



UBO  
CNRS  
IFREMER  
ORSTOM  
BRGM

GRUPE DE FORMATION DOCTORALE GEOSCIENCES :  
GEODYNAMIQUE, GEOPHYSIQUE ET GEOCHIMIE DES OCEANS  
UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE  
DOCTEUR EN SCIENCES DE LA TERRE  
Brest, France

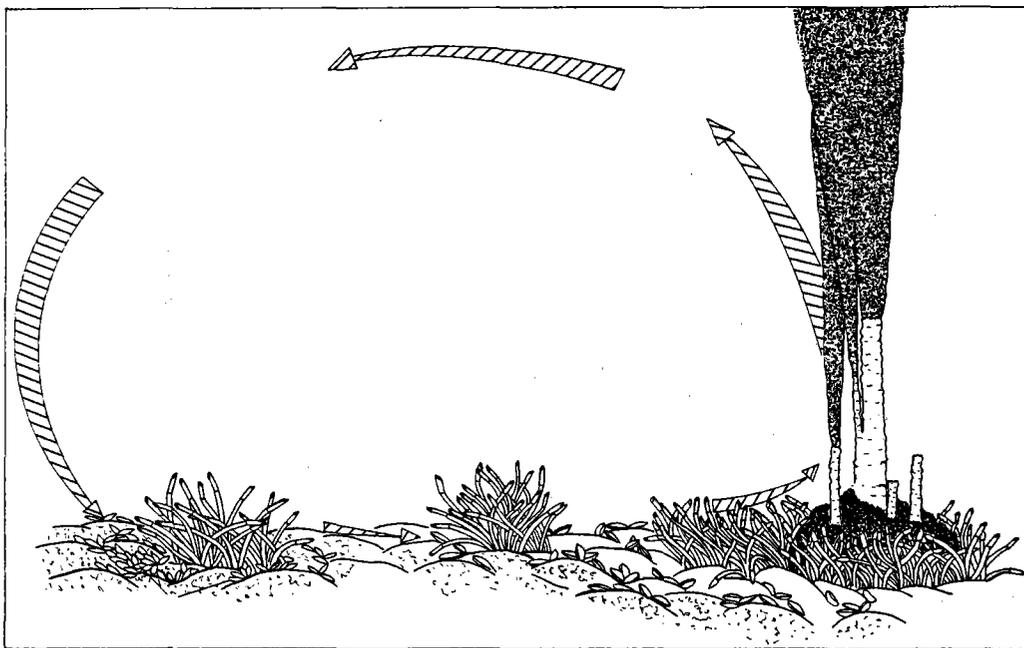
TROISIÈME CYCLE : GÉOLOGIE  
OCÉANOLOGIE ET GÉODYNAMIQUE



BRGM  
BUREAU DE RECHERCHES  
GÉOLOGIQUES ET MINIERES

Bernadette FOURNIER-GERMAIN

# Les sédiments métallifères océaniques actuels et anciens : caractérisation , comparaisons



BREST 1986

130

T633

Centre de Brest  
**Ifremer** B.P. 70 - 29200 PLOUZANE  
 DOCUMENTATION TEL. 02 98 22 42 71 - FAX 02 98 22 42 70  
 Département Géosciences Marines  
 e-mail [orange@ifremer.fr](mailto:orange@ifremer.fr)  
 FRANCE

T H E S E  
 présentée pour l'obtention  
 du  
 DIPLOME DE DOCTEUR DE 3e CYCLE  
 à  
 L'UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mention : *Sciences de la Terre*  
 Spécialité : *Océanologie et Géodynamique*

PAR  
 Bernadette FOURNIER-GERMAIN

LES SEDIMENTS METALLIFERES OCEANIQUES  
 ACTUELS ET ANCIENS : CARACTERISATION, COMPARAISONS

Soutenue le 25 juin 1986 devant la Commission d'Examen :

|                   |  |            |
|-------------------|--|------------|
| MM. René BLANCHET | Professeur, UBO, Brest                             | Président  |
| Michel HOFFERT    | Professeur, Université de Strasbourg               | Rapporteur |
| Henri BOUGAULT    | Ingénieur, IFREMER, Brest                          | Examineurs |
| Pol GUENNOC       | Géologue, BRGM, Brest                              |            |
| Georges SCOLARI   | Directeur, Direction Scientifique<br>BRGM, Orléans |            |

## AVANT-PROPOS

*Cette thèse a été effectuée grâce à une bourse du Bureau de Recherches Géologiques et Minières que je tiens à remercier ici, ainsi que tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce travail et qui ont accepté de le juger.*

*R. Blanchet qui, à l'issue de mes études à l'Université de Bretagne Occidentale, m'a permis, au sein du G.I.S., d'entreprendre ce travail.*

*M. Hoffert pour m'avoir accueillie dans son laboratoire, et dont j'ai beaucoup apprécié les qualités tant humaines que scientifiques.*

*P. Guennoc qui a suivi ce travail et m'a permis de participer à la mission Geomerouad en mer Rouge.*

*H. Bougault qui a permis qu'une collaboration s'établisse avec son laboratoire à l'IFREMER.*

*G. Scolari qui a accepté de juger ce travail.*

*Cette thèse n'aurait pu se concrétiser sans les échantillons et les nombreux documents qui ont été mis à ma disposition par R. Hékinian, le Programme International ODP et le BRGM. Je les en remercie vivement.*

*Je suis reconnaissante également à tous ceux qui m'ont fait bénéficier de leurs compétences et de leur aide : H. Bari, C. Bassoulet, A. Birolleau, J.M. Boirat, M. Bohn, J. Breton, J. Cotten, M. Fevrier, Y. Fouquet, R. Kerbrat, E. Lallier-Vergès, P. Larqué et l'équipe de Strasbourg, A.L. Monjanel, A. Person, J. Senant, M. Sibuet, G. Siquin, Y. Thisse, J.L. Travers, E. Vincent, G. Vincent. Je n'oublie pas M.L. Gaudin et J. Rolet qui ont assuré la frappe de cette thèse avec beaucoup de patience, ainsi que M.N. Déniel, G. Quentel, A.M. Gestin, S. Floch et F. Salaun pour les services qu'ils m'ont rendus avec beaucoup de gentillesse.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement A. Schaaf et J.J. Tiercelin pour leur aide et conseils judicieux et la grande disponibilité dont ils ont fait preuve à mon égard.*

*Un grand merci à Marie-Lise, Christine, Clervie, Yanna, Anne-Lise, Virginie, Cathy, Erik, Claude, Gilles pour leur aide efficace.*

*Enfin, je remercie Xavier dont le soutien actif et permanent a été précieux tout au long de la rédaction de cette thèse.*

## SOMMAIRE

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CHAPITRE I - LE CONCEPT DE "SEDIMENT METALLIFERE"</b>   | <b>1</b>  |
| A - Des "argiles rouges riches en fer" et des "vases à globigerines ferrugineuses"   | 1         |
| B - Boström et Peterson (1966, 1969) : des "sédiments riches en Fe-Mn et pauvres en Al", d'origine hydrothermale                 | 2         |
| C - Des mises en évidence multiples de "sédiments métallifères"  | 5         |
| 1 - Les "sédiments métallifères" dans le Pacifique   | 5         |
| a) La dorsale du Pacifique Est   |           |
| b) Les sédiments métallifères forés par le Glomar Challenger, à la base de la colonne sédimentaire                               |           |
| c) Des sédiments métallifères de surface éloignés d'une dorsale active : le modèle de la dépression de Bauer                     |           |
| d) Le bassin de Tiki   |           |
| e) Les "sédiments métallifères" : une composante de certains sédiments pélagiques. Cas de la zone Domes-C dans le Pacifique Nord |           |
| 2 - Des sédiments métallifères dans un océan en voie de formation : cas de la Mer Rouge  | 20        |
| 3 - Des sédiments métallifères anciens associés aux complexes ophiolitiques  | 23        |
| D - Conclusions  | 30        |
| <br>   |           |
| <b>CHAPITRE II - ETUDE DE LA SEDIMENTATION A L'AXE DE LA DORSALE DU PACIFIQUE EST : LES ZONES DE 12°50'N et 11°30'N</b>          | <b>33</b> |
| <br>   |           |
| Introduction   |           |
| I - <u>Caractéristiques générales de la dorsale à 12°50'N et 11°30'N et localisation des prélèvements de sédiments</u>           | 34        |
| A - Caractéristiques générales de la dorsale à 12°50'N et 11°30'N (zones A et B)   | 34        |
| 1 - Morphologie des zones A et B   | 35        |
| 2 - L'hydrothermalisme   | 36        |
| a) dans le graben central  |           |
| b) l'hydrothermalisme hors-axe   |           |
| 3 - Détection de l'hydrothermalisme dans l'eau de mer et mise en évidence des courants dominants à 12°50'N et 11°30'N            | 38        |
| B - Localisation des prélèvements de sédiments   | 41        |
| II - <u>Modes de prélèvements et désignation des échantillons</u>  | 43        |
| A - Les modes de prélèvements  | 43        |
| B - La désignation des échantillons  | 43        |

|  |    |
|--|----|
| III - <u>Les sédiments de surface dans le graben central et à proximité de l'axe</u><br><u>(jusqu'à 6 km) : la zone "axiale"</u> | 43 |
| A - Les sédiments caractéristiques dans cette zone   | 44 |
| 1 - Les données sédimentologiques  | 44 |
| a) couleur des sédiments humides   |    |
| b) la teneur en eau des sédiments  |    |
| c) texture des sédiments   |    |
| d) les teneurs en CaCO <sub>3</sub>  |    |
| e) observation des sédiments en frottis : détermination des faciès<br>sédimentaires  |    |
| α - les phases observées   |    |
| β - les faciès sédimentaires observés  |    |
| f) conclusion  |    |
| 2 - Observation de la fraction grossière (> 63 μm) et biostratigraphie   | 47 |
| a) proportion et répartition de la fraction grossière  |    |
| b) les constituants de la fraction grossière   |    |
| α - la fraction non biogène  |    |
| β - la fraction biogène  |    |
| c) conclusions   |    |
| 3 - Diffraction des rayons X sur le sédiment total   | 55 |
| a) diffraction des rayons X sur le sédiment total  |    |
| α - méthode d'étude  |    |
| β - les résultats  |    |
| b) diffraction des rayons X sur le sédiment chauffé jusqu'à 800°C  |    |
| α - méthode d'étude  |    |
| β - les résultats  |    |
| c) conclusion  |    |
| 4 - Etude de la fraction argileuse (< 2 μm)  | 57 |
| a) étude de la fraction argileuse aux rayons X   |    |
| α - diffraction des rayons X sur échantillons non traités.<br>Technique d'étude.   |    |
| β - diffraction des rayons X sur échantillons traités  |    |
| b) observation de la fraction argileuse au microscope électronique à<br>transmission   |    |
| α - observation de la fraction argileuse non traitée   |    |
| β - observation de la fraction argileuse après traitement  |    |
| γ - conclusion   |    |
| B - Un cas particulier : le sédiment situé au pied d'un édifice hydrothermal inactif   |    |
| 1 - Les données sédimentologiques  | 63 |
| 2 - Observation de la fraction grossière et biostratigraphie   | 64 |
| a) la fraction non biogène   |    |
| b) la fraction biogène   |    |
| 3 - Observation de la fraction argileuse (< 2 μm) aux rayons X   | 65 |
| 4 - Conclusion   | 65 |
| C - Des pièges naturels de phases hydrothermales : les modioles Bathymodiolus thermo-<br>philus                                  | 66 |
| 1 - Les sites de prélèvement des modioles  | 67 |
| 2 - Méthode d'étude  | 68 |
| 3 - Les résultats  | 69 |
| a) observation au MEB et à l'analyseur TRACOR : mise en évidence des parti-<br>cules hydrothermales                              |    |
| b) détermination de l'origine des particules : observation des sections<br>polies  |    |
| c) conclusion  |    |

|  |    |
|--|----|
| D - La répartition des sédiments dans la zone axiale   | 72 |
| 1 - <i>Le graben central : mise en évidence de deux processus de genèse des sédiments métallifères</i> | 72 |
| a) l'environnement "non hydrothermal"  |    |
| b) l'environnement hydrothermal  |    |
| c) conclusion  |    |
| 2 - <i>La sédimentation sur les flancs près de l'axe</i>   | 76 |
| 3 - <i>Conclusions</i>   | 78 |
| IV - <u>Une coupe sur le flanc ouest : les sédiments de surface</u>                                    | 79 |
| A - Les données sédimentologiques  | 79 |
| 1 - <i>Couleur, texture et teneur en eau des sédiments</i>   | 79 |
| 2 - <i>Les teneurs en CaCO<sub>3</sub></i>   | 79 |
| 3 - <i>Observation des sédiments en frottis : détermination des faciès sédimentaires</i>               | 79 |
| 4 - <i>Conclusion</i>  | 80 |
| B - Observation de la fraction grossière (> 63 µm) et biostratigraphie                                 | 80 |
| 1 - <i>Proportion de la fraction grossière</i>   | 80 |
| 2 - <i>Les constituants de la fraction grossière</i>   | 80 |
| a) la fraction non biogène   |    |
| b) la fraction biogène   |    |
| c) conclusion  |    |
| C - Etude aux rayons X du sédiment total   | 86 |
| D - Etude de la fraction argileuse (< 2 µm)  | 86 |
| E - Conclusion à l'étude des sédiments de surface sur le flanc ouest                                   | 88 |
| V - <u>Les sédiments prélevés sur les seamounts</u>  | 88 |
| A - Les échantillons des seamounts à 11°30' Nord, Sud-Est et Nord-Est (CY 84-21-1, 22-2, 23-1 et 28-1) | 88 |
| 1 - <i>Couleur, texture et teneur en eau des sédiments humides</i>                                     | 88 |
| 2 - <i>Les teneurs en CaCO<sub>3</sub></i>   | 88 |
| 3 - <i>Observation des sédiments en frottis : détermination des faciès sédimentaires</i>               | 89 |
| 4 - <i>Observation de la fraction grossière (&gt; 63 µm) et biostratigraphie</i>                       | 89 |
| a) proportion de la fraction >63 µm  |    |
| b) les constituants de la fraction grossière   |    |
| α - la fraction non biogène  |    |
| β - la fraction biogène  |    |
| 5 - <i>Etude du sédiment total aux rayons X</i>  | 91 |
| 6 - <i>Conclusion</i>  | 91 |
| B - L'échantillon CY 84-26-1 sur le seamount Clipperton  | 92 |
| C - La sédimentation sur les seamounts   | 92 |
| 1 - <i>La sédimentation sur les seamounts sud-est et à 11°30' Nord</i>                                 | 92 |
| 2 - <i>La sédimentation sur les seamounts nord-est (zone A) et Clipperton</i>                          | 95 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>VI - <u>La géochimie des sédiments de surface dans les zones A et B</u></b>  | <b>96</b>  |
| A - Méthode d'étude   | 96         |
| B - Les éléments majeurs  | 97         |
| C - Les éléments mineurs  | 100        |
| D - L'arsenic et le sélénium  | 100        |
| 1 - L'arsenic   | 100        |
| 2 - Le sélénium   | 101        |
| E - Les corrélations entre les éléments   | 103        |
| F - Le rapport (Fe+Mn)/Al   | 104        |
| G - Influence des 3 pôles : hydrothermal, détritique et basaltique dans les sédiments                                     | 107        |
| H - Conclusion  | 108        |
| <b>VII - <u>Les variations de la sédimentation en profondeur. Etude des carottes.</u></b>                                 | <b>108</b> |
| A - Etude de la carotte CY KS 1 dans la zone "axiale"   | 108        |
| 1 - Les données sédimentologiques   | 108        |
| a) couleur des sédiments humides  |            |
| b) texture des sédiments  |            |
| c) les teneurs en CaCO <sub>3</sub>   |            |
| d) les facies sédimentaires observés : étude des frottis  |            |
| 2 - Observation de la fraction grossière  | 109        |
| 3 - Conclusion  | 109        |
| B - Etude des carottes CL KS 1, CL KS 2 et CL KS 3 sur le flanc ouest   | 110        |
| 1 - Couleur et texture des sédiments : Les différentes unités lithologiques   | 114        |
| 2 - Les teneurs en CaCO <sub>3</sub>  | 114        |
| 3 - Observation des sédiments en frottis et observation des fractions grossières  | 114        |
| 4 - Etude du sédiment total aux rayons X  | 115        |
| 5 - Etude de la fraction argileuse  | 115        |
| a) étude de la fraction argileuse aux rayons X  |            |
| b) étude de la fraction argileuse au microscope électronique à transmission   |            |
| 6 - Conclusion à l'étude sédimentologique des carottes du flanc ouest   | 116        |
| C - La géochimie des sédiments dans les carottes  | 117        |
| 1 - Dans la zone "axiale" : la carotte CY KS 1  | 117        |
| 2 - Sur le flanc ouest : les carottes CL KS 2 et CL KS 3  | 119        |
| 3 - Conclusion  | 121        |
| <b>VIII - <u>Discussion et conclusion sur la sédimentation à 12°50' N et 11°30' N sur la dorsale du Pacifique Est</u></b> | <b>122</b> |
| 1 - Trois types de sédiments métallifères   | 122        |
| a) les sédiments liés aux sites hydrothermaux inactifs  |            |
| b) les sédiments "caractéristiques" : les plus répandus sur la zone   |            |
| c) le sédiment CY 84-26-1   |            |
| 2 - Un modèle pour la formation des sédiments métallifères à 12°50' N et 11°30' N sur la dorsale du Pacifique Est         | 123        |

|   |     |
|---|-----|
| <b>CHAPITRE III - LES SEDIMENTS METALLIFERES DU PACIFIQUE FORÉS PAR LE GLOMAR CHALLENGER A LA</b><br><b><u>BASE DE LA COLONNE SEDIMENTAIRE</u></b>  | 131 |
| <br><b>Introduction</b>   |     |
| <b>I - Répartition dans le Pacifique des sédiments métallifères forés par le Glomar Challenger au-dessus du plancher océanique</b>  | 131 |
| <b>II - Etude de quelques sédiments métallifères de base dans le Pacifique</b>  | 135 |
| <b>A - Etude sédimentologique</b>   | 135 |
| 1 - <i>Couleur des sédiments humides</i>  | 135 |
| 2 - <i>Texture des sédiments</i>  | 137 |
| 3 - <i>Etude du sédiment total en frottis et détermination des facies sédimentaires</i>   | 137 |
| a) les constituants des sédiments   |     |
| α - la fraction biogène   |     |
| β - la fraction non biogène   |     |
| b) les facies sédimentaires   |     |
| 4 - <i>Etude de la fraction grossière (&gt; 63 μm)</i>  | 139 |
| a) pourcentage de la fraction grossière   |     |
| b) les constituants de la fraction grossière  |     |
| α - la fraction biogène   |     |
| β - la fraction non biogène   |     |
| 5 - <i>Conclusion</i>   | 144 |
| <b>B - Etude du sédiment total aux rayons X</b>   | 145 |
| <b>C - Etude de la fraction argileuse (&lt; 2 μm)</b>   | 146 |
| 1 - <i>Les diffractogrammes de rayons X sur agrégats orientés</i>   | 146 |
| 2 - <i>Etude de la fraction argileuse au microscope électronique à transmission</i>   | 148 |
| 3 - <i>Conclusion à l'étude de la fraction argileuse des sédiments métallifères de base forés par le Glomar Challenger et comparaison avec les sédiments qui se forment actuellement à l'axe de la dorsale à 12°50' N et 11°30' N</i> | 149 |
| <b>D - La géochimie des sédiments métallifères forés à la base de la colonne sédimentaire</b>   | 151 |
| 1 - <i>Les sédiments métallifères de base par rapport aux argiles pélagiques du Pacifique (Ppc)</i>   | 151 |
| 2 - <i>Les corrélations entre les éléments majeurs et mineurs</i>   | 154 |
| a) trois groupes d'éléments   |     |
| b) l'arsenic et le sélénium   |     |
| 3 - <i>Le rapport (Fe+Mn)/Al</i>  | 157 |
| 4 - <i>Influence des trois pôles : hydrothermal, détritique et basaltique - Diagramme de Boström (1970, 1973)</i>   | 157 |
| 5 - <i>Conclusion</i>   | 159 |
| <b>E - Discussion et conclusion à l'étude des sédiments métallifères forés à la base de la colonne sédimentaire dans le Pacifique</b>   | 160 |

|   |     |
|---|-----|
| CHAPITRE IV - <u>LA DEPRESSION DE BAUER : ETUDE DE QUELQUES SEDIMENTS DE SURFACE ET JUSQU'A 210 cm DE PROFONDEUR</u>        | 163 |
| I - <u>Caractéristiques générales de la dépression de Bauer et localisation des échantillons</u>                            | 164 |
| II - <u>Les échantillons de sédiment en surface</u>   | 165 |
| A - Les données sédimentologiques   | 165 |
| B - Etude des sédiments en frottis : les facies sédimentaires   | 166 |
| C - Etude de la fraction grossière (> 63 µm)  | 166 |
| 1 - <i>La fraction biogène</i>  | 166 |
| 2 - <i>La fraction non biogène</i>  | 167 |
| D - Etude du sédiment total aux rayons X  | 167 |
| E - Etude de la fraction argileuse (< 2 µm)   | 168 |
| 1 - <i>Etude des diagrammes de rayons X</i>   | 168 |
| 2 - <i>Etude de la fraction argileuse au microscope électronique à transmission</i>   | 168 |
| F - La géochimie des sédiments de surface dans la dépression de Bauer   | 169 |
| 1 - <i>Les éléments majeurs</i>   | 169 |
| 2 - <i>Les éléments mineurs</i>   | 170 |
| 3 - <i>Influence des trois pôles basaltique, terrigène et hydrothermal</i>  | 171 |
| G - Conclusion  | 174 |
| III - <u>Etude des deux premiers mètres de sédiments : la carotte Geometep-I-101 K</u>                                      | 174 |
| A - Les données sédimentologiques   | 174 |
| B - Etude des sédiments en frottis  | 175 |
| C - Observation de la fraction grossière (> 63 µm)  | 175 |
| 1 - <i>Les constituants biogènes</i>  | 175 |
| 2 - <i>Les constituants non biogènes</i>  | 176 |
| D - Etude de la fraction argileuse (< 63 µm)  | 178 |
| E - La composition chimique des sédiments de la carotte 101 K   | 179 |
| 1 - <i>Les éléments majeurs</i>   | 179 |
| 2 - <i>Les éléments mineurs</i>   | 179 |
| 3 - <i>Le diagramme Fe/Ti en fonction de Al/(Al+Fe+Mn)</i>  | 181 |
| F - Conclusion  | 181 |
| IV - <u>Discussion et conclusion</u>  | 182 |
| CHAPITRE V - <u>UN EXEMPLE DE SEDIMENTS METALLIFERES ASSOCIES A UN COMPLEXE OPHIOLITIQUE : LES TERRES D'OMBRE DE CHYPRE</u> | 187 |
| I - <u>Caractéristiques générales du complexe ophiolitique du Troodos</u>   | 187 |
| II - <u>Localisation et description des échantillons de terres d'ombre</u>  | 190 |

|  |     |
|--|-----|
| III - <u>Composition minéralogique des terres d'ombre</u>  | 191 |
| A - Les diagrammes de rayons X sur sédiment total  | 191 |
| B - Les diagrammes de rayons X sur la fraction argileuse   | 192 |
| IV - <u>Etude géochimique des terres d'ombre</u>   | 192 |
| V - <u>Discussion et conclusion</u>  | 199 |
| <br>   |     |
| CHAPITRE VI - <u>DES SEDIMENTS METALLIFERES ASSOCIES AUX TOUS PREMIERS STADES D'OUVERTURE OCEANIQUE : LA FOSSE SHABAN EN MER ROUGE</u>   | 203 |
| <br>   |     |
| I - <u>Caractéristiques générales de la fosse Shaban</u>   | 204 |
| II - <u>Etude de la carotte TM KS 1</u>  | 205 |
| A - Caractéristiques principales des sédiments "non métallifères" de la carotte TM KS 1  | 207 |
| B - Etude des sédiments métallifères : l'Unité VI (602-604 cm) de la carotte TM KS 1   | 212 |
| 1 - <i>Couleur, texture et teneur en CaCO<sub>3</sub> des sédiments métallifères</i>   | 212 |
| 2 - <i>Observation des sédiments en frottis : détermination des facies sédimentaires</i>   | 212 |
| 3 - <i>Etude de la fraction grossière (&gt; 63 µm)</i>   | 213 |
| 4 - <i>Etude des sédiments métallifères aux rayons X</i>   | 213 |
| 5 - <i>Observation de la fraction argileuse (&lt; 2 µm)</i>  | 214 |
| 6 - <i>Géochimie des sédiments métallifères</i>  | 215 |
| C - Conclusion   | 217 |
| 1 - <i>Les unités sédimentaires "non métallifères"</i>   | 217 |
| 2 - <i>L'Unité VI (602-604 cm) : les sédiments métallifères</i>  | 218 |
| 3 - <i>Conclusion</i>  | 219 |
| <br>   |     |
| <u>CONCLUSION GENERALE</u>   | 221 |
| <br>   |     |
| I - <u>Les sédiments métallifères actuels associés aux phénomènes hydrothermaux à l'axe de la dorsale du Pacifique Est vers 13° Nord</u> | 222 |
| A - Les sédiments les plus communs   | 222 |
| B - Les sédiments associés aux édifices hydrothermaux inactifs   | 225 |
| II - <u>Des sédiments particuliers situés au sommet du seamount Clipperton</u>   | 225 |
| III - <u>Autres exemples de sédiments métallifères</u>   | 226 |
| A - Les sédiments métallifères hydrothermaux   | 226 |
| B - Les sédiments métallifères à genèses multiples   | 227 |
| IV - <u>Le sélénium : marqueur d'un hydrothermalisme récent</u>  | 227 |
| V - <u>Evolution diagénétique des sédiments métallifères</u>   | 228 |
| <br>   |     |
| BIBLIOGRAPHIE  |     |
| PLANCHES PHOTOS  |     |
| ANNEXES  |     |

# CHAPITRE I

LE CONCEPT DE " SEDIMENT METALLIFERE "

**CHAPITRE I**  
**LE CONCEPT DE "SEDIMENT METALLIFERE"**

**A - DES "ARGILES ROUGES RICHES EN FER" et des "VASES A GLOBIGERINES FERRUGINEUSES" (cf Tableau I)**

Les analyses chimiques des sédiments de type "argiles rouges" prélevés durant la campagne du "Challenger" (1873-1876) indiquent une teneur moyenne en Fe de 10,38 % et en Mn de 1,02 % (Murray et Renard, 1891). Cela conduit Caspari (dans Murray et Lee, 1909) à signaler la présence d'"argiles rouges riches en fer" dans des sédiments superficiels prélevés à l'emplacement de la dépression de Bauer (Fe = 16,6 %, Mn = 3,10 %).

| Echant. | (%)   |      |       |      |      |      |       |      |      |      | (ppm) |     |     |     |     |
|---------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|-----|-----|-----|-----|
|         | Si    | Al   | Fe    | Ti   | Mn   | Mg   | Ca    | K    | Na   | P    | Ni    | Co  | Cu  | V   | Cr  |
| 1       | 25,28 | 8,70 | 10,38 |      | 1,02 | 1,06 | 0,52  | 1,34 | 1,01 | 0,15 |       |     |     |     |     |
| 2       | 21,11 | 3,39 | 16,60 |      | 3,10 | 3,49 | 0,79  | 1,34 | 0,70 |      |       |     |     |     |     |
| 3       | 23,00 | 8,38 | 5,49  | 0,47 | 0,88 | 1,56 | 2,92  | 2,16 | 1,46 | 0,07 |       |     |     |     |     |
| 4       | 7,73  | 2,87 | 10,47 | 0,17 | 3,16 | 0,98 | 17,20 | 0,71 | 0,72 | 0,10 |       |     |     |     |     |
| 5       | 25,58 | 8,80 | 5,39  | 0,47 | 1,30 | 2,04 | 0,51  | 2,24 | 0,96 |      | 205   |     | 720 |     |     |
| 6       |       |      | 5,07  | 0,45 | 0,48 |      |       |      |      | 0,10 | 211   | 101 | 323 | 215 | 102 |

- 1 - Moyenne des analyses chimiques des "argiles rouges" du "Challenger" (Murray et Renard, 1891)
- 2 - Composition d'une argile rouge" riche en fer de la dépression de Bauer , d'après Caspari dans Murray et Lee (1909)
- 3 - Composition d'une argile rouge" du Pacifique Nord (échantillon n°62) d'après Revelle (1944)
- 4 - Composition d'une "vase à globigérines ferrugineuses" du Pacifique Sud (échantillon n°22) d'après Revelle (1944)
- 5 - Composition moyenne d'une argile pélagique du Pacifique Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Ti, Na et K d'après Landergren (1964). Cu d'après Goldberg et Arrhenius (1958) dans Bischoff et Rosenbauer (1977)
- 6 - Composition moyenne d'une argile pélagique du Pacifique (Cronan, 1969)

**Tableau I : Compositions moyennes d'argiles rouges et argiles pélagiques du Pacifique**

- En 1944, Revelle décrit sous le terme de "vases à globigérines ferrugineuses" des sédiments également prélevés dans la dépression de Bauer et qui sont caractérisés par la présence de particules d'oxydes de fer assez abondantes et surtout par un rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  faible, ce qui rapproche la fraction non calcareuse de ces dépôts de la composition des latérites.

Revelle propose 3 origines :

- Matériel issu de sols latéritiques caractéristiques des tropiques, apporté en suspension à partir du continent et qui se dépose avec les foraminifères pélagiques,

- Résidu de l'altération sous-marine de dépôts volcaniques ou autres, dans des conditions alcalines régnant dans les eaux interstitielles saturées en  $\text{CaCO}_3$  des vases à Globigérines,

- Précipitation à partir de solutions, ou de suspensions colloïdales, d'oxydes de fer et de manganèse dans des conditions alcalines spécialement favorables, et possibilité pour l'aluminium de rester libre.

B - BOSTRÖM ET PETERSON (1966, 1969) : DES "SEDIMENTS RICHES EN Fe-Mn ET PAUVRES EN Al", D'ORIGINE HYDROTHERMALE (cf. Tableau II)

Boström et Peterson, en 1966 puis en 1969, décrivent des sédiments prélevés le long de 2 coupes à travers la dorsale du Pacifique Est ( $6^\circ$  Nord et  $12^\circ$  à  $16^\circ$  Sud). Les sédiments prélevés à l'axe sont singuliers : "Ils contiennent un précipité d'oxydes métalliques, amorphe aux rayons X, brun et abondant. Plutôt qu'un enrobage ou une imprégnation d'un autre grain minéral, comme il est courant dans les sédiments classiques brun-rouge des grands fonds, il s'agit d'un matériel indépendant, très finement disséminé ou bien formant seul des

agrégats. On peut stabiliser une suspension de ce matériel qui met plusieurs mois à se redéposer". Les analyses chimiques montrent qu'ils sont enrichis en Fe, Mn, Cu, Cr, Ni et Pb. Boström et Peterson attribuent cet enrichissement à l'hydrothermalisme qui, selon eux, doit exister, en relation avec les mesures élevées de flux de chaleur.

Puis à travers plusieurs publications, ils précisent les caractéristiques et le mode de genèse de ces sédiments particuliers :

- Boström *et al.* (1969), caractérisent ces sédiments à l'échelle de l'océan mondial. Ils établissent une relation entre la présence de la dorsale et les valeurs faibles du rapport  $(Al/Al + Fe + Mn) \times 100$  (cf. fig. 1). Ils soulignent leur richesse en Fe, Mn, As, Hg, B, Cd, V, Ba, Pb, Cr, H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>.

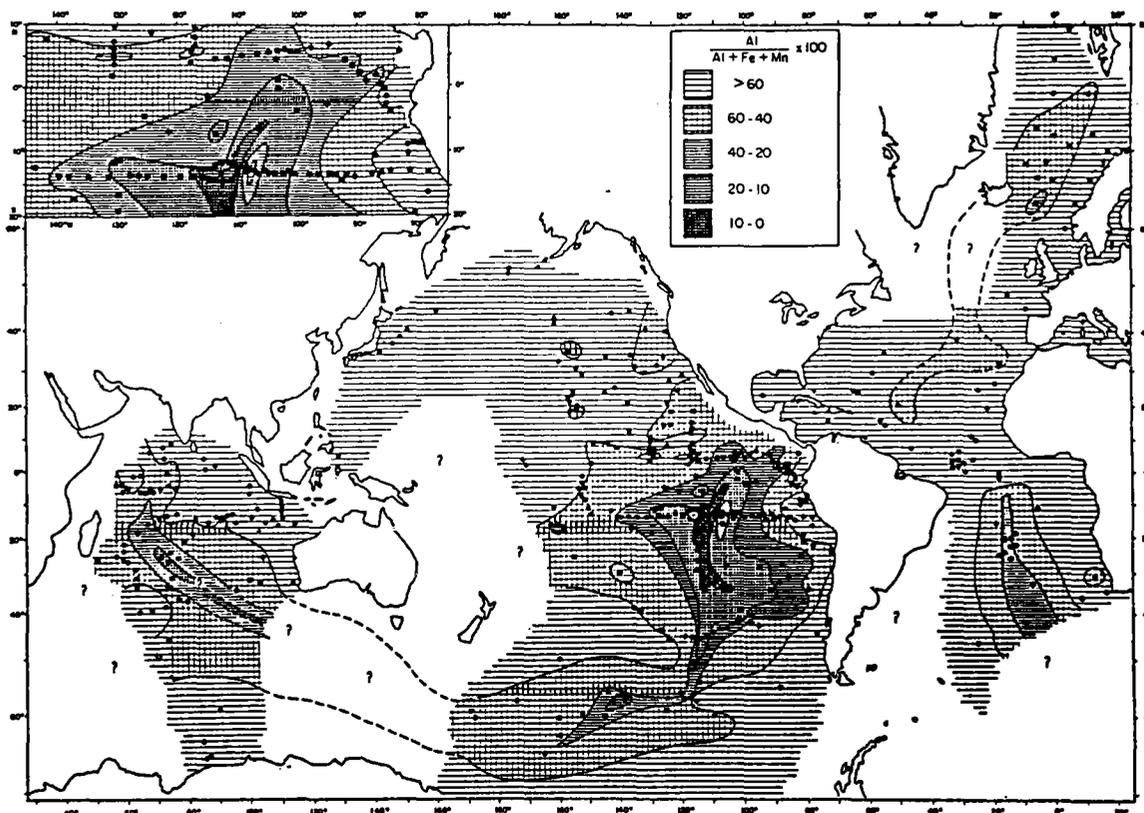
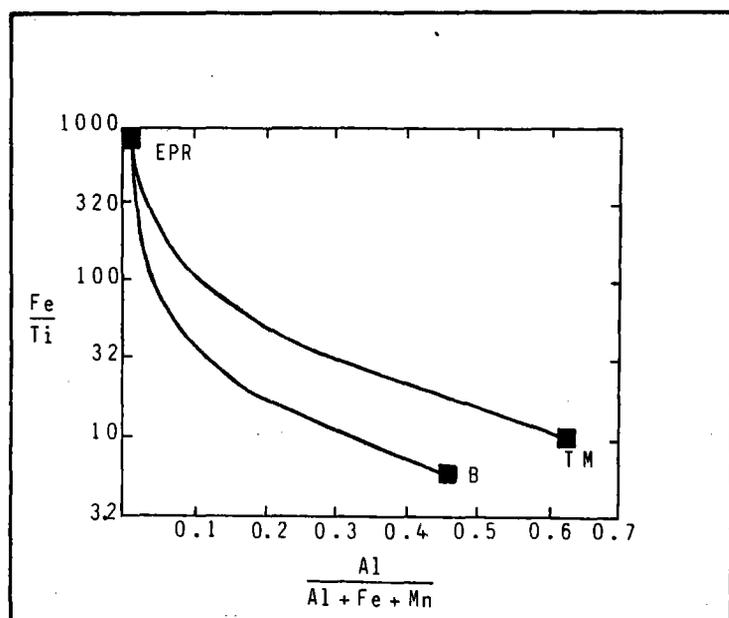


Fig. 1 : Valeur du rapport  $(Al/Al+Fe+Mn) \times 100$  dans les sédiments océaniques. D'après Boström *et al.*, (1969).

- Boström et Fischer (1969) analysent 57 échantillons de sédiments du Pacifique Est et observent que les valeurs les plus élevées en Hg, coïncident avec l'axe de la dorsale.

- Boström et Valdes (1969) attribuent l'enrichissement en As des sédiments sur les dorsales actives aux phénomènes hydrothermaux.

- Boström (1970, 1973) considère que le passage entre les sédiments d'origines hydrothermale, basaltique et terrigène, se fait progressivement. Les sédiments se répartissent ainsi le long de 2 courbes entre ces 3 pôles obtenus à partir des rapports  $Fe/Ti$  et  $Al/(Al + Fe + Mn)$  dans lesquels Ti et Al représentent respectivement les apports basaltique et terrigène, et Fe, Mn l'apport hydrothermal (cf fig. 2). Ainsi, dès le début, la notion de sédiment métallifère est associée à l'hydrothermalisme : ce phénomène entraînant la formation de précipités riches en métaux.



**Fig. 2** : Influence des 3 pôles hydrothermal (EPR), basaltique (B) et terrigène (TM) dans les sédiments océaniques. D'après Boström (1970, 1973).

Le problème de la dilution des sédiments par les organismes calcaires contraint ces auteurs à recalculer les analyses chimiques à  $\text{CaCO}_3 = 0$  et à caractériser ces sédiments à l'aide de rapports entre éléments et non pas en valeurs absolues.

Les teneurs très faibles en Al sont interprétées comme le résultat d'un apport continental très faible.

### C - DES MISES EN EVIDENCE MULTIPLES DE "SEDIMENTS METALLIFERES"

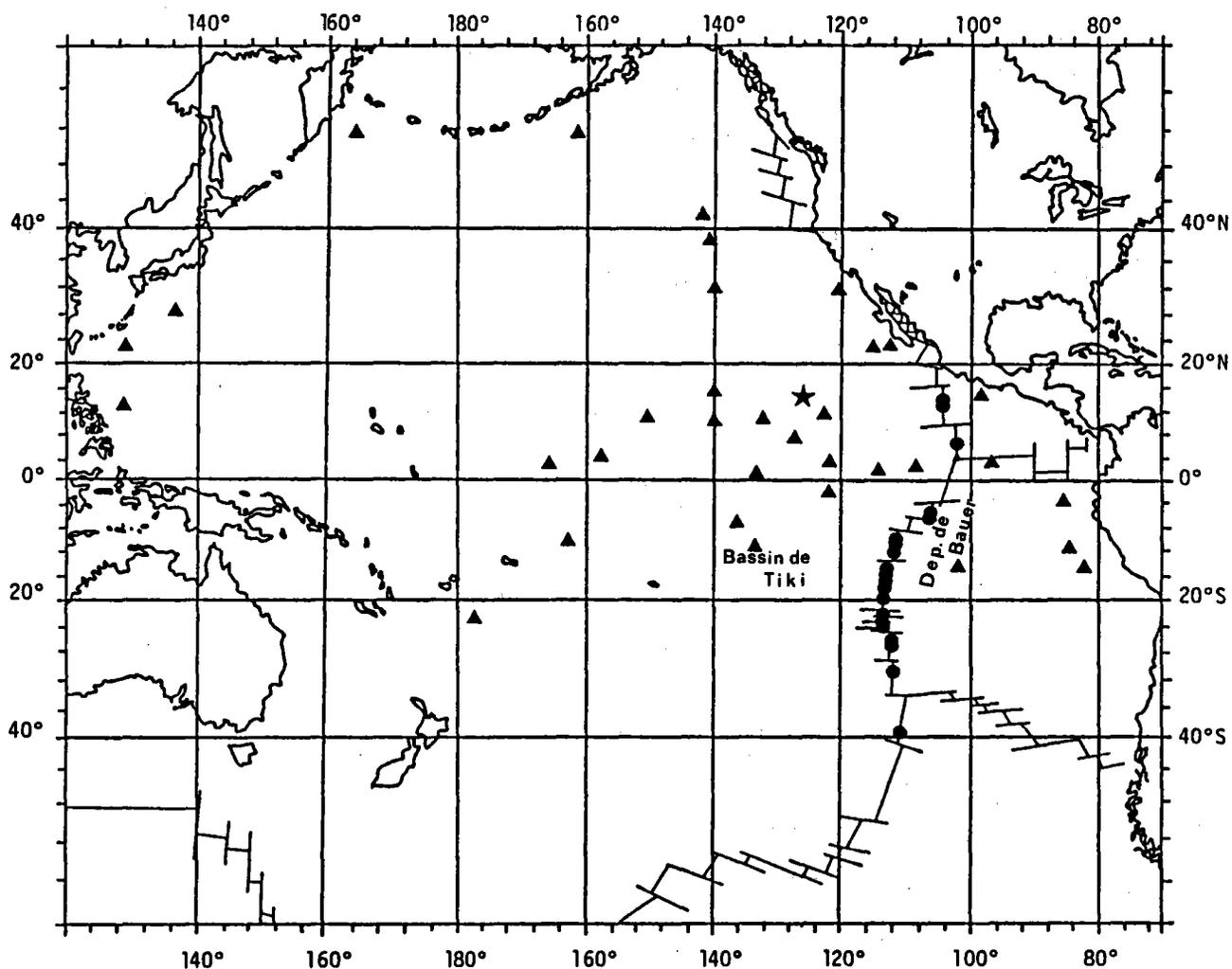
A partir de 1969, de nombreuses publications et de nombreux travaux sont consacrés à des sédiments ayant certains caractères proches de ceux décrits par Boström et Peterson en 1969. Le terme "sédiment métallifère" est souvent utilisé.

On va se borner ici à décrire rapidement les principaux domaines de recherche, dans le but d'en dégager les caractéristiques minéralogiques et chimiques, ainsi que de discuter les modèles de genèse proposés par les différents auteurs.

#### 1 - LES "SEDIMENTS METALLIFERES" DANS LE PACIFIQUE (cf. fig. 3)

Ils ont été décrits principalement :

- sur la dorsale du Pacifique Est,
- à la base de la colonne sédimentaire, dans de nombreux endroits du Pacifique,
- dans la dépression de Bauer,
- dans le bassin de Tiki ,
- en subsurface, à 2.400 km à l'ouest de la dorsale dans le Pacifique Nord, dans la zone DOMES - C.



**Fig. 3** : Carte de répartition des sédiments métallifères dans le Pacifique :

- à l'axe de la dorsale du Pacifique Est
- ▲ à la base de la colonne sédimentaire (forages DSDP)
- ★ en surface dans la zone DOMES C

a) La dorsale du Pacifique Est

C'est dans le Pacifique Sud, entre 6° et 39°S qu'ont été décrits tous les sédiments métallifères (Boström et Peterson, 1966, 1969 ; Bender *et al.*, 1971 ; Bischoff et Sayles, 1972 ; Piper, 1973 ; Dymond

et Veeh, 1975 ; Heath et Dymond, 1977 ; Dymond, 1981 ; Cronan et Varnavas, 1981 ; Marchig et Gundlach, 1982 ; Bäcker *et al.*, 1985...) prélevés à l'axe de la dorsale. Dans le Pacifique Nord, n'ont été signalés que ceux décrits par Boström et Peterson en 1966 à 6°N, ceux échantillonnés durant la campagne GEOMETEP (1982-1983) et ceux prélevés durant les missions CLIPPERTON (1981), CYATHERM (1982) et CYARISE (1984), et qui seront analysés dans ce travail.

Le bilan des caractéristiques minéralogiques et géochimiques à partir de ces différents travaux met en évidence :

- des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  très élevées : 50 à 90 % (cf. Tableau II). Ce sont des vases carbonatées. La crête de la dorsale du Pacifique Est est, en effet située au-dessus de la profondeur de compensation de la calcite (CCD) et au-dessus de la lysocline (Cronan, 1980).

- la fraction non carbonatée semble à dominante amorphe et constituée par des oxyhydroxydes de fer et manganèse (Bender *et al.*, 1971).

- les phases cristallisées sont rares : Goethite,  $\delta\text{-MnO}_2$  et des smectites riches en fer (Dymond *et al.*, 1973 ; Heath et Dymond, 1977 ; Mac Murtry et Yeh, 1981).

- l'apport détritique est très faible (Bender *et al.*, 1971 ; Cronan, 1980) ce qui se traduit par des valeurs basses en Al.

- les analyses chimiques sont analogues à celles de Boström et Peterson (1969), cependant, certains auteurs observent des faits particuliers et notamment Heath et Dymond (1977) ; Dymond (1981) et Cronan et Varnavas (1981), qui indiquent des teneurs élevées en Cu et Zn dans des sédiments de la dorsale entre 6° et 24° Sud, et au niveau de l'intersection de la zone de fracture de 9° Sud avec la dorsale. Piper (1973), quant à lui, signale un enrichissement en cobalt au niveau de l'axe à 39° Sud (cf. Tableau II).

| Auteurs                                 | nom de l'échantillon | Latitude  | Longitude   | Profondeur de carotte (cm) | % CaCO <sub>3</sub> | Si   | Si*   | Al     | Al*  | Fe   | Fe*   |      |
|---|----------------------|-----------|-------------|----------------------------|---------------------|------|-------|--------|------|------|-------|------|
| Boström et Peterson (1969)              | Ris 63               | 12°39'S   | 110°00'W    | 30-70                      | 90                  | 0,5  | 4,7   | 0,1    | 1,3  | 0,6  | 6,0   |      |
|   | Ris 65               | 12°33'S   | 111°12'W    | 30-70                      | 77                  | 1,9  | 8,4   | 0,2    | 0,7  | 4,5  | 20,0  |      |
|   | Ris 66               | 12°30'S   | 112°37'W    | 30-70                      | 82                  | 0,9  | 5,1   | 0,1    | 0,6  | 2,9  | 16,5  |      |
|   | Ris 68               | 13°36'S   | 112°42'W    | 30-70                      | 66                  | 2,1  | 6,0   | 0,08   | 0,2  | 7,1  | 21,1  |      |
|   | Ris 69               | 14°41'S   | 113°29'W    | 30-70                      | 74                  | 1,6  | 6,0   | 0,1    | 0,5  | 5,9  | 22,6  |      |
|   | Ris 71               | 14°15'S   | 113°50'W    | 30-70                      | 80                  | 1,2  | 5,1   | 0,2    | 0,8  | 4,5  | 22,2  |      |
|   | Ris 72               | 14°18'S   | 115°37'W    | 30-70                      | 86                  | 0,7  | 5,1   | 0,1    | 0,9  | 2,1  | 14,7  |      |
|   | Ris 73               | 14°14'S   | 117°34'W    | 30-70                      | 88                  | 0,5  | 4,2   | 0,1    | 1,1  | 1,0  | 8,5   |      |
|   | Ris 74               | 14°00'S   | 119°36'W    | 38-70                      | 89                  | 0,5  | 4,2   | 0,2    | 1,7  | 0,9  | 8,2   |      |
| Cronan et Varnavas (1981)               | SH 1525              | 8°53.89'S | 108°15.66'W | Surface                    | 72-82               |      |       |        | 0,4  |      | 13,54 |      |
|   | SH 1547              | 9°04.94'S | 108°24.53'W | "                          | 81-64               |      |       |        | 0,93 |      | 13,73 |      |
| Dymond et Veeh (1975)                   | Y71-7-45 P           | 11°05'S   | 110°06'W    | 5-10                       |                     | 0,56 |       | 0,0780 |      | 1,26 |       |      |
|   | "                    | "         | "           | 10-15                      | 87                  |      |       |        |      |      |       |      |
|   | "                    | "         | "           | 50-55                      | 89                  |      |       |        |      |      |       |      |
|   | "                    | "         | "           | 92-97                      | 91                  |      |       |        |      |      |       |      |
|   | "                    | "         | "           | 97-102                     |                     | 0,9  |       | 0,1020 |      | 1,66 |       |      |
|   | "                    | "         | "           | 142-147                    | 86                  |      |       |        |      |      |       |      |
|   | "                    | "         | "           | 192-197                    | 91                  |      |       |        |      |      |       |      |
|   | Y71-7-45P            | "         | "           | 205-210                    |                     |      |       | 0,1170 |      | 1,53 |       |      |
|   | "                    | "         | "           | 260-265                    | 90                  |      |       |        |      |      |       |      |
|   | "                    | "         | "           | 300-305                    | 89                  |      |       |        |      |      |       |      |
| Bender <i>et al.</i> (1971)             | V19-54               | 17°02'S   | 113°54'W    |                            | 65                  | 2,40 |       | < 0,2  |      | 10,5 |       |      |
|   |                      |           |             |                            |                     |      |       |        |      |      |       |      |
| Heath et Dymond (1977)<br>Dymond (1981) | Y71-9-93P            | 6°45'S    | 106°19'W    | 5-10                       | 84,3                |      | 26,39 |        | 0,87 |      | 5,77  |      |
|   | Y71-9-97G            | 6°36'S    | 106°48'W    | 5-10                       | 81,3                |      | 24,46 |        | 0,60 |      | 6,32  |      |
|   | KK71-115GC-015       | 10°33'S   | 110°36'W    | 5-10                       | 68,4                |      | 7,96  |        | 0,25 |      | 27    |      |
|   | KK71-11FFC-177       | 10°21'S   | 110°49'W    | 5-9                        | 72,9                |      | 9,46  |        | 0,28 |      | 25,94 |      |
|   | AMPH-32GV            | 18°24'S   | 114°57'W    | 19-24                      | 58,6                |      | 4,55  |        | 0,24 |      | 31,91 |      |
|   | V19-54               | 17°02'S   | 113°54'W    | 25-30                      | 54,8                |      | 5,40  |        | 0,21 |      | 33,41 |      |
|   | RC9-99               | 24°36'S   | 115°27'W    | 5-10                       | 83,6                |      | 4,44  |        | 1,43 |      | 26,28 |      |
|   | V19-53               | 17°01'S   | 113°31'W    | 11-16                      | 53,7                |      | 5,83  |        | 0,22 |      | 33,23 |      |
|   | RC13-84              | 18°48'S   | 114°54'W    | 4-9                        | 85,6                |      | 5,22  |        | 0,91 |      | 33,61 |      |
| Bäcker <i>et al.</i> (1985)             | 189K                 | 18°5'S    |             | 0-10                       | 80,3                | 0,9  | 4,6   | 0,10   | 0,51 | 3,7  | 18,8  |      |
|   | "                    | "         |             | 50-280                     | 64,1                | 1,8  | 5,0   | 0,27   | 0,75 | 7,4  | 20,6  |      |
|   | 190K                 | "         |             | 0-10                       | 71,0                | 1,5  | 5,2   | 0,12   | 0,41 | 5,5  | 18,9  |      |
|   | "                    | "         |             | 50-200                     | 60,7                | 1,9  | 4,8   | 0,30   | 0,76 | 7,6  | 19,3  |      |
|   | 188GR                | "         |             | 0-24                       | 43,2                | 3,7  | 6,5   | 0,60   | 1,06 | 9,4  | 16,5  |      |
|   | 166D                 | "         |             | 0                          | 28,6                | 2,8  | 3,9   | 0,16   | 0,22 | 12,5 | 17,5  |      |
|   | 173GR                | "         |             | 0                          | 19,1                | 11,7 | 14,7  | 2,5    | 3,10 | 13,0 | 16,1  |      |
|   | 174K                 | "         |             | 0-10                       | 41,1                | 2,6  | 4,4   | 0,12   | 0,20 | 11,1 | 18,9  |      |
|   | "                    | "         |             | 10-280                     | 45,5                | 2,7  | 4,9   | 0,26   | 0,48 | 10,8 | 19,8  |      |
|   | 167K                 | "         |             | 0-10                       | 44,4                | 2,4  | 4,3   | 0,08   | 0,14 | 10,8 | 19,4  |      |
|   | "                    | "         |             | 50-270                     | 43,6                | 3,4  | 6,0   | 0,57   | 1,01 | 10,9 | 19,3  |      |
|   | 192K                 | "         |             | 0-10                       | 48,7                | 2,3  | 4,5   | 0,11   | 0,21 | 10,1 | 19,6  |      |
|   | "                    | "         |             | 50-110                     | 53,7                | 1,8  | 3,9   | 0,15   | 0,32 | 9,9  | 21,4  |      |
|   | Piper (1973)         | A-32      | 39°02'S     | 110°31'W                   | Surface             | 87   |       |        | 0,14 |      |       | 2,91 |
|   |                      | A-33      | 38°58'S     | 111°21'W                   | "                   | 74   |       |        | 0,16 |      |       | 6,08 |
| A-34                                    |                      | 39°00'S   | 111°51'W    | "                          | 85                  |      |       | 0,18   |      |      | 3,76  |      |
| A-35                                    |                      | 39°01'S   | 112°26'W    | "                          | 88                  |      |       | 0,09   |      |      | 1,39  |      |

Tableau II : Composition de quelques sédiments métallifères à l'axe de la dorsale

| Mn    | Mn* | Ti    | <sup>+</sup> (2)<br>Ti* | (ppm)+<br>Cu | Cu* | Zn  | Zn* | Cr    | Cr* | Ni  | Ni* | Co    | Co* | As  | As* | Profondeur (m) |  |  |  |       |  |  |  |       |
|-------|-----|-------|-------------------------|--------------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|----------------|--|--|--|-------|--|--|--|-------|
| 0,1   | 1,0 | 0,003 | 0,03                    | 40           | 400 | 35  | 350 | 9     | 90  | 39  | 390 | 15    | 150 | 3   | 30  | 3.135          |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 1,5   | 6,7 | 0,006 | 0,027                   | 160          | 710 | 110 | 490 | 12    | 53  | 105 | 470 | 25    | 110 | 3   | 13  | 3.110          |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 0,9   | 5,1 | 0,003 | 0,018                   | 130          | 740 | 60  | 340 | 4     | 23  | 75  | 430 | 15    | 85  | 22  | 120 | 3.165          |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 2,3   | 6,8 | 0,009 | 0,027                   | 250          | 740 | 120 | 360 | 22    | 66  | 140 | 420 | 25    | 75  | 48  | 140 | 2.990          |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 2,3   | 8,8 | 0,006 | 0,024                   | 225          | 860 | 75  | 290 | 12    | 46  | 135 | 520 | 25    | 96  | 104 | 400 | 3.010          |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 1,6   | 7,9 | 0,006 | 0,03                    | 185          | 910 | 75  | 370 | 10    | 49  | 100 | 490 | 25    | 120 | 37  | 180 | 3.040          |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 0,3   | 3,5 | 0,003 | 0,021                   | 100          | 700 | 75  | 530 | 9     | 63  | 55  | 390 | 20    | 140 | 12  | 84  | 3.250          |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 0,2   | 1,7 | 0,003 | 0,024                   | 60           | 510 | 40  | 340 | 9     | 76  | 30  | 250 | 15    | 130 | 6   | 51  | 3.440          |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 0,2   | 1,8 | 0,003 | 0,027                   | 65           | 590 | 25  | 230 | 4     | 36  | 40  | 360 | 25    | 230 | 7   | 63  | 3.685          |  |  |  |       |  |  |  |       |
|       |     |       |                         | 4,49         |     |     |     | 728   |     |     |     | 331   |     |     |     | 533            |  |  |  | 3.083 |  |  |  |       |
|       |     |       |                         | 3,54         |     |     |     | 632   |     |     |     | 321   |     |     |     | 321            |  |  |  | 3.290 |  |  |  |       |
| 1,97  |     |       |                         | 67           |     |     |     | 31    |     |     |     | 146   |     |     |     |                |  |  |  | 3.096 |  |  |  |       |
|       |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     |       |     |     |     |                |  |  |  | "     |  |  |  |       |
|       |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     |       |     |     |     |                |  |  |  | "     |  |  |  |       |
| 0,55  |     |       |                         | 89           |     |     |     | 31    |     |     |     | 26    |     |     |     |                |  |  |  | "     |  |  |  |       |
|       |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     |       |     |     |     |                |  |  |  | "     |  |  |  |       |
| 0,39  |     |       |                         |              |     |     |     | 29    |     |     |     |       |     |     |     |                |  |  |  | "     |  |  |  |       |
|       |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     |       |     |     |     |                |  |  |  | "     |  |  |  |       |
| 0,67  |     |       |                         |              |     |     |     | 38    |     |     |     |       |     |     |     |                |  |  |  | "     |  |  |  |       |
|       |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     |       |     |     |     |                |  |  |  | "     |  |  |  |       |
| 3,3   |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     | 198   |     |     |     |                |  |  |  | 2.830 |  |  |  |       |
|       |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     |       |     |     |     |                |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 1,55  |     |       |                         |              |     |     |     | 646   |     |     |     | 344   |     |     |     | 215            |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 1,18  |     |       |                         |              |     |     |     | 473   |     |     |     | 257   |     |     |     | 209            |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 9,83  |     |       |                         |              |     |     |     | 1.367 |     |     |     | 559   |     |     |     | 507            |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 9,23  |     |       |                         |              |     |     |     | 1.300 |     |     |     | 560   |     |     |     | 514            |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 11,00 |     |       |                         |              |     |     |     | 1.392 |     |     |     | 596   |     |     |     | 661            |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 9,80  |     |       |                         |              |     |     |     | 1.394 |     |     |     |       |     |     |     | 517            |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 9,11  |     |       |                         |              |     |     |     | 1.400 |     |     |     | 587   |     |     |     | 805            |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 11,69 |     |       |                         |              |     |     |     | 1.697 |     |     |     |       |     |     |     | 533            |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 9,8   |     |       |                         |              |     |     |     | 1.603 |     |     |     | 668   |     |     |     | 953            |  |  |  |       |  |  |  |       |
|       |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     |       |     |     |     |                |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 1,2   |     |       |                         | 6,1          |     |     |     | 230   |     |     |     | 1.170 |     |     |     | 100            |  |  |  | 510   |  |  |  | 3.324 |
| 1,9   |     |       |                         | 5,3          |     |     |     | 340   |     |     |     | 950   |     |     |     | 115            |  |  |  | 320   |  |  |  | "     |
| 1,7   |     |       |                         | 5,8          |     |     |     | 320   |     |     |     | 1.100 |     |     |     | 105            |  |  |  | 360   |  |  |  | 3.140 |
| 2,3   |     |       |                         | 5,8          |     |     |     | 400   |     |     |     | 1.020 |     |     |     | 130            |  |  |  | 330   |  |  |  | "     |
| 3,1   |     |       |                         | 5,5          |     |     |     | 560   |     |     |     | 980   |     |     |     | 180            |  |  |  | 320   |  |  |  | 2.914 |
| 3,7   |     |       |                         | 5,1          |     |     |     | 810   |     |     |     | 1.130 |     |     |     | 195            |  |  |  | 270   |  |  |  | 2.652 |
| 3,1   |     |       |                         | 3,8          |     |     |     | 590   |     |     |     | 730   |     |     |     | 160            |  |  |  | 200   |  |  |  | 2.930 |
| 3,6   |     |       |                         | 6,1          |     |     |     | 540   |     |     |     | 920   |     |     |     | 155            |  |  |  | 260   |  |  |  | 3.100 |
| 3,0   |     |       |                         | 5,5          |     |     |     | 460   |     |     |     | 840   |     |     |     | 130            |  |  |  | 240   |  |  |  | "     |
| 3,5   |     |       |                         | 6,3          |     |     |     | 550   |     |     |     | 990   |     |     |     | 135            |  |  |  | 240   |  |  |  | 3.130 |
| 3,2   |     |       |                         | 5,7          |     |     |     | 450   |     |     |     | 800   |     |     |     | 120            |  |  |  | 210   |  |  |  | "     |
| 3,5   |     |       |                         | 6,8          |     |     |     | 580   |     |     |     | 1.120 |     |     |     | 155            |  |  |  | 300   |  |  |  | 3.145 |
| 3,2   |     |       |                         | 6,9          |     |     |     | 450   |     |     |     | 970   |     |     |     | 145            |  |  |  | 310   |  |  |  | "     |
|       |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     |       |     |     |     |                |  |  |  |       |  |  |  |       |
| 1,23  |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     | 1,8   |     |     |     | 14             |  |  |  |       |  |  |  | 2.811 |
| 2,80  |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     | 5,8   |     |     |     | 22             |  |  |  |       |  |  |  | 2.754 |
| 1,50  |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     | 5,4   |     |     |     | 18             |  |  |  |       |  |  |  | 2.924 |
| 0,51  |     |       |                         |              |     |     |     |       |     |     |     | 2,0   |     |     |     | 9,9            |  |  |  |       |  |  |  | 2.922 |

du Pacifique Est (\* : élément calculé à CaCO<sub>3</sub>=0)

L'hypothèse de l'origine hydrothermale, émise pour les sédiments à l'axe de la dorsale, par Boström et Peterson (1966, 1969) est ici largement admise par les différents auteurs (Bender *et al.*, 1971 ; Piper, 1973 ; Dymond et Veeh, 1975 ; Heath et Dymond, 1977 ; Dymond, 1981 ; Cronan et Varnavas, 1981 ; Marchig et Gundlach, 1982 ; Bäcker *et al.*, 1985).

b) Les sédiments métallifères forés par le Glomar Challenger, à la base de la colonne sédimentaire (cf. fig. 3)

C'est à 40° Nord au cours du leg 5 du Glomar Challenger (Von der Borch et Rex, 1970), que les premiers sédiments métallifères ont été forés à la base de la colonne sédimentaire, juste au-dessus du basalte.

Depuis, de nombreux autres ont été signalés (Drever, 1971 ; Von der Borch *et al.*, 1971 ; Cronan, 1973 ; Yeats *et al.*, 1976 ; Boström *et al.*, 1976 ; Bonatti *et al.*, 1979 ; Leinen, 1981 ; Leggett, 1982...) dans le Pacifique.

Les principales caractéristiques de ces sédiments sont :

- des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  qui fluctuent de 0 à 90 % (cf. Tableau III).
- les oxyhydroxydes amorphes de fer et de manganèse sont dominants (Von der Borch et Rex, 1970) et ont été appelés RSOs (Red brown semi-opaque oxides) par Yeats *et al.* (1976) au cours du leg 34 dans la dépression de Bauer.
- les phases cristallisées sont peu abondantes : Goethite, montmorillonite riche en fer et zéolites (phillipsite, clinoptilolite, heulandite) et rarement de l'hématite.
- les analyses chimiques sont analogues à celles des sédiments métallifères obtenues sur la dorsale du Pacifique Est

| Auteurs                         | nom de l'échantillon  | Latitude   | Longitude   | %CaCO <sub>3</sub>                      | Si   | Al  | Fe   | Mn  | Na   | Ti   | P  |
|---------------------------------|---|--|---|---|--|---|--|---|------|--|--|
| Kuykendall <i>et al.</i> (1970) | 37-4-5 (40 cm)<br>38-6-4 (80 cm)  | 40°58.74'N<br>38°42.12'N                           | 140°43-11'N<br>140°21-27'W                            | 0,9<br>54,5                             | 8,69<br>2,67                               | 2,82<br>0,86                                | 27,85<br>13,86                                       |   |      |  |  |
| Drever (1971)                   | 66.0-9-3(103-104)   | 2°23.63'N  | 166°07.28'W   | ~ 0                                     | 7,92                                       |   | 26,00  | 7,00  |      |  |  |
| Cronan (1973)                   | sites 159<br>160<br>162 ] moyenne<br>11 éch.  | 12°19-92'N<br>11°42.27'N<br>14°52.19'N             | 122°17.27'W<br>130°52.81'W<br>140°02.61'W             |   |  |   | 17,50  | 4,52  |      |  |  |
| Boström <i>et al.</i> (1976)    | 319-11 et 12<br>320- 2 et 3<br>320B- 1 et 2<br>321 - 7 à 9<br>10<br>11 et 12<br>13        | 13°01.04'S<br>9°00.40'S<br>9°00.40'S<br>12°01.29'S | 101°31.46'W<br>83°31.80'W<br>83°31.80'W<br>81°54.24'W | ~ 85<br>~ 87<br>~ 54<br>~ 95<br>~ 76    | 0,9<br>3,0<br>1,6<br>11,65<br>0,88<br>2,70 | 0,14<br>0,38<br>0,12<br>3,4<br>0,22<br>0,46 | 2,18<br>3,12<br>2,06<br>7,65<br>1,30<br>0,85<br>4,63 | 0,64<br>0,91<br>0,72<br>2,10<br>0,31<br>0,23<br>2,1 |      | 0,0097<br>0,020<br>0,0093<br>0,17<br>0,0090<br>0,0087<br>0,081 | 0,12<br>0,08<br>0,07<br>0,43<br>0,07<br>0,06<br>0,11 |
| Jenkins et Hardy(1976)          | 315A-30-2(132-134)  | 4°10-26'N  | 158°31.54'W   | ~ 0                                     | 25,31                                      | 4,25  | 13,7   | 0,51  | 0,83 | 0,85   | 0,13   |
| Leinen (1981)                   | 469-43-3(74-76)<br>" -45-1(86-90)<br>471-79-1(87-94)<br>472-12-2(54-55)<br>" " 4(139-141) | 32°37'N<br>23°29'N<br>23°0'N                       | 120°33'W<br>112°30'W                                  | 1,41<br>18,04<br>1,97<br>34,82<br>85,07 | 13,91<br>27,57<br>19,61<br>10,93<br>2,22   | 1,70<br>1,74<br>8,03<br>2,79<br>0,43        | 6,77<br>5,52<br>15,01<br>6,47<br>0,77                | 0,62<br>0,43<br>0,62<br>1,77<br>0,29                |      |  |  |
| Leggett (1982)                  | 487-18 et 19<br>moyenne<br>13 éch.  | 15°51.21'N   | 99°10.52'W  | ~ 0                                     |  | 3,7   | 14,8   | 5,6   | 1,8  | 0,19   | 0,4  |

| Auteurs                      | nom de l'échantillon   | Ni (ppm)                                 | Cu  | Zn  | Ba  | As  | Str | Rb | V  | Cr   | Co                                       |
|------------------------------|--|--|---|---|---|-----|-----|----|--|--|--|
| Drever (1971)                | 66-0-9-3(103-104)  | 1.000                                    | 1.300                                       | 700                                       | 4.100   | 300 | 350 | 12 | 1.100                                    | 150  |  |
| Cronan (1973)                | sites 159<br>160<br>162  | 535                                      | 917   | 358                                       |   |     |     |    |  |  | 83                                       |
| Boström <i>et al.</i> (1976) | 319-11 et 12<br>320- 2 et 3<br>320B- 1 et 2<br>321 - 7 à 9<br>10<br>11 et 12<br>13         | 54<br>53<br>59<br>310<br>22<br>14<br>180 | 116<br>180<br>116<br>555<br>50<br>34<br>240 | 73<br>104<br>61<br>255<br>50<br>40<br>153 | 820<br>1.350<br>700<br>2.200<br>120<br>295<br>375 |     |     |    | 60<br>65<br>73<br>185<br>27<br>14<br>165 | < 5<br><10<br><10<br>20<br><10<br><10<br>~ 8.3 | 15<br>13<br>8.5<br>137<br>7.5<br>4<br>18 |
| Jenkins et Hardy(1976)       | 315A-30-2(132-134)   | 129                                      | 143   | 302                                       | 267   |     | 176 | 50 |  | 24   | 35                                       |
| Leinen (1981)                | 469-43-3(74-76)<br>" -45-1(86-90)<br>471-79-1(87-94)<br>472-12-2(54-55)<br>" -" 4(139-141) | 48<br>44<br>269<br>180<br>121            | 93<br>154<br>118<br>255<br>40               | 68<br>97<br>98<br>162<br>43               | 1.400<br>195<br>1.140<br>5.770<br>370             |     |     |    |  |  | 12<br>12<br>52<br>32<br>20               |
| Leggett (1982)               | 487-18 et 19<br>moyenne<br>13 éch.   | 272                                      | 552   | 317                                       |   |     | 415 |    | 342                                      | 103  | 48                                       |

**Tableau III** : Exemples d'analyses chimiques de sédiments métallifères du Pacifique forés à la base de la colonne sédimentaire par le Glomar Challenger.

(cf Tableau III). Cependant, Jenkyns et Hardy (1976), décrivent des sédiments rouge-brique, juste au-dessus du basalte au site 315 A, dont les teneurs en titane sont élevées : 0,87 %.

L'analogie des compositions minéralogiques et chimiques avec les sédiments décrits par Boström et Peterson (1969) sur la dorsale du Pacifique Est, ainsi que leur position stratigraphique juste au-dessus du plancher océanique, amènent les auteurs à conclure à une origine hydrothermale pour ces sédiments (Von der Borch et Rex, 1970 ; Von der Borch *et al.*, 1971 ; Cronan, 1973 ; Dymond *et al.*, 1976 ; Leinen, 1981 ; Leggett, 1982).

c) Des sédiments métallifères de surface éloignés d'une dorsale active : le modèle de la dépression de Bauer

La dépression de Bauer, dans laquelle Caspari (dans Murray et Lee, 1909) et Revelle (1944) avaient déjà décrit des sédiments riches en fer, a fait l'objet de plusieurs campagnes (7ème campagne du Carnegie, 1928-1929 ; Risepac, 1961 ; campagne 54 du navire Atlantis II, 1969 ; Leg 34 du Glomar Challenger ; campagne Geometep, 1980...) et publications (Dasch *et al.*, 1971 ; Bischoff et Sayles, 1972 ; Dymond *et al.*, 1973 ; Sayles et Bischoff, 1973 ; Dasch, 1974 ; Dymond et Veeh, 1975 ; Sayles *et al.*, 1975 ; Dymond *et al.*, 1976 ; Bostrom *et al.*, 1976 ; Heath et Dymond, 1977 ; Dymond *et al.*, 1977 ; Heath et Dymond, 1981...).

L'intérêt de la position géographique et géodynamique de cette dépression, est d'être située au niveau du saut de dorsale entre la dorsale fossile des Galapagos et la dorsale du Pacifique Est (cf. Fig.4 et 5).

- Les sédiments sont très proches de la CCD, ainsi, leurs teneurs en  $\text{CaCO}_3$  sont extrêmement variables : 1 à 70% environ (cf. tableau IV). Il s'agit donc, soit de vases carbonatées, soit de vases argileuses. Les analyses de tous ces sédiments sont recalculées, par les

différents auteurs, à  $\text{CaCO}_3 = 0$  afin de pouvoir mieux comparer les compositions chimiques de ces différents faciès.

- La fraction non carbonatée semble comporter une phase amorphe (oxyhydroxydes de Fe et Mn) analogue à celle décrite dans les sédiments en provenance des dorsales, mais qui serait ici moins importante.

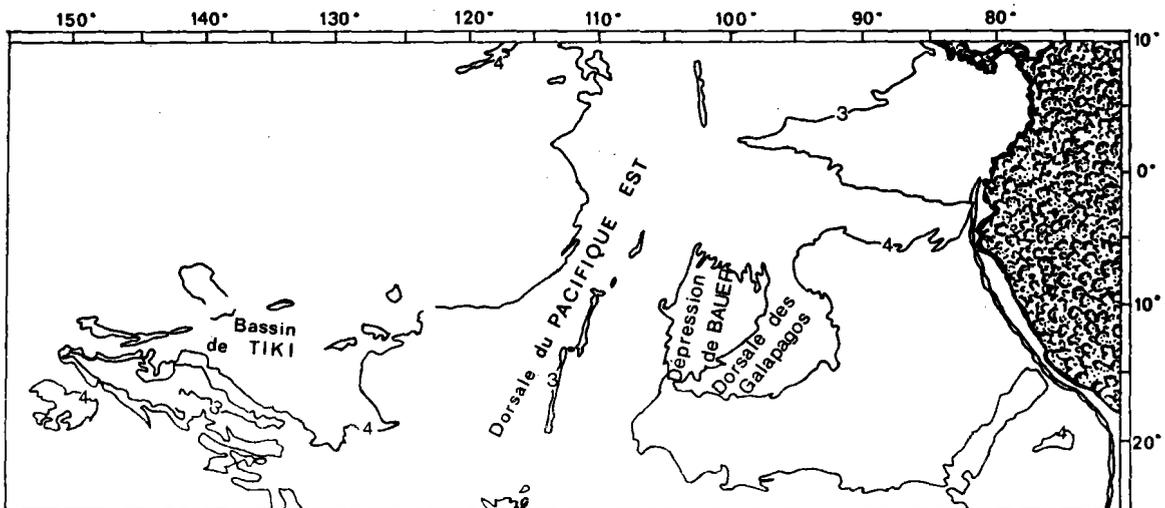


Fig. 4 : Localisation de la dépression de Bauer et du bassin de Tiki (d'après Hoffert *et al.*, 1979)

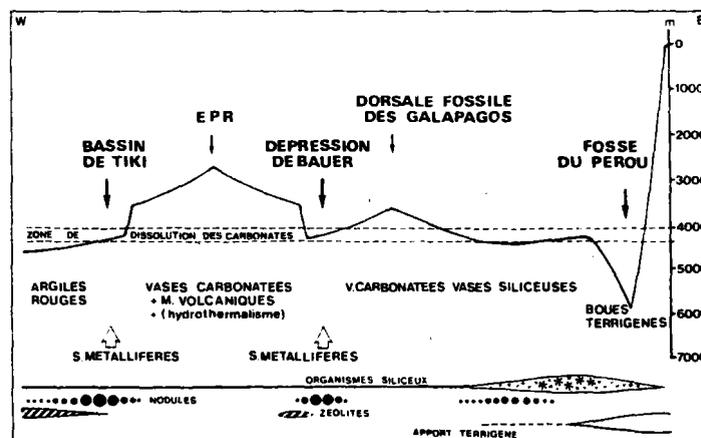


Fig. 5 : Coupe schématique W.E à travers le Pacifique Est, environ à 10°S. Relations entre les "sédiments métallifères" du bassin de Tiki et ceux de la dépression de Bauer. (D'après Hoffert *et al.*, 1979)

- Les phases cristallisées sont :

\* des *smectites* principalement : Sayles et Bischoff (1973), Eklund (1974) et Dymond et Eklund (1978) décrivent une smectite ferri-fère pauvre en aluminium. Dymond *et al.* (1973) parlent de montmorillonite nontronitique, tandis que Dasch (1974) observe une smectite ferromanganésifère.

Les smectites peuvent former des agrégats jaunâtres, microcristallins dont la taille peut atteindre 50  $\mu$  (Sayles et Bischoff, 1973 ; Sayles *et al.*, 1975).

\* occasionnellement : goethite, todorokite,  $\delta$ -MnO<sub>2</sub>, phillipsite, phosphorite (carbonate - fluorapatite), plagioclases, quartz et très rarement, de la barytine (Dymond *et al.*, 1973 ; Sayles et Bischoff, 1973 ; Dasch, 1974 ; Eklund, 1974 ; Dymond et Eklund, 1978).

- L'apport détritique est faible, du fait de la présence de la dorsale fossile des Galapagos qui joue un rôle de barrière vis à vis des éléments détritiques provenant du continent Sud-Américain (Dymond, 1981).

- Les analyses chimiques (cf. tableau IV) montrent que les teneurs en Fe et Mn sont inférieures à celles observées à l'axe de la dorsale du Pacifique Est. Les teneurs en Al sont également faibles, tandis que Si et Ni montrent un enrichissement dans la dépression de Bauer (Dymond *et al.*, 1973 ; Sayles et Bischoff, 1973). Les valeurs de Cu, Zn et Co sont similaires, d'après Sayles et Bischoff (1973).

Deux origines sont proposées pour les sédiments métallifères de la dépression de Bauer :

- La première conclut à une origine hydrothermale, par analogie de composition avec les sédiments métallifères de dorsale (Dasch *et al.*,

1971 ; Dymond *et al.*, 1973 ; Dasch, 1974 ; Bagin *et al.*, 1975), impliquant pour ces auteurs une influence hydrothermale provenant de l'axe de la dorsale. D'autres auteurs comme Anderson et Halunen (1974), Mac Murtry et Burnett (1975), Mac Murtry et Yeh (1981) considèrent que les manifestations hydrothermales existent au sein même de la dépression de Bauer. Cette dernière affirmation est basée sur des mesures de flux de chaleur élevés dans la dépression.

- La seconde tendance n'élimine pas totalement le rôle de l'hydrothermalisme dans la formation des sédiments métallifères de la dépression de Bauer. Elle accorde une part importante et complémentaire à la formation de phases ferromanganésifères à partir de l'eau de mer : origine hydrogène, favorisée par de faibles taux de sédimentation (Sayles *et al.*, 1975 ; Dymond et Veeh, 1975 ; Heath et Dymond, 1977). Pour Sayles *et al.* (1975), les oxydes colloïdaux de Fe-Mn et les micronodules sont d'origine hydrogène tandis que la montmorillonite ferrifère a une origine hydrothermale. Au contraire, pour Dymond et Veeh (1975), la meilleure cristallinité des phases dans la dépression de Bauer s'explique par l'origine hydrogène de celles-ci. Heath et Dymond (1977) estiment que la majorité de Fe, Mn, Cu et Zn est d'origine hydrothermale, tandis que 70 à 80% de Ni et 30 à 60% de Cu et Zn sont d'origine hydrogène.

#### d) Le bassin de Tiki

Beaucoup moins décrit dans la littérature, le bassin de Tiki occupe une position symétrique de la dépression de Bauer par rapport à la dorsale du Pacifique Est. Il est séparé de celle-ci par quelques 2.500 kilomètres (cf. fig. 4 et 5). Les profondeurs des deux bassins sont similaires, aux environs de 4.000 mètres.

Des sédiments enrichis en fer et manganèse existent en surface, dont la répartition obéit à la présence de la CCD (Tracey *et al.*, 1971 ; Hoffert *et al.*, 1979 ; Hoffert, 1980).

| Auteurs                  | nom de l'échantillon | Latitude | Longitude | Profondeur de carotte (cm) | % CaCO <sub>3</sub> | Si   | Si*   | Al   | Al*  | Fe   | Fe*   |
|--------------------------|----------------------|----------|-----------|----------------------------|---------------------|------|-------|------|------|------|-------|
| Sayles et Bischoff(1973) | 11                   | 9°02' S  | 97°36'W   | 23                         | 19                  | 18   | 22    | 2.98 | 3.67 | 7.9  | 9.7   |
|                          | "                    | "        | "         | 291                        | 28                  | 15   | 21    | 2.95 | 4.08 | 7.9  | 10.9  |
|                          | "                    | "        | "         | 567                        | 2                   | 16   | 16    | 2.62 | 2.68 | 14.9 | 15.3  |
|                          | "                    | "        | "         | 865                        | 8                   | 19   | 21    | 2.81 | 3.05 | 11.8 | 12.8  |
|                          | 14                   | 8°22' S  | 102°14'W  | 40                         | 72                  | 8    | 28    | 0.32 | 1.14 | 2.52 | 9.0   |
|                          | "                    | "        | "         | 162                        | 1                   | 18   | 18    | 1.38 | 1.40 | 18.0 | 18.2  |
|                          | "                    | "        | "         | 347                        | 18                  | 18   | 21    | 0.94 | 1.14 | 12.4 | 15.0  |
| "                        | "                    | "        | 704       | 1                          | 18                  | 18   | 1.55  | 1.56 | 16.8 | 17.0 |       |
| Dymond et Veeh (1975)    | Y 71-7-36 MG2        | 10°08' S | 102°51'W  | 0-5                        | 1.2                 |      |       |      |      |      |       |
|                          | "                    | "        | "         | 5-10                       | -                   | 16.1 |       | 2.18 |      | 14.1 |       |
|                          | "                    | "        | "         | 15-20                      | -                   |      |       |      |      |      |       |
|                          | "                    | "        | "         | 28-35                      | -                   | 15.9 |       | 2.07 |      | 12.9 |       |
|                          | "                    | "        | "         | 35-40                      | 1.6                 |      |       |      |      |      |       |
|                          | "                    | "        | "         | 50-55                      | 1.3                 |      |       |      |      |      |       |
| Heath et Dymond (1977)   | KK71-124LDC-3        | 9°55' S  | 101°09'W  | 5-10                       | 10.6                |      | 18.72 |      | 2.60 |      | 13.57 |
|                          | KK71-105FFC-168      | 10°04' S | 102°10'W  | 5-10                       | 17.0                |      | 21.07 |      | 2.72 |      | 15.81 |
|                          | KK71-087FFC-130      | 11°33' S | 97°27'W   | 5-10                       | 71.9                |      | 18.58 |      | 4.07 |      | 9.73  |
|                          | KK71-084FFC-117      | 11°58' S | 103°21'W  | 5-10                       | 0.9                 |      | 15.80 |      | 3.33 |      | 17.77 |
|                          | Y 71+7-54MG 3        | 10°60' S | 103°45'W  | 5-10                       | 1.2                 |      | 18.03 |      | 2.95 |      | 15.3  |
|                          | OC73-1-3-MG1         | 12°56' S | 103°34'W  | 5-10                       | 13.4                |      | 14.45 |      | 3.31 |      | 17.97 |
|                          | OC73-4-33MG2         | 13°04' S | 103°29'W  | 5-10                       | 9.4                 |      | 15.34 |      | 3.71 |      | 20.65 |

Tableau IV : Composition des sédiments métallifères de la

| Auteurs               | nom de l'échantillon | Latitude | Longitude | Profondeur de carotte (cm) | % CaCO <sub>3</sub> | Si   | Si*  | Al  | Al* | Fe   | Fe*  |
|-----------------------|----------------------|----------|-----------|----------------------------|---------------------|------|------|-----|-----|------|------|
| Hoffert et al. (1979) | TKS 07               |          |           | 0-2                        | ≈ 89                | 1.7  | 15.6 | 0.2 | 1.9 | 1.0  | 8.9  |
|                       | TKS 08               | 11°32'3S | 130°40'8W | 0-2                        | ≈ 64                | 4.5  | 12.5 | 1.1 | 2.9 | 3.8  | 10.4 |
|                       | "                    | "        | "         | 291-292                    | ≈ 12                | 14.2 | 16.2 | 3.8 | 4.4 | 16.0 | 18.3 |
|                       | TKS 09               | "        | "         | 0-2                        | ≈ 29                | 13.2 | 18.7 | 4.4 | 6.3 | 9.0  | 12.7 |
|                       | "                    | "        | "         | 98-100                     | ≈ 10                | 17.1 | 19.1 | 5.7 | 6.4 | 11.5 | 12.8 |
|                       | TKS 10               | "        | "         | 0-2                        | ≈ 58                | 7.6  | 18.2 | 2.5 | 6.1 | 5.1  | 12.3 |
|                       | "                    | "        | "         | 43-45                      | ≈ 12                | 16.9 | 19.1 | 5.6 | 6.3 | 10.8 | 12.3 |
|                       | T2-K1                | 20°05'1S | 137°00'9W | 0-2                        | ≈ 69                | 4.9  | 15.7 | 1.6 | 5.2 | 3.8  | 12.2 |
|                       | "                    | "        | "         | 60-62                      | ≈ 15                | 13.7 | 16.1 | 5.2 | 6.1 | 14.5 | 16.9 |
|                       | T2-K2                | "        | "         | 0-2                        | ≈ 12                | 12.5 | 14.2 | 4.7 | 5.3 | 16.4 | 18.7 |
|                       | "                    | "        | "         | 50-52                      | ≈ 11                | 11.2 | 12.6 | 4.4 | 5.0 | 21.8 | 24.4 |

Tableau V : Composition des sédiments métallifères du

| Mn   | Mn*  | Ti   | $\frac{+Z}{Ti^*}$ | ppm+  | Cu    | Cu* | Zn  | Zn*   | Sr    | Sr*   | Ni    | Ni* | Co  | Co*    | Ba     | Ba*    | (m)<br>Profondeur |
|------|------|------|-------------------|-------|-------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-----|-----|--------|--------|--------|-------------------|
| 2.12 | 2.61 | 0.15 | 0.19              | 860   | 1.060 | 130 | 160 | 1.300 | 1.605 | 670   | 830   | 180 | 220 | 23.000 | 28.000 | 4.080  |                   |
| 1.37 | 1.89 | -    | -                 | 700   | 970   | 100 | 140 | 960   | 1.333 | 730   | 1.000 | 140 | 190 | 19.500 | 27.000 | "      |                   |
| 6.49 | 6.65 | 0.08 | 0.08              | 920   | 940   | 160 | 170 | 1.000 | 1.020 | 1.640 | 1.700 | 220 | 230 | 17.500 | 18.000 | "      |                   |
| 4.02 | 4.37 | -    | -                 | 1.080 | 1.200 | 100 | 110 | 770   | 837   | 1.310 | 1.400 | 200 | 220 | 18.500 | 20.000 | "      |                   |
| 0.55 | 1.96 | 0.04 | 0.14              | 200   | 710   | 100 | 350 | 1.500 | 5.357 | 340   | 1.200 | 90  | 330 | 3.700  | 13.000 | 4.124  |                   |
| 5.63 | 5.68 | 0.10 | 0.10              | 1.120 | 1.100 | 590 | 600 | 620   | 626   | 940   | 950   | 90  | 90  | 13.000 | 13.000 | "      |                   |
| 1.78 | 2.16 | 0.07 | 0.09              | 650   | 790   | 300 | 360 | 520   | 634   | 340   | 410   | 160 | 190 | 9.000  | 10.000 | "      |                   |
| 4.30 | 4.34 | 0.14 | 0.14              | 1.050 | 1.060 | 670 | 680 | 390   | 394   | 530   | 540   | 110 | 110 | 8.000  | 8.000  | "      |                   |
| 3.04 |      |      |                   | 781   |       | 308 |     |       |       | 498   |       |     |     |        |        |        | 4.541             |
| 2.99 |      |      |                   | 749   |       | 286 |     |       |       | 430   |       |     |     |        |        |        | "                 |
| 3.59 |      |      |                   | 857   |       | 433 |     |       |       | 587   |       |     |     |        |        |        | "                 |
| 4.67 |      |      |                   |       | 913   |     | 377 |       |       | 777   |       |     |     |        |        | 18.600 |                   |
| 5.11 |      |      |                   |       | 959   |     | 448 |       |       | 797   |       |     |     |        |        | 20.800 |                   |
| 3.72 |      |      |                   |       | 1.002 |     | 326 |       |       | 919   |       |     |     |        |        | -      |                   |
| 6.20 |      |      |                   |       | 1.349 |     | 439 |       |       | 1.189 |       |     |     |        |        | 14.200 |                   |
| 7.24 |      |      |                   |       | 1.079 |     | 401 |       |       | 984   |       |     |     |        |        | 15.600 |                   |
| 6.59 |      |      |                   |       | 1.451 |     | 456 |       |       | 1.389 |       |     |     |        |        | 19.400 |                   |
| 6.65 |      |      |                   |       | 1.444 |     | 444 |       |       | 1.408 |       |     |     |        |        | 23.200 |                   |

dépression de Bauer. (\* élément calculé à  $CaCO_3 = 0$ .)

| Mn  | Mn* | Ti   | $\frac{+Z}{Ti^*}$ | ppm+ | Cu | Zn  | Sr    | Ni  | Co  | Ba    |
|-----|-----|------|-------------------|------|----|-----|-------|-----|-----|-------|
| 0.2 | 2.2 | 0.02 | 0.2               | 46   |    | 86  | 1.348 | 35  | < 2 | 2.775 |
| 1.0 | 2.8 | 0.09 | 0.2               | 88   |    | 45  | 1.325 | 64  | 15  | 2.758 |
| 3.4 | 3.9 | 0.2  | 0.2               | 525  |    | 173 | 442   | 739 | 266 | 4.030 |
| 3.0 | 4.2 | 0.4  | 0.6               | 194  |    | 67  | 714   | 713 | 251 | 3.386 |
| 3.2 | 3.5 | 0.4  | 0.5               | 539  |    | 209 | 365   | 800 | 300 | 1.368 |
| 1.7 | 4.0 | 0.3  | 0.6               | 219  |    | 43  | 916   | 450 | 167 | 3.491 |
| 3.2 | 3.7 | 0.6  | 0.7               | 366  |    | 59  | 513   | 798 | 299 | 3.522 |
| 1.4 | 4.4 | 0.1  | 0.5               | 253  |    | 239 | 1.799 | 363 | 135 | 6.719 |
| 3.5 | 4.1 | 0.7  | 0.8               | 441  |    | 219 | 736   | 711 | 316 | 2.099 |
| 4.3 | 4.9 | 0.5  | 0.6               | 474  |    | 195 | 703   | 785 | 373 | 2.197 |
| 4.0 | 4.5 | 0.5  | 0.6               | 497  |    | 226 | 470   | 782 | 263 | 934   |

bassin de Tiki (\* élément calculé à  $CaCO_3 = 0$ .)

Les caractéristiques de ces sédiments sont analogues à ceux de la dépression de Bauer :

- Les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  sont très variables : 0 à 90%. Elles sont liées, comme dans la dépression de Bauer, à la CCD (cf. tableau V).

- La fraction non carbonatée comporte une phase amorphe importante, constituée par des oxyhydroxydes de Fe-Mn.

- Les phases cristallisées sont rares : smectites ferrifères, phillipsite et des traces de goethite.

- L'apport terrigène est très faible.

- Les analyses chimiques sont analogues à celles de la dépression de Bauer (Cf. Tableau V).

Le bassin de Tiki et la dépression de Bauer présentent de nombreux caractères similaires : position par rapport à la dorsale, profondeur, minéralogie et géochimie des sédiments. Cependant, Hoffert *et al.* (1979) et Hoffert (1980) concluent à une origine autre que hydrothermale ou hydrogène pour la formation de tels sédiments (dépression de Bauer et bassin de Tiki). En effet, l'éloignement de ces 2 bassins par rapport à une source hydrothermale connue et la concordance de la profondeur de ces bassins avec la CCD les conduisent à faire appel à un mécanisme de dissolution des organismes calcaires libérant du fer et du manganèse, puis à des remaniements des sédiments aboutissant à des concentrations en ces éléments.

e) Les "sédiments métallifères" : une composante de certains sédiments pélagiques. Cas de la zone Domes-C dans le Pacifique Nord (14°N, 126°W) (cf. fig. 3).

Cette zone est située entre les fractures de Clarion et Clipper-ton, à 2.400 km à l'ouest de la dorsale du Pacifique Est.

Des sédiments récents y ont été décrits : leur couleur est brun-chocolat, et ils contiennent beaucoup d'oxyhydroxydes de Fe et Mn appelés RSOs (Red Brown semi-opaque oxides) par analogie avec ce qui a été décrit par Yeats *et al.* (1976) dans des sédiments prélevés par le Glomar Challenger. (Bischoff et Rosenbauer, 1977 ; Bischoff *et al.*, 1979a ; Hein *et al.*, 1979).

Les caractéristiques minéralogiques et chimiques de ces sédiments sont les suivantes :

- Les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  sont faibles ( $\approx 3\%$ ). La zone DOMES C est située au niveau du passage boues siliceuses-argiles rouges.
- La phase amorphe est importante et constituée par les RSOs.
- Les phases cristallisées sont rares : smectites, illite, kaolinite.
- Les analyses chimiques (Bischoff et Rosenbauer, 1977) montrent un enrichissement en Fe, Mn, Cu, Ni, et un appauvrissement en Al par rapport aux argiles pélagiques voisines (cf. tableau VI)

| Auteurs                       | Nom de l'échantillon | Latitude | Longitude | Prof ds carotte (cm) | $\text{CaCO}_3$ | Si   | Al  | Fe  | Mn  | Ti  | Cu    | Ni  |
|-------------------------------|----------------------|----------|-----------|----------------------|-----------------|------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|
| Bischoff et Rosenbauer (1977) | 18 B                 | 14°N     | 126°W     | 34-36                | $\approx 3$     | 23.3 | 4.6 | 9.1 | 4.3 | 0.3 | 1.300 | 632 |
|                               |                      |          |           |                      |                 |      | (2) |     |     |     | (ppm) |     |

Tableau VI : Sédiments métallifères de la zone DOMES C - Station 18B

Bischoff et Rosenbauer (1977) et Bischoff *et al.* (1979a) définissent ces sédiments métallifères en tant que fraction d'un autre sédiment non métallifère. Bischoff et Rosenbauer (1977) estiment ainsi à environ 40% la proportion de la fraction métallifère dans le sédiment de la carotte 18 B. Le terme "sédiment métallifère" est dans ce cas synonyme de "fraction hydrothermale".

Bischoff et Rosenbauer (1977) localisent cette activité hydrothermale peut-être au niveau de la zone de fracture de Clarion.

Hein *et al.* (1979) excluent quant à eux une origine hydrothermale, et font intervenir la dissolution des organismes qui serait responsable de l'enrichissement en métaux de ces sédiments.

## 2 - DES SEDIMENTS METALLIFERES DANS UN OCEAN EN VOIE DE FORMATION : CAS DE LA MER ROUGE

Cette mer étroite (environ 300 km) est caractérisée par la présence d'une vallée axiale plus développée au Sud qu'au Nord, qui est le siège de l'accrétion océanique.

Dans cette dépression centrale, existent un grand nombre de fosses à saumures qui renferment des sédiments d'une nature particulière, enrichis en métaux : Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Ag... Ce sont par exemple les fosses Kebrit, Gypsum, Nereus, Thetis, Atlantis II, Erba... (cf. fig. 6).

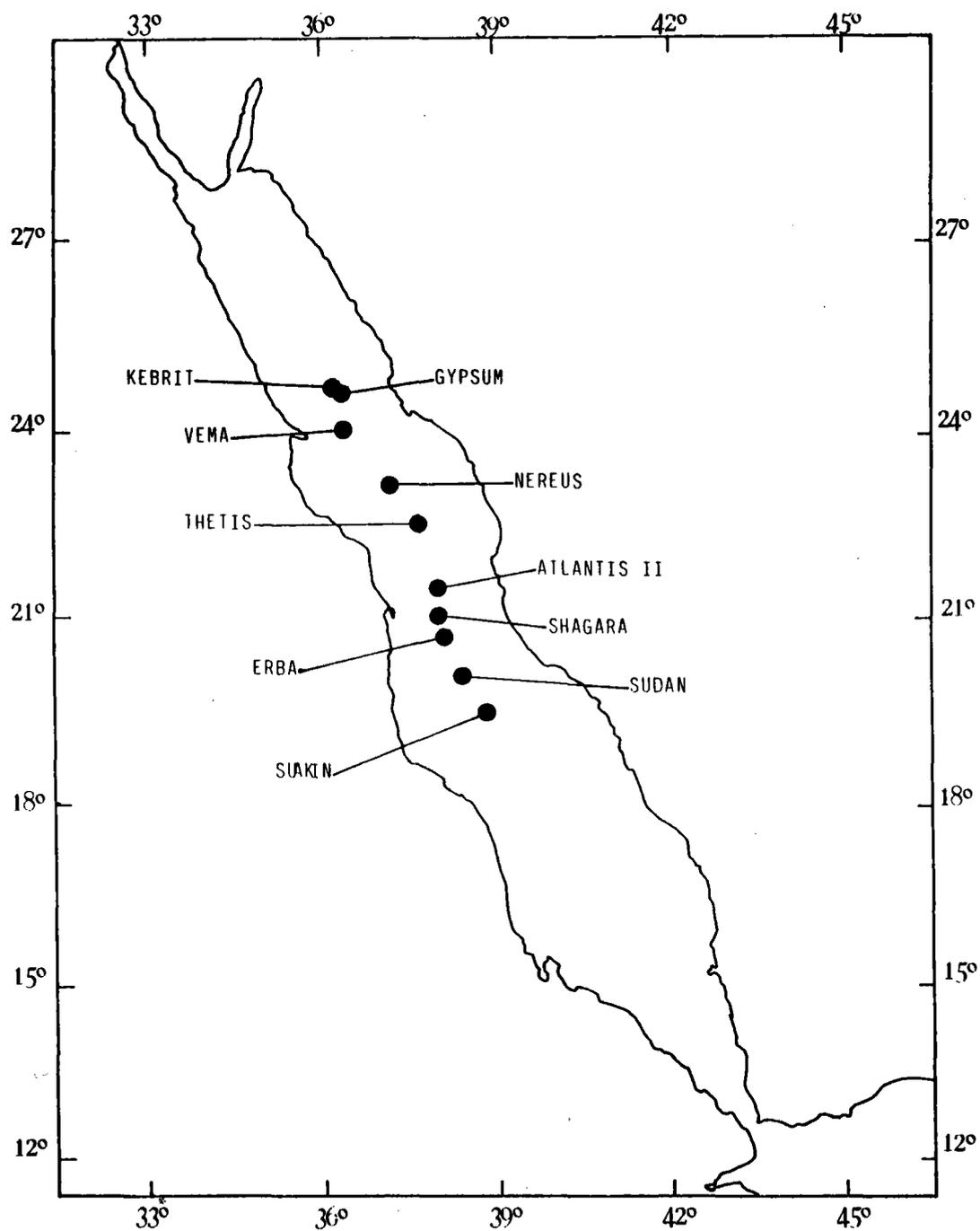
Les premiers sédiments métallifères ont été décrits dans la fosse Atlantis II par Miller *et al.* (1966) et Bischoff (1969) (cf. tableau VII), puis par de nombreux autres auteurs (Bäcker, 1976 ; Bignell *et al.*, 1976 ; Bignell, 1978 ; Thisse, 1982...).

| Faciès                 | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>total | FeO  | Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | %   | (ppm)  |        |
|------------------------|------------------|--------------------------------|---|------|--------------------------------|-----|--------|--------|
|                        |                  |                                |   |      |                                |     | Zn     | Cu     |
| à Montmorillonite - Fe | 24,4             | 1,7                            | 37,1                                    | 11,7 | 2,1                            | 4,8 | 2.560  | 6.400  |
| Amorphe à Goethite     | 8,7              | 1,1                            | 64,2                                    | 2,7  | 1,1                            | 3,4 | 5.600  | 2.400  |
| à sulfures             | 24,7             | 1,5                            | 24,3                                    | 13,4 | 1,1                            | 2,5 | 97.600 | 36.000 |
| à manganite            | 7,5              | 0,7                            | 30,5                                    | 0,4  | 35,5                           | 2,9 | 11.200 | 800    |

Tableau VII - Analyses chimiques des principaux faciès minéralisés de Mer Rouge (d'après Bischoff, 1969)

Les faciès observés sont d'une très grande variété et constituent des alternances de couches centimétriques à métriques d'oxydes, de sulfures, de sulfates, de silicates et de carbonates qui traduisent

les conditions physico-chimiques diverses du milieu de dépôt et des solutions minéralisées hydrothermales responsables de la formation de ces sédiments.



