.
- COURTILLOT V. (2002). La dynamique du globe contrôle-t-elle l'évolution des espèces ? In MICHAUD Y. (dir.) (2002). *Université de tous les savoirs* 15, Le Globe. pp. 9-26.
- CUVIER G. (1985). *Discours sur les révolutions de la surface du globe*. Paris: Christian Bourgois éditeur (1825).
- DANCHIN A. (1990). *Une aurore de pierres*. Paris: Seuil.
- DARWIN C. (1983). *L'origine des espèces*. Paris: La Découverte/Maspero (reprise de l'édition de 1876).

- 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.
- DOOLITTLE F. (2000). L'arbre du vivant: un buisson foisonnant. *Pour la Science*, 270, Avril 2000, p. 84-89.
- DURIS P. & GOHAU G. (1997). *Histoire des sciences de la vie*. Paris : Nathan.
- DUVE C. de (1996). *Poussière de vie*. Paris : Fayard.
- ELDREDGE N. & GOULD S.J. (1972). Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism. In Schopf T.J.M. (ed). *Models in Paleobiology*. San Francisco : Freeman, Cooper & Co.
- ELIADE M (1969). *Le mythe de l'éternel retour*. Paris : Gallimard
- 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).
- 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.
- FORTERRE P. (1999). Les hyperthermophiles sont-ils nos ancêtres?. *La Recherche*, n°317, février 1999, pp. 36-43.
- FORTERRE P. (2000). L'origine du génome. *La recherche*, n°336, pp 34-39.
- FOUCAULT A. & RAOULT J.-F. (2001). *Dictionnaire de géologie*. Paris: Dunod.
- GAYON J. (1993). La biologie entre loi et histoire. *Philosophie*. n°38. p. 30- 57.
- GINGRAS Y. (2001). Mathématisation et exclusion: socio-analyse de la formation des cités savantes. In J.-J. Wunenburger (dir.) (2001). *Bachelard et l'épistémologie française*. PUF.
- GOHAU G. & TIRARD S. (1998). Y a-t-il débat en science?. *Raison présente*, 2è trimestre 1998, pp. 79-101.

- 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. (1995b). Constant Prévost (1787-1856), géologue critique. In *Hommage à Wegmann*. Mémoire de la Société Géologique de France, 168, pp.77-82.
- GOHAU G. (1997). Naissance de la méthode "actualiste" en géologie. In GOHAU G. , dir., (1997). *De la géologie à son histoire*, CTHS, pp. 139-149.
- 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.
- GOIX M. (1996). *Les concepts de croissance et de développement en biologie : obstacles et présentations chez les élèves de collège*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur. Université Paris VII (Denis Diderot).
- GOULD S.J. (1965). Is uniformitarianism necessary? *American Journal of Science*, vol.263, march 1965, pp. 223-228.
- GOULD S.J. (1982). *Le pouce du panda*. Paris: Grasset, Le livre de poche
- GOULD S.J. (1990). *Aux racines du temps*. Paris: Grasset. (1987).
- GOULD S.J. (1991). *La vie est belle*. Paris: Editions du Seuil.
- GOULD S.J. (1994). L'évolution de la vie sur la Terre. *Pour la Science*, n° 206, décembre 1994, pp.90-98.
- GOULD S.J. (1996). *Comme les huit doigts de la main*. Paris : Editions du Seuil, 1996, p. 352.
- 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.
- HALBWACHS F. (1973). L'histoire de l'explication en physique. In L. APOSTEL et al (1973). *L'explication dans les sciences*. Paris: Flammarion.
- HALLAM A. (1976). *Une révolution dans les sciences de la Terre*. Paris: Le Seuil.
- HEMPEL C. (1972). *Eléments d'épistémologie*. Paris: Armand Colin.
- HERRMANN J. (1995). *Atlas de l'astronomie*. Le livre de poche.
- HOOYKAAS R. (1970). *Continuité et discontinuité en géologie et biologie*. Paris: Seuil.
- JACOB F. (1970). *La logique du vivant*. Paris: Gallimard.
- JACOB F. (1981). *Le jeu des possibles*. Paris: Librairie Fayard.