**Fig. 6** : Principales fosses à sédiments métallifères de la Mer Rouge.

Bignell (1978) synthétise dans un tableau, les faciès présents dans les différentes fosses (cf. fig. 7).

| Groupe minéral                              | Faciès   | Métaux enrichis                      | Fosses  |
|---|--|--------------------------------------|---|
| 1. Groupe des oxydes<br>Oxydes de fer       | Limonite, Goethite,<br>Lepidocrocite, Hematite   | Fe, Zn, Cu, Co, Pb, Hg<br>V, Ba      | Atlantis II, Thetis, Nereus,<br>Gypsum, Kebrit, Vema, Shagara,<br>Erba, Sudan, Suakin |
|   | Magnetite  | Fe, Cu, V, Ba, Ti, Zn,<br>Co, Pb, Hg | Atlantis II, Thetis   |
| Oxydes de manganèse                         | Manganite, Grouthite,<br>Woodruffite, Todorokite | Mn, Fe, Zn, Cu, Pb, Hg,<br>Sr, Ba    | Chain, Atlantis II, Thetis, Nereus<br>Shagara, Suakin                                 |
| 2. Groupe des sulfures<br>Sulfures mélangés | Sphalerite, Chalcopryrite<br>Marcasite           | Fe, Cu, Zn, Ag, Ba, Cd,<br>Hg, Ca    | Atlantis II, Thetis, Erba   |
|   | Pyrite   | Fe, Cu                               | Atlantis II, Gypsum, Erba, Suakin   |
| 3. Groupe des sulfates                      | Anhydrite  | Ca                                   | Atlantis II, Thetis   |
|   | Gypse  | Ca                                   | Gypsum, Erba, Kebrit  |
| 4. Groupe des carbonates                    | Siderite   | Fe, Ca, Zn, Cu, Pb                   | Atlantis II, Gypsum   |
|   | Manganosiderite                                  | Fe, Mn, Ca, Zn                       | Atlantis II   |
|   | Rhodochrosite                                    | Mn, Ca, Zn                           | Atlantis II   |
| 5. Groupe des silicates                     | Smectite   | Fe, Zn, Cu, Pb, Hg, Ag,<br>Ba        | Atlantis II, Erba   |
|   | Chamosite  | Fe, Mg, Al, Zn, Cu, Hg               | Thetis  |

Fig. 7 : Les différents faciès des sédiments métallifères de la Mer Rouge (d'après Bignell, 1978)

Les sédiments métallifères de la Mer Rouge présentent des caractéristiques particulières dues à l'environnement :

- c'est un milieu évaporitique de mer équatoriale presque fermée, dans laquelle s'est mise en place une couche épaisse d'évaporites au Miocène qui influe sur la formation des sédiments métallifères, avec mise en place de saumures.

- l'apport détritique est important. Il est dû à l'étroitesse de la Mer Rouge.

Si le mode de formation des sédiments métallifères de Mer Rouge peut être rapproché de celui de certains sédiments métallifères du Pacifique, leur composition minéralogique quant à elle est très

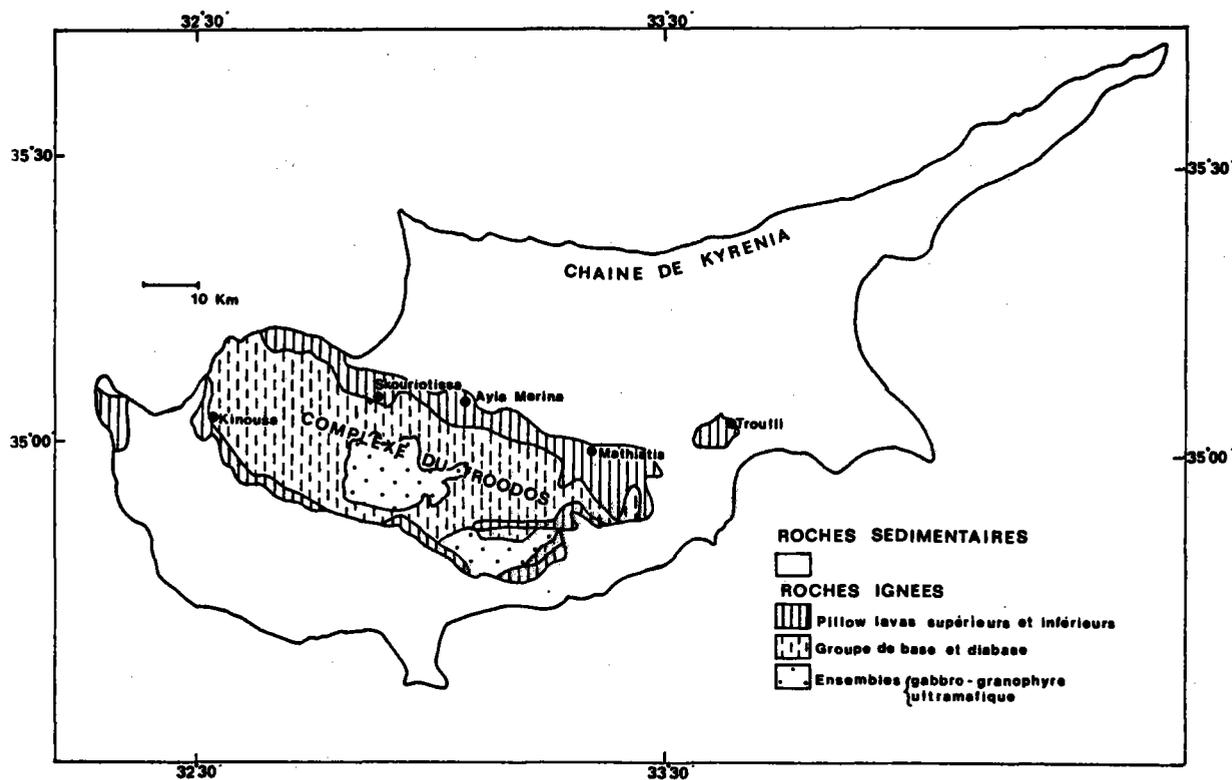
différente. Cependant, Von der Borch et Rex (1970) considèrent que les sédiments métallifères forés à la base de la colonne sédimentaire durant le Leg 5 du Glomar Challenger sont comparables uniquement au "faciès amorphe à goethite" décrit par Bischoff en 1969 en Mer Rouge.

### 3 - DES SÉDIMENTS MÉTALLIFÈRES ANCIENS ASSOCIÉS AUX COMPLEXES OPHIOLITIQUES

De nombreux exemples de fragments de croûte océanique obduc-tée existent à travers le monde. Ils ont une caractéristique commune qui est de présenter des niveaux de sédiments métallifères reposant sur la succession de roches ultrabasiques et basiques constituant le complexe ophiolitique. Ce sont entre autres, le complexe du Troodos à Chypre (Constantinou et Govett, 1972 ; Robertson et Hudson, 1973 ; Guillemot et Nesteroff, 1979), la série de Campbellton (Kay, 1975) et le complexe de York Harbour (Duke et Hutchinson, 1974) à Terre Neuve, les ophiolites des Appennins en Italie (Bonatti *et al.*, 1976), ou encore les ophiolites d'Oman (Alabaster *et al.*, 1982 ; Juteau, 1984).

Dans le détail, ces dépôts ne sont pas homogènes par leur composition chimique, minéralogique et ne présentent pas tous le même degré de lithification ou de métamorphisme.

- Les dépôts crétacés du Troodos à Chypre (cf. fig. 8) sont de deux types : les "ombres" et les "ocres", tous les deux de nature poreuse. Les laves basaltiques en coussins (Lower Pillow Lavas) sont surmontées par des dépôts de sulfures, puis par les ocres. Celles-ci sont en général séparées des ombres par un nouvel épisode de laves en coussins : les Upper Pillow Lavas (U.P.L.) (Constantinou et Govett, 1972 ; Elderfield *et al.*, 1972). Les ocres sont riches en fer et pauvres en manganèse et contiennent parfois des sulfures. Elles sont considérées comme le produit d'altération de l'amas sulfuré (Constantinou et Govett, 1972 - Robertson, 1976) (cf. tableau VIII).



**Fig. 8** : Le complexe ophiolitique du Troodos à Chypre  
(d'après Contantinou et Govett, 1972)

Les ombres, au contraire, sont plus sombres; elles sont riches en fer et manganèse et ne contiennent jamais de sulfures. Elles constituent le premier dépôt de sédiments après la mise en place des U.P.L. C'est ce dernier type qui est généralement rapproché des sédiments métallifères océaniques actuels.

Les ombres de Chypre sont en majorité amorphes. Des phases cristallisées sont quand même reconnues : quartz, goéthite,  $\delta\text{-MnO}_2$ , manganite, apatite, clinoptilolite, mordénite, smectite, palygorskite (Elderfield *et al.*, 1972 ; Desprairies et Lapierre, 1973 ; Robertson et Hudson, 1973 ; Guillemot et Nesteroff, 1979).

| Auteurs                            | Echantillon | Provenance                       | Z →              |                  |                                |                                |                  |      |      |                   |                  |                               |
|------------------------------------|-------------|----------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------|-------------------|------------------|-------------------------------|
|                                    |             |                                  | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO <sub>2</sub> | MgO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
| Elderfield <i>et al.</i> , 1972    | CY1         | ombre-Troodos                    | 25.09            | 0.23             | 4.19                           | 51.92                          | 0.43             | 1.61 | 0.74 | 0.08              | 0.26             | 0.43                          |
|                                    | CY2         | " "                              | 8.93             | 0.20             | 2.69                           | 56.16                          | 17.04            | 1.51 | 0.80 | 0.32              | 0.42             | 0.67                          |
| Guillemot et Nesteroff, 1979       | 2           | ocre-Troodos                     | 17.07            | 0.23             | 3.23                           | 54.17                          | 6.72             | 0.86 | 1.64 | 0.14              | 0.20             |                               |
| <i>in</i> Robertson et Boyle, 1983 | 74          | nappe du Semail-OMAN             | 57.6             | 0.1              | 5.1                            | 13.6                           | 6.76             | 0.8  | 16.2 | 0.1               | 0.1              | 0.3                           |
|                                    | 244         | "                                | 83.5             | <0.1             | 0.3                            | 9.5                            | 1.47             | 0.1  | 6.8  | 0.1               | <0.1             | <0.1                          |
|                                    | 226         | "                                | 40.0             | 1.2              | 1.6                            | 15.8                           | 32.18            | 0.4  | 1.2  | 0.1               | 0.2              | 0.1                           |
|                                    | 15          | "                                | 50.9             | 0.3              | 7.1                            | 26.3                           | 8.97             | 2.4  | 1.7  | 0.3               | 1.7              | 0.2                           |
|                                    | 44          | "                                | 69.6             | 0.4              | 9.1                            | 9.8                            | 3.19             | 1.4  | 2.9  | 0.7               | 2.3              | 0.3                           |
| Bonatti <i>et al.</i> , 1976       | Z - 17      | minéralisation Mn                | 31.11            | <0.01            | 0.11                           | 0.08                           | 73.2             | 3.01 | 0.06 | <0.09             | 0.09             |                               |
|                                    | Z - 46(b)   | Molinello et Gambatesa           | 75.32            | 0.025            | 0.79                           | 0.8                            | 24.6             | 0.88 | 0.06 | 0.05              | 0.07             |                               |
|                                    | Z - 51      | (Appennins)                      | 83.04            | 0.02             | 0.64                           | 0.43                           | 15.0             | 0.32 | 0.15 | 0.17              | 0.14             |                               |
| Kay, 1975                          | 1           | Série de Campbellton-Terre Neuve | 62.96            |                  | 4.54                           | 7.00                           | 15.32            | 0.64 | 4.07 |                   | 0.12             |                               |
|                                    | 2           | "                                | 67.77            | 1.22             | 11.30                          | 4.19                           | 7.96             | 0.62 | 0.44 | 0.32              | 5.01             |                               |
|                                    | 3           | "                                | 76.81            | 0.63             | 6.82                           | 5.09                           | 4.32             | 0.70 | 1.35 | 0.55              | 1.45             |                               |

| Auteurs                            | Echantillon | Provenance                       | ppm → |     |        |     |     |     |     |       |     |     |    |
|------------------------------------|-------------|----------------------------------|-------|-----|--------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|----|
|                                    |             |                                  | Ba    | Cr  | Cu     | Pb  | Zn  | Co  | Ni  | As    | Sr  | V   | Rb |
| Elderfield <i>et al.</i> , 1972    | CY1         | ombre-Troodos                    | 12    | 140 | 11.000 | 150 | 470 | 120 | 170 | 190   |     |     |    |
|                                    | CY2         | "                                | 77    | 92  | 1.400  | 160 | 280 | 110 | 250 | 1.400 |     |     |    |
| Guillemot et Nesteroff, 1979       | 2           | ocre-Troodos                     | 132   | 87  | 1.350  |     |     | 132 | 216 |       | 202 | 500 | 17 |
| <i>in</i> Robertson et Boyle, 1983 | 74          | Nappe du Semail-OMAN             | 80    | 17  | 336    | 99  | 233 |     | 233 |       | 217 | 240 |    |
|                                    | 244         | "                                | 13    | 6   | 15     | 11  | 5   |     | 17  |       | 33  | 80  |    |
|                                    | 226         | "                                | 80    | 63  | 1.361  | 211 | 142 |     | 160 |       | 325 | 59  |    |
|                                    | 15          | "                                | 216   | 38  | 527    | 236 | 299 |     | 303 |       | 493 | 468 |    |
|                                    | 44          | "                                | 275   | 45  | 216    | 95  | 127 |     | 94  |       | 425 | 193 |    |
| Bonatti <i>et al.</i> , 1976       | Z - 17      | minéralisation Mn                | 3.500 | <10 | 310    |     | 50  | 80  | 39  |       |     |     |    |
|                                    | Z - 46(b)   | Molinello et Gambatesa           | 500   | 105 | 290    |     | 95  | 100 | 35  |       |     |     |    |
|                                    | Z - 51      | (Appennins)                      | 1.600 | 18  | 97     |     | 21  | 45  | 20  |       |     |     |    |
| Kay, 1975                          | 1           | Série de Campbellton-Terre-Neuve | 720   |     |        |     |     |     |     |       |     |     |    |
|                                    | 2           | "                                | 5.310 |     |        |     |     |     |     |       |     |     |    |
|                                    | 3           | "                                | 1.080 |     |        |     |     |     |     |       |     |     |    |

**Tableau VIII** - Exemples d'analyses chimiques de sédiments métallifères anciens associés aux ophiolites.

Le milieu de formation généralement supposé de ces sédiments est une ride océanique active (Elderfield *et al.*, 1972 ; Robertson et Hudson, 1973 ; Robertson, 1976 ; Robertson et Fleet, 1976 ; Parmentier et Spooner, 1978 ; Desmet *et al.*, 1978 ; Ordin *et al.*, 1981). Cependant, quelques auteurs considèrent qu'il s'agit d'un environnement d'arc insulaire (Miyashiro, 1973 ; Robinson *et al.*, 1983 ; Schmincke *et al.*, 1983).

- Les ophiolites des Appennins en Italie (cf. fig. 9) sont caractérisées par la présence d'un niveau sédimentaire métallifère en contact direct avec le basalte et à la base d'une formation de cherts (Bonatti *et al.*, 1976). Ces dépôts d'âge jurassique supérieur sont essentiellement riches en manganèse et pauvres en fer (cf. tableau VIII) ; ce qui se traduit par la présence dominante de Braunite ( $3 \text{ Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnSiO}_3$ ). Ce minéral résulterait d'une recristallisation de minéraux initiaux de manganèse, due au métamorphisme qui a affecté le complexe lors de sa mise en place.

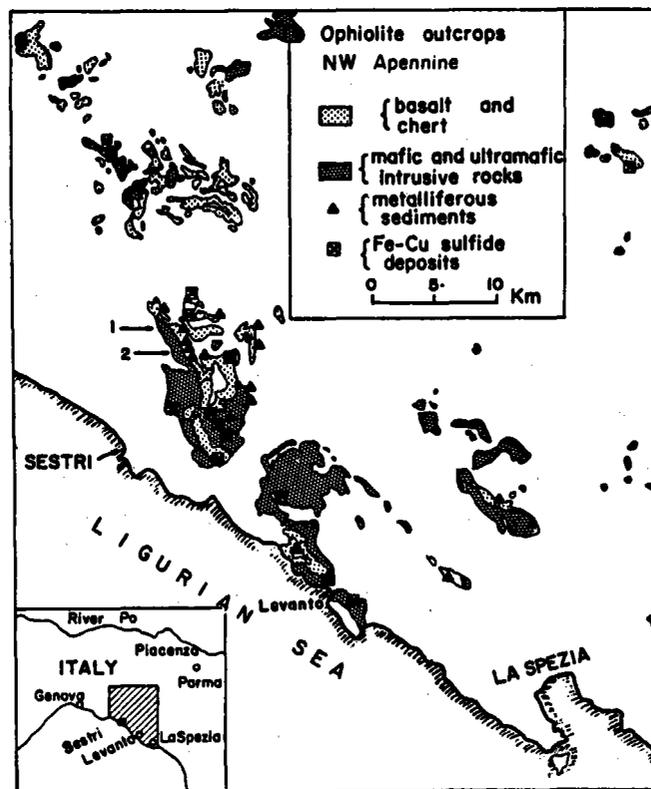
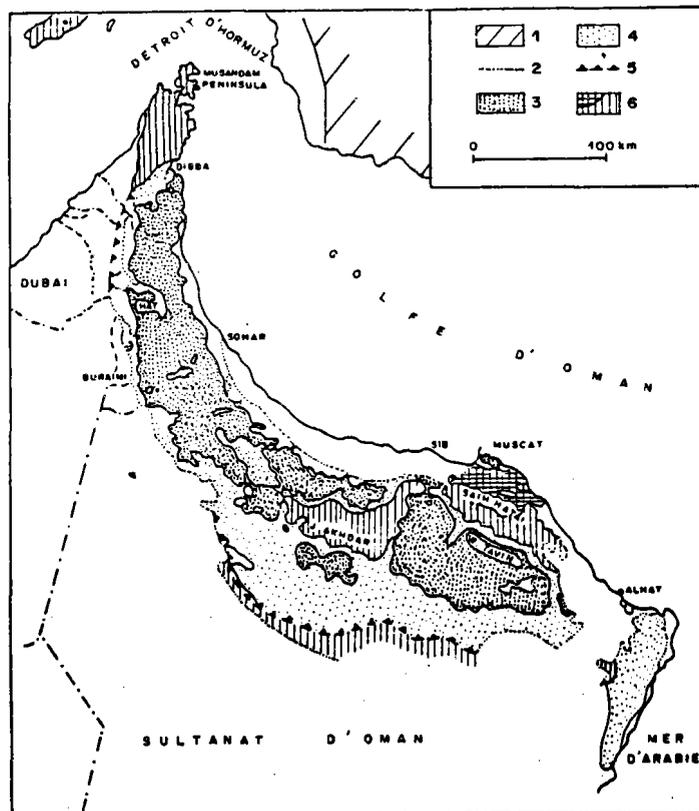


Fig. 9 : Le complexe ophiolitique au Nord-Ouest des Appennins (d'après Bonatti *et al.*, 1976).

Ces niveaux métallifères des Appennins sont rapprochés des dépôts hydrothermaux de la dorsale Atlantique à 26° Nord, par leur composition chimique, l'étude du spectre des terres rares (ils présentent une anomalie négative en Ce comme les dépôts hydrothermaux) et la valeur du rapport U/Th.

- La nappe de Sémail en Oman (cf. fig. 10) représente un fragment de croûte océanique obductée sur laquelle reposent des sédiments crétacés à caractère métallifère. Plusieurs types de dépôts sont observés : sulfures de cuivre, sédiments à oxydes de fer et manganèse ou seulement à oxydes de manganèse, positionnés soit entre les laves, soit au-dessus de celles-ci (cf. tableau VIII) (Fleet et Robertson, 1980 ; Robertson et Boyle, 1983 ; Juteau, 1984). La nappe de Sémail est interprétée comme étant un ancien fragment de dorsale active accompagnée de phénomènes hydrothermaux ayant donné naissance aux dépôts métallifères.



**Fig. 10** : Le complexe ophiolitique d'Oman (la nappe de Semail) (dans Juteau, 1984). 1 : complexe de subduction d'âge crétacé terminal - miocène ; 2 : couverture d'âge maestrichien terminal - paléocène ; 3 : nappe de Semail (ophiolites) ; 4 : sédiments alloctones (Hawasina et Sumeini) ; 5 : front des nappes de Hawasina ; 6 : nappes de Muscat (quadrillé) et unités autochtones de la plaque arabe.

- *La série de Campbellton*, au Nord-Est de Terre Neuve (fig.11) probablement d'âge cambrien ou ordovicien inférieur, comprend une épaisse formation volcanique surmontée d'une séquence d'argillites siliceuses (formation de Luscombe) de 300 m d'épaisseur, vers la base de laquelle existent 50 mètres d'une argillite manganésifère (Kay, 1975). Ce niveau, constitué essentiellement de rhodonite ( $MnSiO_3$ ) et de rhodochrosite ( $MnCO_3$ ) alternant avec des bancs d'argillites siliceuses, présente des affinités avec les dépôts manganésifères des ophiolites des Appennins décrits précédemment (cf. tableau VIII).

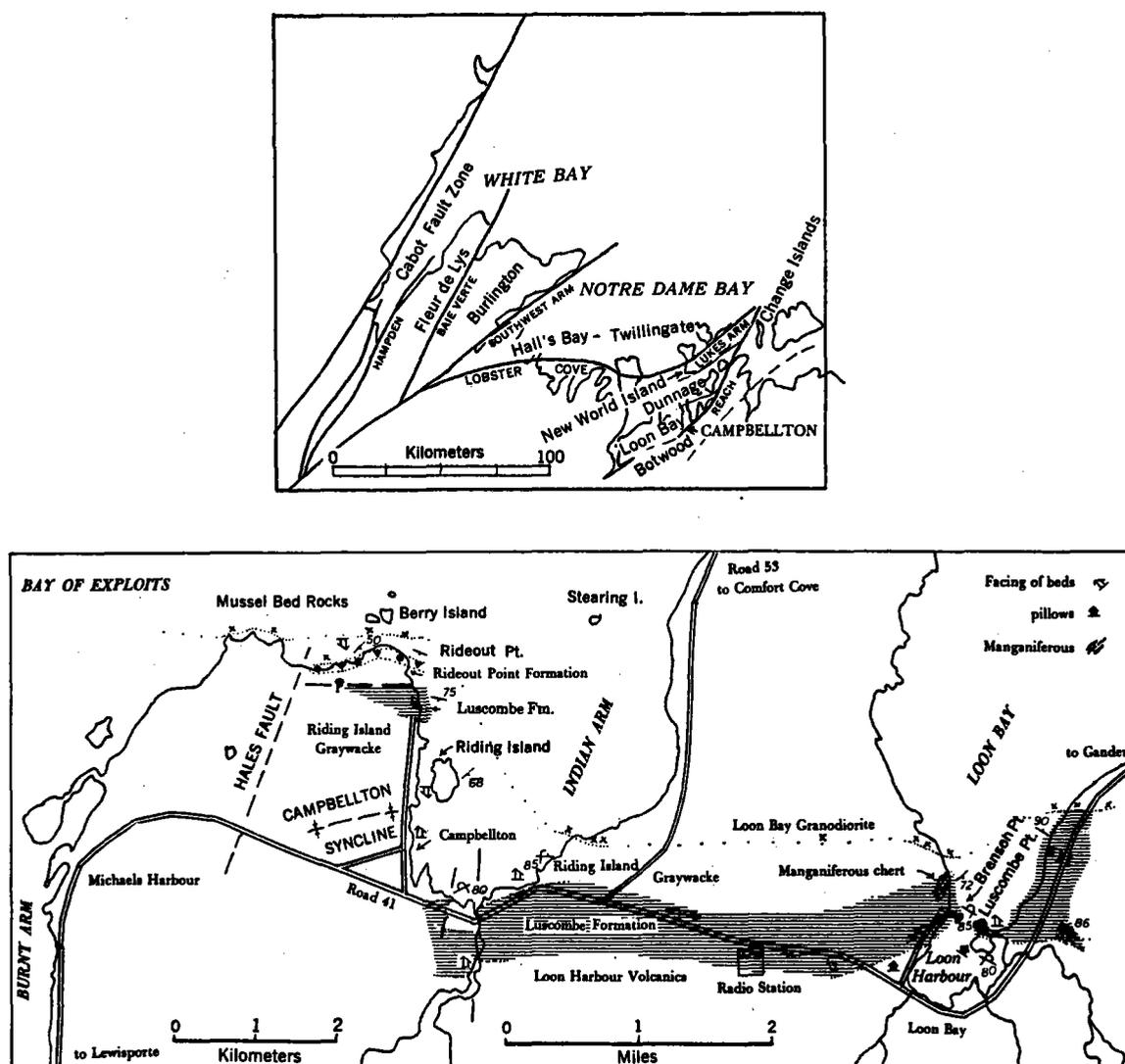
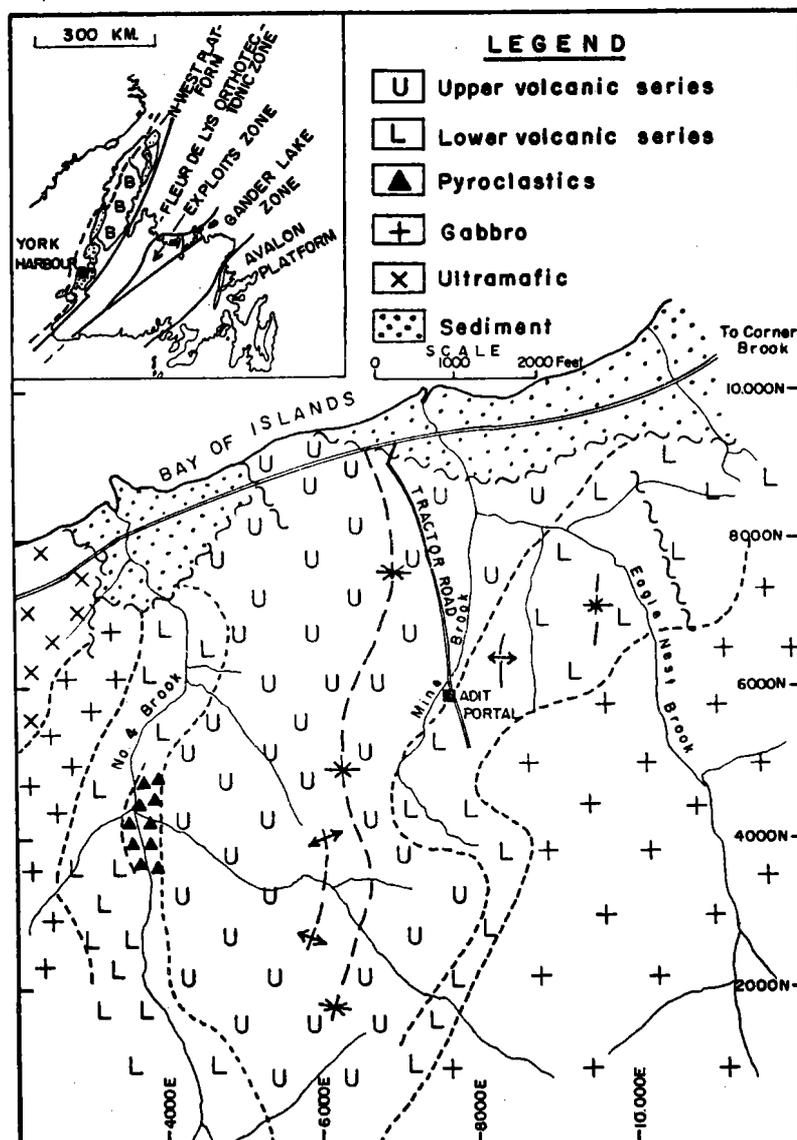


Fig. 11 : La séquence ophiolitique de Campbellton (Terre Neuve) : les sédiments manganésifères de la Formation de Luscombe (d'après Kay, 1975).

- Le complexe de York Harbour est situé dans la baie des Iles à Terre Neuve (fig. 12). Des petites lentilles de sulfures massifs de cuivre et de zinc sont présentes dans les roches volcaniques du complexe ophiolitique. Ces dépôts sont d'âge ordovicien moyen et présentent un métamorphisme assez important ayant entraîné la recristallisation de certains sulfures (Duke et Hutchinson, 1974). Ces auteurs comparent cette formation aux gisements actuellement observés en Mer Rouge ou aux dépôts anciens de sulfures de chypre.



**Fig. 12** : Le complexe ophiolitique de York Harbour (Terre Neuve) (d'après Duke et Hutchinson, 1974).

On constate à travers ces quelques exemples, que les dépôts minéralisés sédimentaires associés aux ophiolites sont en général attribués à des phénomènes hydrothermaux de dorsales océaniques anciennes ou d'arcs insulaires, et que les différents types d'environnements actuels (dorsales rapides ou lentes, mer en voie d'ouverture) sont reconnus dans l'ancien.

#### D - CONCLUSIONS

- Le terme "sédiment métallifère" est utilisé pour désigner des sédiments enrichis en fer et manganèse, et pauvres en aluminium, en provenance de divers environnements océaniques actuels ou anciens.

- La richesse en carbonates de certains sédiments métallifères amène souvent les auteurs à quantifier l'enrichissement en fer et manganèse sur la fraction non carbonatée.

- Un sédiment métallifère est désigné non pas par les valeurs absolues de ses teneurs en métaux, mais par le faible rapport  $(Al/Al + Fe + Mn) \times 100$  défini par Boström *et al.* (1969).

- Le terme "sédiment métallifère" a une connotation hydrothermale par référence aux travaux de Boström et Peterson (1966, 1969).

- Pour certains auteurs, le terme "sédiment métallifère" est employé dans le sens de fraction d'un autre sédiment et qui est dans ce cas synonyme de fraction d'origine hydrothermale (Bischoff et Rosenbauer, 1977 ; Bischoff *et al.*, 1979a).

Dans certains cas, l'hypothèse de l'origine hydrothermale est plausible. :

- au niveau des dorsales où l'hydrothermalisme est observé ;

- dans les niveaux à la base de la colonne sédimentaire, forés

par le Glomar Challenger. On peut en effet, imaginer aisément un dépôt de ces sédiments au niveau d'un centre d'accrétion, puis une migration vers leur position actuelle par le phénomène de l'expansion océanique.

- en Mer Rouge où des venues hydrothermales sont bien connues au niveau des fosses à saumures.

En revanche, il existe un problème au niveau des sédiments métallifères de surface éloignés des dorsales.

- C'est le cas - de la dépression de Bauer,
- du bassin de Tiki,
- de la zone DOMES,

qui présentent des sédiments de nature similaire à ceux de la dorsale du Pacifique Est. Des études comparatives ont été faites sur les taux de sédimentation, l'état de cristallinité des sédiments, les éventuelles concentrations en éléments mineurs comme As et Ni dans l'un ou l'autre type.

Dans ce travail, nous disposons d'un moyen d'étude nouveau : la soucoupe plongeante CYANA qui a permis l'observation directe d'une zone centrée à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, vers 13° Nord. Les plongées se sont déroulées pendant les missions CYATHERM (1982) et CYARISE (1984) de l'IFREMER, au cours desquelles des échantillons de sédiments ont été prélevés par la soucoupe.

Une étude de ces prélèvements a ainsi pu être menée dans un contexte géologique connu et dans un environnement hydrothermal bien exploré ; cette analyse permettant ensuite une comparaison avec divers types de sédiments métallifères qui ont été décrits dans ce chapitre.

# CHAPITRE II

ETUDE DE LA SEDIMENTATION A L'AXE DE LA DORSALE DU  
PACIFIQUE EST: LES ZONES DE 12°50 N ET 11°30 N

CHAPITRE II  
ETUDE DE LA SEDIMENTATION A L'AXE DE LA DORSALE DU  
PACIFIQUE EST : LES ZONES DE 12°50'N et 11°30'N

INTRODUCTION

Les zones de 12°50'N et 11°30'N sur la dorsale du Pacifique Est ont été le cadre de plusieurs missions organisées par l'IFREMER: CLIPPERTON (1981), CYATHERM (1982), et CYARISE (1984). Après la découverte en 1980, au cours de la mission SEARISE (Boulègue *et al.*, 1980 ; Francheteau, 1981), d'anomalies en hélium et manganèse vers 13° Nord, le but des trois missions entre 1981 et 1984 était d'approfondir l'exploration de cette partie de la dorsale, d'y étudier les manifestations hydrothermales, d'en comprendre le fonctionnement, de connaître la nature des dépôts associés, les écosystèmes, et le cadre structural dans lequel ont lieu ces phénomènes.

Des prélèvements de sédiments ont été effectués au cours de ces missions. Ils permettent d'accéder à une nouvelle dimension, celle de l'observation directe sur le terrain et du prélèvement in situ.

Leur analyse présente de plus un double intérêt :

- ils sont situés dans l'hémisphère Nord, tandis que les études publiées jusqu'à présent concernent surtout la portion sud de la dorsale du Pacifique Est,

- leur environnement est bien connu par les missions qui s'y sont déroulées.

## I - CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA DORSALE A 12°50'N ET 11°30'N ET LOCALISATION DES PRELEVEMENTS DE SEDIMENTS

### A - CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA DORSALE A 12°50'N ET 11°30'N (zones A et B)

Le domaine d'étude est divisé en deux zones A et B, centrées à l'axe de la dorsale respectivement à 12°50'N et 11°30'N (cf. fig. 13). Celle-ci est caractérisée par un taux d'accrétion élevé de 11 à 12cm/an (Hékinian *et al.*, 1983a et b ; Choukroune *et al.*, 1984).

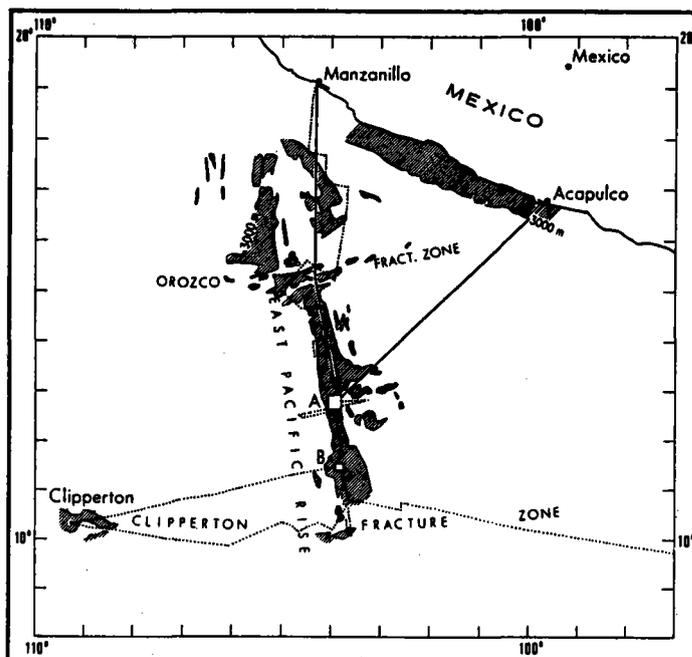


Fig. 13 - Carte générale de localisation des zones A et B des missions Clipperton (1981), Cyatherm (1982) et Cyarise (1984) (dans Hékinian *et al.*, 1984).

1 - MORPHOLOGIE DES ZONES A ET B (cf. fig. 14)

A ce niveau, la ride est étroite (1,5 km à l'isobathe 2.650 m), asymétrique, ce qui se traduit par un demi-taux d'accrétion plus fort à l'Ouest qu'à l'Est : 6,5 cm/an contre 4,5 cm/an (Choukroune *et al.*, 1984).

L'axe de la dorsale est occupé par un graben de 20 à 40 mètres de profondeur, et de 300 à 500 m de large dans la zone A, tandis qu'il est moins prononcé dans la zone B, où il a 200 m de large et seulement 20 m de profondeur (Hékinian *et al.*, 1981 ; 1983a ; 1983b ; Gente *et al.*, 1984).

La région est caractérisée par la présence de quatre seamounts qui bordent le graben central (cf. fig. 14).

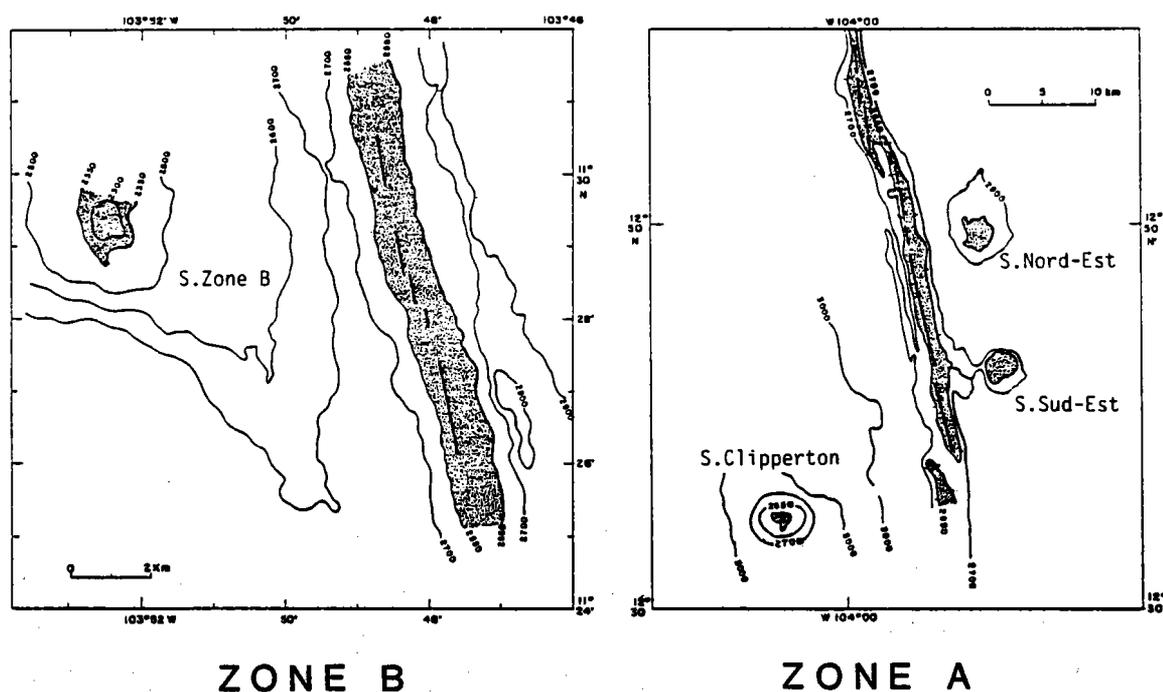


Fig. 14 - Les caractéristiques morphologiques des zones A et B.

### Dans la zone A

- Le seamount Clipperton est situé à 18 km à l'Ouest de l'axe, à 12°35'Nord. C'est une structure d'environ 6 km de diamètre qui s'élève à 800 m au-dessus du plancher océanique à l'isobathe 2.900 m.

- Les seamounts Sud-Est et Nord-Est sont chacun à 6 km à l'Est du graben à 12°43'N et 12°49'N. Le premier a une largeur de 6 km environ et une hauteur de 300 m à l'isobathe 2.800 m tandis que le second a la même largeur et une hauteur de 100 m à l'isobathe 2.800 m.

Dans la zone B, un seamount est centré à 7 km à l'Ouest de l'axe à 11°30' N. Sa largeur est d'environ 3 km et sa hauteur 250 m à l'isobathe 2.500 m.

## 2 - L'HYDROTHERMALISME

L'hydrothermalisme est observé à deux endroits :

### a) Dans le graben central

C'est là que se situe l'essentiel de l'activité hydrothermale et en particulier au Nord de 12°47'N. Plus de 80 dépôts y ont été recensés entre 12°41'N et 12°52'N, espacés de 100 à 200 m en moyenne sur une distance de 20 km environ (cf. fig. 15). 24 sites ont montré des cheminées actives et 60 dépôts se sont révélés inactifs (Hékinian *et al.*, 1983b, 1984, Hékinian et Fouquet, 1985). Les manifestations hydrothermales au niveau du graben central sont de plusieurs types (Hékinian et Fouquet, 1985 ; Hékinian *et al.*, 1985) qui correspondent selon ces auteurs à des stades différents au cours desquels les édifices hydrothermaux se mettent en place, puis cessent toute activité.

- Le premier stade est représenté par une émission de fluide basse température (< 30°C) à travers les fissures dans les basaltes, sans qu'il y ait la formation d'un édifice. Il y a seulement dépôt

d'hydroxydes de Fe, Al, et Mg orange, rouges et blancs (Hékinian *et al.*, 1985) ou de sulfures de fer basse température (Hékinian et Fouquet, 1985).

- Les stades suivants sont marqués par une plus haute température d'émission des fluides et par la formation de nouvelles paragenèses sulfurées à Fe, Zn et Cu. Ces différents stades se traduisent par l'édification de structures irrégulières ou en colonnes dont la hauteur peut atteindre 25 m et la largeur 5 m (Hékinian *et al.*, 1983b, 1984). Les structures montrent en général des petites cheminées, de hauteur inférieure à 2 m et qui viennent se greffer à différents niveaux sur ces colonnes. La température des fluides peut atteindre 350°C, leur débit d'émission est en moyenne de 10 l/s, (Hékinian *et al.*, 1983b) et leur pH inférieur à 5 (Hékinian *et al.*, 1985).

- Le dernier stade est représenté par l'obstruction progressive des bouches émissives et la cessation de l'émission hydrothermale. L'édifice va ensuite petit à petit se dégrader par oxydation de ses constituants (Hékinian *et al.*, 1985 ; Hékinian et Fouquet, 1985) et éventuellement se fracturer.

#### b) L'hydrothermalisme hors-axe

- Un seul indice d'activité hydrothermale a été détecté en dehors de l'axe. Il s'agit d'une émission de fluide à 17°C observée dans le Sud-Est de la zone A entre le graben central et le seamount Sud-Est, sur une structure volcanique marginale en demi-cercle appelée "constructional marginal high" (Geocyarise, 1984 ; Hékinian et Fouquet, 1985).

- Sur les seamounts, aucune manifestation hydrothermale active n'a été observée. Des dépôts sont présents sur le seamount Sud-Est de la zone A et le seamount de la zone B. Les dépôts sont caractérisés par des sulfures massifs de cuivre et de fer abondants tandis que les sulfures de zinc sont rares sur le seamount Sud-Est contrairement aux dépôts hydrothermaux de l'axe. Ils sont également consti-

tués par des oxyhydroxydes et de la silice amorphe (Geocyarise, 1984 ; Hékinian et Fouquet, 1985).

Les dépôts hydrothermaux des seamounts correspondent au stade ultime d'évolution de plusieurs émissions hydrothermales qui forment des structures importantes de corps lenticulaires superposés (Hékinian et Fouquet, 1985).

- |   |  |
|---|--|
| ▲ | Sites hydrothermaux actifs.  |
| ● | Sites hydrothermaux inactifs observés durant Cyatherm.               |
| ■ | Sites hydrothermaux en majorité inactifs observés durant Clipperton. |
| ⊖ | Points hauts (2600m) en bordure du graben central.                   |
| ⊕ | Graben central (isobathe 2640m).                                     |

Légende Fig. 15.

### 3 - DETECTION DE L'HYDROTHERMALISME DANS L'EAU DE MER ET MISE EN EVIDENCE DES COURANTS DOMINANTS A 12°50'N ET 11°30'N.

Craig *et al.* (1975), ont mis en évidence un excès d'hélium ( $^3\text{He}$ ) d'origine mantellique dans l'eau de mer au niveau de la dorsale du Pacifique Est. Depuis, de nombreuses mesures du rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ( $\delta^3\text{He}$ ) ont montré qu'il constitue un bon indice pour repérer les phénomènes hydrothermaux (Lupton, 1979 ; Lupton *et al.*, 1980).

D'autres paramètres importants permettent également de tracer cette activité hydrothermale. Il s'agit des concentrations anormalement élevées en manganèse et en méthane ( $\text{CH}_4$ ) observées et mesurées par Klinkhammer *et al.* (1977) ; Welhan et Craig (1979) ; Lupton *et al.* (1980).

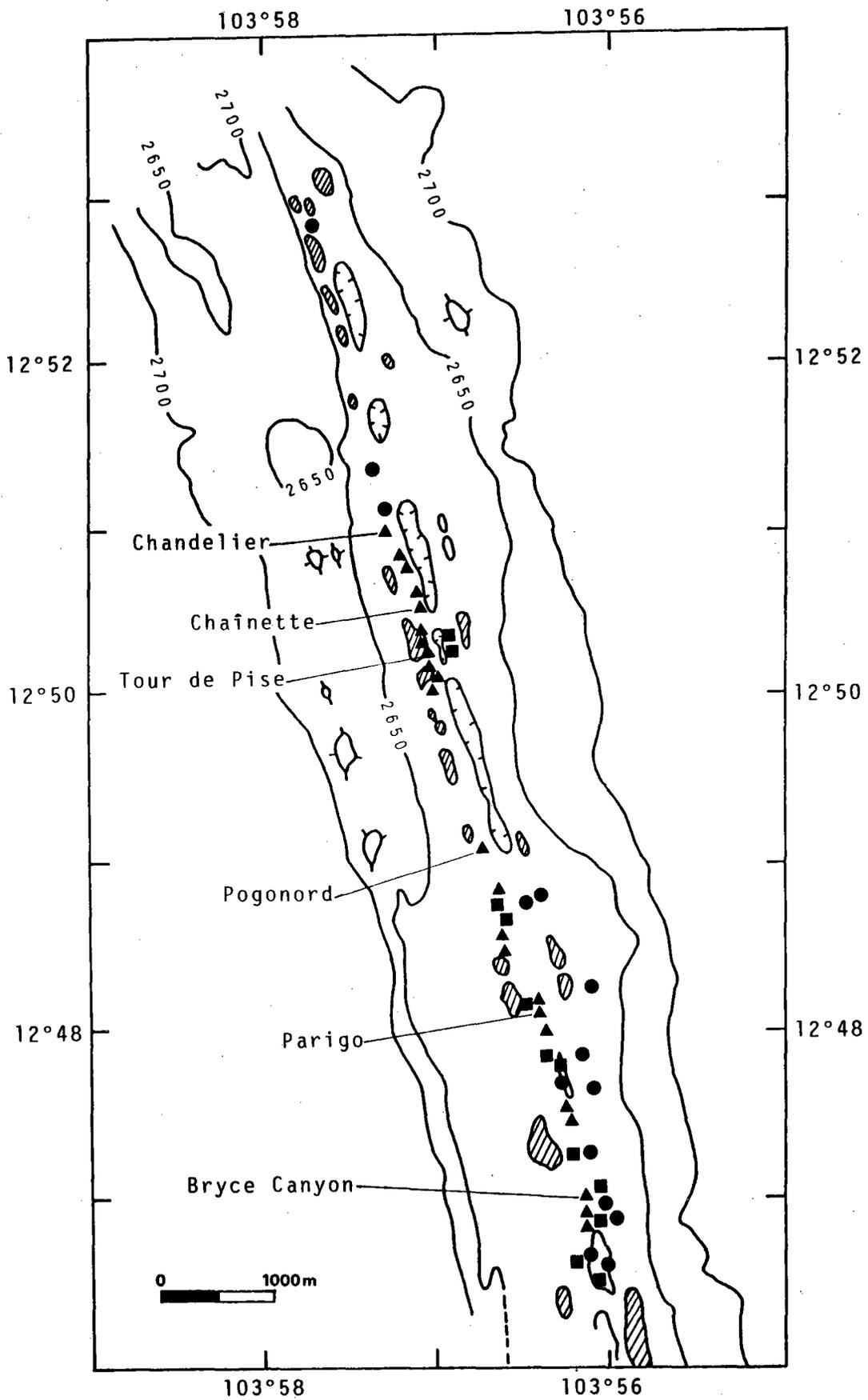


Fig. 15 - Localisation des sites hydrothermaux actifs et inactifs dans le graben central au niveau de la zone A (d'après Hékinian *et al.*, 1984).

De tels paramètres, évalués au cours de la mission Searise (1980) ont permis de mettre en évidence l'existence d'hydrothermalisme actif dans les zones à 12°50'N et 11°30'N sur la dorsale du Pacifique Est. Puis d'autres mesures ont été effectuées pendant les missions Clipperton et Cyatherm. Ainsi, les anomalies positives de manganèse atteignent des maxima de  $30 \cdot 10^{-9}$  mole/kg à  $36 \cdot 10^{-9}$  mole/kg (30 à 36 nM/l) et pour l'hélium cette valeur est de 73% plus élevée que pour l'hélium atmosphérique. Ces anomalies sont les plus fortes au-dessus de la zone axiale de la dorsale (Boulàgue *et al.*, 1980 ; Merlivat *et al.*, 1981 ; Bougault, 1982 ; Hékinian *et al.*, 1983a) (cf fig. 16).

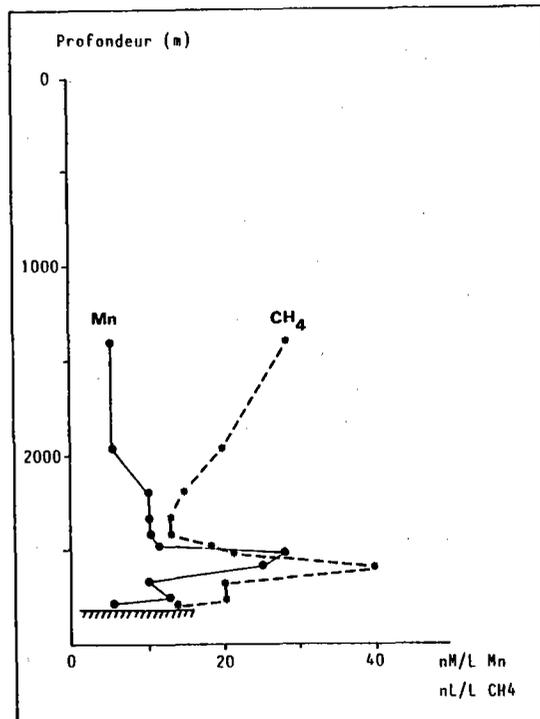


Fig. 16 - Anomalies de manganèse et de méthane : exemple d'un profil en fonction de la profondeur à 3 km à l'Ouest du graben central dans la zone A (HY-CY-5) (d'après Charlou, dans Bougault, 1982).

Une anomalie positive en méthane est également observée. Elle atteint 40 nl/l pour le prélèvement (HY-CY-5) (cf fig. 16) situé à environ 3 km de l'axe sur le flanc ouest, dans la zone A.

Dans la colonne d'eau, les anomalies maximum sont obtenues entre 100 et 200 m au-dessus du fond. Un régime ouest dominant des courants de fond dans cette zone est mis en évidence par la dispersion dans cette direction des anomalies de l'hélium, du manganèse et du méthane. A 70 km à l'Ouest de la ride, un niveau encore enrichi en  $^3\text{He}$  ( $\delta^3\text{He} = 32\%$ ) est identifié à 2.500 m de profondeur (Merlivat *et al.*, 1981), c'est-à-dire à environ 650 mètres au-dessus du fond. En revanche, à l'Est de l'axe, aucune anomalie n'est mesurée, sauf au niveau du sommet du seamount Sud-Est de la zone A et qui est inférieure à  $15.10^{-9}$  mole/kg pour le manganèse.

Une nouvelle méthode de détection de l'hydrothermalisme a été testée au cours de la mission CYARISE. Elle consiste à mesurer la différence de potentiel redox entre les eaux de surface et les eaux de fond au-dessus de la dorsale. Les premières mesures ont montré une anomalie négative d'amplitude 6 à 8 mV près du fond et s'étendant parfois jusqu'à 500 ou 600 m au-dessus de celui-ci (Geocyarise, 1984).

#### B - LOCALISATION DES PRELEVEMENTS DE SEDIMENTS (cf. fig. 17)

L'échantillonnage des sédiments a été rassemblé au cours des 3 missions : CLIPPERTON (1981), CYATHERM (1982) et CYARISE (1984).

On peut diviser celui-ci en trois groupes selon leur position par rapport à la dorsale :

- Les échantillons prélevés dans le graben central et jusqu'à 6 km de celui-ci sur les flancs ouest et est, dans la zone A (zone "axiale"). Parmi ceux-ci, un seul a été prélevé directement au pied d'une cheminée hydrothermale inactive.

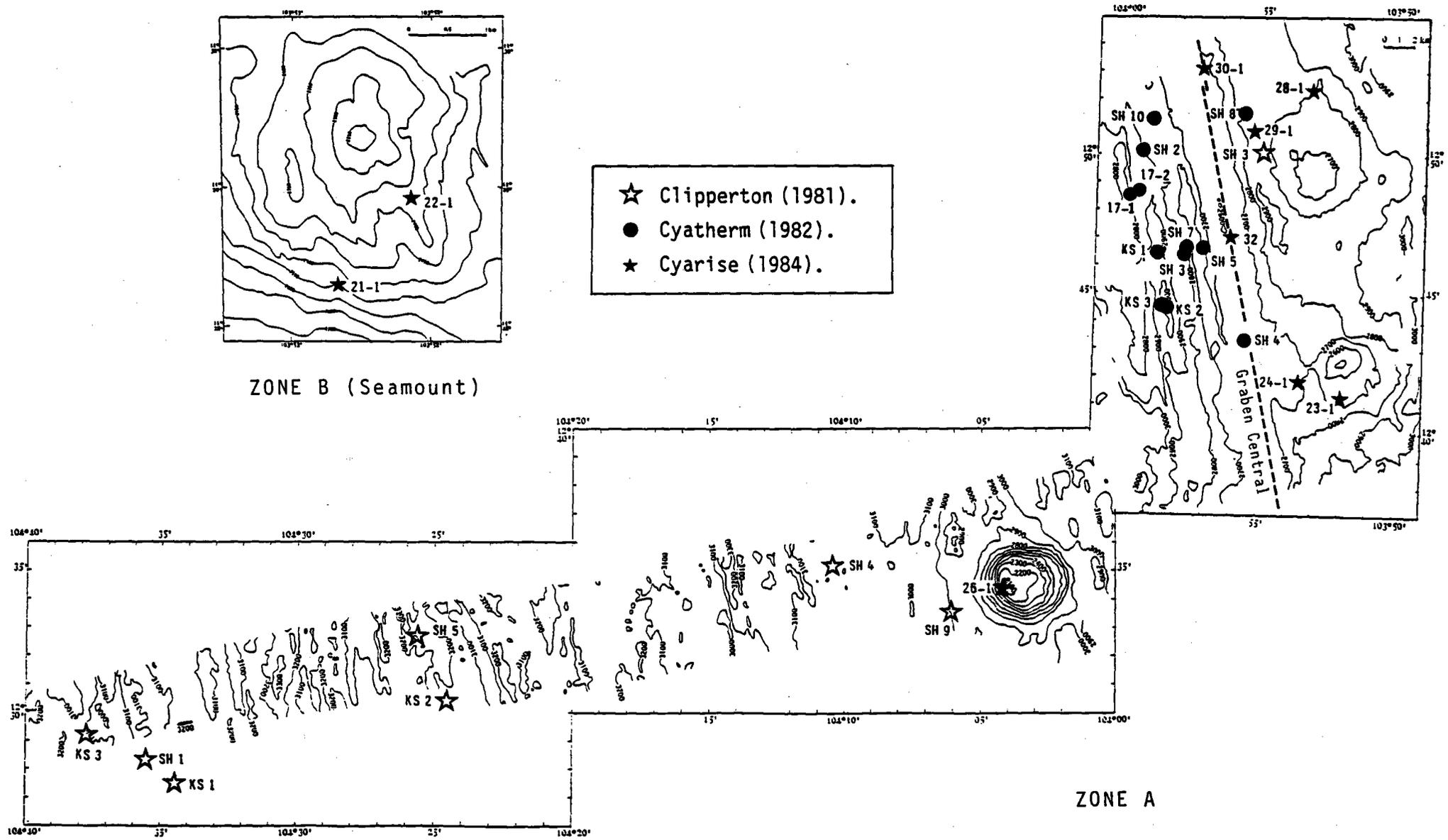


Fig. 17 - Localisation des prélèvements de sédiments dans les zones A et B.

- Les sédiments situés sur le flanc ouest entre 8 et 80 km de l'axe, également dans la zone A.

- Les prélèvements effectués sur les quatre seamounts dans les zones A et B.

## II - MODES DE PRELEVEMENTS ET DESIGNATION DES ECHANTILLONS

### A - LES MODES DE PRELEVEMENTS (cf tableau IX Annexe I).

Les sédiments ont été prélevés selon 3 méthodes qui apparaissent dans la désignation des échantillons :

Les carottes Küllenberg (KS), obtenues à partir du bateau. Les plus longues ont atteint 2,15 m.

Les bennes Shipeck (SH) qui prélèvent massivement les 10 à 20 premiers centimètres du sédiment. Elles sont également manoeuvrées depuis la surface.

Les prélèvements de la soucoupe Cyana (CY) effectués avec un tube de plastique par l'intermédiaire du bras manipulateur.

### B - LA DESIGNATION DES ECHANTILLONS

L'abréviation CL ou CY précède celle du mode de prélèvement et désigne les missions Clipperton et Cyatherm, sauf dans le cas des prélèvements à partir de la soucoupe où la mission est reconnue par l'année au cours de laquelle elle a eu lieu (82 pour Cyatherm et 84 pour Cyarise), le nom de l'échantillon débute alors invariablement par CY.

## III - LES SEDIMENTS DE SURFACE DANS LE GRABEN CENTRAL ET A PROXIMITE DE L'AXE (JUSQU'A 6 KM) : LA ZONE "AXIALE" (cf fig. 17 et tableau IX, Annexe I)

17 échantillons ont été prélevés dans le graben central et sur les flancs de la dorsale à moins de 3 km de l'axe. La majorité de ceux-ci est située sur le flanc ouest tandis que sur le flanc est, ils sont limités entre l'axe et les seamounts Nord-Est et Sud-Est. Parmi ces 17 échan-

tillons, il en existe un (CY 82-32) qui présente des caractéristiques particulières. Nous le traiterons à part.

## A - LES SEDIMENTS CARACTERISTIQUES DANS CETTE ZONE

### 1 - LES DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES

#### a) Couleur des sédiments humides

La couleur des sédiments humides a été codifiée selon le principe de la Munsell Soil Color Chart (Edition 1954).

Ils ont une couleur homogène brun, brun-jaune à brun-rouge plus ou moins foncé (cf tableau IX, Annexe I).

#### b) La teneur en eau des sédiments

Elle exprime le pourcentage du poids en eau du sédiment humide par rapport au poids du sédiment sec :

$$t,e = \frac{\text{pds.sed.hum.} - \text{pds.sed.sec}}{\text{pds.sed.sec}} \times 100$$

Cette mesure a été faite seulement sur les échantillons frais.

La moyenne obtenue sur 14 échantillons de surface est de 305 % avec des valeurs extrêmes de 161 % et 444 % (cf tableau X, annexe I).

#### c) Texture des sédiments

Ce sont des sédiments meubles, fins parfois légèrement granuleux à cause de la présence de foraminifères ou de fragments de verre volcanique.

#### d) Les teneurs en CaCO<sub>3</sub>

Elles ont été déterminées par la méthode du calcimètre de Bernard qui consiste en une mesure du CO<sub>2</sub> dégagé à partir de l'attaque des carbonates par HCl.

Les valeurs obtenues oscillent entre 6,5 % et 56 %, et sont en moyenne de 24 % (cf tableau XI, annexe I).

On observe donc une grande variation des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  pour des échantillons relativement proches les uns des autres.

D'autre part, elles sont faibles pour une zone située au-dessus de la CCD (Calcite Compensation Depth). Cette observation sera discutée plus tard.

e) Observation des sédiments en frottis : détermination des faciès sédimentaires

Les frottis sont faits à partir du sédiment total, et permettent par une détermination du pourcentage des constituants d'établir les faciès présents.

$\alpha$  - Les phases observées (cf tableau XII, annexe I)

Elles sont au nombre de trois :

- Les argiles et les oxyhydroxydes : la distinction entre ces deux phases est difficile à établir au microscope, en raison de leurs tailles voisines. On définit ici, en effet comme "argiles", toutes les particules de taille inférieure au pouvoir de résolution du microscope tandis que les oxyhydroxydes se présentent en amas diffus, brun plus foncé et parfois opaques.

Une partie des argiles peut donc être intégrée dans les amas d'oxyhydroxydes, et ces derniers lorsqu'ils sont de petite taille sont assimilés aux argiles. Ainsi, les pourcentages de l'un et de l'autre peuvent être sous-estimés.

Les argiles ainsi définies représentent 67 à 92 % de la surface en frottis, et les oxyhydroxydes : 3 à 20 %.

Les argiles + les oxyhydroxydes constituent au total au moins 81 % et jusqu'à 97 % du sédiment total.

- La phase biogène est un assemblage formé essentiellement de foraminifères (2 à 15 %), de radiolaires (0 à 5 %) et de diatomées (à l'état de traces et jusqu'à 2 %), mais également de coccolithes (0 à 1 %), spicu-

les siliceux (0 à 1 %) et de traces de silicoflagellés et acanthaires.

- Le verre volcanique. Sa proportion varie de 0 à 3 %. Il se présente sous forme de fragments anguleux de quelques centaines de  $\mu\text{m}$  à quelques mm, de couleur noire à brun clair, opaque ou translucide et isotrope en lumière polarisée. Les cassures conchoïdales sont souvent très nettes, et son aspect est parfois vacuolaire.

### $\beta$ - Les facies sédimentaires observés

La classification adoptée pour la dénomination des sédiments est celle de Hoffert (1980) (cf tableau XIII).

Un sédiment est tout d'abord qualifié de "sable" ou de "vase" selon la dominance d'éléments grossiers visibles à l'oeil nu, ou d'éléments fins, non discernables de cette manière.

Ce terme est suivi d'un ou plusieurs qualificatifs qui permettent de mettre en évidence l'existence d'éléments particuliers dans le sédiment, en fonction de leur abondance.

| Proportion du composant | abondance | mode de transcription |
|-------------------------|-----------|-----------------------|
| > 50 %                  | dominant  | «de»                  |
| > 25 à 50 %             | abondant  | «à»                   |
| > 5 à 25 %              | commun    | «avec»                |
| 0 à 5 %                 | rare      | «traces de»           |

Tableau XIII - Classification et dénomination des sédiments (Hoffert, 1980).

Ex. : Une "vase d'argiles avec oxyhydroxydes" est un sédiment fin qui contient plus de 50 % d'argiles, et entre 5 et 25 % d'oxyhydroxydes.

Ces observations montrent que tous les échantillons de sédiments de cette zone sont des vases d'argiles caractérisées en plus par la présence d'oxyhydroxydes et de foraminifères en proportions variables qui ne dépassent pas toutefois le stade de constituants "communs".

### f) Conclusion

- Les sédiments étudiés ici et prélevés dans le graben central et près de l'axe, constituent un ensemble homogène de vases d'argiles brunes. Des variations importantes sont observées au niveau des teneurs en carbonates qui sont responsables de la couleur plus ou moins claire des sédiments.

## 2 - OBSERVATION DE LA FRACTION GROSSIERE (> 63 µm) ET BIO-STRATIGRAPHIE

Le sédiment total a été séché à l'étuve à 60°C pendant 24 heures, puis passé dans un tamis de norme AFNOR, de maille 63 µm. Le résidu de tamis a ensuite été récupéré, puis pesé pour connaître son pourcentage par rapport au sédiment total humide. Son observation a été effectuée à la loupe binoculaire et au microscope électronique à balayage (MEB).

### a) Proportion et répartition de la fraction grossière

Le pourcentage de fraction grossière (> 63 µm) est compris entre 2 et 56 %. Il est en moyenne de 21 % (cf tableau XIV). Cette grande variation s'explique par la concentration particulièrement importante d'éléments biogènes ou non, déjà en partie observés à l'oeil nu sur le sédiment et qui lui confèrent une texture légèrement granuleuse.

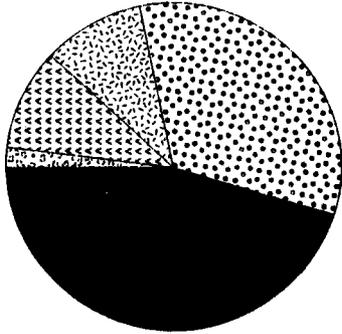
| Echantillon          | % > 63µm |
|----------------------|----------|
| <u>zone "axiale"</u> |          |
| CL SH3               | 30       |
| CY 82-17-1           | 38       |
| CY 82-17-2           | 56       |
| CY SH2               | 17       |
| SH3                  | 20       |
| SH4                  | 21       |
| SH5                  | 13       |
| SH7                  | 15       |
| SH8                  | N.D      |
| SH10                 | 28       |
| CY KS1               | 21       |
| KS2                  | 27,5     |
| KS3                  | 15       |
| CY 84-24-1           | 2        |
| 29-1                 | 13       |
| 30-1                 | 4        |
| CY 82-32             | 6        |

Tableau XIV - Pourcentage de la fraction grossière (> 63 µm) dans les sédiments de surface de la zone "axiale" dans la zone A.

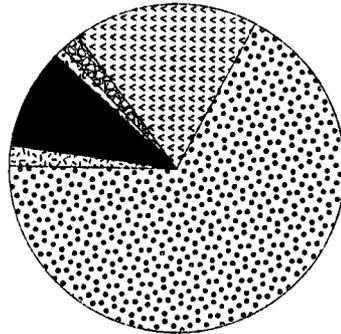
### b) Les constituants de la fraction grossière (cf fig. 18 et tableau XV, annexe I)

#### α - La fraction non biogène

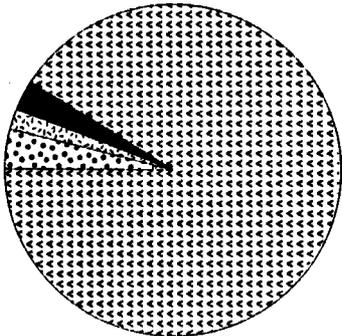
- Les agrégats bruns: L'observation de la fraction grossière met en évi-



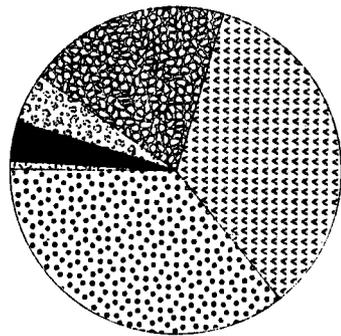
CL SH 3



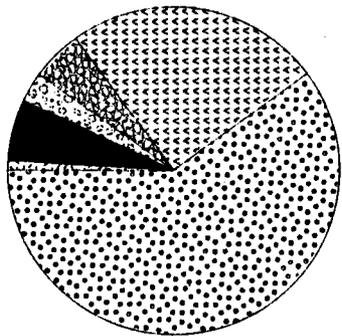
CY KS 2



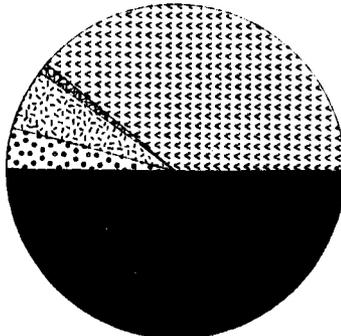
CY KS 3



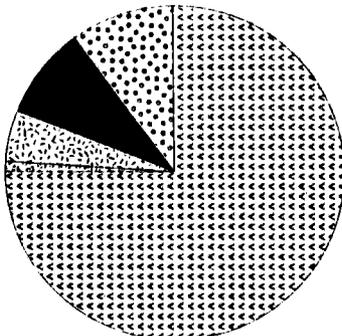
CY 82-17-1



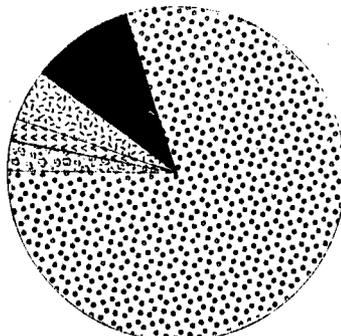
CY 82-17-2



CY 84-24-1



CY 84-29-1



CY 84-30-1

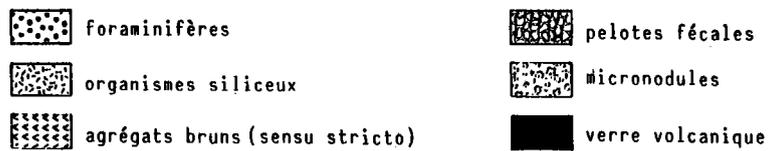
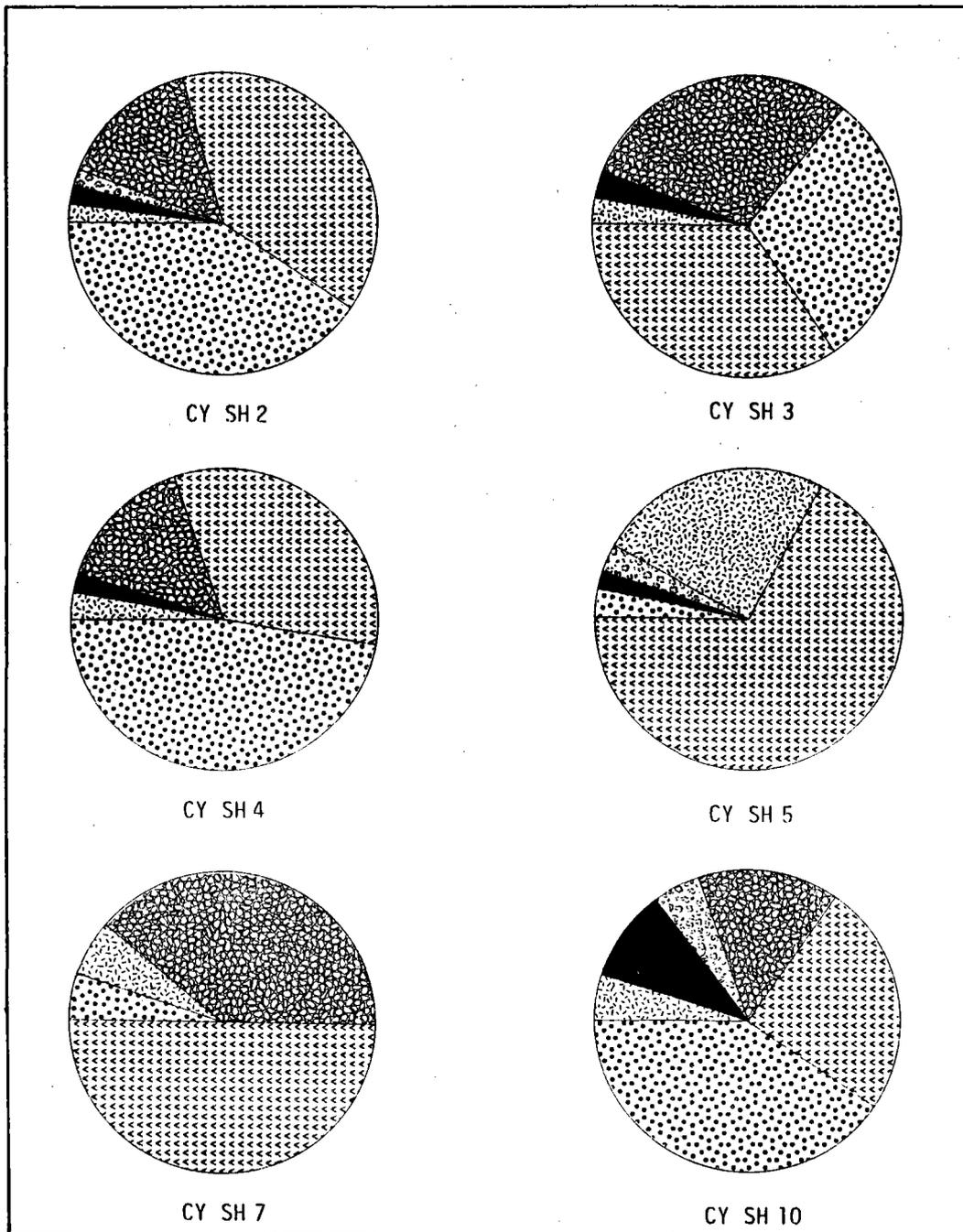


Fig. 18 - Les constituants de la fraction grossière des sédiments de surface de la zone "axiale" dans la zone A.

dence l'existence de 2 types différents d'agrégats bruns :

- . Les agrégats bruns au sens strict : ils sont caractérisés par une forme irrégulière et sont constitués de particules liées entre elles : fragments biogènes, oxyhydroxydes et argiles. Leur taille est très variable, et peut atteindre plusieurs millimètres (cf planche I, photo 1). Ils sont présents dans tous les sédiments dans une proportion qui oscille entre 2 et 91 %. Il faut souligner que le mode de tamisage effectué à partir du sédiment sec a tendance à exagérer le pourcentage de ces agrégats.
- . Les pelotes fécales : contrairement aux précédents, elles ont une forme ovale bien régulière d'une longueur de 400  $\mu\text{m}$  environ et sont constituées de particules de tailles homogènes, de même nature que celles des agrégats bruns au sens strict (cf planche I, photo 2). Leur proportion varie de 0 à 50 %. Elles sont donc moins abondantes que les précédents et leur présence n'est pas systématique.

- Le verre volcanique: Les fragments de verre volcanique sont aisément reconnaissables à leur cassure en esquilles ou conchoïdale, et à leur couleur noire ou brune plus ou moins translucide. Leur taille peut atteindre plusieurs millimètres. Le verre volcanique est toujours présent, au moins à l'état de traces et occupe jusqu'à 50 % de la fraction grossière dans l'échantillon CY 84-24-1 situé sur le "constructional marginal high" à l'Est du graben central.

Une fine pellicule d'altération verdâtre est quelquefois visible en surface. Une observation au MEB a montré qu'il s'agit de smectites néoformées (cf planche I, photos 3 à 5).

- Les micronodules : ils sont toujours présents, et jusqu'à 8 %. Leur taille varie de plusieurs centaines de  $\mu\text{m}$  au millimètre. Ce sont des microconcrétions de formes variables, rondes, ovales ou quelconques de couleur noire à brun sombre (cf planche I, photo 6).

Une étude menée par E. Lallier-Vergès (Université de Paris Sud, Orsay) a montré une absence de structure interne définie, contrairement aux autres micronodules du Pacifique. Du sédiment est parfois emprisonné à l'intérieur des micronodules.

Leur composition chimique (cf tableau XVI), obtenue à partir d'une diode couplée à un MEB, est caractérisée par une richesse particulière en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (30 à 40 %) et  $\text{SiO}_2$  (20 à 25 %), et au contraire des va-

leurs faibles de  $Al_2O_3$  (3 à 4 %). Ils sont également riches en  $MnO_2$ , mais le rapport  $Fe/Mn$  est  $>1$ , ce qui est différent des autres micronodules du Pacifique (Monaco, 1979 ; Lallier-Vergès et Clinard, 1983 ; Lallier-Vergès, en préparation).

L'absence de structure interne ainsi que la présence de sédiment emprisonné dans les micronodules impliquent une croissance rapide de ceux-ci par précipitation au sein du sédiment.

|                       | CY SH 5 |       | CY SH 10 |        | *165 KG |
|-----------------------|---------|-------|----------|--------|---------|
| $Na_2O$               | 0,06    | 0,46  | 0,09     | 0,42   | 1,00    |
| $MgO$                 | 1,91    | 2,40  | 2,32     | 2,44   | 4,10    |
| $Al_2O_3$             | 3,03    | 3,72  | 4,10     | 3,90   | 5,95    |
| $SiO_2$               | 20,95   | 19,99 | 22,36    | 24,20  | 14,30   |
| $P_2O_5$              | 1,83    | 2,76  | 2,78     | 2,20   | 0,40    |
| $SO_3$                | 0,16    | 0,61  | 0,28     | 0,41   |         |
| $Cl$                  | 0,33    | 0,38  | 0,24     | 0,40   |         |
| $K_2O$                | 0,32    | 0,34  | 0,31     | 0,33   | 1,60    |
| $CaO$                 | 4,22    | 5,61  | 5,36     | 5,88   | 2,00    |
| $TiO_2$               | 0,35    | 0,49  | 0,51     | 0,48   | 0,65    |
| $MnO_2$               | 26,66   | 29,05 | 22,11    | 19,16  | 36,12   |
| $Fe_2O_3$             | 39,54   | 32,69 | 38,02    | 38,34  | 5,63    |
| $NiO$                 | 0,03    | 0,28  | 0,50     | 0,70   | 0,75    |
| $CuO$                 | 0,09    | 0,29  | 0,40     | 0,52   | 1,00    |
| $SrO$                 | 0,48    | 0,91  | 0,60     | 0,62   |         |
| TOTAL                 | 99,96   | 99,98 | 99,98    | 100,00 |         |
| $Fe/Mn_{\text{nod}}$  | 1,44    | 1,25  | 1,91     | 2,22   | 0,17    |
| $Fe/Mn_{\text{séd.}}$ | 4,8     |       | 5,06     |        | 7,21    |

Tableau XVI : Composition de quelques micronodules dans les échantillons CY SH5 ET CY SH10 de la zone A et comparaison avec des micronodules du Pacifique Sud (carotte 165 KG (0-1 cm) de la mission "SO-14")  
\* d'après Lallier-Vergès et Clinard (1983).

- Les feldspaths et le quartz : ils sont rarement observés, et uniquement en traces. Le quartz traduit une légère influence détritique, tandis que les feldspaths peuvent résulter de l'activité volcanique locale.

- Les sulfures : ils sont observés en traces uniquement dans l'échantillon CY 84-29-1, et représentent vraisemblablement une pollution par d'autres échantillons de sulfures, intervenue au cours de leur prélèvement.

### β - La fraction biogène

Elle est dominée par les foraminifères, puis par les radiolaires, les diatomées et les spicules siliceux.

- Les foraminifères: Ils représentent la phase biogène la plus importante (4 à 80 % de la fraction grossière).

Les foraminifères à tests calcaires sont dominants tandis que l'on observe seulement des traces de foraminifères benthiques agglutinants dont les tests sont constitués de verre volcanique. Leur état de conservation est généralement moyen à mauvais (cf fig. 19), mais il est fréquent d'observer dans un même échantillon des spécimens dont les états de conservation sont très différents. La dissolution des tests se manifeste par la disparition des parties les plus fragiles. Dans les cas extrêmes, seuls subsistent des fragments de la carène, plus résistante.

Il est intéressant de constater que l'état de conservation des foraminifères n'est pas forcément lié au pourcentage de  $\text{CaCO}_3$ .

Les déterminations de foraminifères ont été effectuées par L. Pastouret (cf Caziot, 1982) et E. Vincent.

Les résultats montrent que cette faune est constituée d'espèces d'eaux chaudes, surtout pélagiques et parfois benthiques, de répartition miocène à quaternaire et probablement actuelle.

L'étude des foraminifères met donc en évidence un phénomène de dissolution important. De plus, la coexistence de tests d'états de conservation très différents et le fait que le taux de dissolution et la proportion de  $\text{CaCO}_3$  ne soient pas liés, peuvent traduire soit une résistance à la dissolution, variable selon les espèces, soit des remaniements au sein des sédiments par les courants et probablement une combinaison des deux phénomènes.

- Les radiolaires: Moins abondants que les foraminifères, les radiolaires représentent néanmoins 1 à 20 % de la fraction grossière.

Leur état de conservation est meilleur que celui des foraminifères ; il est en général moyen à bon (cf fig. 19). Localement, dans l'échantillon CY SH 5 il est exceptionnellement bon. Celui-ci est situé sur le flanc ouest de l'axe.

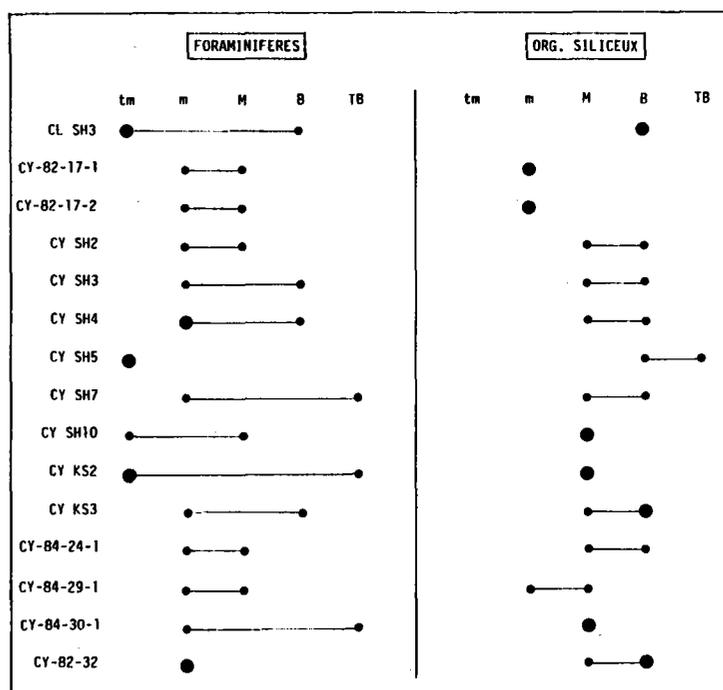


Fig. 19 - Etat de conservation des organismes calcaires et siliceux dans les sédiments de surface de la zone "axiale".

On observe qu'il n'y a pas de relations entre la dissolution des organismes calcaires et siliceux.

La détermination des espèces rencontrées a été faite par A. Schaaf. La diversité spécifique peut être très grande, et donne un âge quaternaire. Cependant, il n'est pas possible de préciser si les sédiments sont actuels (< 180 000 ans). En effet, l'espèce *Buccinosphaera invaginata* qui indiquerait des sédiments actuels, n'est pas présente. Cependant, il faut signaler que ce radiolaire est rare et fragile.

- Les diatomées: Parfois totalement absentes, elles représentent généralement des traces ou 1 % de la fraction grossière. Seul l'échantillon CY SH 5, dans lequel les radiolaires sont très bien conservés, en contient 5 %.

Leur préservation est bonne à moyenne, avec des indices de dissolution fréquents (cf fig. 19).

Les déterminations ont été faites par A.L. Monjanel et ne permettent pas de préciser davantage l'âge des sédiments de cette zone ; l'association est en effet Miocène - Actuel.

- Les spicules siliceux: Ils sont toujours présents, jusqu'à 1 % de la fraction grossière.

### c) Conclusions

L'étude de la fraction grossière met en évidence :

- Un phénomène de dissolution, important pour les foraminifères, et moins prononcé pour les organismes siliceux.

- Un taux de dissolution des carbonates qui n'est pas forcément lié au pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  du sédiment, suggérant soit une dissolution préférentielle de certaines espèces plus fragiles que les autres, soit un remaniement des sédiments par les courants de fond ou encore une combinaison des deux phénomènes.

- Une concentration toujours présente et généralement importante d'agrégats bruns.

- Une formation authigène de micronodules qui contiennent principalement du fer et de la silice, suggérant que la source d'apport est très proche si on considère que le fer précipite avant le manganèse. La croissance rapide de ces micronodules atteste l'importance de cette source.

- Une absence totale de sulfures dans les sédiments.

- Un apport détritique très discret au niveau de la fraction grossière, observé à travers de rares grains de quartz.

### 3 - DIFFRACTION DES RAYONS X SUR LE SEDIMENT TOTAL

#### a) Diffraction des rayons X sur le sédiment séché à 60°C

##### $\alpha$ - Méthode d'étude

Le sédiment total a été séché à l'étuve à 60°C pendant 24 h, puis broyé et soumis aux rayons X, en utilisant le rayonnement K $\alpha$  du cuivre.

##### $\beta$ - Les résultats

Les diagrammes obtenus, montrent que les seules phases cristallisées sont sous forme de quartz, calcite, feldspath et halite (cf fig. 20).

Il existe cependant une légère bosse entre 3.9 Å et 4.6 Å. Bonatti *et al.* (1972) avaient interprété une bosse similaire comme de la goethite mal cristallisée.

Les sédiments de la zone "axiale" sont donc constitués en grande majorité par des produits amorphes que l'on peut tenter de définir en chauffant le sédiment afin de provoquer une cristallisation de ces phases.

#### b) Diffraction des rayons X sur le sédiment chauffé jusqu'à 800°C

Cette étude a été menée en collaboration avec A. Person à l'Université de Paris VI.

##### $\alpha$ - Méthode d'étude

Deux échantillons ont été choisis (CY SH 5 et CL SH 3). Chacun d'eux a été divisé en plusieurs parties qui ont été chauffées progressivement jusqu'à 800°C par étapes de 4 heures. A chaque étape de température, un spécimen de chaque échantillon a été retiré du four, broyé, puis passé aux rayons X, en utilisant le rayonnement K $\alpha$  du cuivre.

### β - Les résultats

L'examen des diagrammes fait apparaître 2 étapes importantes (cf fig. 20) :

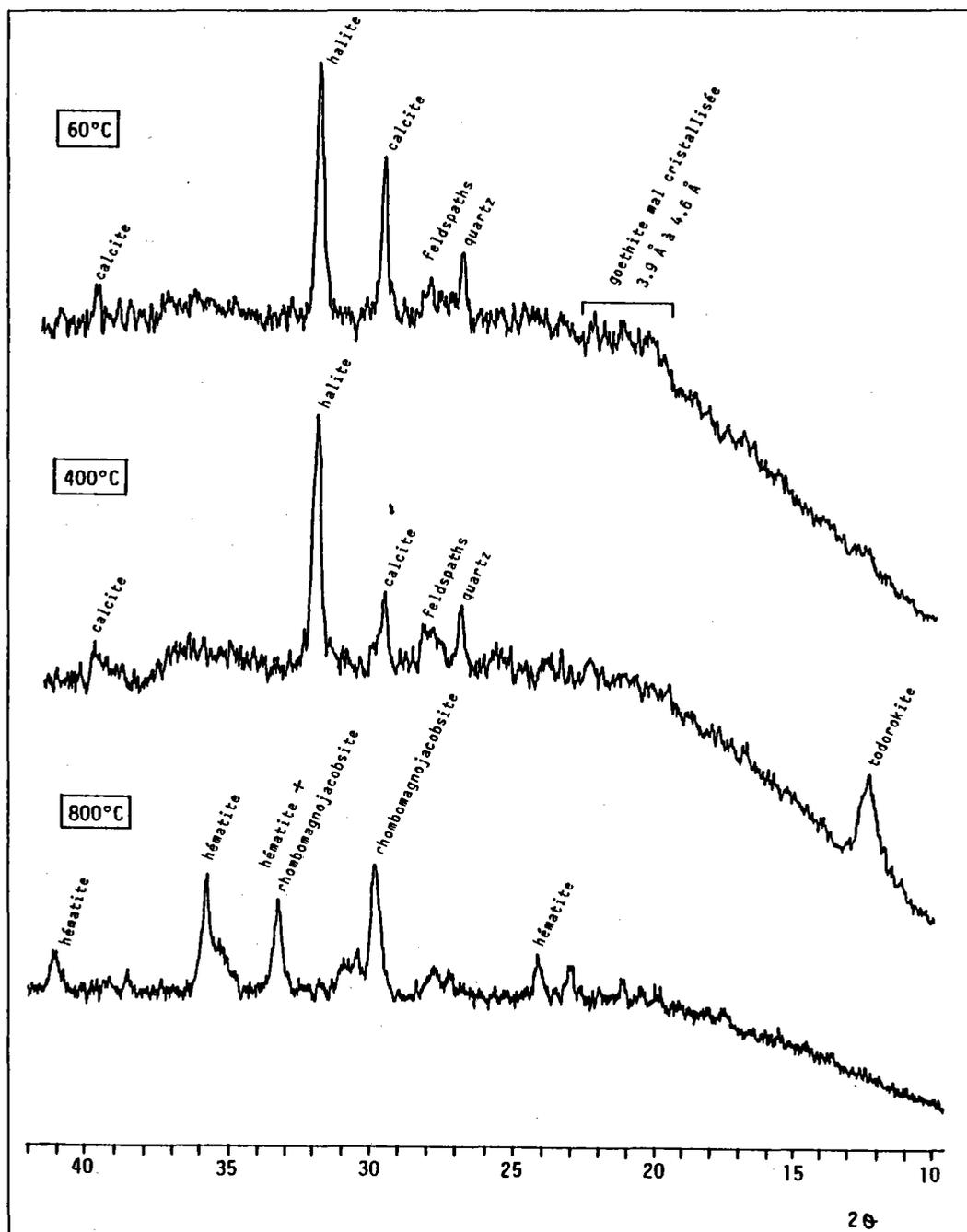


Fig. 20 - Diagrammes de rayons X sur sédiment total, dans la zone "axiale" : différentes étapes de chauffage (60°C, 400°C et 800°C).

- à 400°C : à cette température, on observe un pic particulièrement bien développé à 7, 13 Å, caractéristique d'oxyde de manganèse cristallisé (todorokite).

- à 800°C : cette phase se transforme alors en un spinelle manganésifère, dont les pics à 2.98 Å et 2.54 Å correspondent à la rhombomagnocobbsite  $(\text{Mn}, \text{Mg})(\text{Mn}, \text{Fe})\text{O}_4$  (fiche JCPDS n° 18-791). A cette même température, la phase ferrifère mal cristallisée, observée sur le diagramme à 60°C, cristallise sous forme d'hématite nettement exprimée. Ce dernier résultat a également été constaté par Bonatti *et al.* (1972) qui faisaient apparaître ce minéral à 500°C après 10 heures de chauffage.

### c) Conclusion

- Cette expérience a permis de mettre en évidence l'existence de produits amorphes.

- La nature des phases cristallisées obtenues après chauffage des sédiments (todorokite puis rhombomagnocobbsite et hématite) révèle que ces produits amorphes dominants, sont des oxyhydroxydes de fer et manganèse.

#### 4 - ETUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE (< 2 µm)

Les observations du sédiment total en frottis et de la fraction grossière (> 63 µm) ont montré l'importance des particules fines dans les sédiments métallifères de la zone axiale à 12°50' N.

Une étude de la fraction argileuse (< 2 µm) a donc été entreprise aux rayons X et au microscope électronique à transmission (MET), en collaboration avec P. Larqué du Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la surface de Strasbourg.

a) Etude de la fraction argileuse aux rayons X

α - Diffraction des rayons X sur échantillons non traités:  
Technique d'étude.

Les minéraux argileux ont été analysés sur pâtes orientées par diffraction des rayons X.

La description des techniques de préparation a fait l'objet d'une note technique de l'Institut de Géologie de Strasbourg (mise au point collective, 1978).

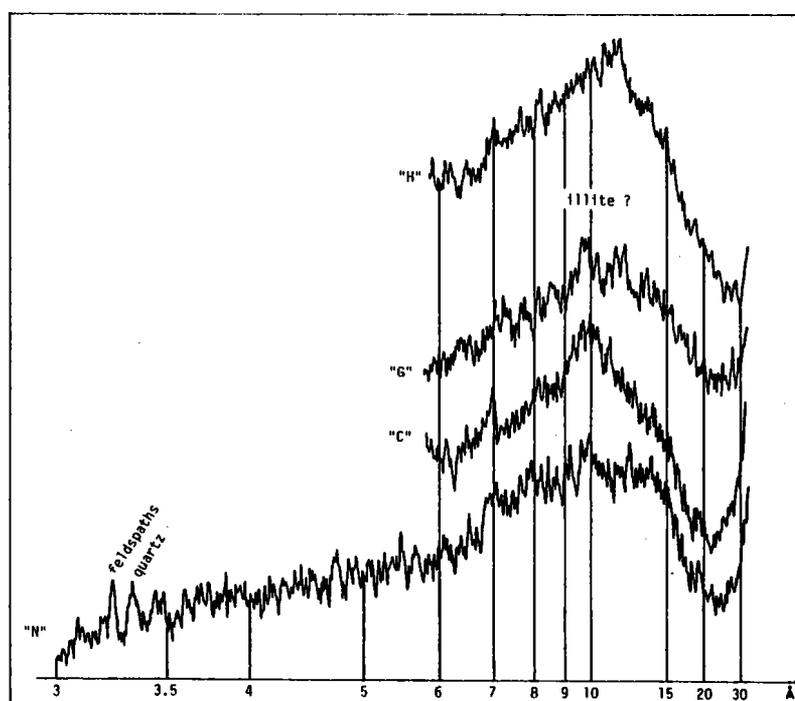


Fig. 21 - Diagramme de rayons X de la fraction argileuse (< 2 μm) non traitée, dans la zone "axiale" (exemple : l'échantillon CY SH 5).

Quatre diagrammes sont effectués pour chaque échantillon, correspondant à :

- un enregistrement "N" de la pâte séchée à l'air ;
- un enregistrement "G" de la pâte saturée aux vapeurs d'éthylène - glycol ;

- un enregistrement "C" de la pâte chauffée à 490°C pendant 4 heures ;
- un enregistrement "H" de la pâte saturée aux vapeurs d'hydrazine monohydratée.

La comparaison de ces 4 diagrammes permet de déterminer les minéraux qui composent la fraction argileuse d'après la position et le déplacement des réflexions (001) des particules cristallisées.

#### Les résultats (cf fig. 21)

Seules des traces de goethite, quartz et feldspath sont parfois détectées.

Cependant, on observe toujours une large "bosse" qui est :

\* soit centrée à 12 Å sur l'enregistrement "N", qui se déplace à 10 Å après chauffage, mais qui reste à 10 Å après traitement à l'éthylène-glycol. Dans ce cas, les 2 courbes "N" et "C" peuvent correspondre à un comportement de smectites,

\* soit centrée à 10 Å invariablement pour les 3 courbes "N", "C" et "G", correspondant peut-être à de l'illite.

Ces diagrammes montrent donc que la fraction  $< 2 \mu\text{m}$  est en majorité amorphe.

Néanmoins, la présence de "bosses" vers 10 ou 12 Å laisse supposer l'existence de phases argileuses cristallisées, masquées ici par les produits amorphes.

#### $\beta$ - Diffraction des rayons X sur échantillons traités

Un traitement de la fraction argileuse ( $< 2 \mu\text{m}$ ) a été effectué afin d'éliminer les produits amorphes et ainsi de mettre en évidence d'éventuelles particules cristallisées.

#### Méthode d'étude

Le traitement a consisté en 2 ou 3 attaques successives acides (HCl 8 N) et basiques (NaOH 0,5 N). Cette méthode a été préconisée par Segalen (1968) et permet de supprimer les produits minéraux amorphes Fe - Si - Al.

Puis, chaque échantillon a été à nouveau soumis aux rayons X.

Les résultats (cf fig. 22)

Les diagrammes obtenus révèlent la présence de phases argileuses parfaitement bien cristallisées : illite, chlorite, kaolinite et smectites. Ces dernières présentent une réflexion centrée entre 13 et 14 Å sur l'enregistrement "N", qui se déplace à 10 Å après chauffage et à 17 Å après traitement à l'éthylène - glycol.

Il semble d'autre part qu'il y ait aussi des argiles interstratifiées observées d'après la largeur du pic 13 à 14 Å sur la courbe "N".

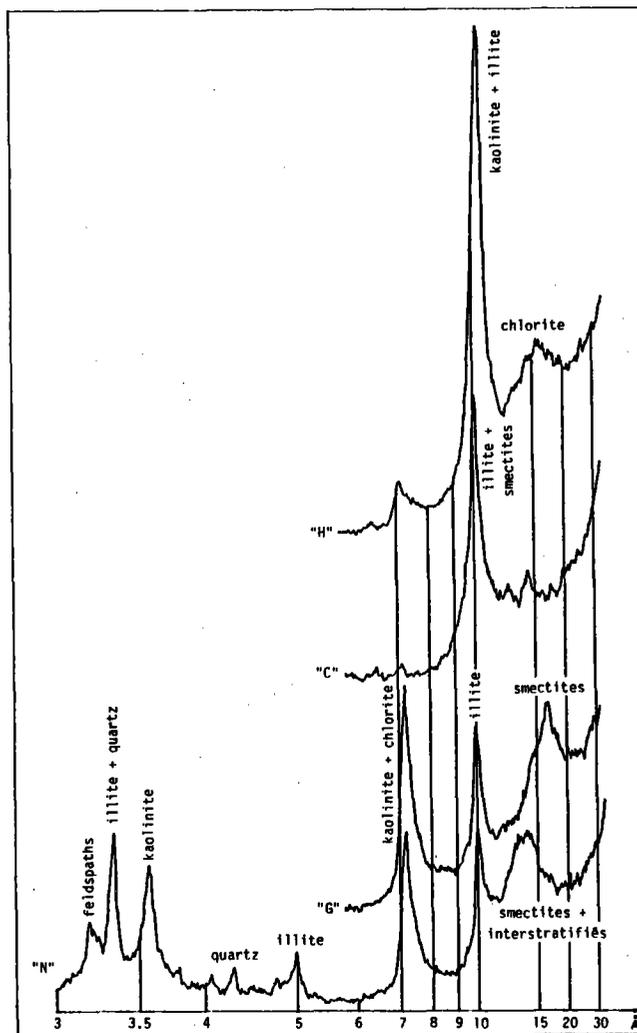


Fig. 22 - Diagramme de rayons X de la fraction argileuse après traitement (exemple : l'échantillon CY SH 5).