- 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.
- LANGANEY A. (1990). Le retour des créationnistes. In *Science et Vie, Hors série n°173*, décembre 1990.
- LARGEAULT J. (2000). Article « Description et explication ». In *Encyclopaedia Universalis*.
- LATOUB B. (1991). D'où viennent les microbes? *Les cahiers de science et vie*, n°4, août 1991. pp. 36-62.
- LAUDAN R. (1982). Tensions in the concept of Geology: natural history or natural philosophy. In *History of Geology*, 1, pp. 7-13.
- LE PICHON X. (1968). Sea-floor spreading and continental drift. *Journal of geophysical research*, vol. 73, n°12, pp 3661-3697.
- 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.
- LEMOINE M., CIRIO R. , PELLET G. & KECK R. (1995). *Le massif du Chenaillet*. Centre briançonnais de géologie alpine.
- LEMOINE M., CIRIO R., PELLET G. & KECK R. (1995). *Le Massif du Chenaillet Montgenèvre (Alpes franco-italiennes)*. Centre Briançonnais de Géologie Alpine.
- LEVI-STRAUSS C. (1962). *La pensée sauvage*. Paris : Plon.
- 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.
- 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. (1994). *Les origines de la vie*. Paris: Syros;
- 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.
- MAYR E. (1989). *Histoire de la biologie*. Paris : Editions Fayard.
- MAYR E. (1993). *Darwin et la pensée moderne de l'évolution*. Paris: Odile Jacob.
- 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). "Réel 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.
- PASTEUR L. (1994). *Ecrits scientifiques et médicaux*. Paris: GF-Flammarion.
- PATY M. (1994). En guise de préface. Quelques remarques sur la question des origines. In MAUREL M.-C. (1994). *Les origines de la vie*. Paris: Syros. pp. 11-32.
- PENNETIER G. (1907). Un débat scientifique, Pouchet et Pasteur, 1858-1868. In *Actes du Muséum d'Histoire Naturelle de Rouen XI*. Rouen: Imprimerie J. Girieud.
- PIAGET J. & GARCIA R. (1983). *Psychogenèse et histoire des sciences*. Paris: Flammarion.
- PIAGET J. (1946). *Le développement de la notion de temps chez l'enfant*. Paris: Presses Universitaires de France.
- PIAGET J. (1973) Introduction: le problème de l'explication. In L. APOSTEL et al (1973). *L'explication dans les sciences*. Paris: Flammarion.
- PICHOT A. (1993). *Histoire de la notion de vie*. Paris : Editions Gallimard.
- PICHOT A. (1994). Introduction générale. In PASTEUR L. (1994). *Ecrits scientifiques et médicaux*. Paris: GF-Flammarion. pp. 7-19.
- PIRART J. (1994). *Une histoire de la Terre*. Paris: Syros.
- POMEROL C., LAGABRIELLE Y. & RENARD M. (2000). *Eléments de géologie*. Paris: Dunod.

- POPPER K. (1991). *La connaissance objective*. Paris : Aubier (1972)
- PRIGOGINE I. (1996). *La fin des certitudes*. Paris: Odile Jacob.
- PRIGOGINE I. & STENGERS I. (1979). *La nouvelle alliance*. Paris: Gallimard.
- RAULIN F. (1994). *La vie dans le cosmos*. Editions Dominos Flammarion.
- RAULIN F., RAULIN-CERCEAU F. & SCHNEIDER J. (1997). *La bioastronomie*. PUF, Que sais-je?
- RAULIN-CERCEAU F., LENA P. & SCHNEIDER J. (2002). *Sur les traces du vivant*. Le Pommier.
- 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.
- RICHET P. (1999). *L'âge du monde*. Paris: Seuil.
- RICOEUR P. (1984). *Temps et récit. 2. La configuration dans le récit de la fiction*. Paris : Seuil
- RIQLES A. de (2002). Un darwinien pas très orthodoxe. *La recherche*, n°356, septembre 2002. pp. 25-32.
- RUDWICK M. (1997). Smith, Cuvier et Brongniart, et la reconstitution de la géohistoire. In GOHAU G. , dir., (1997). *De la géologie à son histoire*, CTHS, pp. 119-128.
- RUMELHARD G. (1986). *La génétique et ses représentations dans l'enseignement*. Berne : Peter Lang.
- RUMELHARD G., dir. (2000). *Les formes de causalité dans les sciences de la vie et de la terre*. Paris, INRP.
- SAVATON P. (1998). *La carte géologique dans l'enseignement secondaire*. Thèse de doctorat de l'Université de Paris 7.
- SERRES M. & FAROUKI N. (1997). *Le trésor, Dictionnaire des Sciences*. Paris: Flammarion.
- SMIT Y. (1996). Un épisode tragique: "l'océan Folamour". *La Recherche* n° 293, décembre 1996, pp 62-64.
- STENGERS I. (1995). *L'invention des sciences modernes*. Paris: Flammarion, collection Champs Flammarion.
- TATON R. (1995). *La science moderne de 1450 à 1800*. Quadrige/Presses universitaires de France.
- THOM R. (1983). *Paraboles et catastrophes*. Paris: Flammarion.
- THOMAS H. (1985). Préface. In CUVIER G. (1985). *Discours sur les révolutions de la surface du globe*. Christian Bourgois Editeur.
- THOMAS P. (2002). Après la tectonique des plaques. *Pour la science*, n° 300, pp. 88-91.
- THUAN T. X. (1998). *Le chaos et l'harmonie*. Editions Gallimard, Folio essais.
- TIRARD S. (1996). *Les travaux sur l'origine de la vie de la fin du XIXème siècle jusqu'aux années 1970*. Thèse pour obtenir le grade de Docteur. Université Paris VII (Denis Diderot).
- TIRARD S. (2000a). Les origines de la vie: un problème, des disciplines. *ASTER* n° 30. INRP.

- TIRARD S. (2000b). Evènement unique et cause, Les origines de la vie. In Rumelhard (dir.) *Les formes de causalité dans les sciences de la vie et de la terre*. Paris : INRP. pp. 107-123.
- TOULMIN S. (1973). *L'explication scientifique*. Paris: Armand Colin (édition originale, 1961).
- VERDIER P (1974). Introduction de l'article "Histoire". In *Encyclopaedia universalis*.
- VEYNE P. (1971). Comment on écrit l'histoire. Paris: Seuil. (Points Histoire).
- VIENNOT L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, 1, septembre 1993. INRP. pp. 13-27
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique*. De Boeck et Larcier.
- WEGENER A. (1990). *La genèse des continents et des océans*. Christian Bourgois éditeur. (1929)
- WHEWELL W. (1847). *History of the Inductive Sciences from the earliest to the Present time*. London: J.W. Parker, 3 vol.
- WHITECHURCH H. & ERNEWEIN M.(1999). Article "Ophiolites". In *Encyclopaedia universalis*.
- ZILLIG W. & ARNOLD H.-P. (1999). Sur la piste des virus primordiaux. *La Recherche*, 1999, 317, p. 44-48.

PROGRAMMES et TEXTES OFFICIELS CITES

- M.E.N. (1992). Nouveaux programmes des classes de seconde, première et terminale des lycées. *B.O.E.N., Tomes I & II. Hors série* du 24 septembre 1992.
- M.E.N. (1994). *Programme de Sciences de la vie et de la Terre. B.O.E.N. n°6*, 9 juin 1994.
- M.E.N. (1999). L'enseignement des sciences au lycée. *B.O.E.N. Hors série* du 12 août 1999. pp 5-6.
- M.E.N. (2000). Sciences de la vie et de la Terre, Série scientifique, Enseignement obligatoire, Nouveau programme applicable à compter de l'année scolaire 2001-2002. *B.O.E.N.. Hors série n°7* du 31 août 2000.
- M.E.N. (2000). Programmes d'enseignement scientifique obligatoire de 1^{ère} L et 1^{ère} ES. *B.O.E.N.. Hors série n°7* du 31 août 2000.
- M.E.N. (2001). Programme de l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre en classe terminale de la série scientifique. *B.O.E.N. hors série n°5*, 30 août 2001

Y DESPUES

LOS LABERINTOS
que crea el tiempo
se desvanecen.

(Solo queda
el desierto.)

Federico GARCIA LORCA, Poema del cante jondo