### Conclusion

- La fraction argileuse des sédiments métallifères dans la zone axiale à 12°50' Nord est caractérisée par une proportion importante de produits amorphes qui masquent une fraction bien plus faible de minéraux argileux détritiques, illite, chlorite et sans doute une partie de la kaolinite et des smectites.

- La phase détritique apparaît également de façon très discrète à travers la détection de feldspath et de quartz.

- La goethite est fréquemment observée en faible proportion. Il faut signaler que celle-ci n'a pas été détectée aux rayons X à partir du sédiment total, ce qui indique la petite taille de ces minéraux (< 2 µm). Sa présence dans les sédiments métallifères a déjà été signalée à plusieurs reprises (Dymond *et al.*, 1973 ; Bagin *et al.*, 1975 ; Heath et Dymond, 1977).

#### b) Observation de la fraction argileuse au microscope électronique à transmission

Cette observation complète l'étude aux rayons X.

##### α - Observation de la fraction argileuse non traitée

Cette observation montre :

- des oxyhydroxydes : ce sont des particules sombres, sans formes définies empêchant les minéraux argileux cristallisés de diffracter aux rayons X ;

- des particules de type illite - chlorite : celles-ci sont difficilement reconnaissables, leur aspect moiré caractéristique n'apparaît pas clairement ;

- des smectites : 2 types de smectites sont observés (cf planche II, photos 1 et 2). Les premières sont de grande taille (environ 1  $\mu\text{m}$ ), isolées et ont des formes de "voiles froissés". Leur origine peut être détritique, cependant il ne faut pas exclure une origine authigène par exemple par formation à partir de l'altération du verre volcanique qui a été observée précédemment au microscope électronique à balayage.

L'autre type de smectites est de taille beaucoup plus petite (environ 0,1  $\mu\text{m}$ ) et s'observe en néoformation sur des fragments d'organismes siliceux en voie de dissolution. Ce phénomène a déjà été décrit dans des environnements divers (Chamley et Millot, 1972 ; Du Castel, 1985...).

### $\beta$ - Observation de la fraction argileuse après traitement

Le traitement décrit précédemment pour les rayons X a provoqué la disparition des petites smectites observées en néoformations sur les organismes siliceux en voie de dissolution.

En revanche, les particules de type illite - chlorite sont maintenant aisément reconnaissables, et leur aspect moiré typique apparaît clairement. Certaines de ces particules présentent une bordure floue, témoignant de leur instabilité dans le milieu (cf planche II, photo 3), ou encore montrent des bordures frangées de fibres radiaires correspondant à des néoformations de deuxième génération. Ce dernier phénomène a été décrit par Holtzappfel (1983) qui l'interprète comme des croissances secondaires de fibres de smectites aux dépens des particules de type illite - chlorite (cf planche II, photo 4).

Ce traitement révèle également la présence de kaolinite qui n'avait pas été observée avant traitement (cf planche II, photo 5). La taille de ces minéraux est très petite (0,1 à 0,5  $\mu\text{m}$  environ), ce qui permet d'envisager une origine authigène de ceux-ci. La kaolinite a, en effet, été signalée en encroûtement sur des basaltes en contact avec une émission de fluide tiède, à 21° N sur la dorsale du Pacifique Est par Février (1981) qui lui attribue une origine hydrothermale.

### γ - Conclusion

La fraction argileuse des sédiments métallifères de la zone "axiale" témoigne de l'apport local important d'oxyhydroxydes amorphes qui masquent une proportion d'argiles cristallisées d'origines diverses et souvent instables dans le milieu :

- des argiles détritiques :
  - . illite,
  - . chlorite,
  - . sans doute une partie de la kaolinite,
  - . une partie des grandes smectites en "voiles froissés".
- des argiles néoformées :
  - . des smectites en fibres observées à la périphérie de certaines particules d'illite - chlorite,
  - . des petites smectites en "voiles froissés" en néoformation sur les organismes siliceux en voie de dissolution,
  - . vraisemblablement, des smectites en voiles formées par l'altération locale du verre volcanique,
  - . de la kaolinite en petits cristaux de taille comprise entre 0,1 et 0,5 μm, d'origine sans doute hydrothermale.

### B - UN CAS PARTICULIER : LE SEDIMENT SITUE AU PIED D'UN EDIFICE HYDROTHERMAL INACTIF

Ce sédiment (CY 82-32) est le seul à avoir été prélevé directement au pied d'une cheminée hydrothermale inactive, dans le graben central.

#### 1 - LES DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES

- Sa couleur est rouille (5 YR 4/8) contrairement aux autres sédiments de cette zone.
- Sa teneur en eau est de 218 %.
- Sa texture est très fine.
- Sa teneur en CaCO<sub>3</sub> est très faible : 0,31 %. Cette valeur est la plus basse obtenue pour les sédiments de la zone.

- Le facies sédimentaire montre qu'il s'agit d'une vase d'argiles à oxyhydroxydes.

Les autres éléments présents sont uniquement des traces de foraminifères, de diatomées, de spicules et de verre volcanique.

## 2 - OBSERVATION DE LA FRACTION GROSSIERE ET BIOSTRATIGRAPHIE

(cf tableau XV, annexe I et fig. 23)

### a) La fraction non biogène

- La limonite : la fraction grossière de ce sédiment est dominée par la présence de produits d'altération directe des sulfures constituant l'édifice hydrothermal au pied duquel il a été prélevé. Ces produits d'oxydation sont regroupés sous le terme de limonite, et se présentent sous forme d'agrégats rouilles qui occupent 75 % de la fraction grossière.

- Les sulfures : ils sont présents dans une proportion de 23 %. Ce sont des sulfures de fer, zinc et cuivre qui ne sont pas encore altérés ou en voie d'altération et qui proviennent de la désagrégation de l'édifice hydrothermal.

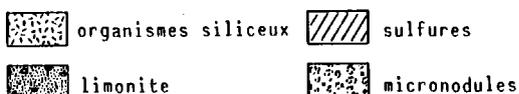
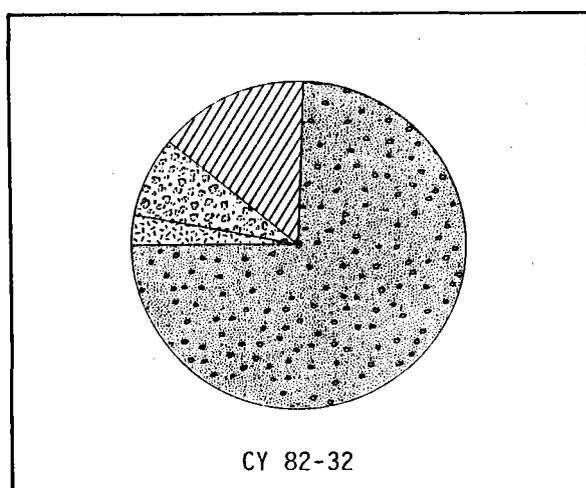


Fig. 23 - Les constituants de la fraction grossière de CY 82-32.

- Les micronodules, le verre volcanique et les pelotes fécales sont rares.

b) La fraction biogène

- Les foraminifères n'existent qu'en traces, et en mauvais état de conservation.

- Les radiolaires sont les plus abondants : 2 % et sont dans un état de conservation moyen à bon.

- Les diatomées, assez bien conservées sont en traces. Les déterminations spécifiques donnent un âge imprécis miocène - actuel.

- Les spicules siliceux sont également présents en traces.

3 - OBSERVATION DE LA FRACTION ARGILEUSE (< 2 µm) AUX RAYONS X

Aucune phase cristallisée n'a pu être reconnue, ni avant, ni après traitement.

4 - CONCLUSION

A la base des édifices hydrothermaux inactifs, existent des sédiments particuliers, constitués en majorité par les produits d'altération de l'édifice à partir duquel ils se forment : limonite et sulfures en voie d'oxydation.

Ces sédiments sont pratiquement dépourvus de carbonates et montrent des traces de dissolution importante.

Dans ce cas, ce sont les organismes siliceux, bien que peu abondants, qui dominent la fraction biogène. Des signes de dissolution sont également observés, mais dans une moindre part.

Dans la fraction fine ( $< 2 \mu\text{m}$ ), aucune particule argileuse cristallisée n'a été observée.

#### C - DES PIEGES NATURELS DE PHASES HYDROTHERMALES : LES MODIOLES

##### *Bathymodiolus thermophilus*

La coexistence de deux types différents de sédiments à l'axe de la dorsale, amène à s'interroger sur le devenir des particules émises par les sources hydrothermales et en particulier des sulfures qui sont présents dans l'échantillon CY 82-32 et, au contraire absents dans les autres sédiments.

Ainsi, en 1982, durant la mission Cyatherm, un piège à sédiments a été déposé à 50 mètres au-dessus du graben central et à 500 m au Nord d'un champ de sources hydrothermales pendant plus de 8 mois. Boulègue *et al.* (1983) ont estimé le flux de matière à environ 9 mg par mètre carré et par jour. La quantité de particules non biogènes représentait  $15 \pm 2 \%$  de la masse totale recueillie. Des sulfures de cuivre et de fer ont été mis en évidence dans ce piège : chalcopyrite, cubanite et pyrite.

Il existe une autre manière de concentrer les particules hydrothermales. Il s'agit d'un piège biologique constitué par les bivalves *Bathymodiolus thermophilus* qui vivent associés aux émissions hydrothermales (Le Pennec et Hily, 1984). Ces modioles, dont la taille peut atteindre 17 cm, entretiennent dans leur cavité palléale un courant d'eau destiné à leur alimentation. La quantité d'eau ambiante qui circule entre les branchies n'a pas encore été mesurée. Cependant, chez les Mytilidae littoraux, le volume d'eau qui transite journalièrement dans la cavité palléale est de 25 à 30 litres. Les modioles des sources hydrothermales ayant une surface de branchies environ 6 fois supérieure à celle des espèces littorales (Le Pennec et Hily, 1984), on peut supposer que le courant d'eau circulant au niveau de l'appareil branchial est aussi nettement plus important (cf planche III, photo 1).

Ces modioles font partie de l'importante communauté animale existant autour des sources. Les différentes espèces s'organisent en aureoles centrées sur l'édifice actif, à des distances plus ou moins gran-

des (jusqu'à quelques mètres) selon les conditions de température dont elles ont besoin pour se développer. *Bathymodiolus thermophilus* est une espèce tolérante en ce qui concerne la température. Ses représentants se situent en général, presque à la périphérie de ces auréoles, et correspondent à des conditions de températures de 3 à 6°C, et parfois jusqu'à 10°C (Desbruyères *et al.*, 1982 ; Fustec, 1985).

### 1 - LES SITES DE PRELEVEMENT DES MODIOLES

A 13° Nord, cette espèce est observée sur deux sites hydrothermaux actifs qui ont été tous les deux échantillonnés (cf fig. 15, 24 et 25).

- Pogonord (12°49'07 N, 103°56'69 W) : ce site de quelques dizaines de mètres carrés seulement est caractérisé par la présence de 2 diffuseurs coniques de 1 à 3 m de hauteur qui émettent un fluide à 270°C. Les modioles ont été prélevées à 3 m à l'Est de ceux-ci, dans une fissure (Fustec, 1985).

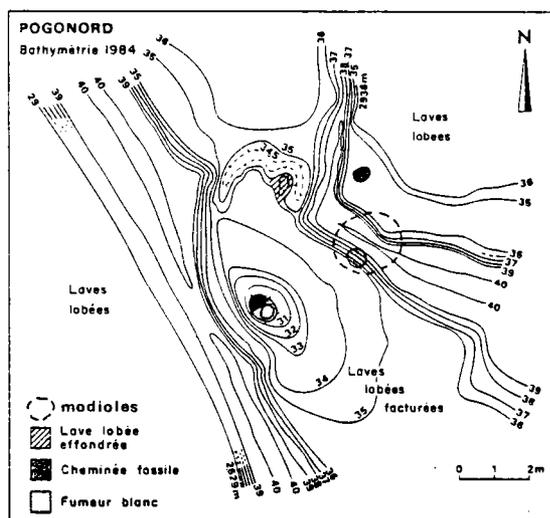


Fig. 24 - Le site Pogonord : localisation des prélèvements des modioles (d'après Fustec, 1985).

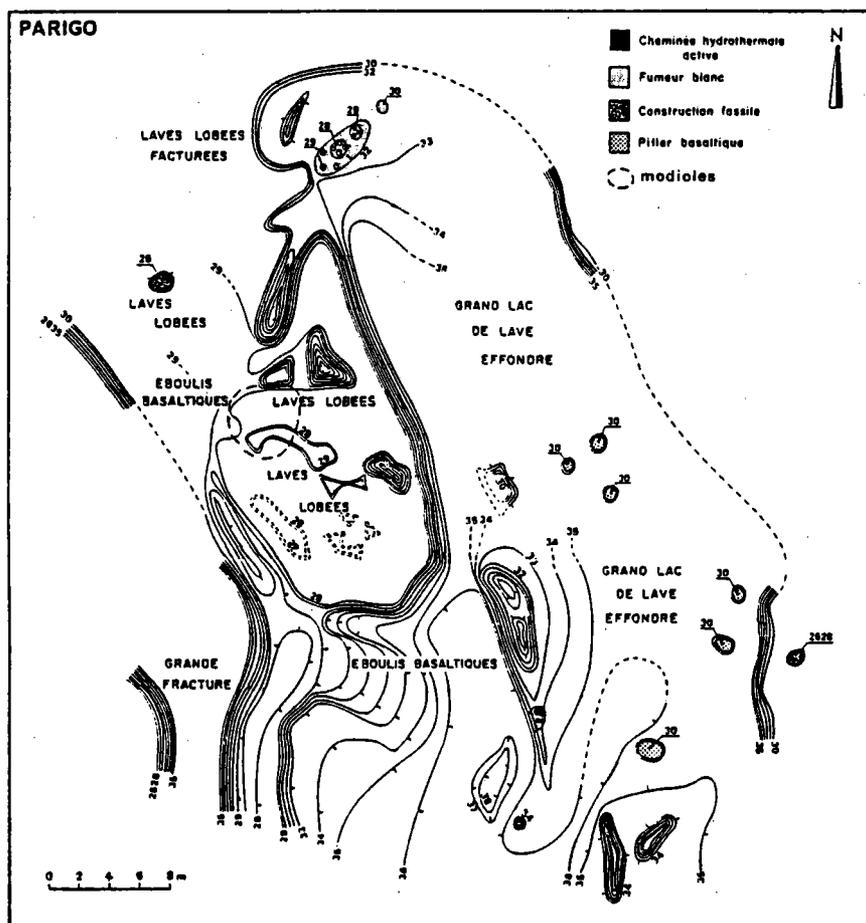


Fig. 25 - Le site Parigo : localisation des prélèvements des modioles (d'après Fustec, 1985).

- Parigo (12°48'57 N, 103°56'71 W) : ce site, plus étendu que le précédent (environ 500 m<sup>2</sup>) est occupé par deux zones actives :

- . de petites cheminées de l'ordre du mètre, qui libèrent des fluides à 288°C et situées au Sud-Est du site ;
- . une grande zone (15 m<sup>2</sup>) avec des cheminées de 3 à 5 m de haut, au Nord du site.

Les bivalves ont été échantillonnés à 15 m environ au Sud de cette deuxième zone, et à 25 m au Nord de la première.

## 2 - METHODE D'ETUDE

Dès leur arrivée sur le bateau, les modioles ont été fixées par du formol à 5 % dans l'eau de mer, puis conservées dans l'éthanol à 70° (Le Pennec et Prieur, 1984).

Les particules ont ensuite été recueillies dans la cavité paléale des modioles, et à la base des branchies, dans le sillon alimentaire, par simple rinçage de celles-ci. La quantité de matière recueillie est de l'ordre du gramme.

L'étude de ces particules s'est effectuée en collaboration avec J. Senant, en deux étapes :

- une observation au microscope électronique à balayage (MEB) à l'Université de Bretagne occidentale complétée par des analyses sur un TRACOR au BRGM à Orléans (Fournier-Germain *et al.*, 1986) ;
- une étude au microscope métallographique sur sections polies, réalisée par J. Senant à l'IFREMER (Senant, 1985).

### 3 - LES RESULTATS (cf tableau XVII)

| Echantillon et site   | Phases observées  | Abondance   | Habitus  |
|-----------------------|---|---|--|
| POGONORD<br>CY 82-1   | goethite<br>melnicovite<br><br>marcassite<br>pyrite<br>pyrrhotite<br>würtzite<br>sphalerite(blende)<br>galène<br>chalcoppyrite<br><br>barytine<br>opale | = 80Z<br>> 15Z<br><br><br><br>] = 5Z<br>rare<br>rare<br><br>rare<br>fréquente | - en plaques arrondies millimétriques<br>cristallisation fréquente en sphérolites coalescents.<br><br>- fréquemment englobés par des sulfures de fer (marcassite)<br><br>- visible seulement en petites mouches d'environ 10 µ, au sein des sulfures de zinc.  |
| POGONORD<br>CY82-M5-2 | melnicovite<br>marcassite<br>pyrite<br>pyrrhotite<br>würtzite<br>galène<br>chalcoppyrite  | ] 70 à 80Z<br><br>10Z<br>10Z<br>rare<br>rare                                  | - marcassite = phase tardive transformant les pyrites<br><br>- souvent encroûtée par des sulfures de zinc<br><br>- associée aux sulfures de zinc<br>- en mouches dans les sulfures de zinc, jamais en même temps que la galène.  |
| POGONORD<br>CY84-32   | melnicovite<br>marcassite<br>pyrite<br>pyrrhotite<br>sulfures de zinc<br>galène<br>anhydrite  | ] > 70 Z<br><br>= 5Z<br>= 10 Z<br>fréquente<br>= 5 Z                          | - pyritosphères fréquents souvent englobés par la melnicovite<br><br>- parfois encroûtée par des sulfures de zinc<br><br>- petits cristaux (< 10 µm) dans les sulfures de zinc<br>- très corrodée  |
| PARIGO<br>CY84-34     | melnicovite<br>marcassite<br>pyrite<br>pyrrhotite<br><br>sulfures de zinc<br>galène<br>chalcoppyrite  | ] = 70Z<br><br>= 20Z<br><br>= 15Z<br>fréquente<br>rare                        | - en cristaux pouvant dépasser 100 µm.<br>Parfois totalement encroûtée par des sulfures de zinc et seule la morphologie reste visible.<br><br>- en petits cristaux automorphes au sein des sulfures de zinc<br>- en mouches dans les sulfures de zinc.   |
| PARIGO<br>CY84-37     | melnicovite<br>marcassite<br>pyrite<br><br>sulfures de zinc<br><br>pyrrhotite<br>chalcoppyrite<br>anhydrite<br>opale                                    | ] 50Z<br><br>30 Z<br><br>absente<br>fréquente<br>15Z                          | - cristaux automorphes englobés par la melnicovite et la marcassite et parfois par du sulfure de zinc<br>- phases successives (automorphes et dendritiques) au sein de sulfures de fer. Association développée au sein de l'édifice hydrothermal.<br><br>- dans les sulfures de zinc en plaques de 20 à 30 µm<br>- grands cristaux corrodés (+ 1 mm) |

Tableau XVII : Associations minéralogiques des particules prélevées dans les modioles observées en sections polies (d'après SENANT, 1985)

a) Observation au MEB et à l'analyseur TRACOR : mise en évidence des particules hydrothermales

L'étude préliminaire des particules minérales de taille généralement comprise entre 1 et 40  $\mu\text{m}$  et parfois jusqu'à 600  $\mu\text{m}$ , a été faite au MEB et à l'analyseur TRACOR (Fournier-Germain *et al.*, 1986).

Dans les deux sites, les minéraux les plus abondants sont :  
 - des sulfures mixtes de zinc et de fer. Il s'agit de blende ( $\text{ZnS}$ ), de würtzite  $[(\text{Zn}, \text{Fe}) \text{S}]$  de pyrite ( $\text{FeS}_2$ ) et de pyrrhotite ( $\text{Fe}_{1-x} \text{S}$ ) bien cristallisées (cf planche III, photos 2 à 5).

D'autres sulfures, moins abondants ont été observés :-la galène ( $\text{PbS}$ ) n'a été détectée qu'une seule fois à Pogonord, sous forme d'un cristal altéré englobé dans des sulfures de zinc ; - la melnicovite ( $\text{FeS}_2$ ) est quelquefois présente sous forme d'amas sphérolitiques (cf planche III, photo 6).

Les autres phases observées sont :

- des sulfates : des cristaux en éventail de barytine ( $\text{BaSO}_4$ ), des rosettes de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), de grands cristaux allongés (environ 600 $\mu$ ) et partiellement dissous d'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) (cf planche IV, photos 1 à 4).
- des globules d'opale : ils apparaissent très souvent dispersés sur les cristaux de sulfures. Leur surface est parfaitement lisse et leur taille varie de 1 à 4  $\mu\text{m}$  (cf planche III, photo 4).

b) Détermination de l'origine des particules : observation des sections polies

Cette analyse a été menée par J. Senant (1985) dans le but de compléter les observations au MEB, et d'établir la provenance des différentes phases (cf tableau XVII).

Les résultats confirment les premières observations et montrent en plus :

- l'existence de goethite en grande quantité dans l'échantillon CY 82-1 à Pogonord ;
- la présence constante de marcassite dans tous les échantillons ;
- la présence de chalcopryrite sous forme de petits cristaux au sein des sulfures de zinc et caractéristiques des cheminées haute température ;

- des associations typiques de cheminées hydrothermales : sulfures de zinc automorphes englobés dans des sulfures de fer contenant eux-mêmes des sulfures de zinc dendritiques.

Ces deux derniers points sont confirmés par une comparaison des associations observées sur la cheminée haute température (288°C) du site Parigo.

### c) Conclusion

. Les particules filtrées par *Bathymodiolus thermophilus* sont hydrothermales et sont caractérisées par la prédominance de phases de moyenne à basse température et la présence moins fréquente de phases de haute température.

. L'origine de ces particules est à rechercher :

- à 2 niveaux dans les édifices hydrothermaux adjacents, haute température, qui montrent les mêmes associations minéralogiques que les modioles :

\* dans les parties chaudes de l'édifice pour la würtzite, l'anhydrite et une partie des pyrrhotites (en effet, sur le site Parigo, elles existent dans les modioles alors qu'elles ne sont pas observées sur la cheminée à 288°C. Dans ce cas précis, l'origine des pyrrhotites est à rechercher ailleurs).

\* dans la partie externe, moins chaude, pour la pyrite, marcasite, melnicovite, le sulfure de zinc dendritique, la galène et la barytine.

- dans des sites inactifs qui existent à Pogonord et qui sont susceptibles de fournir des sulfures de zinc ;

- dans des édifices hydrothermaux actifs, plus éloignés, qui renfermeraient de la pyrrhotite emportée ensuite vers les bivalves ?

- dans des zones d'émissions de fluides à basse température pour la goethite et les globules d'opale. Les modioles sont souvent localisées dans des fissures au niveau de telles zones d'émissions.

. La coexistence de paragénèses d'origines diverses dans les modioles implique la présence de courants capables de transporter latéralement les particules en voie de dépôt, ou d'arracher des fragments de cheminées. Cela implique également un processus de mise en suspension des particules qui proviennent de la base des édifices hydrothermaux.

Cependant, aucune de ces phases n'est présente dans les sédiments adjacents à l'exception de l'échantillon CY 82-32, prélevé directement au pied d'une cheminée hydrothermale inactive. Deux hypothèses peuvent être formulées pour expliquer cette absence :

- Ces phases hydrothermales se déposent dans les sédiments mais sont altérées très vite et disparaissent.

- Ces phases ne peuvent pas atteindre les sédiments situés en dehors de la zone hydrothermale, et sont soit déposées dans un périmètre restreint autour des sources, soit entraînées dans le panache des fluides puis altérées dans l'eau de mer avant de se déposer dans les sédiments.

#### D - LA REPARTITION DES SEDIMENTS DANS LA ZONE AXIALE

De nombreuses plongées pendant les missions Cyatherm et Cyarise ont permis d'observer directement la sédimentation dans le graben central et également sur les flancs de la dorsale jusqu'à une distance de 6 km sur le flanc ouest (cf planche V).

##### 1 - LE GRABEN CENTRAL : MISE EN EVIDENCE DE DEUX PROCESSUS DE GENESE DES SEDIMENTS METALLIFERES

L'observation des films et des photographies pris au cours des plongées avec la soucoupe Cyana amène à considérer deux environnements différents :

##### a) L'environnement "non hydrothermal"

Cet environnement est situé en dehors de la limite des sites hydrothermaux actifs ou inactifs.

Le sédiment y est peu abondant, sinon absent. Il se présente en une fine pellicule irrégulière, d'épaisseur inférieure au centimètre saupoudrant la surface des basaltes ou bien s'accumulant entre les laves lobées où son épaisseur peut alors atteindre quelques centimètres.

Il semble d'autre part, qu'il y ait une tendance à l'épaississement de la couche sédimentaire dans le Sud du graben de la zone A, qui se confirme dans la zone B.

### Conclusion

Cette présence relativement discrète de sédiments dans le graben central est due à l'interaction de plusieurs phénomènes :

- l'âge récent de la croûte océanique,
- l'action des courants de fond,
- l'activité tectonique créant un environnement instable,
- l'activité volcanique pouvant entraîner la disparition locale de la pellicule sédimentaire sous une coulée de lave ; ceci pouvant expliquer l'irrégularité dans la répartition des sédiments. L'augmentation sensible de leur épaisseur, observée vers le Sud pourrait ainsi rendre compte d'une activité tectonique ou volcanique moins récente. L'activité volcanique la plus récente est en effet située au Nord de la zone A, vers 12°50' N (Ballard *et al.*, 1984).

#### b) L'environnement hydrothermal

Les nombreux sites hydrothermaux actifs et inactifs observés dans le graben central constituent des milieux particuliers pour la sédimentation. Deux cas extrêmes peuvent être définis :

- Cas des sites très actifs. Ils sont caractérisés par la présence de cheminées haute température émettant un fluide généralement noir ("fumeurs noirs") et parfois incolore. Ce sont par exemple, les sites de la Chaînette et de Bryce Canyon (cf fig. 15).

Les observations faites à ce niveau montrent une absence de sédiment brun au pied des cheminées et dans un rayon de quelques mètres, limité par les dernières espèces de la faune hydrothermale en relation avec le site. Seul un léger dépôt, meuble et noir est présent au coeur du site, parmi les cheminées.

- Cas des sites inactifs. Ils représentent un stade final de l'activité hydrothermale (Hékinian *et al.*, 1985 ; Hékinian et Fouquet, 1985) qui se traduit par la dégradation des édifices par oxydation. Un dépôt sédimentaire est présent, de couleur brun à rouille et qui peut dépasser 20 cm d'épaisseur comme au site de l'échantillon CY 82-32, au Nord-Est de Bryce Canyon.

### Discussion

La nature et la densité des dépôts sédimentaires sont régis par le degré d'activité des sites hydrothermaux.

Pour expliquer ce phénomène, une hypothèse peut être formulée selon laquelle, la pénétration dans l'eau de mer de panaches chauds avec un fort débit d'émission doit engendrer une double barrière vis à vis des particules sédimentaires:

- à la verticale du site, le panache empêche la sédimentation par le haut,

- latéralement, la mise en place de courants de convection, dus au mélange eau de mer froide - fluide chaud émis avec un fort débit entraîne des particules du panache dans un cycle successivement descendant et ascendant, laissant se déposer seulement les particules les plus lourdes au pied des cheminées, ce qui expliquerait la présence du dépôt noir meuble, observé à cet endroit (cf fig. 26).

Ces courants empêchent donc les particules de se déposer et remettent en suspension celles qui se seraient éventuellement déjà déposées.

Lonsdale (1977) et Enright *et al.* (1981) ont également conclu à l'existence de tels courants de convection pour expliquer le transport des particules nutritives à partir des sources, pour nourrir les organismes filtreurs situés à quelques dizaines de mètres de là. Ces organismes, et en particulier *Bathymodiolus thermophilus* profitent de ce renouvellement incessant d'eau chargée de particules.

La diminution progressive jusqu'à la cessation de l'activité hydrothermale, supprime les courants de convection et permet un retour au régime de sédimentation "normale", que l'on observe ailleurs dans le graben central. Cependant, celle-ci est largement masquée sur les sites hydrothermaux inactifs par les produits de l'altération des édifices, soumis au milieu oxydant de l'eau de mer, et qui constituent des dépôts particuliers et locaux de sédiments métallifères.

### c) Conclusion

Le graben central est caractérisé par trois types de sédiments :

- des sédiments caractéristiques, présents dans tout le graben

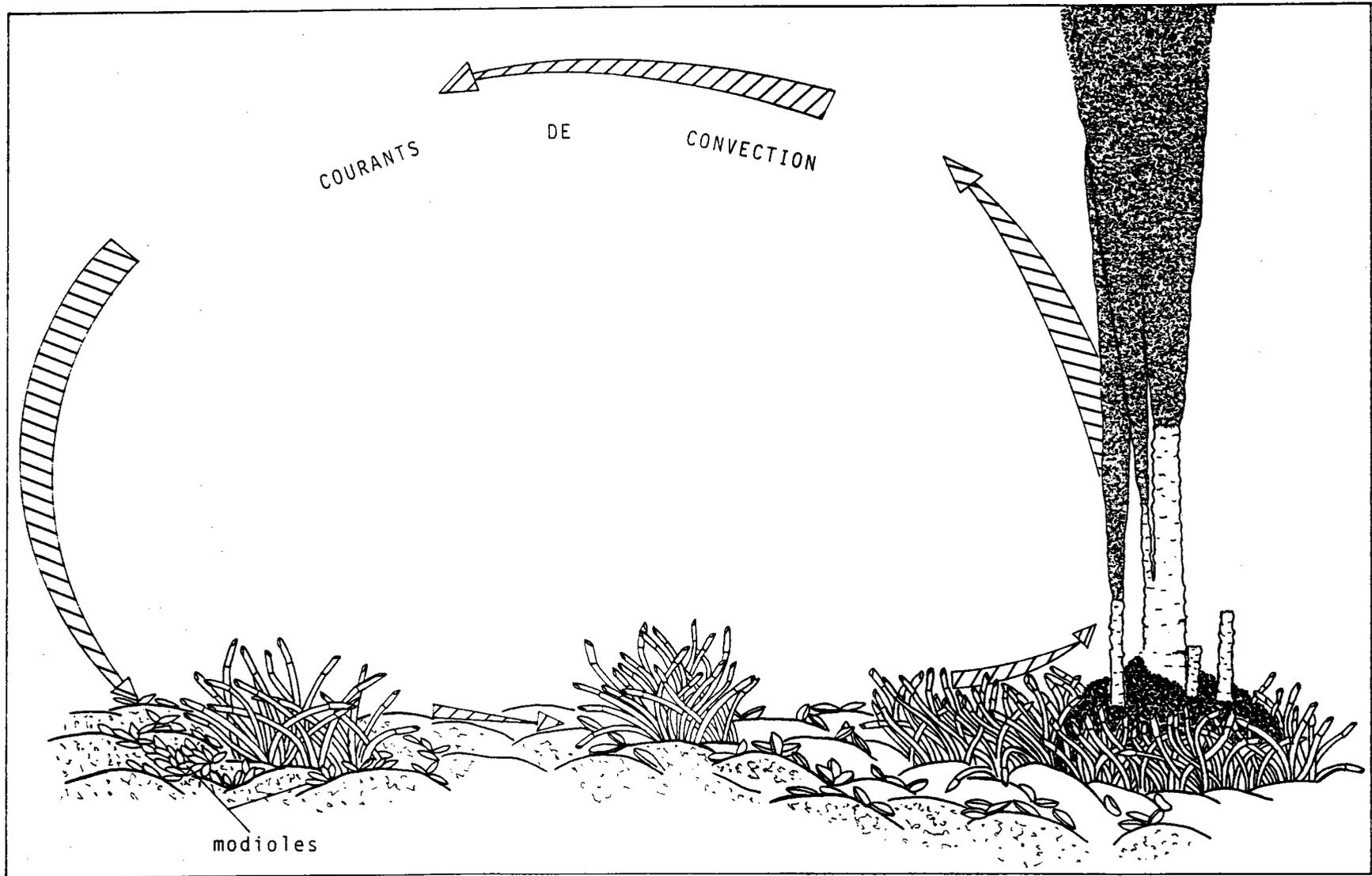


Fig. 26 - Les courants de convection engendrés par l'émission des fluides hydrothermaux.

en une fine couche irrégulière,

- des sédiments à accumulation locale provenant de l'altération des sites hydrothermaux inactifs,

- des sédiments purement hydrothermaux qui apparaissent sous la forme de dépôts noirs dans le périmètre immédiat des sources actives.

## 2 - LA SEDIMENTATION SUR LES FLANCS PRES DE L'AXE

Deux plongées de la mission Cyatherm (CY 82-17 et CY 82-20) effectuées perpendiculairement à l'axe de la dorsale, ont permis d'explorer sur une longueur d'environ 6 km à chaque fois, la sédimentation dans la zone A, sur le flanc ouest (non perturbé par la présence des seamounts contrairement au flanc est) (cf fig. 27) . D'autre part, un certain nombre de plongées ont permis l'étude de la transition entre le graben central et les flancs.

Ces observations indiquent les faits suivants :

- L'accumulation des sédiments est plus importante au Sud de la zone A (plongée CY 82-20) qu'au Nord (plongée CY 82-17). Dans tous les cas, l'épaisseur de ceux-ci est de plusieurs dizaines de cm, mais tandis qu'au Nord, les pillows apparaissent souvent à travers le sédiment, au Sud au contraire, ils sont fréquemment complètement enfouis. De même, du fait de cette épaisseur au Sud, les lacs de lave y sont moins souvent repérés à cause de leur manque de relief qui les fait disparaître plus vite sous les sédiments.

- La diminution, dans la partie est de la coupe CY 82-17, de la sédimentation et l'apparition de failles et d'éboulis peu sédimentés permettent d'établir la limite de la zone tectoniquement active jusqu'à 3 km sur le flanc ouest et centrée dans le graben (Choukroune *et al.*, 1984, 1985). En revanche, dans le Sud (coupe CY 82-20), cette zone active n'existe pas si l'on en juge par la présence d'éboulis toujours sédimentés et par l'épaisseur des sédiments encore importante à l'Est de la coupe.

- La transition entre la sédimentation dans le graben et sur les flancs est en général très nette. Cependant, entre 12°43' N et 12°45' N, au niveau du relief volcanique construit ("constructional

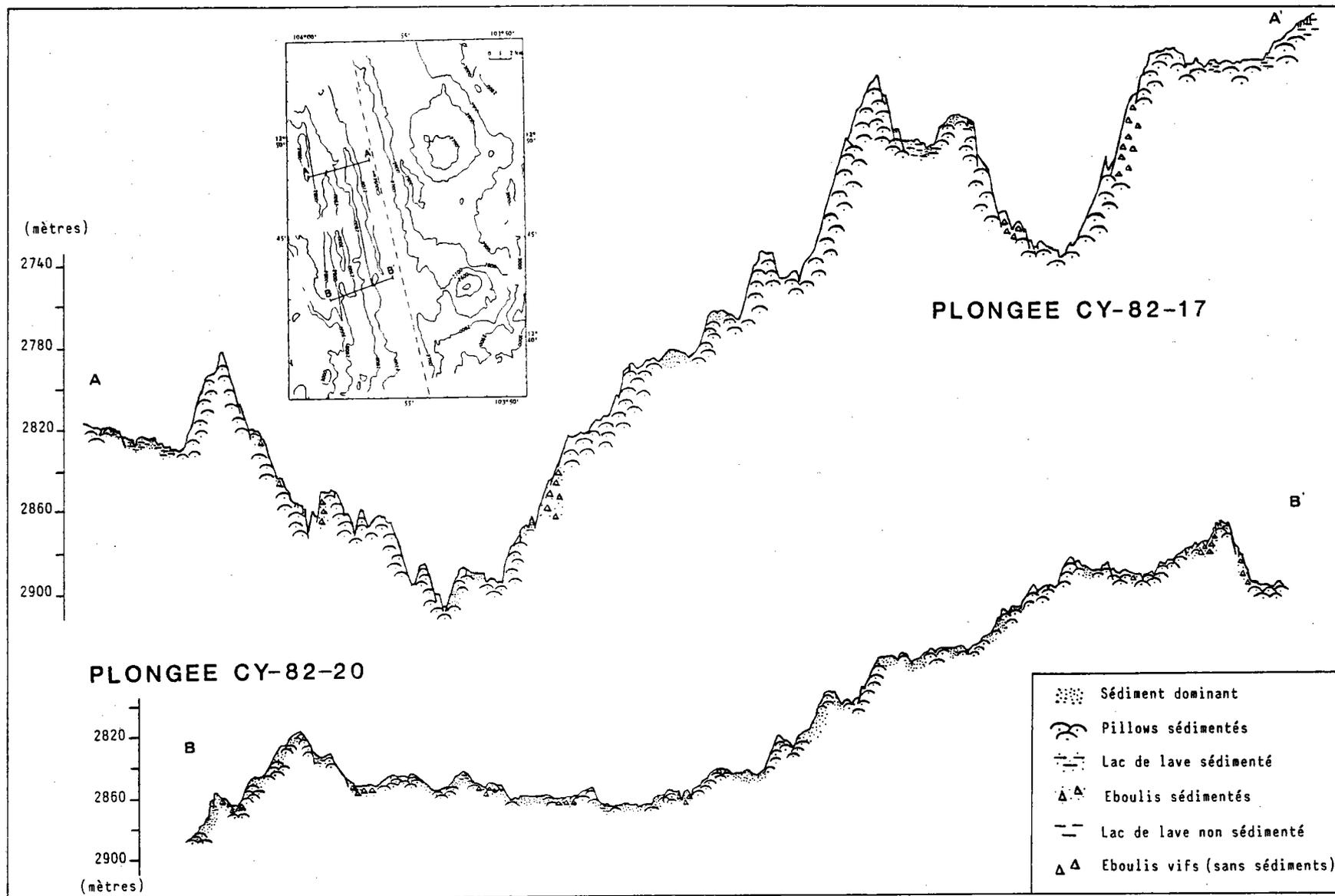


Fig. 27 - Répartition des sédiments sur le flanc ouest (jusqu'à 6 km de l'axe), d'après les deux plongées Cyatherm : CY 82-17 (au Nord) et CY 82-20 (au Sud).

marginal high") la limite entre les deux n'est pas clairement exprimée à travers les sédiments. En bordure du graben, le relief construit est plus tectonisé que le graben, perturbant ainsi la répartition des sédiments.

- La couleur des sédiments est difficile à établir à partir de l'observation dans la soucoupe en raison de la lumière artificielle qui est utilisée. Cependant, des indications de sédiments brun clair à marron-chocolat et parfois brun verdâtre sont données par les observateurs.

- Des traces de bioturbation sont fréquemment observées qui affectent le sédiment de façon importante dans certains cas.

- La mégafaune, constituée par les organismes fouisseurs, mobiles ou fixés sur un substrat, témoigne de l'importance de l'activité biologique dans le milieu. Cette faune est caractéristique de celle qui est recensée dans les autres milieux océaniques profonds (du Castel, 1985). Les organismes rencontrés ici sont essentiellement des octocoralliaires, hydraires, crinoïdes, holothuries, cnidaires, échinides...

### 3 - CONCLUSIONS

Cette étude a montré que :

- Il y a coexistence de trois types de dépôts sédimentaires dans la zone axiale :

- . des sédiments caractéristiques observés couramment dans le graben et sur les flancs,
- . des sédiments d'extension locale, concentrés sur les édifices hydrothermaux inactifs dans le graben central,
- . des sédiments hydrothermaux "purs", déposés entre les cheminées actives de haute température.

- Les processus de sédimentation sont gouvernés par plusieurs facteurs :

- . la densité et le degré de l'activité hydrothermale,
- . les phénomènes tectoniques et volcaniques,
- . les courants de fond et sans doute les courants de convection existant au niveau des sites hydrothermaux actifs,
- . la présence d'une mégafaune dense, capable de remanier les sédiments.

#### IV - UNE COUPE SUR LE FLANC OUEST : LES SEDIMENTS DE SURFACE

Cette zone concerne les échantillons de sédiments prélevés à l'Ouest du Seamount Clipperton et jusqu'à 80 km de l'axe de la dorsale.

##### A - LES DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES

###### 1 - COULEUR, TEXTURE ET TENEUR EN EAU DES SEDIMENTS

(cf tableaux IX et X, annexe I)

Ce sont des vases de couleur homogène brun foncé à brun rouge foncé. Leur texture est fine à légèrement granuleuse.

Par suite de dessiccation, les teneurs en eau n'ont pu être déterminées que sur 3 échantillons. Elles varient de 135 à 228 %.

###### 2 - LES TENEURS EN CaCO<sub>3</sub> (cf tableau XI, annexe I)

Les teneurs en CaCO<sub>3</sub> sont en moyenne de 15,4 % et sont donc beaucoup plus faibles que dans la zone "axiale". Celles-ci redeviennent relativement fortes à l'Ouest de la coupe (30 % CaCO<sub>3</sub>).

###### 3 - OBSERVATION DES SEDIMENTS EN FROTTIS : DETERMINATION DES FACIES SEDIMENTAIRES

Les phases observées ainsi que les facies sédimentaires sont les mêmes que ceux de la zone "axiale" (cf tableau XII, annexe I).

Toutefois, des cendres volcaniques (cf plus loin, description paragraphe B-2-a) sont notées, et représentent jusqu'à 2 % (CL SH 5) et le verre volcanique atteint 10 % dans l'échantillon CL SH 9, situé au pied du seamount Clipperton.

#### 4 - CONCLUSION

Au niveau du flanc ouest, les données sédimentologiques sont caractérisées par une forte diminution des teneurs en CaCO<sub>3</sub> au centre de la zone et une remontée de celles-ci à l'Ouest.

#### B - OBSERVATION DE LA FRACTION GROSSIERE (> 63 µm) ET BIOSTRATIGRAPHIE

##### 1 - PROPORTION DE LA FRACTION GROSSIERE (cf tableau XVIII)

Elle est élevée dans le cas de CL SH 9 (55 %), par la présence de fragments de verre volcanique et de plagioclases observés en grande quantité. Dans les autres cas, elle varie de 1 à 7 %.

##### 2 - LES CONSTITUANTS DE LA FRACTION GROSSIERE

###### a) La fraction non biogène (cf fig. 28 et tableau XV, annexe I)

La fraction non biogène sur le flanc ouest est similaire à celle de la zone "axiale" dans son ensemble. Cependant, on note :

- dans l'échantillon CL SH 9, une concentration importante de verre volcanique (49 %) renfermant des phénocristaux de plagioclases (49 %) pour lesquels, les analyses à la microsonde révèlent une tendance calcique très marquée (An<sub>78-87</sub>). Des cristaux d'olivine sont aussi observés en traces. Cet assemblage, est caractéristique du basalte observé sur le seamount Clipperton (Hékinian *et al.*, 1983 a).

- des cendres volcaniques : elles sont observées en traces dans l'échantillon CL SH 4 et leur proportion augmente dans les sédiments situés à l'Ouest de celui-ci. Elles représentent jusqu'à 30 % de la fraction grossière dans l'échantillon CL KS 1 (cf fig. 29). Ce sont des fragments transparents et incolores d'une centaine de µm de longueur et épais de 10 à 20 µm. Ils ont des formes simples plates ou incurvées, ou plus complexes qui indiquent un mode de volcanisme explosif (cf planche VI, photos 1 et 2).

Leur composition, déterminée à la microsonde (cf tableau XIX) est de nature rhyolitique. Des cendres de composition similaire ont été

| Echantillon        | % > 63µm |
|--------------------|----------|
| <i>Flanc ouest</i> |          |
| CL SH1             | 7        |
| SH4                | 5        |
| SH5                | 1        |
| SH9                | 55       |
| CL KS1             | 2        |
| KS2                | 1        |
| KS3                | 6        |

Tableau XVIII - Pourcentage de fraction grossière dans les sédiments du flanc ouest.

|                                |   |          |   |
|--------------------------------|---|----------|---|
| SiO <sub>2</sub>               | : | 73 - 79  | % |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | : | 12 - 13  | % |
| K <sub>2</sub> O               | : | 3 - 4    | % |
| FeO                            | : | 1 - 1,3  | % |
| Na <sub>2</sub> O              | : | 0,5- 1,8 | % |
| CaO                            | : | 0,3- 0,5 | % |
| Total                          | : | 97       | % |

Tableau XIX - Composition des cendres volcaniques déterminées à la microsonde.

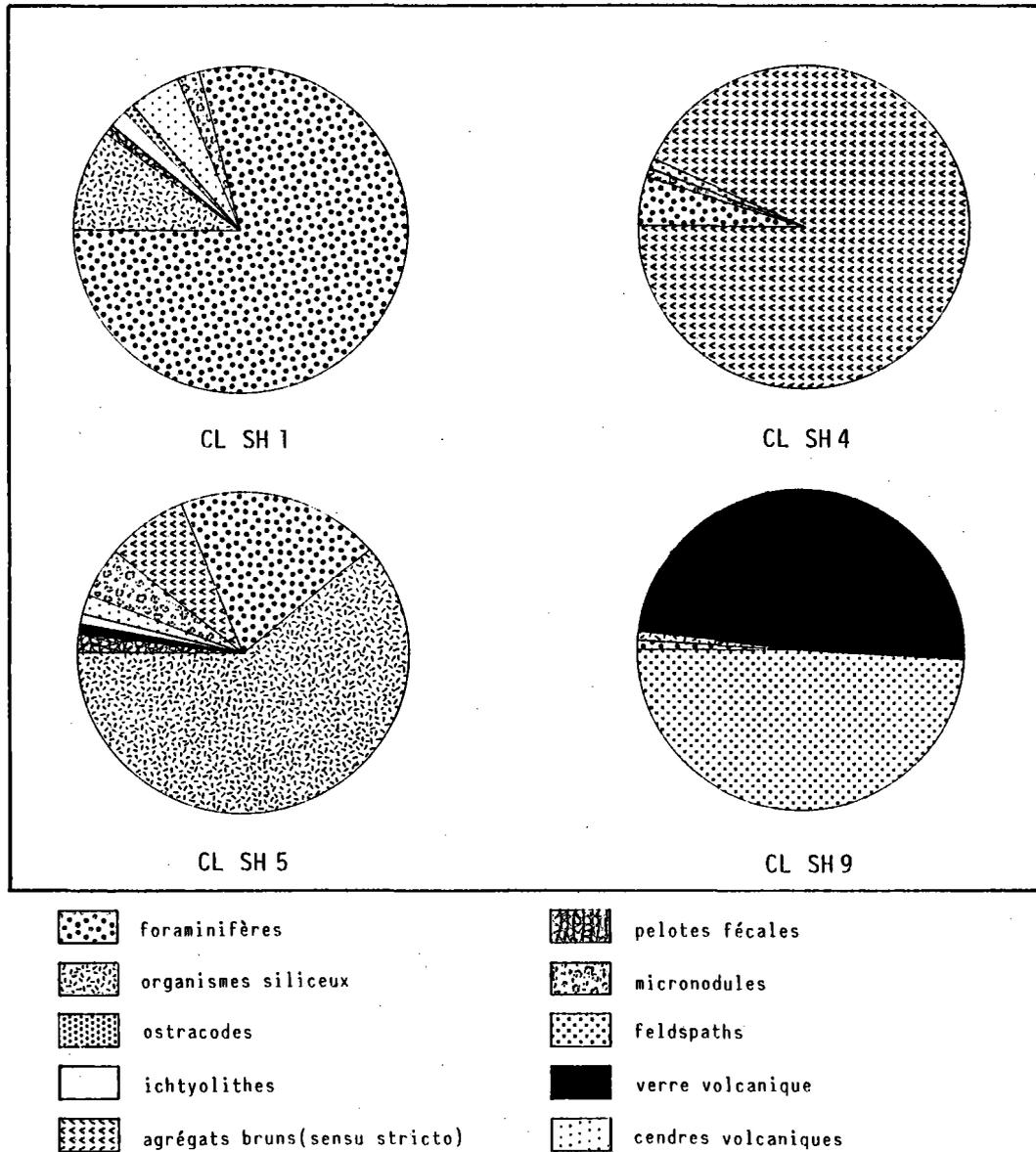


Fig. 28 - Les constituants de la fraction grossière des sédiments de surface sur le flanc ouest.

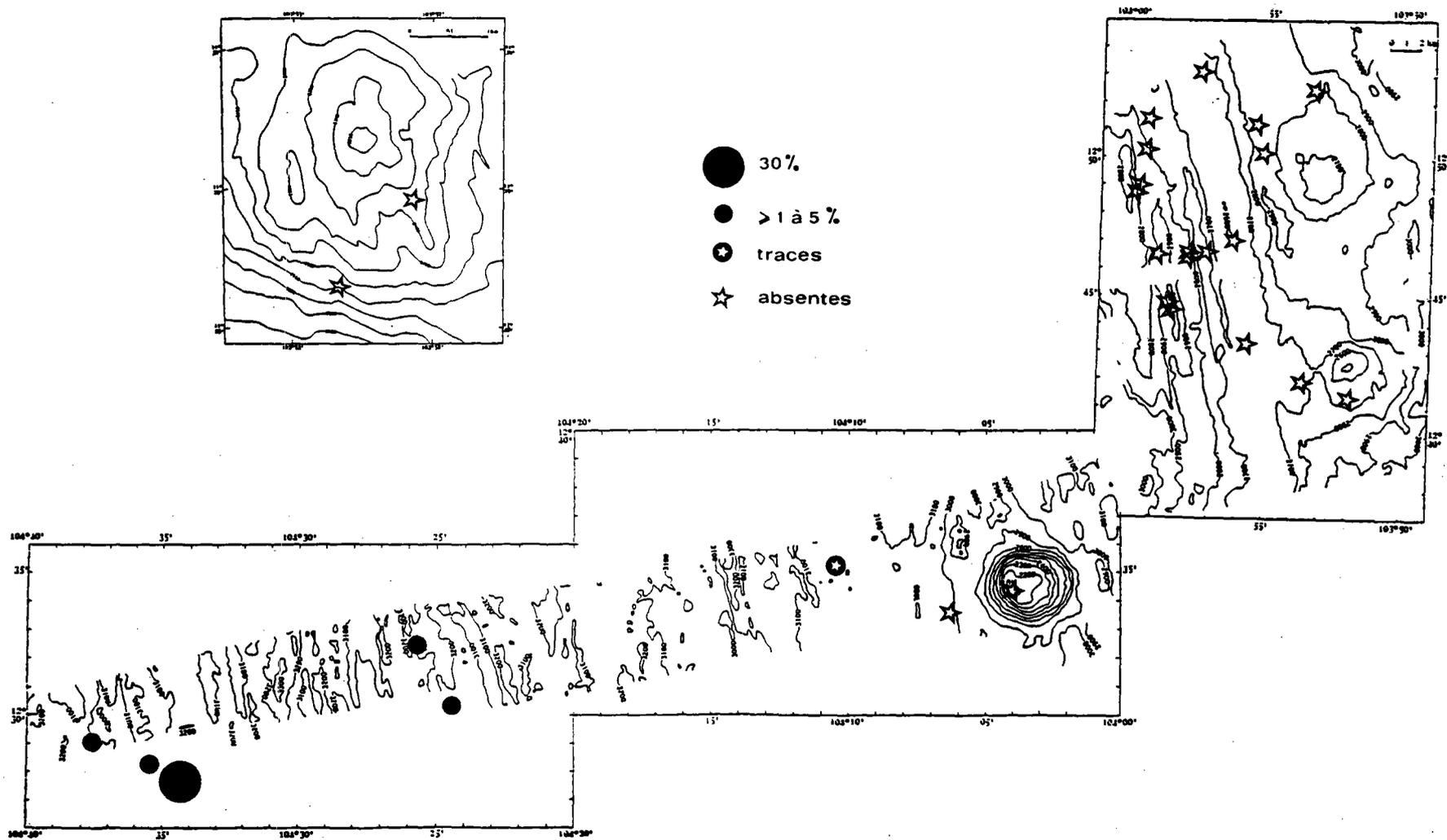


Fig. 29 - Répartition des cendres volcaniques dans les sédiments de surface (à partir de l'observation des fractions grossières).

observées au large de la fosse d'Amérique Centrale pendant les Legs 66 et 67 du programme international "Deep Sea Drilling Project" (DSDP) et ont été reliées aux éruptions des volcans d'Amérique Centrale (Cadet *et al.*, 1982 a et b). Le sens ouest dominant des vents et des courants marins dans cette zone est un critère supplémentaire permettant de conclure à une même origine pour les cendres que nous observons ici (cf fig. 30). Elles correspondent aux éruptions post-pliocène des volcans d'Amérique Centrale.

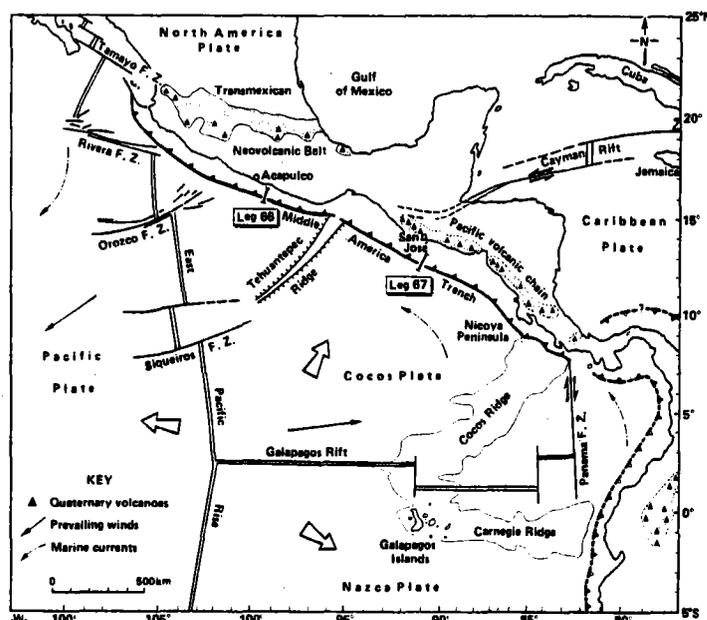


Fig. 30 - Le Pacifique Centre-Est : les vents et les courants marins dominants (Cadet *et al.*, 1982 b).

La localisation de ces cendres, limitée à l'Ouest de la zone à partir de l'échantillon CL SH 4 (à 30 km de l'axe) permet de déduire certains faits :

- les sédiments de surface dans la partie est (entre 0 et 30 km de l'axe) sont plus récents que ceux situés à l'Ouest (30 à 83 km). Ils sont postérieurs à la dernière éruption volcanique qui a été enregistrée à l'Ouest ;

- la limite entre les deux zones doit donc correspondre à la limite au-delà de laquelle, l'apport direct de matériel hydrothermal diminue sensiblement. On peut donc conclure que l'influence hydrothermale actuelle est dominante jusqu'à environ 30 km de l'axe sur le flanc ouest.

- le taux de sédimentation est fort à l'Est, et diminue au-delà de 30 km, où l'influence hydrothermale s'affaiblit.

b) La fraction biogène

- Les foraminifères sont concentrés surtout à l'Ouest de la zone et présentent des signes de dissolution importants. Leur état de conservation est mauvais à très mauvais dans l'ensemble, mais on observe souvent des états très différents dans un même échantillon (cf fig. 31). De plus, l'état des organismes n'est pas lié au pourcentage de  $\text{CaCO}_3$ . Les datations obtenues sur les foraminifères ne sont pas précises, et sont les mêmes que dans la zone axiale, c'est-à-dire qu'ils sont probablement actuels.

- Les radiolaires sont particulièrement abondants dans les échantillons CL SH 5 (59 %) et CL KS 1 (30 %). Leur état de conservation est bon dans l'ensemble et ne présente pas de relation avec celui des organismes calcaires (cf fig. 31). Les datations obtenues ne permettent pas de donner une meilleure précision sur l'âge qu'à partir des foraminifères.

- Les diatomées sont rares et donnent un âge pléistocène supérieur, postérieur à la limite Bruhnes-Matuyama (750 000 ans) et dans la zone à *Pseudoeunotia doliolus* (Burckle, 1972, 1977). Leur état de conservation est moyen.

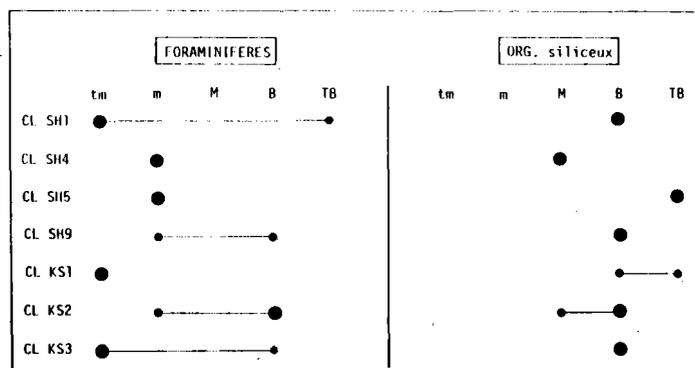


Fig. 31 - Etat de conservation des organismes calcaires et siliceux dans les sédiments de surface situés sur le flanc ouest.

### c) Conclusion

- La fraction grossière des sédiments de surface sur le flanc ouest montre une répartition préférentielle des carbonates à l'Ouest de la zone.

- La répartition des cendres volcaniques permet de limiter la zone d'influence hydrothermale maximum jusqu'à 30 km environ à l'Ouest de l'axe.

### C - ETUDE AUX RAYONS X DU SEDIMENT TOTAL

Les diagrammes de rayons X révèlent une nature amorphe des sédiments, seules sont observées de la calcite, des traces de quartz, de l'olivine et des plagioclases. Ces derniers sont particulièrement abondants dans CL SH 9.

On observe aussi parfois une légère "bosse" vers 4,50 Å pouvant correspondre à un pic de minéraux argileux. Cette réflexion n'avait pas été notée dans les sédiments de la zone axiale, ce qui traduit une dilution moins importante du sédiment par l'apport hydrothermal.

### D - ETUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE (< 2 µm)

Une étude identique à celle des sédiments de la zone "axiale" a été menée aux rayons X et au microscope électronique à transmission.

Les résultats obtenus, montrent :

- une proportion moins importante de produits amorphes par rapport aux argiles cristallisées, ce qui se traduit par une meilleure "allure" des diagrammes de rayons X des échantillons avant traitement. Ceux-ci montrent en effet des pics mal exprimés de chlorite, kaolinite, illite et de smectites (cf fig. 32 et 33) ;

- des néoformations de smectites sur les organismes siliceux ainsi que les autres argiles observées dans la zone axiale.

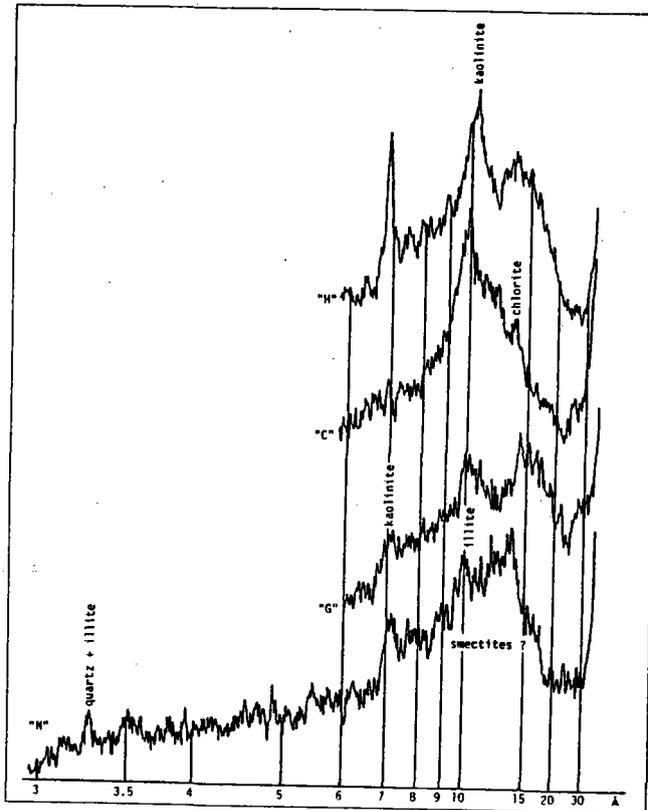


Fig. 32 - Diagramme de rayons X de la fraction argileuse avant traitement, d'un sédiment de surface sur le flanc ouest (exemple de l'échantillon CL SH 1).

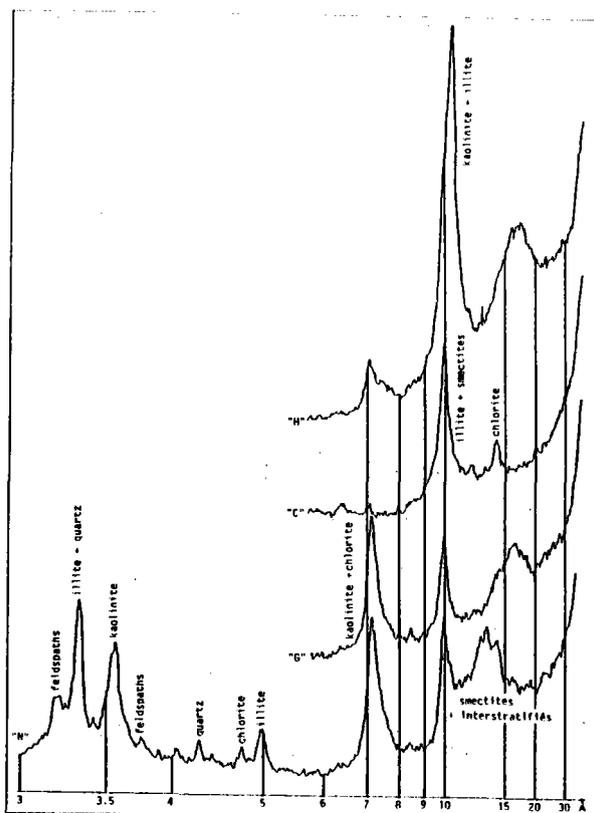


Fig. 33 - Diagramme de rayons X après traitement (exemple de l'échantillon CL SH 1).

## E - CONCLUSION A L'ETUDE DES SEDIMENTS DE SURFACE SUR LE FLANC OUEST

Ces sédiments de surface présentent une zonation d'Est en Ouest qui se traduit par :

- une diminution de la quantité d'oxyhydroxydes amorphes vers l'Ouest,
- une influence détritique qui apparaît corrélativement plus importante dans cette direction,
- des cendres volcaniques présentes uniquement à partir de 30 km de l'axe,
- des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  faibles dans le centre de la zone et qui remontent progressivement également à l'Ouest de la zone.

## V - LES SEDIMENTS PRELEVES SUR LES SEAMOUNTS

5 échantillons ont été prélevés sur les seamounts (cf fig. 17)

- CY 84-21-1 et CY 84-22-1 : sur le flanc sud du seamount à l'Ouest de la dorsale dans la zone B ( $11^{\circ}30'$  Nord),
- CY 84-23-1 : sur le flanc sud du seamount Sud-Est dans la zone A ( $12^{\circ}50'$  Nord),
- CY 84-28-1 : au bas du flanc nord du seamount Nord-Est, dans la zone A,
- CY 84-26-1 : au sommet du seamount Clipperton dans la zone A. Ce dernier échantillon sera étudié à part.

## A - LES ECHANTILLONS DES SEAMOUNTS A $11^{\circ}30'$ NORD, SUD-EST ET NORD-EST

(CY 84-21-1 ; 22-1 ; 23-1 et 28-1)

### 1 - COULEUR, TEXTURE ET TENEUR EN EAU DES SEDIMENTS HUMIDES

(cf tableaux IX et X, annexe I)

Ces sédiments sont brun sombre à brun rouge foncé, et ont une texture fine à relativement granuleuse. Les teneurs en eau sont les plus faibles observées sur l'ensemble des zones (69 à 144 %), sauf pour l'échantillon CY 84-28-1 qui atteint 336 %.

### 2 - LES TENEURS EN $\text{CaCO}_3$ (cf tableau XI, annexe I)

Les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  sont de 15 % en moyenne pour les 3 échan-

tillons CY 84-21-1, 22-1 et 28-1. Cette valeur est équivalente à celle observée pour les sédiments situés sur le flanc ouest. En revanche, CY 84-23-1 ne renferme que 3 % CaCO<sub>3</sub>.

### 3 - OBSERVATION DES SEDIMENTS EN FROTTIS : DETERMINATION DES FACIES SEDIMENTAIRES

Les phases observées sont les mêmes que dans la zone "axiale". Tous les échantillons sont des vases d'argiles (cf tableau XII, annexe I).

### 4 - OBSERVATION DE LA FRACTION GROSSIERE (> 63 µm) ET BIOSTRATIGRAPHIE

#### a) Proportion de la fraction >63 µm

Le pourcentage de la fraction grossière varie de 6 à 40 %. Il est élevé dans le cas de CY 84-23-1 qui renferme des fragments de verre volcanique de grande taille (cf tableau XX).

| Echantillon      | % > 63µm |
|------------------|----------|
| <i>Seamounts</i> |          |
| CY 84-21-1       | 9        |
| CY 84-22-1       | 12       |
| CY 84-23-1       | 40       |
| CY 84-26-1       | 44       |
| CY 84-28-1       | 6        |

Tableau XX - Pourcentage de fraction grossière dans les sédiments prélevés sur les seamounts.

#### b) Les constituants de la fraction grossière

On observe les mêmes constituants que dans les sédiments de la zone "axiale" (cf fig. 34).

#### α - La fraction non biogène

Elle est caractérisée par :

- . l'abondance d'agrégats bruns dans l'échantillon CY 84-28-1 ;
- . l'abondance de verre volcanique dans les échantillons CY 84-21-1, 22-1 (70 %) et CY 84-23-1 (50 %).

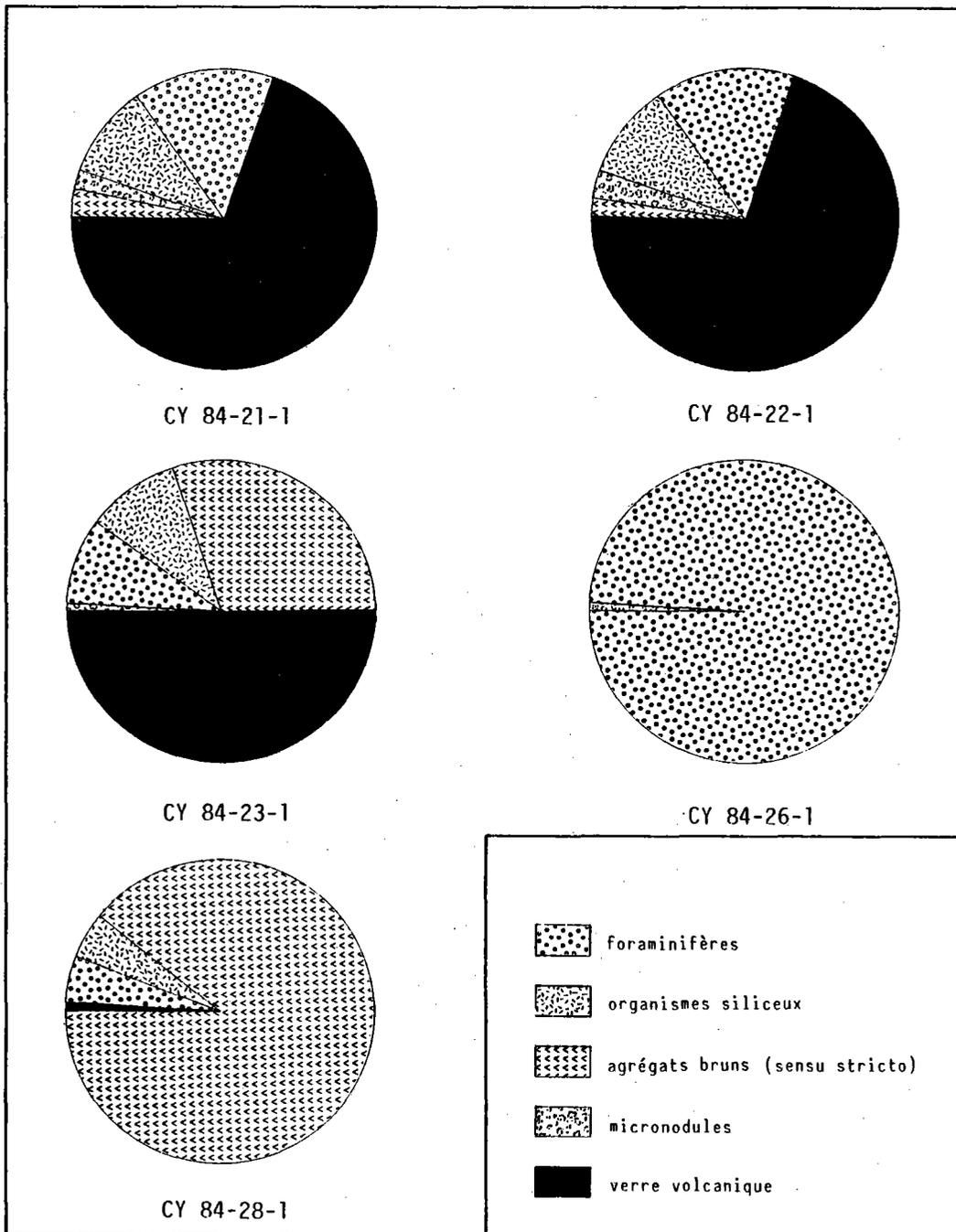


Fig. 34 - Les constituants de la fraction grossière (> 63  $\mu\text{m}$ ) dans les sédiments situés sur les seamounts.

### β - La fraction biogène

- les foraminifères montrent des signes importants de dissolution. Leur état de conservation est mauvais à moyen (cf fig. 35) ;
- les radiolaires sont assez abondants (5 à 10 %) et sont dans un état de conservation généralement moyen, et parfois bon (cf fig. 35). Des indices de faunes froides sont observés dans CY 84-21-1, dans lequel on obtient un âge quaternaire moyen (compris entre  $250.10^3$  ans et  $180.10^3$  ans) ;
- les diatomées sont rares. Sur le seamount à  $11^{\circ}30'$  Nord, l'âge obtenu est Pléistocène supérieur correspondant à la zone à *Pseudoeumotia doliolus* (Burckle, 1972, 1977), c'est-à-dire inférieur à 750 000 ans.

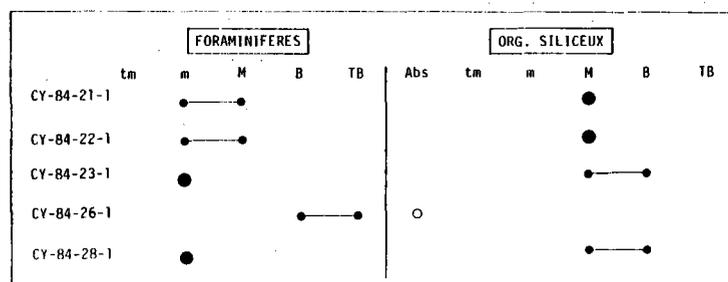


Fig. 35 - Etat de conservation des organismes calcaires et siliceux dans les sédiments situés sur les seamounts.

### 5 - ETUDE DU SEDIMENT TOTAL AUX RAYONS X

Les sédiments prélevés sur les seamounts, présentent aux rayons X les mêmes caractéristiques que ceux de la zone axiale, c'est-à-dire qu'ils sont en majorité amorphes.

### 6 - CONCLUSION

Les sédiments prélevés sur les seamounts Nord-Est, Sud-Est, et à  $11^{\circ}30'$  Nord sont caractérisés par :

- des teneurs en eau faibles en général,
- des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  faibles,
- une grande proportion de verre volcanique.

## B - L'ECHANTILLON CY 84-26-1 SUR LE SEAMOUNT CLIPPERTON

Ce sédiment présente de nombreuses caractéristiques particulières par rapport aux autres sédiments qui ont été étudiés jusqu'à présent :

- Il s'agit d'un sable dont la teneur en  $\text{CaCO}_3$  est très élevée (89 %). Il est, en effet, constitué essentiellement de foraminifères (99 % de la fraction grossière) dont l'état de conservation est bon à très bon, et sur lesquels il n'a pas été observé de dissolution.

- Le reste de la fraction grossière renferme uniquement 1 % de micronodules et des traces de verre volcanique et de spicules siliceux.

- Les foraminifères (10 YR 8/1) sont très souvent, partiellement ou totalement enrobés par oxyhydroxydes de fer rouilles (5 YR 4/8) ou encroûtés par des oxydes de manganèse noirs (10 YR 2/1), ce qui confère au sédiment une couleur hétérogène (cf planche VI, photos 5 et 6).

- Les argiles sont peu abondantes (6 % en frottis). Ce sédiment, d'après la classification adoptée (Hoffert, 1980), est donc un sable de foraminifères avec argiles.

## C - LA SEDIMENTATION SUR LES SEAMOUNTS (cf planche V)

L'exploration par submersible a montré une similitude entre le seamount Sud-Est (zone A) et le seamount de la zone B. Outre des caractéristiques géomorphologiques semblables, des dépôts hydrothermaux ont en effet, été observés sur l'un et l'autre (Hékinian et Fouquet, 1985 ; Hékinian et Bideau, en préparation).

### 1 - LA SEDIMENTATION SUR LES SEAMOUNTS SUD-EST ET A 11°30' NORD (cf fig. 36 et 37)

La sédimentation sur les flancs sud des deux seamounts est caractérisée par une dualité, telle que celle qui a déjà été observée dans la zone "axiale" à une plus grande échelle. En effet, deux types de sédiments se jouxtent :

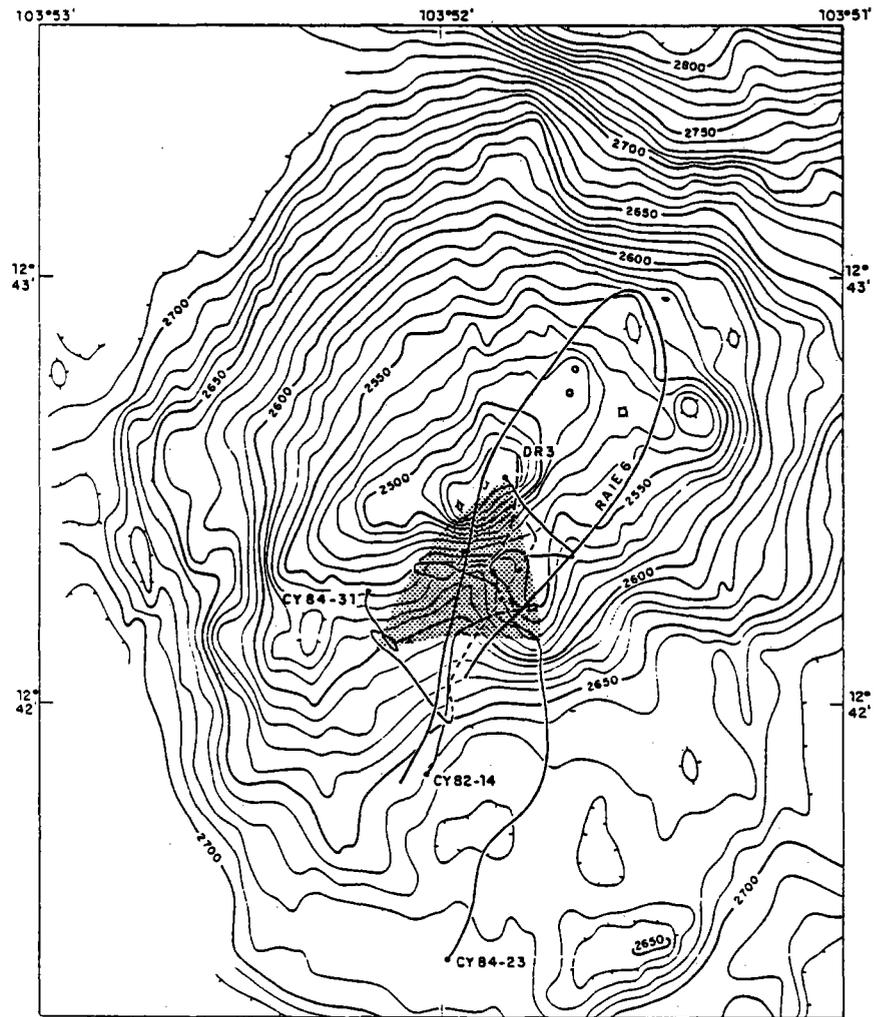
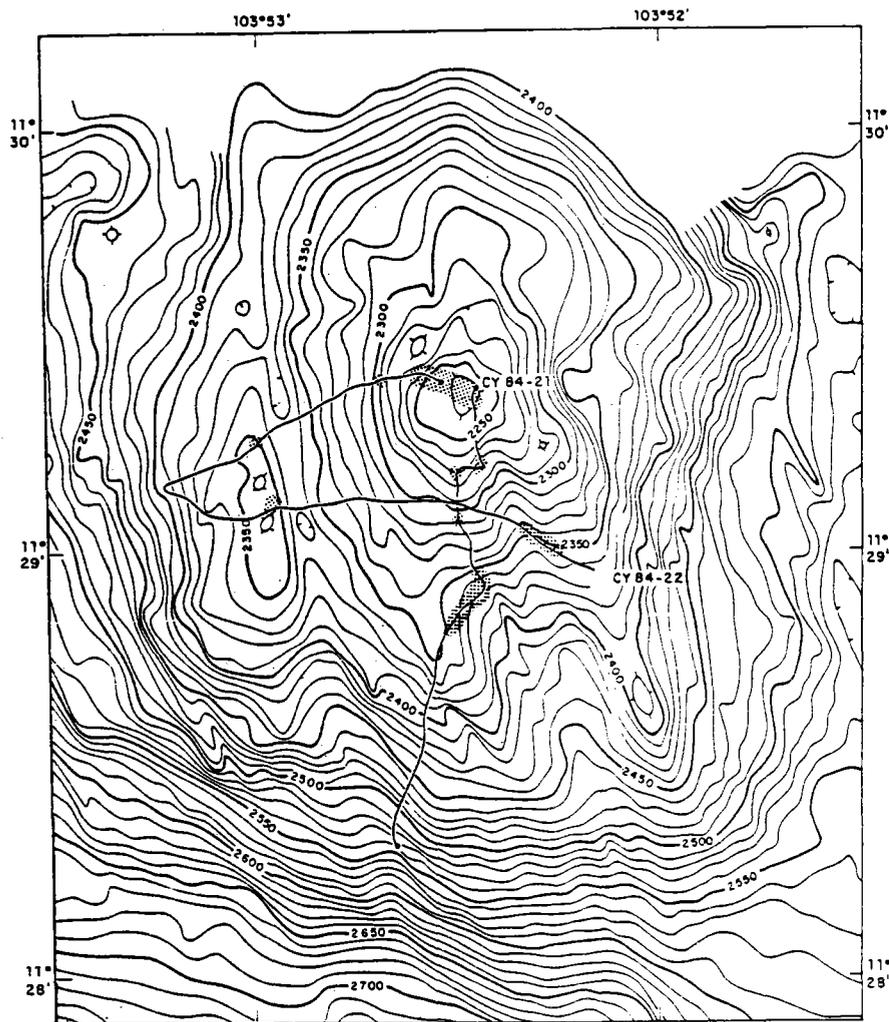


Fig. 36 - Localisation des dépôts hydrothermaux (zones ombrées) sur les seamounts Sud-Est (zone A) et de la zone B (Hékinian et Bideau, sous presse).

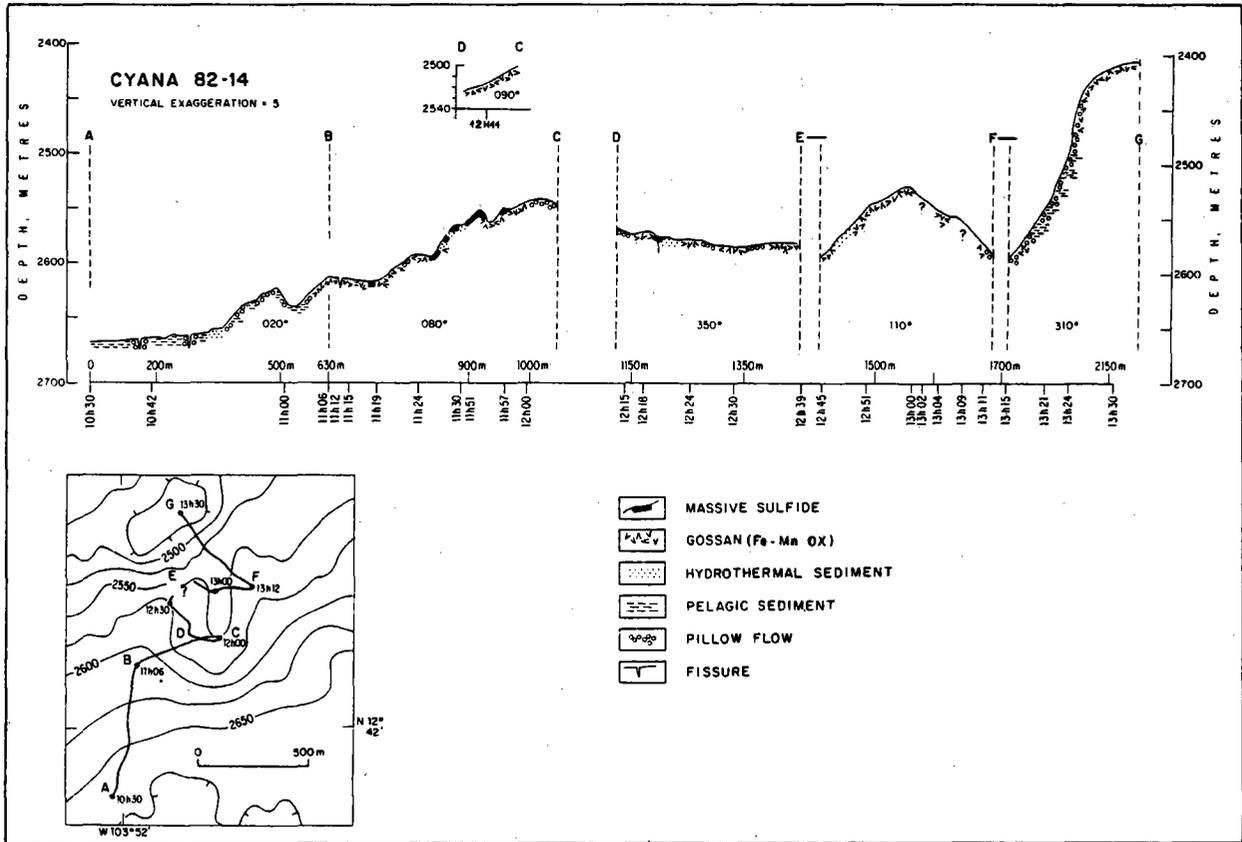


Fig. 37 - Coupe sur le seamount Sud-Est (Hékinian et Fouquet, 1985).

- des sédiments pulvérulents, jaunes à rougeâtres localisés aux abords des dépôts hydrothermaux plus massifs de sulfures (Hékinian et Fouquet, 1985), et que l'on peut comparer aux sédiments des sites hydrothermaux inactifs dans la zone "axiale". Toutefois, ils sont souvent surmontés ici, par des encroûtements de manganèse.
- des sédiments brun clair comme ceux qui ont été observés en dehors des sites hydrothermaux inactifs dans la zone "axiale".

Les zones hydrothermales recensées sur les deux seamounts (cf fig. 36) indiquent l'étendue des sédiments du premier type. Sur le seamount Sud-Est, ils sont compris dans un triangle centré au sommet et sur le flanc sud du seamount. A 11°30' Nord, ils sont également présents au sommet, mais existent aussi en plusieurs points sur les flancs sud et ouest.

Le second type de sédiments est abondant à la base des seamounts, et diminue vers le sommet. Ainsi, il occupe 60 à 70 % de la surface au départ des plongées CY 84-21 et 22 sur le seamount à 11°30' Nord.

Sur le seamount Sud-Est, la couverture sédimentaire est fine vers 2685 m (au début de la plongée CY 84-23) où elle recouvre les laves drapées sur une épaisseur de 1 à 2 cm en moyenne, ou bien occupe les espaces interstitiels des pillows. A mi-pente (2650 m) au début de la plongée CY 82-14, le sédiment atteint 50 cm environ (Hékinian et Fouquet, 1985) et recouvre en partie les coulées de pillows. Puis il diminue vers le sommet du seamount.

- la présence de courants de fond au niveau du seamount à 11°30' Nord est signalée par l'existence de rides en certains endroits à la surface des sédiments.

## 2 - LA SEDIMENTATION SUR LES SEAMOUNTS NORD-EST (ZONE A) ET CLIPPERTON

Il n'a pas été observé de zones hydrothermales sur ces seamounts.

. Le seamount Clipperton. Sur le flanc sud, les sédiments sont abondants. Ils sont organisés en plages décamétriques sur les replats où l'épaisseur peut dépasser 50 cm, ou bien en coulées, intercalées entre

les pillows, ou bien encore s'accumulent dans des petites vallées créées par des mises en places successives de basaltes lobés. Par endroits, les éboulis et les espaces inter-pillows ne sont que légèrement saupoudrés de sédiment.

A la base du seamount, les sédiments sont de couleur brune, tandis qu'ils sont blancs en général avec parfois des traînées noires, dans la pente et au sommet. Cet édifice est de plus parcouru, comme le seamount à 11°30' Nord, par des courants dont la présence est souvent enregistrée à travers les rides à la surface des sédiments. Ceux-ci sont également perturbés par une bioturbation parfois intense, due aux organismes fouisseurs comme les holothuries par exemple. Les autres formes de la faune associées à ce relief sont bien développées, qu'elles soient fixées (octocoralliaires, hydraires, crinoïdes) ou mobiles (poissons...).

. Le seamount Nord-Est a au contraire été exploré sur son flanc nord, et il présente beaucoup de similitudes avec le seamount Clipperton. Le sédiment est abondant partout, et remplit les fissures. Il n'y a qu'au niveau des reliefs construits de pillows qu'il se raréfie, à cause de la pente plus raide qu'ils engendrent. Sur ce flanc, il n'a pas été observé de rides de courant comme sur le seamount Clipperton. Par contre, comme sur ce dernier, la faune y est bien développée (ophiures, crinoïdes, poissons, holothuries, sipunculien) et la bioturbation importante.

## VI - LA GEOCHIMIE DES SEDIMENTS DE SURFACE DANS LES ZONES A ET B

### A - METHODE D'ETUDE

- Le dosage de 10 éléments majeurs et de 10 éléments en traces a été effectué à l'Université de Bretagne Occidentale par J. Cotten, sur sédiment total. A l'exception de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, dosé par colorimétrie, les analyses ont été faites par spectrophotométrie de flamme en absorption et émission atomique. L'appareillage utilisé est du type Varian Tecktron A.A.6.

- Deux éléments en traces : As et Se ont été dosés à l'IFREMER, centre de Brest par A. Birolleau selon la méthode de spectrométrie d'absorption atomique avec génération d'hydrure (Birolleau, en préparation). Avant cette dernière analyse, les sédiments sont séchés, broyés, puis minéralisés à l'acide nitrique. Il faut signaler que la fraction minéralisée ne comprend que la partie "échangeable" du sédiment, c'est-à-dire la fraction non silicatée. En effet, une attaque totale du sédiment entraînerait des pertes par volatilisation de composés gazeux d'arsenic et de sélénium.

#### B - LES ELEMENTS MAJEURS

Les sédiments de surface sont caractérisés par des teneurs en fer et manganèse élevées, et des teneurs en aluminium, silice et potassium, faibles par rapport aux sédiments pélagiques moyens du Pacifique (cf références 5 et 6 du tableau I, chapitre I et tableau XI, annexe I). Bischoff *et al.* (1979b), d'après les données de Landergren (1964) et Cronan (1969) établissent des droites moyennes correspondant au rapport des éléments majeurs en fonction de l'aluminium pour les argiles pélagiques du Pacifique (Pacific pelagic clay : Ppc). L'aluminium est utilisé comme élément de référence car il est considéré comme constant dans ces argiles, et résultant de l'apport détritique dans le sédiment.

La comparaison des valeurs de ces différents rapports avec les sédiments de surface de 12°50'N et 11°30'N, souligne le caractère "particulier" de ces derniers dû à l'enrichissement en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> et à l'appauvrissement en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> et K<sub>2</sub>O, et met en évidence une évolution dans la composition des sédiments au sein des 3 zones ('axiale', flanc ouest et seamounts) (cf fig. 38).

- Le rapport SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> est légèrement plus élevé dans le domaine d'étude par rapport à la Ppc, bien qu'en valeur absolue, SiO<sub>2</sub> soit appauvri dans le premier domaine. Ceci traduit un appauvrissement plus important en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que pour SiO<sub>2</sub>. On peut donc envisager une source d'apport supplémentaire, à 12°50' N et 11°30' N, pour la silice qui

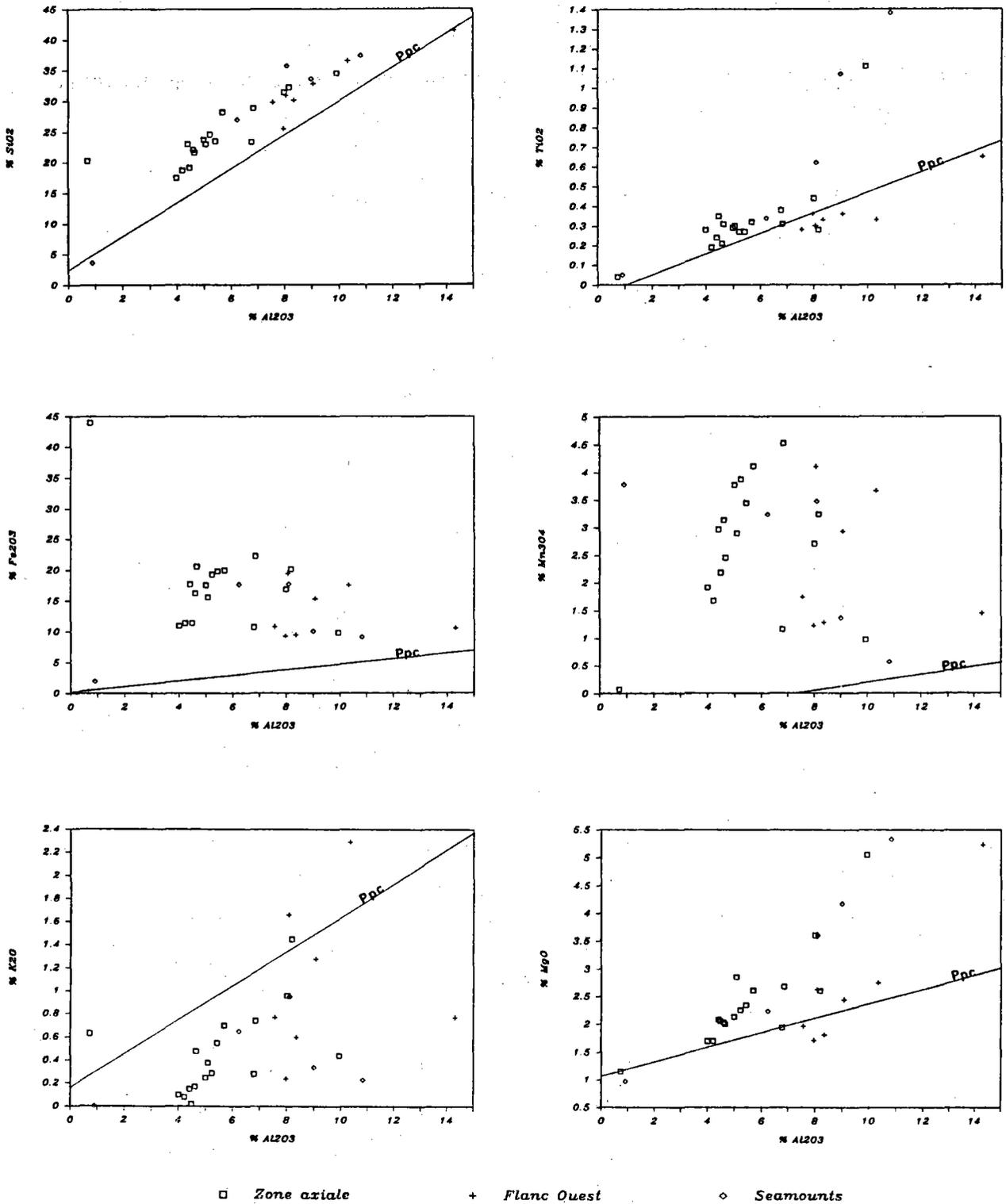


Fig. 38 - SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, MgO et K<sub>2</sub>O en fonction de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : comparaison avec les argiles pélagiques moyennes du Pacifique (Ppc).

semble moins affectée que l'aluminium par la dilution due au fer et au manganèse. Cet apport peut s'expliquer par des apports biogène ou hydrothermal plus importants et qui sont indépendants de l'aluminium.

- De même, le rapport  $K_2O/Al_2O_3$  traduit un appauvrissement plus important de  $K_2O$  relativement à  $Al_2O_3$ , en comparaison avec la Ppc, traduisant une dilution de  $K_2O$  probablement par les produits hydrothermaux.

Les analyses chimiques mettent également en évidence des évolutions entre les 3 zones :

- .  $Fe_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$  et  $P_2O_5$  ont des teneurs plus élevées dans la zone "axiale" que sur le flanc ouest ;

- .  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  et  $K_2O$  sont, au contraire, plus élevés sur le flanc ouest que dans la zone "axiale" ;

- .  $TiO_2$ ,  $MgO$  et  $Na_2O$  sont équivalents dans les 2 zones ;

- . Les échantillons localisés sur les seamounts, montrent un enrichissement significatif en  $TiO_2$  et  $MgO$  par rapport aux deux autres zones, tandis que  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$  et  $Na_2O$  sont équivalents aux échantillons du flanc ouest et  $K_2O$ , à ceux de l'axe.  $Al_2O_3$ , lui, est intermédiaire entre les échantillons du flanc ouest et de la zone "axiale" ;

- Trois échantillons présentent des particularités géochimiques par rapport à l'ensemble des sédiments de surface sur les trois zones :

- . CY 82-32, provenant d'une cheminée inactive : cet échantillon est très riche en  $Fe_2O_3$  (46,19 % contre 21,68 % en moyenne à  $CaCO_3 = 0$  dans la zone "axiale") et est pauvre en  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$  et  $MgO$  ;

- . CY 84-26-1, prélevé au sommet du seamount Clipperton, est très riche en  $Mn_3O_4$  (25,18 % contre 2,45 % à  $CaCO_3 = 0$  en moyenne sur les seamounts) et pauvre en  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Na_2O$  et  $K_2O$  ;

- . CL SH 9, prélevé à l'Ouest du seamount Clipperton, sur le flanc ouest. Cet échantillon présente une teneur importante en  $Al_2O_3$  (16,09 % contre 11,39 % en moyenne à  $CaCO_3 = 0$  sur le flanc ouest),  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  et  $MgO$  et un appauvrissement en  $Fe_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$ ,  $K_2O$  et  $P_2O_5$ .

## C - LES ELEMENTS MINEURS (cf tableau XI, annexe I)

Les éléments mineurs montrent, comme les majeurs, une évolution d'une zone à l'autre :

- . Cu, Zn et Sr sont enrichis dans la zone "axiale" par rapport au flanc ouest ; les deux premiers éléments ont des teneurs très élevées, particulièrement dans CY 82-32.

- . Li et Ba ont un comportement inverse ;

- . Rb, V, Cr, Co et Ni sont équivalents sur les deux zones ;

- . Au niveau des seamounts, on observe un enrichissement en Co par rapport aux deux autres zones, tandis que Li et Rb sont appauvris. Quant à l'échantillon CY 84-26-1, il est enrichi en Sr, Ni, Cu et Zn.

## D - L'ARSENIC ET LE SELENIUM

L'arsenic et le sélénium sont tous les deux des éléments de la chimie du soufre qui est déterminant dans les processus hydrothermaux. Le dosage de ces deux éléments peut donc éventuellement permettre de retrouver au niveau des sédiments, une signature hydrothermale aidant à l'identification ultérieure de l'origine de sédiments métallifères de localisations variées.

### 1 - L'ARSENIC

Dans la zone "axiale", les teneurs en As sont en moyenne de 109 ppm avec une valeur maximum de 162,5 ppm pour CY 82-32.

Sur le flanc ouest, la moyenne est de 53 ppm.

Sur les seamounts, elle est de 46 ppm.

On observe ainsi une évolution décroissante de la zone "axiale" vers le flanc ouest (cf fig. 39). Cependant, cette évolution présente des restrictions au niveau de la zone "axiale" où l'amplitude des valeurs observées est forte.

Boström et Valdes (1969), Boström *et al.* (1969), Cronan (1972), Toth (1977) et Marchig *et al.* (1982) ont mesuré des teneurs élevées en As dans les sédiments métallifères d'environnements hydrothermaux.

D'après les données de Boström et Valdes (1969), les sédiments du flanc ouest ne présentent qu'un très faible enrichissement en As par rapport aux sédiments pélagiques moyens du Pacifique (cf fig. 40), tandis qu'ils sont encore largement enrichis d'après les valeurs de Marchig *et al.* (1982).

Au niveau de la zone "axiale", l'enrichissement est très variable et atteint au maximum 162,5 ppm pour l'échantillon CY 82-32. Cette valeur est en accord avec celle de Marchig *et al.* (1982) obtenue par absorption atomique avec génération d'hydrure, méthode également employée dans ce travail. Toujours selon ces auteurs, la moyenne ( $> 100$  ppm) de la zone "axiale" permettrait d'attribuer une origine hydrothermale à ces sédiments ; cependant, ils n'excluent pas une origine hydrogène pour cet élément qui est facilement adsorbé par les oxyhydroxydes de fer.

## 2 - LE SELENIUM

Le sélénium présente le même type de variations que l'arsenic dans la zone "axiale". On observe en effet des teneurs comprises entre 0.3 ppm et 3,4 ppm (à  $\text{CaCO}_3 = 0$ ) (cf fig. 41).

Sur le flanc ouest, ces valeurs décroissent moins régulièrement que l'arsenic.

Au niveau des seamounts, les teneurs sont très faibles (0,2 ppm en moyenne).

Le sélénium est beaucoup plus rarement dosé dans les sédiments, et d'après ces résultats, il semble avoir un comportement légèrement différent de celui de l'arsenic. Le coefficient de corrélation calculé entre ces deux éléments n'est que de + 0.54 sur 25 échantillons. Par exemple, tandis que CY 82-32 a la valeur la plus élevée en As, il n'en est pas de même pour le sélénium.

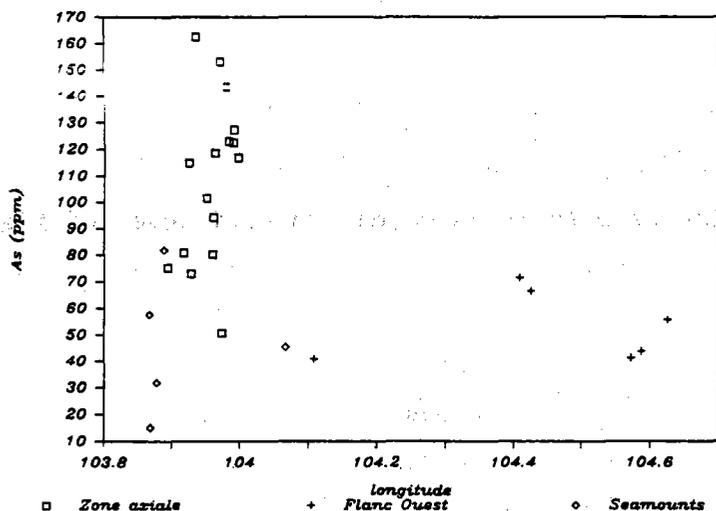


Fig. 39 - Variation des teneurs en arsenic en fonction de la longitude (à  $\text{CaCO}_3 = 0$ ).

| Auteurs                  | Type de sédiment   | teneurs en As (ppm) à $\text{CaCO}_3 = 0$ |                                 |                |                               |
|--------------------------|--|---|---------------------------------|----------------|-------------------------------|
|                          |  | spectrophotométrie                        | activation neutronique          | fluorescence X | absorption atomique (hydrure) |
| Boström et Valdes (1969) | Sédiment pélagique moyen   | 40  | sur fraction < 63 $\mu\text{m}$ |                |                               |
|                          |  |   |                                 |                |                               |
| Marchig et al. (1982)    | Sédiment pélagique moyen   |   | $5 \pm 1$                       | $10 \pm 2$     | $3 \pm 0.3$                   |
|                          | Sédiment métallifère hydrothermal de la dorsale du Pacifique Est |   | $180 \pm 30$                    | $222 \pm 46$   | $157 \pm 12$                  |

Fig. 40 - Valeurs moyennes, par différentes méthodes d'analyses, des teneurs en arsenic dans les sédiments pélagiques moyens et les sédiments de la dorsale du Pacifique Est (d'après Boström et Valdes, 1969 et Marchig et al., 1982).

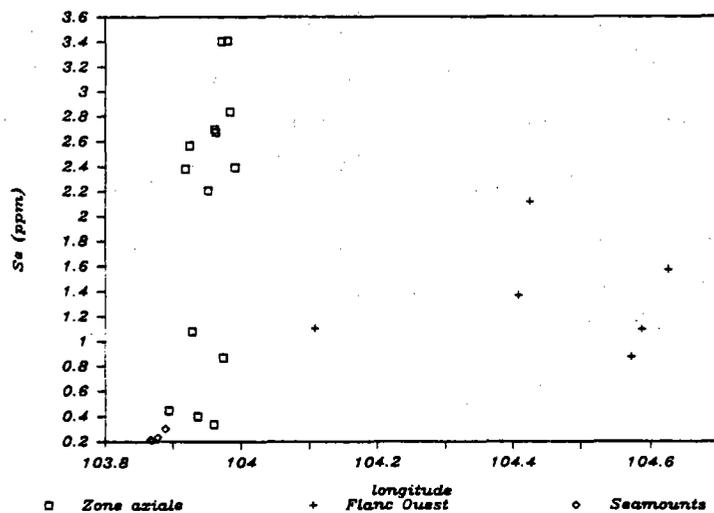


Fig. 41 - Variation des teneurs en sélénium en fonction de la longitude (à  $\text{CaCO}_3 = 0$ ).

E - LES CORRELATIONS ENTRE LES ELEMENTS

Les coefficients de corrélations linéaires entre les éléments ont été déterminés sur les échantillons de surface des 3 zones, à partir des analyses chimiques avec  $\text{CaCO}_3$ . Le nombre des échantillons pris en compte varie de 23 à 29, d'une part en fonction du nombre d'analyses existantes et d'autre part en éliminant CY 84-26-1, CY 82-32 ou CY 84-29-1 pour le calcul des coefficients en fonction du  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Zn}$  et  $\text{Cu}$ . Les sédiments présentent en effet des valeurs anormales en ces éléments susceptibles de modifier la valeur réelle des coefficients.

| $\text{CaCO}_3$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{Mn}_3\text{O}_4$ | $\text{MgO}$ | $\text{CaO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{P}_2\text{O}_5$ | $\text{Li}$ | $\text{Rb}$ | $\text{Sr}$ | $\text{Ba}$ | $\text{V}$ | $\text{Cr}$ | $\text{Co}$ | $\text{Ni}$ | $\text{Cu}$ | $\text{Zn}$ | $\text{As}$             | $\text{Se}$             | ..              |
|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|--------------|-----------------------|----------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| **              | -0.61          | -0.20          | -0.36                   | -0.36                   | -0.19                   | -0.40        | 0.84         | -0.79                 | -0.59                | -0.32                  | -0.35       | -0.52       | 0.43        | -0.31       | 0.00       | -0.12       | -0.01       | -0.30       | 0.01        | 0.02        | -0.25                   | 0.05                    | $\text{CaCO}_3$ |
| **              | 0.63           | 0.91           | 0.23                    | -0.12                   | 0.78                    | -0.47        | 0.52         | 0.58                  | -0.04                | 0.47                   | 0.42        | -0.48       | 0.42        | 0.38        | 0.66       | -0.09       | -0.02       | -0.61       | -0.47       | -0.11       | 0.08                    | $\text{SiO}_2$          |                 |
| **              |                | 0.66           | -0.28                   | -0.42                   | 0.88                    | 0.08         | 0.00         | -0.05                 | -0.47                | -0.20                  | -0.21       | -0.59       | -0.23       | 0.01        | 0.45       | -0.07       | -0.30       | -0.53       | -0.44       | -0.44       | -0.38                   | $\text{TiO}_2$          |                 |
| **              |                |                | 0.68                    | -0.05                   | -0.57                   | 0.72         | 0.45         | 0.90                  | 0.53                 | 0.57                   | 0.20        | 0.40        | 0.73        | 0.20        | 0.27       | 0.25        | 0.26        | 0.48        | 0.82        | 0.67        | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ |                         |                 |
| **              |                |                |                         | 0.68                    | -0.05                   | -0.57        | 0.72         | 0.45                  | 0.90                 | 0.53                   | 0.57        | 0.20        | 0.40        | 0.73        | 0.20       | 0.27        | 0.25        | 0.26        | 0.48        | 0.82        | 0.67                    | $\text{Mn}_3\text{O}_4$ |                 |
| **              |                |                |                         |                         | -0.21                   | -0.34        | 0.34         | 0.33                  | 0.20                 | 0.54                   | 0.40        | 0.55        | 0.42        | 0.49        | -0.03      | 0.08        | 0.80        | 0.62        | 0.58        | 0.25        | 0.54                    | $\text{MgO}$            |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         | -0.22        | 0.26         | 0.17                  | -0.34                | 0.04                   | 0.01        | -0.55       | -0.10       | 0.23        | 0.83       | -0.11       | -0.10       | -0.38       | -0.37       | -0.28       | -0.14                   | $\text{CaO}$            |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              | -0.67        | -0.71                 | -0.53                | -0.55                  | -0.71       | 0.46        | -0.42       | -0.21       | -0.06      | 0.05        | -0.44       | 0.15        | -0.06       | -0.51       | -0.51                   | $\text{Na}_2\text{O}$   |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              | **                    | 0.27                 | 0.82                   | 0.92        | -0.16       | 0.81        | 0.24        | 0.12       | 0.00        | 0.49        | -0.16       | -0.25       | 0.14        | 0.34                    | $\text{K}_2\text{O}$    |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       | **                   | 0.26                   | 0.47        | -0.13       | 0.20        | 0.27        | -0.23      | -0.01       | -0.11       | 0.30        | 0.50        | 0.89        | 0.37                    | $\text{P}_2\text{O}_5$  |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      | **                     | 0.77        | 0.09        | 0.82        | 0.49        | 0.14       | -0.17       | 0.58        | -0.13       | -0.09       | 0.17        | 0.61                    | $\text{Li}$             |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        | **          | -0.07       | 0.77        | 0.27        | 0.30       | -0.11       | 0.45        | 0.03        | -0.08       | 0.37        | 0.52                    | $\text{Rb}$             |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             | **          | 0.19        | 0.17        | -0.29      | 0.03        | 0.37        | 0.52        | 0.56        | -0.11       | 0.31                    | $\text{Sr}$             |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             |             | **          | 0.35        | -0.04      | -0.08       | 0.51        | -0.19       | -0.13       | 0.08        | 0.47                    | $\text{Ba}$             |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             |             |             | **          | 0.47       | -0.11       | 0.19        | 0.10        | 0.32        | 0.36        | 0.69                    | $\text{V}$              |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             |             |             |             | **         | -0.06       | -0.09       | -0.27       | -0.17       | -0.09       | 0.21                    | $\text{Cr}$             |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             |             |             |             | **         | -0.03       | 0.02        | 0.11        | -0.04       | -0.23       | $\text{Co}$             |                         |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             |             |             |             | **         | 0.38        | 0.16        | -0.17       | 0.29        | $\text{Ni}$ |                         |                         |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             |             |             |             | **         | **          | **          | **          | 0.78        | 0.44        | 0.36                    | $\text{Cu}$             |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             |             |             |             | **         | **          | **          | **          | **          | 0.60        | 0.36                    | $\text{Zn}$             |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             |             |             |             | **         | **          | **          | **          | **          | 0.54        | $\text{As}$             |                         |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             |             |             |             | **         | **          | **          | **          | **          | 0.54        | $\text{Se}$             |                         |                 |
| **              |                |                |                         |                         |                         |              |              |                       |                      |                        |             |             |             |             | **         | **          | **          | **          | **          | 0.54        | $\text{Se}$             |                         |                 |

Tableau XXI - Les coefficients de corrélations entre les éléments majeurs et mineurs, déterminés à partir des analyses chimiques des sédiments de surface.

Les résultats sont donnés dans le tableau XXI. Les corrélations les plus significatives, c'est-à-dire les coefficients positifs  $> + 0.65$  ou négatifs  $< - 0.65$ , sont exprimées dans un diagramme synthétique (cf fig. 42).

On observe ainsi que les éléments se répartissent en cinq groupes, à l'exception de  $\text{Co}$  et  $\text{Sr}$  qui ne montrent aucune corrélation avec les autres. Chacun de ces groupes représente une influence dominante hydrothermale, hydrogène, volcanique, détritique ou biogène.

- Le groupe I :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{As}$  et  $\text{Se}$

Les éléments de ce groupe ont une origine principalement hydrothermale. Tous ces éléments, à l'exception de  $\text{Ni}$ , s'organisent autour du fer, avec lequel ils présentent des corrélations positives significatives.  $\text{Sr}$  peut s'intégrer en partie à ce groupe car il est moyennement corrélé avec  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ .

- Le groupe II :  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  et  $\text{Cr}$

Ces éléments représentent la phase argileuse et le verre volcanique. La silice représente également une partie de la fraction biogène. Les groupes I et II sont parfaitement indépendants l'un vis à vis de l'autre.

- Le groupe III :  $\text{CaCO}_3$  et  $\text{CaO}$

Ce groupe a bien sûr, une origine biogène. Il faut signaler ici que  $\text{Sr}$  est quand même moyennement corrélé à ces deux éléments, lui attribuant donc une origine partiellement biogène.

- Le groupe IV :  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}$ ,  $\text{Rb}$  et  $\text{Ba}$

Ce groupe montre une certaine indépendance vis à vis des groupes précédents. Il est vraisemblablement à dominante hydrogène. En effet, Marchig et Gundlach (1982) considèrent que  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{Rb}$  sont d'origine hydrogène. L'association de  $\text{Ba}$  et  $\text{Li}$  avec ces éléments, suggère qu'ils ont, au moins en partie, une même origine. Cependant, des corrélations positives, généralement inférieures à + 0.65 sont observées à la fois avec le groupe I et le groupe II. Ce fait signifie que les éléments du groupe IV ont soit une origine quadruple (hydrogène, hydrothermale, volcanique et détritique) ou bien que l'on assiste à des phénomènes d'adsorption, et en particulier par les phases hydrothermales, ce qui se traduit par une corrélation positive forte entre  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et des corrélations moyennes entre  $\text{Li}$  et  $\text{Se}$  ou  $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{As}$  par exemple.

- Le groupe V :  $\text{Zn}$  et  $\text{Cu}$

Ces deux éléments ne sont reliés aux autres que par une seule corrélation forte négative avec  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . En revanche, des corrélations moyennes sont observées à la fois avec les groupes I et III. Dans ce dernier cas, ils sont reliés au  $\text{Sr}$ . Ils pourraient donc avoir une origine mixte biogène et hydrothermale ; cette dernière semblant être plus importante.

F - LE RAPPORT (Fe + Mn)/Al

Ce rapport a été utilisé par Boström (1973) pour caractériser les sédiments hydrothermaux. Ceux-ci ont en effet un rapport  $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Al}$  d'autant plus élevé que l'influence hydrothermale se fait sentir par

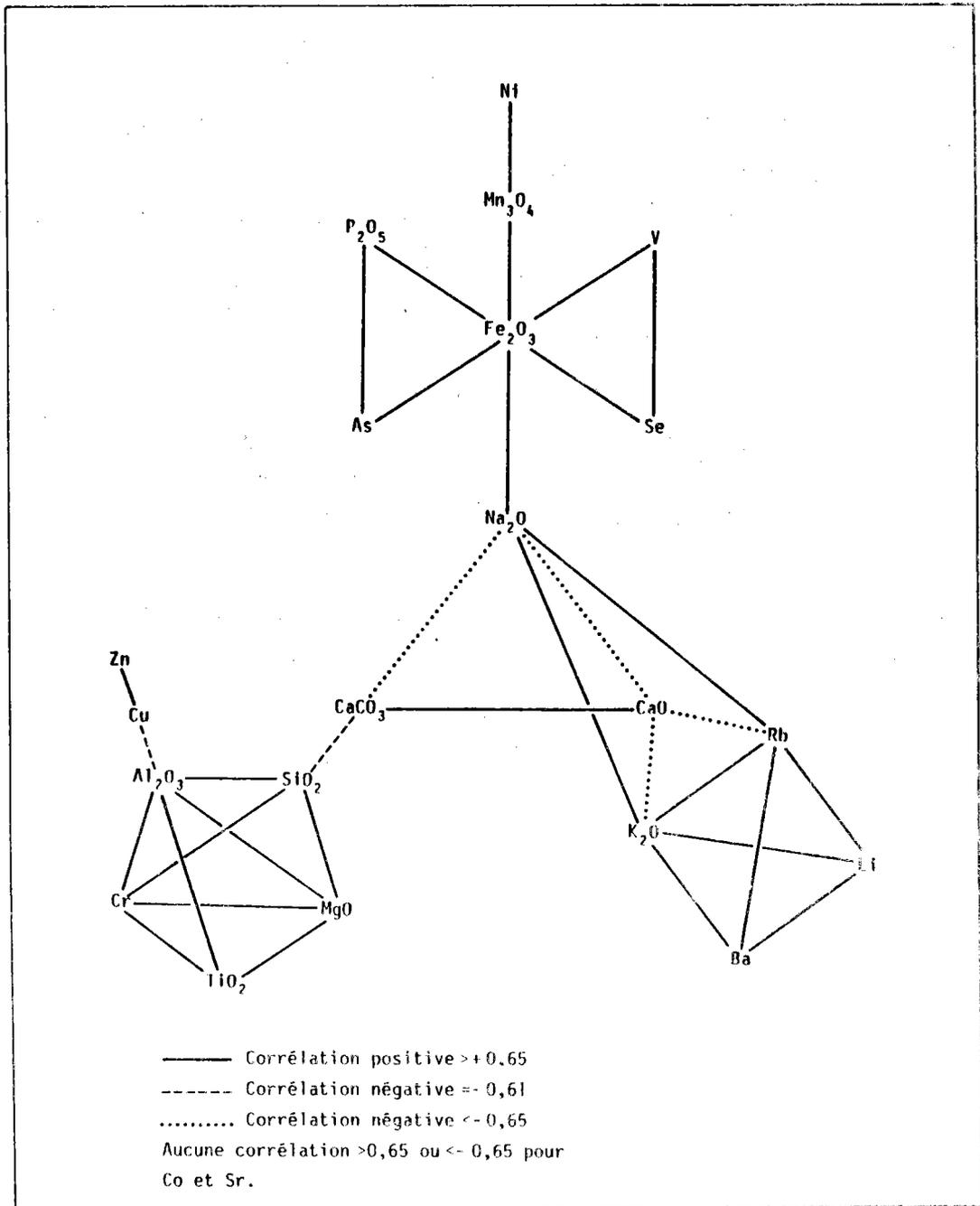


Fig. 42 - Les corrélations positives et négatives, supérieures à  $+0.65$  et inférieures à  $-0.65$  dans les sédiments de surface à  $12^{\circ}50'$  Nord et  $11^{\circ}30'$  Nord.

rapport à l'influence détritique traduite par Al.

Ce rapport est calculé à partir du pourcentage en éléments à  $\text{CaCO}_3 = 0$ , afin d'éliminer l'influence des carbonates. Dans la zone d'étude, ce rapport est compris entre 1 et 9 (cf fig. 43) sauf dans le cas de l'échantillon CY 82-32 pour lequel il atteint 80 (celui-ci n'a

pas été représenté sur la figure pour une meilleure clarté).

On observe que  $(Fe + Mn)/Al$  est plus élevé en moyenne dans la zone "axiale" que sur le flanc ouest. Cependant, dans le détail, de grandes variations se font sentir dans la première zone. Ceci montre que malgré l'élimination des carbonates, la source alimentant les sédiments en fer et manganèse n'est pas régulière à ce niveau. La répartition à proximité et de façon ponctuelle des sources hydrothermales actives dans le graben central, est sans doute responsable de l'hétérogénéité du rapport  $(Fe + Mn)/Al$  dans la zone "axiale"; plus loin, les courants aidant, celle-ci peut s'estomper par le mélange des produits de plusieurs sources hydrothermales, homogénéisant le phénomène qui décroît ensuite régulièrement vers l'Ouest.

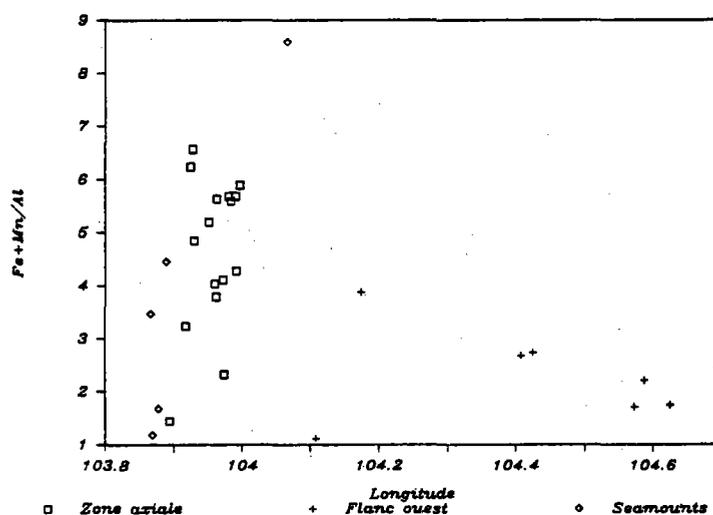


Fig. 43 - Variations du rapport  $(Fe+Mn)/Al$  (à  $CaCO_3 = 0$ ) en fonction de la longitude (sans l'échantillon CY 82-32).

La comparaison de ce rapport avec ceux beaucoup plus élevés ( $> 40$ ), obtenus par Walter et Stoffers (1985) à  $20^\circ S$  sur la dorsale du Pacifique Est, montre qu'à  $13^\circ Nord$  l'influence détritique est beaucoup plus importante, même au niveau de l'axe. Seul le rapport concernant l'échantillon CY 82-32 ( $= 80$ ) s'apparente à ces valeurs.

G - INFLUENCE DES 3 POLES : HYDROTHERMAL, DETRITIQUE ET BASALTIQUE  
DANS LES SEDIMENTS

Boström (1970, 1973) considère que les sédiments océaniques sont le résultat d'un mélange entre trois pôles distincts : basaltique, terrigène et hydrothermal, exprimés respectivement par Ti, Al et Fe, Mn.

Selon ce modèle, les sédiments des zones A et B montrent clairement, combien les influences détritique et basaltique sont importantes. Une fois de plus, seul CY 82-32 peut être classé parmi les sédiments hydrothermaux "purs", ne semblant pas être affecté par un apport détritique ou volcanique (cf fig. 44).

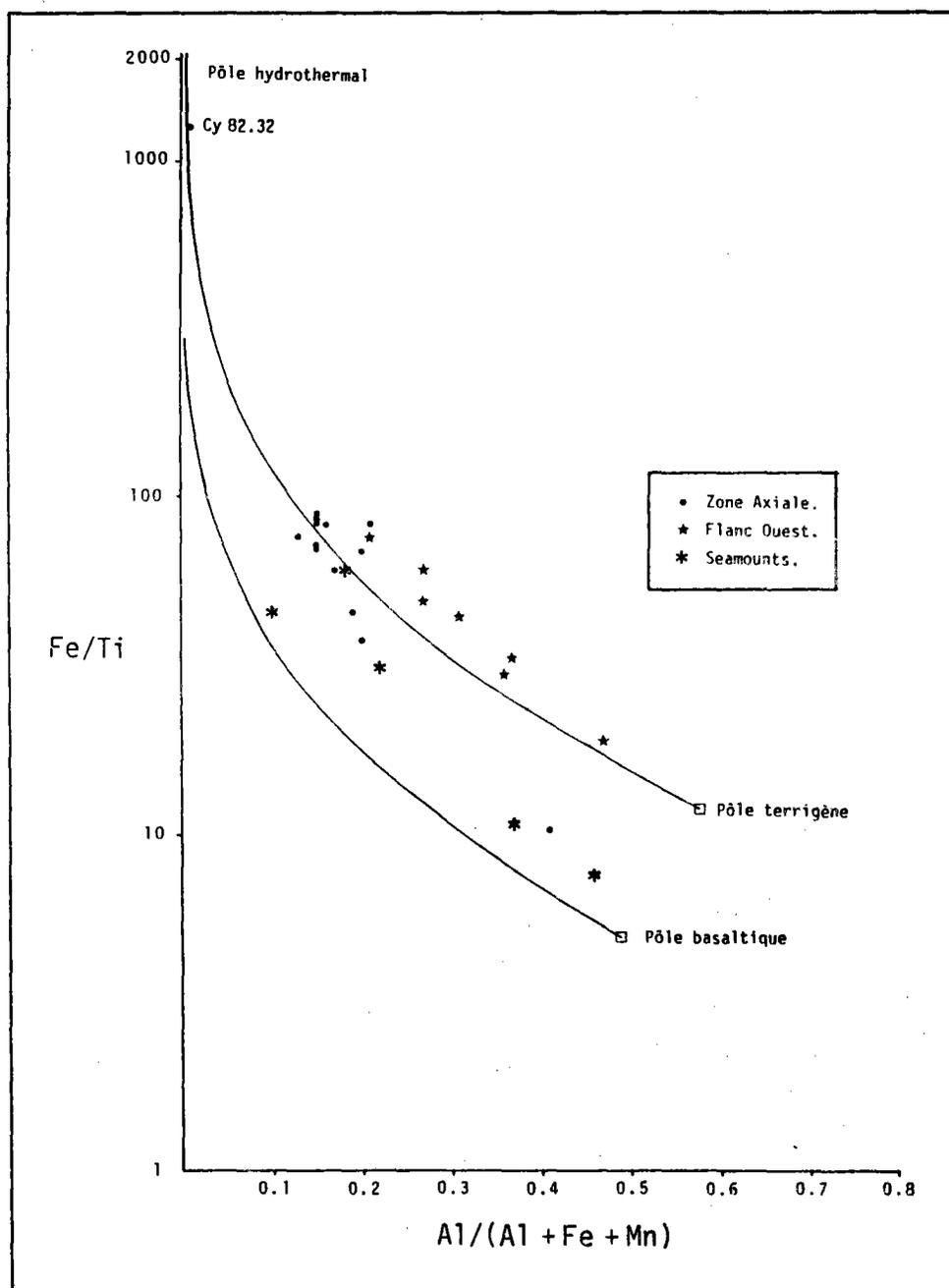


Fig. 44 - Influence des trois pôles basaltique, terrigène et hydrothermal dans les sédiments de surface à 12°50' Nord et 11°30' Nord.

## H - CONCLUSION

Les sédiments de surface à 12°50' Nord et 11°30' Nord sont métallifères au sens de Boström et Peterson (1969), par leurs teneurs élevées en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (9,1 à 22,3 %) et  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  (0,6 à 4,5 %), et leurs teneurs faibles en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,7 à 14,3 %).

Parmi ces sédiments, deux échantillons sont particuliers :

. CY 82-32 ne contient pratiquement pas de  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  (0,07 %), tandis qu'il est très riche en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (44 %).

. CY 84-26-1 renferme davantage de  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  que de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (25,2 % contre 13,1 % à  $\text{CaCO}_3 = 0$ ).

L'étude des relations entre les éléments chimiques, montre que si la formation de ces sédiments est dominée par un apport hydrothermal, on observe également d'autres contributions non négligeables : détritique, volcanique, hydrogène et biogène.

## VII - LES VARIATIONS DE LA SEDIMENTATION EN PROFONDEUR. ETUDE DES CAROTTES.

### A - ETUDE DE LA CAROTTE CY KS 1 DANS LA ZONE "AXIALE"

#### 1 - LES DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES (cf fig. 45)

##### a) Couleur des sédiments humides

La succession sédimentaire est constituée d'unités de couleurs brunes à brun-rouge foncé entre lesquelles le passage est progressif.

Ces unités sont marquées par une bioturbation importante qui se traduit par la présence de taches centimétriques de couleurs différentes.

##### b) Texture des sédiments

Leur texture est fine à légèrement granuleuse, en relation avec le verre volcanique et les foraminifères.

c) Les teneurs en CaCO<sub>3</sub> (cf tableau XI, Annexe I)

Elles varient entre 15 et 46 %, les valeurs fortes correspondant à des concentrations en nannofossiles ou en foraminifères.

d) Les facies sédimentaires observés : étude des frottis (cf tableau XII, annexe I)

L'étude des frottis montre les faits suivants :

- une proportion importante d'argiles : > 80 %
- des oxyhydroxydes plus abondants en surface (7 %) qu'en profondeur où la proportion reste constante : 3 %
- un niveau de concentration en coccolithes à 21 cm et un autre de foraminifères à 48 cm.

2 - OBSERVATION DE LA FRACTION GROSSIERE (cf fig. 45 et tableau XV, annexe I)

. Le pourcentage de fraction grossière représente au maximum 20 % du sédiment total en surface, diminue de plus de la moitié en profondeur et redevient voisin de 10 % vers 55 cm. Cette variation est liée à la proportion d'agrégats bruns *sensu stricto*, plus abondants en surface (88 % contre 40 %) et au verre volcanique qui, lui, est plus abondant à la base de la carotte (4 % contre 30 %).

. Les micronodules sont concentrés dans le niveau 35-37 cm où ils représentent 8 % de la fraction

. Des traces de dents de poissons sont également observées à ce niveau.

. L'état de conservation des foraminifères est mauvais dans l'ensemble. En revanche, les radiolaires sont mieux conservés en profondeur.

3 - CONCLUSION

Cette étude montre :

- des variations en profondeur dans la carotte qui s'expriment par :
  - . une diminution avec la profondeur des oxyhydroxydes sous forme d'agrégats bruns au sens strict,

- . une augmentation à la base de la carotte de la quantité de verre volcanique.
- des traces de bioturbation non négligeables,
- une dissolution forte des foraminifères.

| LITHOLOGIE  |                      |
|---|----------------------|
|    | vase d'argiles       |
| COMPOSITION DES FROTTIS ET DE LA FRACTION GROSSIERE                                 |                      |
|    | organismes calcaires |
|    | organismes siliceux  |
|    | oxyhydroxydes Fe-Mn  |
|    | agrégats bruns       |
|   | micronodules         |
|  | argiles              |
|  | ichtyolithes         |
|  | pelotes fécales      |
|  | verre volcanique     |
|  | cendres volcaniques  |

Légende Fig. 45 à 48.

#### B - ETUDE DES CAROTTES CL KS 1, CL KS 2 et CL KS 3 SUR LE FLANC OUEST

Les caractéristiques sédimentologiques de ces trois carottes sont synthétisées dans les figures 46 à 48, et les tableaux XI, XII et XV, Annexe I.

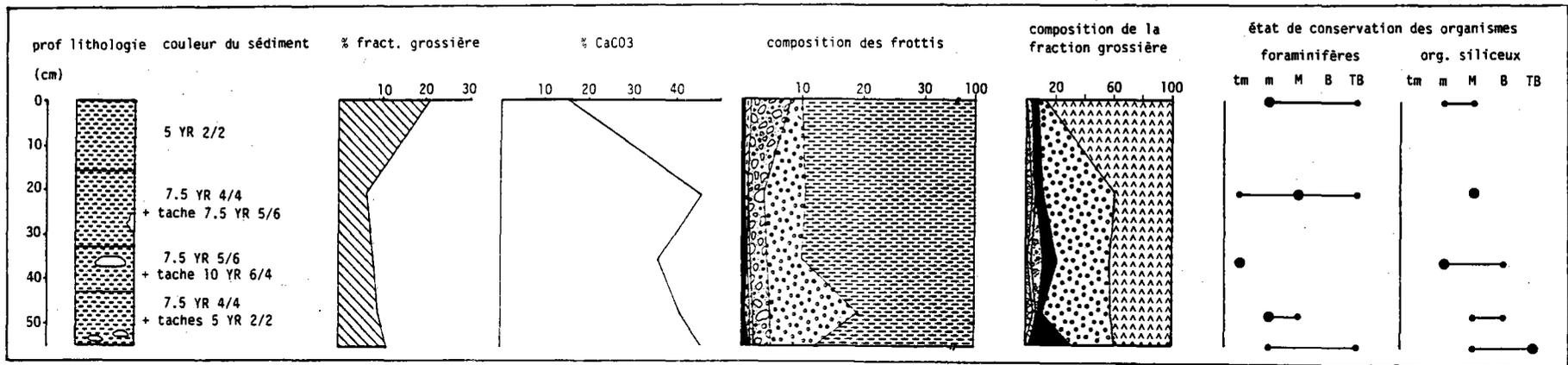


Fig. 45 - La carotte CY KS 1.

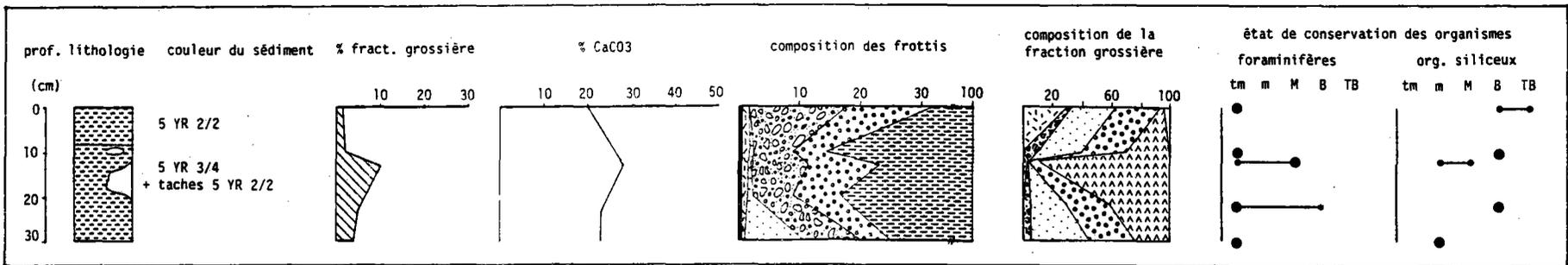


Fig. 46 - La carotte CL KS 1.

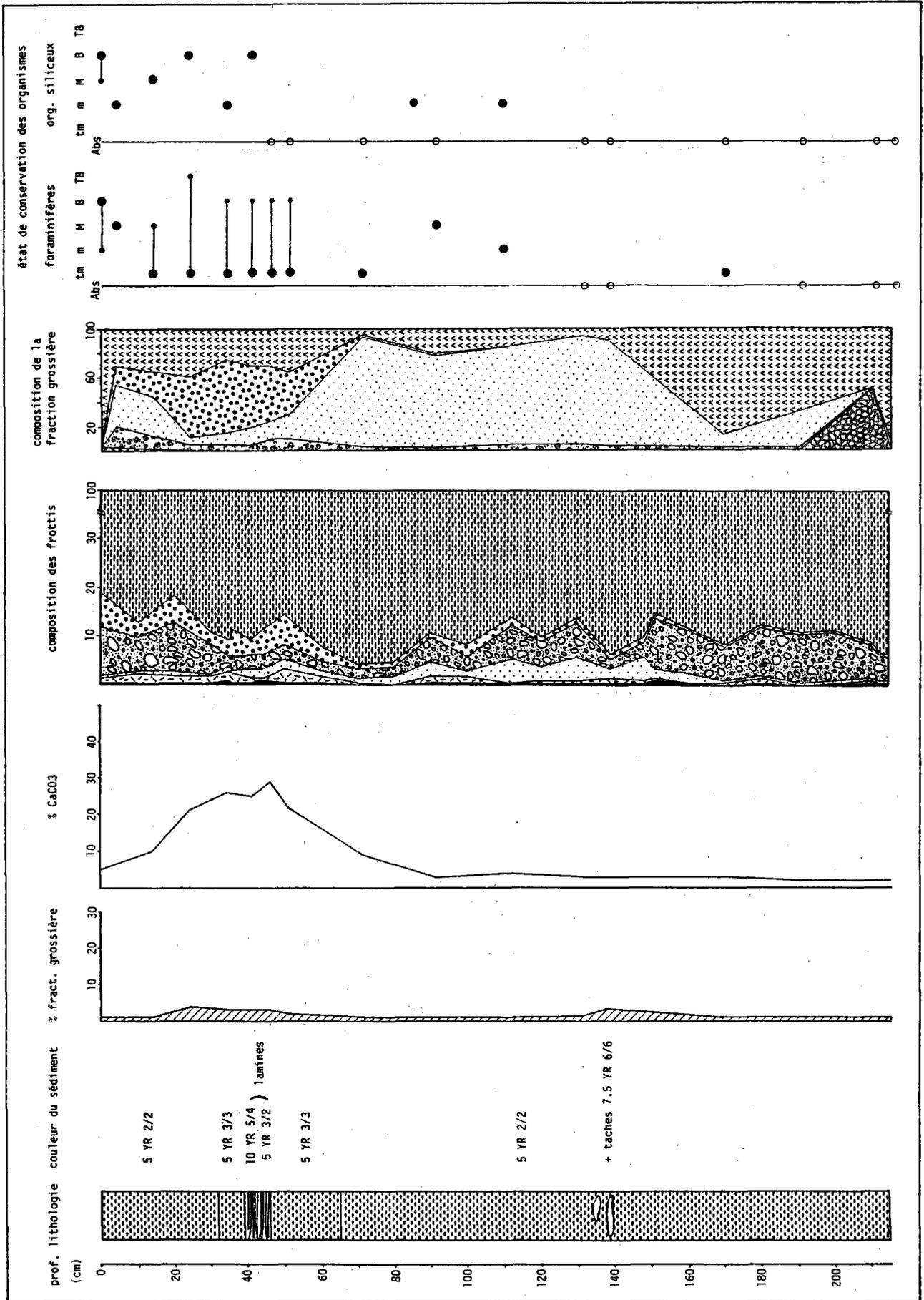


Fig. 47 - La carotte CL KS 2.

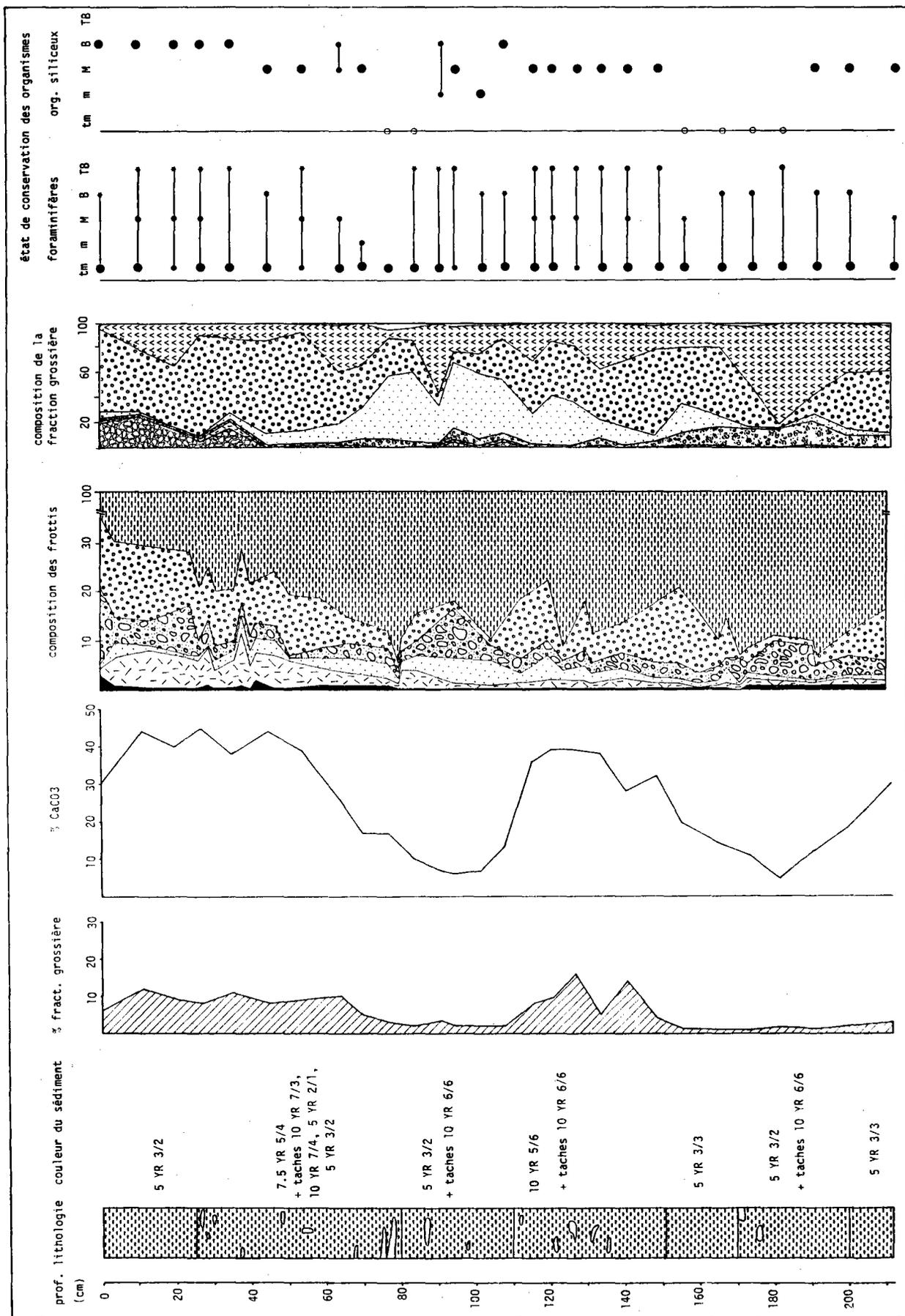


Fig. 48 - La carotte CL KS 3.

## 1 - COULEUR ET TEXTURE DES SEDIMENTS : LES DIFFERENTES UNITES LITHOLOGIQUES

Les unités lithologiques sont définies par les variations de couleur le long des carottes. Le passage d'une unité à l'autre se fait en général progressivement. Des traces de bioturbation sont souvent notées sous la forme de taches centimétriques à pluricentimétriques de couleur plus claire ou plus foncée que le sédiment qui les entoure. Ces traces sont particulièrement abondantes le long de la carotte CL KS 3.

Les textures observées sont fines à légèrement granuleuses dans les niveaux où les foraminifères sont concentrés.

## 2 - LES TENEURS EN CaCO<sub>3</sub>

Les variations des teneurs en CaCO<sub>3</sub> ne sont pas les mêmes au sein des 3 carottes :

- elles sont comprises entre 20 et 30 % dans CL KS 1,
- CL KS 2 présente un maximum (10 à 30 %) entre 15 et 75 cm puis les valeurs sont faibles (< 5 %) et uniformes jusqu'à la base de la carotte,
- CL KS 3, en revanche, montre des variations cycliques dont les valeurs les plus élevées atteignent 45 %. Cette distribution cyclique est tout à fait compatible avec les variations de CaCO<sub>3</sub> dans les sédiments de surface en fonction de l'éloignement à l'axe de la dorsale (cf fig. 54, paragraphe VIII). Le déplacement progressif des sédiments par rapport à l'axe, entraînant des conditions différentes d'accumulation des carbonates, selon l'influence plus ou moins directe de l'hydrothermalisme et des courants de fond.

## 3 - OBSERVATION DES SEDIMENTS EN FROTTIS ET OBSERVATION DES FRACTIONS GROSSIERES

L'observation des sédiments en frottis permet de conclure qu'il s'agit de vases d'argiles dont les caractéristiques principales sont :

- une proportion légèrement croissante d'agrégats bruns en profondeur attestant la formation de ces sédiments dans une zone plus proche de l'axe ;

- la présence quasi continue, mais discrète, de verre volcanique (2 % au maximum) n'impliquant pas nécessairement une position éloignée par rapport à l'axe, mais peut-être une période de calme volcanique relatif, au moment du dépôt de ces vases, tandis que l'hydrothermalisme était quand même actif.

- une dissolution très forte des organismes calcaires et siliceux ;

- des cendres volcaniques particulièrement abondantes (jusqu'à 91 % de la fraction grossière) dans CL KS 2, entre 50 et 170 cm. Ce niveau correspond vraisemblablement au même épisode volcanique continental majeur, enregistré dans CL KS 3 dans le même intervalle. Des concentrations plus faibles de cendres sont également observées dans les trois carottes. Celles-ci ne peuvent ni être individualisées, ni corrélées entre elles.

#### 4 - ETUDE DU SEDIMENT TOTAL AUX RAYONS X

L'observation des diagrammes de rayons X obtenus à partir du sédiment total, ne montre pas d'évolution de leur état de cristallisation par rapport aux sédiments de surface.

#### 5 - ETUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE

##### a) Etude de la fraction argileuse aux rayons X

Les diagrammes de rayons X obtenus à partir de la fraction argileuse ne montrent pas en profondeur, d'évolution vers une meilleure cristallinité de ces phases.

Ceci permet de dire que la fraction argileuse n'est pas affectée ou seulement dans une proportion infime, imperceptible aux rayons X, par des recristallisations secondaires indiquant un début de diagénèse.

##### b) Etude de la fraction argileuse au microscope électronique à transmission

Les argiles qui ont été observées dans les sédiments de la zone "axiale" sont également présentes ici :

- smectites de grande taille (de l'ordre du micron) en "voiles froissés",

- illite-chlorite dont les bordures sont souvent frangées de smectites en fibres, néoformées (cf planche VI, photo 3),

- kaolinite de petite taille (0,1 à 0,5  $\mu\text{m}$ )...

Un fait nouveau, est la mise en évidence d'argiles constituées de fibres disposées à 60° ou 120° les unes par rapport aux autres et qui semblent correspondre aux smectites lattées et aux smectites mixtes décrites par Hoffert (1980) dans des sédiments situés sur le flanc ouest de la dorsale fossile des Galapagos, et par Holtzappfel (1983) dans des sédiments de l'Atlantique (cf planche VI, photo 4). Ces smectites sont dites "mixtes", lorsqu'elles croissent autour d'une particule de smectite "en voile" bien visible, tandis que ce support a disparu pour les smectites lattées. Holtzappfel (1983), après l'observation de tous les stades intermédiaires, considère que les secondes dérivent de la déstabilisation des smectites en "voiles" qui finissent par disparaître complètement. L'observation de ce phénomène dans les carottes du flanc ouest, traduirait donc un début de transformation par rapport aux sédiments plus récents situés plus près de l'axe.

## 6 - CONCLUSION A L'ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE DES CAROTTES DU FLANC OUEST

Dans les deux premiers mètres de la colonne sédimentaire, les variations par rapport aux sédiments de surface sont infimes :

- on observe une légère tendance à l'augmentation avec la profondeur de la proportion des agrégats bruns, et donc des produits amorphes, pouvant traduire un dépôt plus près de l'axe,

- la fraction argileuse est caractérisée par des modifications récentes et infimes au niveau des smectites en "voiles" qui évoluent en smectites lattées, tandis que les particules détritiques, comme dans la zone "axiale" sont souvent frangées d'argiles néoformées,

- plusieurs épisodes volcaniques continentaux, dont un majeur, ont été enregistrés dans les sédiments des carottes. Ces événements correspondent aux éruptions post-pliocène des volcans d'Amérique Centrale ;

- la présence simultanée d'organismes plus ou moins dissous le long des carottes, met en évidence l'existence de courants de fond qui remanient les sédiments. Ceux-ci sont également observés dans les sédiments de surface.

- des taux de sédimentation moyens ont été calculés à partir des carottes. Les valeurs obtenues sont 0,24 et 0,17 cm/10<sup>3</sup> ans respectivement pour CL KS 2 et CL KS 3. Le taux est plus élevé dans la zone "axiale" : 0,7 cm/10<sup>3</sup> ans pour CY KS 1. Cependant, il s'agit de taux de sédimentation minimum, car on ne connaît pas l'épaisseur exacte des sédiments déposés sur le plancher océanique à ces endroits, et les datations par les organismes ne sont pas assez précises.

### C - LA GEOCHIMIE DES SEDIMENTS DANS LES CAROTTES

#### 1 - DANS LA ZONE "AXIALE" : LA CAROTTE CY KS 1

La diminution du pourcentage d'oxyhydroxydes en profondeur est perceptible à travers les teneurs en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> qui baissent au moins de moitié dans les 20 premiers cm (respectivement 20 à 10 % et 3,4 à 0,8 %) (cf fig. 49). Les variations de ces deux éléments sont

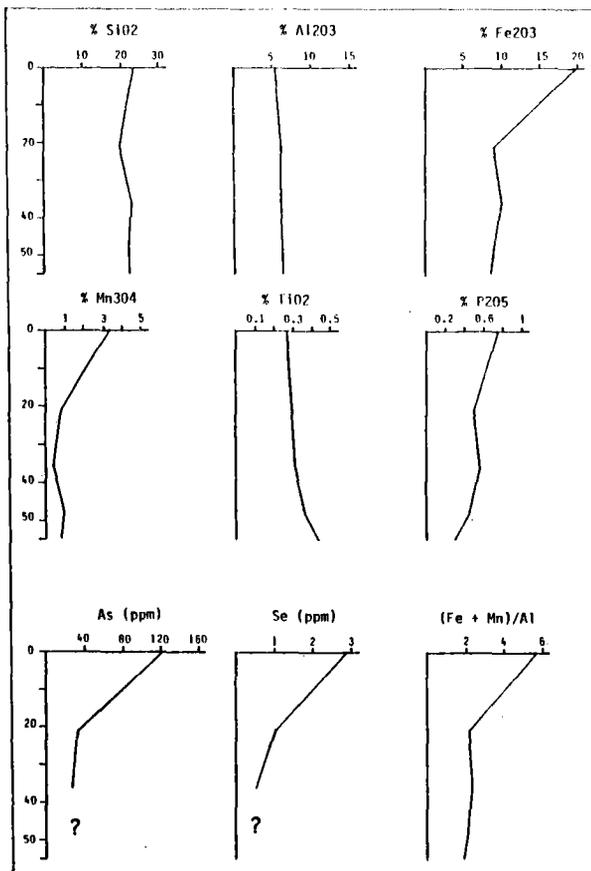


Fig. 49 - Variations des teneurs des principaux éléments chimiques le long de la carotte CY KS 1.

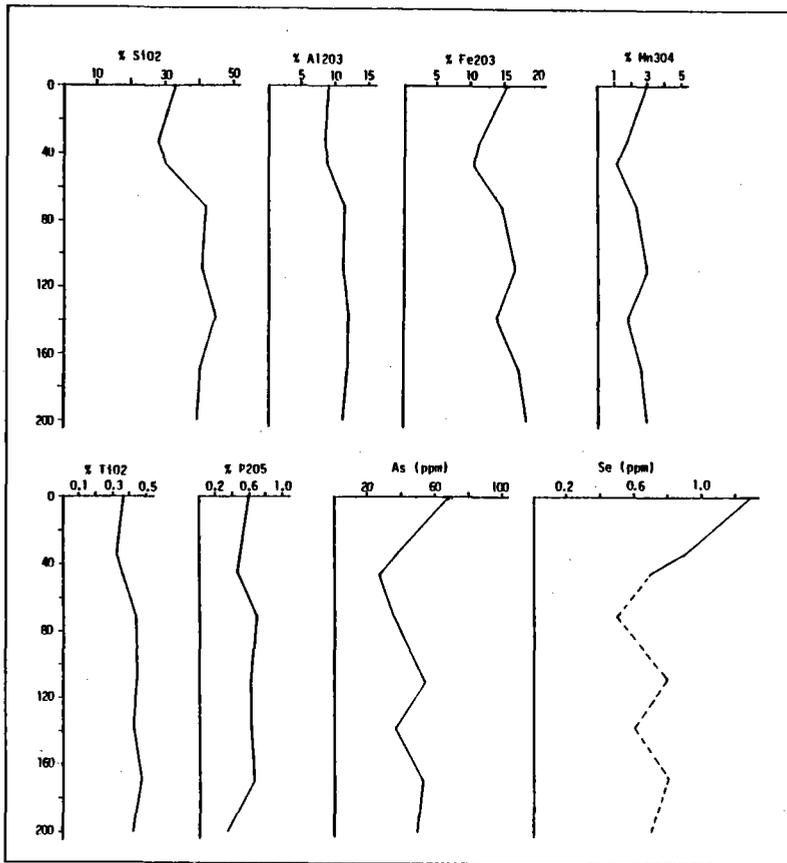


Fig. 50 - Variations des teneurs des principaux éléments chimiques le long de la carotte CL KS 2.

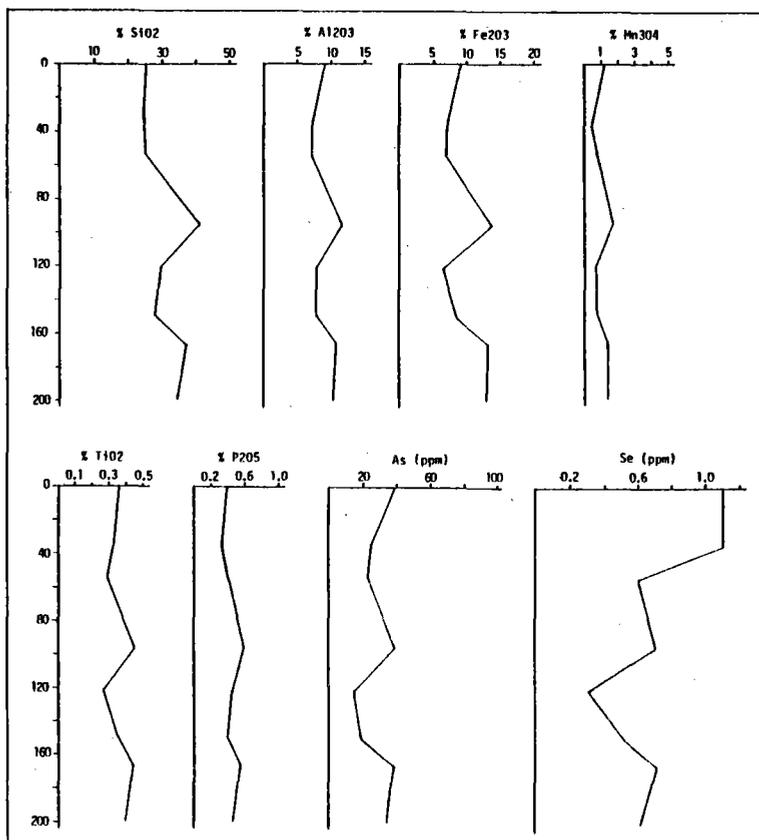


Fig. 51 - Variations des teneurs des principaux éléments chimiques le long de la carotte CL KS 3.

accompagnées de celles de  $P_2O_5$ , As et Se qui évoluent dans le même sens.

A l'opposé,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$  montrent une tendance à l'augmentation en profondeur, traduisant un plus faible pourcentage de matériel amorphe et une concentration de verre volcanique, en particulier en bas de la carotte.

On observe donc que les corrélations entre les éléments chimiques qui ont été établies dans les sédiments de surface, restent variables ici.

Le rapport  $(Fe + Mn)/Al$  (cf fig. 49) qui traduit l'apport hydrothermal, montre que celui-ci diminue en profondeur. Les apports terrigène et basaltique deviennent corrélativement plus importants comme en témoigne le diagramme  $Fe/Ti = f(Al/Al + Fe + Mn)$  de la fig. 53.

## 2 - SUR LE FLANC OUEST : LES CAROTTES CL KS 2 et CL KS 3

Les interprétations des variations chimiques le long des carottes CL KS 2 et CL KS 3 doivent prendre en compte la présence locale des cendres volcaniques acides, d'origine continentale qui modifient quelque peu la composition chimique des sédiments (cf fig. 50 et 51).

Ainsi  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$  ne sont pas anticorrélés avec  $Fe_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$ ,  $P_2O_5$  et As comme dans les sédiments de surface et de la carotte CY KS 1.

- $Fe_2O_3$  et  $Mn_3O_4$  ont une légère tendance à augmenter vers la base de la carotte, corrélativement aux oxyhydroxydes. Cependant, cette évolution n'est pas régulière. Des valeurs élevées sont observées vers 1 m de profondeur dans chaque carotte. Elles correspondent à des niveaux de concentrations d'oxyhydroxydes.
- $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$  présentent des enrichissements correspondant aux niveaux de cendres.
- Se montre une tendance nette à la diminution avec la profondeur. Il semble donc que cet élément soit mobile dans les sédiments.

Le rapport  $(Fe + Mn)/Al$  (cf fig. 52)

Il est équivalent en surface et à la base des carottes CL KS 2 et CL KS 3. Sa valeur est comprise entre 1,7 et 2,7 dans CL KS 2 et entre 1,2 et 1,9 dans CL KS 3. Elles sont donc faibles et traduisent une influence hydrothermale moins importante qu'à l'axe de la dorsale.

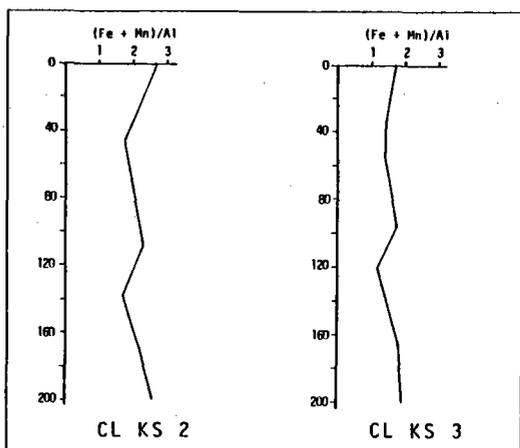


Fig. 52 - Variations du rapport (Fe+Mn)/Al dans CL KS 2 et CL KS 3.

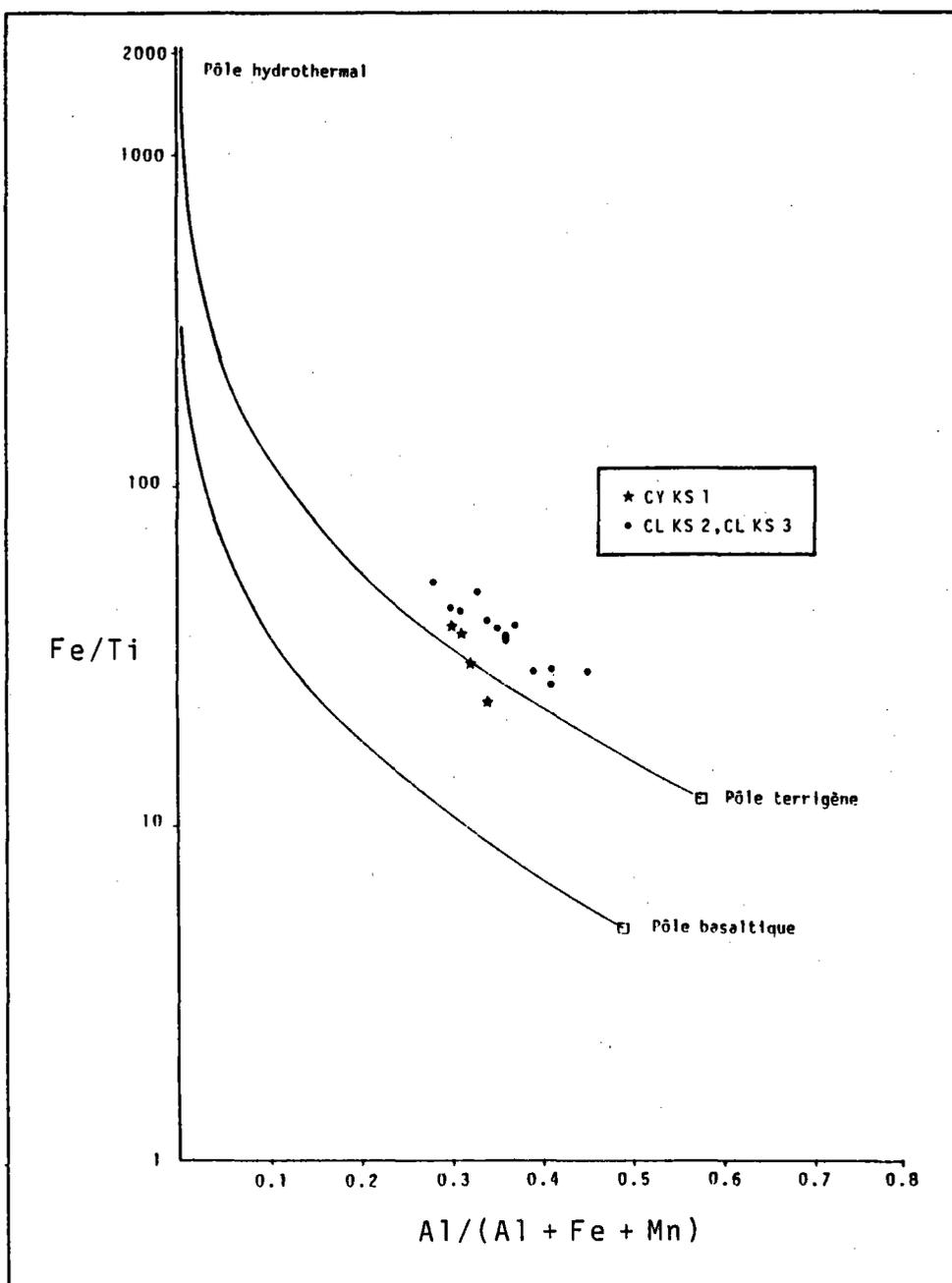


Fig. 53 - Influence des trois pôles basaltique, terrigène et hydrothermal dans les carottes CY KS 1, CL KS 2 et CL KS 3.

Variation de Fe/Ti en fonction de Al/(Al + Fe + Mn)

Ce diagramme (cf fig. 53) situe les sédiments des deux carottes entre les pôles terrigène et hydrothermal. L'influence basaltique est faible.

3 - CONCLUSION

- Des variations importantes de composition chimique et en particulier des teneurs en  $Fe_2O_3$  et  $Mn_3O_4$ , peuvent être observées sur une épaisseur faible de sédiments. La carotte CY KS 1 présente en effet, dans les vingt premiers centimètres à partir de la surface, une diminution d'au moins la moitié de leur valeur pour le fer et le manganèse. Les carottes CL KS 2 et CL KS 3 sur le flanc ouest de la dorsale, montrent également des fluctuations en ces éléments dont les amplitudes sont cependant moins grandes.

Cette distribution reflète vraisemblablement la combinaison de plusieurs phénomènes, c'est-à-dire une occurrence plus ou moins proche de sources hydrothermales actives et des courants de fond d'orientations plus ou moins favorables à la concentration dans les sédiments du matériel émis par les sources.

Ainsi, les vingt premiers centimètres de sédiments de la carotte CY KS 1 se seraient formés dans un endroit proche de sources hydrothermales actives dont les produits se seraient accumulés à cet endroit. Les sédiments sous-jacents correspondraient au contraire soit à un hydrothermalisme local moins important, soit à des courants défavorables entraînant plus loin la majeure partie des produits hydrothermaux.

Dans les carottes CL KS 2 et CL KS 3, l'augmentation sensible des teneurs en fer et en manganèse en profondeur, suggère que le dépôt des sédiments à la base des carottes, s'est effectué à une distance plus proche de l'axe. Cependant, l'évolution irrégulière de ces teneurs tend à montrer que les manifestations hydrothermales ne sont peut-être pas continues dans le temps.

- Les corrélations observées entre les éléments chimiques sont les mêmes qu'en surface, à l'exception du sélénium qui semble migrer

avec l'enfouissement des sédiments. Ce fait n'est pas visible dans les 55 premiers centimètres (carotte CY KS 1) mais commence à se faire sentir au-delà (carottes CL KS 2 et CL KS 3).

### VIII - DISCUSSION ET CONCLUSION SUR LA SEDIMENTATION A 12°50' NORD ET 11°30' NORD SUR LA DORSALE DU PACIFIQUE EST

L'étude de la sédimentation sur cette portion de dorsale montre, à quel point, de nombreux mécanismes interagissent pour aboutir finalement à la formation de ces sédiments métallifères.

A l'échelle de la zone étudiée, malgré l'apparente similitude des dépôts se dégagent plusieurs influences.

#### 1 - TROIS TYPES DE SEDIMENTS METALLIFERES

##### a) Les sédiments liés aux sites hydrothermaux inactifs

Dans notre étude, ce type correspond à l'échantillon CY 82-32. Il est caractérisé par des teneurs très élevées en  $Fe_2O_3$ , As, Cu, Zn et des teneurs très faibles en  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$ , MgO, CaO,  $K_2O$  et  $Na_2O$ . Il est constitué par des produits d'altération des cheminées hydrothermales, sous forme de limonite et de cristaux de sulfures en voie d'altération. L'étude de la fraction argileuse aux rayons X n'a pas permis la mise en évidence d'argiles cristallisées comme dans les autres sédiments.

##### b) Les sédiments "caractéristiques" : les plus répandus sur la zone

Ce sont des sédiments fins (vases d'argiles) constitués principalement par :

- des oxyhydroxydes de fer et de manganèse, des microconcrétions polymétalliques et des traces de goéthite. Ils ne contiennent jamais de sulfures ;

- des organismes calcaires (foraminifères surtout et coccolithes) et siliceux (radiolaires, diatomées, spicules, silicoflagellés) qui présentent des signes importants de dissolution ;

- des argiles détritiques instables dans le milieu, et des argiles néoformées ;

- du verre volcanique plus abondant dans les sédiments situés près de l'axe et à l'Ouest du seamount Clipperton ;

- des cendres volcaniques d'origine continentale présentes à partir de 30 km de l'axe sur le flanc ouest.

Ce deuxième type présente une évolution, de l'axe vers le flanc ouest. Dans le premier cas, il y a prédominance des phases amorphes d'oxyhydroxydes, et dans le second cas, les argiles détritiques deviennent plus abondantes.

c) Le sédiment CY 84-26-1

Sa composition est très particulière, car elle est dominée par les foraminifères (93 % de la surface en frottis) qui sont très fréquemment encroûtés, surtout par des oxydes de manganèse et moins souvent par des oxyhydroxydes de fer (cf planche VI, photos 5 et 6). Il ne contient que 6 % d'argiles en frottis, 1 % de micronodules et des traces de verre volcanique.

Les foraminifères ne montrent aucune trace de dissolution.

Le seamount Clipperton est caractérisé par une altitude élevée (800 m à l'isobathe 2900 m). Son sommet, c'est-à-dire l'endroit où a été prélevé CY 84-26-1, constitue le point le moins profond (2058 m) sur l'ensemble des deux zones A et B. Celui-ci est donc situé au-dessus de la tranche d'eau où les anomalies dues à l'hydrothermalisme sont maximum, c'est-à-dire entre 100 et 200 m au-dessus du fond. D'autre part, aucun édifice hydrothermal actif ou inactif n'a été observé sur ce seamount. Tout ceci tend à montrer une origine hydrogène vraisemblablement dominante pour le manganèse dans cet échantillon, tandis qu'une fraction moins importante de fer et de manganèse pourrait avoir une origine hydrothermale.

2 - UN MODELE POUR LA FORMATION DES SEDIMENTS METALLIFERES

A 12°50' NORD ET 11°30' NORD SUR LA DORSALE DU PACIFIQUE EST (cf fig. 55)

Ce domaine centré à l'axe de la dorsale du Pacifique Est à 12°50' Nord et 11°30' Nord est caractérisé par :

- une activité hydrothermale importante située dans le graben

central, émettant dans l'eau de mer des particules sulfurées, des sulfates, de la silice et des ions en solution ;

- des sites hydrothermaux inactifs en voie d'altération dans le graben central, mais également sur les seamounts Sud-Est (zone A) et à 11°30' Nord (zone B) ;

- un régime de courants dominants orientés vers l'Ouest et entraînant les particules émises par les cheminées hydrothermales ainsi que de l'hélium, du méthane et du manganèse, dont les anomalies maximum sont mesurées entre 100 et 200 m au-dessus du fond.

Dans ce chapitre, de nombreux faits concernant les sédiments ont été mis en évidence :

- Les organismes calcaires, bien que la zone soit située au-dessus de la CCD, montrent des signes de dissolution intense (sauf CY 84-26-1 sur le seamount Clipperton). De plus, cette dissolution n'est pas liée aux teneurs en  $\text{CaCO}_3$  et des spécimens dans des états de conservation différents sont souvent observés dans un même échantillon.

Enfin, la répartition des carbonates est irrégulière dans la zone "axiale", uniforme avec des valeurs faibles sur le flanc ouest jusqu'à 70 km environ, puis les valeurs sont à nouveau fortes au-delà (cf fig. 54).

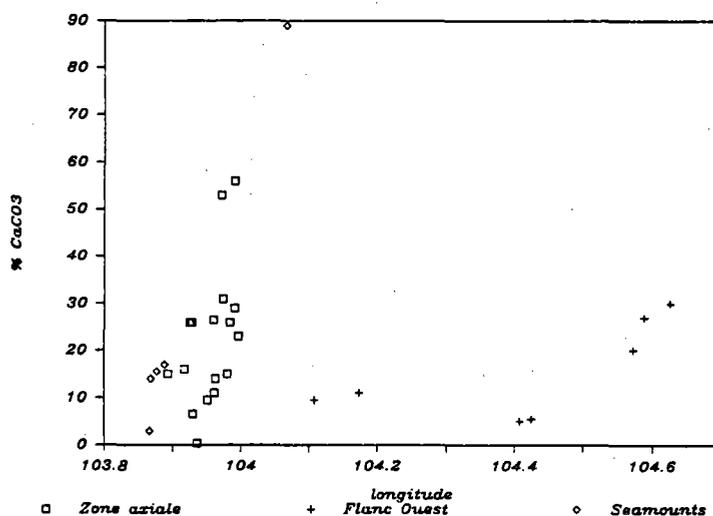


Fig. 54 - Variations du pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  en fonction de la longitude dans les sédiments de surface.

- Un tel schéma nécessite l'intervention de plusieurs phénomènes :

- . Une dissolution des carbonates qui ne peut s'expliquer par la profondeur. Il faut donc envisager l'action d'un facteur local. L'injection dans l'eau de mer des fluides hydrothermaux pourrait engendrer un niveau acide dont le maximum se situe entre 100 et 200 m au-dessus du fond comme le montrent les anomalies en  $^3\text{He}$ ,  $\text{CH}_4$  et Mn. Cette tranche d'eau corrosive provoquerait la dissolution des carbonates lorsque ceux-ci la traversent.
- . Une redistribution des carbonates par les courants de fond après leur dépôt, permettant ainsi d'expliquer la coexistence d'organismes dont les états de conservation sont différents.
- . Les fortes amplitudes dans les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  de la zone "axiale" comparées aux valeurs relativement homogènes et faibles sur le flanc ouest peuvent résulter du fait que les sédiments de la zone "axiale" sont proches des sources hydrothermales ponctuelles dans le graben. A ce niveau, l'éloignement des sédiments ne doit pas être suffisant pour que cette répartition ponctuelle ne se fasse plus sentir. En revanche, sur le flanc ouest, il doit y avoir un mélange de fluides provenant de plusieurs sites, se traduisant par une homogénéisation de l'action corrosive sur les carbonates.

- La concentration de foraminifères en excellent état de conservation dans l'échantillon CY 84-26-1 peut ainsi s'expliquer par sa position surélevée par rapport au niveau maximum des anomalies créées par les sources hydrothermales. Le seamount Clipperton a, en effet, 800 mètres d'altitude par rapport au plancher océanique à l'isobathe 2900 m.

- Les sédiments sont essentiellement constitués par des oxyhydroxydes amorphes de fer et manganèse. Les sulfures ne sont jamais observés dans les sédiments, en dehors des sites hydrothermaux inactifs. Ceci tend à prouver que ces derniers n'atteignent jamais les sédiments et que les produits hydrothermaux sont déjà oxydés quand ils se déposent. Ce processus implique donc une influence hydrothermale indirecte par un séjour dans l'eau de mer des particules qui peuvent à ce moment là, adsorber des éléments (Na, K, Rb, Ba, Li, As ?).

- Les micronodules qui se forment dans ces sédiments ont un rapport Fe/Mn > 1 contrairement aux autres micronodules du Pacifique. Ils indiquent que la source du fer est proche par une précipitation rapide (ils emprisonnent, en effet, souvent un peu de sédiment).

- La fraction argileuse est constituée d'argiles détritiques pour la plupart (illite, chlorite, smectite) et authigènes (smectites et vraisemblablement kaolinite).

L'influence détritique est plus sensible vers l'Ouest de la zone étudiée où les oxyhydroxydes sont moins abondants.

Les sédiments sont le siège de transformations et de néoformations d'argiles :

- . néoformations de smectites à partir de la dissolution des diatomées,
- . formation de kaolinite d'origine hydrothermale,
- . néoformations de smectites par l'altération du verre volcanique,
- . néoformations de smectites lattées sur les bordures des particules d'illite-chlorite,
- . amorce de transformation des smectites "en voiles" détritiques en smectites lattées.

- Des cendres volcaniques provenant d'Amérique Centrale, qui permettent, par leur répartition dans les sédiments de 13° Nord, de considérer que l'influence hydrothermale sur le flanc ouest est maximum entre 0 et 30 km de l'axe environ.

- La répartition des sédiments dans le graben central est liée à l'activité hydrothermale (pas de sédiments sur les sites actifs à cause de l'existence de courants de convection), aux épisodes volcaniques avec coulées de laves qui peuvent recouvrir la fine pellicule de sédiments existants, à l'activité tectonique et aux courants de fond. Ainsi, la partie nord du graben est moins sédimentée que la partie sud.

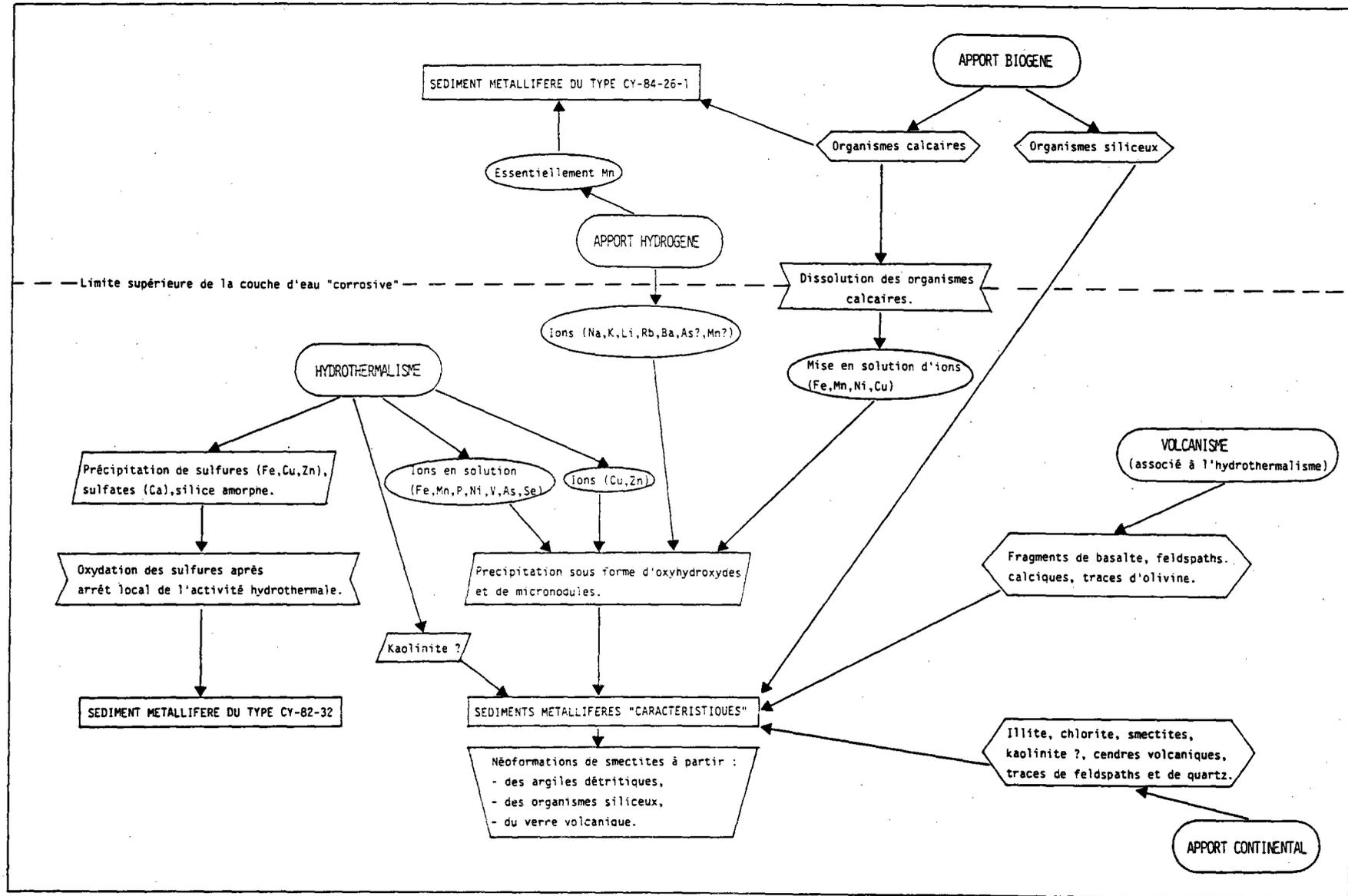


Fig. 55 - Les processus de sédimentation à l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord.

### CONCLUSION ET DEFINITION DES SEDIMENTS METALLIFERES TYPES

Le type le plus répandu de sédiments métallifères à 12°50' Nord et 11°30' Nord est caractérisé par :

- une couleur brune plus ou moins sombre,
- une texture fine à légèrement granuleuse et meuble permettant de les classer parmi les vases d'argiles,
- la présence variable mais moyenne d'organismes calcaires (3 à 56 %  $\text{CaCO}_3$ ) et d'organismes siliceux,
- une richesse en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (9 à 22 %) et  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  (0,5 à 4,5 %) sous forme essentiellement d'oxyhydroxydes amorphes et de microconcrétions, et jamais sous forme de sulfures,
- un appauvrissement en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (4 à 14 %) par rapport aux argiles pélagiques moyennes du Pacifique et en revanche, un léger enrichissement en cet élément par rapport aux autres sédiments métallifères décrits à l'axe de la dorsale dans le Pacifique Sud (cf tableau II, chapitre I), traduisant un apport détritique plus important.

La genèse de ce premier type de sédiments est le résultat d'une combinaison de plusieurs facteurs (cf fig. 55) : un apport hydrothermal dominant entraînant la précipitation d'oxyhydroxydes métalliques, qui du fait de leur séjour dans l'eau de mer y adsorbent des ions (apport hydrogène), puis se déposent sur le fond en même temps que les organismes calcaires, déjà partiellement dissous après leur passage dans la couche corrosive (formée par le mélange des fluides acides dans la colonne d'eau) et en même temps que les organismes siliceux (apport biogène). Cette genèse est complétée par des apports terrigènes (argiles détritiques, quartz, feldspath, cendres volcaniques) et volcaniques. Des transformations diagénétiques précoces sont amorcées rapidement qui se traduisent par l'instabilité des argiles détritiques et du verre volcanique donnant naissance à des néoformations d'argiles.

Le deuxième type est limité aux édifices hydrothermaux inactifs (dans le graben central ou sur les seamounts). Il est caractérisé par :

- une couleur rouille,
- une texture fine et meuble,

- une absence quasi totale d'organismes calcaires et siliceux,
- une grande richesse en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (44 %) sous forme de limonite, en Cu et Zn (respectivement 2915 et 25000 ppm) sous forme de sulfures,
- des teneurs très faibles en  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  (0,07 %) et  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,7 %).

La genèse de ce type de sédiments est une altération directe à partir de l'oxydation des édifices hydrothermaux. Ils constituent donc les sédiments qui ont la plus forte influence hydrothermale (cf fig. 55).

Enfin, la troisième type observé est caractérisé par :

- une texture grossière,
- un faible pourcentage d'argiles (6 % en frottis),
- une richesse particulière en foraminifères (93 % en frottis),
- une plus grande richesse en  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  (25,2 % à  $\text{CaCO}_3 = 0$ ) qu'en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (13,1 % à  $\text{CaCO}_3 = 0$ ).

Par sa position surélevée (2058 m) par rapport aux autres sédiments, sa genèse est vraisemblablement dominée par un apport hydrogène et biogène.

# CHAPITRE III

LES SEDIMENTS METALLIFERES DU PACIFIQUE FORES PAR  
LE GLOMAR CHALLENGER A LA BASE DE LA COLONNE  
SEDIMENTAIRE

CHAPITRE III  
LES SEDIMENTS METALLIFERES DU PACIFIQUE  
FORES PAR LE GLOMAR CHALLENGER  
A LA BASE DE LA COLONNE SEDIMENTAIRE

INTRODUCTION

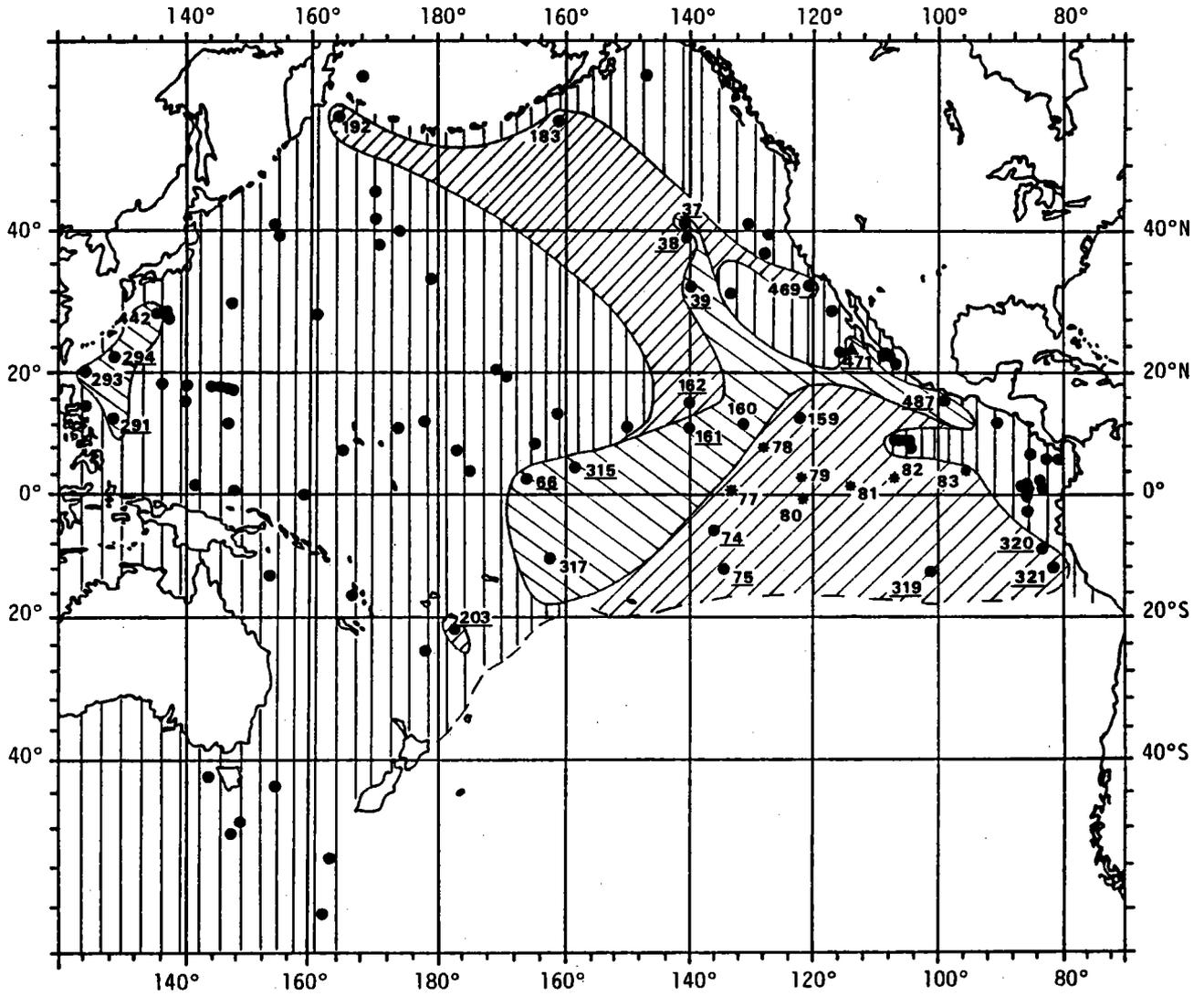
L'existence de sédiments métallifères à l'axe des dorsales, amène tout naturellement à considérer une migration de ceux-ci par accréation océanique après leur dépôt.

En effet, durant les nombreux legs effectués par le Glomar Challenger, des sédiments métallifères ont été forés juste au-dessus du plancher océanique dans divers océans, et en particulier dans le Pacifique (von der Borch et Rex, 1970 ; von der Borch *et al.*, 1971 ; Cronan, 1973 ; Anderson *et al.*, 1976 ; Leinen, 1981 ; Leggett, 1982...).

Nous allons comparer ces sédiments entre eux, et avec ceux que nous venons d'étudier à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, afin de voir si ils sont identiques, et si ils ont subi une diagenèse.

I - REPARTITION DANS LE PACIFIQUE DES SEDIMENTS METALLIFERES FORES PAR  
LE GLOMAR CHALLENGER AU-DESSUS DU PLANCHER OCEANIQUE

Une carte de la répartition des sédiments métallifères de base dans le Pacifique a pu être établie à partir de la compilation des données rassemblées dans les "Initial Reports of the Deep-Sea Drilling Project" (cf fig. 56) et par une interrogation de la banque de données



NATURE DES PREMIERS SEDIMENTS

AU DESSUS DU PLANCHER OCEANIQUE.

-  Sédiments métallifères renfermant moins de 50% de CaCO<sub>3</sub>
-  Sédiments métallifères renfermant plus de 50% de CaCO<sub>3</sub>
-  Sédiments non métallifères

NATURE DU PLANCHER OCEANIQUE

SUR LEQUEL REPOSENT LES SEDIMENTS.

- Basalte
- ★ Basalte intrusif (sill)
- ▲ Diabase altérée

**162** Echantillons étudiés dans ce chapitre

Fig. 56 - Répartition dans le Pacifique des sédiments métallifères forés au contact du plancher océanique par le Glomar Challenger et localisation des échantillons étudiés.

IPOD au Bureau National des Données Océaniques à l'IFREMER, Centre de Brest.

Sur cette carte, ont été distingués 3 types de sédiments forés juste au-dessus du plancher océanique.

- Les niveaux sédimentaires de base enrichis en oxydes de Fe et Mn et contenant moins de 50 % de CaCO<sub>3</sub>,

- Les niveaux enrichis en oxydes de Fe et Mn, contenant plus de 50 % de CaCO<sub>3</sub>,

- Les niveaux qui ne montrent aucun enrichissement.

Les deux premières subdivisions ont été choisies car la présence de CaCO<sub>3</sub> en pourcentage important entraîne une dilution des oxyhydroxydes de Fe et Mn et de ce fait, un caractère métallifère apparent moins fort.

L'origine de ces sédiments est activement discutée par de nombreux auteurs. Dans la majorité des cas, ils sont considérés comme les équivalents anciens des sédiments métallifères qui se forment actuellement à l'axe des dorsales comme celle du Pacifique Est (von der Borch et Rex, 1970 ; von der Borch *et al.*, 1971 ; Cronan, 1973...).

Cependant, la position de certains sites et la composition des sédiments métallifères associés, amène parfois les auteurs à envisager un autre mode de formation. Natland (1973) considère que les sédiments métallifères du Site 183 sont du type de ceux que l'on rencontre en Mer Rouge (niveaux à goethite et niveaux aragonitiques à pyrite). Il fait donc appel à une formation de ceux-ci dans un milieu salé et chaud. Au Site 192, il fait intervenir une mise en place diagénétique des oxydes de fer par altération du basalte alcalin qui constitue le plancher océanique. Jenkins et Hardy (1976) comparent les sédiments riches en fer et titane du Site 315 A à ceux du Site 192. Dans ce cas, les manifestations hydrothermales, si elles ont existé, n'auraient joué qu'un rôle négligeable. En revanche, les teneurs élevées en titane qui caractérisent à la fois le basalte et les sédiments sus-jacents traduiraient un lien entre les deux. Ces auteurs semblent donc considérer que les sédiments métallifères de ces deux sites se sont formés par altération des basaltes sur lesquels ils reposent.

| Echantillon |       |         |         |                 | Latitude    | Longitude    | Position de l'échantillon dans la colonne sédimentaire (m) | Epaisseur du niveau (m)  | Age de la base   |
|-------------|-------|---------|---------|-----------------|-------------|--------------|--|--|--|
| Leg         | Site  | carotte | section | intervalle (cm) |             |              |  |  |  |
| 5           | 37    | 4       | 5       | 142-145         | 40°58.74' N | 140°43.11' W | 29,5   | 10   | Oligocène inf. ? (32 Ma)<br>Eocène inf. ? (56 Ma)<br>Eocène inf. |
|             | 38    | 6       | 6       | 138-141         | 38°42.12' N | 140°21.27' W | 48   | 9  |  |
|             | 39    | 2       | 6       | 143-146         | 32°48.28' N | 139°34.29' W | 17   | 17   |  |
| 16          | 161 A | 14      | cc      | -               | 10°14.25' N | 139°57.21' W | 244  | 44   | Eocène moyen et sup.<br>Base Eocène moyen                        |
|             | 162   | 17      | 4       | 147-150         | 14°52.19' N | 140°02.61' W | 150  | 6  |  |
| 7           | 66.0  | 9       | 3       | 118-121         | 2°23.63' N  | 166°07.28' W | 192  | 3 niveaux de :<br>0,45 ; 0,33 et 0,18  | Turonien ou<br>Cénomanién à 190 m                                |
| 33          | 315 A | 30      | 2       | 127-130         | 4°10.26' N  | 158°31.54' W | 995  | 85 m d'une alternance<br>claystone bleu-vert,<br>rouge-brique et<br>sable volcanique | Santonien  |
| 8           | 74    | 12      | 3       | 27-30           | 6°14.20' S  | 136°05.80' W | 100  | 2  | Eocène moyen<br>Oligocène inf.                                   |
|             | 75    | 9       | 6       | 95-98           | 12°31.0' S  | 134°16.0' W  | 81,5   | 8 m d'une alternance<br>de boues à nannofos-<br>siles et à oxydes de<br>Fe-Mn        |  |
| 34          | 319   | 12      | 3       | 80-83           | 13°01.04' S | 101°31.46' W | 109  | 34   | Miocène inf.   |
|             | 320 B | 2       | 5       | 144-147         | 9°00.40' S  | 83°31.80' W  | 155  | 19   | Oligocène-Miocène  |
|             | 321   | 13      | 3       | 125-128         | 12°01.29' S | 81°54.24' W  | 124  | 66   | Eocène sup.-Miocène inf.   |
| 63          | 471   | 79      | 1       | 87-90           | 23°28.93' S | 112°29.78' W | 740  | 0,02   | Miocène moyen  |
| 66          | 487   | 19      | 5       | 60-63           | 15°51.21' N | 99°10.52' W  | 170  | 65,5   | Miocène sup.   |
| 21          | 203   | 5       | 1       | 145-148         | 22°09.22' S | 177°32.77' W | 409  | 0,50   | Pliocène   |
| 31          | 291 A | 2       | cc      | -               | 12°48.45' N | 127°49.98' E | 114  | 16,5 (?)   | Eocène   |
|             | 294   | 6       | cc      | -               | 22°34.74' N | 131°23.13' E | 112  | 14,5   | Eocène ?   |

Tableau XXII - Caractéristiques générales des sédiments étudiés.

## II - ETUDE DE QUELQUES SEDIMENTS METALLIFERES DE BASE DANS LE PACIFIQUE

17 échantillons de sédiments présentant des enrichissements en oxydes de fer et manganèse ont été choisis en fonction des différents types d'environnements dans lesquels on les trouve (cf fig. 56 et tableau XXII) afin de comparer un plus grand nombre de sédiments localisés dans des contextes différents. Ces échantillons ont pu être obtenus grâce au programme international ODP (Ocean Drilling Program).

On a ainsi retenu, en fonction de leur position actuelle, les Sites :

- 37, 38, 39, 161 A et 162 représentant une coupe Nord-Sud à 140° Ouest, dans le Pacifique central,
- 66.0 et 315 A, respectivement à l'Ouest et à l'Est des îles de la Ligne,
- 74 et 75, au Nord-Est des îles Marquises et au Sud-Est de celles-ci (bassin de Tiki),
- 319, dans la dépression de Bauer, à l'Est de la dorsale du Pacifique Est et à l'Ouest de la dorsale fossile des Galapagos,
- 320 B, 321, 471 et 487, répartis près du continent américain, au large de la fosse du Pérou, de la Péninsule californienne et de la fosse d'Amérique centrale,
- 203, 291 A et 294 dans les arcs insulaires des Tonga (bassin de Lau) et Philippines-Japon (bassin Ouest Philippines).

### A - ETUDE SEDIMENTOLOGIQUE

#### 1 - COULEUR DES SEDIMENTS HUMIDES (cf tableau XXIII)

La couleur des sédiments humides varie du marron très foncé, presque noir au gris beige clair.

Elle est, en général, homogène. Néanmoins, 3 échantillons (162, 66.0 et 74) sont marron foncé avec des taches de sédiment plus clair.

| Echantillon |       |         |         |                    | Couleur                | % fraction<br>grossière<br>(> 63 µm) | Texture                                 |
|-------------|-------|---------|---------|--------------------|------------------------|--------------------------------------|---|
| Leg         | Site  | Carotte | Section | Intervalle<br>(cm) |                        |                                      |   |
| 5           | 37    | 4       | 5       | 142-145            | 10 YR 3/3              | 10                                   | fine                                    |
|             | 38    | 6       | 6       | 138-141            | 10 YR 3/3              | 0,3                                  | fine                                    |
|             | 39    | 2       | 6       | 143-146            | 10 YR 2/1              | 15,5                                 | fine                                    |
| 16          | 161 A | 14      | cc      | -                  | 10 YR 6/4              | 7                                    | fine, poudreuse                         |
|             | 162   | 17      | 4       | 147-150            | 10 YR 2/1 + 10 YR 5/3  | 3                                    | fine à légèrement granuleuse            |
| 7           | 66.0  | 9       | 3       | 118-121            | 5 YR 2/1 (+ 10 YR 8/4) | 3                                    | finement grenue                         |
| 33          | 315 A | 30      | 2       | 127-130            | 10 YR 4/6              | ~ 0                                  | fine, sédiment induré                   |
| 8           | 74    | 12      | 3       | 27-30              | 10 YR 3/2(+10 YR 8/6)  | 0,5                                  | fine à légèrement granuleuse            |
|             | 75    | 9       | 6       | 95-98              | 10 YR 5/3              | 1,5                                  | fine à légèrement granuleuse, poudreuse |
| 34          | 319   | 12      | 3       | 80-83              | 10 YR 6/4              | 3                                    | fine à légèrement granuleuse            |
|             | 320 B | 2       | 5       | 144-147            | 10 YR 7/2              | 5                                    | finement grenue                         |
|             | 321   | 13      | 3       | 125-128            | 10 YR 4/2              | 3                                    | finement grenue                         |
| 63          | 471   | 79      | 1       | 87-90              | 5 YR 6/1               | 18                                   | poudreuse et granuleuse                 |
| 66          | 487   | 19      | 5       | 60-63              | 5 YR 2/2               | 7                                    | fine                                    |
| 21          | 203   | 5       | 1       | 145-148            | 10 YR 7/3              | 29                                   | finement grenue                         |
| 31          | 291 A | 2       | cc      | -                  | 10 YR 2/1              | 0,5                                  | fine                                    |
|             | 294   | 6       | cc      | -                  | 5 YR 2/1               | 8                                    | granuleuse                              |

Tableau XXIII : Couleur, pourcentage de fraction grossière et texture des sédiments.

## 2 - TEXTURE DES SEDIMENTS (cf tableau XXIII)

Leur texture est fine à légèrement granuleuse, et parfois grenue.

Un seul échantillon est induré : 315 A. Celui-ci présente une texture et un litage très fins. Les autres sédiments sont meubles et parfois poudreux.

## 3 - ETUDE DU SEDIMENT TOTAL EN FROTTIS ET DETERMINATION DES FACIES SEDIMENTAIRES (cf tableau XXIV)

### a) Les constituants des sédiments

#### α - La fraction biogène

- Les foraminifères : ils sont peu abondants (0 à 5 %) sauf au Site 203 où ils représentent 20 % de la surface en frottis.

- Les nannofossiles : ils occupent une place plus grande dans la composition de ces sédiments par rapport à ceux étudiés dans le chapitre précédent, à l'axe de la dorsale. Ils sont représentés par des coccolithes dont de nombreux discoasters, caractéristiques des sédiments d'âge tertiaire. Leur proportion varie de 0 à 50 %.

- Les radiolaires : ils sont absents dans la majorité des cas. Seul le Site 161 A en renferme 50 %.

- Les diatomées : elles n'ont jamais été observées.

- Les spicules siliceux sont rares.

- Les ichtyolithes (dents, écailles et débris de squelettes de poissons) : ils sont rares également.

La fraction biogène est donc dominée par les nannofossiles, et occasionnellement les radiolaires et les foraminifères.

| Leg | Site  | Carotte | Section | Intervalle (cm) | Foraminifères | Mammofossiles | Radiolaires | Spicules | Palagonite | Feldspath | Quartz | Oxyhydroxydes | Ichtyolithes | Phillipsite | Argiles | Facies sédimentaire                    |
|-----|-------|---------|---------|-----------------|---------------|---------------|-------------|----------|------------|-----------|--------|---------------|--------------|-------------|---------|--|
|     |       |         |         |                 |               |               |             |          |            |           |        |               |              |             |         |  |
| 5   | 37    | 4       | 5       | 142-145         | -             | -             | -           | -        | 3          | t         | -      | 10            | -            | t           | 86      | v.a. avec oxyhydr.                     |
|     | 38    | 6       | 6       | 138-141         | -             | 50            | -           | -        | 1          | r         | -      | 10            | -            | -           | 38      | v. a nanno. et a argiles avec oxyhydr. |
|     | 39    | 2       | 6       | 143-146         | t             | t             | -           | -        | -          | -         | -      | 15            | -            | -           | 84      | v.a. avec oxyhydr.                     |
| 16  | 161 A | 14      | CC      | -               | -             | t             | 50          | 1        | t          | t         | t      | 2             | t            | -           | 46      | v. a radiolaires et a argiles          |
|     | 162   | 17      | 4       | 147-150         | 1             | 40            | t           | t        | -          | -         | -      | 10            | t            | -           | 48      | v. a nanno. et a argiles avec oxyhydr. |
| 7   | 66.0  | 9       | 3       | 118-121         | t             | -             | -           | -        | t          | -         | -      | 10            | t            | -           | 89      | v.a. avec oxyhydr.                     |
|     | 315 B | 30      | 2       | 127-130         | 1             | -             | -           | -        | -          | t         | -      | 15            | t            | -           | 87      | v.a. avec oxyhydr.                     |
| 8   | 74    | 12      | 3       | 27-30           | -             | 40            | -           | -        | t          | -         | -      | 7             | -            | -           | 52      | v.a. a nanno.                          |
|     | 75    | 9       | 6       | 95-98           | 1             | 50            | -           | -        | -          | t         | -      | 10            | -            | -           | 48      | v. a nanno. et a argiles               |
| 34  | 319   | 12      | 3       | 80-83           | 5             | 50            | -           | -        | -          | -         | -      | 3             | -            | -           | 41      | v. a nanno. et a argiles               |
|     | 320 B | 2       | 5       | 144-147         | 5             | 40            | -           | -        | -          | -         | -      | 3             | -            | -           | 51      | v.a a nanno.                           |
|     | 321   | 13      | 3       | 125-128         | 5             | 30            | -           | -        | 1          | -         | -      | 10            | t            | -           | 53      | v.a a nanno.                           |
| 63  | 471   | 79      | 1       | 87-90           | t             | -             | -           | -        | -          | t         | 10     | 5             | -            | -           | 84      | v.a. avec quartz                       |
| 66  | 487   | 19      | 5       | 60-63           | t             | 5             | -           | t        | -          | t         | -      | 10            | -            | -           | 84      | v.a. avec oxyhydr.                     |
| 21  | 203   | 5       | 1       | 145-148         | 20            | 5             | -           | -        | -          | 5         | -      | 7             | -            | -           | 62      | v.a. avec foram. et oxyhydr.           |
| 31  | 291 A | 2       | CC      | -               | t             | 1             | -           | -        | -          | t         | t      | 10            | t            | -           | 88      | v.a. avec oxyhydr.                     |
|     | 294   | 6       | CC      | -               | t             | -             | -           | -        | -          | t         | -      | 15            | -            | t           | 84      | v. sableuse d'argiles avec oxyhydr.    |

Tableau XXIV- Les facies sédimentaires : observation des sédiments en frottis.

| Leg | Site  | Carotte | Section | Intervalle (cm) | Foraminifères | Etat de conservation   | Radiolaires | Spicules | Etat de conservation | Agregats bruns | Verre volcanique | Feldspath | Quartz | Micronodules | Palagonite | Phillipsite | Ichtyolithes | Fragments de Roches | Micas | Sulfures | Cendres noires | Hematite - Goethite |
|-----|-------|---------|---------|-----------------|---------------|--|-------------|----------|----------------------|----------------|------------------|-----------|--------|--------------|------------|-------------|--------------|---------------------|-------|----------|----------------|---------------------|
|     |       |         |         |                 |               |  |             |          |                      |                |                  |           |        |              |            |             |              |                     |       |          |                |                     |
| 5   | 37    | 4       | 5       | 142-145         | -             | -  | -           | -        | -                    | 30             | -                | r         | -      | -            | 35         | t           | t            | -                   | -     | -        | 35             | -                   |
|     | 38    | 6       | 6       | 138-141         | 70            | B-->tm   | t           | t        | B                    | 2              | -                | r         | -      | 10           | 15         | -           | 3            | -                   | r     | -        | -              | -                   |
|     | 39    | 2       | 6       | 143-146         | t             | -  | -           | r        | -                    | 10             | -                | -         | -      | 10           | t          | t           | 80           | -                   | r     | -        | -              | -                   |
| 16  | 161 A | 14      | CC      | -               | -             | -  | 95          | t        | B-->m                | 5              | -                | -         | -      | -            | -          | -           | -            | -                   | -     | -        | -              | -                   |
|     | 162   | 17      | 4       | 147-150         | 76            | TB-->M   | -           | -        | -                    | 8              | -                | -         | -      | 5            | 10         | -           | 1            | -                   | -     | -        | -              | -                   |
| 7   | 66 O  | 9       | 3       | 118-121         | t             | B  | -           | t        | -                    | 74             | -                | t         | -      | 1            | 24         | -           | 1            | -                   | -     | -        | -              | -                   |
|     | 315 B | 30      | 2       | 127-130         | t             | > 63 µ. 0. Seulement quelques radiolaires, Ichtyolithes et micronodules. | -           | -        | -                    | -              | -                | -         | -      | -            | -          | -           | -            | -                   | -     | -        | -              | -                   |
| 8   | 74    | 12      | 3       | 27-30           | 10            | M-->m  | -           | t        | -                    | 29             | -                | 1         | -      | 5            | 50         | t           | 5            | -                   | -     | -        | -              | -                   |
|     | 75    | 9       | 6       | 95-98           | 99            | TB-->m   | t           | t        | m                    | t              | -                | -         | -      | -            | -          | 1           | -            | t                   | -     | -        | -              | -                   |
| 34  | 319   | 12      | 3       | 80-83           | 98            | TB-->m   | -           | -        | -                    | 1              | -                | t         | -      | t            | -          | 1           | -            | -                   | -     | -        | -              | -                   |
|     | 320 B | 2       | 5       | 144-147         | 99            | TB-->m   | -           | -        | B                    | -              | -                | t         | -      | t            | -          | -           | -            | -                   | -     | -        | -              | -                   |
|     | 321   | 13      | 3       | 125-128         | 1             | B-->m  | t           | -        | m                    | 20             | -                | -         | -      | 2            | 77         | -           | t            | -                   | -     | -        | -              | -                   |
| 63  | 471   | 79      | 1       | 87-90           | t             | -  | t           | -        | m                    | 50             | -                | t         | 39     | t            | -          | -           | 10           | -                   | 1     | -        | -              |                     |
| 66  | 487   | 19      | 5       | 60-63           | t             | m  | t           | 1        | M                    | 15             | t                | t         | -      | 10           | t          | -           | 74           | t                   | -     | -        | -              |                     |
| 21  | 203   | 5       | 1       | 145-148         | 49            | TB-->M   | -           | -        | -                    | 49             | t                | 2         | t      | -            | -          | t           | -            | -                   | -     | -        | -              |                     |
| 31  | 291 A | 2       | CC      | -               | -             | -  | 64          | -        | B-->M                | 35             | -                | -         | -      | 1            | -          | 1           | -            | -                   | -     | -        | -              | -                   |
|     | 294   | 6       | CC      | -               | t             | M  | t           | t        | B                    | 1              | t                | 10        | -      | 5            | t          | -           | 74           | t                   | -     | 5        | 5              |                     |

Tableau XXV- Les constituants de la fraction grossière (> 63 µm).

### β - La fraction non biogène

- Les argiles et les oxyhydroxydes sont les constituants principaux et communs à tous les sédiments étudiés ici. Leur proportion varie de 38 à 89 % pour les premières et de 2 à 15 % pour les seconds. Il faut rappeler ici que les proportions de l'un et de l'autre sont surestimées à cause de la difficulté à distinguer ces deux constituants en frottis.

- Les autres constituants sont mineurs. Il s'agit de palagonite (jusqu'à 3 %), feldspath (jusqu'à 5 % au Site 203), quartz (en traces et localement égal à 10 % au Site 471), phillipsite (seulement en traces aux Sites 37 et 294).

#### b) Les facies sédimentaires

Les vases d'argiles et les vases à nannofossiles sont dominantes.

Cependant, on observe trois cas particuliers :

- une vase à radiolaires et à argiles au Site 161 A,
- une vase d'argiles avec quartz au Site 471,
- une vase sableuse d'argiles avec oxyhydroxydes au Site 294.

#### 4 - ETUDE DE LA FRACTION GROSSIERE (> 63 μm)

##### a) Pourcentage de la fraction grossière (cf tableau XXIII)

Le pourcentage de la fraction grossière est variable d'un échantillon à l'autre. Celle-ci est pratiquement inexistante dans l'échantillon 315 A et elle atteint 29 % du poids du sédiment humide dans l'échantillon 203.

b) Les constituants de la fraction grossière (cf tableau XXV) $\alpha$  - La fraction biogène

- Elle est dominée par les foraminifères dont les concentrations sont néanmoins très variables. Ils peuvent, en effet, être totalement absents ou représenter une grande part de la fraction grossière (jusqu'à 99 %). Leur état de conservation est très bon à très mauvais d'un échantillon à l'autre, mais également au sein d'un même échantillon. Cette caractéristique a déjà été mentionnée à l'axe de la dorsale, et peut refléter des dissolutions préférentielles de certaines espèces par rapport à d'autres, et des remaniements dus aux courants de fond. Il semble que la diagenèse n'intervienne pas dans ce processus.

- Les radiolaires sont beaucoup plus rares et sont observés en proportions importantes uniquement dans deux cas : aux Sites 161 A (95 %) et 291 A (64 %). Il faut toutefois noter que dans ce deuxième cas, le pourcentage de fraction grossière est très faible (0,5 %) et que les radiolaires n'avaient pas été observés en frottis. Ils représentent donc une fraction infime du sédiment total.

Dans l'échantillon 161 A, l'état de conservation des radiolaires est bon à mauvais. Celui-ci est situé sur la bordure nord d'une zone de sédiments épais d'âge cénozoïque qui correspond actuellement à la zone équatoriale de haute productivité biologique (Ewing *et al.*, 1968 dans van Andel *et al.*, 1973).

L'état de conservation des radiolaires sur ce site et la présence suspectée de faunes plus anciennes remaniées (Dinkelman, 1973) dans ce niveau, indiquent la présence probable de courants au moment de leur dépôt.

Dans les autres échantillons, les traces de radiolaires observées sont dans un état bon à mauvais. La rareté des radiolaires dans l'ensemble des sédiments (sauf au Site 161 A) suggère qu'ils ont été fortement dissous, et seules quelques espèces plus résistantes ont subsisté. Cette hypothèse est renforcée par le fait que les diatomées sont totale-

ment absentes. Au cours des processus de dissolution des organismes siliceux, ce sont en effet les diatomées qui disparaissent les premières. Il semble donc que les sédiments métallifères soient le siège de dissolutions importantes des organismes siliceux.

- Les ichtyolithes : ce sont des dents, des écailles et fragments de squelettes de poissons. Ils sont en général accessoires, sauf dans l'échantillon du Site 39 où ils représentent 80 % de la fraction grossière. De telles accumulations semblent correspondre à des taux de sédimentation faibles (Heath et Moberly, 1971). Au Site 39, ce taux de sédimentation n'a cependant pas pu être estimé.

### β - La fraction non biogène

#### - Les constituants dominants

- Les agrégats bruns : leur proportion varie de 0 à 49 %. Ils sont de forme irrégulière, brun plus ou moins clair, et renferment des oxyhydroxydes de Fe et Mn mélangés à des argiles et des fragments d'organismes. Ils sont absents uniquement dans deux échantillons : 315 A qui est extrêmement fin, et 320 B qui renferme 99 % de foraminifères.

- Les micronodules : leur proportion varie de 0 à 10 %.

- La palagonite : elle se présente sous forme de grains plus ou moins anguleux, opaques, de couleur jaune crème, et dont la taille varie de 0,1 à 1 mm. Leur forme, relativement anguleuse tend à prouver un faible transport. Leur présence indique donc un environnement volcanique proche. Cette influence est très nette, spécialement dans le cas de l'échantillon 321 (77 % de la fraction grossière), mais également aux Sites 37, 38, 162, 66.0 et 74.

- Les constituants accessoires

- Le quartz est en général absent ou en traces. Il est très abondant au Site 471 (39 %) et traduit donc un apport terrigène important.

- Les micas sont également probablement détritiques. Ils sont rares dans les sédiments étudiés.

- Le verre volcanique ; il est observé en traces, uniquement aux Sites 487, 203 et 294. Les fragments sont frais, ou recouverts d'une légère pellicule d'altération.

- Les feldspaths : ils traduisent certainement un apport détritique, mais également un apport volcanique. Au Site 294, ils constituent une partie des produits de désagrégation du basalte tholéiitique sur lequel les sédiments reposent.

- La phillipsite : elle est présente en traces dans quelques échantillons sous forme de cristaux maclés présentant des signes de dissolution importants (cf planche VII, photo 1). L'existence de ces zéolites semble résulter de l'altération de niveaux de cendres volcaniques présents dans la colonne sédimentaire (Mac Manus *et al.*, 1970).

- Des éléments exceptionnels

- Des cendres volcaniques : elles représentent respectivement 35 et 5 % de la fraction grossière aux Sites 37 et 294. Elles se présentent sous la forme d'agrégats noirs plus ou moins brillants. De tels niveaux de cendres indiquent vraisemblablement un volcanisme aérien explosif dont les produits ont pu s'accumuler dans les sédiments métallifères des deux sites, par transport éolien ou entraînés par les courants marins. Ce phénomène a, par exemple, été observé dans les sédiments métallifères que nous avons étudiés précédemment (cf chapitre II).

- Des fragments de roches : 74 % de la fraction grossière aux Sites 487 et 294, sont constitués de fragments de roches porphyriques dont la taille peut atteindre 1 cm. Ils proviennent de la désagrégation des basaltes sous-jacents. Au Site 471, les sédiments reposent sur une diabase altérée ; la fraction grossière renferme 10 % de ces fragments.

- Des sulfures : 1 % de sulfures (pyrite) sont observés au Site 471. C'est le seul sédiment qui en contienne. Il fait partie de la sous-unité 5 b décrite par Yeats *et al.* (1981) comme "un pot-pourri de sédiments et de roches sédimentaires comprenant une argillite à chalcoppyrite et sphalerite, des cherts quartzeux noirs et des sédiments métallifères". Ces derniers sont situés à la base de la formation, au contact de la diabase altérée. Ils sont également présents dans les fractures de cette diabase où ils sont, alors, transformés en jaspe brun-rouge. Une étude des sulfures de cette sous-unité a été effectuée par Devine et Leinen (1981) qui considèrent que leur minéralogie est en général similaire à celle des sulfures associés aux ophiolites et aux rides médio-océaniques actuelles, mais présente quand même quelques différences.

Ainsi, ce sédiment pourrait avoir une origine commune avec celui qui a été décrit à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, vers 13° Nord et situé au pied d'un édifice hydrothermal inactif. Il était, en effet, le seul à renfermer des sulfures.

Néanmoins, la nature intrusive de la diabase sous-jacente amène Grechin *et al.* (1981) à considérer que le phénomène hydrothermal qui a conduit à la formation de la sous-unité 5 b, est secondaire et aurait été provoqué par la mise en place du sill de diabase. Nous verrons plus loin, que la composition chimique des sédiments métallifères, associés à ces niveaux, s'accorderait davantage avec cette dernière hypothèse.

- De l'hématite et de la goéthite bien cristallisées représentent 5 % de la fraction grossière au Site 294. Karig *et al.* (1975) et Bonatti *et al.* (1979) avaient déjà observé ces minéraux dans les sédi-

ments métallifères de ce site. Ils n'ont jamais été observés dans la fraction grossière des autres sédiments étudiés dans ce chapitre.

## 5 - CONCLUSION

Les sédiments étudiés ici, et situés à la base de la colonne sédimentaire, montrent de nombreuses caractéristiques communes, malgré quelques particularités :

- la présence d'oxyhydroxydes de fer et de manganèse (2 à 15 %) sous forme de particules fines, disséminées, d'agrégats bruns et de micronodules ;

- des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  très variables (0 à 90 %) largement représentées par les coccolithes (parmi lesquels de nombreux discoasters) et les foraminifères. De telles variations avaient déjà été notées à l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord. Cependant, la fraction carbonatée était surtout représentée par les foraminifères.

- une absence totale de diatomées, et de faibles pourcentages de radiolaires (sauf au Site 161 A où les radiolaires représentent 50 % de la surface en frottis). Il semble donc qu'il y ait une forte tendance à la dissolution des organismes siliceux.

- de la palagonite fréquente, dont les formes anguleuses traduisent une mise en place des sédiments dans un environnement volcanique .

- un apport détritique discret en général, observé à travers la présence de traces de quartz et de micas (sauf au Site 471 où le quartz atteint 10 % de la surface en frottis).

- des traces de zéolites présentant des signes importants de dissolution et dont la répartition n'est pas liée aux niveaux métallifères.

Enfin, deux échantillons sont particuliers :

- au Site 294, les sédiments métallifères contiennent de l'hématite bien cristallisée qui est interprétée par Bonatti *et al.* (1979), comme un résultat de la diagenèse qui aboutirait à la cristallisation

des oxyhydroxydes de fer amorphes. Néanmoins, ce fait n'est pas observé dans les autres échantillons.

- au Site 471, des sulfures sont présents. Ces sédiments pourraient correspondre à des produits d'altération d'édifices hydrothermaux par analogie avec l'échantillon CY 82-32 étudié à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, vers 13° Nord (cf chapitre II), ou bien à des manifestations hydrothermales secondaires provoquées par la mise en place du sill de diabase.

#### B - ETUDE DU SEDIMENT TOTAL AUX RAYONS X (cf tableau XXVI)

Les diagrammes de rayons X sur le sédiment total, montrent une nature amorphe très prononcée de ces sédiments.

Outre la calcite qui traduit la présence des organismes calcaires, le quartz et les feldspaths, on observe cependant :

- des traces de goethite aux Sites 66.0, 471 et 294,
- des traces de barytine au Site 161 A,
- de la pyrite au Site 471,
- de la chlorite au Site 471,
- de l'hématite au Site 294.

| Echantillon | calcite | halite | quartz | feldspaths | goethite | hématite | oxydes Mn | pyrite | chlorite | barytine |
|-------------|---------|--------|--------|------------|----------|----------|-----------|--------|----------|----------|
| 37-4-5      | -       | p      | -      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 38-6-6      | p       | p      | -      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 39-2-6      | p       | p      | -      | -          | -        | -        | ?         | -      | -        | -        |
| 161A-14-00  | p       | p      | -      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | p        |
| 162-17-4    | p       | p      | -      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 66.0-9-3    | -       | -      | -      | -          | p        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 315A-30-2   | -       | -      | p      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 74-12-3     | p       | -      | -      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 75-9-6      | p       | -      | -      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 319-12-3    | p       | p      | -      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 320B-2-5    | p       | p      | -      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 321-13-3    | p       | p      | -      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 471-79-1    | -       | -      | p      | p          | p        | -        | -         | p      | p        | -        |
| 487-19-5    | -       | p      | -      | -          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 203-5-1     | p       | p      | -      | p          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 291A-2-00   | -       | p      | -      | ?          | -        | -        | -         | -      | -        | -        |
| 294-6-00    | -       | -      | -      | p          | p        | p        | -         | -      | -        | -        |

Tableau XXVI- Les phases observées aux rayons X sur sédiment total (p : présent).

## C - ETUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE (< 2 $\mu$ m)

L'étude de la fraction argileuse a été menée de la même façon que pour les sédiments à l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord (cf chapitre II).

9 échantillons, supposés représentatifs des divers environnements forés par le Glomar Challenger, ont été choisis. Ceux-ci, après séparation de la fraction < 2  $\mu$ , ont été soumis aux rayons X, puis observés au microscope électronique à transmission. Ces observations ont été répétées sur la fraction argileuse avant et après traitement d'élimination des produits amorphes.

### 1 - LES DIFFRACTOGRAMMES DE RAYONS X SUR AGREGATS ORIENTES

Les résultats obtenus avant et après traitement de la fraction < 2  $\mu$ m sont rassemblés dans le tableau XXVII.

L'étude des diffractogrammes montre que les produits amorphes sont dominants dans la fraction argileuse. Dans certains cas, le traitement appliqué sur cette fraction, révèle des argiles qui étaient masquées jusqu'alors.

On observe ainsi :

- des proportions faibles ou nulles d'argiles détritiques (illite, chlorite, kaolinite) qui ne sont pas présentes dans les mêmes échantillons. Parmi ces trois phases, c'est l'illite qui est le mieux représentée, mais toujours en traces.

La chlorite, quant à elle, est exceptionnellement abondante au Site 471 où elle résulte de l'altération de la diabase sous-jacente, qui a été décrite par Grechin *et al.* (1981).

- des smectites peu abondantes et souvent absentes, même après le traitement d'élimination des amorphes.

- des interstratifiés irréguliers de type illite-smectite observés dans de nombreux cas. Ces minéraux sont particuliers aux sédiments étudiés ici ; en effet, leur présence a été seulement suspectée à l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord.

Ils présentent des réflexions larges entre 10 et 14 Å sur l'enregistrement "N", entre 15 et 20 Å après traitement à l'éthylène-glycol (enregistrement "G") et à 10 Å après chauffage (enregistrement "C") (cf fig. 57).

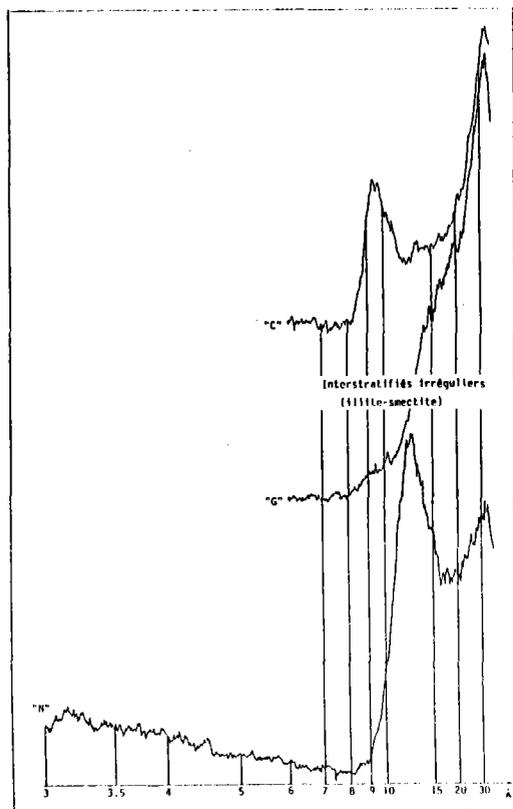


Fig. 57 - Exemple de diagramme de rayons X de la fraction argileuse, après traitement d'élimination des amorphes (l'échantillon 203-5-1).

Ces minéraux interstratifiés constitueraient une évolution de la fraction argileuse des sédiments. Deux explications peuvent être données :

- . une évolution due à la diagenèse : ce phénomène a été signalé par de nombreux auteurs, et en particulier par Millot (1964) et Müller (1967) qui indiquent qu'au cours de la diagenèse, il y a transformation de la montmorillonite en interstratifiés de type illite-montmorillonite et en illite. La proportion d'illite augmente ainsi avec la profondeur, jusqu'à disparition complète de la montmorillonite et des interstratifiés. Cependant, les différents exemples donnés par ces deux auteurs font intervenir des transformations nettes de ce type à partir de 1 000 m d'enfouissement au minimum.
- . une altération "hydrothermale" de cendres volcaniques riches en potassium (Beutelspacher et Van der Marel, 1968).

- de la goethite : celle-ci est observée très fréquemment et il semble qu'elle soit surtout concentrée dans la fraction fine des sédiments, et ne présente pas une bonne cristallinité,
- du quartz, observé seulement aux Sites 315 A et 471,
- des feldspaths, détectés seulement au Site 471. Ceux-ci proviennent, en partie au moins de la diabase altérée sous-jacente.

| ECHANTILLONS | TRAITEMENT | QUARTZ | FELDSPATHS | GOETHITE | ILLITE | CHLORITE | KAOLINITE | SMECTITES | INTERSTRATIFIES |
|--------------|------------|--------|------------|----------|--------|----------|-----------|-----------|-----------------|
| 37-4-5       | avant      | -      | -          | tr       | -      | -        | -         | p         | -               |
|              | apres      | -      | -          | tr       | -      | -        | -         | -         | p               |
| 162-17-4     | av.        | -      | -          | p        | -      | -        | -         | -         | -               |
|              | ap.        | -      | -          | p        | tr     | -        | -         | -         | -               |
| 315 A-30-2   | av.        | p      | -          | -        | tr     | -        | -         | p         | -               |
|              | ap.        | p      | -          | -        | tr     | -        | -         | p         | -               |
| 74-12-3      | av.        | -      | -          | p        | -      | -        | -         | -         | -               |
|              | ap.        | -      | -          | p        | -      | -        | -         | -         | p               |
| 319-12-3     | av.        | -      | -          | p        | tr     | -        | -         | -         | p               |
|              | ap.        | -      | -          | p        | tr     | -        | -         | tr        | p               |
| 471-79-1     | av.        | p      | p          | -        | tr     | A        | -         | -         | -               |
|              | ap.        | p      | p          | -        | tr     | A        | -         | -         | -               |
| 487-19-5     | av.        | -      | -          | tr       | -      | -        | ?         | p         | -               |
|              | ap.        | -      | -          | tr       | -      | ?        | tr        | p         | -               |
| 203-5-1      | av.        | -      | -          | -        | -      | -        | -         | -         | ?               |
|              | ap.        | -      | -          | -        | -      | -        | -         | -         | p               |
| 291 A-2-CC   | av.        | -      | -          | p        | -      | -        | -         | -         | ?               |
|              | ap.        | -      | -          | p        | -      | -        | -         | -         | ?               |

Tableau XXVII - Les constituants de la phase argileuse aux rayons X avant et après traitement d'élimination des amorphes (p : présent ; tr : traces ; A : abondant).

## 2 - ETUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A TRANSMISSION

L'étude de la fraction argileuse au M.E.T. confirme les observations aux rayons X, et fait apparaître des transformations et des néoformations d'argiles, très avancées.

Ce sont ainsi :

- des smectites en "étoiles" constituées de lattes se croisant en un même centre et disposées à 60° et 120°. La taille de ces assemblages varie de 1 à 2 µm. Ils semblent correspondre aux smectites lattées décrites par Holtzappfel (1983) et représenteraient un stade final de transformation des smectites floconneuses ("en voiles") en smectites lattées. Des amorces de transformations de ce type ont été décrites à l'axe de la dorsale à

12°50' Nord et 11°30' Nord (cf chapitre II). On observerait donc ici un stade plus avancé dans l'évolution de la fraction argileuse des sédiments métallifères (cf planche VII, photos 2 et 3).

- des argiles lattées de toute petite taille (environ 0,05 µm) souvent abondantes dans la fraction argileuse (cf planche VII, photo 4), et qui constituent le fond de la préparation. Elles sont soit en particules indépendantes, soit elles ont tendance à être organisées en assemblages à 60° et 120°, comme les argiles décrites précédemment.

- des particules de type illite-chlorite peu abondantes qui montrent souvent des néoformations de smectites lattées sur leur bordure (cf planche VII, photo 5).

- des néoformations de smectites à partir de la dissolution d'organismes siliceux. Ceci n'a été observé qu'une fois, au Site 74.

### 3 - CONCLUSION A L'ETUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE DES SEDIMENTS METALLIFERES DE BASE FORES PAR LE GLOMAR CHALLENGER ET COMPARAISON AVEC LES SEDIMENTS QUI SE FORMENT ACTUELLEMENT A L'AXE DE LA DORSALE A 12°50' NORD ET 11°30' NORD

Les sédiments métallifères à la base de la colonne sédimentaire ont des fractions argileuses similaires, à l'exception du Site 471 qui a une composition particulière.

Cette fraction argileuse est le siège de nombreuses transformations déjà amorcées pour certaines, dans les sédiments étudiés précédemment à 12°50' Nord et 11°30' Nord à l'axe de la dorsale.

L'évolution se traduit à la fois, par des néoformations de smectites et des transformations de smectites déjà existantes.

On observe en effet :

- des néoformations de smectites "en voiles" à partir de la dissolution d'organismes siliceux. Ce phénomène n'a été observé qu'occasionnellement, car il semble que la majeure partie des organismes siliceux soit déjà dissoute,

- des néoformations de smectites lattées à partir de smectites "en voiles" déjà existantes (smectites mixtes). Ce phénomène débute très

tôt. On l'observe en effet quelquefois dans les carottes sur le flanc ouest, à quelques dizaines de kilomètres de l'axe de la dorsale,

- des néoformations de smectites lattées sur des particules d'illite-chlorite,

- l'apparition de minéraux interstratifiés irréguliers de type illite-smectite qui résulte sans doute de la transformation des smectites "en voiles". Celle-ci semble intervenir plus tardivement dans l'évolution des sédiments car elle a seulement été suspectée à l'axe de la dorsale.

La fraction argileuse se caractérise également par :

- une présence plus fréquente de goethite qui reste cependant assez mal cristallisée (à l'exception du Site 292),

- une influence détritique faible. L'illite, la chlorite, le quartz et les feldspaths sont rares.

#### Le Site 471

Il constitue un cas particulier car les sédiments métallifères reposent sur une dolérite altérée (diabase) de nature probablement intrusive (Yeats *et al.*, 1981). La fraction argileuse est largement dominée par de la chlorite, mais également par du quartz, des feldspaths (plagioclases). Elle ne renferme que des traces d'illite, et les smectites n'ont pas été détectées.

La chlorite et les plagioclases proviennent de l'altération de la dolérite. Cette altération aurait été provoquée par un phénomène hydrothermal secondaire dû à la mise en place du sill (Grechin *et al.*, 1981).

Einsele *et al.* (1980) considèrent que l'intrusion de sills dans les sédiments du bassin de Guaymas entraîne un métamorphisme faible et une altération thermique par expulsion de l'eau interstitielle dans les sédiments.

Ce cas constitue une exception au sein des autres niveaux étudiés, qui, eux montrent une évolution poussée de leur fraction argileuse qui peut fort bien s'expliquer en continuité avec les sédiments métallifères formés à l'axe de la dorsale du Pacifique Est.

D - LA GEOCHIMIE DES SEDIMENTS METALLIFERES FORÉS A LA BASE DE LA COLONNE SEDIMENTAIRE (cf tableau XXVIII)

Les analyses chimiques montrent que les sédiments métallifères forés au-dessus du basalte sont similaires à ceux qui se forment actuellement à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, à 12°50' Nord et 11°30' Nord, aussi bien que dans le Pacifique Sud (cf tableau II, chapitre I et tableau XI, chapitre II). Ils présentent en effet des caractéristiques de ces deux ensembles :

- les teneurs en  $Fe_2O_3$  varient de 2,34 % à 41,95 % et les teneurs en  $Mn_3O_4$  de 0,43 à 11,30 %. Les carbonates qui, nous l'avons vu, ont de grandes amplitudes, ne sont qu'en partie responsables des variations de  $Fe_2O_3$  et  $Mn_3O_4$ , car les calculs effectués à  $CaCO_3 = 0$  donnent des valeurs également très différentes : 5,44 à 43,05 % pour  $Fe_2O_3$  et 0,43 à 16,38 % pour  $Mn_3O_4$ .

- les teneurs en  $Al_2O_3$  varient de 0,69 à 14,15 %. Elles sont faibles.

1 - LES SEDIMENTS METALLIFERES DE BASE PAR RAPPORT AUX ARGILES PELAGIQUES DU PACIFIQUE (Ppc)

L'observation des diagrammes des principaux éléments majeurs en fonction de l'aluminium, permet de comparer ces sédiments aux argiles pélagiques du Pacifique, mais également aux sédiments métallifères qui ont été étudiés à l'axe de la dorsale du Pacifique Est à 12°50' Nord et 11°30' Nord (cf fig. 58).

$Fe_2O_3$  et  $Mn_3O_4$  présentent des enrichissements relatifs par rapport à la Ppc et  $Fe_2O_3/Al_2O_3$  et  $Mn_3O_4/Al_2O_3$  sont plus élevés qu'à l'axe de la dorsale vers 13° Nord (4,6 en moyenne contre 2,4 pour le premier et 1,3 contre 0,6 pour le second).

Le rapport  $SiO_2/Al_2O_3$  avoisine celui de la Ppc, sauf pour 4 échantillons qui montrent des enrichissements exceptionnels en silice, sous forme de quartz (Sites 471 et 315 A), radiolaires (Site 161 A) ou cendres volcaniques (Site 37).

| ECHANTILLON | CaCO3<br>(%) | SiO2<br>(%) | TiO2<br>(%) | Al2O3<br>(%) | Fe2O3<br>(%) | Mn3O4<br>(%) | MgO<br>(%) | CaO<br>(%) | Na2O<br>(%) | K2O<br>(%) | P2O5<br>(%) | P.Feu<br>(%) | H2O-<br>(%) | Total<br>(%) |
|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 37-4-5      | 1.00         | 41.00       | 0.89        | 8.28         | 19.75        | 3.74         | 4.31       | 1.01       | 4.44        | 2.56       | 0.30        | 14.33        | 5.63        | 100.61       |
| 38-6-6      | 70.00        | 2.80        | 0.09        | 1.40         | 9.50         | 3.30         | 0.90       | 42.00      | 0.00        | 0.01       | 0.40        | 37.11        | 14.32       | 97.51        |
| 39-2-6      | 6.00         | 11.60       | 0.16        | 4.37         | 39.30        | 10.40        | 2.66       | 5.72       | 2.55        | 0.61       | 1.40        | 21.23        | 4.93        | 100.00       |
| 161 A-14-CC | 3.00         | 67.80       | 0.10        | 2.40         | 5.25         | 1.01         | 2.39       | 3.59       | 2.29        | 0.90       | 0.60        | 13.23        | 3.43        | 99.56        |
| 162-17-4    | 68.00        | 9.73        | 0.22        | 2.24         | 7.54         | 1.75         | 1.44       | 40.31      | 0.26        | 0.08       | 0.50        | 35.20        | 1.61        | 99.27        |
| 66.0-9-3    | 2.00         | 15.50       | 0.26        | 3.36         | 41.95        | 11.25        | 2.28       | 4.24       | 2.16        | 1.41       | 1.90        | 15.13        | 4.10        | 99.44        |
| 315 A-30-2  | 0.00         | 51.50       | 0.80        | 7.12         | 24.60        | 1.00         | 2.79       | 1.66       | 1.34        | 1.41       | 0.40        | 7.83         | 3.06        | 100.45       |
| 74-12-3     | 57.00        | 6.50        | 0.22        | 1.78         | 13.10        | 4.50         | 1.27       | 38.00      | 0.05        | 0.02       | 0.30        | 34.31        | 2.24        | 100.05       |
| 75-9-6      | 81.00        | 1.00        | 0.03        | 1.47         | 5.87         | 3.04         | 0.53       | 46.00      | 0.03        | 0.01       | 0.15        | 39.53        | 1.12        | 97.66        |
| 319-12-3    | 80.00        | 2.30        | 0.02        | 0.69         | 2.44         | 0.46         | 0.49       | 54.00      | 0.04        | 0.02       | 0.15        | 39.90        | 0.52        | 100.51       |
| 320 B-2-5   | 90.00        | 2.50        | 0.02        | 1.31         | 2.34         | 0.74         | 0.58       | 53.00      | 0.05        | 0.01       | 0.15        | 39.87        | 0.67        | 100.57       |
| 321-13-3    | 59.00        | 12.95       | 0.29        | 2.32         | 5.74         | 1.72         | 1.78       | 39.23      | 0.21        | 0.02       | 0.25        | 36.03        | 3.01        | 100.54       |
| 471-79-1    | 0.50         | 71.70       | 0.39        | 6.45         | 10.58        | 0.43         | 4.77       | 0.70       | 1.05        | 0.25       | 0.25        | 3.23         | 0.23        | 99.80        |
| 487-19-5    | 1.00         | 36.45       | 0.39        | 7.39         | 20.98        | 6.11         | 4.05       | 4.79       | 4.40        | 1.76       | 0.60        | 12.39        | 4.83        | 99.31        |
| 203-5-1     | 52.00        | 18.20       | 0.35        | 5.53         | 5.13         | 1.68         | 2.08       | 34.50      | 0.71        | 0.12       | 0.40        | 32.14        | 2.20        | 100.84       |
| 291 A-2-CC  | 2.00         | 20.00       | 0.13        | 2.82         | 35.00        | 11.30        | 3.15       | 3.62       | 3.57        | 1.06       | 0.95        | 19.04        | 5.46        | 100.64       |
| 294-6-CC    | 1.00         | 44.00       | 1.79        | 14.15        | 16.30        | 2.60         | 4.32       | 5.85       | 3.63        | 2.54       | 0.70        | 4.95         | 1.33        | 100.83       |

| ECHANTILLON | Li<br>(ppm) | Rb<br>(ppm) | Sr<br>(ppm) | Ba<br>(ppm) | V<br>(ppm) | Cr<br>(ppm) | Co<br>(ppm) | Ni<br>(ppm) | Cu<br>(ppm) | Zn<br>(ppm) | As<br>(ppm) | Se<br>(ppm) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 37-4-5      | 77          | 60          | 200         | 449         | 195        | 16          | 40          | 634         | 347         | 243         | 15          | < 0.1       |
| 38-6-6      | 17          | 5           | 735         | 360         | 268        | 14          | 23          | 411         | 319         | 135         | 52          | < 0.1       |
| 39-2-6      | 125         | 12          | 569         | 1205        | 606        | 10          | 103         | 541         | 945         | 664         | 150         | < 0.1       |
| 161 A-14-CC | 73          | 17          | 229         | 3314        | 63         | 8           | 9           | 87          | 323         | 126         | 3           | < 0.1       |
| 162-17-4    | 39          | 4           | 630         | 350         | 208        | 5           | 20          | 257         | 262         | 104         | 40          | < 0.1       |
| 66.0-9-3    | 78          | 37          | 1076        | 3500        | 934        | 14          | 51          | 650         | 918         | 525         | 79          | < 0.1       |
| 315 A-30-2  | 28          | 35          | 149         | 305         | 101        | 11          | 26          | 121         | 182         | 259         | 270         | < 0.1       |
| 74-12-3     | 41          | 5           | 863         | 418         | 522        | 12          | 20          | 288         | 347         | 163         | 19          | < 0.1       |
| 75-9-6      | 24          | 4           | 1170        | 345         | 216        | 10          | 12          | 166         | 208         | 119         | 16          | < 0.1       |
| 319-12-3    | 11          | 2           | 998         | 676         | 144        | 5           | 7           | 37          | 92          | 38          | 12          | < 0.1       |
| 320 B-2-5   | 13          | 3           | 1148        | 525         | 147        | 8           | 4           | 53          | 88          | 37          | 10          | < 0.1       |
| 321-13-3    | 23          | 3           | 875         | 306         | 160        | 5           | 6           | 142         | 112         | 104         | 4           | < 0.1       |
| 471-79-1    | 39          | 8           | 21          | 50          | 130        | 53          | 23          | 130         | 203         | 232         | 8           | 0.4         |
| 487-19-5    | 72          | 57          | 501         | 2745        | 280        | 98          | 44          | 281         | 476         | 210         | 73          | < 0.1       |
| 203-5-1     | 75          | 3           | 905         | 364         | 183        | 5           | 15          | 52          | 96          | 83          | 27          | < 0.1       |
| 291 A-2-CC  | 105         | 20          | 602         | 1798        | 573        | 10          | 63          | 551         | 702         | 401         | 57          | < 0.1       |
| 294-6-CC    | 54          | 51          | 406         | 896         | 288        | 63          | 30          | 168         | 211         | 131         | 19          | < 0.1       |

Tableau XXVIII - Teneurs en CaCO<sub>3</sub> et analyses chimiques des sédiments.

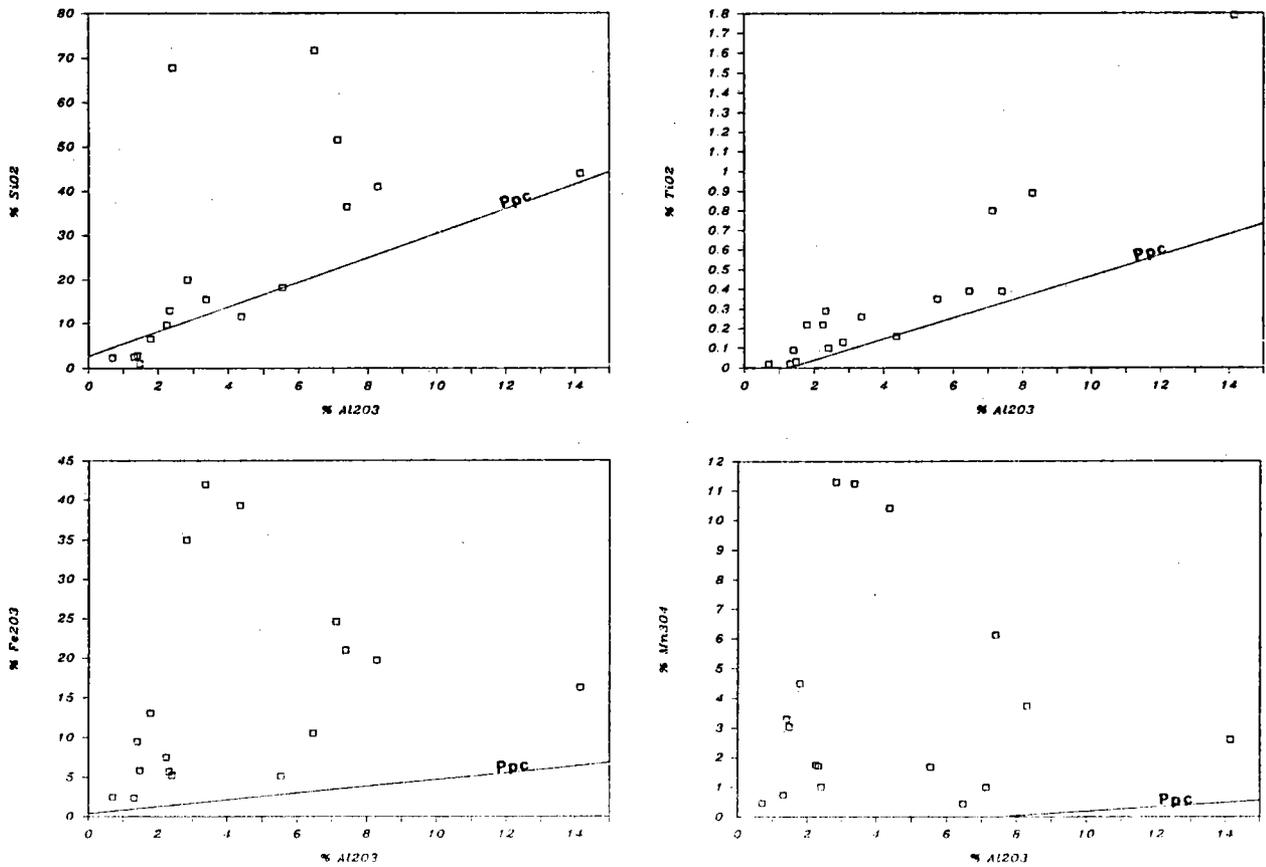


Fig. 58 - SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> en fonction de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Comparaison avec les argiles pélagiques du Pacifique (Ppc).

Le rapport TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se comporte comme à l'axe de la dorsale. Il est très proche et légèrement supérieur à la Ppc, à l'exception de trois échantillons (Sites 315 A, 294 et 37) pour lesquels ce rapport est élevé : 0,11 à 0,12 contre 0,06 en moyenne dans les autres sédiments. Ces enrichissements en TiO<sub>2</sub> proviennent, tout au moins pour les Sites 315 A et 294, des basaltes riches en TiO<sub>2</sub> sur lesquels ils reposent et dont on observe de nombreux fragments dans le sédiment du Site 294. En ce qui concerne le Site 37, aucune indication n'est donnée par Mac Manus *et al.* (1970) quant à la composition du basalte.

## 2 - LES CORRELATIONS ENTRE LES ELEMENTS MAJEURS ET MINEURS

Les coefficients de corrélations linéaires ont été calculés à partir des 17 échantillons. Seules les valeurs  $\geq 0,65$  ou  $\leq -0,65$  sont considérées comme significatives (cf fig. 59 et 60).

### a) Trois groupes d'éléments

- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, TiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, Rb, SiO<sub>2</sub> et Cr sont fortement et positivement corrélés entre eux, à l'exception de SiO<sub>2</sub> et Cr qui ne sont reliés qu'à MgO. A l'axe de la dorsale, cet ensemble était scindé en deux groupes : MgO, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Rb. Ces nouvelles relations traduisent des réorganisations d'éléments, probablement par la transformation des argiles et l'altération en argiles des verres basaltiques. La disparition de corrélation positive entre Na<sub>2</sub>O et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en est une conséquence. En effet, le sodium initialement adsorbé à partir de l'eau de mer par les oxyhydroxydes de fer est ensuite fixé par les argiles après enfouissement des sédiments. A travers ce groupe, on observe une séparation très nette de l'ensemble des argiles qu'il représente avec le reste des constituants du sédiment.

| Niv | CaCO <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Mn   | CaO | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Li   | Rb   | Sr   | Ba   | V    | Cr   | Co   | Ni   | Cu   | Zn   | As   | **                |                                |
|-----|-------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-------------------|------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------------|--------------------------------|
| **  | -.32              | +60              | +18              | +26                            | -.00                           | -.36 | +31 | -.34              | -.11             | +02                           | -.16 | -.18 | +03  | -.49 | -.18 | -.33 | +10  | -.18 | -.39 | -.28 | -.02 | +52               | Niv                            |
| **  | -.76              | -.50             | -.65             | -.68                           | -.43                           | -.88 | +99 | -.83              | -.77             | -.54                          | -.68 | -.72 | +74  | -.50 | -.28 | -.46 | -.59 | -.43 | -.53 | -.62 | -.39 | CaCO <sub>3</sub> |                                |
| **  | **                | **               | +47              | +59                            | +08                            | -.23 | +78 | -.77              | +49              | +52                           | -.01 | +22  | +48  | -.88 | +23  | -.32 | +45  | +01  | -.13 | -.07 | +06  | +13               | SiO <sub>2</sub>               |
| **  | **                | **               | **               | +94                            | +15                            | -.12 | +65 | -.48              | +52              | +77                           | +03  | +09  | +69  | -.49 | -.12 | -.10 | +46  | +08  | +02  | -.14 | -.02 | +14               | TiO <sub>2</sub>               |
| **  | **                | **               | **               | **                             | +26                            | -.02 | +82 | -.64              | +67              | +80                           | +11  | +28  | +76  | -.59 | -.00 | -.07 | +64  | +24  | +06  | -.01 | +12  | +19               | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | +89  | +43 | -.68              | +60              | +51                           | +85  | +73  | +49  | -.18 | +47  | +80  | +12  | +89  | +79  | +90  | +94  | +58               | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | +19 | -.42              | +49              | +28                           | +84  | +75  | +29  | +14  | +54  | +91  | +05  | +85  | +83  | +94  | +85  | +27               | Mn                             |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | -.87              | +80              | +75                           | +24  | +52  | +72  | -.79 | +20  | +04  | +66  | +42  | +28  | +24  | +36  | +14               | MgO                            |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | -.82             | -.75                          | -.53 | -.86 | -.71 | +74  | -.49 | -.27 | -.44 | -.59 | -.45 | -.53 | -.63 | -.40              | CaO                            |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | +89                           | +44  | +72  | +87  | -.53 | +52  | +25  | +35  | +60  | +52  | +50  | +47  | +16               | Na <sub>2</sub> O              |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | +35  | +45  | +97  | -.53 | +38  | +16  | +50  | +38  | +42  | +29  | +31  | +24               | K <sub>2</sub> O               |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | +71  | +31  | +03  | +68  | +85  | +03  | +75  | +67  | +90  | +85  | +35               | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | +39  | -.28 | +55  | +55  | +12  | +83  | +62  | +78               | Li                             |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | **   | -.48 | +41  | +16  | +60  | +36  | +42  | +29               | Rb                             |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | **   | **   | -.03 | +30  | -.39 | -.22 | -.07 | -.02              | Sr                             |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | **   | **   | +47  | +24  | +33  | +33  | +62  | +41               | Ba                             |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | -.04 | +68  | +75  | +87  | +77               | V                              |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **                | Cr                             |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | +15  | -.03 | +05  | +01  | -.02              | Co                             |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | +75  | +88  | +93  | +47               | Ni                             |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **                | Cu                             |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **                | Zn                             |
| **  | **                | **               | **               | **                             | **                             | **   | **  | **                | **               | **                            | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **   | **                | As                             |

Fig. 59 - Les coefficients de corrélations entre les éléments majeurs et mineurs.

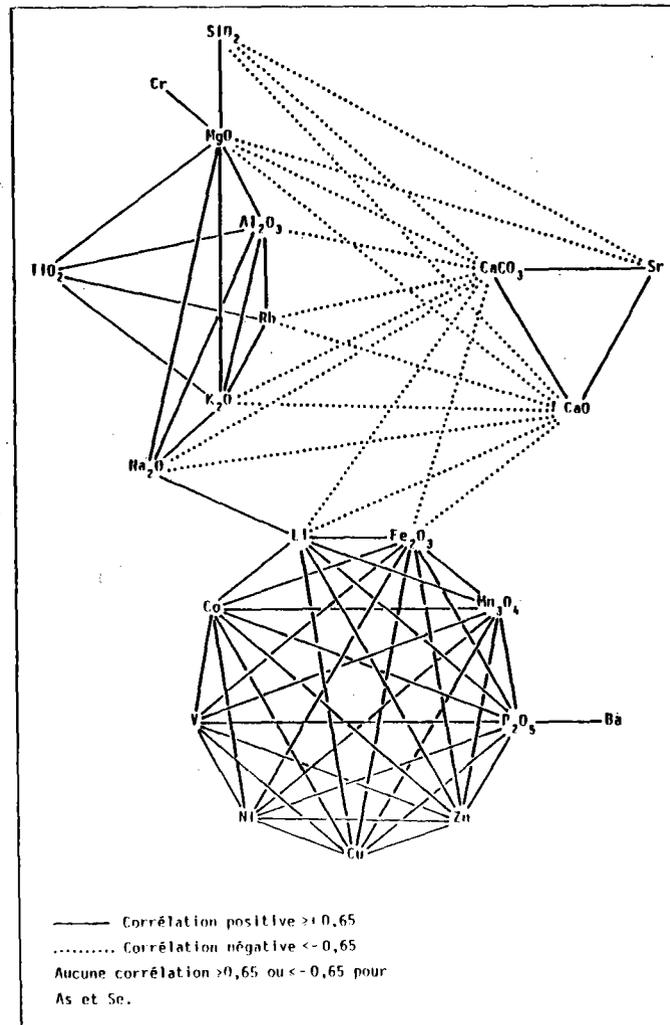


Fig. 60 - Diagramme des coefficients de corrélations.

- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Li, Cu, Zn, Ni, Co, V et Ba : tous les éléments de ce groupe sont corrélés positivement les uns avec les autres, à l'exception de Ba qui n'est lié qu'à P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et Li qui n'est pas corrélé avec Ni et V. Cet ensemble est relié au précédent seulement par la liaison positive Li-Na<sub>2</sub>O. Une partie du lithium semble donc liée aux argiles tandis que l'autre l'est aux oxyhydroxydes métalliques.

- CaCO<sub>3</sub>, CaO, Sr : ce groupe à liaisons positives internes est anticorrélé avec les argiles et les oxyhydroxydes métalliques. Il représente la fraction biogène calcaire.

b) L'arsenic et le sélénium

Ce sont les deux seuls éléments indépendants qui ne sont, ni corrélés entre eux, ni avec aucun autre. Les valeurs des coefficients de corrélations n'ont pas été calculées pour Se car cet élément est en proportions très faibles qui sont, en général, inférieures au pouvoir de détection pour la méthode employée. Seul l'échantillon du Site 471 en renferme 0,4 ppm. Il semble donc que cet élément ait une forte tendance à migrer lors de l'enfouissement des sédiments. En ce qui concerne l'arsenic, cette tendance est moins nette. En effet, les valeurs des coefficients de corrélations avec  $Fe_2O_3$  et  $P_2O_5$ , fortes à l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord sont néanmoins respectivement de 0,58 et 0,35 dans les sédiments forés à la base de la colonne sédimentaire. En valeurs absolues, les teneurs mesurées dans ces derniers montrent de plus grandes amplitudes (3 à 270 ppm) qu'à l'axe de la dorsale (5 à 162 ppm).

A ce stade de notre étude, nous avons donc comparé des sédiments métallifères actuels qui se forment dans un environnement hydrothermal (cf chapitre II) avec des sédiments métallifères anciens, occupant la même position stratigraphique, c'est-à-dire au contact du plancher océanique.

Les mesures de As montrent que cet élément est relativement stable au cours du temps, et que ces deux groupes de sédiments peuvent avoir une origine commune hydrothermale.

Se, en revanche, migre fortement au cours de l'enfouissement des sédiments, et pourrait donc constituer un indicateur d'hydrothermalisme uniquement dans les sédiments actuels. La présence de cet élément, bien qu'en faible quantité, au Site 471 confirmerait alors la théorie de Grechin *et al.* (1981) qui considèrent que la mise en place des sills de dolérite à cet endroit, a provoqué une circulation hydrothermale.

### 3 - LE RAPPORT (Fe + Mn)/Al (cf tableau XXIX)

Le rapport (Fe + Mn)/Al est compris entre 1,64 et 21,84. A l'exception du sédiment prélevé à l'axe de la dorsale, directement au pied d'un édifice hydrothermal inactif (CY 82-32), ces valeurs sont du même ordre à légèrement supérieures à celles de l'ensemble des sédiments prélevés à 12°50' Nord et 11°30' Nord, à l'axe de la dorsale.

| ECHANTILLON | (Fe+Mn)/Al |
|-------------|------------|
| DSDP 37     | 3.76       |
| DSDP 38     | 12.16      |
| DSDP 39     | 15.11      |
| DSDP 161 A  | 3.46       |
| DSDP 162    | 5.51       |
| DSDP 66.0   | 21.04      |
| DSDP 315 A  | 4.75       |
| DSDP 74     | 13.15      |
| DSDP 75     | 9.08       |
| DSDP 319-12 | 5.58       |
| DSDP 320 B  | 3.13       |
| DSDP 321    | 4.27       |
| DSDP 471    | 2.26       |
| DSDP 487    | 4.97       |
| DSDP 203    | 1.64       |
| DSDP 291    | 21.84      |
| DSDP 294    | 1.77       |

Tableau XXIX - Valeurs du rapport (Fe+Mn)/Al  
à CaCO<sub>3</sub> = 0.

### 4 - INFLUENCE DES TROIS POLES : HYDROTHERMAL, DETRITIQUE ET BASALTIQUE - DIAGRAMME DE BOSTROM (1970, 1973) (cf fig. 61)

La répartition des 17 échantillons sur le diagramme Fe/Ti = f(Al/Al+Fe+Mn) montre des tendances diverses. Par rapport à l'axe de la dorsale, à 12°50' Nord et 11°30' Nord, les sédiments forés à la base de la colonne sédimentaire semblent davantage marqués par les influences des pôles basaltique et hydrothermal. Cependant, la position de certains échantillons est identique à celles observées dans l'ensemble, dans la zone étudiée précédemment à l'axe de la dorsale.

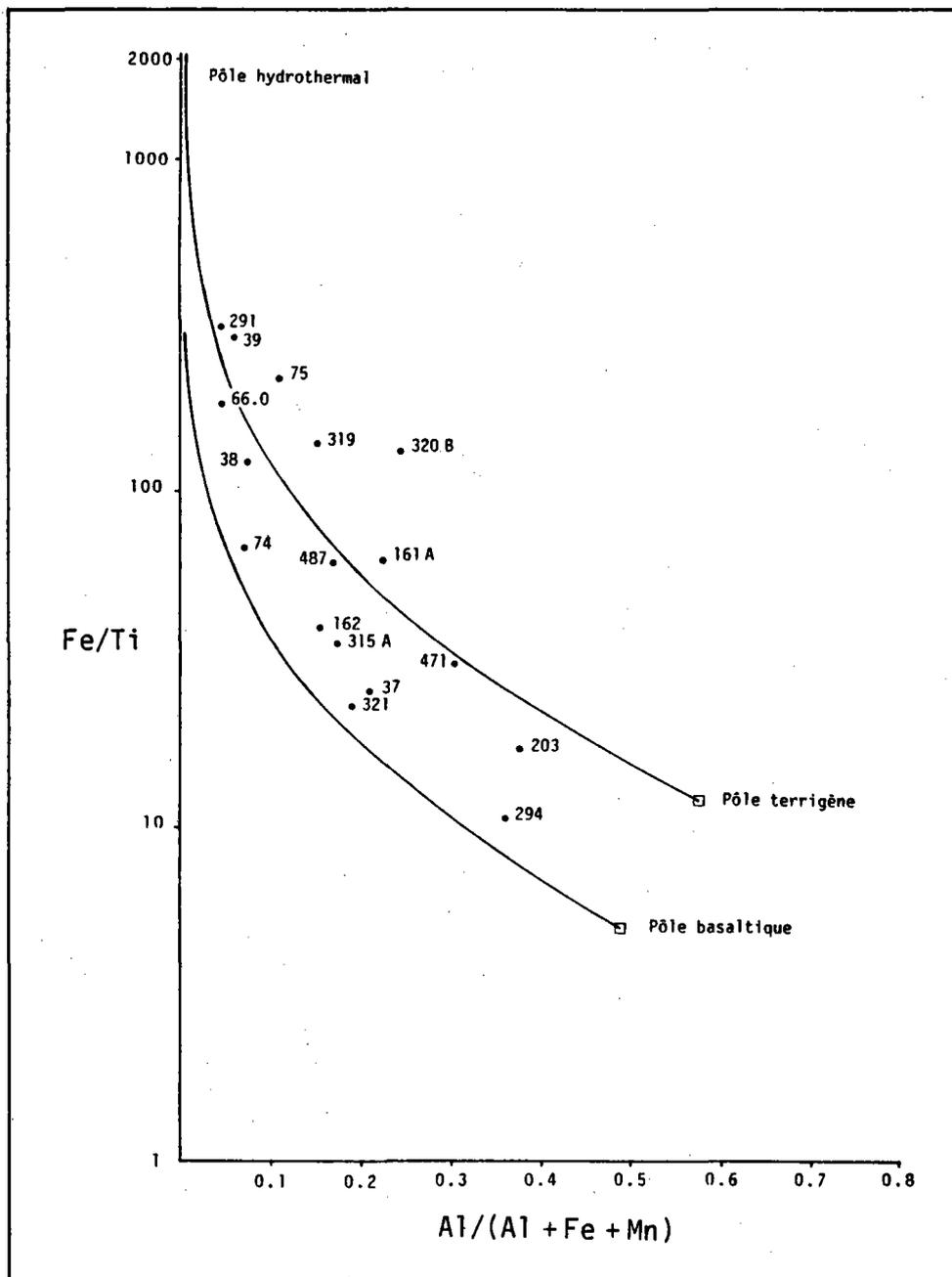


Fig. 61- Influence des trois pôles hydrothermal, basaltique et terrigène dans les sédiments.

## 5 - CONCLUSION

Les sédiments métallifères forés à la base de la colonne sédimentaire dans le Pacifique présentent des analogies avec ceux de la dorsale du Pacifique Est à 12°50' Nord et 11°30' Nord.

- Ils contiennent entre 2,34 % et 41,95 % de  $Fe_2O_3$  et entre 0,43 et 11,30 % de  $Mn_3O_4$ .

- Les teneurs en  $Al_2O_3$  sont faibles (0,69 à 14,15 %).

Ils se distinguent cependant des sédiments de l'axe par des teneurs en  $CaCO_3$  souvent très élevées (jusqu'à 90 %).

L'étude de la géochimie permet également de mettre en évidence des évolutions au sein des sédiments qui se traduisent par des réorganisations d'éléments entre les différentes phases minérales, ou bien par des migrations :

- $K_2O$ ,  $Na_2O$  et Rb sont maintenant fortement corrélés à  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  traduisant des réorganisations au sein des argiles dont certaines proviennent de l'altération des verres basaltiques.

- $Fe_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$ ,  $P_2O_5$ , Li, Cu, Zn, Ni, Co, V et Ba constituent un groupe dans lequel les corrélations sont très fortes. Cet ensemble représente les oxyhydroxydes et n'est relié au précédent que par Li, en partie associé aux argiles.

- Les teneurs en arsenic montrent que les sédiments étudiés ici peuvent avoir une origine hydrothermale au même titre que ceux de 12°50' Nord et 11°30' Nord à l'axe de la dorsale du Pacifique Est.

- Le sélénium migre fortement avec l'enfouissement des sédiments, et pourrait constituer un indicateur d'hydrothermalisme uniquement dans les sédiments métallifères actuels. Sa présence au Site 471 indiquerait un épisode hydrothermal provoqué par la mise en place du sill de dolérite sur lequel repose le sédiment étudié.

E - DISCUSSION ET CONCLUSION A L'ETUDE DES SEDIMENTS METALLIFERES FORES A  
LA BASE DE LA COLONNE SEDIMENTAIRE DANS LE PACIFIQUE

L'ensemble des sédiments métallifères que nous venons d'étudier dans ce chapitre, à l'exception de celui du Site 471, présente de nombreuses analogies avec ceux qui se forment actuellement à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, notamment par leur position stratigraphique juste au-dessus du basalte, leurs compositions minéralogique et chimique, et la présence fréquente de palagonite ou de verre basaltique indiquant une formation proche d'un milieu volcanique.

Ils présentent néanmoins, une évolution déjà amorcée en surface à l'axe de la dorsale, et qui se poursuit au cours de l'enfouissement des sédiments. On observe ainsi :

- une légère tendance à la cristallisation des phases amorphes ferrifères, sous forme de goethite, et plus rarement d'hématite (Site 294),
- une dissolution importante des organismes siliceux,
- des modifications de la phase argileuse se traduisant par :
  - . des néoformations de smectites "en voiles" ou lattées à partir des organismes siliceux, du verre volcanique et des particules détritiques d'illite-chlorite,
  - . l'apparition d'argiles interstratifiées irrégulières de type illite-smectite à partir de la transformation des smectites détritiques.
- une réorganisation des éléments chimiques en deux groupes distincts entrant dans la composition des argiles et des oxyhydroxydes métalliques,
- une relative stabilité de l'arsenic,
- une migration très nette du sélénium.

Les sédiments métallifères du Site 471

Ce niveau, de 2 cm seulement d'épaisseur, est particulier par rapport aux précédents, par sa composition minéralogique. Il renferme en effet, à la fois des oxyhydroxydes Fe-Mn et des sulfures, ce qui le rapproche des sédiments du type de ceux qui ont été observés sur les édifices hydrothermaux inactifs et altérés à l'axe de la dorsale du Pacifique Est.

Cependant, une telle origine semble improbable pour plusieurs raisons :

- Il repose sur un sill de diabase altérée dont la mise en place aurait provoqué selon Einsele *et al.* (1980) et Grechin *et al.* (1981), une manifestation hydrothermale secondaire par expulsion de l'eau interstitielle des sédiments traversés ; ce phénomène ayant entraîné l'altération de la diabase. La grande quantité de chlorite présente dans les sédiments métallifères et dans la diabase, attesterait cette altération.

- Les rapports  $Fe_2O_3/Al_2O_3$  (1,6) et  $Fe_2O_3/Mn_3O_4$  (24,6) sont faibles si on les compare à ceux de l'échantillon CY 82-32, prélevé au pied d'une cheminée hydrothermale inactive à l'axe de la dorsale et qui sont respectivement de 61 et 629.

- L'épaisseur du niveau est très faible (environ 2 cm).

- C'est le seul sédiment dans lequel le sélénium a été détecté.

Il a, en effet, migré dans les autres échantillons étudiés. Sa présence ici, bien qu'en faibles proportions, conforterait donc l'hypothèse de Einsele *et al.* (1980) et Grechin *et al.* (1981).

#### Signification géologique des sédiments métallifères de base dans le Pacifique

Les sédiments métallifères forés à la base de la colonne sédimentaire sont situés essentiellement le long d'une bande N.W à S.E dans le Pacifique oriental (cf fig. 56) et qui se prolonge selon une direction perpendiculaire N.E à S.W, à peu près au niveau de l'équateur. La partie centrale de cette zone est occupée par les niveaux métallifères pauvres en carbonates (< 50 %).

Le Pacifique centre et occidental se caractérise par l'absence de ces niveaux métallifères, à l'exception de quelques sites associés à des bassins d'arcs insulaires, c'est-à-dire dans les bassins de Lau, Shikoku et Ouest-Philippines. Une zone étroite, de forme irrégulière et dépourvue également de sédiments métallifères, s'étend le long de la bordure ouest du continent américain. Enfin, il n'existe pas de données de forages concernant le Pacifique Sud-Est (au-delà de 15° Sud environ).

L'observation de cette carte montre donc que les équivalents anciens des sédiments métallifères qui se déposent actuellement à l'axe de la dorsale du Pacifique Est sont prédominants au cours d'une période géologique qui s'étend du Crétacé inférieur (sans doute antérieure à la limite Aptien-Barrémien au Site 317) à l'Actuel. On peut donc supposer que l'hydrothermalisme est prépondérant durant toute cette période. La dissymétrie de cette zone, plus développée à l'Ouest qu'à l'Est de la dorsale du Pacifique Est, signifie probablement que le dépôt des produits hydrothermaux a été guidé par une circulation océanique profonde à sens Ouest dominant. Ce phénomène est d'ailleurs encore actuellement observé (Hékinian *et al.*, 1983 a ; Walter et Stoffers, 1985...).

L'épaisseur des sédiments métallifères est très variable (quelques centimètres à 70 m environ), ce qui indique des changements d'intensité de l'hydrothermalisme, et/ou des conditions particulières des courants de fond.

# CHAPITRE IV

LA DEPRESSION DE BAUER :  
ETUDE DE QUELQUES SEDIMENTS DE SURFACE

**CHAPITRE IV****LA DEPRESSION DE BAUER :  
ETUDE DE QUELQUES SEDIMENTS DE SURFACE  
ET JUSQU'A 210 cm DE PROFONDEUR**

L'existence de sédiments métallifères dans la dépression de Bauer, pose le problème de la spécificité de tels sédiments par rapport aux environnements hydrothermaux. Si l'origine hydrothermale des sédiments métallifères situés juste au-dessus du basalte, se conçoit parfaitement par migration de la croûte océanique à partir d'une dorsale, il n'en est pas de même pour les sédiments de surface de la dépression de Bauer. Il est donc nécessaire de procéder à une étude comparative des sédiments de cette dépression avec ceux que nous avons étudiés à 12°50' Nord et 11°30' Nord sur la dorsale du Pacifique Est. Une telle étude devrait permettre sinon de résoudre le problème, tout au moins d'apporter de nouveaux éléments à la discussion.

## I - CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA DEPRESSION DE BAUER ET LOCALISATION DES ECHANTILLONS

La dépression de Bauer s'étend de 5° Sud à 15° Sud environ, à 900 km à l'Est de la dorsale du Pacifique Est, et à 600 km à l'Ouest de la ride fossile des Galapagos (cf fig. 62).

La profondeur moyenne de ce bassin avoisine 4000 m, tandis que la profondeur de compensation de la calcite (CCD) est à 4200 m (Sayles et Bischoff, 1973). Ainsi, selon leur position par rapport à la CCD, les sédiments de la dépression de Bauer sont plus ou moins riches en carbonates.

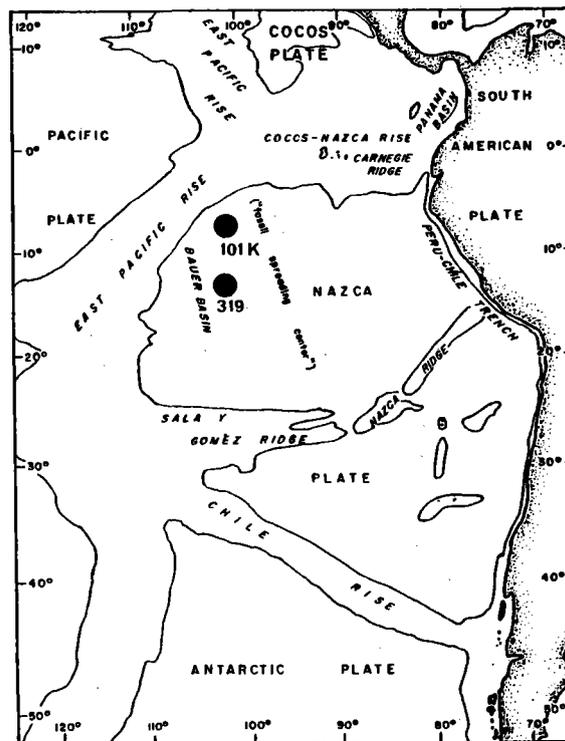


Fig. 62 - La dépression de Bauer (d'après Erlandson *et al.*, 1981) : localisation des échantillons étudiés.

Les sédiments étudiés ont été prélevés au cours du Leg 34 du Deep Sea Drilling Project par le Glomar Challenger (Site 319), au Sud-Est du bassin, et pendant la mission allemande GEOMETEP I (Carotte 101 K), au Nord du bassin, et à environ 600 km du Site 319 (cf fig. 62 et tableau XXX). Ces échantillons ont pu être obtenus grâce au programme international ODP (Site 319) et au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (GEOMETEP I - 101 K).

## II - LES ECHANTILLONS DE SEDIMENT EN SURFACE

Les sédiments de surface étudiés correspondent aux trois premiers centimètres du forage au Site 319 [319-1-0-(0-3)] et aux vingt premiers centimètres de la carotte GEOMETEP I - 101 K [101 K-(0-20)] .

### A - LES DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES (cf tableau XXX)

Ces deux échantillons sont des vases homogènes, de couleur brun-rouge foncé (5 YR 2/2), de teneur en eau élevée (222 et 306 %).

Les pourcentages en CaCO<sub>3</sub> sont de 0,5 % au Site 319, et 37 % au sommet de la Carotte 101 K. Ces valeurs sont donc faibles à moyennes.

| Echantillon         | Latitude   | Longitude    | Profondeur d'eau (m) | Couleur du sédiment humide | % de fraction > 63 µm | % CaCO <sub>3</sub> | Teneur en eau (%) |
|---------------------|------------|--------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| 319-1-0<br>(0-3 cm) | 13°01.04'S | 101°31.46'O  | 4296                 | 5 YR 2/2                   | 18,3                  | 0,5                 | 222               |
| 101 K<br>(0-20 cm)  | 7°53.141'S | 101°33.910'O | 4338                 | 5 YR 2/2                   | 1,1                   | 37                  | 306               |

Tableau XXX - Données générales concernant les échantillons de sédiments dans la dépression de Bauer.

## B - ETUDE DES SEDIMENTS EN FROTTIS : LES FACIES SEDIMENTAIRES

Les deux échantillons étudiés sont des vases d'argiles, mais tandis que l'échantillon 101 K (0-20) contient 14 % d'organismes (10 % de foraminifères, 2 % de diatomées, 2 % de radiolaires et silicoflagellés et des traces de coccolithes), l'échantillon 319-1-0(0-3) en est pratiquement dépourvu ; on y observe uniquement des traces de foraminifères et 2 % d'ichtyolithes. Ce dernier (319-1-0) est une vase d'argiles avec oxyhydroxydes (cf tableau XXXI, annexe II).

## C - ETUDE DE LA FRACTION GROSSIERE (> 63 µm) (cf tableau XXXII, annexe II)

Les pourcentages de fraction grossière sont respectivement de 18,3 % et 1,1 % pour les échantillons 319(1-0) et GOMETEP 101 K(0-20).

### 1 - LA FRACTION BIOGENE

- Les foraminifères : ils représentent 25 % de la fraction grossière dans l'échantillon 101 K(0-20). Au Site 319, ils ne sont observés qu'en traces. Dans les deux cas, ils montrent des signes importants de dissolution.

- Les organismes siliceux : ils n'existent que dans l'échantillon 101 K(0-20), sous forme de radiolaires (59 %) très bien à bien conservés, et des traces de spicules et d'acanthaires. Les radiolaires, dont les espèces sont très diversifiées ici, indiquent un âge quaternaire supérieur à actuel (déterminations A. Schaaf). Les diatomées sont absentes.

- Les ichtyolithes : ils sont observés au Site 319 où ils représentent 15 % de la fraction grossière.

## 2 - LA FRACTION NON BIOGENE

- Les agrégats bruns : leur proportion varie de 1 à 15 %.

- Les micronodules : ils varient également de 1 à 15 %. Leur aspect extérieur est différent de ceux que l'on observe à l'axe de la dorsale. Ils sont, en effet, complètement noirs et plus ou moins brillants, et non plus noirs à brun très sombre. Ceci est dû à leur composition chimique (cf plus loin, paragraphe III-C-2).

- La palagonite : elle est très abondante dans l'échantillon 319 (1-0) où elle représente 68 % de la fraction grossière. Par contre, elle n'est observée qu'en traces dans l'échantillon 101 K(0-20). La palagonite qui est observée ici, n'a pas le même aspect que dans les sédiments métallifères situés juste au-dessus du basalte et étudiés dans le chapitre précédent. Elle se présente en effet, sous forme de grains arrondis, translucides et orangés. Il semble que dans le cas présent, ces grains aient subi un transport important. Leur fort pourcentage au Site 319 peut indiquer une concentration par des courants de fond.

- La phillipsite : elle n'est observée qu'au Site 319 (1 %) sous forme de cristaux maclés souvent recouverts d'oxyhydroxydes de fer.

- Les feldspaths : ils sont rares.

## D - ETUDE DU SEDIMENT TOTAL AUX RAYONS X

L'observation des diagrammes de rayons X sur sédiment total montre de la calcite (biogène), de la halite et des feldspaths. Aucune autre phase n'est détectée.

## E - ETUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE (< 2 $\mu$ m)

### 1 - ETUDE DES DIAGRAMMES DE RAYONS X

L'observation des diagrammes de rayons X sur échantillons non traités, ne permet pas de reconnaître de phases argileuses cristallisées. Seules des traces de quartz et de feldspaths sont détectées.

Après avoir éliminé les produits amorphes, des smectites et des interstratifiés irréguliers de type illite-smectite sont mis en évidence. L'existence de ces derniers a seulement été soupçonnée dans les sédiments à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, à 12°50' Nord. En revanche, ils sont communs dans les sédiments métallifères situés juste au-dessus du basalte, où ils ont été interprétés comme des produits de transformation des smectites au cours de la diagenèse. Dans l'échantillon 319 (1-0), leur origine est différente par leur position en surface. Cette occurrence peut être le résultat d'une formation authigène, par transformation des smectites. L'observation de ce phénomène en surface traduirait un séjour plus long près de l'interface eau-sédiment, au cours duquel s'opérerait le remplacement des ions Mg par les ions K, aboutissant à la formation des interstratifiés. Les taux de sédimentation dans la dépression de Bauer sont en effet plus faibles qu'à l'axe de la dorsale du Pacifique Est. Dymond et Veeh (1975) et Dymond *et al.* (1976) indiquent une valeur de 0,11 cm/10<sup>3</sup> ans dans les huit premiers mètres de sédiment au Site 319.

### 2 - ETUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A TRANSMISSION

Les phases principales observées, sont des smectites de grande taille (quelques microns) en "voiles", dont l'origine est peut-être détritique.

Les autres argiles détritiques sont rares. Il s'agit de particules d'illite-chlorite dont les bords sont souvent flous, et qui montrent des néoformations de smectites lattées. Des traces de kaolinite sont éga-

lement observées, qui semblent instables dans le milieu.

Des smectites lattées néoformées à partir de smectites en "voiles", se présentent sous forme de particules en "étoiles" du même type que celles qui sont observées dans les sédiments situés au-dessus du basalte (cf chapitre III).

Enfin, des argiles fibreuses, allongées (cf planche VII, photo 6) sont quelquefois notées, dont la taille (de l'ordre du micron) est supérieure aux argiles lattées souvent abondantes dans les sédiments décrits dans le chapitre précédent, et qui ne dépassaient pas le dixième de micron.

#### F - LA GEOCHIMIE DES SEDIMENTS DE SURFACE DANS LA DEPRESSION DE BAUER

Les analyses chimiques des sédiments de la carotte GEOMETEP 101 K ont été effectuées au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) à Orléans. Celles de l'échantillon 319-1-0 (0-3) a été faite à l'Université de Bretagne Occidentale à Brest. En ce qui concerne l'arsenic et le sélénium, ils ont été dosés à l'IFREMER au Centre de Brest.

##### 1 - LES ELEMENTS MAJEURS (cf tableau XXXIII, annexe II)

La plupart des éléments majeurs ont des teneurs similaires à celles des sédiments de surface observés à l'axe de la dorsale du Pacifique Est à 12°50' Nord et 11°30' Nord. En particulier, les valeurs de  $Fe_2O_3$  sont comparables, mais varient néanmoins du simple au triple (8,6 % à 23,9 %) dans les deux échantillons 101 K(0-20) et 319-1-0(0-3) .

Au niveau du Site 319, on observe des valeurs fortes en  $Mn_3O_4$  (7,95 %) et  $P_2O_5$  (1,50 %). Pour ce deuxième élément, une seule valeur de cet ordre a été observée à l'axe de la dorsale, dans le sédiment prélevé directement au pied d'une cheminée hydrothermale inactive (CY 82-32). Celle-ci était liée à une forte teneur en  $Fe_2O_3$  (44 %). Au Site 319,  $P_2O_5$  est lié en grande partie aux ichtyolithes contenus dans la fraction grossière.

Les teneurs en  $Al_2O_3$  sont parmi les plus faibles qui ont été mesurées à l'axe de la dorsale, ce qui confirme un apport détritique peu important dans la dépression de Bauer.

## 2 - LES ELEMENTS MINEURS (cf tableau XXXIII, annexe II)

Les éléments mineurs ont également des valeurs souvent comparables à celles qui ont été mesurées dans les sédiments à l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord.

Quelques éléments cependant se distinguent :

- Ba se situe parmi les valeurs les plus élevées observées à l'axe (  $\geq$  3500 ppm et 4707 ppm).

- Ni est très élevé dans l'échantillon 319-1-0 (1138 ppm) et assez élevé dans l'échantillon 101 K (313 ppm). Cette caractéristique des sédiments de la dépression de Bauer a été signalée entre autres par Field *et al.* (1976) et Cronan (1980). Ce dernier auteur considère que Ni peut être adsorbé par les oxydes de fer et manganèse au cours de leur transport dans l'eau de mer vers la dépression de Bauer.

- As varie dans le même sens que le fer. Les teneurs mesurées présentent une grande amplitude (16,2 ppm à 115 ppm), et sont similaires à celles qui ont été mesurées à l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord.

- Se est inférieur à la limite de détection (  $<$  0,1 ppm), contrairement à ce qui a été observé à l'axe. Le sélénium semble très mobile d'après l'observation des sédiments métallifères forés juste au-dessus du basalte (cf chapitre III). Cet élément ne permet donc pas d'attribuer une origine hydrothermale aux sédiments de la dépression de Bauer, mais montre cependant qu'il n'est pas d'origine hydrogène. Dans ce cas, en effet, les sédiments de la dépression de Bauer devraient renfermer du sélénium étant donné leur contact prolongé avec l'eau de mer dans la dépression elle-même

(du fait du faible taux de sédimentation), soit éventuellement au cours de leur transport à partir de l'axe de la dorsale.

### 3 - INFLUENCE DES TROIS POLES BASALTIQUE, TERRIGENE et HYDROTHERMAL

Les échantillons de surface se situent sur la courbe qui relie les pôles détritique et hydrothermal (cf fig. 63). D'après ce diagramme, l'influence de ce dernier pôle serait plus importante que pour les sédiments étudiés précédemment à l'axe de la dorsale du Pacifique Est à 12°50' Nord et 11°30' Nord (cf fig. 44, chapitre II). Les apports détritique et basaltique sont plus faibles dans la dépression de Bauer. La position plus proche du pôle hydrothermal des sédiments de cette dépression, semble être due à ces apports plus faibles. Néanmoins, on peut calculer à nouveau, dans les sédiments à l'axe de la dorsale, les rapports Fe/Ti et Al/(Al + Fe + Mn) en considérant des valeurs de Ti et Al, égales à celles des sédiments de la dépression de Bauer, afin de soustraire les apports détritique et volcanique plus importants à l'axe de la dorsale. Le diagramme obtenu à partir des échantillons de surface (sauf pour CY 82-32 dont les teneurs en Ti et Al sont inférieures à celles dans la dépression de Bauer) montre que les sédiments en provenance de ces deux environnements se confondent (cf fig. 64). D'après ce diagramme, les sédiments de la dépression de Bauer sont donc autant influencés par les manifestations hydrothermales que ceux de l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord à contributions basaltique et détritique égales. Cependant, ce mode de représentation ne prend pas en compte d'autres sources éventuelles pouvant aboutir à un enrichissement en fer et manganèse. Ceci amène à conclure que les sédiments métallifères de surface dans la dépression de Bauer peuvent, par leur composition chimique, avoir une origine hydrothermale. Mais ils peuvent également être enrichis par d'autres mécanismes tels que la dissolution des organismes calcaires ou l'adsorption à partir de l'eau de mer qui aboutiraient à des facies sédimentaires similaires aux sédiments formés à l'axe de la dorsale.

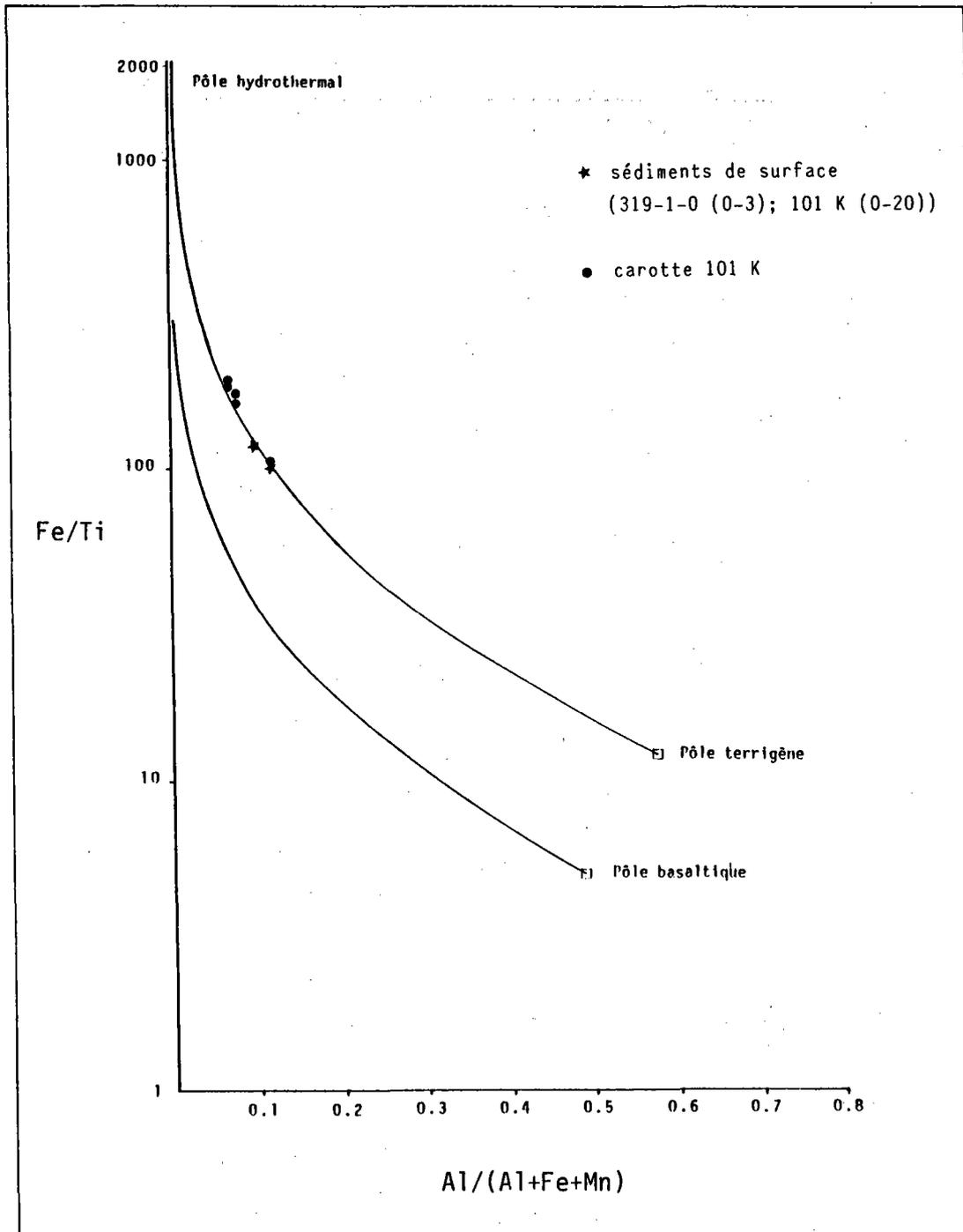


Fig. 63 - Influence des pôles basaltique, terrigène et hydrothermal dans les sédiments de la dépression de Bauer : le diagramme Fe/Ti en fonction de Al/(Al+Fe+Mn).

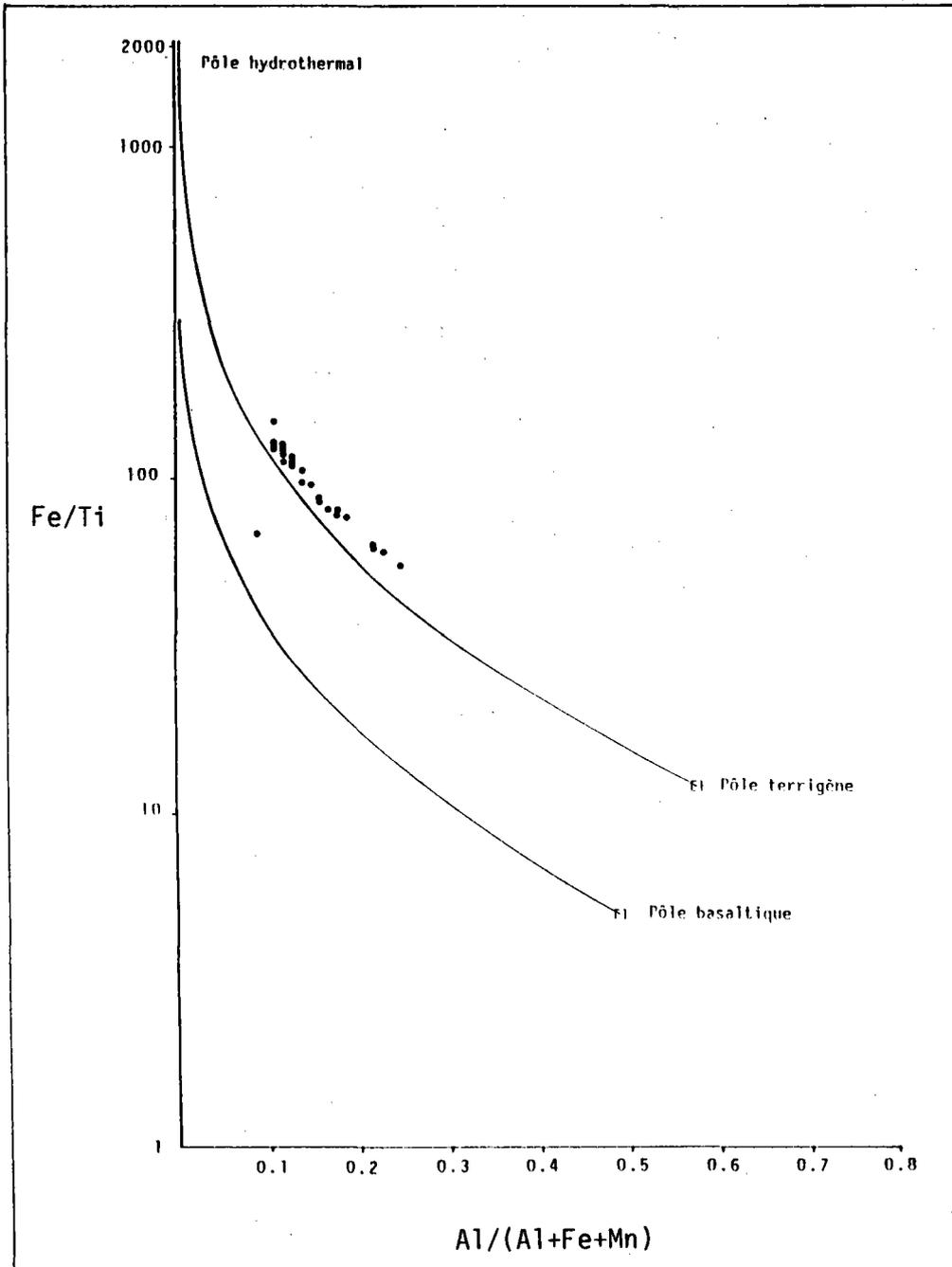


Fig. 64 - Le diagramme Fe/Ti en fonction de Al/(Al+Fe+Mn) : comparaison entre les sédiments de surface de la dépression de Bauer et ceux de l'axe de la dorsale à 12°50' N et 11°30' Nord, à contributions basaltique et détritique égales.

## G - CONCLUSION

Les sédiments métallifères de surface étudiés dans la dépression de Bauer présentent des points communs essentiels avec ceux de la dorsale du Pacifique Est, à 12°50' Nord et 11°30' Nord.

- Ce sont des sédiments fins, homogènes et de couleur brune. Ils sont constitués par un matériel amorphe dominant sous forme d'oxyhydroxydes de fer et de manganèse.
- Leurs teneurs en arsenic sont similaires à celles des sédiments à l'axe de la dorsale.

Quelques faits les distinguent néanmoins des sédiments de l'axe :

- des teneurs en  $Mn_3O_4$ , Ni et Ba plus élevées,
- des teneurs en sélénium inférieures à la limite de dosabilité (< 0,1 ppm),
- un apport détritique faible se traduisant par des teneurs en  $Al_2O_3$  encore plus basses qu'à l'axe, et la rareté des argiles de type illite-chlorite,
- l'existence d'argiles interstratifiées de type illite-smectite aux rayons X, d'argiles fibreuses de grande taille (environ 1  $\mu m$ ) et de smectites "en étoiles" néoformées à partir de smectites "en voiles" au M.E.T.
- la présence de grains arrondis de palagonite atteignent 68 % de la fraction grossière au Site 319.

## III - ETUDE DES DEUX PREMIERS METRES DE SEDIMENTS : LA CAROTTE GEOMETEP-I-101 K

### A - LES DONNEES SEDIMENTOLOGIQUES (cf fig. 65)

La carotte GEOMETEP-I - 101 K, longue de 217 cm, a été prélevée par un carottier de type Kasten Corer à section carrée (15 x 15 cm).

Elle est homogène, et ne présente pas de stratifications évidentes. Le sédiment est une vase de couleur brun-rouge foncé avec quelques taches de bioturbation plus claires, jaunes entre 40 et 50 cm de profondeur.

Les teneurs en eau sont supérieures à 300 % (306 à 469 %). Elles sont donc très élevées.

Le pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  décroît très rapidement. Il varie de 37 % à 1 % en moyenne au-delà de 40 cm.

#### B - ETUDE DES SEDIMENTS EN FROTTIS

Les facies sédimentaires passent rapidement d'une vase d'argiles avec foraminifères à une vase d'argiles et traces d'oxyhydroxydes puis à des vases d'argiles avec oxyhydroxydes (cf tableau XXXI, annexe II).

Les pourcentages d'organismes calcaires et siliceux (foraminifères, diatomées et radiolaires) diminuent très fortement pour les premiers et de façon moins importante pour les seconds.

La palagonite et les ichtyolithes sont présents dans des proportions faibles (1 % au maximum).

#### C - OBSERVATION DE LA FRACTION GROSSIERE ( > 63 $\mu\text{m}$ )

Les sédiments de cette carotte sont des vases très fines. Le pourcentage de fraction grossière ne dépasse pas 13 %, et est lié essentiellement aux micronodules contenus dans cette fraction (cf fig. 65 et tableau XXXII, annexe II).

##### 1 - LES CONSTITUANTS BIOGENES

- Les foraminifères disparaissent complètement au-delà de 20 cm. Cette disparition rapide et leur mauvais état de conservation suggèrent que la dissolution est limitée à l'interface eau-sédiment, au niveau de laquelle se situe la CCD.

- Les radiolaires, très abondants dans les 50 premiers centimètres (40 à 59 %), ne sont plus observés qu'en traces entre 80 et 90 cm et représentent ensuite 1 % de la fraction grossière. Leur état de conservation, bon à très bon en surface, devient progressivement mauvais en profondeur. A ce niveau, aucune détermination de faune n'a pu être faite.

- Les diatomées sont observées en traces entre 40 et 50 cm. Dans les autres niveaux, elles sont absentes.

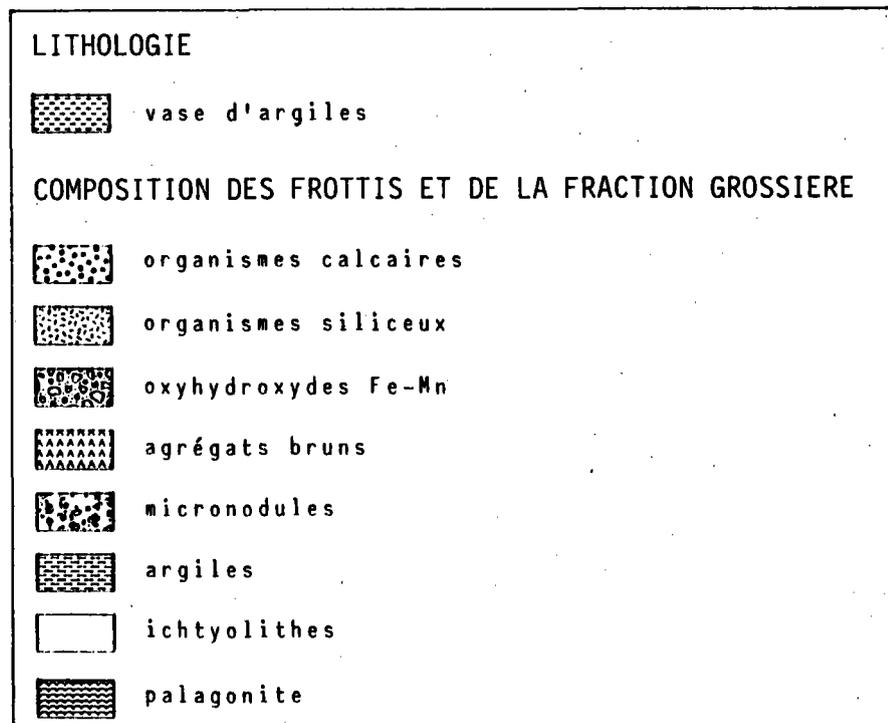
- Les ichtyolithes sont notés à partir de 40 cm et représentent ensuite au maximum 1 % de la fraction grossière.

## 2 - LES CONSTITUANTS NON BIOGENES

Ils sont au nombre de trois :

- Les agrégats bruns sont présents à tous les niveaux dans des proportions qui varient de 11 à 40 %.

- Les micronodules sont particulièrement abondants sauf en surface. Ils atteignent 49 % de la fraction grossière entre 80 et 90 cm. Dymond et Eklund (1978) ont analysé ces microconcrétions dans un sédiment provenant de la dépression de Bauer, à 4,80 m de profondeur. Leur composition chimique est caractérisée par un rapport Fe/Mn inférieur à 1,



Légende de la figure 65

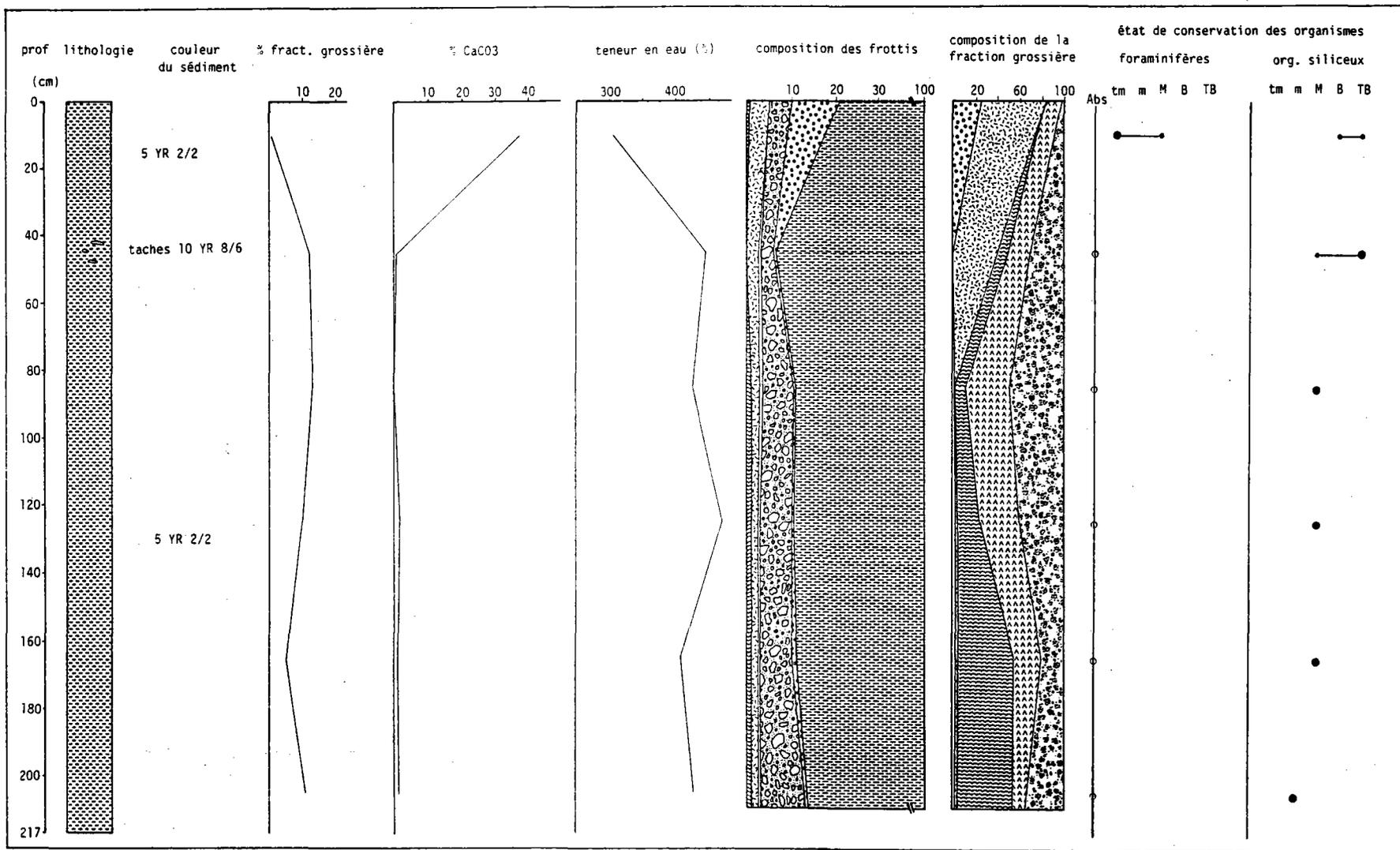


Fig. 65 - La carotte Geometep I - 101 K.

contrairement aux micronodules qui ont été analysés à l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord (cf tableau XXXIV). Leur teneur en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reste quand même plus élevée que dans les micronodules décrits par Lallier-Vergès et Clinard (1983) et qui ne sont pas associés à des sédiments métallifères.

- La palagonite se présente sous forme de grains arrondis et orangés. Sa proportion augmente avec la profondeur et atteint 50 % de la fraction grossière.

|                                | micronodules | sédiment associé |
|--------------------------------|--------------|------------------|
| Na <sub>2</sub> O              | 0,29 %       | 0,90 %           |
| MgO                            | 3,34         | 4,55             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,74         | 2,64             |
| SiO <sub>2</sub>               | 15,11        | 38,8             |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,51         | -                |
| SO <sub>3</sub>                | 0,18         | -                |
| K <sub>2</sub> O               | 0,29         | 1,02             |
| CaO                            | 2,05         | 1,12             |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,17         | -                |
| MnO <sub>2</sub>               | 36,21        | 8,48             |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25,41        | 24,3             |
| NiO                            | 0,61         | 0,909            |
| CuO                            | 0,21         | 0,11             |
| Fe/Mn                          | 0,78         | 3,18             |

Tableau XXXIV - Analyses chimiques de micronodules et de sédiments associés dans la dépression de Bauer (d'après Dymond et Eklund, 1978 - Echantillon A II 54-14 (467-478 cm) - 9° Sud, 102° Ouest).

#### D - ETUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE ( < 63 µm)

L'observation des diagrammes de rayons X de la fraction argileuse, montre une légère évolution vers une meilleure cristallinité des phases. Le diagramme de l'échantillon 101 K (200-210 cm) présente des réflexions nettes, mais cependant faibles, d'argiles de type smectites et

interstratifiés irréguliers déjà observés en surface. Après le traitement d'élimination des amorphes, ces réflexions se confirment et s'intensifient.

L'illite, la chlorite et la kaolinite sont absentes.

## E - LA COMPOSITION CHIMIQUE DES SEDIMENTS DE LA CAROTTE 101 K

### 1 - LES ELEMENTS MAJEURS (cf fig. 66 et tableau XXXIII, annexe II)

$\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MgO}$  et  $\text{K}_2\text{O}$  ont des valeurs similaires à celles qui ont été observées à l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord. En revanche,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  présente des teneurs plus élevées (5,2 % à 7,35 %) qui se manifestent sous forme de micronodules abondants.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{TiO}_2$  sont, au contraire, en pourcentages plus faibles et reflètent les apports terrigène et volcanique discrets au niveau de la dépression de Bauer.

### 2 - LES ELEMENTS MINEURS (cf fig. 66 et tableau XXXIII, annexe II)

Parmi les éléments mineurs, on observe quelques caractéristiques particulières par rapport aux sédiments étudiés précédemment à l'axe :

- Cu et Ni ont des teneurs élevées qui varient respectivement de 788 à 930 ppm pour le cuivre, et de 413 à 616 ppm pour le nickel. Ces éléments sont vraisemblablement concentrés dans les micronodules dont la présence est prépondérante dans la dépression de Bauer.

- Zn, Ba et V ont des teneurs qui correspondent aux valeurs parmi les plus élevées mesurées à l'axe de la dorsale. Cependant, les teneurs en baryum ne sont pas connues précisément car elles atteignent la limite de dosage supérieure qui est de 3500 ppm pour cet élément, par la technique utilisée.

- Les teneurs en As augmentent en profondeur, mais restent néanmoins moyennes (40 à 49 ppm). Elles sont du même ordre de grandeur qu'à l'axe de la dorsale.

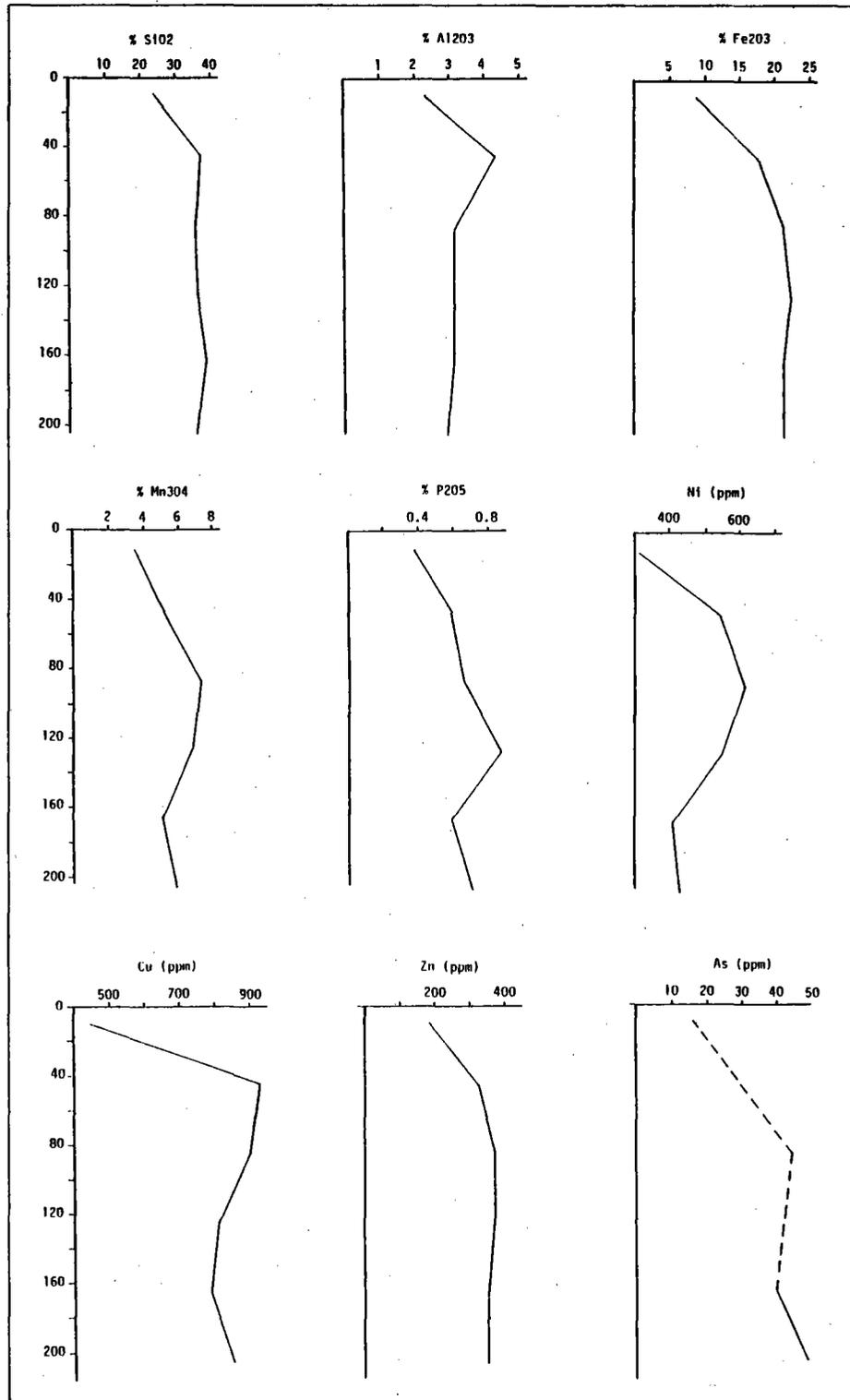


Fig. 66 - Variation des principaux éléments chimiques dans la carotte Geometep I - 101 K.

- Le sélénium est inférieur à 0,1 ppm comme en surface.

### 3 - LE DIAGRAMME Fe/Ti EN FONCTION DE Al/(Al+Fe+Mn) (cf fig. 63)

Par rapport aux sédiments de surface, on observe une légère migration des points vers le pôle hydrothermal. Ce phénomène est dû à des augmentations plus importantes des teneurs en fer et surtout en manganèse, comparativement à l'aluminium et au titane. Il semble donc que les influences basaltique et détritique soient encore plus faibles à ces niveaux.

### F - CONCLUSION

- La carotte GEOMETEP I - 101 K est caractérisée par une homogénéité dans la texture et la couleur.

- Au niveau des constituants, on observe :

- . une augmentation en profondeur du pourcentage d'oxyhydroxydes et de la palagonite ;
- . un pourcentage important de micronodules dont le rapport Fe/Mn est inférieur à 1 et supérieur à celui des autres micronodules du Pacifique qui ne sont pas associés à des sédiments métallifères ;
- . une disparition des organismes calcaires (foraminifères) et siliceux (radiolaires et diatomées) ;
- . une meilleure cristallinité des phases argileuses ;
- . la rareté des constituants détritiques.

- D'un point de vue chimique, les sédiments de cette carotte sont riches en  $Mn_3O_4$ , Ni, Cu et pauvres en  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  et Se. Les deux éléments :  $Fe_2O_3$  et As présentent des teneurs similaires à celles mesurées à l'axe de la dorsale du Pacifique Est à 12°50' Nord et 11°30' Nord.

#### IV - DISCUSSION ET CONCLUSION

Les études diverses menées par les nombreux auteurs et les observations dans ce travail des sédiments au Site 319 et de la carotte GEOMETEP I - 101 K, montrent la complexité du problème concernant le mode de formation des sédiments métallifères de surface dans la dépression de Bauer.

Néanmoins, une synthèse de ces résultats tend à prouver que quatre phénomènes principaux concourent à l'élaboration de tels sédiments :

- L'hydrothermalisme. Des mesures isotopiques du plomb ont été effectuées par Dymond *et al.* (1973) qui ressemblent à celles des basaltes tholéitiques des rides médio-océaniques (Dasch, 1974). Une contribution hydrothermale semble donc possible dans les sédiments superficiels de la dépression de Bauer. Heath et Dymond (1977) et Lyle (1981), d'après Lonsdale (1976), considèrent que le matériel hydrothermal parvient dans la dépression par le Nord, grâce à une circulation des eaux de fond traversant la dorsale du Pacifique Est au niveau des zones de fractures vers 6° Sud (cf fig. 67). En effet, si l'apport hydrothermal venait directement par l'Ouest, on devrait observer une diminution progressive des pourcentages en fer et manganèse, en particulier, entre la dorsale du Pacifique Est et la dépression de Bauer. Boström et Peterson (1966, 1969) et Dasch (1974) montrent que ce n'est effectivement pas le cas ; le fer et le manganèse atteignent des valeurs maximum au niveau de l'axe de la dorsale et dans la dépression de Bauer, tandis que les valeurs sont faibles entre les deux domaines (cf fig. 68). D'autre part, Heath et Dymond (1981) observent une augmentation des teneurs en fer et manganèse dans les sédiments de surface à l'Ouest de la dorsale du Pacifique Est par rapport aux sédiments sous-jacents. Ceci indiquerait soit un changement de l'activité hydrothermale, soit une modification récente (Holocène) vers l'Ouest du régime des courants transportant les produits hydrothermaux. Cette dernière hypothèse est renforcée par le fait que ces auteurs constatent un appauvrissement en fer et manganèse dans les sédiments superficiels de la dépression de Bauer. Une telle variation a effectivement été observée dans ce travail.

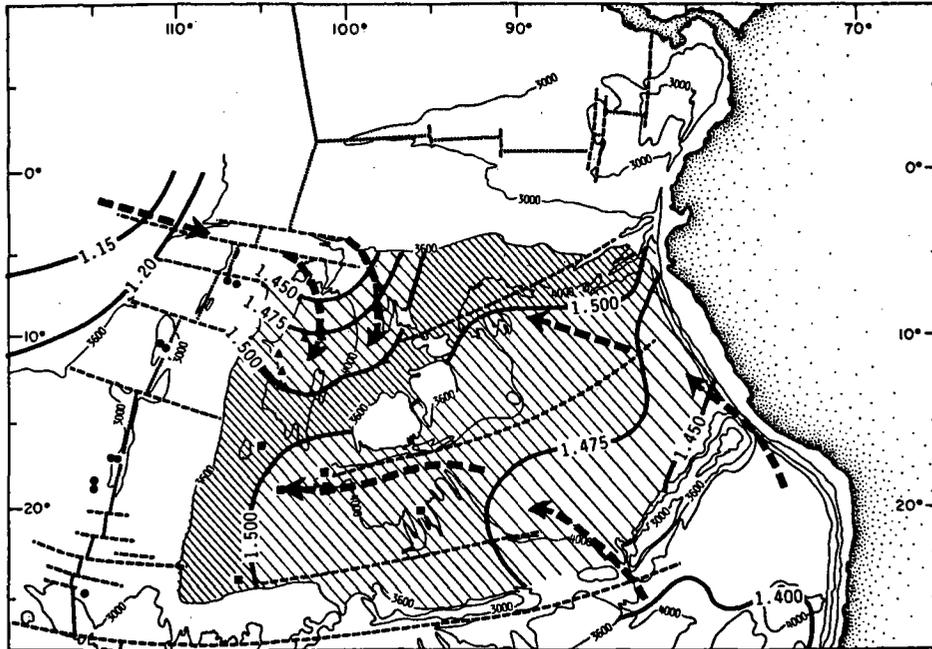


Fig. 67 - Circulation des masses d'eau profondes (3800 m) établie à partir des isothermes. Les zones hachurées sont limitées par les isothermes 1,500 - 1,475 et 1,450°C (Lonsdale, 1976).

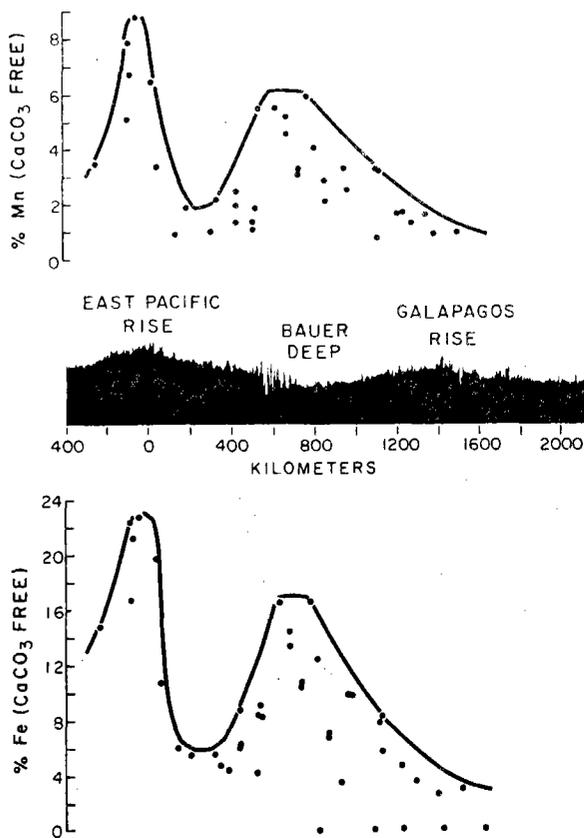


Fig. 68 - Distribution du fer et du manganèse (à  $\text{CaCO}_3 = 0$ ) le long d'une coupe joignant la dorsale du Pacifique Est à la dorsale fossile des Galapagos, passant par la dépression de Bauer (Dasch, 1974).

Les vingt premiers centimètres de la carotte GEOMETEP I - 101 K sont plus pauvres en fer et manganèse que les niveaux plus profonds.

On peut ainsi imaginer, que dans un passé récent (environ 180 000 ans au maximum, si on considère que le taux de sédimentation est  $0,11 \text{ cm}/10^3 \text{ ans}$  (Dymond et Veeh, 1975 ; Dymond *et al.*, 1976) et que l'amorce de la diminution des teneurs en fer et manganèse se fait vers 20 cm de profondeur), des courants qui initialement étaient orientés vers l'Est, se sont établis ensuite vers l'Ouest, privant la dépression de Bauer de l'apport direct de produits hydrothermaux. Néanmoins, il est probable qu'un apport de cette nature existe toujours indirectement et donc de façon moins sensible par les courants de fond arrivant du Nord et décrits par Lonsdale (1976).

- L'apport biogène. Il est incontestable que celui-ci joue un rôle prépondérant dans la genèse des sédiments de surface de la dépression de Bauer, dans la mesure où :

- . leur richesse en carbonates est directement liée à la profondeur de leur dépôt, qui avoisine la CCD,
- . les organismes calcaires montrent des signes importants de dissolution et disparaissent à moins de un mètre de profondeur dans la colonne sédimentaire lorsque le dépôt se fait tout près de la CCD (Sayles et Bischoff, 1973),
- . les organismes siliceux sont également dissous,
- . des analyses de tests de foraminifères, de radiolaires et de frustules de diatomées révèlent des teneurs souvent élevées notamment en fer et en manganèse (Martin et Knauer, 1973 ; Arrhénius, 1963 et Turékian, 1965 dans Hoffert, 1980), mais également en cuivre et nickel (Boström *et al.*, 1974).

Néanmoins, Hoffert (1980) estime que des teneurs significatives en fer et manganèse ne sont obtenues qu'à condition qu'il y ait des transports successifs des produits de dissolution, aboutissant à des concentrations.

- L'apport hydrogène. Cette influence intervient probablement à deux niveaux : par un contact prolongé des sédiments avec l'eau de mer, du fait du taux de sédimentation faible mesuré, et au moment du transport

des particules hydrothermales vers la dépression de Bauer. Les oxyhydroxydes de fer et de manganèse peuvent adsorber des éléments de l'eau de mer comme Cu, Ni et  $Mn_3O_4$ , expliquant leurs teneurs plus élevées dans la dépression de Bauer qu'à l'axe de la dorsale. Boström *et al.* (1974) considèrent, en effet, que ces éléments peuvent également avoir une origine hydrogène. La composition des micronodules traduit bien l'importance du manganèse dans la dépression de Bauer. Ils ont un rapport Fe/Mn inférieur à 1, contrairement aux micronodules de la dorsale du Pacifique Est (cf chapitre II). Ceci signifie qu'il existe soit un fractionnement entre le fer et le manganèse hydrothermaux, soit une source supplémentaire, au moins en partie hydrogène pour le manganèse.

L'absence de sélénium dans les sédiments de la dépression de Bauer constitue peut-être une preuve indirecte de l'importance de l'apport hydrogène ou biogène. Il est, en effet, présent dans les sédiments à l'axe de la dorsale. Dans la dépression de Bauer, on peut dire qu'il a disparu ou bien qu'il n'a jamais existé. Dans l'un et l'autre cas, il n'a de toute façon, pas une origine hydrogène. Il est donc vraisemblablement hydrothermal. De plus, son absence traduit soit une dilution importante de la source hydrothermale, soit une instabilité de cet élément qui a déjà été observée dans les sédiments forés à la base de la colonne sédimentaire (cf chapitre III).

Le problème de l'arsenic est plus complexe car les sédiments montrent des teneurs similaires à celles observées dans les sédiments à l'axe de la dorsale. Il est cependant probable qu'il ait en partie une origine hydrogène à cause de la dilution importante des produits hydrothermaux, qui, si elle n'était pas compensée par d'autres apports, aboutirait également à la diminution des teneurs en arsenic. Ainsi, les oxyhydroxydes de fer et de manganèse d'origine biogène, formés dans la dépression de Bauer peuvent adsorber l'arsenic de l'eau de mer qui s'ajoute éventuellement à l'arsenic associé aux produits hydrothermaux.

- Les apports détritiques et volcaniques sont faibles dans la dépression de Bauer et évitent, en cela, une dilution du caractère "métallifère" des sédiments.

CONCLUSION

Par rapport aux sédiments étudiés à l'axe de la dorsale du Pacifique Est à 12°50' Nord et 11°30' Nord, les sédiments de surface de la dépression de Bauer sont caractérisés par :

- des teneurs en  $Fe_2O_3$  et As similaires,
- des teneurs plus élevées en  $Mn_3O_4$ , Cu et Ni,
- une absence de sélénium.

Ils sont le résultat de l'interaction de plusieurs phénomènes :

- une influence biogène, engendrée par la dissolution des organismes libérant des éléments comme Fe, Mn, Cu, Ni...
- une influence hydrogène prépondérante dans l'apport de Mn et sans doute d'une partie de Cu, Ni et As.
- une influence hydrothermale arrivant par le Nord de la dépression et diluée par les autres sources d'apports.
- des influences volcanique et détritique faibles.

# CHAPITRE V

UN EXEMPLE DE SEDIMENTS METALLIFERES ASSOCIES A  
UN COMPLEXE OPHIOLITIQUE:  
LES TERRES D'OMBRE DE CHYPRE

CHAPITRE V  
UN EXEMPLE DE SEDIMENTS METALLIFERES  
ASSOCIES A UN COMPLEXE OPHIOLITIQUE :  
LES TERRES D'OMBRE DE CHYPRE

INTRODUCTION

L'île de Chypre est caractérisée par la présence de deux types de "sédiments métallifères" appelés "terres d'ombre" et "ocres" et qui sont associés au complexe ophiolitique du Troodos. Par cet exemple, nous allons tenter une comparaison avec ceux que nous avons pu observer dans le Pacifique, et en particulier avec ceux qui se déposent actuellement vers 13° Nord à l'axe de la dorsale du Pacifique Est.

I - CARACTERISTIQUES GENERALES DU COMPLEXE OPHIOLITIQUE DU TROODOS

Le complexe ophiolitique du Troodos se situe dans la partie Sud-Ouest de Chypre. Deux autres structures morphologiques caractérisent l'île ; il s'agit, au Nord, de la chaîne de Kyrénia, le segment le plus externe de l'arc alpin, et, au Sud, de la plaine de Mésaoria à sédiments pliocène et pléistocène non déformés (Elderfield *et al.*, 1972) (cf fig. 69).

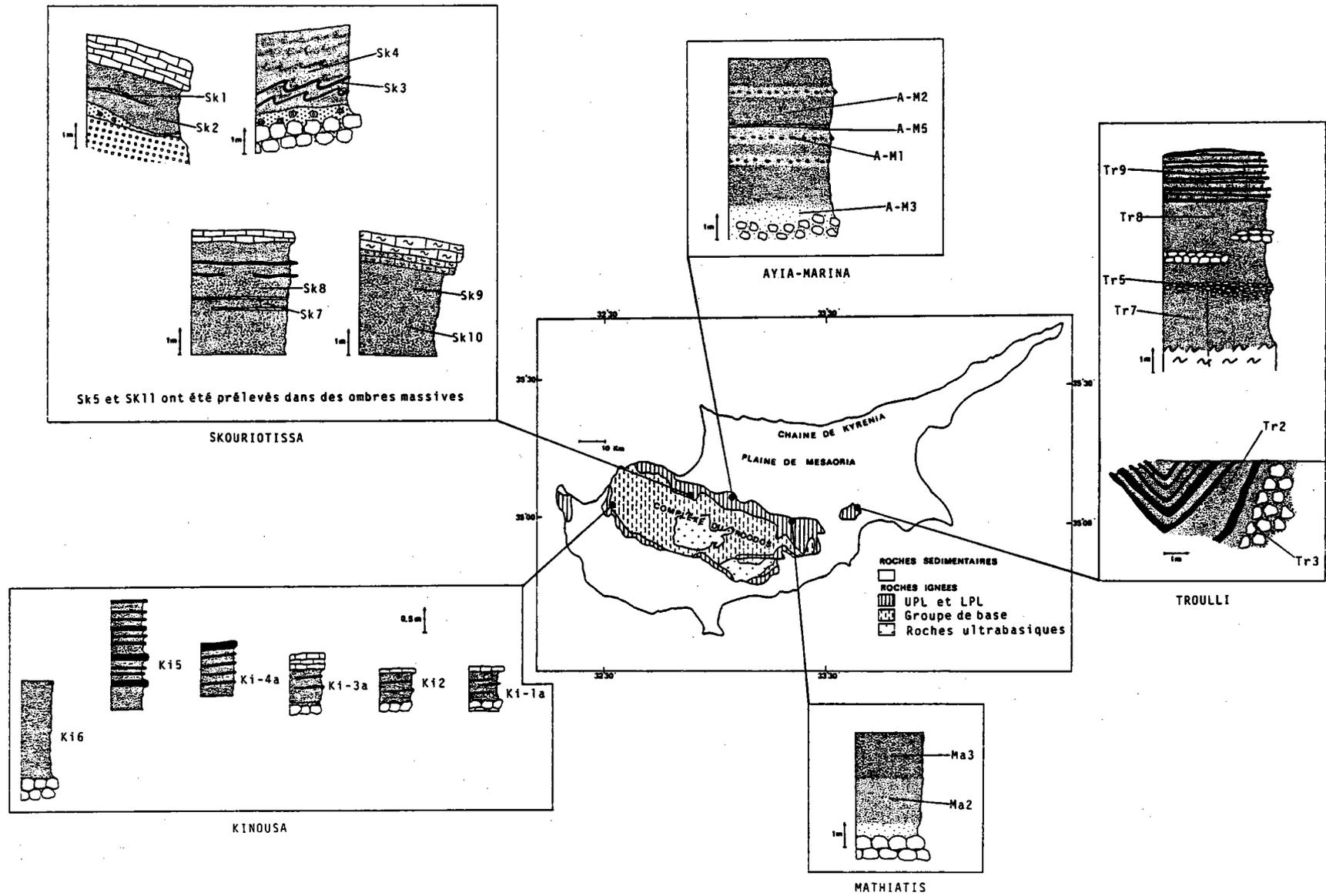
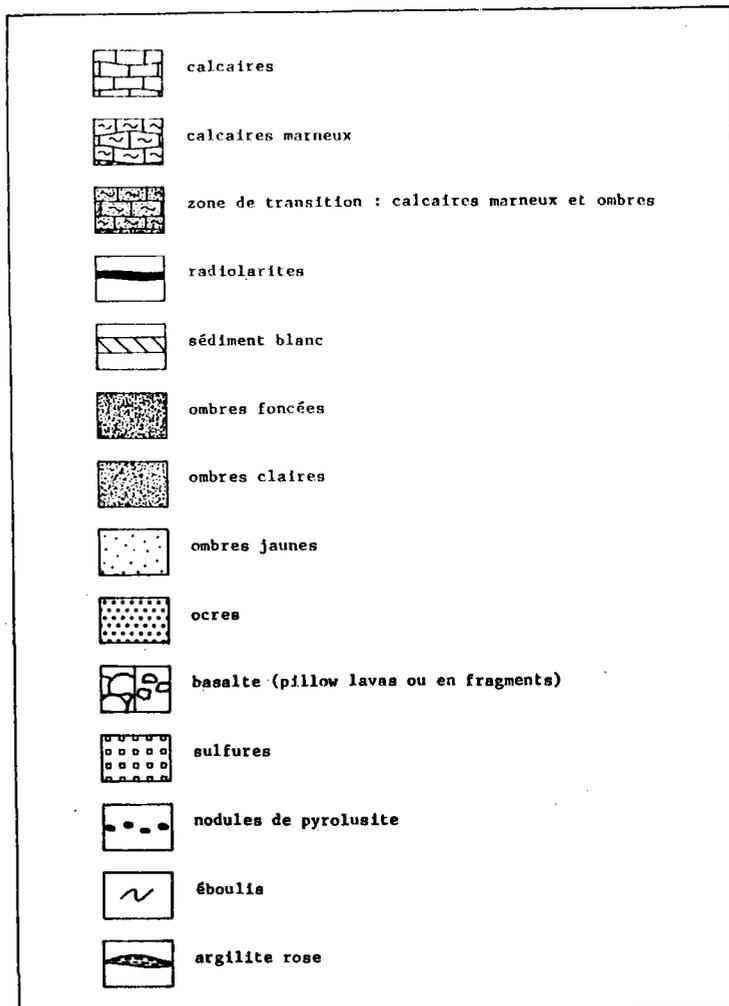


Fig. 69- Le complexe ophiolitique du Troodos à Chypre : localisation des prélèvements de terre d'ombre dans les cinq carrières (Ayia-Marina, Troulli, Mathiatis, Kinoussa, Skouriotissa. Logs établis d'après les données de J.M. Boirat).

Le complexe du Troodos est constitué par un ensemble de roches ultrabasiqes (complexe plutonique) entouré par un complexe filonien basique (Groupe de Base). Celui-ci est, à son tour, surmonté par les basaltes divisés en Pillow-Lavas Inférieurs et Supérieurs (LPL et UPL).

Ce complexe, d'âge crétacé supérieur, correspond probablement à un fragment de croûte soulevé de l'océan Téthysien. L'hypothèse la plus souvent admise est que cette croûte s'est formée au niveau d'une ride d'accrétion, analogue à celles du Pacifique ou de l'Atlantique (Gass, 1968 ; Elderfield *et al.*, 1972 ; Robertson et Hudson, 1973 ; Robertson, 1976 ; Robertson et Fleet, 1976 ; Guillemot, 1979 ; Guillemot et Nestoroff, 1979 ; Oudin *et al.*, 1981 ; Robertson et Boyle, 1983...), tandis que d'autres auteurs envisagent une formation dans un environnement d'arc insulaire (Miyashiro, 1973 ; Robinson *et al.*, 1983 ; Schmincke *et al.*, 1983).



Légende de la figure 69

Ce fragment de croûte océanique est surmonté par des formations minéralisées qui se situent soit sur les LPL, soit sur les UPL. Ce sont des lentilles de sulfures massifs localisées dans des dépressions à la surface des LPL. Celles-ci sont en général situées à l'aplomb d'une zone bréchifiée contenant des sulfures disséminés et se prolongeant vers le bas, dans les LPL.

Les dépôts sont recouverts par les ocres dont l'extension est limitée à celle des lentilles de sulfures et sont interprétées comme une altération sous-marine de ces derniers (Constantinou et Govett, 1972 ; Robertson et Boyle, 1983). Elles sont caractérisées par des teneurs élevées en fer et des teneurs faibles en manganèse et sont constituées essentiellement par des oxydes et des sulfures.

Les terres d'ombre sont généralement séparées des ocres par les UPL non minéralisés et souvent altérés sur lesquels elles reposent à la faveur de dépressions et forment des affleurements qui dépassent rarement 150 mètres de long et 10 mètres d'épaisseur (Constantinou et Govett, 1972). Selon la définition de ces auteurs, les terres d'ombre sont caractérisées par leur richesse en fer et en manganèse et par une absence de sulfures. Elles représentent le membre inférieur de la formation de Perapedhi (Campanien) qui passe progressivement vers le haut à des radiolarites, des argilites à radiolaires et des argiles (Robertson et Hudson, 1973). Des calcaires et des marnes recouvrent cette formation (formation de Lefkara, Pakhna et Koronia du Maestrichtien au Miocène supérieur) (Constantinou et Govett, 1972).

Au sein des ombres et des ocres, sont souvent observés des niveaux de tufs, cherts, calcaires, radiolarites et de conglomérats à blocs de pillows emballés dans une matrice ferromanganésifère.

## II - LOCALISATION ET DESCRIPTION DES ECHANTILLONS DE TERRES D'OMBRE

Les 27 échantillons de terres d'ombre dont nous avons pu disposer, ont été prélevés par J.M. Boirat du département Géologie Marine du BRGM dans le cadre d'une mission G.I.S., CNRS-BRGM en 1983. L'étude des

terres d'ombre associées aux Upper Pillow Lavas constituait l'un des objectifs de cette mission.

Cinq carrières ont été échantillonnées (cf fig. 69) :

- . Kinousa (Ki) : les prélèvements ont été effectués sur six affleurements selon une coupe Est-Ouest ;
- . Skouriotissa (Sk) : les échantillons proviennent de six affleurements répartis sur le pourtour de la carrière ;
- . Ayia-Marina (A.M) : les ombres, localisées dans une dépression formée par les UPL, ont été échantillonnées selon une coupe verticale ;
- . Mathiatis (Ma) : les ombres reposent sur des laves très altérées et ont été prélevées selon une coupe verticale ;
- . Troulli (Tr) : l'ensemble des échantillons proviennent de deux affleurements.

### III - COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES TERRES D'OMBRE

La composition minéralogique des terres d'ombre a été déterminée à partir des diagrammes de rayons X sur le sédiment total et la fraction argileuse ( $< 2 \mu\text{m}$ ).

#### A - LES DIAGRAMMES DE RAYONS X SUR SEDIMENT TOTAL

Les diagrammes de rayons X indiquent le caractère amorphe important des terres d'ombre. Seules quelques phases, le plus souvent mal cristallisées, ont été reconnues. Les oxydes de manganèse, dont la nature exacte n'a pu être déterminée sont le plus souvent présents dans les terres d'ombre. Le quartz est également fréquent, à l'état de traces. La goethite est moins commune que les oxydes de manganèse et semble mal cristallisée.

L'apatite est abondante dans deux échantillons (Sk 10 et A.M 1). Enfin de la chlorite a été détectée dans l'échantillon Sk 1.

Les petits nodules centimétriques inclus dans l'échantillon A.M 1 sont constitués de pyrolusite ( $\text{MnO}_2$ ). Elderfield *et al.* (1972) mentionnent l'existence de tels nodules dans les ombres et précisent

qu'ils varient en taille de 1 cm à 1 m environ. Nous verrons plus loin, que le manganèse a tendance à migrer, de la base des ombres vers leur sommet, et particulièrement à Ayia-Marina. Ce phénomène est peut-être responsable de la formation de ces nodules de pyrolusite.

#### B - LES DIAGRAMMES DE RAYONS X SUR LA FRACTION ARGILEUSE

Dans les niveaux de terres d'ombre massives, les seules argiles présentes sont des smectites qui diffractent à 15 Å sans traitement, se déplacent à 17 Å après traitement à l'éthylène-glycol, puis à 10 Å après chauffage. Ces observations rejoignent celles de Desprairies et Lapierre (1973).

Dans les niveaux de terres d'ombre associés à des radiolarites, les argiles sont plus variées.

Les smectites sont toujours présentes, et sont mélangées à de l'illite, et parfois de la chlorite. Des zéolites (clinoptilolite-mordénite), du quartz et de la goethite sont aussi observés dans certains cas.

#### IV - ETUDE GEOCHIMIQUE DES TERRES D'OMBRE

Les terres d'ombre de Chypre sont caractérisées avant tout, par des teneurs en carbonates très faibles, voisines de zéro. Deux échantillons (Sk 10 et A.M 1) présentent des valeurs fortes de CaO qui ne sont pas dues aux carbonates. Elles s'associent à des teneurs élevées en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et correspondent à des concentrations particulières d'apatite dont l'existence a été confirmée par les rayons X.

Si les sédiments ne sont pas carbonatés, ils sont en revanche, siliceux dans certains cas (> 40 % SiO<sub>2</sub>). Ce sont des radiolarites ferromanganésifères (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 6,8 à 23 % et Mn<sub>3</sub>O<sub>3</sub> de 0,24 à 5,47 %) dont la couleur est rose à brun clair.

Les autres échantillons de terres d'ombre, plus "pures", se distinguent par des couleurs sombres d'autant plus noires qu'ils contiennent

| ECHANTILLON | SiO2<br>(%) | TiO2<br>(%) | Al2O3<br>(%) | Fe2O3<br>(%) | Mn3O4<br>(%) | MgO<br>(%) | CaO<br>(%) | Na2O<br>(%) | K2O<br>(%) | P2O5<br>(%) | P.Feu<br>(%) | H2O-<br>(%) | Total<br>(%) |
|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| Ma 2        | 13.00       | 0.21        | 3.92         | 55.40        | 10.03        | 1.24       | 1.80       | 0.17        | 0.56       | 1.22        | 12.95        | 2.19        | 100.50       |
| Ma 3        | 16.40       | 0.23        | 4.49         | 44.00        | 16.10        | 1.31       | 2.65       | 0.16        | 0.69       | 1.20        | 13.08        | 2.59        | 100.31       |
| Sk 2        | 15.10       | 0.10        | 3.64         | 51.50        | 13.50        | 1.54       | 1.02       | 0.34        | 0.59       | 0.70        | 13.41        | 1.27        | 101.44       |
| Sk 4        | 15.84       | 0.16        | 4.35         | 44.97        | 18.95        | 1.39       | 0.83       | 0.33        | 0.80       | 0.35        | 12.95        | 1.31        | 100.92       |
| Sk 5        | 16.70       | 0.15        | 4.36         | 45.38        | 16.16        | 1.43       | 1.08       | 0.77        | 0.84       | 0.35        | 13.27        | 1.47        | 100.49       |
| Sk 8        | 19.80       | 0.19        | 5.70         | 41.20        | 14.12        | 1.74       | 1.39       | 0.70        | 1.03       | 0.50        | 14.04        | 1.45        | 100.43       |
| Sk 9        | 24.15       | 0.24        | 6.37         | 35.00        | 14.25        | 2.03       | 1.70       | 0.97        | 1.28       | 0.98        | 13.43        | 2.51        | 100.40       |
| Sk 10       | 15.37       | 0.15        | 3.83         | 45.50        | 1.60         | 1.13       | 12.27      | 0.81        | 0.55       | 7.65        | 11.98        | 1.24        | 100.84       |
| Sk 11       | 11.16       | 0.11        | 3.50         | 43.65        | 23.40        | 0.98       | 0.63       | 0.91        | 0.63       | 0.45        | 14.97        | 1.31        | 100.39       |
| Tr 5        | 19.20       | 0.15        | 4.41         | 55.70        | 1.45         | 1.68       | 3.79       | 0.35        | 0.65       | 0.68        | 13.16        | 2.44        | 101.42       |
| Tr 7        | 12.95       | 0.10        | 3.24         | 58.50        | 7.04         | 1.42       | 1.52       | 0.41        | 0.38       | 0.70        | 13.48        | 2.00        | 99.74        |
| Tr 8        | 24.60       | 0.21        | 5.77         | 38.00        | 14.19        | 2.12       | 2.19       | 0.51        | 0.90       | 1.00        | 12.56        | 2.48        | 101.85       |
| KI 6        | 19.90       | 0.11        | 3.56         | 40.90        | 19.10        | 1.32       | 1.23       | 0.33        | 0.56       | 0.30        | 12.72        | 2.33        | 100.03       |
| A-M 1       | 15.45       | 0.15        | 3.38         | 22.17        | 8.05         | 1.21       | 22.17      | 1.01        | 0.56       | 15.75       | 9.44         | 1.81        | 99.34        |
| A-M 2       | 24.50       | 0.24        | 5.33         | 39.35        | 12.38        | 1.99       | 1.04       | 0.88        | 0.91       | 0.55        | 12.52        | 3.09        | 99.69        |
| A-M 3       | 18.30       | 0.18        | 3.90         | 62.25        | 1.26         | 1.55       | 0.81       | 0.66        | 0.80       | 0.50        | 11.92        | 2.67        | 102.03       |
| A-M 5       | 25.30       | 0.26        | 5.50         | 37.50        | 13.51        | 2.06       | 1.14       | 1.01        | 0.90       | 0.51        | 12.34        | 3.26        | 100.03       |
| Sk 1        | 37.00       | 0.91        | 15.50        | 8.81         | 0.37         | 3.61       | 1.49       | 1.10        | 2.16       | 0.25        | 7.85         | 7.19        | 99.05        |
| Sk 3        | 54.65       | 0.70        | 13.88        | 10.71        | 0.24         | 4.80       | 1.23       | 0.71        | 2.21       | 0.45        | 8.77         | 8.10        | 98.35        |
| Tr 2        | 50.00       | 0.54        | 10.55        | 15.36        | 4.65         | 3.71       | 1.56       | 0.86        | 1.91       | 0.55        | 9.59         | 6.49        | 99.28        |
| Tr 3        | 53.30       | 0.40        | 11.40        | 14.00        | 2.76         | 3.74       | 1.88       | 1.15        | 1.94       | 0.50        | 9.81         | 5.95        | 100.88       |
| Tr 9        | 75.80       | *           | 6.12         | 6.81         | 1.41         | 1.71       | 1.39       | 0.51        | 0.94       | 0.10        | 6.03         | 2.76        | 100.82       |
| KI 1a       | 41.30       | 0.28        | 8.94         | 23.00        | 5.47         | 4.47       | 1.49       | 0.28        | 1.27       | 0.35        | 12.20        | 5.49        | 99.05        |
| KI 2        | 57.70       | 0.51        | 12.04        | 8.80         | 2.27         | 3.33       | 1.23       | 1.07        | 2.56       | 0.35        | 9.65         | 4.20        | 99.51        |
| KI 3a       | 58.40       | 0.57        | 11.27        | 9.42         | 1.94         | 3.49       | 2.21       | 0.62        | 2.02       | 0.20        | 9.48         | 6.08        | 100.12       |
| KI 4a       | 72.00       | 0.25        | 6.69         | 6.85         | 2.11         | 2.08       | 1.11       | 0.38        | 1.11       | 0.20        | 6.79         | 5.46        | 99.58        |
| KI 5        | 54.00       | 0.37        | 10.18        | 15.50        | 3.59         | 2.72       | 2.12       | 0.95        | 1.50       | 0.30        | 9.27         | 7.64        | 100.50       |

| ECHANTILLON | Li<br>(ppm) | Rb<br>(ppm) | Sr<br>(ppm) | Ba<br>(ppm) | V<br>(ppm) | Cr<br>(ppm) | Co<br>(ppm) | Ni<br>(ppm) | Cu<br>(ppm) | Zn<br>(ppm) | As<br>(ppm) | Se<br>(ppm) |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ma 2        | 10          | 20          | 1088        | 1176        | 657        | 40          | 162         | 218         | 735         | 302         | *           | *           |
| Ma 3        | 10          | 20          | 590         | 1115        | 516        | 35          | 89          | 245         | 820         | 298         | *           | *           |
| Sk 2        | 11          | 21          | 445         | 633         | 575        | 50          | 273         | 470         | 938         | 1049        | *           | *           |
| Sk 4        | 11          | 26          | 144         | 1155        | 493        | 47          | 150         | 391         | 871         | 316         | *           | *           |
| Sk 5        | 13          | 27          | 1070        | 615         | 509        | 44          | 155         | 346         | 1050        | 365         | *           | *           |
| Sk 8        | 16          | 34          | 586         | 1134        | 484        | 55          | 196         | 460         | 953         | 354         | *           | *           |
| Sk 9        | 19          | 49          | 603         | 1118        | 477        | 47          | 171         | 588         | 877         | 370         | *           | *           |
| Sk 10       | 11          | 23          | 261         | 0           | 468        | 79          | 45          | 437         | 741         | 404         | *           | *           |
| Sk 11       | 14          | 23          | 278         | 485         | 517        | 46          | 127         | 415         | 987         | 419         | *           | *           |
| Tr 5        | 12          | 23          | 66          | 0           | 761        | 79          | 87          | 183         | 662         | 389         | *           | *           |
| Tr 7        | 11          | 17          | 738         | 462         | 825        | 56          | 154         | 240         | 853         | 391         | *           | *           |
| Tr 8        | 14          | 31          | 308         | 595         | 515        | 56          | 151         | 316         | 880         | 370         | *           | *           |
| KI 6        | 13          | 22          | 161         | 89          | 216        | 42          | 96          | 361         | 939         | 331         | 4           | < 0.1       |
| A-M 1       | 11          | 14          | 546         | 371         | 292        | 34          | 52          | 216         | 581         | 223         | *           | *           |
| A-M 2       | 12          | 30          | 505         | 662         | 463        | 38          | 95          | 409         | 970         | 304         | *           | *           |
| A-M 3       | 8           | 18          | 88          | 15          | 750        | 44          | 89          | 397         | 735         | 320         | *           | *           |
| A-M 5       | 12          | 28          | 527         | 708         | 480        | 38          | 101         | 390         | 944         | 283         | *           | *           |
| Sk 1        | 40          | 65          | 115         | 82          | 107        | 117         | 85          | 147         | 420         | 374         | 5           | < 0.1       |
| Sk 3        | 31          | 75          | 112         | 89          | 107        | 60          | 42          | 116         | 167         | 169         | *           | *           |
| Tr 2        | 26          | 74          | 218         | 260         | 199        | 49          | 82          | 198         | 392         | 210         | *           | *           |
| Tr 3        | 27          | 66          | 214         | 196         | 285        | 64          | 73          | 133         | 300         | 138         | *           | *           |
| Tr 9        | 16          | 31          | 98          | 61          | 141        | 37          | 48          | 89          | 157         | 100         | 46          | < 0.1       |
| KI 1a       | 35          | 36          | 321         | 920         | 154        | 99          | 49          | 289         | 598         | 351         | *           | *           |
| KI 2        | 44          | 88          | 227         | 176         | 162        | 61          | 71          | 141         | 190         | 132         | *           | *           |
| KI 3a       | 36          | 74          | 160         | 93          | 186        | 81          | 91          | 137         | 171         | 132         | *           | *           |
| KI 4a       | 31          | 38          | 68          | 134         | 142        | 44          | 66          | 119         | 161         | 94          | *           | *           |
| KI 5        | 26          | 57          | 122         | 213         | 243        | 72          | 99          | 202         | 425         | 199         | *           | *           |

Tableau XXXV - Analyses chimiques des échantillons de terres d'ombre à Chypre.

du manganèse et d'autant plus ocre-jaune, qu'ils contiennent du fer. Ces deux éléments atteignent régulièrement des valeurs particulièrement élevées (jusqu'à 62,25 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et 23,4 %  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ), comparativement à celles qui ont été mesurées dans les sédiments à l'axe de la dorsale du Pacifique Est (cf tableau XXXV) et plus généralement dans le Pacifique.

#### COMPORTEMENT DU MANGANESE

Il s'opère une dissociation de comportement entre le fer et le manganèse (coefficient de corrélation faible : cf fig. 70 et 71) qui n'était pas observée jusqu'à présent. En effet, parmi les sédiments qui ont été prélevés selon une coupe verticale, on observe une migration du manganèse vers les couches supérieures, qui se traduit par un appauvrissement en cet élément dans les couches inférieures. Ce phénomène est particulièrement bien illustré à Ayia-Marina où A.M 3, situé à la base de la série, juste au-dessus des basaltes, renferme 62,25 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et 1,26 %  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ , contre 22,17 % à 39,35 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et 8,05 % à 13,51 %  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  dans les niveaux supérieurs. C'est le cas également pour les terres d'ombre prélevées à la base des coupes à Troulli (Tr 5 et Tr 7), Skouriotissa

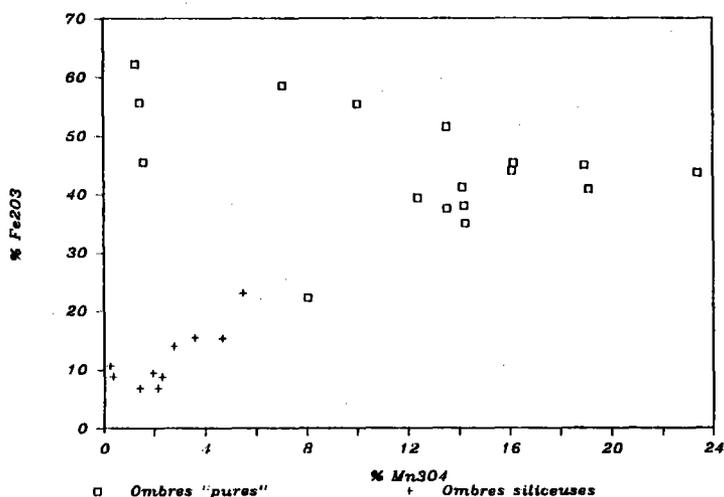


Fig. 70 - Variations du fer en fonction du manganèse dans les terres d'ombre de Chypre.

(Sk 10) et Mathiatis (Ma 2). Cette migration du manganèse est vraisemblablement postérieure au dépôt des ombres (Robertson, 1975). En effet, l'étude des sédiments métallifères forés par le Glomar Challenger à la base de la colonne sédimentaire a montré qu'il n'y a pas de dissociation du fer et du manganèse (cf chapitre III). Celle-ci a donc dû intervenir à une époque ultérieure. Nous pouvons ainsi proposer l'hypothèse suivante : après l'émersion du complexe ophiolitique, l'exposition à l'air libre et les conditions climatiques régnant à Chypre ont pu provoquer une altération secondaire des sulfures et des ocres situés sur les LPL. En effet, les précipitations hivernales peuvent s'infiltrer jusqu'à ces niveaux, et créer des conditions acides par réaction avec les sulfures. Au moment de la saison chaude, il y aurait une remontée par évaporation de ces fluides acides, dont le passage à travers les UPL serait favorisé par leur nature bréchifiée et altérée. Ceci aurait pour effet, de créer des conditions faiblement réductrices à la base des ombres, mais suffisantes pour remobiliser le manganèse.

#### LES CORRELATIONS ENTRE LES ELEMENTS CHIMIQUES

Les coefficients de corrélation linéaire ont été calculés à partir des 27 échantillons, sauf pour  $P_2O_5$  (25 échantillons),  $TiO_2$  (26) et Zn (26) qui présentent des valeurs anormales pour un ou deux échantillons. Les corrélations sont considérées comme significatives pour des valeurs supérieures à 0.60 ou inférieures à -0.60 (cf fig. 71 et 72). Les coefficients de corrélation avec As et Se n'ont pas pu être déterminés, par suite d'un manque de mesures avec As et à cause de valeurs inférieures à la limite de détection pour Se.

Les résultats obtenus font apparaître deux groupes d'éléments distincts similaires à ceux qui ont été observés dans les niveaux métallifères de base forés par le Glomar Challenger dans le Pacifique. On retrouve en effet, une dualité entre les éléments associés aux argiles, aux matériaux volcanique et détritique d'une part ( $SiO_2$ , MgO,  $Al_2O_3$ ,  $K_2O$ ,  $TiO_2$ , Li, Cr, Rb), et d'autre part, aux oxyhydroxydes métalliques ( $Fe_2O_3$ ,  $Mn_3O_4$ , Cu, Ni, Zn, Co, V,  $P_2O_5$ ). La liaison de Ba avec ce dernier groupe

|                                | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | MgO   | CaO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | Li   | Rb   | Sr   | Ba   | V    | Cr   | Co   | Ni   | Cu   | Zn   | → |                                |
|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|--------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 1.00             |                  |                                |                                |                                |       |       |                   |                  |                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | SiO <sub>2</sub>               |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.77             | 1.00             |                                |                                |                                |       |       |                   |                  |                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | TiO <sub>2</sub>               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.65             | 0.77             | 1.00                           |                                |                                |       |       |                   |                  |                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -0.79            | -0.58            | -0.91                          | 1.00                           |                                |       |       |                   |                  |                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 0.50             | -0.70            | 0.02                           | -0.42                          | 1.00                           |       |       |                   |                  |                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> |
| MgO                            | -0.55            | -0.28            | -0.19                          | -0.50                          | 0.34                           | 1.00  |       |                   |                  |                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | MgO                            |
| CaO                            | 0.08             | 0.30             | 0.87                           | -0.33                          | 0.84                           | 0.84  | 1.00  |                   |                  |                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | CaO                            |
| Na <sub>2</sub> O              | -0.23            | 0.04             | 0.38                           | 0.02                           | 0.06                           | -0.06 | -0.08 | 1.00              |                  |                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | Na <sub>2</sub> O              |
| K <sub>2</sub> O               | 0.50             | -0.31            | 0.34                           | 0.50                           | -0.12                          | -0.30 | -0.31 | 0.15              | 1.00             |                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | K <sub>2</sub> O               |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | -0.37            | -0.49            | -0.33                          | -0.49                          | -0.35                          | 0.26  | 0.58  | 0.61              | -0.31            | 1.00                          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  |
| Li                             | 0.87             | -0.42            | -0.33                          | -0.77                          | 0.62                           | -0.40 | -0.55 | -0.75             | -0.51            | 0.43                          | 1.00 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   | Li                             |
| Rb                             | 0.65             | 0.47             | 0.50                           | 0.33                           | 0.55                           | 0.55  | 0.56  | 0.56              | 0.43             | -0.31                         | 0.40 | 1.00 |      |      |      |      |      |      |      |      |   | Rb                             |
| Sr                             | 0.65             | 0.47             | 0.50                           | 0.33                           | 0.55                           | 0.55  | 0.56  | 0.56              | 0.43             | -0.31                         | 0.40 | 0.51 | 1.00 |      |      |      |      |      |      |      |   | Sr                             |
| Ba                             | 0.65             | 0.47             | 0.50                           | 0.33                           | 0.55                           | 0.55  | 0.56  | 0.56              | 0.43             | -0.31                         | 0.40 | 0.51 | 0.57 | 1.00 |      |      |      |      |      |      |   | Ba                             |
| V                              | 0.35             | -0.31            | 0.57                           | 0.52                           | 0.58                           | 0.58  | 0.57  | 0.57              | 0.43             | -0.31                         | 0.40 | 0.51 | 0.57 | 0.52 | 1.00 |      |      |      |      |      |   | V                              |
| Cr                             | 0.23             | -0.23            | -0.26                          | -0.33                          | 0.15                           | 0.15  | 0.15  | 0.15              | 0.15             | 0.15                          | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 1.00 |      |      |      |      |   | Cr                             |
| Co                             | 0.23             | -0.23            | -0.26                          | -0.33                          | 0.15                           | 0.15  | 0.15  | 0.15              | 0.15             | 0.15                          | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.23 | 1.00 |      |      |      |   | Co                             |
| Ni                             | 0.23             | -0.23            | -0.26                          | -0.33                          | 0.15                           | 0.15  | 0.15  | 0.15              | 0.15             | 0.15                          | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.23 | 0.23 | 1.00 |      |      |   | Ni                             |
| Cu                             | 0.23             | -0.23            | -0.26                          | -0.33                          | 0.15                           | 0.15  | 0.15  | 0.15              | 0.15             | 0.15                          | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 1.00 |      |   | Cu                             |
| Zn                             | 0.23             | -0.23            | -0.26                          | -0.33                          | 0.15                           | 0.15  | 0.15  | 0.15              | 0.15             | 0.15                          | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 1.00 |   | Zn                             |

Fig. 71- Matrice des coefficients de corrélations linéaires entre les éléments chimiques dans les terres d'ombre de Chypre.

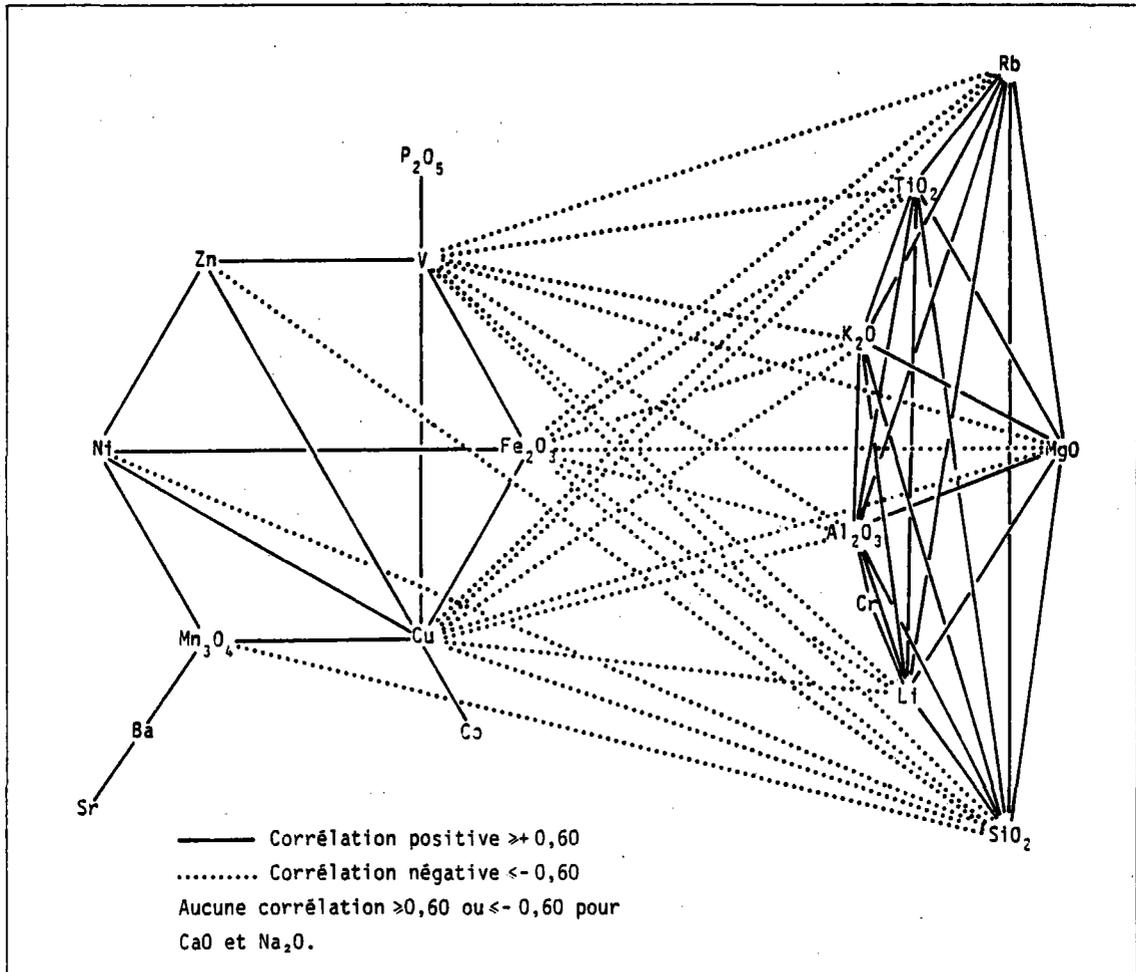


Fig. 72- Les corrélations significatives (>.60 et <-.60) entre les éléments chimiques dans les terres d'ombre de Chypre.

devient prépondérante par rapport à ce qui était observé à 13° Nord, à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, où la liaison dominante se faisait avec les éléments d'origine hydrogène. Ceci indique, qu'à Chypre, cette dernière influence n'est plus visible, sans doute par une diagénèse plus poussée des sédiments, au sein desquels les éléments d'origine hydrogène ont été adsorbés plus complètement par différentes phases du sédiment, et en particulier par les oxyhydroxydes pour le baryum.

Le comportement du lithium est différent. En effet, cet élément d'origine vraisemblablement hydrogène a tendance à s'associer aux métaux à 13° Nord. Ces liaisons se confirment dans les sédiments plus anciens forés par le Glomar Challenger. Au contraire, dans les terres d'ombre de Chypre, il est fortement et négativement corrélé avec  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Cu, V et s'associe complètement aux particules argileuses, volcaniques ou détritiques. Il semble donc que des remobilisations secondaires sont intervenues pour cet élément.

#### LES OMBRES "PURES" ET LES OMBRES SILICEUSES

Ces deux types de dépôts ont des teneurs en plusieurs éléments qui sont similaires à celles observées dans les sédiments métallifères actuels qui se déposent à 13° Nord, à l'axe de la dorsale. C'est le cas pour  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , MgO,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , Sr et Cr.

Les ombres "pures" sont au contraire très riches en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ . Elles le sont également en Ni, Cu, Zn, V et moins fortement en Co. Elles sont par contre, appauvries en Li et Ba.

Les ombres siliceuses (> 40 %  $\text{SiO}_2$ ) sont plus riches que les ombres "pures" en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , MgO,  $\text{TiO}_2$ , Li et plus légèrement en  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , Rb. A l'inverse, elles sont appauvries pour les éléments qui sont corrélés au fer et au manganèse (cf fig. 73). Ceci apparaît nettement au sein de la fraction argileuse cristallisée qui est plus développée et variée que dans les ombres pures, où la fraction amorphe domine.

#### L'ARSENIC ET LE SELENIUM

Les mesures dont nous disposons confirment le comportement très mobile du sélénium. Sa valeur est inférieure au pouvoir de détection par la méthode utilisée (< 0,1 ppm). Hutchinson et Searle (1971) signalent

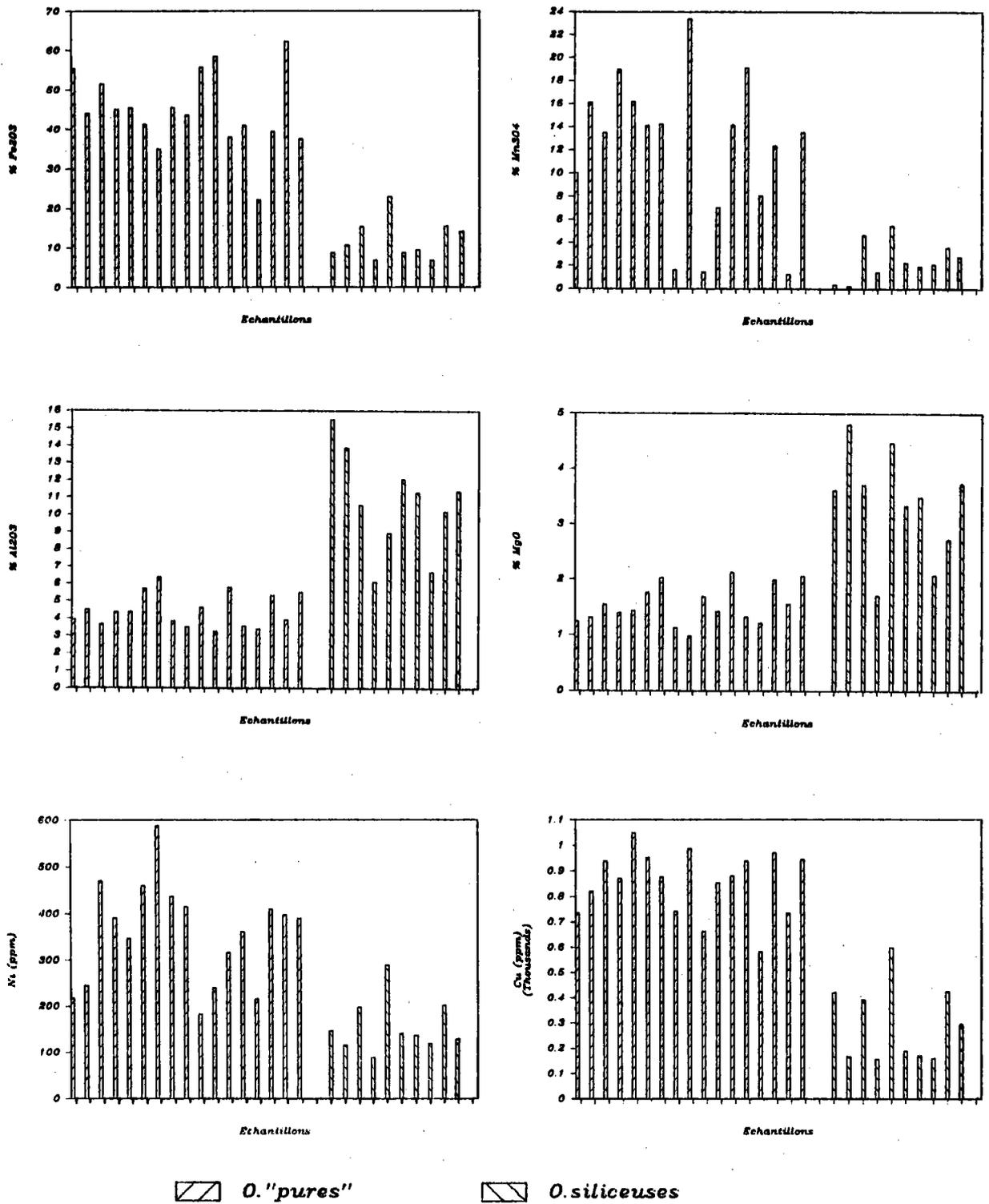


Fig. 73- Comparaisons des teneurs en quelques éléments chimiques entre les ombres pures et les ombres siliceuses (radiolarites ferrifères).

également que cet élément n'est pas détecté dans les sédiments de la formation de Perapedhi qui ne sont pas associés aux sulfures (c'est-à-dire dans les ombres définies en 1972 par Constantinou et Govett).

Les valeurs d'arsenic sont très variables (4 à 46 ppm). Elderfield *et al.* (1972) observent des valeurs plus élevées qui s'étalent entre 84 et 1400 ppm et sont liées au manganèse. Néanmoins, dans les échantillons étudiés ici, cette relation ne semble pas se confirmer. Hutchinson et Searle (1971), quant à eux, n'ont pas détecté d'arsenic dans les ombres.

Ainsi, le comportement de ces deux éléments s'intègre parfaitement avec celui qui est observé dans les sédiments métallifères forés à la base de la colonne sédimentaire dans le Pacifique. Le sélénium disparaît avec l'enfouissement des sédiments tandis que l'arsenic, s'il n'est pas mobile, semble quand même subir une redistribution au sein du sédiment, si on considère la diminution apparente dans la corrélation de cet élément avec le fer et le manganèse.

## V - DISCUSSION ET CONCLUSION

Les terres d'ombre de Chypre étudiées ici, présentent de nombreuses analogies avec les sédiments métallifères "caractéristiques" que nous avons observés vers 13° Nord à l'axe de la dorsale du Pacifique Est :

- leur couleur brune
- une texture fine
- des teneurs élevées en  $Fe_2O_3$  et  $Mn_3O_4$
- des teneurs faibles en  $Al_2O_3$
- des teneurs similaires en arsenic
- une nature minéralogique à dominante amorphe (oxyhydroxydes de fer et de manganèse, un peu de goethite et des smectites) et ne renfermant jamais de sulfures.

Elles se singularisent néanmoins par quelques caractéristiques :

- des teneurs absolues beaucoup plus élevées dans l'ensemble en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (37,5 à 62,25 % contre 15,5 % en moyenne à 13° Nord sur la dorsale du Pacifique Est), et  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  (1,26 à 23,40 % contre 2,3 % en moyenne à 13° Nord) ;
- des teneurs plus élevées également en Ni, Cu, Zn ;
- une absence de carbonates ;
- des teneurs inférieures à 0,1 ppm en sélénium (la même chose est observée déjà dans les sédiments métallifères forés à la base de la colonne sédimentaire dans le Pacifique) ;
- une remobilisation secondaire du manganèse, conduisant à un appauvrissement en cet élément à la base des ombres ;
- des intercalations fréquentes de radiolarites ferromanganésifères dont la fraction argileuse est plus variée que celle des ombres "pures" (illite, chlorite, smectites, zéolites).

A travers tous ces faits, on peut envisager une origine commune hydrothermale pour les terres d'ombre de Chypre et les sédiments métallifères qui se forment à l'axe de la dorsale du Pacifique Est. Néanmoins, pour expliquer les teneurs particulièrement élevées en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ , on peut supposer que l'activité hydrothermale qui a conduit à la formation de ces sédiments, était spécialement intense.

#### LA REPARTITION SPATIALE DES TERRES D'OMBRE

A Chypre, le schéma que l'on observe s'apparente en de nombreux points à celui de l'axe de la dorsale du Pacifique Est vers 13° Nord. En effet :

- Il existe deux types de dépôts métallifères distincts :
  - . Les terres d'ombre, dont la composition correspond tout à fait aux sédiments métallifères "caractéristiques", les plus répandus vers 13° Nord.
  - . Les ocres qui, d'après les nombreuses descriptions dans la littérature (Constantinou et Govett, 1972 ; Robertson et Boyle, 1983...), s'apparentent fortement à l'échantillon CY 82-32, prélevé directement au pied d'une cheminée hydrothermale inactive, dans le graben central vers 13° Nord. Ces ocres sont ri-

ches en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et pauvres en  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ . Elles renferment des sulfures et des oxyhydroxydes de fer qui proviennent de l'altération directe de sulfures massifs auxquels ils sont étroitement liés dans l'espace.

- Dans les corps de sulfures massifs, Oudin et Constantinou (1984) ont montré qu'il existe des vestiges de cheminées hydrothermales de type "fumeurs noirs", analogues à celles que l'on observe actuellement sur la dorsale du Pacifique Est, la ride des Galapagos, la ride de Juan de Fuca et dans le bassin de Guaymas.

- Les terres d'ombre ont une extension beaucoup plus grande que les ocres (Robertson, 1975).

- Les terres d'ombre reposent sur des basaltes non minéralisés (Constantinou et Govett, 1973).

A Chypre, il est classiquement admis que les terres d'ombre reposent sur les Pillows Lavas Supérieurs et les ocres sur les Pillows Lavas Inférieurs. En réalité, dans le détail, les terres d'ombre peuvent également exister entre les pillows, au sein d'une coulée (Robertson et Hudson, 1973), ou directement sur l'amas sulfuré comme à Skouriotissa par exemple (Robertson, 1975). C'est pourquoi, il est possible d'envisager que les deux formations volcaniques (LPL et UPL) ne traduisent pas deux épisodes distincts : l'un ayant conduit à la mise en place d'amas sulfurés dont l'altération au contact de l'eau de mer a produit les ocres, et l'autre ayant conduit à la formation des ombres. A l'axe de la dorsale du Pacifique Est, vers  $13^\circ$  Nord, ces deux types de dépôts sont engendrés par une même activité hydrothermale.

On peut proposer un modèle pour expliquer les relations spatiales entre les ocres et les ombres. Des édifices hydrothermaux situés dans le graben central émettent des fluides qui engendrent la formation de sédiments métallifères de type ombre dont la répartition et l'extension seront liées à la nature des courants de fond. Après un arrêt de l'activité de ces édifices (tandis que d'autres restent actifs), il y a altération des sulfures et formation consécutive des ocres. Un épanchement de laves en coussins peut alors recouvrir certains dépôts, tandis que la sédimentation de type "terres d'ombre" se poursuit grâce à des émissions de fluides au niveau d'autres cheminées qui, elles, sont restées actives. Cette cou-

lée de laves peut donc ne pas être présente partout. Ceci se vérifie d'ailleurs à Skouriotissa où, après l'arrêt de l'activité des édifices hydrothermaux, les ombres ont progressivement recouvert les amas de sulfures plus ou moins altérés.

#### CONCLUSION

- Les sédiments métallifères de Chypre sont vraisemblablement le résultat d'une activité hydrothermale qui a été probablement très intense. Elle a donné naissance en même temps aux ombres et aux ocres qui correspondent aux deux types de sédiments métallifères observés actuellement à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, à 13° Nord.

- Ces dépôts sont indépendants des coulées de lave, et en particulier des UPL qui indiquent seulement que des épisodes volcaniques peuvent intervenir en certains endroits alors que l'hydrothermalisme est encore actif.

- Enfin, des remobilisations secondaires d'éléments peuvent intervenir et en particulier du manganèse dans les terres d'ombre.

# CHAPITRE VI

DES SEDIMENTS METALLIFERES ASSOCIES AUX TOUS PREMIERS  
STADES D'OUVERTURE OCEANIQUE:

LA FOSSE SHABAN EN MER ROUGE

CHAPITRE VI  
DES SEDIMENTS METALLIFERES  
ASSOCIES AUX TOUS PREMIERS STADES D'OUVERTURE OCEANIQUE :  
LA FOSSE SHABAN EN MER ROUGE

La mer Rouge est le centre d'une accréation océanique qui a débuté à la fin de l'Eocène et au début de l'Oligocène (Bertin *et al.*, 1979). Une longue période de calme (pendant 30 Ma) succéda à ce début d'ouverture, pendant laquelle s'accumulèrent jusqu'à 6 km de sédiments (évaaporites miocènes, sédiments détritiques pliocènes et pléistocènes) (cf fig. 74). Puis, l'expansion océanique reprit il y a 2 ou 3 Ma, créant le rift axial actuel se développant du Sud vers le Nord et qui se caractérise en certains endroits par la mise en place de basaltes récents, et de boues métallifères hydrothermales dans des fosses à saumures chaudes et réductrices (Bertin *et al.*, 1979 ; Pautot, 1983). La plus importante de ces fosses, et la plus étudiée, est Atlantis II vers 21° Nord (Miller *et al.*, 1966 ; Bischoff, 1969 ; Craig, 1969 ; Thisse, 1982 ; Guennoc et Thisse, 1982 ; Zierenberg et Schanks, 1983 ; Oudin *et al.*, 1984).

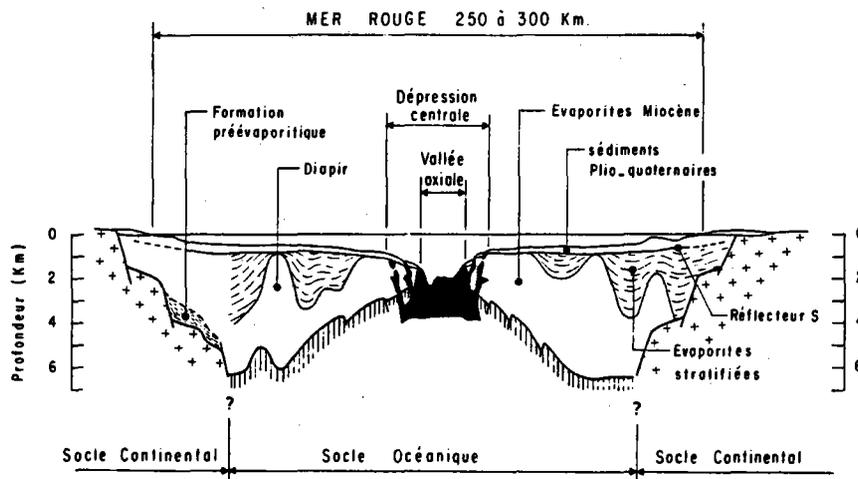


Fig. 74 - Coupe géologique schématique de la Mer Rouge (d'après Bertin *et al.*, 1979, dans Pautot, 1983).

Elle se situe dans une zone où la partie axiale de la mer Rouge est de nature océanique, tandis que la partie nord n'en est qu'à un stade plus précoce d'océanisation. C'est à ce niveau (à 26° Nord) qu'a été découverte récemment la fosse Shaban (également appelée Jean Charcot). Le prélèvement d'une carotte de 8 mètres environ (TM KS 1) au cours de la mission française Transmerou, a révélé l'existence d'un niveau de sédiments métallifères. Cette occurrence, unique jusqu'à présent à cette haute latitude, constitue un témoin précieux concernant la nature des premières manifestations hydrothermales accompagnant les stades initiaux d'ouverture d'un océan.

## I - CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA FOSSE SHABAN

La fosse Shaban est localisée dans la zone axiale de la mer Rouge, à 26° Nord (cf fig. 75). Sa forme est grossièrement rectangulaire et elle mesure environ 10 x 6 km (cf fig. 76). La fosse Shaban se divise en quatre bassins séparés au centre par un relief volcanique récent, allongé, d'orientation N 138° E, et dépourvu de sédiments (Pautot *et al.*, 1984). Des saumures épaisses (environ 200 mètres) sont observées dans les

deux bassins sud qui sont les plus profonds. Leur température ( $24,8^{\circ}\text{C}$ ) n'est que de 2 ou  $3^{\circ}\text{C}$  plus élevée que celle des eaux de fond normales et correspond aux valeurs les plus faibles mesurées dans les saumures de mer Rouge (Pautot *et al.*, 1984). Dans les deux petits bassins nord, la couche de saumures existe, mais elle est très fine.

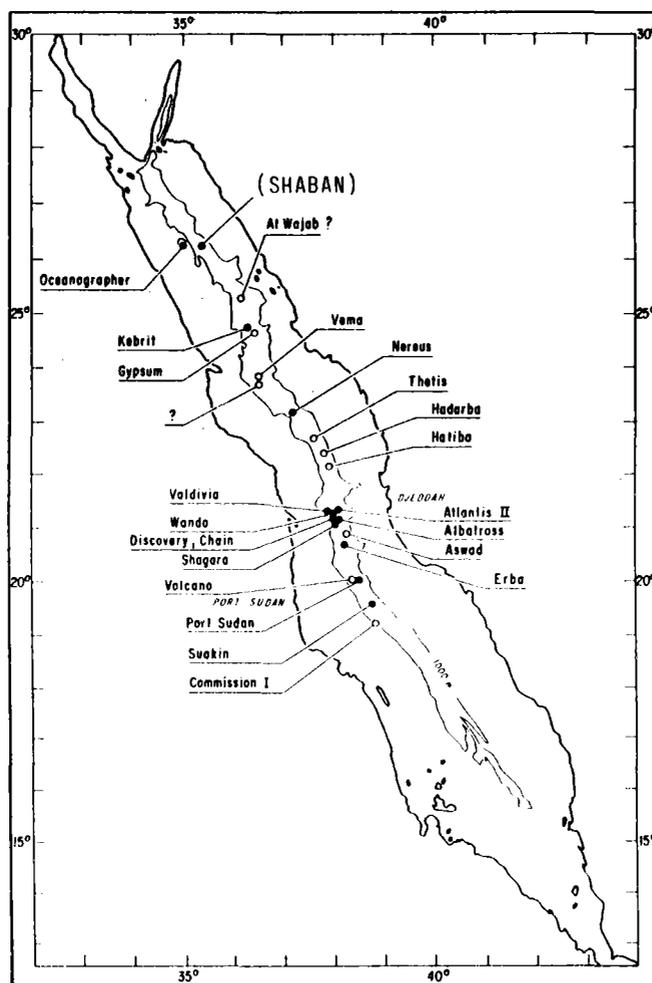


Fig. 75 - Localisation de la fosse Shaban (ou Jean Charcot) d'après Pautot *et al.*, 1984.

## II - ETUDE DE LA CAROTTE TM KS 1

La carotte TM KS 1 a été prélevée au pied de la bordure nord du bassin sud-ouest de la fosse Shaban, au cours de la mission Transmerou du BRGM et de l'IFREMER en 1983 (cf fig. 76). 7,8 mètres de sédiments ont été

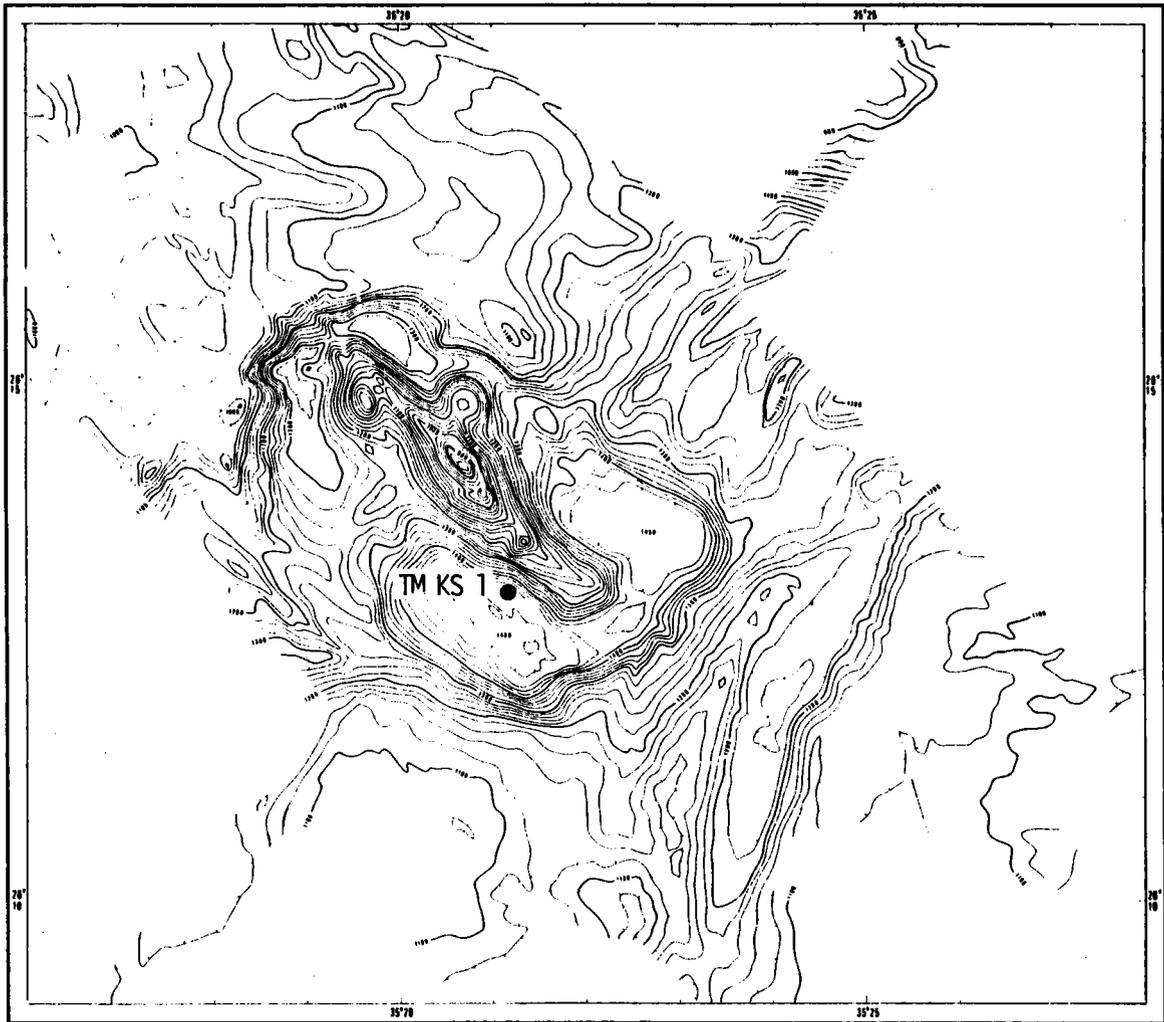


Fig. 76- Carte bathymétrique Seabeam de la fosse Shaban d'après Pautot *et al.*, 1984 et localisation de la carotte TM KS 1.

récupérés, qui reposent sur le plancher océanique, comme en témoignent les fragments de basalte qui se sont logés dans l'ogive du carottier. Pautot *et al.* (1984), Maury *et al.* (1985) et Pautot *et al.* (1986), ont montré qu'il s'agit d'un ferrobasilte tholéitique à affinités transitionnelles, contrairement aux basaltes de nature typiquement tholéitique, rencontrés plus au Sud dans la mer Rouge. La fosse Shaban correspond donc à un stade très récent d'ouverture océanique.

La carotte TM KS 1 est constituée par une alternance de sept unités de boues silicatées biodétritiques quaternaire supérieur, de cou-

leur gris clair à vert olive, et d'un niveau métallifère brun jaune à brun rouge foncé (unité VI de 602 à 604 cm). Une étude particulière de ce dernier niveau sera faite, tandis que nous nous bornerons dans ce travail à donner les caractéristiques principales des autres unités.

A - CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES SEDIMENTS "NON METALLIFERES" DE LA CAROTTE TM KS 1 (cf fig. 77 et tableaux XXXVI à XXXIX)

Les sept unités de boues silicatées biodétritiques ont été distinguées selon leur texture "spongieuse" ou "lisse et grasse". Les premières sont caractérisées par un litage fin, centimétrique, et surtout par des pourcentages élevés de diatomées (jusqu'à 63 % en frottis et jusqu'à 100 % de la fraction grossière), tandis que les boues à texture "lisse" sont plus homogènes, peu litées et contiennent moins de diatomées.

Les unités I et II sont marquées par des figures d'écoulements gravitaires, ce qui tend à prouver une instabilité récente, postérieure au dépôt des unités III à VIII qui, elles, ne sont pas perturbées. La présence de fragments de verre volcanique frais, disséminés à certains niveaux, tout au long de la carotte, montre que la mise en place des sédiments s'est effectuée tout près d'un domaine volcanique actif.

Une étude des diatomées a été menée par A.L. Monjanel dont les résultats ont fait l'objet d'un rapport préliminaire (Monjanel, 1985). Celle-ci a montré des zones à grandes diversités spécifiques, mais également des zones de "blooms alguaire" (vers 350 et 380 cm) caractérisées par l'explosion préférentielle d'une espèce, traduisant des conditions particulières de température et de salinité du milieu qui ne peuvent pas être précisées par l'étude de la seule carotte TM KS 1. Un autre fait, est la présence dominante, de 400 à 470 cm, vers 550 cm et 760 cm, de spores de diatomées, correspondant à une adaptation leur permettant de survivre dans un environnement défavorable. Ces crises peuvent être dues par exemple à une augmentation rapide de la salinité des eaux de surface.

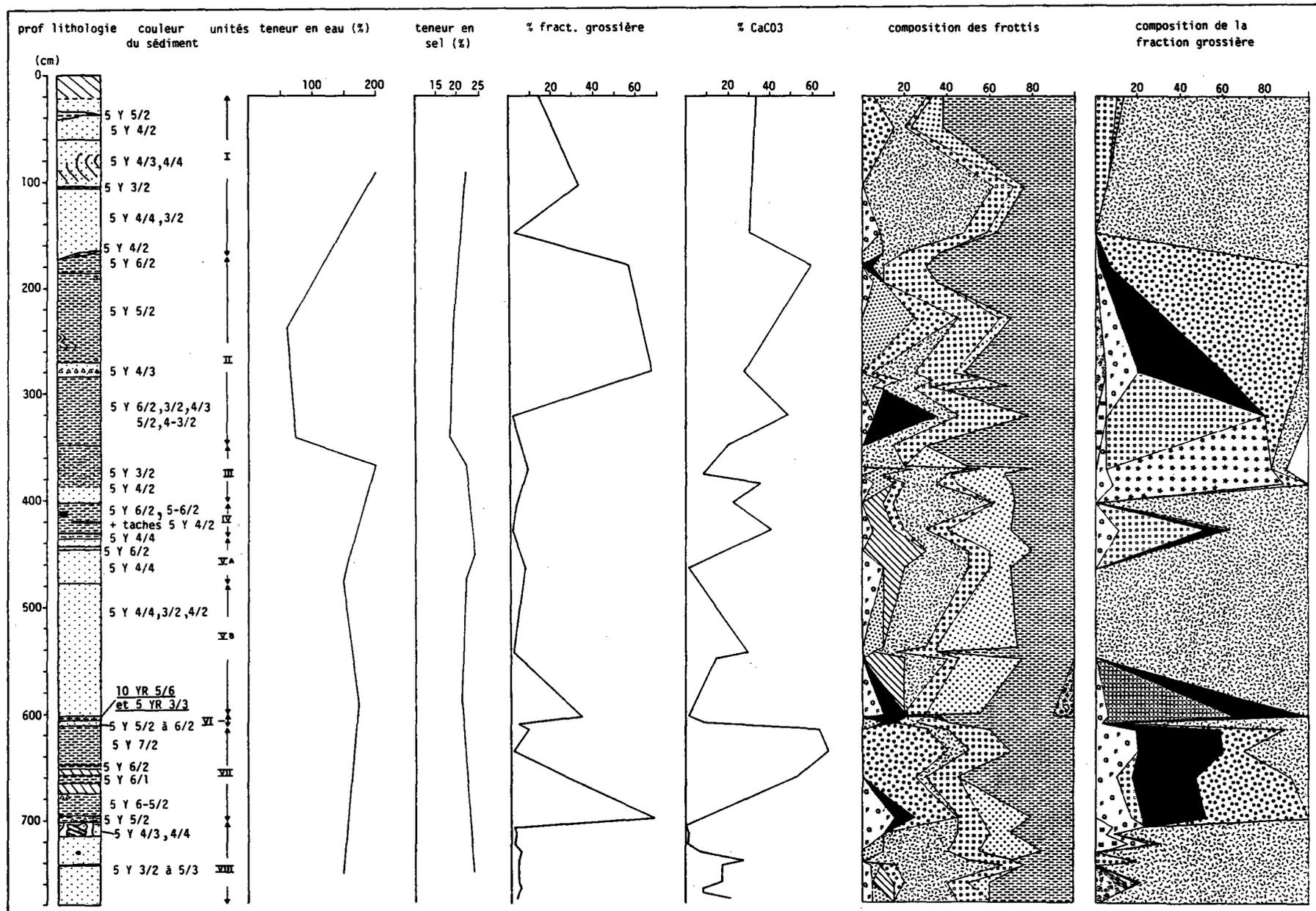


Fig. 77 - La carotte TM KS 1.

| LITHOLOGIE  |  |
|---|--|
|  | vase silicatée biodétritique à texture spongieuse      |
|  | vase silicatée biodétritique à texture lisse et grasse |
|  | alternance des deux facies précédents                  |
|  | vase métallifère                                       |
|  | fragments de verre volcanique                          |
|  | portion vide ou non ouverte                            |

| COMPOSITION DES FROTTIS ET DE LA FRACTION GROSSIERE                                   |   |
|---|---|
|    | oxyhydroxydes Fe                        |
|    | quartz et feldspaths                    |
|    | micas                                   |
|    | organismes calcaires                    |
|    | organismes siliceux (diatomées surtout) |
|    | spores de diatomées                     |
|    | ichtyolithes                            |
|    | calcite et dolomite                     |
|    | pyrite                                  |
|    | microconcrétions (Fe-Ni-Co)             |
|    | verre volcanique                        |
|   | sel                                     |
|  | argiles                                 |
|  | agrégats orange (oxyhydroxydes Fe)      |
|  | agrégats micacés                        |

Légende de la figure 77

| Echantillon | Niveau (cm) | Foraminifères | Coccolithes | Diatomees | Spores de diatomees | Radiolaires | Verre volcanique + Silicoflagelles | Feldspath + Quartz | Pyrite | Oxyhydroxydes | Calcite + Dolomite | Sel | Argiles |
|-------------|-------------|---------------|-------------|-----------|---------------------|-------------|------------------------------------|--------------------|--------|---------------|--------------------|-----|---------|
| TRANSNEROU  |             |               |             |           |                     |             |                                    |                    |        |               |                    |     |         |
| KS1         | 26-28       | t             | 5           | 26        | -                   | t           | r                                  | t                  | -      | 2             | 5                  | 60  |         |
|             | 51          | t             | 15          | 5         | -                   | r           | r                                  | r                  | -      | 3             | 15                 | 60  |         |
|             | 104-106     | t             | t           | 63        | -                   | r           | r                                  | r                  | -      | 10            | 5                  | 20  |         |
|             | 149-151     | t             | t           | 40        | -                   | r           | r                                  | r                  | -      | 10            | 5                  | 35  |         |
|             | 168         | t             | t           | 10        | -                   | t           | t                                  | t                  | 10     | 17            | r                  | 60  |         |
|             | 180-182     | t             | t           | 5         | -                   | r           | r                                  | r                  | -      | 20            | t                  | 67  |         |
|             | 195-197     | t             | t           | 1         | -                   | t           | t                                  | t                  | 5      | 25            | r                  | 62  |         |
|             | 229         | t             | 20          | t         | -                   | t           | t                                  | t                  | 25     | 20            | 5                  | 28  |         |
|             | 280-282     | t             | 5           | 20        | -                   | t           | t                                  | t                  | -      | 18            | 5                  | 50  |         |
|             | 288         | t             | 8           | 15        | -                   | t           | t                                  | t                  | 10     | 25            | t                  | 40  |         |
|             | 294         | t             | 5           | 20        | -                   | t           | t                                  | t                  | 5      | -             | 36                 | 30  |         |
|             | 296-298     | t             | t           | 15        | -                   | t           | t                                  | t                  | 10     | 15            | -                  | 58  |         |
|             | 321-323     | t             | t           | 10        | -                   | t           | 30                                 | 5                  | t      | 33            | -                  | 20  |         |
|             | 349-351     | t             | t           | 10        | -                   | 5           | t                                  | t                  | t      | 15            | t                  | 67  |         |
|             | 370         | -             | t           | 15        | -                   | 5           | -                                  | t                  | t      | -             | 1                  | 30  | 48      |
|             | 371-373     | -             | -           | 25        | -                   | 5           | -                                  | 8                  | 15     | -             | 2                  | 25  | 20      |
|             | 376-378     | -             | t           | 30        | -                   | t           | -                                  | t                  | 10     | -             | 2                  | 25  | 32      |
|             | 385-387     | -             | 5           | 15        | -                   | t           | -                                  | 5                  | t      | -             | 10                 | 25  | 30      |
|             | 403-405     | -             | 5           | 45        | 10                  | t           | -                                  | t                  | t      | -             | 2                  | 10  | 27      |
|             | 428-430     | -             | 5           | 10        | 10                  | t           | t                                  | 5                  | t      | -             | 10                 | 30  | 29      |
|             | 448-450     | t             | r           | 20        | 30                  | t           | t                                  | t                  | t      | -             | 10                 | 20  | 17      |
|             | 464-466     | -             | t           | 30        | 10                  | t           | r                                  | t                  | 10     | 10            | 10                 | 29  | 29      |
|             | 539         | t             | t           | 20        | t                   | t           | t                                  | 10                 | -      | 5             | 38                 | 25  | 25      |
|             | 543-545     | t             | r           | 10        | t                   | -           | t                                  | 5                  | -      | 15            | t                  | 67  | 67      |
|             | 549-551     | -             | -           | 20        | 20                  | -           | t                                  | t                  | -      | 5             | 30                 | 25  | 25      |
|             | 602         | -             | -           | t         | -                   | t           | 5                                  | 10                 | -      | 5             | 10                 | 25  | 44      |
|             | 604         | -             | -           | t         | -                   | t           | 5                                  | 5                  | -      | r             | t                  | 88  | 88      |
|             | 605         | -             | -           | 10        | -                   | t           | 20                                 | 5                  | t      | 2             | 5                  | 62  | 62      |
|             | 609-611     | -             | -           | 10        | t                   | t           | 5                                  | 10                 | -      | 15            | r                  | 58  | 58      |
|             | 615-617     | 5             | 25          | 10        | t                   | t           | t                                  | t                  | -      | 20            | -                  | 38  | 38      |
|             | 635-637     | t             | 40          | 10        | -                   | t           | t                                  | t                  | -      | 20            | -                  | 28  | 28      |
|             | 660-662     | 5             | 25          | 5         | -                   | t           | r                                  | t                  | -      | 15            | -                  | 48  | 48      |
|             | 698-700     | 10            | 10          | t         | -                   | 10          | 15                                 | t                  | -      | 10            | 25                 | 20  | 20      |
|             | 713-715     | -             | t           | 30        | t                   | 5           | t                                  | 10                 | -      | 15            | 10                 | 28  | 28      |
|             | 730-732     | -             | -           | 30        | t                   | t           | t                                  | 10                 | -      | 15            | 30                 | 14  | 14      |
|             | 740-741     | t             | -           | 30        | t                   | t           | t                                  | t                  | -      | 20            | t                  | 27  | 27      |
|             | 743-745     | -             | 5           | 50        | t                   | t           | -                                  | 4                  | 5      | 10            | t                  | 35  | 35      |
|             | 760-761     | t             | 5           | 20        | 10                  | t           | -                                  | 5                  | t      | 10            | 10                 | 39  | 39      |
|             | 769-771     | t             | t           | 30        | t                   | t           | -                                  | 5                  | 10     | 15            | t                  | 38  | 38      |

Tableau XXXVI- Les constituants en frottis des sédiments de la carotte TM KS 1.

| Echantillon | Niveau (cm) | Foraminifères | Etat de conservation | Radiolaires | Diatomees | Spicules | Etat de conservation | Calcite + Dolomite | Agregats micaces | Verre volcanique | Feldspath + Quartz | Microconcretions | Agregats orange | Micas | Ichtyolithes |
|-------------|-------------|---------------|----------------------|-------------|-----------|----------|----------------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------|-----------------|-------|--------------|
| TRANSNEROU  |             |               |                      |             |           |          |                      |                    |                  |                  |                    |                  |                 |       |              |
| KS1         | 26-28       | -             | -                    | 5           | 78        | 3        | TB-->M               | 10                 | 3                | -                | 1                  | -                | -               | -     | t            |
|             | 104-106     | -             | -                    | t           | 93        | 1        | B-->m                | 5                  | -                | -                | 1                  | -                | -               | -     | -            |
|             | 149-151     | -             | -                    | t           | 99        | t        | TB-->M               | t                  | t                | -                | 1                  | t                | -               | -     | -            |
|             | 180-182     | 93            | B-->m                | t           | t         | t        | M                    | t                  | 5                | 2                | t                  | -                | t               | -     | -            |
|             | 280-282     | 35            | B-->m                | t           | 3         | -        | B-->M                | t                  | 41               | 15               | 5                  | t                | 1               | -     | -            |
|             | 321-323     | 10            | B                    | t           | 10        | t        | B                    | 75                 | t                | t                | t                  | -                | 5               | -     | -            |
|             | 371-373     | 1             | B-->m                | 6           | t         | -        | B                    | 78                 | t                | 5                | -                  | -                | t               | 10    | -            |
|             | 385-387     | 10            | B-->M                | t           | t         | -        | B                    | 81                 | t                | 8                | t                  | -                | 1               | t     | -            |
|             | 403-405     | -             | -                    | -           | 100       | -        | TB                   | t                  | -                | t                | t                  | -                | -               | -     | -            |
|             | 428-430     | 2             | TB-->M               | t           | 35        | t        | B-->M                | 40                 | 10               | 11               | 1                  | -                | 1               | -     | -            |
|             | 464-466     | -             | -                    | -           | 100       | -        | TB-->M               | t                  | t                | -                | -                  | -                | t               | -     | -            |
|             | 543-545     | t             | M                    | 1           | 97        | t        | TB-->M               | t                  | t                | 1                | 1                  | t                | 1               | -     | -            |
|             | 549-551     | -             | -                    | 1           | 98        | -        | TB-->M               | t                  | t                | t                | t                  | -                | 1               | -     | -            |
|             | 604(inf)    | -             | -                    | -           | t         | t        | B                    | 15                 | 35               | 6                | t                  | 44               | t               | -     | -            |
|             | 609-611     | t             | B-->M                | t           | 89        | t        | B                    | t                  | 5                | 3                | t                  | 2                | 1               | -     | -            |
|             | 615-617     | 30            | TB                   | t           | 10        | t        | M-->m                | t                  | 40               | 19               | t                  | 1                | -               | -     | -            |
|             | 635-637     | 10            | M                    | t           | 30        | -        | M-->m                | -                  | 40               | 20               | -                  | -                | t               | -     | -            |
|             | 660-662     | 45            | TB-->M               | -           | 8         | -        | M                    | -                  | 30               | 10               | -                  | -                | t               | -     | -            |
|             | 698-700     | 47            | B-->M                | -           | 1         | -        | M                    | 5                  | 30               | 17               | -                  | -                | t               | -     | -            |
|             | 705-708     | -             | -                    | -           | 75        | t        | B                    | 1                  | 1                | 15               | t                  | t                | 8               | -     | -            |
|             | 713-715     | -             | -                    | -           | 91        | t        | B-->M                | 1                  | t                | 3                | t                  | t                | 5               | -     | -            |
|             | 722-724     | -             | -                    | -           | 67        | 3        | TB-->M               | 5                  | -                | 10               | t                  | t                | 15              | -     | -            |
|             | 730-732     | t             | TB                   | t           | 100       | t        | TB-->M               | t                  | t                | t                | t                  | t                | t               | -     | -            |
|             | 740-741     | -             | -                    | -           | 80        | t        | TB-->M               | 20                 | t                | t                | t                  | t                | t               | -     | -            |
|             | 743-745     | -             | -                    | -           | 99        | t        | TB-->M               | t                  | 1                | t                | -                  | t                | t               | -     | -            |
|             | 760-761     | 1             | m                    | t           | 77        | 1        | TB-->M               | 5                  | 2                | 2                | 10                 | t                | 2               | -     | -            |
|             | 765-767     | -             | -                    | 1           | 83        | t        | TB-->M               | t                  | -                | 1                | 15                 | -                | t               | -     | -            |
|             | 769-771     | 1             | B                    | 1           | 86        | t        | TB-->M               | t                  | -                | 1                | 10                 | -                | t               | -     | -            |
|             | 775-777     | -             | -                    | t           | 96        | 1        | TB-->M               | t                  | -                | 1                | 2                  | t                | t               | -     | -            |

Tableau XXXVII- Les constituants de la fraction grossière (> 63 µm) dans les sédiments de la carotte TM KS 1.

Mise à part la différence de texture entre les deux types d'unités dans les sédiments de la carotte et qui est due aux diatomées, il n'existe pas de particularités minéralogiques ou chimiques permettant de distinguer les différentes zones.

Toutes les observations et analyses (chimiques ou rayons X) ont été effectuées à partir des sédiments désalés. Les résultats montrent que les constituants principaux sont des argiles (kaolinite, smectite, illite et parfois chlorite) qui représentent 14 à 67 % en frottis, des feldspaths et du quartz (en traces et jusqu'à 15 %), des micas (jusqu'à 15 % de la fraction grossière), de la calcite et de la dolomite (jusqu'à 25 % en frottis), de la pyrite (jusqu'à 25 %). La fraction biogène (foraminifères, coccolithes, radiolaires, silicoflagellés, spicules siliceux et ichtyolithes) est beaucoup moins importante que les diatomées.

Enfin, il faut noter la présence de microconcrétions polymétalliques, vers 280 cm et surtout à la base de la carotte (760 à 780 cm), où elles constituent jusqu'à 15 % de la fraction grossière. Leur taille, qui varie de quelques 100  $\mu\text{m}$  au millimètre, est similaire à celle des micronodules Fe-Mn observés précédemment dans les sédiments métallifères du Pacifique, mais elles s'en distinguent totalement par leur composition. Ce sont en effet, des sulfures de Fe, Ni et Co comme en témoignent les analyses effectuées au microscope électronique de l'Université d'Orsay par E. Lallier-Vergès (cf tableau XXXVIII). Ces microconcrétions sont aisément reconnaissables à leurs couleurs irisées jaunes, rouges ou vertes.

On constate ainsi que les niveaux "non métallifères" au sens de Boström et Peterson (1966, 1969) sont tout de même marqués par des enrichissements locaux et discrets en sulfures, sous forme de pyrite ou de microconcrétions de Fe, Ni et Co qui sont certainement dues à des précipitations de produits d'origine hydrothermale en milieu réducteur. Toutefois, ces manifestations semblent être de faible intensité.

| Niveau (cm) | 760-761  | 760-761  | 769-771  |
|-------------|----------|----------|----------|
| Na          | < limite | 0,25     | 3,91     |
| Mg          | 0,19     | 1,35     | 1,55     |
| Al          | 0,15     | 0,36     | < limite |
| Si          | 0,44     | 1,81     | 1,28     |
| P           | 0,08     | < limite | 0,27     |
| S           | 41,67    | 37,95    | 33,52    |
| Cl          | < limite | < limite | < limite |
| K           | 0,08     | 0,18     | < limite |
| Ca          | 0,30     | 1,90     | 2,05     |
| Ti          | < limite | < limite | 0,27 (?) |
| Mn          | 0,07     | < limite | < limite |
| Fe          | 55,79    | 41,60    | 30,91    |
| Ni          | 0,47 (?) | 12,13    | 19,91    |
| Cu          | < limite | < limite | 0,63 (?) |
| Zn          | 0,27     | < limite | 0,54 (?) |
| Co          | 0,47 (?) | 2,46     | 5,15     |
| Ba          | < limite | < limite | < limite |

Tableau XXXVIII : Composition (en pourcentages) de quelques microconcrétions polymétalliques dans les niveaux 760-761 cm et 769-771 cm de la carotte TM KS 1.

## B - ETUDE DES SEDIMENTS METALLIFERES : L'UNITE VI (602-604 cm) DE LA CAROTTE TM KS 1

### 1 - COULEUR, TEXTURE ET TENEUR EN CaCO<sub>3</sub> DES SEDIMENTS METALLIFERES

Les sédiments métallifères du niveau 602-604 cm sont de couleur jaune-rouge ou rouille (10 YR 5/6) et brun-rouge foncé (5 YR 3/3). Leur texture est fine à granuleuse et ils sont pauvres en CaCO<sub>3</sub> (environ 1 %) (cf fig. 77 et tableau XXXIX).

### 2 - OBSERVATION DES SEDIMENTS EN FROTTIS : DETERMINATION DES FACIES SEDIMENTAIRES (cf fig. 77 et tableau XXXVI)

Le niveau métallifère est caractérisé avant tout par la présence d'oxyhydroxydes de fer sous forme de grains jaune-orangé (10 %). Le

pourcentage de ces oxyhydroxydes est difficile à estimer, car ils sont également en imprégnation sur les autres constituants des sédiments, et peuvent être aussi inclus dans les pourcentages estimés des "argiles" (particules de taille inférieure au pouvoir de résolution du microscope). Ces dernières représentent 44 à 79 % de la surface en frottis.

Les autres constituants sont détritiques et volcaniques (5 % de quartz et de feldspaths et 5 % à 10 % de verre volcanique) et authigènes (jusqu'à 10 % de calcite et de dolomite). Enfin, des cristaux de sel (halite) peuvent atteindre 20 % de la surface en frottis.

La fraction biogène est presque totalement absente. Seules des traces de diatomées, radiolaires et silicoflagellés ont été observées.

D'après la classification de Hoffert (1980) les sédiments métallifères entre 602 et 604 cm sont donc des vases d'argiles ou à argiles avec oxyhydroxydes.

### 3 - ETUDE DE LA FRACTION GROSSIERE (> 63 µm)

Le pourcentage de fraction grossière est assez élevé : 33 %. Celui-ci est exprimé par rapport au sédiment sec et désalé.

Cette fraction est dominée par la présence d'agrégats orange (44 %) imprégnés d'oxyhydroxydes de fer. Leur aspect est microcristallin et ils correspondent souvent à des enrobages de particules comme le quartz, les feldspaths, la calcite et la dolomite, qui sont soudées entre elles par les oxydes. Néanmoins, 15 % de calcite et de dolomite et 6 % de feldspaths et de quartz, ne sont pas imprégnés par ces oxydes.

Enfin, le verre volcanique occupe une place importante dans la fraction grossière (35 %). De telles concentrations sont notées à plusieurs niveaux de la carotte TM KS 1, et ne sont donc pas un caractère spécifique des sédiments métallifères.

### 4 - ETUDE DES SEDIMENTS METALLIFERES AUX RAYONS X

Cette étude a été menée à partir du sédiment total désalé. Les constituants observés montrent l'influence de plusieurs facteurs :

- un apport détritique, sous forme de quartz, illite, chlorite et peut-être des feldspaths

- de la calcite et de la dolomite, dont l'origine peut être authigène ou détritique. Au cours du Leg 23 du DSDP, une étude de la sédimentation non métallifère récente (Miocène - Actuel) de mer Rouge, a montré que ces minéraux sont souvent observés. Stoffers et Ross (1977), considèrent qu'ils peuvent être authigènes. Cependant, ils attribuent aussi une origine détritique à la dolomite quand elle est associée à un fort pourcentage de constituants détritiques.

- un apport hydrothermal représenté par de la goethite et autres hydroxydes de fer mal cristallisés. Les réflexions obtenues pour ces derniers indiquent qu'il s'agit probablement du composé  $\epsilon$ -FeOOH (Bendeliani *et al.*, 1972 dans Burns et Burns, 1977) et de traces de lépidocrocite ( $\gamma$ -FeOOH) (fiche JCPDS 8-98). L'association goethite-lépidocrocite a été signalée dans le faciès "amorphe et à goethite" (Goethite-Amorphous) entre autres, dans les fosses Atlantis II et Discovery par Bischoff (1969) et Bäcker (1976).

#### 5 - OBSERVATION DE LA FRACTION ARGILEUSE (< 2 $\mu$ m)

La fraction argileuse est marquée par un caractère amorphe dominant. Des réflexions faibles de smectites et d'illite sont néanmoins observées. Les smectites diffractent entre 13 Å et 14 Å sur la courbe "N" (normale). Le pic se déplace à 17-18 Å après traitement à l'éthylène-glycol, puis à 10 Å après chauffage. Ce schéma est différent de celui des smectites présentes dans les niveaux "non métallifères" de la carotte TM KS 1, pour lesquelles les diffractions étaient respectivement 15 Å  $\rightarrow$  17 Å  $\rightarrow$  10 Å, avant et après les traitements.

Ces observations montrent que les hydroxydes de fer (goethite,  $\epsilon$ -FeOOH et lépidocrocite) "cristallisés", détectés à partir de l'étude aux rayons X sur sédiment total, sont essentiellement compris dans la fraction supérieure à 2  $\mu$ m. Dans la fraction argileuse (< 2  $\mu$ m), ils sont amorphes.

6 - GEOCHIMIE DES SEDIMENTS METALLIFERES (cf tableau XXXIX)

Le niveau métallifère de la carotte TM KS 1 est caractérisé par :

- des teneurs élevées en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (31,11 % à 34,73 %) accompagnées de valeurs fortes en  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,83 % à 1,20 %) et V (226 à 250 ppm). La corrélation entre ces trois éléments a déjà été observée dans les sédiments métallifères du Pacifique, ainsi qu'à Chypre. Ceci semble donc confirmer leur origine commune hydrothermale ;

- des teneurs basses en  $\text{SiO}_2$  et CaO liées à un très faible pourcentage de la fraction biogène ;

- des teneurs en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  similaires à celles des niveaux non métallifères de la carotte TM KS 1, et qui sont faibles ;

- des teneurs faibles en  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ . Cet élément n'a donc pas le même comportement que  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Les conditions de pH et de Eh régnant dans le milieu ont pu favoriser sa migration vers d'autres niveaux plus oxydants. Dans la carotte TM KS 1, on observe en effet, un léger enrichissement en  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  dans les niveaux 195-197 cm (0,8 %) et 296 à 323 cm (1,68 à 1,95 %).

Les analyses chimiques des boues minéralisées du facies à goethite dans quelques fosses de la mer Rouge (Bignell *et al.*, 1976) montrent que le niveau métallifère de la carotte TM KS 1, s'apparente le plus à celui de la fosse Kebrit, en ce qui concerne la teneur en Fe qui est de 30,8 %, c'est-à-dire 44 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (cf tableau XL). Le "caractère métallifère" des sédiments de la zone VI de la carotte TM KS 1 est donc plus faible que dans les autres fosses. Mn et Ni montrent des teneurs similaires aux sédiments des autres fosses. Cu est très variable dans TM KS 1 (25 à 686 ppm) tandis que la valeur la plus élevée donnée par Bignell *et al.* (1976) est 340 ppm. Enfin, les teneurs en Zn sont faibles par rapport aux autres fosses.

#### L'arsenic et le sélénium

Par rapport aux autres mesures effectuées tout au long de la carotte, Se est maximum dans le niveau métallifère (4,1 ppm). Ce n'est

| Niveau<br>(cm) | CaCO <sub>3</sub><br>(%) | SiO <sub>2</sub><br>(%) | TiO <sub>2</sub><br>(%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>(%) | Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub><br>(%) | MgO<br>(%) | CaO<br>(%) | Na <sub>2</sub> O<br>(%) | K <sub>2</sub> O<br>(%) | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>(%) | P.Feu<br>(%) | H <sub>2</sub> O-<br>(%) | Total<br>(%) |
|----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| 26-28          | 33                       | 47.00                   | 0.29                    | 4.86                                  | 2.76                                  | 0.07                                  | 2.05       | 18.68      | 0.51                     | 0.69                    | 0.20                                 | 20.98        | 1.60                     | 98.09        |
| 104-106        | *                        | 61.00                   | 0.29                    | 4.82                                  | 3.27                                  | 0.03                                  | 1.77       | 11.20      | 0.60                     | 0.81                    | 0.10                                 | 14.91        | 2.04                     | 98.80        |
| 149-151        | 30                       | 46.00                   | 0.40                    | 5.85                                  | 3.22                                  | 0.05                                  | 2.74       | 18.40      | 0.60                     | 0.94                    | 0.20                                 | 21.12        | 1.14                     | 99.52        |
| 180-182        | 59                       | 22.10                   | 0.35                    | 5.70                                  | 3.32                                  | 0.28                                  | 3.54       | 33.30      | 0.26                     | 0.33                    | 0.30                                 | 31.40        | 0.46                     | 100.88       |
| 195-197        | *                        | 42.50                   | 0.88                    | 11.04                                 | 4.42                                  | 0.80                                  | 3.21       | 13.23      | 0.73                     | 1.51                    | 0.35                                 | 21.01        | 0.93                     | 99.68        |
| 280-282        | 27                       | 38.30                   | 0.79                    | 11.40                                 | 7.04                                  | 0.20                                  | 5.60       | 21.40      | 1.64                     | 0.39                    | 0.20                                 | 13.77        | 0.22                     | 100.73       |
| 296-298        | *                        | 30.00                   | 0.44                    | 6.17                                  | 4.31                                  | 1.95                                  | 3.23       | 24.50      | 0.59                     | 0.61                    | 0.25                                 | 27.11        | 0.23                     | 99.16        |
| 321-323        | 48                       | 27.80                   | 0.42                    | 6.37                                  | 4.88                                  | 1.68                                  | 3.40       | 27.00      | 0.50                     | 0.52                    | 0.25                                 | 26.71        | 0.10                     | 99.23        |
| 349-351        | 20                       | 46.35                   | 0.43                    | 6.31                                  | 4.95                                  | 0.11                                  | 2.18       | 17.00      | 0.74                     | 0.94                    | 0.25                                 | 19.60        | 0.77                     | 98.86        |
| 371-373        | *                        | 55.30                   | 0.43                    | 5.72                                  | 7.26                                  | 0.17                                  | 1.84       | 5.10       | 0.91                     | 0.95                    | 0.30                                 | 20.65        | 0.59                     | 98.63        |
| 376-378        | 8                        | 54.00                   | 0.23                    | 3.82                                  | 8.55                                  | 0.13                                  | 1.33       | 7.94       | 1.22                     | 0.67                    | 0.10                                 | 20.56        | 0.67                     | 98.55        |
| 385-387        | 35                       | 33.55                   | 0.46                    | 6.77                                  | 4.69                                  | 0.10                                  | 3.26       | 22.65      | 0.62                     | 0.82                    | 0.20                                 | 25.07        | 0.24                     | 98.19        |
| 403-405        | 22                       | 50.00                   | 0.29                    | 5.50                                  | 1.88                                  | 0.09                                  | 3.13       | 16.23      | 0.70                     | 0.89                    | 0.10                                 | 20.85        | 0.86                     | 99.66        |
| 428-430        | 40                       | 37.50                   | 0.53                    | 6.60                                  | 2.70                                  | 0.08                                  | 3.55       | 21.15      | 0.75                     | 0.96                    | 0.20                                 | 24.62        | 0.08                     | 98.64        |
| 448-450        | *                        | 69.00                   | 0.53                    | 7.00                                  | 2.11                                  | 0.04                                  | 2.60       | 3.03       | 0.90                     | 1.19                    | 0.10                                 | 12.54        | 0.19                     | 99.04        |
| 464-466        | 1                        | 69.50                   | 0.53                    | 6.17                                  | 2.16                                  | 0.07                                  | 2.25       | 5.70       | 0.79                     | 1.13                    | 0.10                                 | 11.51        | 0.04                     | 99.91        |
| 543-545        | 29                       | 46.20                   | 0.48                    | 6.83                                  | 3.04                                  | 0.05                                  | 2.79       | 17.15      | 0.81                     | 1.09                    | 0.15                                 | 21.28        | 0.64                     | 99.87        |
| 549-551        | 14                       | 59.80                   | 0.31                    | 3.91                                  | 3.68                                  | 0.05                                  | 1.86       | 11.16      | 0.80                     | 0.77                    | 0.10                                 | 16.29        | 0.94                     | 98.73        |
| 602            | *                        | 24.70                   | 0.54                    | 5.21                                  | 31.11                                 | 0.41                                  | 2.98       | 12.90      | 0.44                     | 0.74                    | 0.83                                 | 20.32        | 0.88                     | 100.18       |
| 604            | 1                        | 37.50                   | 0.75                    | 6.70                                  | 34.73                                 | 0.04                                  | 2.21       | 1.13       | 1.05                     | 1.48                    | 1.20                                 | 12.72        | 1.54                     | 99.51        |
| 609-611        | 8                        | 49.30                   | 0.83                    | 10.28                                 | 4.73                                  | 0.14                                  | 3.90       | 11.00      | 0.94                     | 1.59                    | 0.30                                 | 16.56        | 0.02                     | 99.57        |
| 615-617        | 63                       | 18.00                   | 0.33                    | 5.15                                  | 2.80                                  | 0.20                                  | 3.61       | 36.50      | 0.28                     | 0.20                    | 0.30                                 | 33.91        | 0.13                     | 101.28       |
| 635-637        | 67                       | 16.00                   | 0.28                    | 4.77                                  | 2.59                                  | 0.21                                  | 3.56       | 39.25      | 0.12                     | 0.19                    | 0.30                                 | 34.74        | 0.06                     | 102.01       |
| 660-662        | 52                       | 21.20                   | 0.40                    | 5.83                                  | 3.27                                  | 0.21                                  | 3.61       | 33.00      | 0.39                     | 0.26                    | 0.20                                 | 30.26        | 0.27                     | 98.63        |
| 698-700        | *                        | 33.90                   | 0.76                    | 10.30                                 | 4.70                                  | 0.29                                  | 3.95       | 25.50      | 1.53                     | 0.41                    | 0.15                                 | 17.14        | 0.15                     | 98.63        |
| 713-715        | 1                        | 60.50                   | 0.73                    | 8.99                                  | 3.62                                  | 0.04                                  | 3.52       | 4.49       | 1.05                     | 1.51                    | 0.15                                 | 14.46        | 0.23                     | 99.06        |
| 730-732        | 7                        | 66.00                   | 0.29                    | 4.45                                  | 2.77                                  | 0.04                                  | 1.84       | 7.88       | 1.41                     | 0.78                    | 0.10                                 | 13.37        | 0.67                     | 98.93        |
| 740-741        | 27                       | 46.00                   | 0.52                    | 6.54                                  | 2.26                                  | 0.05                                  | 3.17       | 17.37      | 0.78                     | 1.09                    | 0.10                                 | 21.10        | 0.11                     | 98.98        |
| 743-745        | 17                       | 60.00                   | 0.36                    | 5.02                                  | 2.16                                  | 0.04                                  | 2.16       | 11.42      | 0.76                     | 0.84                    | 0.10                                 | 16.21        | 0.10                     | 99.07        |
| 760-761        | 17                       | 51.60                   | 0.46                    | 6.11                                  | 2.55                                  | 0.05                                  | 2.84       | 16.14      | 1.14                     | 1.08                    | 0.10                                 | 17.81        | 0.24                     | 99.88        |
| 769-771        | 8                        | 64.00                   | 0.33                    | 4.92                                  | 3.85                                  | 0.04                                  | 1.95       | 9.22       | 0.60                     | 0.80                    | 0.15                                 | 12.88        | 0.50                     | 98.74        |

| Niveau<br>(cm) | Li<br>(ppm) | Rb<br>(ppm) | Sr<br>(ppm) | Ba<br>(ppm) | V<br>(ppm) | Cr<br>(ppm) | Co<br>(ppm) | Ni<br>(ppm) | Cu<br>(ppm) | Zn<br>(ppm) | As<br>(ppm) | Se<br>(ppm) |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 26-28          | 19          | 18          | 694         | <100        | 45         | 38          | 20          | 58          | 106         | 372         | 31.0        | 1.6         |
| 104-106        | 22          | 28          | 587         | <100        | 48         | 35          | 11          | 24          | 70          | 171         | *           | *           |
| 149-151        | 24          | 29          | 960         | 154         | 65         | 47          | 10          | 5           | 68          | 160         | 7.0         | 1.4         |
| 180-182        | 18          | 6           | 1200        | <100        | 58         | 55          | 20          | 56          | 77          | 168         | *           | *           |
| 195-197        | 38          | 48          | 468         | 339         | 107        | 89          | 23          | 45          | 101         | 176         | *           | *           |
| 280-282        | 27          | 7           | 680         | <100        | 122        | 180         | 30          | 114         | 86          | 176         | *           | *           |
| 296-298        | 24          | 14          | 887         | 155         | 106        | 58          | 20          | 45          | 67          | 214         | *           | *           |
| 321-323        | 25          | 12          | 968         | 23          | 92         | 55          | 20          | 49          | 66          | 225         | 6.7         | 1.3         |
| 349-351        | 22          | 28          | 540         | 114         | 96         | 58          | 20          | 63          | 69          | 158         | *           | *           |
| 371-373        | 20          | 31          | 196         | 390         | 86         | 56          | 24          | 82          | 54          | 99          | *           | *           |
| 376-378        | 36          | 20          | 269         | 323         | 52         | 38          | 17          | 36          | 86          | 106         | *           | *           |
| 385-387        | 26          | 21          | 980         | 82          | 83         | 58          | 21          | 47          | 66          | 208         | 23.0        | 3.8         |
| 403-405        | 23          | 28          | 550         | 71          | 48         | 34          | 10          | 8           | 63          | 200         | *           | *           |
| 428-430        | 22          | 25          | 855         | 169         | 64         | 50          | 11          | 16          | 45          | 131         | 11.5        | 0.4         |
| 448-450        | 24          | 39          | 117         | 200         | 52         | 49          | 9           | 10          | 50          | 117         | 8.7         | 2.0         |
| 464-466        | 24          | 38          | 197         | 107         | 42         | 41          | 14          | 10          | 60          | 79          | 2.0         | 0.6         |
| 543-545        | 27          | 36          | 830         | 140         | 58         | 54          | 15          | 39          | 73          | 206         | 5.2         | 1.2         |
| 549-551        | 30          | 24          | 478         | 102         | <30        | 29          | 9           | 15          | 70          | 128         | *           | *           |
| 602            | 18          | 22          | 303         | 119         | 250        | 77          | 47          | 59          | 686         | 344         | *           | *           |
| 604            | 21          | 43          | 105         | 43          | 226        | 82          | 11          | 24          | 25          | 130         | 26.1        | 4.1         |
| 609-611        | 39          | 50          | 285         | 142         | 77         | 77          | 19          | 59          | 80          | 20          | *           | *           |
| 615-617        | 22          | 4           | 822         | <100        | 49         | 45          | 9           | 26          | 67          | 261         | 2.5         | 0.2         |
| 635-637        | 18          | 4           | 846         | n.d         | <30        | 32          | 11          | 26          | 63          | 93          | *           | *           |
| 660-662        | 25          | 4           | 766         | 88          | 54         | 69          | 15          | 85          | 76          | 88          | 3.7         | 0.3         |
| 698-700        | 16          | 5           | 602         | 106         | 88         | 123         | 32          | 170         | 59          | 76          | *           | *           |
| 713-715        | 28          | 43          | 136         | 176         | 74         | 69          | 20          | 45          | 44          | 114         | 13.2        | 2.0         |
| 730-732        | 38          | 19          | 189         | 119         | 30         | 34          | 186         | 875         | 87          | 180         | *           | *           |
| 740-741        | 25          | 31          | 543         | 127         | 44         | 48          | 15          | 45          | 83          | 139         | *           | *           |
| 743-745        | 10          | 23          | 367         | 85          | 40         | 41          | 85          | 340         | 67          | 334         | *           | *           |
| 760-761        | 26          | 29          | 467         | 147         | 55         | 44          | 197         | 967         | 80          | 195         | *           | *           |
| 769-771        | 17          | 24          | 236         | 77          | 34         | 44          | 1060        | 4314        | 66          | 371         | *           | *           |

Tableau XXXIX - Analyses chimiques des sédiments de la carotte TM KS 1.

pas le cas pour As (26,1 ppm seulement). Il ne semble pas y avoir de bonne corrélation entre ces deux éléments.

En considérant que l'influence hydrothermale est la plus forte entre 602 et 604 cm (unité VI), par la présence d'un niveau de sédiments métallifères, seul le comportement de Se confirmerait cette influence. Les valeurs de As sont faibles, et ne dépassent pas 31 ppm dans toute la carotte.

| Fosses               | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>% | Ca<br>% | Fe<br>% | Mn<br>% | Zn<br>(ppm) | Cu<br>(ppm) | Ni<br>(ppm) |
|----------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|
| Kebrit               | 2,76                                | 14,96   | 30,80   | 0,17    | 1010        | 340         | 30          |
| Vema (carotte 615)   | 0,66                                | 1,08    | 64,20   | 0,03    | 1150        | 14          | 5           |
| (carotte 524, u)     | 0,50                                | 2,27    | 59,72   | 0,05    | 1170        | 14          | 12          |
| (carotte 524, I)     | 0,44                                | 3,42    | 49,17   | 0,06    | 720         | 9           | 13          |
| Gypsum (niveau sup.) | 0,71                                | 1,57    | 57,17   | 0,29    | 2490        | 170         | 5           |
| (niveau inf.)        | 0,96                                | 1,78    | 50,20   | 0,41    | 2220        | 120         | 14          |
| Nereus               | 0,92                                | 0,35    | 54,60   | 0,45    | 6650        | 59          | 0           |
| Atlantis II          | 1,93                                | 0,30    | 63,16   | 0,26    | 1456        | 116         | 9           |

Tableau XL : Analyses chimiques de boues métallifères du facies à goethite dans quelques fosses de la Mer Rouge (dans BIGNELL *et al.*, 1976).

## C - CONCLUSION

### 1 - LES UNITES SEDIMENTAIRES "NON METALLIFERES"

. Sept unités "non métallifères" ont été distinguées, et sont constituées par une succession de boues silicatées bio-détritiques de couleur verte à brun-vert, ayant tantôt une texture "spongieuse" due à un important pourcentage de diatomées, et tantôt une texture "lisse et grasse" correspondant à des pourcentages plus faibles de ces diatomées. Leurs compositions minéralogique et chimique sont similaires dans toutes les unités et ont une origine détritique (quartz, illite, chlorite, kaolinite, smectites, micas, feldspaths ?, dolomite ?) authigène (calcite, dolomite ?), biogène (diatomées surtout), volcanique (fragments de basal-

te, feldspaths ?), et aussi une origine hydrothermale discrète (pyrite, microconcrétions de sulfures de Fe, Co et Ni).

. Les deux unités supérieures sont perturbées par des figures d'écoulements gravitaires semblant indiquer une activité tectonique croissante, tandis qu'un volcanisme actif proche, se manifeste à travers l'existence des fragments de verre basaltique à plusieurs niveaux dans la carotte. La source d'apport de ces produits est vraisemblablement le relief volcanique central qui sépare les quatre bassins de la fosse Shaban.

## 2 - L'UNITE VI (602-604 cm) : LES SEDIMENTS METALLIFERES

Par leur composition chimique et minéralogique, les sédiments métallifères de la carotte TM KS 1 peuvent être classés dans le faciès à oxydes amorphes et à goethite ("Goethite-Amorphous facies"). Ils peuvent, en particulier, être rapprochés des sédiments métallifères de la fosse Kebrit (Bignell *et al.*, 1976) qui est une des fosses les plus au Nord et renfermant des boues minéralisées (cf fig. 75).

L'intercalation de ces sédiments particuliers et peu épais (2 cm), au sein d'unités non métallifères, suggère qu'ils sont les témoins d'un épisode brutal et bref, ayant conduit à des modifications radicales des conditions physico-chimiques dans le milieu de dépôt. Bäcker et Richter (1973) (dans Thisse, 1982) interprètent l'existence, dans la fosse Atlantis II, de la "zone centrale oxydée" (située entre deux zones à sulfures), comme le résultat d'une déstabilisation due à des phénomènes tectoniques et volcaniques. Ceux-ci, ayant écarté les saumures réductrices, ont ouvert le milieu aux eaux oxygénées du fond de la mer Rouge, et ont ainsi permis, à partir de sources proches la précipitation du fer sous forme d'oxyhydroxydes.

En ce qui concerne la fosse Shaban, ce phénomène, s'il a existé, a certainement été moins important et peut, peut-être, s'expliquer seulement par des fluctuations du niveau du toit des saumures ; celles-ci pouvant être dues à une activité volcanique et tectonique, au niveau du relief central de la fosse. La carotte TM KS 1 a été prélevée en bordure

du bassin sud-ouest, où les saumures sont donc moins épaisses. Il aurait ainsi suffi d'un mouvement de relativement faible amplitude pour rabaisser le toit des saumures. Ceci, combiné à des émissions hydrothermales, aurait alors permis le dépôt de fer sous forme d'oxyhydroxydes.

Par rapport aux sédiments métallifères étudiés jusqu'à présent, ceux de la carotte TM KS 1 sont particuliers à différents égards :

- la goethite est abondante,
- le manganèse n'est pas lié au fer,
- les oxyhydroxydes de fer amorphes sont essentiellement en imprégnation sur d'autres particules (quartz, calcite, dolomite...) contrairement à la définition de Boström et Peterson (1966, 1969). Ces auteurs parlent, en effet, d'oxyhydroxydes sous forme d'agrégats indépendants plutôt qu'un enrobage d'autres particules ;

- l'arsenic, contrairement au sélénium ne semble pas bien corrélé au fer, ce qui confirmerait une origine hydrothermale plus certaine pour le sélénium que pour l'arsenic.

### 3 - CONCLUSION

L'étude de la carotte TM KS 1 fait apparaître que la sédimentation dans la fosse Shaban (ou Jean Charcot) est marquée par une influence hydrothermale, essentiellement entre 602 et 604 cm (unité VI) où les sédiments, de teinte rouille, sont caractérisés par des teneurs élevées en  $Fe_2O_3$  (31,11 % à 34,73 %), sous forme d'oxydes. Il semble qu'un apport hydrothermal plus faible existe aussi dans les autres unités sédimentaires de la carotte, comme l'attestent la présence fréquente (en proportions faibles toutefois) de pyrite et la concentration de microconcrétions de sulfures de Fe, Ni et Co vers la base de la colonne sédimentaire. Ces niveaux à sulfures correspondent alors à des dépôts dans un milieu réducteur.

# **CONCLUSION GENERALE**

LES ORIGINES ET LES EVOLUTIONS DES SEDIMENTS  
METALLIFERES

**CONCLUSION GENERALE****LES ORIGINES ET LES EVOLUTIONS DES SEDIMENTS METALLIFERES**

Le concept de "sédiment métallifère" est né à la suite de la description par Boström et Peterson (1966, 1969), de sédiments riches en Fe et Mn, sous forme d'oxyhydroxydes et pauvres en Al prélevés à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, sédiments interprétés comme d'origine hydrothermale. Dès lors, les termes "sédiment métallifère" et "sédiment hydrothermal" sont généralement employés de façon synonyme.

En utilisant les critères minéralogiques et chimiques proposés par Boström et Peterson (1966, 1969), il est vraisemblable d'admettre une origine hydrothermale des sédiments métallifères prélevés à l'axe des dorsales océaniques où des manifestations hydrothermales ont été reconnues. Cependant, d'après ces mêmes critères, il est difficile d'y relier la genèse de sédiments ayant des caractéristiques proches, mais situés dans des domaines océaniques où aucun phénomène hydrothermal n'a été mis en évidence à ce jour. C'est le cas en particulier de la zone DOMES-C, dans le Pacifique Nord (Bischoff et Rosenbauer, 1977 ; Bischoff *et al.*, 1979a ; Hein *et al.*, 1979), de la dépression de Bauer (cf chapitre IV), ou encore du bassin de Tiki (Tracey *et al.*, 1971 ; Hoffert *et al.*, 1979 ; Hoffert, 1980) dans le Pacifique Sud.

Pour faire progresser la compréhension du mode de genèse de ces sédiments, la démarche suivie a été d'étudier les sédiments prélevés à proximité de la dorsale du Pacifique Est, vers 13° Nord, zone dans laquelle les phénomènes hydrothermaux sont abondants et ont fait l'objet de travaux nombreux, puis d'établir ainsi les caractéristiques de ces sédiments. Utilisant comme "référence" ce type de sédiments métallifères, il a été possible de rechercher les modifications qu'ils ont subies durant la diagenèse, en étudiant des sédiments de même origine, mais situés à l'interface basalte-sédiments pélagiques. Il s'agit là de prélèvements issus des forages du "Glomar Challenger". Enfin, l'étude de quelques types de "sédiments métallifères" situés dans des contextes géologiques variés (océan naissant en Mer Rouge, série ancienne associée au complexe ophiolitique du Troodos à Chypre, sédiments métallifères en surface de la colonne sédimentaire mais non associés à l'hydrothermalisme dans la dépression de Bauer) permet de nuancer la signification du terme "sédiment métallifère".

## I - LES SEDIMENTS METALLIFERES ACTUELS ASSOCIES AUX PHENOMENES HYDROTHERMAUX A L'AXE DE LA DORSALE DU PACIFIQUE EST VERS 13° NORD

### A - LES SEDIMENTS LES PLUS COMMUNS

1 - Ce sont des *sédiments fins* (vases d'argiles), de couleur brun-chocolat plus ou moins foncé (cf planche V).

2 - *Quatre phases* dominent la composition de ces sédiments :

a - Fe-Mn sous forme d'oxyhydroxydes amorphes (dominants), de micronodules (peu abondants) et quelquefois de traces de goethite.

b - des minéraux argileux peu abondants d'origine :

. continentale (illite, chlorite, smectites, kaolinite) et instables dans cet environnement

. néoformée (smectites issues de la dissolution des organismes siliceux et de l'altération du verre volcanique)

. hydrothermale (kaolinite). Une telle origine peut, en effet, être envisagée pour ce minéral du fait de sa petite taille (de l'ordre du dixième de micron) et de sa présence signalée en encroûtement sur des basaltes en contact avec une émission de fluide tiède, à 21° Nord sur la dorsale du Pacifique Est (Février, 1981).

- c - une fraction biogène calcaire et siliceuse dont la proportion variable ne dépasse cependant pas 20 % et qui est caractérisée par une dissolution intense.
- d - des fragments de verre volcanique qui peuvent représenter jusqu'à 10 % du sédiment.

3 - *Leur composition chimique* est caractérisée par :

- a - des teneurs élevées en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13,7 %, moyenne sur 45 échantillons) et Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (2,1 %) comparativement aux argiles pélagiques du Pacifique (Ppc) qui contiennent respectivement 7,7 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 0,6 % Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Bischoff *et al.*, 1979b).
- b - des teneurs faibles en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7,9 %) par rapport aux argiles pélagiques du Pacifique (16,6 %).

Les enrichissements en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> des sédiments sont souvent exprimés par les auteurs à partir de la fraction décarbonatée du fait des teneurs élevées en CaCO<sub>3</sub>. Les valeurs qui sont données ici, concernent le sédiment total dont la teneur en CaCO<sub>3</sub> est en moyenne relativement faible (22 %).

- c - un rapport Fe/Mn variable (4,5 à 25) similaire à celui des sédiments pélagiques moyens (Bischoff *et al.*, 1979b).
- d - un rapport (Fe+Mn)/Al faible (1 à 9) par rapport à celui des sédiments métallifères décrits par Walter et Stoffers (1985) à 20° Sud sur la dorsale du Pacifique Est (> 40) et traduisant une influence détritique plus importante à 13° Nord.
- e - deux éléments, As et Se, ont été dosés en particulier dans ces sédiments. Jusqu'à présent, l'absence de critères minéralogiques et géochimiques spécifiques à l'hydrothermalisme, a conduit à choisir ces deux éléments chalcophiles. Ce sont des éléments de la chimie de soufre qui, lui-même, constitue un élément important des émissions hydrothermales.

- As : la valeur moyenne obtenue (52 ppm) est supérieure à celles proposées par Boström et Valdes (1969) et Marchig *et al.* (1982) pour des sédiments pélagiques moyens (respectivement 40 ppm et entre 3 et 10 ppm). Elle est, en revanche, inférieure à celle de sédiments métallifères décrits par Marchig *et al.* (1982) sur la dorsale du Pacifique Est (157 ppm). Une origine hydrothermale peut ainsi être envisagée. Cependant, ces au-

teurs n'excluent pas une origine partiellement hydrogène pour cet élément qui est facilement adsorbé par les oxyhydroxydes de fer.

- Se : cet élément est beaucoup plus rarement dosé dans les sédiments. Les valeurs obtenues ici varient de 0,3 ppm à 2,9 ppm dans les sédiments de surface, tandis qu'elles montrent une tendance nette à la diminution en profondeur, au-delà de 50 cm. Son coefficient de corrélation avec As (+0.54) montre que ces deux éléments ont des comportements légèrement différents.

#### 4 - Les autres caractéristiques de ce type de sédiments :

- a - ils ne renferment jamais de sulfures. Ce fait amène à considérer que les sulfures hydrothermaux émis par les cheminées ont, soit atteint les sédiments et ont été très rapidement altérés, soit ont été entraînés ou déposés ailleurs. Le premier cas implique qu'un apport de cette nature ne peut être que faible afin de permettre une disparition totale des sulfures. Senant (1985) a ainsi montré que plus de 90 % des particules émises par les fluides hydrothermaux de haute température, sont sous forme d'anhydrite et que les sulfures représentent moins de 10 % du matériel émis. Ceux-ci sont donc plus vraisemblablement entraînés par les panaches hydrothermaux ou par les courants de convection engendrés par les sources actives par contact des fluides chauds avec l'eau de mer.
- b - ce type de sédiments est largement le plus répandu à 13° Nord, à la fois dans le graben central, en dehors des sites hydrothermaux actifs ou inactifs et sur le flanc ouest de la dorsale.
- c - leur répartition est guidée par les courants de fond mis en évidence par Hékinian *et al.* (1983a), par la bioturbation importante (cf planche V) et les phénomènes tectoniques et volcaniques existant principalement dans le graben central.

#### 5 - Conclusion

- La définition d'un sédiment métallifère repose sur trois critères essentiels qui sont :

- . la finesse (vase d'argiles),
- . la couleur brun-chocolat,
- . une phase dominante amorphe représentée par des oxyhydroxydes Fe-Mn qui induisent la composition chimique (richesse en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> et teneurs faibles en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

- La faible proportion de phases cristallisées (argiles, oxydes Fe et Mn), la richesse des phases amorphes (oxyhydroxydes Fe, Mn) et l'ab-

sence de sulfures suggèrent un mode de genèse de ces sédiments par dépôt de particules d'oxydes et dont l'origine réside dans l'émission massive et proche de ces éléments. Cette source principale est bien représentée à 13° Nord par les phénomènes hydrothermaux qui y ont été largement décrits (cf chapitre II).

#### B - LES SEDIMENTS ASSOCIES AUX EDIFICES HYDROTHERMAUX INACTIFS

- Leur extension est limitée au voisinage immédiat des édifices hydrothermaux inactifs, c'est-à-dire dans le graben central et sur certains seamounts.

- Ce sont des sédiments fins (vases d'argiles) de couleur rouille.

- Ils sont constitués en majorité par de la limonite (75 %) et des sulfures Fe, Zn et Cu (23 %).

- La fraction biogène est très faible et fortement dissoute.

- Leur composition chimique est caractérisée par :

- . des teneurs très élevées en  $Fe_2O_3$  (44 %), faibles en  $Mn_3O_4$  (0,07 %) et  $Al_2O_3$  (0,72 %)

- . des valeurs très élevées pour les rapports Fe/Mn (=611) et (Fe+Mn)/Al (=80).

- Leur mode de genèse est différent de celui du type précédent. Ils résultent de l'altération, au contact de l'eau de mer, des sulfures constituant les édifices hydrothermaux après arrêt de leur activité.

#### II - DES SEDIMENTS PARTICULIERS SITUES AU SOMMET DU SEAMOUNT CLIPPERTON

- Leur présence a été notée seulement au sommet du seamount Clipperton dont la hauteur (800 m à l'isobathe 2900 m) les place au-dessus de la tranche d'eau où les anomalies dues à l'hydrothermalisme sont maximum (entre 100 et 200 m au-dessus du fond).

- Les caractéristiques de ce type de sédiments, ne permettent pas de l'inclure parmi les sédiments "métallifères" au sens où nous les avons définis précédemment. En effet :

- . ce sont des sédiments grossiers (sables)
- . ils sont constitués par 99 % de foraminifères très bien conservés et très fréquemment encroûtés par des oxydes de fer, et surtout de manganèse
- . le rapport Fe/Mn est inférieur à 1 (=0,51), contrairement aux deux types précédents.

- Dans ce cas précis, la source principale des métaux est probablement d'origine hydrogène, du fait de sa position peu profonde, de l'absence de dissolution des foraminifères et du rapport Fe/Mn inférieur à 1.

### III - AUTRES EXEMPLES DE SEDIMENTS METALLIFERES

Les études effectuées à partir d'autres exemples font ressortir des origines multiples pour ces sédiments :

#### A - LES SEDIMENTS METALLIFERES HYDROTHERMAUX

- Les sédiments métallifères forés à la base de la colonne sédimentaire dans le Pacifique correspondent par les critères minéralogiques et chimiques employés, aux sédiments métallifères communs rencontrés à 13° Nord.

- A Chypre, dans le complexe du Troodos, on retrouve les deux types de sédiments métallifères connus à 13° Nord. Les premiers ("terres d'ombre") peuvent être assimilés aux sédiments métallifères communs, tandis que les seconds ("ocres") sont les équivalents des sédiments métallifères associés aux édifices hydrothermaux inactifs.

- Les sédiments métallifères de la mer Rouge sont également d'origine hydrothermale. Le contexte géodynamique est cependant particulier. La mer Rouge est en effet, un "petit océan" en voie de formation où les manifestations hydrothermales sont fortement influencées par la présence de saumures. Les sédiments métallifères que nous avons étudiés appartiennent au faciès amorphe et à goethite et se différencient des sédiments métallifères communs de 13° Nord par une présence plus importante de phases cristallisées d'oxydes Fe.

#### B - LES SEDIMENTS METALLIFERES A GENESES MULTIPLES

Les sédiments métallifères de surface dans la dépression de Bauer résultent de la combinaison de plusieurs facteurs :

- dissolution des carbonates,
- apport hydrogène par faible taux de sédimentation et donc, contact prolongé avec l'eau de mer,
- influence hydrothermale mineure et guidée par la circulation océanique profonde.

#### IV - LE SELENIUM : MARQUEUR D'UN HYDROTHERMALISME RECENT

Les mesures d'arsenic et de sélénium effectuées dans les différents exemples de sédiments métallifères montrent les faits suivants :

- l'arsenic est en proportions très variables dans tous les domaines. Les teneurs mesurées, par exemple à 13° Nord sur la dorsale du Pacifique Est (5 ppm à 162 ppm) et dans les sédiments de la dépression de Bauer (16 ppm à 115 ppm) indiquent un même ordre de grandeur pour cet élément dans des environnements très différents. Ceci confirmerait une origine au moins en partie hydrogène pour l'arsenic.
- le sélénium, bien que présent en faibles proportions (quelques dixièmes de ppm à quelques ppm) est étroitement lié à l'existence très proche dans l'espace et dans le temps, d'émissions hydrothermales actives. C'est le cas à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, à 13° Nord, dans le niveau métallifère du Site 471 du DSDP (où la mise en place d'un sill de diabase a vraisemblablement entraîné des phénomènes hydrothermaux secondaires) et dans la carotte TM KS 1 en mer Rouge.

- le sélénium semble se mobiliser au cours de la diagenèse et ne pourrait donc pas "tracer" l'hydrothermalisme dans les sédiments anciens. Cette remobilisation intervient très vite. Le sélénium est, en effet, inférieur à la limite de détection au-delà de 50 cm de profondeur environ, dans les sédiments de la dorsale du Pacifique Est vers 13° Nord.

Une étude du comportement de As et Se est actuellement menée par A. Birolleau à l'IFREMER (Centre de Brest). Ce travail, basé sur de nombreuses mesures à partir d'échantillons de sédiments, de basaltes et d'eau de mer provenant d'environnements variés, hydrothermaux ou non, permettra de confirmer ou d'infirmer nos conclusions.

## V - EVOLUTION DIAGENETIQUE DES SEDIMENTS METALLIFERES

Les sédiments métallifères présentent une faible évolution diagénétique qui se traduit par :

- une persistance du caractère amorphe dominant des oxyhydroxydes de fer et manganèse et une très faible tendance à la cristallisation de goéthite,
- des modifications de la phase argileuse sous forme de néoformations de smectites et d'interstratifiés irréguliers de type illite-smectite,
- une remobilisation du sélénium dans les sédiments d'origine hydrothermale.

*La répartition à l'échelle mondiale des sédiments métallifères (Pacifique, mer Rouge, Chypre, Terre Neuve, Oman...) et leur omniprésence au cours des temps géologiques (Cambrien à Actuel) rend compte de l'importance des phénomènes qui leur ont donné naissance. Leur étude et celle de leur environnement constituent des guides en ce qui concerne l'évaluation des ressources potentielles en métaux dans le monde, celles-ci pouvant constituer des réserves pour l'avenir. Ainsi, à 13° Nord sur la dorsale du Pacifique Est, la masse totale de matériel métallique émise par une cheminée hydrothermale est de l'ordre de 86 à 112 kg par jour (Hékinian et al., 1983 b).*

*En mer Rouge, dans la fosse Atlantis II, d'une surface de 60 km<sup>2</sup>, les réserves en Zn, Cu et Ag sont estimées à 2,5 millions de tonnes.*

# **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

- ALABASTER T., PEARCE J.A. et MALPAS J. - 1982. - The volcanic stratigraphy and petrogenesis of the Oman Ophiolite Complex. *Contrib. Mineral. Petrol.* 81, pp. 168-183.
- ANDERSON R.N. et HALUNEN J. Jr - 1974. - Implications of heat flow for metallogenesis in the Bauer Deep. *Nature*, 251, pp. 473-475.
- ANDERSON T.F., DONNELLY T.W., DREVER J.I., ESLINGER E., GIESKES J.M., KASTNER M., LAWRENCE J.R. et PERRY E.A. - 1976. - Geochemistry and diagenesis of deep-sea sediments from Leg 35 of the Deep-Sea-Drilling-Project. *Nature*, 261, n° 5560, pp. 473-476.
- BACKER H. - 1976. - Fazies und chemische Zusammensetzung rezenter Ausfällungen aus Mineralquellen im Roten Meer. *Geologisches Jahrbuch*, Hannover, D 17, p. 151-172.
- BACKER H., LANGE J. et MARCHIG V. - 1985. - Hydrothermal activity and sulphide formation in axial valleys of the East Pacific Rise crest between 18 and 22°S. *E.P.S.L.*, 72, pp. 9-22.
- BAGIN V.I., BAGINA O.A., BOGDANOV Y.V.A., GENDLER T.S., LEBEDEV A.I., LISITSYN A.P. et PECHERSKIY D.M. - 1975. - Iron in the metalliferous sediments of the Bauer Deep and East Pacific Rise. *Geochim. Internation. U.S.A.*, 12, n° 2, pp. 105-125.
- BALLARD R.D., HEKINIAN R. et FRANCHETEAU J. - 1984. - Geological setting of hydrothermal activity at 12°50'N on the East Pacific Rise : a submersible study. *E.P.S.L.*, 69, pp. 176-186.
- BENDER M., BROECKER W., GORNITZ V., MIDDEL U., KAY R., SUN S.S. et BISCAYE P. - 1971. - Geochemistry of three cores from the East Pacific Rise. *E.P.S.L.*, 12, pp. 425-433.
- BERTIN J., PEDEUX J.P. et MAGENHAM J.C. - 1979. - Contribution de la géophysique et de l'océanographie physique à la recherche et à l'exploration des boues métallifères de la mer Rouge. *Documents BRGM*, n° 7, pp. 339-366.
- BEUTELSPACHER H. et VAN DER MAREL H.W. - 1968. - Atlas of electron microscopy of clay minerals and their admixtures. Elsevier Publishing Company, 333 p.
- BIGNELL R.D. - 1978. - Genesis of the Red Sea metalliferous sediments. *Marine Mining*, 1, 3, pp. 209-235.
- BIGNELL R.D., CRONAN D.S. et TOOMS J.S. - 1976. - Red Sea metalliferous brines precipitates. *Geological Association of Canada*. Special paper number 14, pp. 147-179.
- BISCHOFF J.L. - 1969. - Red Sea geothermal brine deposits : their mineralogy, chemistry and genesis. *In* : DEGENS E.T. et ROSS D.A., eds. Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea, pp. 368-401.
- BISCHOFF J.L. et ROSENBAUER R.J. - 1977. - Recent metalliferous sediment in the North Pacific manganese nodule area. *E.P.S.L.*, 33, pp. 379-388.
- BISCHOFF J.L. et SAYLES F.L. - 1972. - Pore fluid and mineralogical studies of recent marine sediments : Bauer depression region of East Pacific Rise. *Journal of Sedimentary Petrology*, 42, n° 3, pp. 711-724.
- BISCHOFF J.L., PIPER D.Z. et QUINTERNO P. - 1979a - Nature and origin of metalliferous sediment in Domes Site C, Pacific Manganese Nodule Province. *Colloques Internationaux du C.N.R.S.* n° 289. La genèse des nodules de manganèse, pp. 119-138.
- BISCHOFF J.L., HEATH G.R. et LEINEN M. - 1979b. - Geochemistry of deep-sea sediments from the Pacific Manganese Nodule Province : Domes sites A, B and C. *In* : BISCHOFF J.L. et PIPER D.Z., eds. Marine geology and oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province, pp. 397-436.
- BONATTI E., KRAEMER J. et RYDELL H. - 1972. - Classification and genesis of submarine iron-manganese deposits. *In* : HORN D.R., ed. Ferromanganese deposits on the ocean floor, pp. 149-167.

- BONATTI E., ZERBI M., KAY R. et RYDELL H. - 1976. - Metalliferous deposits from the Apennine ophiolites : mesozoic equivalents of modern deposits from oceanic spreading centers. *Geol. Soc. Am. Bull.* 87, n° 1, pp. 83-94.
- BONATTI E., KOLLA V., MOORE W.S. et STERN C. - 1979. - Metallogenesis in marginal basins : Fe-rich basal deposits from the Philippine sea. *Marine Geology*, 32, pp. 21-37.
- BORCH (von der) C.C., NESTEROFF W.D. et GALEHOUSE J.S. - 1971. - Iron-rich sediments cored during Leg 8 of the Deep Sea Drilling Project. *In* : TRACEY J.I. Jr *et al.*, *Init. Repts DSDP*, 8, pp.829-835.
- BORCH (von der) C.C. et REX R.W. - 1970. - Amorphous iron oxide precipitates in sediments cored during Leg 5 : Deep Sea Drilling Project. *In* : Mac MANUS D.A. *et al.* *Init. Repts DSDP*, 5, pp 541-544.
- BOSTROM K. - 1970. - Submarine volcanism as a source for iron. *E.P.S.L.*, 9, pp. 348-354.
- BOSTROM K. - 1973. - The origin and fate of ferromanganoan active ridge sediments. *Stockholm Contrib. Geol.*, 27, 2, pp. 149-243.
- BOSTROM K. et FISCHER D.E. - 1969. - Distribution of mercury in East Pacific sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, pp. 743-745.
- BOSTROM K. et PETERSON M.N.A. - 1966. - Precipitates from hydrothermal exhalations on the East Pacific Rise. *Economic Geology*, 61, pp. 1258-1265.
- BOSTROM K. et PETERSON M.N.A. - 1969. - The origin of aluminium-poor ferromanganoan sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise. *Marine Geology Amsterdam*, 7, (5), pp. 427-447.
- BOSTROM K. et VALDES S. - 1969. - Arsenic in ocean floors. *Lithos* 2, pp. 351-360.
- BOSTROM K., PETERSON M.N.A., JOENSUU O. et FISCHER D.E. - 1969. - Aluminium poor ferromanganoan sediments on active oceanic ridges. *Journal of Geophysical Research*, 74, n° 12, pp. 3261-3270.
- BOSTROM K., JOENSUU O. et BROHM I. - 1974. - Plankton : its chemical composition and its significance as a source of pelagic sediments. *Chem. Geol.*, 14, pp. 255-271.
- BOSTROM K., JOENSUU O., VALDES S., CHARM W. et GLACCUM R. - 1976. - Geochemistry and origin of East Pacific sediments sampled during DSDP Leg 34. *In* : YEATS R.S., HART S.R. *et al.* *Init. Repts DSDP*, 34, pp. 559-574.
- BOUGAULT H. - 1982. - Circulation hydrothermale océanique et métallogénèse. *Annales des Mines* - novembre-décembre 1982, pp. 91-122.
- BOULEGUE J., MICHARD G., BOUGAULT H. et CHARLOU J.L. - 1980. - Hydrothermal activity on the East Pacific Rise between 15°N and 7°S. *E.O.S.*, 61, n° 46, p. 992.
- BOULEGUE J., LAFITTE M. et MAURY R. - 1983. - Etude minéralogique des sédiments métallifères collectés à proximité de l'axe de la dorsale Est-Pacifique (12°45' Nord). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 296, série II, pp. 1729-1732.
- BURCKLE L.H. - 1972. - Late cenozoic planktonic diatom zones from the Eastern Equatorial Pacific. *Nova Hedwigia, Beih. (1st symp. Recent Fossil Mar. Diatoms Proc., Bremerkaven, 1970)*, n° 39, pp. 217-249.
- BURCKLE L.H. - 1977. - Pliocene and pleistocene diatom datum levels from the Equatorial Pacific. *Quaternary Research*, 7, pp. 330-340.
- BURNS R.G., BURNS V.M. - 1977. - Mineralogy. *In* : GLASBY G.P. ed., *Marine manganese deposits*, pp. 185-248.
- CADET J.P., THISSE Y., POUCKET A., BARDINTZEFF J.M. et STEPHAN J.F. - 1982a. - Tephra from Deep Sea Drilling Project Leg 66 : Middle America trench transect (southern Mexico). *In* : WATKINS J.S., MOORE J.C. *et al.* *Init. Repts DSDP*, 66, pp. 687-698.
- CADET J.P., POUCKET A., THISSE Y., BARDINTZEFF J.M. et AZEMA J. - 1982b. - Middle America neogene explosive volcanism and ash layers : Evidence from the Middle America trench transect, Deep Sea Drilling Project Leg 67. *In* : AUBOIN J., von HUENE R. *et al.* *Init. Repts DSDP*, 67, pp. 475-491.
- CAZIOT L.H. - 1982. - Les sédiments métallifères de la dorsale du Pacifique Est : sédimentologie, chimie et genèse. *Rapport de DEA*, Univ. Bret. Occidentale, Brest, 52 p.

- CHAMLEY H. et MILLOT G. - 1972. - Néof ormation de montmorillonite à partir de diatomées et de cendres dans les sédiments marins de Santorin (Méditerranée orientale). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 274, pp. 1132-1134.
- CHOUKROUNE P., FRANCHETEAU J. et HEKINIAN R. - 1984. - Tectonics of the East Pacific Rise near 12°50'N : a submersible study. *E.P.S.L.*, 68, pp. 115-127.
- CHOUKROUNE P., FRANCHETEAU J. et HEKINIAN R. - 1985. - Carte géologique de la ride Est-Pacifique à 12°50'N. *Bull. Soc. géol. France*, 8, t. I, n° 1, pp. 145-148.
- CONSTANTINOU G. et GOVETT G.J.S. - 1972. - Genesis of sulphide deposits, ochre and umber of Cyprus. Institution of Mining and Metallurgy. Transactions vol. 31, section B, Bulletin n° 783, B 34-46.
- CONSTANTINOU G. et GOVETT G.J.S. - 1973. - Geology, Geochemistry and genesis of Cyprus sulfide deposits. *Economic Geology*, 68, pp. 843-858.
- CRAIG H. - 1969. - Geochemistry and origin of the Red Sea brines. In : DEGENS E.T. et ROSS D.A. eds. Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea, pp. 208-250.
- CRAIG H., CLARKE W.B. et BEG M.A. - 1975. - Excess <sup>3</sup>He in deep water on the East Pacific Rise. *E.P.S.L.*, 26, pp. 125-132.
- CRONAN D.S. - 1969. - Average abundances of Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Pb, Mo, V, Cr, Ti and P in Pacific pelagic clays. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, pp. 1562-1565.
- CRONAN D.S. - 1972. - The Mid-Atlantic Ridge near 45°N, XVII : Al, As, Hg and Mn in ferruginous sediments from the median valley. *Can. Journ. Earth Sc.*, 9, pp. 319-323.
- CRONAN D.S. - 1973. - Basal ferruginous sediments cored during Leg 16, Deep Sea Drilling Project. In : van ANDEL T.H., HEATH G.R. et al. *Init. Repts DSDP*, 16, pp. 601-604.
- CRONAN D.S. - 1980. - Metalliferous sediments. In : HERMAN H. et CRONAN D.S. eds. Underwater minerals. Academic Press, London, Chap. 6, pp. 170-227.
- CRONAN D.S. et VARNAVAS S.P. - 1981. - Hydrothermal and dissolution related geochemical variations in sediments from an East Pacific Rise fracture zone at 9°S. *Oceanologica Acta, Proceedings 26th International Geological Congress, Geology of oceans symposium*, Paris, July 7-17, 1980, pp. 47-58.
- DASCH E.J. - 1974. - Metallogensis in the southeastern Pacific. A progress report on the IDOE NAZCA PLATE PROJECT. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 9, pp. 249-258.
- DASCH E.J., DYMOND J.R. et HEATH G.R. - 1971. - Isotopic analysis of metalliferous sediment from the East Pacific Rise. *E.P.S.L.*, 13, pp. 175-180.
- DESBRUYERES D., CRASSOUS P., GRASSLE J., KHRIPOUNOFF A., REYSS D., RIO M. et van PRAET M. - 1982. - Données écologiques sur un nouveau site d'hydrothermalisme actif de la ride du Pacifique oriental. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 295, pp. 489-494.
- DESMET A., LAPIERRE H., ROCCI G., GAGNY Cl., PARROT J.F. et DELALOYE M. - 1978. - Constitution and significance of the Troodos sheeted complex. *Nature*, 273, pp. 527-530.
- DESPRAIRIES A. et LAPIERRE H. - 1973. - Les argiles liées au volcanisme du massif du Troodos (Chypre) et leur remaniement dans sa couverture. *Revue de Géographie physique et de Géologie Dynamique* (2), XV, fasc. 5, pp. 499-510.
- DEVINE J.D. et LEINEN M. - 1981. - Chemistry of the massive sulfide deposit cored at Site 471. In : YEATS R.S., HAQ B.U. et al. *Init. Repts DSDP*, 63, pp. 679-686.
- DINKELMAN M.G. - 1973. - Radiolarian stratigraphy : Leg 16, Deep Sea Drilling Project. In : van ANDEL T.H., HEATH G.R. et al. *Init. Repts DSDP*, 16, pp. 747-813.
- DREVER J.I. - 1971. - Chemical and mineralogical studies, Site 66. In : WINTERER E.L. et al. *Init. Repts DSDP*, 7, pp. 965-975.
- DU CASTEL V. - 1985. - Etablissement d'une carte géologique au 1/20.000 d'un domaine océanique profond dans une zone riche en nodules polymétalliques du Pacifique Nord (zone Clarion-Clipperton). *Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale*, 211 p.
- DUKE N.A. et HUTCHINSON R.W. - 1974. - Geological relationships between massive sulfide bodies and ophiolitic volcanic rocks near York Harbour, Newfoundland. *Can. Journ. Earth Sc.*, 11, pp. 53-69.

- DYMOND J. - 1981. - Geochemistry of Nazca plate surface sediments : an evaluation of hydrothermal, biogenic, detrital and hydrogenous sources. *In* : KULM L.D., DYMOND J., DASCH E.J. et HUSSONG D.M. eds. "Nazca Plate : crustal formation and andean convergence" *Geological Society of America*, Memoir 154, pp. 133-173.
- DYMOND J. et EKLUND W. - 1978. - A microprobe study of metalliferous sediment components. *E.P.S.L.*, 40, pp. 243-251.
- DYMOND J. et VEEH H.H. - 1975. - Metal accumulation rates in the Southeast Pacific and the origin of metalliferous sediments. *E.P.S.L.*, 28, pp. 13-22.
- DYMOND J., CORLISS J.B., HEATH G.R., FIELD C.W., DASCH E.J. et VEEH H.H. - 1973. - Origin of metalliferous sediments from the Pacific ocean. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, pp. 3355-3372.
- DYMOND J., CORLISS J.B. et STILLINGER R. - 1976. - Chemical composition and metal accumulation rates of metalliferous sediments from Sites 319, 320 and 321. *In* : YEATS R.S., HART S.R. et al. *Init. Repts DSDP*, 34, pp. 575-588.
- DYMOND J., CORLISS J.B. et HEATH G. - 1977. - History of metalliferous sedimentation at Deep Sea Drilling Site 319 in the South Eastern Pacific. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, pp. 741-753.
- EINSELE G., GIESKES J.M., CURRAY J., MOORE D.M., AGUAYO E., AUBRY M.P., FORNARI D., GUERRERO J., KASTNER M., KELTS K., LYLE M., MATOBA Y. et MOLINA-CRUZ A. - 1980. - Intrusion of basaltic sills into highly porous sediments and resulting hydrothermal activity. *Nature*, 283, pp. 441-445.
- EKLUND W.A. - 1974. - A microprobe study of metalliferous sediment components. *M.S. Thesis*, Oregon State University, Corvallis, 77 p.
- ELDERFIELD H., GASS I.G., HAMMOND A. et BEAR L.M. - 1972. - The origin of ferromanganese sediments associated with the Troodos massif of Cyprus. *Sedimentology*, 19, pp. 1-19.
- ENRIGHT J.T., NEWMAN W.A., HESSLER R.R. et Mc GOWAN J.A. - 1981. - Deep-ocean hydrothermal vent communities. *Nature*, 289, pp. 219-221.
- FEVRIER M. - 1981. - Hydrothermalisme et minéralisations sur la dorsale Est Pacifique à 21°N. Etude minéralogique et géochimique. *Thèse de doctorat de 3ème Cycle*, Brest, 270 p.
- FIELD C.W., DYMOND J.R., CORLISS J.B., DASCH E.J., HEATH G.R., SENECHAL R.G. et VEEH H.H. - 1976. - Metallogenesis in southeast Pacific Ocean : Nazca Plate Project. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Mem.*, 25, pp. 539-550.
- FLEET A.J. et ROBERTSON A.H.F. - 1980. - Ocean-ridge metalliferous and pelagic sediments of the Semail Nappe, Oman. *J. geol. Soc. London*, 137, n° 4, pp. 403-422.
- FOURNIER-GERMAIN B., LE PENNEC M. et HOFFERT M. - 1986. - Des pièges naturels de phases hydrothermales sur la dorsale du Pacifique Est : les modioles *Bathymodiolus thermophilus*. *Bull. Soc. géol. France*, 8, t. II, n° 3, pp. 457-460.
- FRANCHETEAU J. - 1981. - Characteristics of the axial region of the East Pacific Rise. Abstract. *In* : AGU Chapman Conference. The creation of the oceanic lithosphere, april 6-10, Warrenton, Virginia.
- FUSTEC A. - 1985. - Microdistribution et variations temporelles de la faune hydrothermale des sites de la zone "13°N" sur la ride du Pacifique Est. *Thèse de doctorat-ingénieur en Sciences Agronomiques*, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, 146 p.
- GASS I.G. - 1968. - Is the Troodos Massif of Cyprus a fragment of mesozoic ocean floor ? *Nature*, 220, pp. 39-42.
- GENTE P., AUZENDE J.M., BOUGAULT H. et VOISSET M. - 1984. - Variabilité morphotectonique le long de la dorsale Est-Pacifique entre 11° et 13°N. Résultats préliminaires de la campagne Géocyarise 2 (submersible CYANA). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 299, série II, n° 19, pp. 1337-1342.
- GEOCYARISE - 1984. - Submersible study of the East Pacific Rise. *Nature*, 311, p. 606.
- GOLDBERG E.D. et ARRHENIUS G.O.S. - 1958. - Chemistry of Pacific pelagic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 13, pp. 153-212.
- GRECHIN V.I., EROSHCHEV-SHAK V.A. et ZOLOTAREV B.P. - 1981. - Petrochemistry of abyssal oceanic basalts and dolerites, and their secondary alterations, Sites 469, 470, 471, 472, 473. *In* : YEATS R.S., HAQ B.U. et al., *Init. Repts DSDP*, 63, pp. 711-732.

- GUENOC P. et THISSE Y. - 1982. - Histoire de l'ouverture de la Mer Rouge et minéralisation des fosses axiales. Synthèse bibliographique. *Documents B.R.G.M.*, 51, 88 p.
- GUILLEMOT D. - 1979. - Un exemple de métallogénie en milieu océanique. Etude des roches témoins des exhalaisons minéralisantes du Troodos (Chypre). *Thèse 3ème Cycle*, Institut National Polytechnique de Lorraine, 206 p.
- GUILLEMOT D. et NESTEROFF W.D. - 1979. - Les dépôts métallifères crétacés de Chypre : Comparaison avec leurs homologues actuels du Pacifique. *In* : PANAYIOTOU A. ed., *International Ophiolite Symposium Nicosia*, pp. 139-146.
- HEATH G.R. et DYMOND J. - 1977. - Genesis and transformation of metalliferous sediments from the East Pacific Rise, Bauer Deep and Central Basin, northwest Nazca Plate. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88, pp. 723-733.
- HEATH G.R. et DYMOND J. - 1981. - Metalliferous sediment deposition in time and space : East Pacific Rise and Bauer Basin, northern Nazca Plate. *In* : KULM L.D., DYMOND J., DASCH E.J. et HUSSONG D.M. eds, "Nazca Plate: crustal formation and andean convergence". *Geol. Soc. Am.*, Memoir 154, pp. 175-197.
- HEATH G.R. et MOBERLY R. Jr - 1971. - Noncalcareous pelagic sediments from the Western Pacific : Leg 7, Deep Sea Drilling Project. *In* : WINTERER E.L. et al., *Init. Repts DSDP*, 7, pp. 987-990.
- HEIN J.R., ROSS C.R., ALEXANDER E. et YEH H.W. - 1979. - Mineralogy and diagenesis of surface sediments from DOMES areas A, B and C. *Marine Science*, 9, pp. 365-396.
- HEKINIAN R. et BIDEAU D. - à paraître. - Volcanism and mineralization of the oceanic crust on the East Pacific Rise. Metallogeny of basic and ultrabasic rocks conference. *Proceedings Institution of Mining and Metallurgy*.
- HEKINIAN R. et FOUQUET Y. - 1985. - Volcanism and metallogenesis of Axial and off-axial structures on the East Pacific Rise near 13°N. *Economic Geology*, 80, n° 2, pp. 221-249.
- HEKINIAN R., FEVRIER M., NEEDHAM H.D., AVEDIK F. et CAMBON P. - 1981. - Sulfide deposits : East Pacific Rise near 13°N. *E. O. S.*, 62, n° 45, p. 913.
- HEKINIAN R., FEVRIER M., AVEDIK F., CAMBON P., CHARLOU J.L., NEEDHAM H.D., RAILLARD J., BOULEGUE J., MERLIVAT L., MOINET A., MANGANINI S. et LANGE J. - 1983 a. - East Pacific Rise near 13°N : geology of new hydrothermal fields. *Science*, 219, pp. 1321-1324.
- HEKINIAN R., FRANCHETEAU J., RENARD V., BALLARD R.D., CHOUKROUNE P., CHEMINEE J.L., ALBAREDE F., MINSTER J.F., CHARLOU J.L., MARTY J.C. et BOULEGUE J. - 1983 b. - Intense hydrothermal activity at the axis of the East Pacific Rise near 13°N : submersible witnesses the growth of sulfide chimney. *Marine Geophysical Researches*, 6, pp. 1-14.
- HEKINIAN R., RENARD V. et CHEMINEE J.L. - 1984. - Hydrothermal deposits on the East Pacific Rise near 13°N : geological setting and distribution of active sulfide chimneys. *In* : RONA P.A., BOSTROM K., LAUBIER L. et SMITH K.L. Jr eds. *Hydrothermal processes at seafloor spreading centers*, pp. 571-602.
- HEKINIAN R., FRANCHETEAU J. et BALLARD R.D. - 1985. - Morphology and evolution of hydrothermal deposits at the axis of the East Pacific Rise. *Oceanologica Acta*, 8, n° 2, pp. 147-155.
- HOFFERT M. - 1980. - Les "argiles rouges des grands fonds" dans le Pacifique Centre-Est. Authigénèse, transport, diagénèse. *Mémoire n° 61*, Univ. Strasbourg, 231 p.
- HOFFERT M., KARPOFF A.M., SCHAAF A. et PAUTOT G. - 1979. - The sedimentary deposits of the Tiki basin (South-East Pacific). Passage from carbonate oozes to "metalliferous sediments". *Colloques internationaux du C.N.R.S.*, n° 289. La genèse des nodules de manganèse, pp. 101-112.
- HOLTZAPFFEL T. - 1983. - Origine et évolution des smectites albo-aptiennes et paléogènes du Domaine Nord-Atlantique. *Thèse 3ème Cycle*, Univ. de Lille, 164 p.
- HUTCHINSON R.W. et SEARLE D.L. - 1971. - Stratatound pyrite deposits in Cyprus and relations to other sulphide ores. *Soc. Mining Geol. Japan*, Spec. Issue, 3, pp. 198-205.
- JENKYN H.C. et HARDY R.G. - 1976. - Basal iron-titanium-rich sediments from Hole 315 A (Line Islands, Central Pacific). *In* : SCHLANGER S.O., JACKSON E.D. et al., *Init. Repts DSDP*, 33, pp. 833-836.
- JUTEAU T. - 1984. - De la croûte océanique aux ophiolites. *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XXVI, n° 3, pp. 471-488.

- KARIG D.E., INGLE J.C. Jr *et al.* - 1975. - Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 31, 927 p.
- KAY M. - 1975. - Campbellton Sequence, manganiferous beds adjoining the Dunnage Melange, Northeastern Newfoundland. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86, pp. 105-108.
- KLINKHAMMER G., BENDER M. et WEISS R.F. - 1977. - Hydrothermal manganese in the Galapagos Rift. *Nature*, 269, pp. 319-320.
- KUYKENDALL W.E., HOFFMAN B.W. et WAINERDI R.E. - 1970. - 14-MeV neutron activation analysis of selected Leg 5 core samples. *In* : Mc MANUS D.A. *et al.*, *Init. Repts DSDP*, 5, pp. 485-486.
- LALLIER-VERGES E. et CLINARD C. - 1983. - Ultra-thin section study of the mineralogy and geochemistry of Mn micronodules from the South Pacific. *Marine Geology*, 52, pp. 267-280.
- LANDERGREN S. - 1964. - On the geochemistry of deep-sea sediments. *Rep. Swed. Deep Sea Exped.*, X, Spec. Invest., n° 5, pp. 61-148.
- LEGGETT J.K. - 1982. - Geochemistry of Cocos Plate pelagic - hemipelagic sediments in Hole 487, Deep Sea Drilling Project Leg 66. *In* : WATKINS J.S., MOORE J.C. *et al.*, eds, *Init. Repts DSDP*, 66, pp. 683-686.
- LEINEN M. - 1981. - Metal-rich basal sediments from northeastern Pacific Deep Sea Drilling Project sites. *In* : YEATS R.S., HAQ B.U. *et al.*, eds, *Init. Repts DSDP*, 63, pp. 667-676.
- LE PENNEC M. et HILY A. - 1984. - Anatomie, structure et ultrastructure de la branchie d'un Mytilidae des sites hydrothermaux du Pacifique oriental. *Oceanologica Acta* 7, n° 4, pp. 517-523.
- LE PENNEC M. et PRIEUR D. - 1984. - Observations sur la nutrition d'un mytilidae d'un site hydrothermal actif de la dorsale du Pacifique oriental. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 298, série III, n° 17, pp. 493-498.
- LONSDALE P. - 1976. - Abyssal circulation of the Southeast Pacific and some geological implications. *Journal of Geophysical Research*, 81, pp. 1163-1176.
- LONSDALE P. - 1977. - Clustering of suspension-feeding macrobenthos near abyssal hydrothermal vents at oceanic spreading centers. *Deep-Sea Research*, 24, pp. 857-863.
- LUPTON J.E. - 1979. - Helium-3 in the Guaymas Basin : evidence for injection of mantle volatiles in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 84, pp. 7446-7452.
- LUPTON J.E., KLINKHAMMER G.P., NORMARK W.R., HAYMON R., MAC DONALD K.C., WEISS R.F. et CRAIG H. - 1980. - Helium-3 and manganese at the 21°N East Pacific Rise hydrothermal site. *E. P. S. L.*, 50, pp. 115-127.
- LYLE M. - 1981. - Formation and growth of ferromanganese oxides on the Nazca plate. *In* : KULM I.D., DYMOND J., DASCH E.J. et HUSSONG D.M. eds. Nazca plate : crustal formation and andean convergence. *Geol. Soc. Am.*, Memoir 154, pp. 269-293.
- Mac MANUS D.A. *et al.* - 1970. - Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 5, 827 p.
- Mac MURTRY G.M. et BURNETT W.C. - 1975. - Hydrothermal metallogenesis in the Bauer Deep of the southeastern Pacific. *Nature*, 254, pp. 42-44.
- Mac MURTRY G.M. et YEH M.W. - 1981. - Hydrothermal clay mineral formation of East Pacific Rise and Bauer Basin sediments. *Chem. Geol.*, 32, n° 3-4, pp. 189-205.
- MARCHIG V. et GUNDLACH H. - 1982. - Iron-rich metalliferous sediments on the East Pacific Rise : prototype of undifferentiated metalliferous sediments on divergent plate boundaries. *E. P. S. L.*, 58, pp. 361-382.
- MARCHIG V., GUNDLACH H., MOLLER P. et SCHLEY F. - 1982. - Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments. *Marine Geology*, 50, pp. 241-256.
- MARTIN J.H. et KNAUER G.A. - 1973. - The elemental composition of plankton. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, pp. 1639-1653.
- MAURY R.C., BOUGAULT H., COUTELLE A., GUENOC P., JORON J.L. et PAUTOT G. - 1985. - Présence de ferro-basalte tholéiitique dans la fosse Jean Charcot (26° 15' N, 35° 22' E) : signification dans le contexte géodynamique de la mer Rouge. *C. R. Acad. Sci. Paris*, II, 300, 16, pp. 811-816.
- MERLIVAT L., BOULEGUE J. et DIMON B. - 1981. - Helium isotopes and manganese distribution in the water column at 13°N on the East Pacific Rise. *E. O. S.*, 62, n° 45, p. 913.

- MILLER A.R., DENSMORE C.D., DEGENS E.T., HATHAWAY J.C., MANHEIM F.T., Mc FARLIN P.F., POCKLINGTON R. et JOKELA A. - 1966. - Hot brines and recent iron deposits in deeps of the Red Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 30, pp. 341-359.
- MILLOT G. - 1964. - Géologie des argiles. Masson et Cie, eds. 499 p.
- MIYASHIRO A. - 1973. - The Troodos ophiolite complex was probably formed in an island arc. *E. P. S. L.*, 19, pp. 218-224.
- MONACO A. - 1979. - Les microminéralisations polymétalliques : structures bloquées des sédiments pélagiques. *Chem. Geol.*, 27, pp. 125-142.
- MONJANEL A.L. - 1985. - Etude micropaléontologique des Diatomées et microfossiles siliceux associés (Radiolaires et Silicoflagellés) et la carotte Transmerou KS 01, Fosse Jean Charcot, Mer Rouge. *Rapport préliminaire*, Univ. Bret. Occidentale, Brest, 25 p., non publié.
- MULLER G. - 1967. - Diagenesis in argillaceous sediments. In : LARSEN G. et CHILINGAR G.V., eds. *Diagenesis in sediments. Developments in sedimentology*, 8, pp. 127-177.
- MURRAY J. et LEE G.V. - 1909. - Depth and marine deposits of the Pacific. *Mem. Mus. Comp. Zoology*, 38, 169 p.
- MURRAY J. et RENARD A.F. - 1891. - Report on the deep-sea deposits based on the specimens collected during the voyage of H.M.S. Challenger in the years 1872 to 1876. London, 525 p.
- NATLAND J.H. - 1973. - Basal ferromanganous sediments at DSDP Site 183, Aleutian Abyssal Plain, and Site 192, Meiji Guyot, Northwest Pacific, Leg 19. In : CREAGER *et al.* eds. *Init. Repts DSDP*, 19, pp. 629-641.
- LOUDIN E. et CONSTANTINOU G. - 1984. - Black smoker chimney fragments in Cyprus sulphide deposits. *Nature*, 308, pp. 349-353.
- LOUDIN E., PICOT P. et POUIT G. - 1981. - Comparison of sulphide deposits from the East Pacific Rise and Cyprus. *Nature*, 291, pp. 404-407.
- LOUDIN E., THISSE Y. et RAMBOZ C. - 1984. - Fluid inclusion and mineralogical evidence for high-temperature Saline Hydrothermal Circulation in the Red Sea metalliferous sediments : preliminary results. *Marine Mining*, 5, n° 1, pp. 3-31.
- PARENTIER E.M. et SPOONER E.T.C. - 1978. - A theoretical study of hydrothermal convection and the origin of the ophiolitic sulphide ore deposits of Cyprus. *E. P. S. L.*, 40, pp. 33-44.
- PAUTOT G. - 1983. - Les fosses de la mer Rouge : approche géomorphologique d'un stade initial d'ouverture océanique réalisée à l'aide du Seabeam. *Oceanologica Acta*, 6, 3, pp. 235-244.
- PAUTOT G., GUENOC P., COUTELLE A. et LYBERIS N. - 1984. - Discovery of a large brine deep in the northern Red Sea. *Nature*, 310, pp. 133-136.
- PAUTOT G., GUENOC P., COUTELLE A. et LYBERIS N. - 1986. - La dépression axiale du segment nord mer Rouge (de 25°N à 28°N) : nouvelles données géologiques et géophysiques obtenues au cours de la campagne Transmerou 83. *Bull. Soc. géol. France*, t. II, n° 3, pp. 381-399.
- PIPER D.Z. - 1973. - Origin of metalliferous sediments from the East Pacific Rise. *E. P. S. L.*, 19, pp. 75-82.
- REVELLE R.R. - 1944. - Marine bottom samples collected in the Pacific Ocean by the Carnegie on its seventh cruise. *Carnegie Inst. Washington Publ.*, 556, pp. 1-180.
- ROBERTSON A.H.F. - 1975. - Cyprus umbers : basalt sediment relationships on a Mesozoic ocean ridge. *J. Geol. Soc. London*, 131, n° 5, pp. 511-531.
- ROBERTSON A.H.F. - 1976. - Origins of ochres and umbers : evidence from Skouriotissa, Troodos massif, Cyprus. *Trans. Inst. Min. Metall.*, sect. B : Appl. earth Sci., 85, B 245-251.
- ROBERTSON A.H.F. et BOYLE J.F. - 1983. - Tectonic setting and origin of metalliferous sediments in the mesozoic Tethys ocean. In : RONA P.A., BOSTROM K., LAUBIER L. et SMITH A.G., eds. *Hydrothermal processes at seafloor spreading centers. Nato Conference Series*, 12, pp. 595-663.
- ROBERTSON A.H.F. et FLEET A.J. - 1976. - The origins of rare earths in metalliferous sediments of the Troodos massif : Cyprus. *E. P. S. L.*, 28, pp. 385-394.
- ROBERTSON A.H.F. et HUDSON J.D. - 1973. - Cyprus umbers : chemical precipitates on a tethyan ocean ridge. *E. P. S. L.*, 18, pp. 93-101.

- ROBINSON P.T., MELSON W.G., O'HEARN T. et SCHMINCKE H.V. - 1983. - Volcanic glass compositions of the Troodos ophiolite, Cyprus. *Geology*, 11, pp. 400-404.
- SAYLES F.L. et BISCHOFF J.L. - 1973. - Ferromanganoan sediments in the Equatorial East Pacific. *E. P. S. L.*, 19, pp. 330-336.
- SAYLES F.L., KU T.L. et BOWKER P.C. - 1975. - Chemistry of ferromanganoan sediment of the Bauer Deep. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86, pp. 1423-1431.
- SCHMINCKE H.U., RAUTENSCHLEIN M., ROBINSON P.T. et MEHEGAN J.M. - 1983. - Troodos extrusive series of Cyprus : a comparison with oceanic crust. *Geology*, 11, pp. 405-409.
- SEGALEN P. - 1968. - Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux. *Cahier ORSTOM*, sér. Pédol., VI, pp. 105-126.
- SENANT J. - 1985. - Minéralogie et géochimie des particules des panaches hydrothermaux. *DEA*, Univ. Bret. Occidentale, Brest, 129 p.
- STOFFERS P. et ROSS D.A. - 1977. - Sedimentary history of the Red Sea. *In* : Red Sea Research, 1970-1975, *D. G. M. R. Bull.*, n° 22, H 1 - H 19.
- THISSE Y. - 1982. - Sédiments métallifères de la fosse Atlantis II (Mer Rouge). Contribution à l'étude de leur contexte morpho-structural et de leurs caractéristiques minéralogiques et géochimiques. *Thèse 3ème Cycle*, Orléans, 155 p.
- TOTH J.R. - 1977. - Deposition of submarine hydrothermal manganese and iron, and evidence for hydrothermal input of volatile elements to the ocean. *M. S. Thesis*, Oregon State University, 78 p.
- TRACEY J.I. Jr *et al.* - 1971. - Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 8, 1037 p.
- van ANDEL T.H., HEATH G.R. *et al.* - 1973. - Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 16, 949 p.
- WALTER P. et STOFFERS P. - 1985. - Chemical characteristics of metalliferous sediments from eight areas on the Galapagos Rift and East Pacific Rise between 2°N and 42°S. *Marine Geology*, 65, pp. 271-287.
- WELHAN J.A. et CRAIG H. - 1979. - Methane and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal fluids. *Geophys. Res. Lett.*, 6, p. 829.
- YEATS R.S., HART S.R. *et al.* - 1976. - Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 34, 814 p.
- YEATS R.S., HAQ B.U. *et al.* - 1981. - Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 63, 967 p.
- ZIERENBERG R.A. et SCHANKS W.C. - 1983. - Mineralogy and geochemistry of epigenetic features in metalliferous sediment, Atlantis II Deep, Red Sea. *Economic Geology*, 78, pp. 57-72.

# PLANCHES PHOTOS

PLANCHE I

QUELQUES CONSTITUANTS DES SEDIMENTS METALLIFERES  
A L'AXE DE LA DORSALE DU PACIFIQUE EST, VERS 13° NORD

Photo 1 - Détail d'un agrégat brun sensu stricto, composé de fragments biogènes, d'oxyhydroxydes Fe-Mn et d'argiles (le trait = 10  $\mu\text{m}$ ).

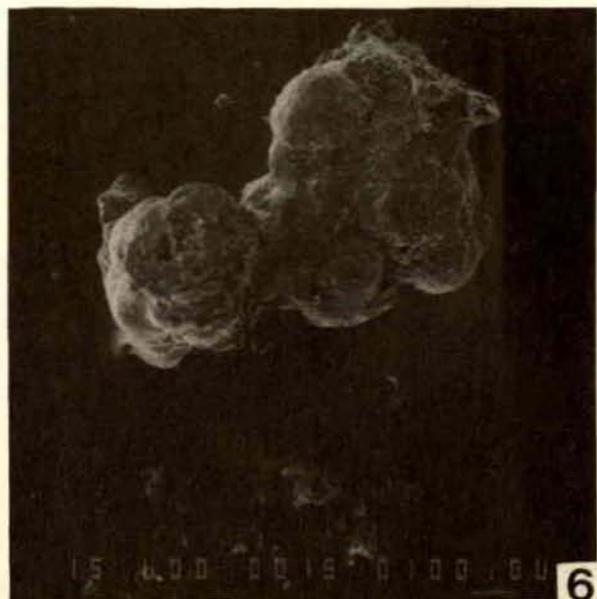
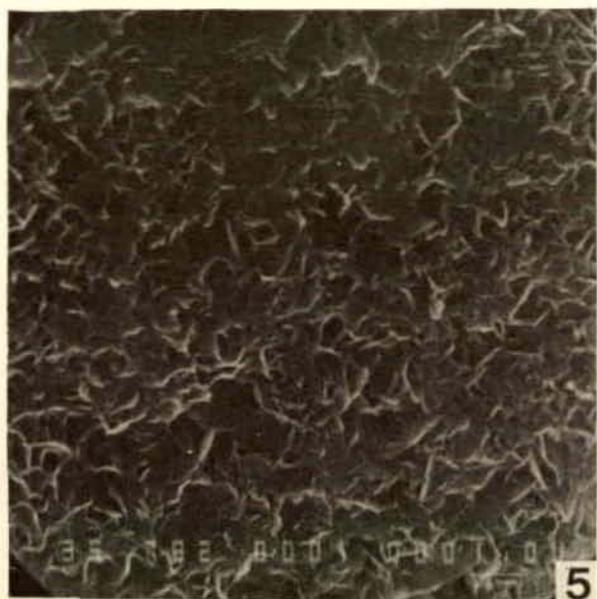
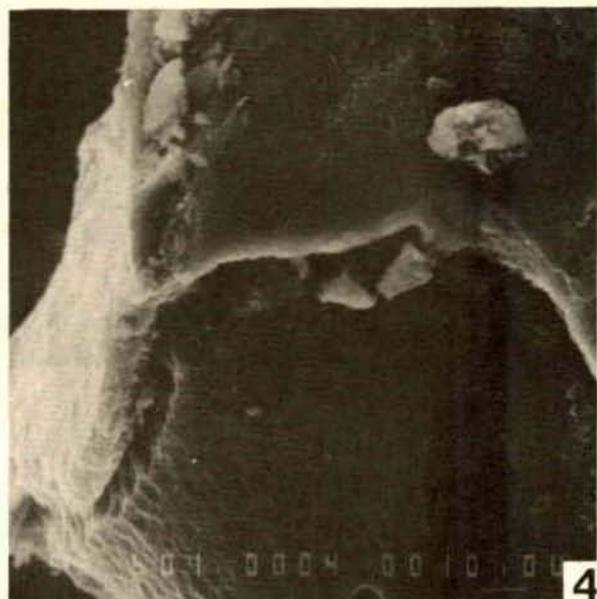
2 - Pelote fécale (le trait = 100  $\mu\text{m}$ ).

3 - Fragment de verre volcanique frais (le trait = 100  $\mu\text{m}$ ).

4 - Verre volcanique partiellement altéré (partie supérieure de la photo) (le trait = 10  $\mu\text{m}$ ).

5 - Détail de la photo 4 : smectites formées à partir de l'altération du verre volcanique (le trait = 1  $\mu\text{m}$ ).

6 - Micronodule (le trait = 100  $\mu\text{m}$ ).



## PLANCHE II

### LA FRACTION ARGILEUSE (<2 $\mu\text{m}$ ) DES SEDIMENTS METALLIFERES A L'AXE DE LA DORSALE DU PACIFIQUE EST, VERS 13° NORD.

- Photo 1 - Smectites en "voile froissé" (au centre) et fragments de diatomées (parties gauche et droite sur la photo).
- 2 - Néoformations de smectites sur un fragment d'organisme siliceux en voie de dissolution.
- 3 - Argile de type illite-chlorite, présentant une bordure floue.
- 4 - Kaolinite (particule hexagonale à gauche sur la photo), smectites en "voile " (au centre) et particule d'illite-chlorite (en bas et au centre) frangée de smectites en fibres.
- 5 - Particules de kaolinite.

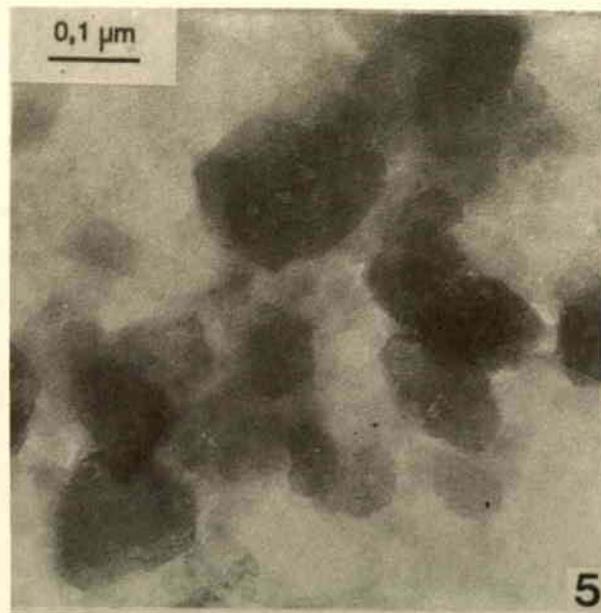
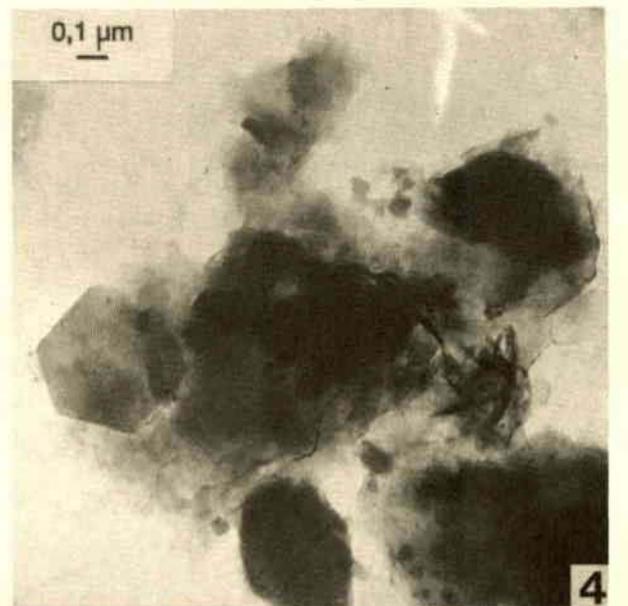
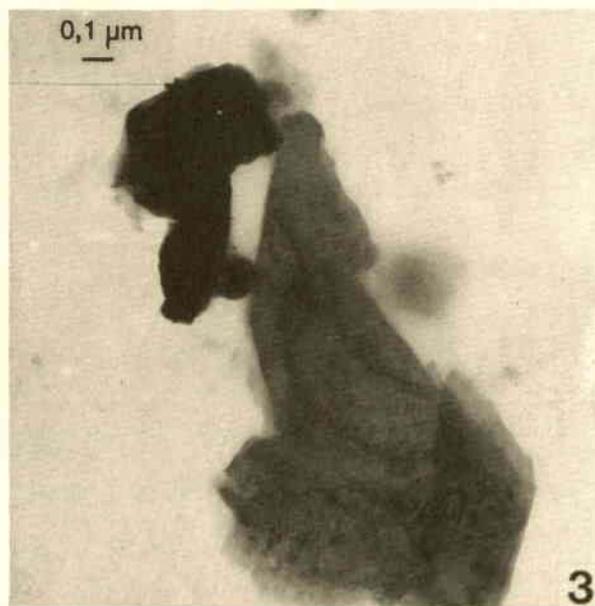
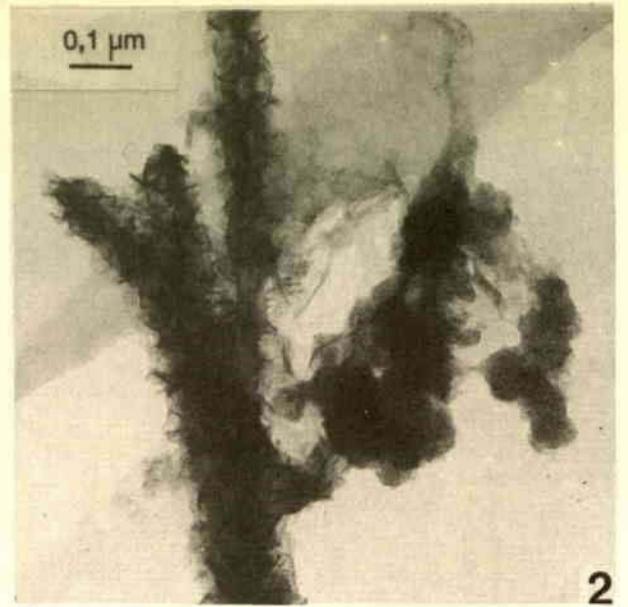
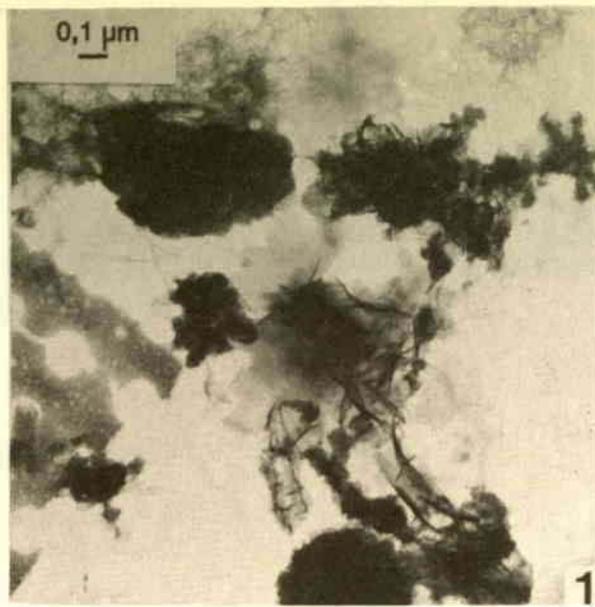


PLANCHE III

PARTICULES PRELEVEES DANS LES MODIOLES

*Bathymodiolus thermophilus*

Photo 1 - *Bathymodiolus thermophilus*

2 - Blende (1e trait = 10  $\mu\text{m}$ ).

3 - Pyrrhotite (1e trait = 10  $\mu\text{m}$ ).

4 - Pyrite et globules d'opale (1e trait = 10  $\mu\text{m}$ ).

5 - Würtzite (1e trait = 10  $\mu\text{m}$ ).

6 - Melnicovite (1e trait = 10  $\mu\text{m}$ ).

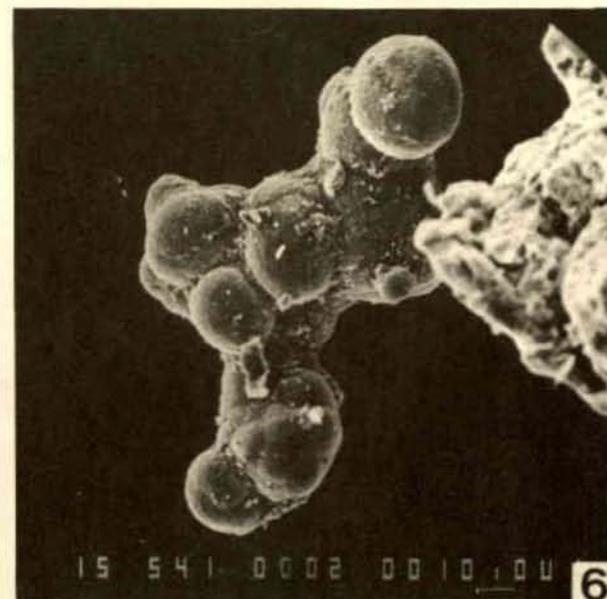
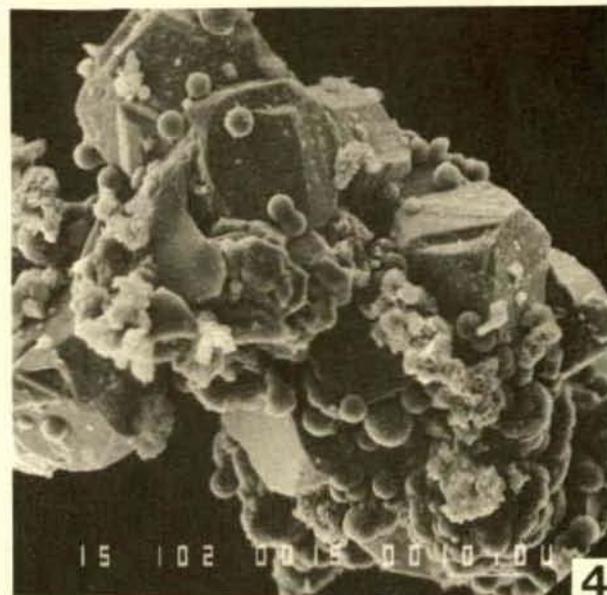
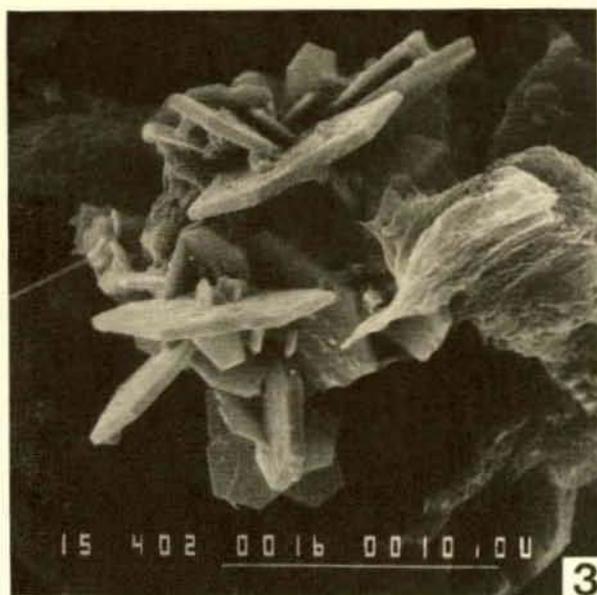
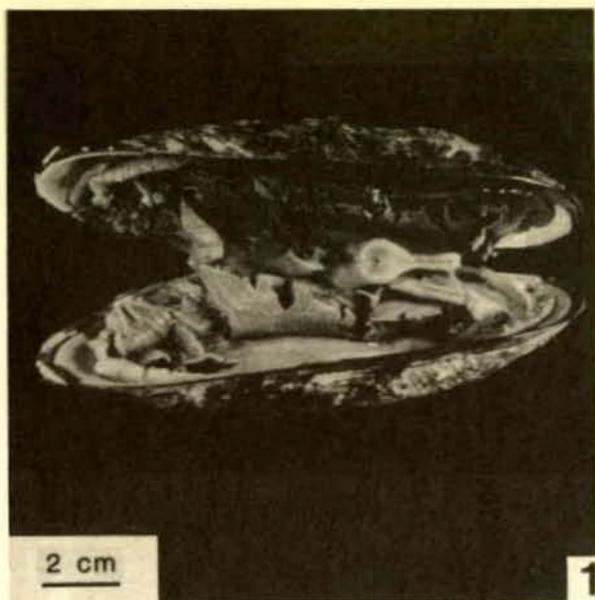


PLANCHE IV

LES SULFATES PRELEVES DANS LES MODIOLES

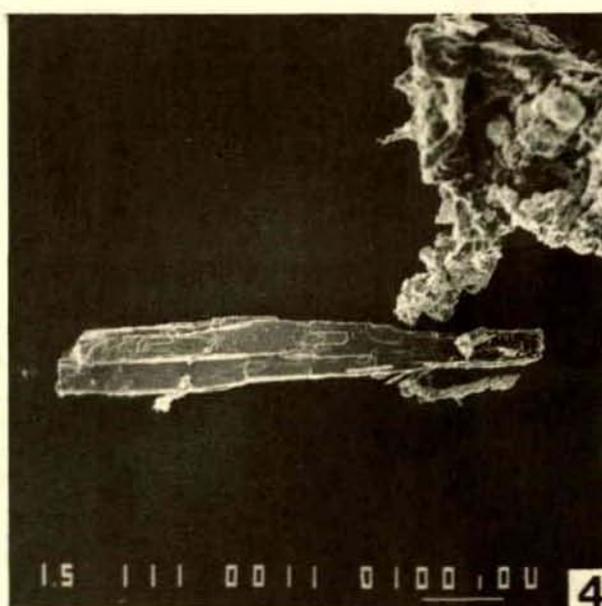
*Bathymodiolus thermophilus*

Photo 1 - Barytine "en éventail" et sulfures de fer (le trait = 10  $\mu\text{m}$ ).

2 - Détail de la photo 1 : la barytine "en éventail" (le trait = 4  $\mu\text{m}$ ).

3 - Cristaux de gypse "en rosettes" (le trait = 10  $\mu\text{m}$ ).

4 - Cristal d'anhydrite (le trait = 100  $\mu\text{m}$ ).



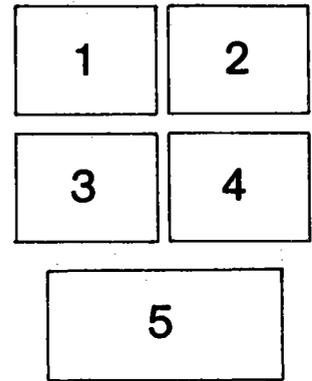


PLANCHE V

LA REPARTITION DES SEDIMENTS SUR LE FOND,  
A L'AXE DE LA DORSALE DU PACIFIQUE EST, VERS 13° NORD

- Photo 1 - (flanc nord du Seamount Nord-Est, zone A)  
Cas typique de sédiments métallifères peu épais occupant les espaces interstitiels entre les pillow lavas et saupoudrant légèrement leur surface.
- 2 - (bas du flanc nord du Seamount Nord-Est)  
Sédiments métallifères épais ennoyant presque complètement les pillow lavas. La bioturbation que l'on observe sur cette photo, est un facteur commun important contribuant au remaniement des sédiments.
- 3 - (flanc nord du Seamount Nord-Est)  
Des fissures, envahies par les sédiments, témoignent d'une activité tectonique aujourd'hui endormie.
- 4 - ("Constructional Marginal High")  
Fine pellicule de sédiment inégalement répartie sur des laves drapées.
- 5 - Exemple de sédiments métallifères "caractéristiques" à l'axe de la dorsale du Pacifique Est, vers 13° Nord.  
Noter la texture fine et la couleur brune, due aux oxyhydroxydes Fe-Mn.



## PLANCHE VI

### CONSTITUANTS DES SEDIMENTS METALLIFERES SUR LE FLANC OUEST DE LA DORSALE DU PACIFIQUE EST, VERS 13° NORD

Photo 1 - Cendres volcaniques (1e trait = 100  $\mu$ m).

2 - Cendre volcanique (1e trait = 100  $\mu$ m).

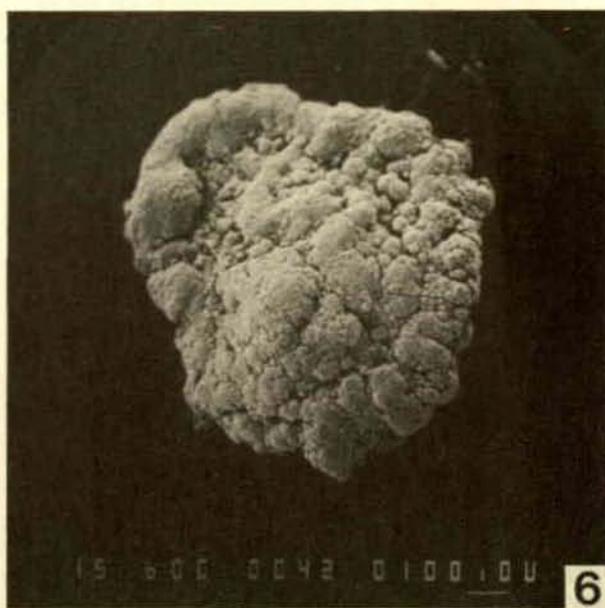
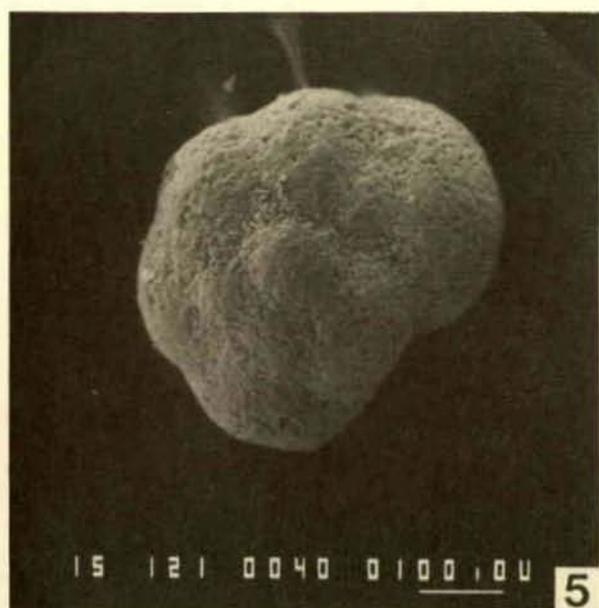
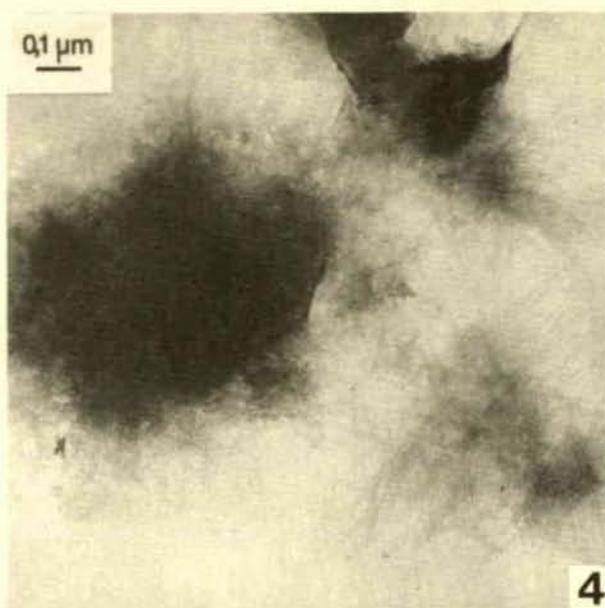
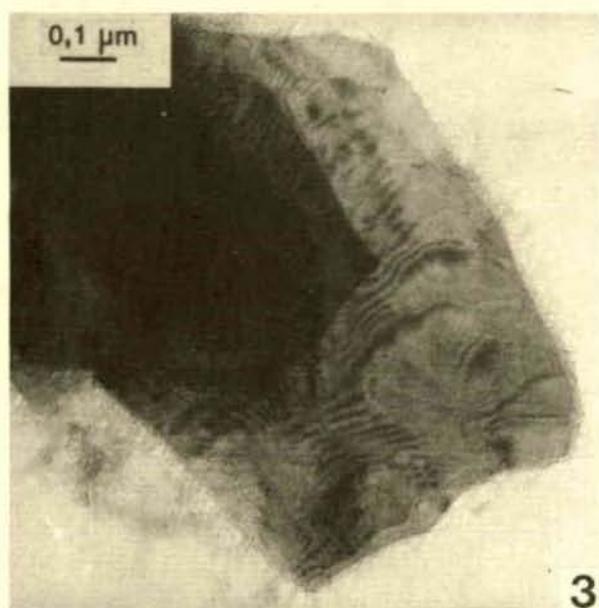
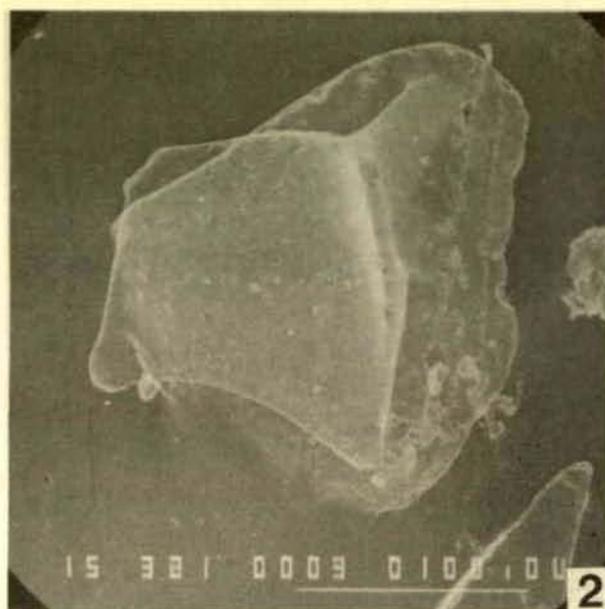
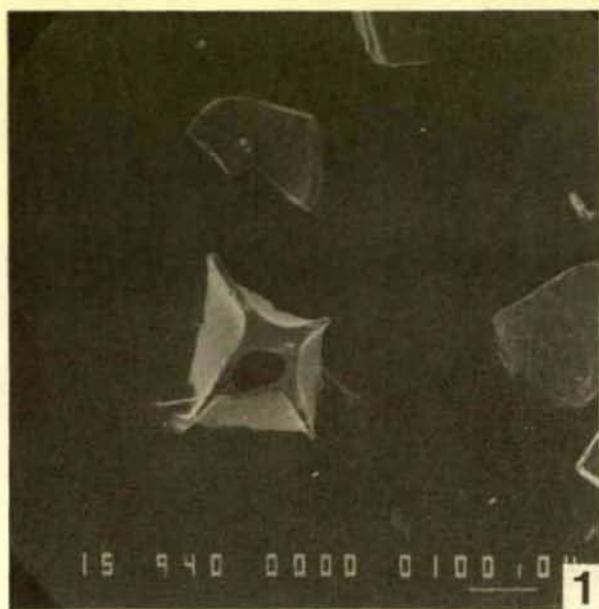
3 - Particules d'illite-chlorite frangées de smectites néoformées  
en fibres.

4 - Néoformations de smectites lattées à partir de smectites  
"en voile".

### LES CONSTITUANTS PRINCIPAUX DE L'ECHANTILLON CY 84-26-1

Photo 5 - Foraminifère encroûté par des oxydes de fer.

6 - Foraminifère encroûté par des oxydes de manganèse.



## PLANCHE VII

### CONSTITUANTS DES SEDIMENTS METALLIFERES FORES PAR LE GLOMAR CHALLENGER

Photo 1 - Cristaux de phillipsite partiellement dissous (le trait = 100  $\mu\text{m}$ ).

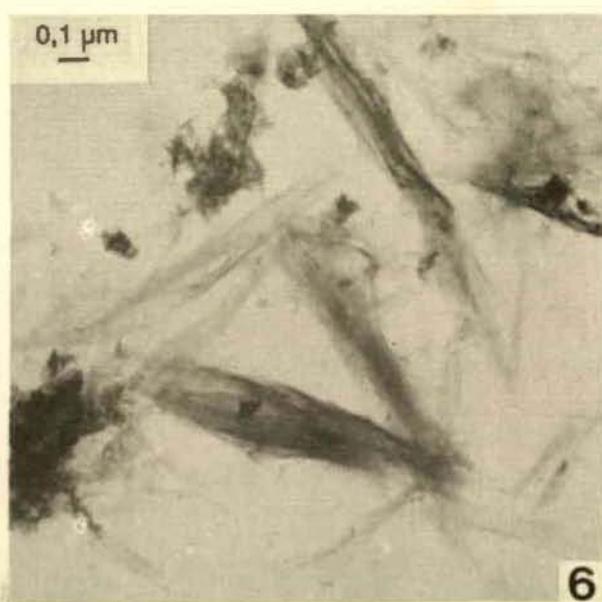
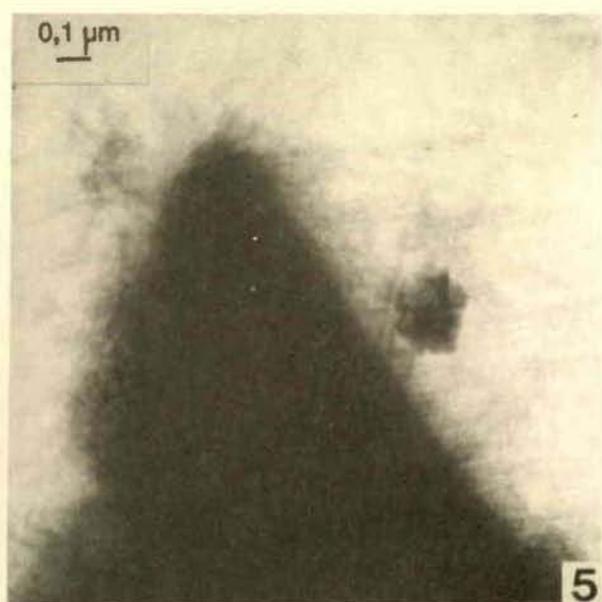
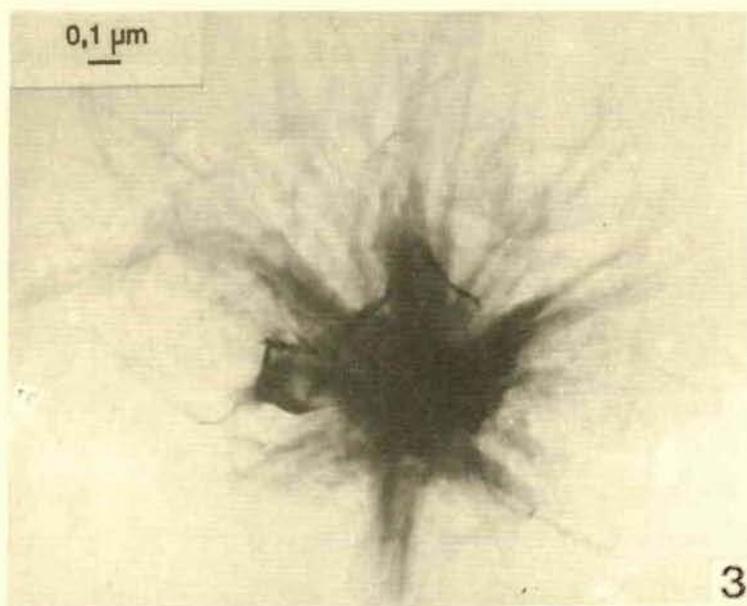
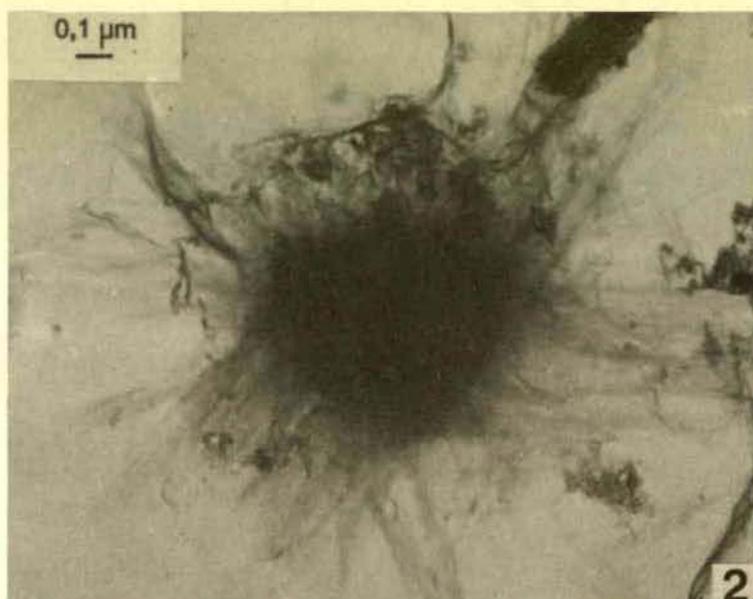
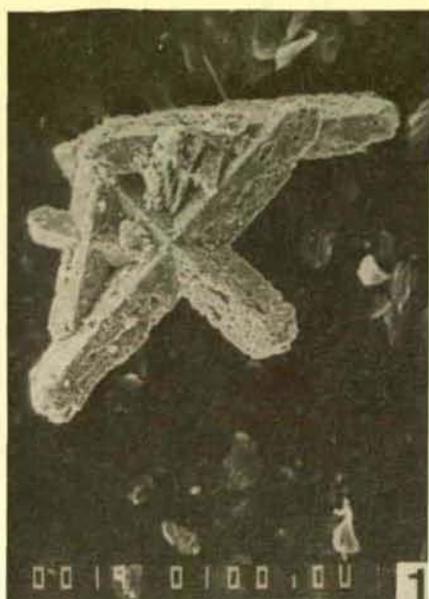
2 et 3 - Smectites lattées "en étoile".

4 - Argiles lattées de toute petite taille ( $\sim 0,1 \mu\text{m}$ ).

5 - Particule d'illite-chlorite frangée de smectites néoformées en lattées.

### SEDIMENTS DE SURFACE DANS LA DEPRESSION DE BAUER

Photo 6 - Argiles fibreuses allongées, dont la taille est de l'ordre du micron.



# ANNEXE I

12°50 NORD ET 11°30 NORD

A L'AXE DE LA DORSALE DU PACIFIQUE EST

| Echantillon   | Mission    | Latitude (Nord) | Longitude (ouest) | Prof.d'eau (m) | Type de prélèvement | Longueur des carottes(cm) | couleur du séd. de surface | Lieu de prélèvement   |
|---------------|------------|-----------------|-------------------|----------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|---|
| ZONE "AXIALE" |            |                 |                   |                |                     |                           |                            |   |
| CL SH3        | CLIPPERTON | 12°50'127       | 103°55'050        | 2.890          | Benne SHIPEK        |                           | 5YR 3/2                    | Zone "axiale" - Flanc Est                                     |
| CY82-17-1     | CYATHERM   | 12°48' 62       | 103°59' 80        | 2.770          | CYANA               |                           | 10YR 2/1                   | Zone "axiale" - Flanc Ouest                                   |
| CY82-17-2     | "          | 12°48' 80       | 103°59' 47        | 2.830          | "                   |                           | 10YR 3/3                   | " " " "   |
| CY SH2        | "          | 12°50' 22       | 103°59' 43        | 2.792          | Benne SHIPEK        |                           | 10YR 2/2                   | " " " "   |
| CY SH3        | "          | 12°46' 41       | 103°57' 78        | 2.815          | " "                 |                           | 10YR 2/1                   | " " " "   |
| CY SH4        | "          | 12°43' 33       | 103°55' 47        | 2.637          | " "                 |                           | 10YR 3/1                   | " " Graben central  |
| CY SH5        | "          | 12°46' 66       | 103°57' 08        | 2.760          | " "                 |                           | 10YR 2/2                   | " " Flanc Ouest   |
| CY SH7        | "          | 12°46' 66       | 103°57' 68        | 2.625          | " "                 |                           | 10YR 2/1                   | " " " "   |
| CY SH8        | "          | 12°51' 48       | 103°55' 78        | 2.660          | " "                 |                           | 5YR 2/2                    | " " Flanc Est   |
| CY SH10       | "          | 12°51' 28       | 103°59' 01        | 2.710          | " "                 |                           | 10YR 2/2                   | " " Flanc Ouest   |
| CY KS1        | "          | 12°46' 43       | 103°58' 82        | 2.925          | Carotte KULLENBERG  | 55                        | 5YR 2/2                    | " " " "   |
| CY KS2        | "          | 12°44' 48       | 103°58' 33        | 2.950          | " "                 | 20                        | 10YR 4/4                   | " " " "   |
| CY KS3        | "          | 12°44' 51       | 103°58' 43        | 2.950          | " "                 | 69                        | 5YR 3/4                    | " " " "   |
| CY84-24-1     | CYARISE    | 12°41' 92       | 103°53' 60        | 2.665          | CYANA               |                           | 5YR 2/2                    | Zone "axiale" - Flanc Est<br>("Constructional Marginal High") |
| CY84-29-1     | "          | 12°51' 05       | 103°55' 40        | 2.789          | "                   |                           | 7,5YR3/2                   | Zone "axiale"- Flanc Est                                      |
| CY84-30-1     | "          | 12°53' 20       | 103°57' 35        | 2.629          | "                   |                           | 5YR 3/2                    | Zone "axiale"- Bord Est                                       |
| CY82-32       | CYATHERM   | 12°47' 04       | 103°56' 14        | 2.360          | "                   |                           | 5YR 4/8                    | Graben Central<br>Zone "axiale"-Graben central                |
| FLANC OUEST   |            |                 |                   |                |                     |                           |                            |   |
| CL SH1        | CLIPPERTON | 12°28'281       | 104°35'256        | 3.085          | Benne SHIPEK        |                           | 5YR 3/4                    | Flanc Ouest   |
| CL SH4        | "          | 12°35'186       | 104°10'420        | 3.056          | " "                 |                           | 5YR 3/4                    | " "   |
| CL SH5        | "          | 12°32'716       | 104°25'516        | 3.250          | " "                 |                           | 5YR 3/2                    | " "   |
| CL SH9        | "          | 12°33' 73       | 104°06' 5         | 3.028          | " "                 |                           | 7,5YR3/2                   | " "   |
| CL KS1        | "          | 12°27'572       | 104°34'349        | 3.130          | Carotte KULLENBERG  | 30                        | 5YR 2/2                    | " "   |
| CL KS2        | "          | 12°30'433       | 104°24'476        | 3.233          | " "                 | 215                       | 5YR 2/2                    | " "   |
| CL KS3        | "          | 12°29'185       | 104°37' 49        | 3.183          | " "                 | 214                       | 5YR 3/2                    | " "   |
| SEAMOUNTS     |            |                 |                   |                |                     |                           |                            |   |
| CY84-21-1     | CYARISE    | 11°28'30        | 103°52'65         | 2.525          | CYANA               |                           | 7,5YR3/2                   | Seamount 11°30'N  |
| CY84-22-1     | "          | 11°28'93        | 103°52'13         | 2.370          | "                   |                           | 7,5YR4/2                   | " "   |
| CY84-23-1     | "          | 12°41'50        | 103°52'00         | 2.745          | "                   |                           | 7,5YR3/2                   | Seamount Sud-Est  |
| CY84-26-1     | "          | 12°34'45        | 104°04'00         | 2.058          | "                   |                           | 10YR2/1                    |   |
|               |            |                 |                   |                |                     |                           | 10YR8/1                    | Seamount Clipperton   |
|               |            |                 |                   |                |                     |                           | 5YR4/8                     |   |
| CY84-28-1     | "          | 12°52'45        | 103°53'32         | 2.880          | "                   |                           | 5YR3/2                     | Seamount Nord-Est   |

Tableau IX.- Données générales concernant les échantillons de sédiments étudiés.

| Zone        | Echantillon | Teneur en eau (%) |
|-------------|-------------|-------------------|
| "Axiale"    | CY 82-17-1  | 279               |
|             | CY 82-17-2  | 222               |
|             | CY SH2      | 370               |
|             | CY SH3      | 444               |
|             | CY SH4      | 336               |
|             | CY SH5      | 418               |
|             | CY SH7      | 399               |
|             | CY SH10     | 321               |
|             | CY KS1      | 341               |
|             | KS2         | 217               |
|             | KS3         | 254               |
|             | CY 84-24-1  | 298               |
|             | CY 84-29-1  | 206               |
|             | CY 84-30-1  | 161               |
|             | CY 82-32    | 218               |
| Flanc Ouest | CL KS1      | 135               |
|             | CL KS2      | 252               |
|             | CL KS3      | 228               |
| Seamounts   | CY 84-21-1  | 144               |
|             | CY 84-22-1  | 69                |
|             | CY 84-23-1  | 95                |
|             | CY 84-26-1  | 112               |
|             | CY 84-28-1  | 336               |

Tableau X : Teneur en eau des sédiments de surface à 12°50'Nord et 11°30'Nord.

| ECHANTILLON | NIVEAU<br>( cm ) | CaCO3<br>( % ) | SiO2<br>( % ) | TiO2<br>( % ) | Al2O3<br>( % ) | Fe2O3<br>( % ) | Mn3O4<br>( % ) | MgO<br>( % ) | CaO<br>( % ) | Na2O<br>( % ) | K2O<br>( % ) | P2O5<br>( % ) | P.Feu<br>( % ) | H2O-<br>( % ) | Total<br>( % ) |
|-------------|------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| CL SH 3     | Surface          | 16.00          | 31.40         | 0.44          | 8.00           | 16.85          | 2.70           | 3.60         | 11.40        | 3.60          | 0.96         | 0.65          | 19.13          | 5.75          | 98.73          |
| CY 82-17-1  | Surface          | 23.00          | 24.60         | 0.27          | 5.22           | 19.32          | 3.87           | 2.25         | 13.67        | 3.01          | 0.29         | 0.82          | 25.57          | 9.97          | 98.89          |
| CY 82-17-2  | Surface          | 56.00          | 17.50         | 0.28          | 4.00           | 10.97          | 1.91           | 1.70         | 30.18        | 0.60          | 0.10         | 0.55          | 32.55          | 5.29          | 100.34         |
| CY SH 2     | Surface          | 29.00          | 23.75         | 0.29          | 4.99           | 17.60          | 3.77           | 2.13         | 16.19        | 2.24          | 0.25         | 0.71          | 27.11          | 9.42          | 99.03          |
| CY SH 3     | Surface          | 14.00          | 28.25         | 0.32          | 5.68           | 20.00          | 4.11           | 2.61         | 10.20        | 3.88          | 0.70         | 0.90          | 23.16          | 10.20         | 99.81          |
| CY SH 4     | Surface          | 26.00          | 23.00         | 0.24          | 4.40           | 17.74          | 2.96           | 2.08         | 16.86        | 2.17          | 0.15         | 0.67          | 28.68          | 8.80          | 98.95          |
| CY SH 5     | Surface          | 9.50           | 28.85         | 0.31          | 6.84           | 22.27          | 4.52           | 2.68         | 6.59         | 4.63          | 0.74         | 0.96          | 21.32          | 12.02         | 99.71          |
| CY SH 7     | Surface          | 11.00          | 32.20         | 0.28          | 8.18           | 20.15          | 3.23           | 2.60         | 5.41         | 5.22          | 1.45         | 0.89          | 20.02          | 10.87         | 99.63          |
| CY SH 8     | Surface          | 6.50           | 23.00         | 0.30          | 5.07           | 15.62          | 2.89           | 2.85         | 9.92         | 5.45          | 0.38         | 0.60          | 33.31          | 7.77          | 99.39          |
| CY SH 10    | Surface          | 26.00          | 22.10         | 0.21          | 4.60           | 16.25          | 3.13           | 2.03         | 19.09        | 1.43          | 0.17         | 0.74          | 29.28          | 8.48          | 99.03          |
| CY KS 1     | Surface          | 15.00          | 23.50         | 0.27          | 5.43           | 19.85          | 3.44           | 2.34         | 11.94        | 3.47          | 0.55         | 0.75          | 28.03          | 3.49          | 99.57          |
| CY KS 2     | Surface          | 53.00          | 18.70         | 0.19          | 4.22           | 11.40          | 1.67           | 1.70         | 27.59        | 1.09          | 0.08         | 0.52          | 33.07          | 5.76          | 100.23         |
| CY KS 3     | Surface          | 31.00          | 23.44         | 0.38          | 6.78           | 10.72          | 1.16           | 1.94         | 22.45        | 1.89          | 0.28         | 0.50          | 30.47          | 1.91          | 100.01         |
| CY 84-24-1  | Surface          | 15.00          | 34.50         | 1.11          | 9.93           | 9.85           | 0.97           | 5.05         | 9.89         | 2.39          | 0.44         | 0.30          | 24.88          | 0.25          | 99.31          |
| CY 84-29-1  | Surface          | 26.00          | 21.65         | 0.31          | 4.65           | 20.60          | 2.45           | 2.00         | 21.60        | 3.30          | 0.48         | 0.55          | 19.41          | 3.19          | 97.00          |
| CY 84-30-1  | Surface          | 26.50          | 19.15         | 0.35          | 4.47           | 11.42          | 2.18           | 2.05         | 29.03        | 0.46          | 0.02         | 0.54          | 29.05          | 1.60          | 98.72          |
| CY 82-32    | Surface          | 0.31           | 20.30         | 0.04          | 0.72           | 44.00          | 0.07           | 1.15         | 0.64         | 4.33          | 0.63         | 1.60          | 22.08          | 0.77          | 95.56          |
| CL SH 1     | Surface          | 27.00          | 29.75         | 0.28          | 7.56           | 10.83          | 1.73           | 1.96         | 17.46        | 2.67          | 0.77         | 0.55          | 25.44          | 2.62          | 99.00          |
| CL SH 4     | Surface          | 11.00          | 30.85         | 0.30          | 8.07           | 19.47          | 4.10           | 2.63         | 5.48         | 4.19          | 1.66         | 0.70          | 20.87          | 5.50          | 98.32          |
| CL SH 5     | Surface          | 5.50           | 36.50         | 0.33          | 10.33          | 17.58          | 3.66           | 2.75         | 2.59         | 4.85          | 2.29         | 0.65          | 16.06          | 5.78          | 97.59          |
| CL SH 9     | Surface          | 9.50           | 41.50         | 0.65          | 14.30          | 10.53          | 1.44           | 5.23         | 12.02        | 3.09          | 0.77         | 0.30          | 8.35           | 2.96          | 98.20          |
| CL KS 1     | Surface          | 20.00          | 30.10         | 0.33          | 8.35           | 9.47           | 1.28           | 1.81         | 20.25        | 1.66          | 0.60         | 0.45          | 24.47          | 2.70          | 98.77          |
| CL KS 2     | Surface          | 5.00           | 32.80         | 0.36          | 9.07           | 15.35          | 2.92           | 2.44         | 9.19         | 3.53          | 1.28         | 0.60          | 21.33          | 4.55          | 98.87          |
| CL KS 3     | Surface          | 30.00          | 25.50         | 0.36          | 7.97           | 9.27           | 1.22           | 1.71         | 23.57        | 1.19          | 0.24         | 0.40          | 28.22          | 2.52          | 99.65          |
| CY 84-21-1  | Surface          | 15.50          | 33.60         | 1.07          | 8.99           | 10.07          | 1.36           | 4.17         | 17.75        | 2.55          | 0.34         | 0.35          | 18.64          | 0.10          | 98.89          |
| CY 84-22-1  | Surface          | 14.00          | 37.40         | 1.38          | 10.82          | 9.12           | 0.56           | 5.33         | 18.47        | 2.31          | 0.23         | 0.25          | 13.23          | 0.07          | 99.10          |
| CY 84-23-1  | Surface          | 3.00           | 35.70         | 0.62          | 8.10           | 17.71          | 3.47           | 3.60         | 14.57        | 4.44          | 0.95         | 0.75          | 8.60           | 0.57          | 98.51          |
| CY 84-26-1  | Surface          | 89.00          | 3.61          | 0.05          | 0.90           | 1.97           | 3.78           | 0.97         | 44.60        | 0.09          | 0.00         | 0.10          | 41.91          | 1.13          | 97.98          |
| CY 84-28-1  | Surface          | 17.00          | 27.00         | 0.34          | 6.23           | 17.70          | 3.23           | 2.23         | 13.40        | 3.41          | 0.65         | 0.65          | 25.29          | 3.65          | 100.13         |
| CL KS 2     | 33-35            | 26.00          | 27.90         | 0.32          | 8.41           | 11.21          | 1.70           | 1.97         | 19.20        | 1.99          | 0.47         | 0.50          | 25.46          | 2.90          | 99.13          |
| CL KS 2     | 45-47            | 29.00          | 29.85         | 0.35          | 8.86           | 10.47          | 1.19           | 2.00         | 18.26        | 2.18          | 0.65         | 0.45          | 24.50          | 3.06          | 98.76          |
| CL KS 2     | 70-72            | 9.00           | 41.40         | 0.43          | 11.54          | 14.56          | 2.34           | 2.74         | 3.64         | 4.50          | 2.71         | 0.70          | 14.41          | 5.11          | 98.97          |
| CL KS 2     | 108-110          | 4.00           | 40.45         | 0.44          | 11.15          | 16.58          | 2.94           | 2.86         | 2.07         | 4.81          | 2.77         | 0.62          | 13.33          | 4.65          | 98.02          |
| CL KS 2     | 137-139          | 3.00           | 44.50         | 0.42          | 12.00          | 13.92          | 1.76           | 2.79         | 2.36         | 5.00          | 2.81         | 0.62          | 13.15          | 4.11          | 99.33          |
| CL KS 2     | 168-170          | 3.00           | 40.10         | 0.46          | 11.94          | 16.97          | 2.63           | 3.16         | 2.04         | 4.59          | 2.75         | 0.65          | 13.34          | 4.08          | 98.63          |
| CL KS 2     | 199-201          | *              | 39.30         | 0.41          | 11.00          | 18.30          | 2.87           | 3.25         | 1.93         | 4.72          | 2.53         | 0.34          | 13.50          | 4.51          | 98.15          |
| CL KS 3     | 34-36            | 38.00          | 24.60         | 0.33          | 7.25           | 7.29           | 0.48           | 1.54         | 27.05        | 1.00          | 0.27         | 0.35          | 29.43          | 2.26          | 99.59          |
| CL KS 3     | 53-55            | 39.00          | 25.45         | 0.29          | 7.32           | 7.08           | 0.76           | 1.57         | 26.95        | 1.13          | 0.36         | 0.40          | 28.74          | 2.45          | 100.05         |
| CL KS 3     | 94-96            | 6.00           | 40.90         | 0.45          | 11.70          | 13.92          | 1.74           | 2.67         | 3.73         | 4.70          | 2.70         | 0.60          | 14.25          | 3.77          | 97.36          |
| CL KS 3     | 120-122          | 39.00          | 29.30         | 0.27          | 7.85           | 6.56           | 0.71           | 1.51         | 24.06        | 1.52          | 0.73         | 0.35          | 26.68          | 2.55          | 99.54          |
| CL KS 3     | 148-150          | 32.00          | 28.00         | 0.35          | 7.85           | 8.47           | 0.80           | 1.97         | 21.90        | 1.69          | 0.43         | 0.40          | 26.62          | 2.75          | 98.48          |
| CL KS 3     | 165-167          | 14.00          | 37.00         | 0.44          | 10.90          | 13.28          | 1.40           | 2.76         | 9.06         | 3.55          | 1.87         | 0.55          | 18.30          | 4.09          | 99.11          |
| CL KS 3     | 199-201          | 18.00          | 34.45         | 0.40          | 10.27          | 13.05          | 1.39           | 2.75         | 11.18        | 3.30          | 1.35         | 0.45          | 20.66          | 4.30          | 99.25          |
| CY KS 1     | 20-22            | 46.00          | 19.80         | 0.29          | 6.00           | 9.09           | 0.83           | 1.49         | 28.59        | 1.10          | 0.18         | 0.50          | 33.58          | 1.47          | 101.45         |
| CY KS 1     | 35-37            | 36.00          | 22.70         | 0.31          | 6.04           | 10.07          | 0.39           | 1.95         | 25.30        | 1.63          | 0.26         | 0.55          | 31.66          | 2.08          | 100.86         |
| CY KS 1     | 47-49            | 41.00          | 21.80         | 0.36          | 6.29           | 9.03           | 0.98           | 2.13         | 26.55        | 1.40          | 0.24         | 0.45          | 30.83          | 2.21          | 100.06         |
| CY KS 1     | 55               | 46.00          | 22.25         | 0.43          | 6.37           | 8.47           | 0.82           | 2.31         | 27.98        | 1.13          | 0.20         | 0.30          | 30.44          | 2.05          | 100.70         |

Tableau XI - Teneurs en CaCO<sub>3</sub> et analyses chimiques des sédiments étudiés à 12°50' Nord et 11°30' Nord (zones A et B).

| ECHANTILLON | NIVEAU<br>( cm ) | Li<br>(ppm) | Rb<br>(ppm) | Sr<br>(ppm) | Ba<br>(ppm) | V<br>(ppm) | Cr<br>(ppm) | Co<br>(ppm) | Ni<br>(ppm) | Cu<br>(ppm) | Zn<br>(ppm) | As<br>(ppm) | Se<br>(ppm) |
|-------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CL SH 3     | Surface          | 310         | 14          | 700         | 2100        | 290        | 130         | 25          | 170         | 80          | 120         | 68.0        | 2.0         |
| CY 82-17-1  | Surface          | 190         | 9           | 763         | 139         | 226        | 78          | 34          | 179         | 233         | 282         | 90.0        | *           |
| CY 82-17-2  | Surface          | 118         | 6           | 839         | 1252        | 192        | 85          | 25          | 109         | 184         | 185         | 56.0        | *           |
| CY SH 2     | Surface          | 152         | 3           | 783         | 2060        | 379        | 75          | 25          | 188         | 198         | 276         | 87.0        | 1.7         |
| CY SH 3     | Surface          | 357         | 15          | 811         | 2642        | 281        | 132         | 29          | 148         | 193         | 261         | 102.0       | 2.3         |
| CY SH 4     | Surface          | 113         | 8           | 848         | 1830        | 267        | 113         | 40          | 130         | 197         | 312         | 85.0        | 1.9         |
| CY SH 5     | Surface          | 309         | 24          | 735         | 2850        | 283        | 77          | 40          | 232         | 187         | 237         | 92.0        | 2.0         |
| CY SH 7     | Surface          | 296         | 36          | 726         | 3574        | 267        | 109         | 40          | 221         | 213         | 211         | 84.0        | 2.4         |
| CY SH 8     | Surface          | 120         | 7           | 796         | 1138        | 233        | 64          | 61          | 136         | 362         | 402         | *           | *           |
| CY SH 10    | Surface          | 182         | 8           | 876         | 1622        | 288        | 104         | 30          | 130         | 254         | 299         | 91.0        | 2.1         |
| CY KS 1     | Surface          | 126         | 16          | 947         | 2208        | 231        | 107         | 32          | 141         | 244         | 281         | 122.0       | 2.9         |
| CY KS 2     | Surface          | 85          | 6           | 898         | 1235        | 238        | 89          | 15          | 83          | 201         | 181         | 72.0        | 1.6         |
| CY KS 3     | Surface          | 75          | 7           | 785         | 1368        | 153        | 65          | 23          | 83          | 124         | 173         | 35.0        | 0.6         |
| CY 84-24-1  | Surface          | 57          | 6           | 287         | 492         | 191        | 140         | 33          | 76          | 64          | 107         | 64.0        | 0.4         |
| CY 84-29-1  | Surface          | 83          | 8           | 850         | 369         | 180        | 82          | 399         | 119         | 7785        | 239         | 54.0        | 0.8         |
| CY 84-30-1  | Surface          | 19          | 3           | 914         | 925         | 133        | 74          | 32          | 100         | 167         | 213         | 59.0        | 0.3         |
| CY 82-32    | Surface          | 43          | 18          | 225         | 711         | 93         | 15          | 40          | 12          | 2915        | 25000       | 162.0       | 0.4         |
| CL SH 1     | Surface          | 279         | 9           | 764         | 2980        | 190        | 54          | 35          | 150         | 42          | 121         | 32.0        | 0.8         |
| CL SH 4     | Surface          | 437         | 28          | 774         | 4550        | 240        | 113         | 35          | 260         | 150         | 299         | *           | *           |
| CL SH 5     | Surface          | 425         | 44          | 673         | 5320        | 230        | 75          | 40          | 240         | 175         | 95          | 63.0        | 2.0         |
| CL SH 9     | Surface          | 170         | 10          | 374         | 1195        | 205        | 190         | 40          | 160         | 105         | 81          | 37.0        | 1.0         |
| CL KS 1     | Surface          | 213         | 11          | 783         | 3150        | 172        | 50          | 30          | 103         | 36          | 121         | 33.0        | 0.7         |
| CL KS 2     | Surface          | 352         | 21          | 735         | 3625        | 205        | 68          | 25          | 194         | 72          | 89          | 68.0        | 1.3         |
| CL KS 3     | Surface          | 130         | 5           | 803         | 2700        | 155        | 55          | 35          | 135         | 47          | 160         | 39.0        | 1.1         |
| CY 84-21-1  | Surface          | 79          | 4           | 593         | 1050        | 182        | 123         | 32          | 83          | 71          | 155         | 27.0        | 0.2         |
| CY 84-22-1  | Surface          | 59          | 2           | 467         | 449         | 195        | 160         | 34          | 84          | 62          | 114         | 13.0        | 0.2         |
| CY 84-23-1  | Surface          | 152         | 17          | 917         | 2900        | 245        | 107         | 45          | 179         | 181         | 240         | 56.0        | 0.2         |
| CY 84-26-1  | Surface          | 24          | 0           | 927         | 436         | 25         | 7           | 42          | 308         | 334         | 216         | 5.0         | < 0.1       |
| CY 84-28-1  | Surface          | 123         | 7           | 664         | 2846        | 199        | 83          | 393         | 155         | 148         | 209         | 68.0        | 0.3         |
| CL KS 2     | 33-35            | 216         | 6           | 783         | 2800        | 195        | 64          | 30          | 130         | 36          | 112         | 37.0        | 0.9         |
| CL KS 2     | 45-47            | 237         | 7           | 751         | 3000        | 180        | 58          | 30          | 118         | 25          | 82          | 27.0        | 0.7         |
| CL KS 2     | 70-72            | 424         | 58          | 725         | 5900        | 170        | 70          | 352         | 226         | 140         | 62          | 35.0        | < 0.5       |
| CL KS 2     | 108-110          | 327         | 58          | 600         | 4530        | 137        | 71          | 48          | 207         | 206         | 56          | 53.0        | < 0.8       |
| CL KS 2     | 137-139          | 310         | 67          | 509         | 4860        | 140        | 84          | 35          | 156         | 109         | 38          | 36.0        | < 0.6       |
| CL KS 2     | 168-170          | 385         | 63          | 598         | 6350        | 165        | 65          | 55          | 225         | 220         | 85          | 52.0        | < 0.8       |
| CL KS 2     | 199-201          | 347         | 59          | 586         | 5890        | 206        | 61          | 45          | 230         | 216         | 76          | 49.0        | < 0.7       |
| CL KS 3     | 34-36            | 143         | 5           | 790         | 2540        | 115        | 52          | 15          | 86          | 40          | 133         | 25.0        | 1.1         |
| CL KS 3     | 53-55            | 137         | 6           | 863         | 2695        | 130        | 44          | 20          | 88          | 27          | 126         | 23.0        | 0.6         |
| CL KS 3     | 94-96            | 358         | 61          | 620         | 6200        | 170        | 62          | 35          | 152         | 109         | 40          | 39.0        | 0.7         |
| CL KS 3     | 120-122          | 130         | 16          | 790         | 2680        | 130        | 40          | 20          | 95          | 34          | 116         | 15.0        | 0.3         |
| CL KS 3     | 148-150          | 234         | 7           | 794         | 3600        | 130        | 60          | 20          | 105         | 38          | 120         | 19.0        | 0.5         |
| CL KS 3     | 165-167          | 420         | 34          | 717         | 5525        | 180        | 80          | 35          | 140         | 67          | 60          | 39.0        | 0.7         |
| CL KS 3     | 199-201          | 362         | 21          | 739         | 4600        | 180        | 72          | 20          | 128         | 57          | 69          | 37.0        | 0.6         |
| CY KS 1     | 20-22            | 70          | 6           | 924         | 1451        | 144        | 81          | 18          | 65          | 141         | 125         | 34.0        | 1.0         |
| CY KS 1     | 35-37            | 77          | 8           | 793         | 1458        | 145        | 58          | 18          | 58          | 125         | 128         | 27.0        | 0.5         |
| CY KS 1     | 47-49            | 82          | 8           | 805         | 1311        | 136        | 63          | 23          | 72          | 470         | 166         | *           | *           |
| CY KS 1     | 55               | 68          | 6           | 825         | 1073        | 123        | 66          | 22          | 61          | 133         | 228         | *           | *           |

Tableau XI (Suite)

| Echantillon   | Niveau (cm) |               |             |           |                        |                               |                  |                     |               |         |                              | Facies sedimentaire |
|---------------|-------------|---------------|-------------|-----------|------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------|---------------|---------|------------------------------|---------------------|
|               |             | Foraminifères | Coccolithes | Diatomees | Spicules + Acanthaires | Radiolaires + Silicoflagelles | Verre volcanique | Cendres volcaniques | Oxyhydroxydes | Argiles |                              |                     |
| Zone "axiale" |             |               |             |           |                        |                               |                  |                     |               |         |                              |                     |
| CL SH3        | surface     | 5             | t           | 2         | 1                      | 1                             | t                | -                   | 7             | 83      | v.a. avec oxyhydr.           |                     |
| CY 82-17-1    | surface     | 5             | t           | t         | t                      | 5                             | t                | -                   | 10            | 79      | v.a. avec oxyhydr.           |                     |
| CY 82-17-2    | surface     | 15            | t           | 1         | t                      | 3                             | 1                | -                   | 7             | 72      | v.a. avec oxyhydr. et foram. |                     |
| CY SH2        | surface     | 10            | -           | 1         | t                      | t                             | t                | -                   | 20            | 68      | v.a. avec oxyhydr. et foram. |                     |
| CY SH3        | surface     | 7             | 1           | 2         | t                      | 2                             | t                | -                   | 20            | 67      | v.a. avec oxyhydr. et foram. |                     |
| CY SH4        | surface     | 7             | 1           | 2         | t                      | 2                             | t                | -                   | 16            | 72      | v.a. avec oxyhydr. et foram. |                     |
| CY SH5        | surface     | 10            | -           | 1         | t                      | 3                             | 3                | -                   | 10            | 72      | v.a. avec oxyhydr. et foram. |                     |
| CY SH7        | surface     | 7             | -           | 1         | t                      | 2                             | t                | -                   | 15            | 73      | v.a. avec oxyhydr. et foram. |                     |
| CY SH8        | surface     | 3             | -           | t         | t                      | t                             | t                | -                   | 5             | 91      | v.a. et traces d'oxyhydr.    |                     |
| CY SH10       | surface     | 15            | -           | 1         | t                      | 1                             | t                | -                   | 11            | 71      | v.a. avec oxyhydr. et foram. |                     |
| CY KS1        | surface     | 2             | t           | t         | t                      | -                             | t                | -                   | 7             | 90      | v.a. avec oxyhydr.           |                     |
| CY KS2        | surface     | 15            | -           | 1         | t                      | 3                             | 1                | -                   | 3             | 76      | v.a. avec foram.             |                     |
| CY KS3        | surface     | 10            | t           | t         | t                      | t                             | 1                | -                   | 5             | 83      | v.a. avec foram.             |                     |
| CY 84-24-1    | surface     | 2             | t           | 1         | t                      | t                             | t                | -                   | 5             | 92      | v.a. et traces d'oxyhydr.    |                     |
| CY 84-29-1    | surface     | 7             | t           | t         | t                      | t                             | -                | -                   | 3             | 85      | v.a. avec foram.             |                     |
| CY 84-30-1    | surface     | 7             | t           | t         | -                      | t                             | t                | -                   | 7             | 85      | v.a. avec oxyhydr. et foram. |                     |
| CY 82-32      | surface     | t             | -           | t         | t                      | -                             | t                | -                   | 45            | 55      | v.a. a oxyhydr.              |                     |
| Flanc Ouest   |             |               |             |           |                        |                               |                  |                     |               |         |                              |                     |
| CL SH1        | surface     | 5             | -           | 1         | 1                      | t                             | t                | 1                   | 7             | 84      | v.a. avec oxyhydr.           |                     |
| CL SH4        | surface     | 3             | t           | t         | t                      | 1                             | t                | -                   | 7             | 88      | v.a. avec oxyhydr.           |                     |
| CL SH5        | surface     | 2             | -           | 1         | t                      | 1                             | t                | 2                   | 10            | 83      | v.a. avec oxyhydr.           |                     |
| CL SH9        | surface     | 1             | -           | -         | -                      | t                             | 10               | t                   | 3             | 85      | v.a. avec verre volc.        |                     |
| CL KS1        | surface     | 15            | -           | -         | t                      | t                             | t                | -                   | 20            | 64      | v.a. avec foram. et oxyhydr. |                     |
| CL KS2        | surface     | 5             | -           | 1         | t                      | t                             | t                | 1                   | 7             | 85      | v.a. avec oxyhydr.           |                     |
| CL KS3        | surface     | 15            | -           | -         | t                      | 1                             | 3                | 1                   | 15            | 65      | v.a. avec oxyhydr. et foram. |                     |
| Seamounts     |             |               |             |           |                        |                               |                  |                     |               |         |                              |                     |
| CY 84-21-1    | surface     | 7             | t           | 1         | t                      | 1                             | 1                | -                   | 7             | 82      | v.a. avec foram. et oxyhydr. |                     |
| CY 84-22-1    | surface     | 15            | t           | t         | t                      | t                             | 3                | -                   | 2             | 79      | v.a. avec foram.             |                     |
| CY 84-23-1    | surface     | 7             | -           | t         | t                      | 2                             | t                | -                   | 10            | 80      | v.a. avec foram. et oxyhydr. |                     |
| CY 84-26-1    | surface     | 92            | -           | -         | -                      | -                             | 1                | -                   | 1             | 6       | sable de foram. et oxyhydr.  |                     |
| CY 84-28-1    | surface     | 7             | t           | t         | t                      | t                             | 1                | -                   | 10            | 81      | v.a. avec oxyhydr. et foram. |                     |

Tableau XII.- Observation des sédiments en frottis et détermination des faciès sédimentaires dans les zones A et B.

| Echantillon   | Niveau (cm) |               |             |           |                        |                               |                  |                     |               |                           |  | Facies sedimentaire |
|---------------|-------------|---------------|-------------|-----------|------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------|---------------|---------------------------|--|---------------------|
|               |             | Foraminiferes | Coccolithes | Diatomees | Spicules + Acanthaires | Radiolaires + Silicoflagelles | Verre volcanique | Cendres volcaniques | Oxyhydroxydes | Argiles                   |  |                     |
| Zone "axiale" |             |               |             |           |                        |                               |                  |                     |               |                           |  |                     |
| CY KS1        | 20-22       | 5             | 2           | -         | t                      | -                             | t                | -                   | 3             | 89                        | v.a. et traces de foram. et de coccol.                 |                     |
|               | 35-37       | 5             | 1           | -         | -                      | -                             | 1                | t                   | 3             | 89                        | v.a. et traces de foram. et de coccol.                 |                     |
|               | 47-49       | 15            | t           | -         | t                      | t                             | t                | t                   | 3             | 81                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 55          | 7             | 1           | -         | -                      | -                             | 2                | t                   | 3             | 86                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
| Flanc Ouest   |             |               |             |           |                        |                               |                  |                     |               |                           |  |                     |
| CL KS1        | 9-11        | 5             | t           | 1         | t                      | t                             | t                | t                   | 7             | 86                        | v.a. avec oxyhydr.                                     |                     |
|               | 12-14       | 7             | 5           | t         | t                      | t                             | t                | t                   | 10            | 77                        | v.a. avec oxyhydr. et foram.                           |                     |
|               | 20          | 7             | 1           | t         | t                      | t                             | t                | 1                   | 7             | 83                        | v.a. avec oxyhydr. et foram.                           |                     |
|               | 30          | 4             | 1           | -         | t                      | t                             | t                | 10                  | 10            | 74                        | v.a. avec oxyhydr. et cendres volc.                    |                     |
| CL KS2        | 10          | 3             | -           | t         | t                      | t                             | t                | t                   | 7             | 89                        | v.a. avec oxyhydr.                                     |                     |
|               | 20          | 5             | t           | t         | t                      | t                             | t                | 1                   | 10            | 83                        | v.a. avec oxyhydr.                                     |                     |
|               | 30          | 2             | t           | t         | t                      | 1                             | t                | t                   | 3             | 93                        | v.a. et traces d'oxyhydr.                              |                     |
|               | 35          | 3             | t           | t         | t                      | 1                             | 1                | 1                   | 2             | 92                        | v.a. et traces de foram.                               |                     |
|               | 36          | 5             | t           | -         | t                      | t                             | t                | t                   | 3             | 91                        | v.a. et traces de foram.                               |                     |
|               | 41          | 2             | 1           | -         | -                      | t                             | t                | 2                   | 3             | 91                        | v.a. et traces d'oxyhydr.                              |                     |
|               | 44          | 3             | 2           | t         | t                      | 2                             | 1                | 2                   | 3             | 86                        | v.a. et traces d'oxyhydr. et foram.                    |                     |
|               | 50          | 5             | 1           | t         | t                      | t                             | t                | 2                   | 3             | 88                        | v.a. et traces de foram.                               |                     |
|               | 60          | 2             | 1           | -         | t                      | -                             | t                | 1                   | 2             | 93                        | v.a. et traces d'oxyhydr. et foram.                    |                     |
|               | 70          | 1             | -           | -         | t                      | -                             | -                | 2                   | 2             | 95                        | v.a. et traces d'oxyhydr.                              |                     |
|               | 80          | 1             | -           | -         | -                      | -                             | -                | 2                   | 2             | 94                        | v.a. et traces d'oxyhydr. et cendres volc.             |                     |
|               | 90          | 1             | -           | t         | t                      | t                             | t                | 3                   | 5             | 90                        | v.a. et traces d'oxyhydr.                              |                     |
|               | 100         | 2             | t           | t         | t                      | t                             | t                | 1                   | 3             | 93                        | v.a. et traces d'oxyhydr.                              |                     |
|               | 112         | 1             | t           | -         | -                      | -                             | -                | 5                   | 7             | 86                        | v.a. avec oxyhydr.                                     |                     |
|               | 120         | 1             | -           | -         | -                      | -                             | t                | 3                   | 5             | 90                        | v.a. et traces d'oxyhydr.                              |                     |
|               | 130         | 1             | -           | -         | -                      | -                             | t                | 5                   | 7             | 86                        | v.a. avec oxyhydr.                                     |                     |
|               | 139         | 1             | -           | t         | t                      | -                             | t                | 2                   | 2             | 94                        | v.a. et traces d'oxyhydr. et cendres volc.             |                     |
|               | 148         | 1             | -           | t         | -                      | -                             | t                | 5                   | 3             | 90                        | v.a. et traces de cendres volc.                        |                     |
|               | 151         | 1             | -           | -         | t                      | -                             | 1                | 2                   | 10            | 85                        | v.a. avec oxyhydr.                                     |                     |
|               | 160         | t             | -           | -         | -                      | -                             | t                | 2                   | 7             | 90                        | v.a. avec oxyhydr.                                     |                     |
|               | 170         | t             | -           | -         | -                      | -                             | t                | 7                   |               | 92                        | v.a. avec oxyhydr.                                     |                     |
| 180           | t           | -             | t           | t         | -                      | t                             | 10               | 10                  | 89            | v.a. avec oxyhydr.        |  |                     |
| 191           | t           | -             | -           | -         | -                      | t                             | 10               | 10                  | 89            | v.a. avec oxyhydr.        |  |                     |
| 200           | t           | -             | -           | -         | -                      | t                             | 10               | 10                  | 89            | v.a. avec oxyhydr.        |  |                     |
| 210           | t           | -             | -           | -         | -                      | t                             | 7                |                     | 92            | v.a. avec oxyhydr.        |  |                     |
| 213           | t           | -             | -           | -         | -                      | t                             | 1                | 5                   | 93            | v.a. et traces d'oxyhydr. |  |                     |
| CL KS3        | 4           | 15            | -           | 2         | t                      | 3                             | 1                | 3                   | 5             | 71                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 13.5        | 15            | -           | 2         | t                      | 5                             | t                | 1                   | 5             | 71                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 24          | 10            | 1           | 2         | 1                      | 3                             | t                | t                   | 10            | 73                        | v.a. avec oxyhydr. et foram.                           |                     |
|               | 26.5        | 10            | 1           | 2         | t                      | 3                             | t                | 1                   | 3             | 79                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 29          | 10            | t           | 2         | t                      | 5                             | t                | t                   | 5             | 77                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 31          | 10            | 1           | 1         | t                      | 2                             | 1                | 2                   | 3             | 79                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 36          | 10            | t           | 2         | t                      | 3                             | t                | 2                   | 2             | 80                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 38          | 10            | t           | 7         | t                      | 3                             | 1                | 3                   | 2             | 73                        | v.a. avec foram. et diatom.                            |                     |
|               | 40.5        | 10            | t           | 2         | t                      | 2                             | t                | 3                   | 3             | 79                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 42          | 10            | 1           | 2         | t                      | 3                             | 2                | 3                   | 3             | 76                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 47          | 10            | 1           | 3         | t                      | 3                             | t                | 3                   | 3             | 77                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 51          | 7             | 5           | 3         | t                      | 2                             | t                | t                   | 2             | 80                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 59          | 5             | 5           | 1         | t                      | 2                             | 1                | 2                   | 2             | 81                        | v.a. et traces de foram. et coccol.                    |                     |
|               | 67          | 2             | 3           | 1         | t                      | 1                             | 1                | 3                   | 3             | 85                        | v.a. et traces de coccol. et oxyhydr. et cendres volc. |                     |
|               | 77          | 3             | t           | t         | t                      | t                             | 1                | 3                   | 7             | 85                        | v.a. avec oxyhydr.                                     |                     |
|               | 80          | 2             | -           | -         | t                      | t                             | t                | 1                   | 5             | 91                        | v.a. et traces d'oxyhydr.                              |                     |
|               | 81          | 2             | t           | 1         | t                      | 2                             | t                | 2                   | 2             | 90                        | v.a. et traces d'org. et oxyhydr. et cendres volc.     |                     |
|               | 85          | 5             | t           | -         | -                      | t                             | 3                | t                   | 3             | 85                        | v.a. et traces de foram.                               |                     |
|               | 95          | 1             | t           | t         | t                      | -                             | t                | 5                   | 10            | 83                        | v.a. avec oxyhydr.                                     |                     |
|               | 105         | 1             | t           | -         | -                      | t                             | t                | 5                   | 3             | 90                        | v.a. et traces de cendres volc.                        |                     |
|               | 113         | 5             | 7           | t         | -                      | t                             | t                | 2                   | 3             | 82                        | v.a. avec coccol.                                      |                     |
|               | 120         | 5             | 7           | t         | t                      | t                             | t                | 5                   | 3             | 79                        | v.a. avec coccol.                                      |                     |
|               | 124         | 2             | t           | t         | -                      | 1                             | t                | 2                   | 2             | 92                        | v.a. et traces de foram. et oxyhydr. et cendres volc.  |                     |
|               | 130         | 5             | 5           | t         | t                      | t                             | t                | 3                   | 5             | 81                        | v.a. et traces d'org. calcaires et oxyhydr.            |                     |
|               | 132         | 3             | 3           | -         | t                      | t                             | t                | 2                   | 2             | 89                        | v.a. et traces d'org. calcaires                        |                     |
|               | 140         | 3             | 3           | t         | t                      | 1                             | t                | 2                   | 3             | 87                        | v.a. et traces d'org. calcaires et oxyhydr.            |                     |
|               | 149         | 10            | 2           | -         | t                      | t                             | t                | 1                   | 3             | 83                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 155         | 10            | 5           | -         | t                      | t                             | t                | 1                   | 3             | 80                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 161         | 7             | 5           | -         | -                      | -                             | t                | 1                   | 2             | 84                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 166         | 3             | 2           | -         | t                      | -                             | t                | 1                   | 3             | 90                        | v.a. et traces de foram. et oxyhydr.                   |                     |
|               | 168.5       | 7             | 1           | t         | -                      | t                             | t                | 3                   | 2             | 86                        | v.a. avec foram.                                       |                     |
|               | 172         | t             | -           | t         | -                      | -                             | t                | 5                   |               | 94                        | v.a. et traces d'oxyhydr.                              |                     |
|               | 174         | 2             | 1           | t         | t                      | t                             | 1                | 1                   | 2             | 92                        | v.a. et traces de foram. et oxyhydr.                   |                     |
| 181           | 1           | -             | -           | t         | t                      | t                             | 1                | 7                   | 90            | v.a. avec oxyhydr.        |  |                     |
| 191           | 1           | -             | -           | -         | t                      | t                             | 7                |                     | 91            | v.a. avec oxyhydr.        |  |                     |
| 192           | 2           | -             | -           | -         | t                      | t                             | 3                |                     | 94            | v.a. et traces d'oxyhydr. |  |                     |
| 201           | 3           | 2             | t           | t         | t                      | t                             | 4                |                     | 90            | v.a. et traces d'oxyhydr. |  |                     |
| 211           | 7           | 3             | -           | t         | t                      | t                             | 1                | 3                   | 85            | v.a. avec foram.          |  |                     |

Tableau XII (Suite)

| Echantillon   | Niveau (cm) |    | Foraminiferes | Radiolaires | Diatomees | Spicules | Agregats bruns s.s. | Agregats bruns  |    | Verre volcanique | Feldspath + Quartz | Micronodules | Ecaillies | Ostracodes et dents | Cendres volcaniques | Sulfures | Limonite | Olivine |
|---------------|-------------|----|---------------|-------------|-----------|----------|---------------------|-----------------|----|------------------|--------------------|--------------|-----------|---------------------|---------------------|----------|----------|---------|
|               |             |    |               |             |           |          |                     | Pelotes fecales |    |                  |                    |              |           |                     |                     |          |          |         |
| Zone "axiale" |             |    |               |             |           |          |                     |                 |    |                  |                    |              |           |                     |                     |          |          |         |
| CL SH3        | surface     | 33 | 10            | t           | t         | 10       | t                   | 45              | -  | 2                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY 82-17-1    | surface     | 35 | 1             | t           | t         | 35       | 20                  | 4               | -  | 5                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY 82-17-2    | surface     | 60 | 1             | t           | t         | 25       | 5                   | 6               | t  | 3                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY SH2        | surface     | 40 | 1             | t           | t         | 39       | 15                  | 2               | -  | 2                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY SH3        | surface     | 30 | 2             | 1           | t         | 34       | 30                  | 3               | t  | t                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY SH4        | surface     | 47 | 2             | 1           | t         | 33       | 15                  | 2               | -  | t                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY SH5        | surface     | 3  | 20            | 5           | t         | 67       | t                   | 2               | -  | 3                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY SH7        | surface     | 5  | 5             | 1           | t         | 39       | 50                  | t               | -  | t                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY SH10       | surface     | 40 | 5             | t           | t         | 25       | 15                  | 10              | -  | 5                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY KS1        | surface     | 5  | 3             | -           | t         | 88       | -                   | 4               | -  | t                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY KS2        | surface     | 67 | 1             | t           | 1         | 18       | 2                   | 10              | -  | 1                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY KS3        | surface     | 4  | 2             | -           | t         | 91       | -                   | 3               | -  | t                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY 84-24-1    | surface     | 4  | 6             | -           | t         | 39       | 1                   | 50              | t  | t                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY 84-29-1    | surface     | 10 | 5             | -           | t         | 75       | t                   | 9               | -  | 1                | -                  | -            | -         | t                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY 84-30-1    | surface     | 80 | 5             | -           | t         | 2        | t                   | 10              | -  | 3                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY 82-32      | surface     | t  | 2             | t           | t         | -        | t                   | t               | -  | t                | -                  | -            | -         | -                   | 23                  | 75       | -        | -       |
| Flanc Ouest   |             |    |               |             |           |          |                     |                 |    |                  |                    |              |           |                     |                     |          |          |         |
| CL SH1        | surface     | 79 | 10            | t           | t         | t        | 1                   | t               | t  | 2                | 2                  | 1            | 5         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CL SH4        | surface     | 5  | t             | -           | t         | 93       | -                   | t               | 1  | 1                | t                  | t            | t         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CL SH5        | surface     | 20 | 59            | t           | 2         | 8        | 2                   | 1               | -  | 5                | 1                  | t            | 2         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CL SH9        | surface     | 1  | 1             | t           | -         | t        | -                   | 49              | 49 | t                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | t       |
| CL KS1        | surface     | 30 | 30            | -           | 1         | 2        | -                   | -               | -  | 3                | 4                  | -            | 30        | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CL KS2        | surface     | 3  | 3             | -           | t         | 92       | -                   | t               | t  | t                | -                  | -            | 2         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CL KS3        | surface     | 67 | 1             | -           | t         | 5        | 20                  | -               | -  | 2                | -                  | -            | 5         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| Seamounts     |             |    |               |             |           |          |                     |                 |    |                  |                    |              |           |                     |                     |          |          |         |
| CY 84-21-1    | surface     | 15 | 10            | t           | t         | 3        | t                   | 70              | -  | 2                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY 84-22-1    | surface     | 15 | 10            | -           | t         | 2        | -                   | 70              | t  | 3                | t                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY 84-23-1    | surface     | 9  | 10            | t           | t         | 30       | -                   | 50              | t  | 1                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY 84-26-1    | surface     | 99 | -             | -           | t         | -        | -                   | t               | -  | 1                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |
| CY 84-28-1    | surface     | 5  | 5             | -           | t         | 90       | t                   | 1               | t  | t                | -                  | -            | -         | -                   | -                   | -        | -        | -       |

Tableau XV - Répartition des constituants de la fraction grossière dans les sédiments des zones A et B.

| Echantillon   | Niveau (cm) |    | Foraminiferes | Radiolaires | Diatomees | Spicules | Agregats bruns s.s. | Agregats bruns  |                  | Verre volcanique | Feldspath + Quartz | Micronodules | Ecailles et dents | Ostracodes | Cendres volcaniques | Sulfures | Limonite | Olivine |
|---------------|-------------|----|---------------|-------------|-----------|----------|---------------------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|--------------|-------------------|------------|---------------------|----------|----------|---------|
|               |             |    |               |             |           |          |                     | Pelotes fecales | Verre volcanique |                  |                    |              |                   |            |                     |          |          |         |
| Zone "axiale" |             |    |               |             |           |          |                     |                 |                  |                  |                    |              |                   |            |                     |          |          |         |
| CY KS1        | 20-22       | 49 | 1             | -           | t         | 40       | 5                   | 5               | -                | t                | -                  | -            | -                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 35-37       | 36 | 1             | -           | t         | 44       | 1                   | 10              | t                | 8                | t                  | -            | -                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 47-49       | 45 | 1             | -           | t         | 43       | 5                   | 5               | -                | 1                | -                  | -            | -                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 55          | 29 | 1             | -           | t         | 40       | t                   | 30              | -                | t                | -                  | -            | -                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
| Flanc Ouest   |             |    |               |             |           |          |                     |                 |                  |                  |                    |              |                   |            |                     |          |          |         |
| CL KS1        | 9-11        | 30 | t             | -           | t         | 30       | -                   | t               | t                | 10               | -                  | -            | 30                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 12-14       | 7  | 3             | -           | t         | 90       | -                   | t               | t                | t                | -                  | -            | -                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 22-24       | 30 | t             | -           | t         | 40       | -                   | -               | t                | 5                | -                  | -            | 25                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 30-32       | 30 | t             | -           | t         | 25       | -                   | -               | -                | 5                | -                  | -            | 40                | -          | -                   | -        | -        | -       |
| CL KS2        | 3-5         | 15 | t             | -           | 2         | 30       | -                   | -               | -                | 18               | -                  | -            | 35                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 13-15       | 20 | t             | -           | 2         | 35       | t                   | -               | -                | 10               | -                  | -            | 33                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 23-25       | 50 | t             | -           | t         | 40       | t                   | -               | t                | 5                | -                  | t            | 5                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 33-35       | 60 | t             | -           | t         | 25       | -                   | t               | -                | 5                | -                  | -            | 10                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 40-42       | 50 | t             | -           | t         | 30       | -                   | -               | -                | 5                | t                  | -            | 15                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 45-47       | 45 | -             | -           | t         | 30       | -                   | -               | -                | 10               | -                  | -            | 15                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 50-52       | 35 | -             | -           | t         | 35       | -                   | -               | -                | 10               | -                  | -            | 20                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 70-72       | 1  | -             | -           | t         | 5        | -                   | -               | -                | 3                | -                  | -            | 91                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 90-92       | 1  | -             | -           | t         | 20       | -                   | -               | -                | 2                | -                  | -            | 77                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 108-110     | t  | t             | -           | t         | 15       | -                   | -               | -                | 5                | t                  | -            | 80                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 130-132     | -  | -             | -           | t         | 5        | -                   | -               | -                | 5                | -                  | -            | 90                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 137-139     | -  | -             | -           | t         | 10       | -                   | -               | -                | 3                | -                  | -            | 87                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 168-170     | t  | -             | -           | -         | 87       | -                   | -               | -                | 3                | -                  | -            | 10                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 189-191     | -  | -             | -           | t         | 69       | -                   | -               | -                | 1                | -                  | -            | 30                | -          | -                   | -        | -        | -       |
| 209-211       | -           | -  | -             | -           | 49        | 50       | -                   | -               | 1                | -                | -                  | t            | -                 | -          | -                   | -        | -        |         |
| 212-214       | -           | -  | -             | t           | 98        | -        | t                   | t               | 1                | t                | -                  | 1            | -                 | -          | -                   | -        | -        |         |
| CL KS3        | 10-12       | 49 | t             | -           | t         | 24       | 25                  | -               | -                | 1                | -                  | -            | 1                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 19-21       | 59 | t             | -           | t         | 25       | 15                  | t               | -                | 1                | t                  | -            | t                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 26-28       | 83 | 1             | -           | t         | 10       | 5                   | -               | -                | 1                | -                  | -            | t                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 34-36       | 59 | 5             | -           | t         | 15       | 15                  | -               | -                | 1                | -                  | -            | 5                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 44-46       | 74 | t             | -           | t         | 15       | t                   | -               | -                | 1                | -                  | t            | 10                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 53-55       | 79 | t             | -           | t         | 9        | 1                   | -               | -                | 1                | t                  | -            | 10                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 63-65       | 41 | 1             | -           | t         | 40       | t                   | -               | -                | 2                | 1                  | -            | 15                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 69-71       | 34 | t             | -           | 1         | 35       | t                   | -               | -                | 5                | t                  | -            | 25                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 76-78       | 30 | -             | -           | t         | 7        | t                   | -               | -                | 7                | t                  | -            | 51                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 83-85       | 25 | -             | -           | t         | 10       | t                   | -               | -                | 5                | t                  | -            | 56                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 90-92       | 10 | t             | -           | 1         | 58       | -                   | -               | -                | 1                | t                  | -            | 30                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 94-96       | 8  | t             | -           | 1         | 20       | 5                   | -               | -                | 10               | -                  | -            | 53                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 101-103     | 15 | t             | -           | 1         | 25       | t                   | -               | -                | 5                | -                  | -            | 53                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 107-109     | 40 | t             | -           | 1         | 5        | 5                   | -               | -                | 5                | -                  | -            | 43                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 115-117     | 42 | t             | -           | t         | 30       | t                   | -               | -                | 3                | -                  | -            | 25                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 120-122     | 43 | t             | -           | t         | 15       | t                   | -               | -                | 2                | t                  | -            | 40                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 126-128     | 44 | t             | -           | t         | 20       | -                   | -               | -                | 1                | t                  | -            | 35                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 133-135     | 40 | t             | -           | t         | 38       | -                   | -               | -                | 6                | t                  | -            | 15                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 140-142     | 53 | t             | -           | t         | 30       | -                   | -               | -                | 2                | -                  | -            | 15                | -          | -                   | -        | -        | -       |
|               | 148-150     | 69 | t             | -           | t         | 20       | -                   | -               | -                | 5                | 1                  | -            | 5                 | -          | -                   | -        | -        | -       |
| 155-157       | 44          | -  | -             | 1           | 25        | -        | -                   | -               | 10               | t                | -                  | 20           | -                 | -          | -                   | -        | -        |         |
| 165-167       | 54          | -  | -             | 1           | 20        | t        | -                   | -               | 15               | -                | -                  | 10           | -                 | -          | -                   | -        | -        |         |
| 173-175       | 35          | -  | -             | t           | 48        | t        | -                   | -               | 15               | 1                | -                  | 1            | -                 | -          | -                   | -        | -        |         |
| 181-183       | 3           | -  | -             | t           | 81        | t        | -                   | -               | 15               | -                | -                  | 1            | -                 | -          | -                   | -        | -        |         |
| 190-192       | 15          | t  | -             | 1           | 59        | t        | -                   | -               | 20               | t                | -                  | 5            | -                 | -          | -                   | -        | -        |         |
| 199-201       | 45          | t  | -             | t           | 45        | t        | -                   | -               | 10               | 1                | -                  | 5            | -                 | -          | -                   | -        | -        |         |
| 210-212       | 49          | t  | -             | t           | 40        | -        | -                   | -               | 10               | 4                | -                  | t            | -                 | -          | -                   | -        | -        |         |

Tableau XV (Suite)

# **ANNEXE II**

LA DEPRESSION DE BAUER

| Echantillon | Niveau (cm) |               |             |           |          |             |        |           |            |              |               |         | Facies sédimentaire       |
|-------------|-------------|---------------|-------------|-----------|----------|-------------|--------|-----------|------------|--------------|---------------|---------|---------------------------|
|             |             | Foraminifères | Coccolithes | Diatomees | Spicules | Radiolaires | Quartz | Feldspath | Palagonite | Ichtyolithes | Oxyhydroxydes | Argiles |                           |
| DSDP 34     |             |               |             |           |          |             |        |           |            |              |               |         |                           |
| 319-1-0     | 0-3         | t             | -           | -         | -        | -           | t      | 2         | t          | 2            | 7             | 88      | v.a. avec oxyhydr.        |
| GEOMETEP I  |             |               |             |           |          |             |        |           |            |              |               |         |                           |
| 101 K       | 0-20        | 10            | t           | 2         | t        | 2           | -      | -         | t          | -            | 5             | 80      | v.a. avec foram.          |
|             | 40-50       | t             | -           | -         | t        | 2           | -      | -         | -          | t            | 3             | 94      | v.a. et traces d'oxyhydr. |
|             | 80-90       | t             | -           | t         | t        | 1           | -      | -         | 1          | t            | 7             | 90      | v.a. avec oxyhydr.        |
|             | 120-130     | t             | -           | t         | -        | 1           | -      | -         | 1          | t            | 7             | 90      | v.a. avec oxyhydr.        |
|             | 160-170     | 1             | -           | t         | t        | t           | -      | -         | 1          | t            | 7             | 90      | v.a. avec oxyhydr.        |
|             | 200-210     | t             | -           | t         | t        | t           | -      | -         | 1          | t            | 10            | 88      | v.a. avec oxyhydr.        |

Tableau XXXI- Observation des sédiments en frottis dans la dépression de Bauer.

| Echantillon | Niveau (cm) |               |                      |             |           |                        |                      |                |           |              |            |              |             |
|-------------|-------------|---------------|----------------------|-------------|-----------|------------------------|----------------------|----------------|-----------|--------------|------------|--------------|-------------|
|             |             | Foraminifères | Etat de conservation | Radiolaires | Diatomees | Spicules + Acanthaires | Etat de conservation | Agregats bruns | Feldspath | Micronodules | Palagonite | Ichtyolithes | Phillipsite |
| DSDP 34     |             |               |                      |             |           |                        |                      |                |           |              |            |              |             |
| 319-1-0     | 0-3         | t             | m                    | -           | -         | -                      | -                    | 1              | t         | 15           | 68         | 15           | 1           |
| GEOMETEP I  |             |               |                      |             |           |                        |                      |                |           |              |            |              |             |
| 101 K       | 0-20        | 25            | M-->tm               | 59          | -         | t                      | TB-->B               | 15             | -         | 1            | t          | -            | -           |
|             | 40-50       | -             | -                    | 40          | -         | t                      | TB-->M               | 20             | -         | 30           | 10         | t            | -           |
|             | 80-90       | -             | -                    | t           | t         | t                      | M                    | 40             | -         | 49           | 10         | 1            | -           |
|             | 120-130     | -             | -                    | 1           | -         | t                      | M                    | 36             | -         | 40           | 20         | 3            | -           |
|             | 160-170     | -             | -                    | 1           | -         | t                      | M                    | 26             | -         | 20           | 50         | 3            | -           |
|             | 200-210     | -             | -                    | 1           | -         | 1                      | m                    | 11             | t         | 35           | 50         | -            | -           |

Tableau XXXII- Les constituants de la fraction grossière (> 63 µm) des sédiments de la dépression de Bauer.

| ECHANTILLON | NIVEAU<br>( cm ) | CaCO3<br>( % ) | SiO2<br>( % ) | TiO2<br>( % ) | Al2O3<br>( % ) | Fe2O3<br>( % ) | Mn3O4<br>( % ) | MgO<br>( % ) | CaO<br>( % ) | Na2O<br>( % ) | K2O<br>( % ) | P2O5<br>( % ) | P.Feu<br>( % ) | H2O-<br>( % ) | Total<br>( % ) |
|-------------|------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| DSDP 319-1  | 0-3              | 0.50           | 26.35         | 0.23          | 4.84           | 23.90          | 7.95           | 3.53         | 3.46         | 5.74          | 1.42         | 1.50          | 19.13          | 6.36          | 98.05          |
| Geom 101 K  | 0-20             | 37.00          | 23.90         | 0.10          | 2.30           | 8.60           | 3.62           | 2.00         | 30.40        | *             | 0.50         | 0.38          | *              | *             | 71.80          |
| Geom 101 K  | 40-50            | 1.00           | 37.30         | 0.19          | 4.30           | 17.50          | 5.21           | 4.20         | 2.30         | *             | 1.90         | 0.59          | *              | *             | 73.49          |
| Geom 101 K  | 80-90            | 0.00           | 36.00         | 0.15          | 3.20           | 21.30          | 7.35           | 5.00         | 2.10         | *             | 1.90         | 0.66          | *              | *             | 77.66          |
| Geom 101 K  | 120-130          | 2.00           | 36.60         | 0.14          | 3.10           | 22.40          | 6.85           | 5.10         | 2.50         | *             | 1.90         | 0.87          | *              | *             | 79.46          |
| Geom 101 K  | 160-170          | 1.00           | 39.20         | 0.14          | 3.10           | 21.30          | 5.19           | 5.60         | 2.00         | *             | 2.00         | 0.59          | *              | *             | 79.12          |
| Geom 101 K  | 200-210          | 1.00           | 36.00         | 0.13          | 2.90           | 21.40          | 6.07           | 5.10         | 2.20         | *             | 1.90         | 0.70          | *              | *             | 76.40          |

| ECHANTILLON | NIVEAU<br>( cm ) | Li<br>(ppm) | Rb<br>(ppm) | Sr<br>(ppm) | Ba<br>(ppm) | V<br>(ppm) | Cr<br>(ppm) | Co<br>(ppm) | Ni<br>(ppm) | Cu<br>(ppm) | Zn<br>(ppm) | As<br>(ppm) | Se<br>(ppm) |
|-------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| DSDP 319-1  | 0-3              | 135         | 21          | 666         | 4707        | 258        | 14          | 187         | 1138        | 739         | 408         | 115         | < 0.1       |
| Geom 101 K  | 0-20             | 18          | *           | 1122        | >3500       | 122        | 61          | 51          | 313         | 446         | 185         | 16          | < 0.1       |
| Geom 101 K  | 40-50            | 47          | *           | 778         | >3500       | 198        | 57          | 117         | 546         | 930         | 324         | *           | *           |
| Geom 101 K  | 80-90            | 53          | *           | 736         | >3500       | 294        | 64          | 80          | 616         | 902         | 370         | 45          | < 0.1       |
| Geom 101 K  | 120-130          | 63          | *           | 661         | >3500       | 316        | 62          | 73          | 551         | 810         | 370         | *           | *           |
| Geom 101 K  | 160-170          | 54          | *           | 563         | >3500       | 237        | 58          | 82          | 413         | 788         | 351         | 40          | < 0.1       |
| Geom 101 K  | 200-210          | 58          | *           | 590         | >3500       | 289        | 59          | 80          | 437         | 854         | 351         | 49          | < 0.1       |

Tableau XXIII- Analyses chimiques des sédiments de la dépression de Bauer

## FIGURES

### CHAPITRE I

- 1 - Valeur du rapport  $(Al/Al+Fe+Mn) \times 100$  dans les sédiments océaniques. D'après Boström *et al.*, 1969.
- 2 - Influence des 3 pôles hydrothermal (EPR), basaltique (B) et terrigène (TM) dans les sédiments océaniques. D'après Boström (1970, 1973).
- 3 - Carte de répartition des sédiments métallifères dans le Pacifique.
- 4 - Localisation de la dépression de Bauer et du bassin de Tiki (d'après Hoffert *et al.*, 1979).
- 5 - Coupe schématique W-E à travers le Pacifique Est, environ à 10°S. Relations entre les "sédiments métallifères" du bassin de Tiki et ceux de la dépression de Bauer (d'après Hoffert *et al.*, 1979).
- 6 - Principales fosses à sédiments métallifères de la Mer Rouge.
- 7 - Les différents facies des sédiments métallifères de la Mer Rouge (d'après Bignell, 1978).
- 8 - Le complexe ophiolitique du Troodos à Chypre (d'après Constantinou et Govett, 1972).
- 9 - Le complexe ophiolitique au Nord-Ouest des Appennins (d'après Bonatti *et al.*, 1976).
- 10 - Le complexe ophiolitique d'Oman (la nappe de Semail) (dans Juteau, 1984).
- 11 - La séquence ophiolitique de Campbellton (Terre Neuve) : les sédiments manganésifères de la formation de Luscombe (d'après Kay, 1975).
- 12 - Le complexe ophiolitique de York Harbour (Terre Neuve) (d'après Duke et Hutchinson, 1974).

## CHAPITRE II

- 13 - Carte générale de localisation des zones A et B des missions Clipper-ton (1981), Cyatherm (1982) et Cyarise (1984) (dans Hékinian *et al.*, 1984).
- 14 - Les caractéristiques morphologiques des zones A et B.
- 15 - Localisation des sites hydrothermaux actifs et inactifs dans le graben central au niveau de la zone A (d'après Hékinian *et al.*, 1984).
- 16 - Anomalies de manganèse et de méthane : exemple d'un profil en fonction de la profondeur à 3 km à l'Ouest du graben central dans la zone A (HY-CY-5) (d'après Charlou, dans Bougault, 1982).
- 17 - Localisation des prélèvements de sédiments dans les zones A et B.
- 18 - Les constituants de la fraction grossière des sédiments de surface de la zone "axiale" dans la zone A.
- 19 - Etat de conservation des organismes calcaires et siliceux dans les sédiments de surface de la zone "axiale".
- 20 - Diagrammes de rayons X sur sédiment total, dans la zone "axiale" : différentes étapes de chauffage (60°C, 400°C et 800°C).
- 21 - Diagramme de rayons X de la fraction argileuse (< 2 µm) non traitée, dans la zone "axiale" (exemple : l'échantillon CY SH 5).
- 22 - Diagramme de rayons X de la fraction argileuse après traitement (exemple : l'échantillon CY SH 5).
- 23 - Les constituants de la fraction grossière de CY 82-32.
- 24 - Le site Pogonord : localisation des prélèvements des modioles (d'après Fustec, 1985).
- 25 - Le site Parigo : localisation des prélèvements des modioles (d'après Fustec, 1985).
- 26 - Les courants de convection engendrés par l'émission des fluides hydrothermaux.

- 27 - Répartition des sédiments sur le flanc ouest (jusqu'à 6 km de l'axe), d'après les deux plongées Cyatherm : CY 82-17 (au Nord) et CY 82-20 (au Sud).
- 28 - Les constituants de la fraction grossière des sédiments de surface sur le flanc ouest.
- 29 - Répartition des cendres volcaniques dans les sédiments de surface (à partir de l'observation des fractions grossières).
- 30 - Le Pacifique Centre-Est : les vents et les courants marins dominants (Oadet *et al.*, 1982 b).
- 31 - Etat de conservation des organismes calcaires et siliceux dans les sédiments de surface situés sur le flanc ouest.
- 32 - Diagramme de rayons X de la fraction argileuse avant traitement, d'un sédiment de surface sur le flanc ouest (exemple de l'échantillon CL SH 1).
- 33 - Diagramme de rayons X après traitement (exemple de l'échantillon CL SH 1).
- 34 - Les constituants de la fraction grossière ( $> 63 \mu\text{m}$ ) dans les sédiments situés sur les seamounts.
- 35 - Etat de conservation des organismes calcaires et siliceux dans les sédiments situés sur les seamounts.
- 36 - Localisation des dépôts hydrothermaux (zones ombrées) sur les seamounts Sud-Est (zone A) et de la zone B (Hékinian et Bideau, sous presse).
- 37 - Coupe sur le seamount Sud-Est (Hékinian et Fouquet, 1985).
- 38 -  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{MgO}$  et  $\text{K}_2\text{O}$  en fonction de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  : comparaison avec les argiles pélagiques moyennes du Pacifique (Ppc).
- 39 - Variation des teneurs en arsenic en fonction de la longitude (à  $\text{CaCO}_3 = 0$ ).
- 40 - Valeurs moyennes, par différentes méthodes d'analyses, des teneurs en arsenic dans les sédiments pélagiques moyens et les sédiments de la dorsale du Pacifique Est (d'après Boström et Valdes, 1969 et Marchig *et al.*, 1982).
- 41 - Variation des teneurs en sélénium en fonction de la longitude (à  $\text{CaCO}_3 = 0$ ).

- 42 - Les corrélations positives et négatives, supérieures à +0.65 et inférieures à -0.65 dans les sédiments de surface à 12°50' Nord et 11°30' Nord.
- 43 - Variations du rapport (Fe+Mn)/Al (à CaCO<sub>3</sub> = 0) en fonction de la longitude (sans l'échantillon CY 82-32).
- 44 - Influence des trois pôles basaltique, terrigène et hydrothermal dans les sédiments de surface à 12°50' Nord et 11°30' Nord.
- 45 - La carotte CY KS 1.
- 46 - La carotte CL KS 1.
- 47 - La carotte CL KS 2.
- 48 - La carotte CL KS 3.
- 49 - Variations des teneurs des principaux éléments chimiques le long de la carotte CY KS 1.
- 50 - Variations des teneurs des principaux éléments chimiques le long de la carotte CL KS 2.
- 51 - Variations des teneurs des principaux éléments chimiques le long de la carotte CL KS 3.
- 52 - Variations du rapport (Fe+Mn)/Al dans CL KS 2 et CL KS 3.
- 53 - Influence des trois pôles basaltique, terrigène et hydrothermal dans les carottes CY KS 1, CL KS 2 et CL KS 3.
- 54 - Variations du pourcentage de CaCO<sub>3</sub> en fonction de la longitude dans les sédiments de surface.
- 55 - Les processus de sédimentation à l'axe de la dorsale à 12°50' Nord et 11°30' Nord.

### CHAPITRE III

- 56 - Répartition dans le Pacifique des sédiments métallifères forés au contact du plancher océanique par le Glomar Challenger et localisation des échantillons étudiés.
- 57 - Exemple de diagramme de rayons X de la fraction argileuse, après traitement d'élimination des amorphes (l'échantillon 203-5-1).

- 58 - SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> en fonction de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Comparaison avec les argiles pélagiques du Pacifique (Ppc).
- 59 - Les coefficients de corrélations entre les éléments majeurs et mineurs.
- 60 - Diagramme des coefficients de corrélations.
- 61 - Influence des trois pôles hydrothermal, basaltique et terrigène dans les sédiments.

#### CHAPITRE IV

- 62 - La dépression de Bauer (d'après Erlandson *et al.*, 1981) : localisation des échantillons étudiés.
- 63 - Influence des pôles basaltique, terrigène et hydrothermal dans les sédiments de la dépression de Bauer : le diagramme Fe/Ti en fonction de Al/(Al+Fe+Mn).
- 64 - Le diagramme Fe/Ti en fonction de Al/(Al+Fe+Mn) : comparaison entre les sédiments de surface de la dépression de Bauer et ceux de l'axe de la dorsale à 12°50' N et 11°30' Nord, à contributions basaltique et détritique égales.
- 65 - La carotte Geometep I - 101 K.
- 66 - Variation des principaux éléments chimiques dans la carotte Geometep I - 101 K.
- 67 - Circulation des masses d'eau profondes (3800 m) établie à partir des isothermes. Les zones hachurées sont limitées par les isothermes 1,500 - 1,475 et 1,450°C (Lonsdale, 1976).
- 68 - Distribution du fer et du manganèse (à CaCO<sub>3</sub> = 0) le long d'une coupe joignant la dorsale du Pacifique Est à la dorsale fossile des Galapagos, passant par la dépression de Bauer (Dasch, 1974).

#### CHAPITRE V

- 69 - Le complexe ophiolitique du Troodos à Chypre : localisation des prélèvements de terre d'ombres dans les cinq carrières (Ayia-Marina, Troulli, Mathiatis, Kinousa, Skouriotissa. Logs établis d'après les données de J.M. Boirat).
- 70 - Variations du fer en fonction du manganèse dans les terres d'ombre de Chypre.

- 71 - Matrice des coefficients de corrélations linéaires entre les éléments chimiques dans les terres d'ombre de Chypre.
- 72 - Les corrélations significatives ( $>.60$  et  $<-.60$ ) entre les éléments chimiques dans les terres d'ombre de Chypre.
- 73 - Comparaisons des teneurs en quelques éléments chimiques entre les ombres pures et les ombres siliceuses (radiolarites ferrifères).

#### CHAPITRE VI

- 74 - Coupe géologique schématique de la Mer Rouge (d'après Bertin *et al.*, 1979, dans Pautot, 1983).
- 75 - Localisation de la fosse Shaban (ou Jean Charcot) d'après Pautot *et al.*, 1984.
- 76 - Carte bathymétrique Seabeam de la fosse Shaban d'après Pautot *et al.*, 1984 et localisation de la carotte TM KS 1.
- 77 - La carotte TM KS 1.

## TABLEAUX

### CHAPITRE I

- I - Compositions moyennes d'argiles rouges et argiles pélagiques du Pacifique.
- II - Composition de quelques sédiments métallifères à l'axe de la dorsale du Pacifique Est.
- III - Exemples d'analyses chimiques de sédiments métallifères du Pacifique forés à la base de la colonne sédimentaire par le Glomar Challenger.
- IV - Composition des sédiments métallifères de la dépression de Bauer.
- V - Composition des sédiments métallifères du bassin de Tiki.
- VI - Sédiments métallifères de la zone DOMES-C-Station 18 B.
- VII - Analyses chimiques des principaux faciès minéralisés de la Mer Rouge (d'après Bischoff, 1969).
- VIII - Exemples d'analyses chimiques de sédiments métallifères anciens associés aux ophiolites.

### CHAPITRE II

- IX\* - Données générales concernant les échantillons de sédiments étudiés.
- X\* - Teneur en eau des sédiments de surface à 12°50' Nord et 11°30' Nord.
- XI\* - Teneurs en CaCO<sub>3</sub> et analyses chimiques des sédiments étudiés à 12°50' Nord et 11°30' Nord (zones A et B).
- XII\* - Observation des sédiments en frottis et détermination des faciès sédimentaires dans les zones A et B.
- XIII - Classification et dénomination des sédiments (Hoffert, 1980).
- XIV - Pourcentage de la fraction grossière (> 63 µm) dans les sédiments de surface de la zone "axiale" dans la zone A.

- XV\* - Répartition des constituants de la fraction grossière dans les sédiments des zones A et B.
- XVI - Composition de quelques micronodules dans les échantillons CY SH 5 et CY SH 10, de la zone A et comparaison avec des micronodules du Pacifique Sud (carotte 165 KG (0-1 cm) de la mission "SO-14").
- XVII - Associations minéralogiques des particules prélevées dans les mo-dioles observées en sections polies (d'après Senant, 1985).
- XVIII - Pourcentage de fraction grossière dans les sédiments du flanc ouest.
- XIX - Composition des cendres volcaniques déterminées à la microsonde.
- XX - Pourcentage de fraction grossière dans les sédiments prélevés sur les seamounts.
- XXI - Les coefficients de corrélations entre les éléments majeurs et mineurs, déterminés à partir des analyses chimiques des sédiments de surface.

### CHAPITRE III

- XXII - Caractéristiques générales des sédiments étudiés.
- XXIII - Couleur, pourcentage de fraction grossière et texture des sédiments.
- XXIV - Les facies sédimentaires : observation des sédiments en frottis.
- XXV - Les constituants de la fraction grossière ( $> 63 \mu\text{m}$ ).
- XXVI - Les phases observées aux rayons X sur sédiment total (p : présent).
- XXVII - Les constituants de la phase argileuse aux rayons X avant et après traitement d'élimination des amorphes
- XXVIII - Teneurs en  $\text{CaCO}_3$  et analyses chimiques des sédiments.
- XXIX - Valeurs du rapport  $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Al}$  à  $\text{CaCO}_3 = 0$ .

#### CHAPITRE IV

- XXX - Données générales concernant les échantillons de sédiments dans la dépression de Bauer.
- XXXI\* - Observation des sédiments en frottis dans la dépression de Bauer.
- XXXII\* - Les constituants de la fraction grossière (> 63 µm) des sédiments de la dépression de Bauer.
- XXXIII\* - Analyses chimiques des sédiments de la dépression de Bauer
- XXXIV - Analyses chimiques de micronodules et de sédiments associés dans la dépression de Bauer (d'après Dymond et Eklund, 1978 - Echantillon A II 54-14 (467-478 cm) - 9° Sud, 102° Ouest).

#### CHAPITRE V

- XXXV - Analyses chimiques des échantillons de terres d'ombre à Chypre.

#### CHAPITRE VI

- XXXVI - Les constituants en frottis des sédiments de la carotte TM KS 1.
- XXXVII - Les constituants de la fraction grossière (> 63 µm) dans les sédiments de la carotte TM KS 1.
- XXXVIII - Composition de quelques microconcrétions polymétalliques dans la carotte TM KS 1.
- XXXIX - Analyses chimiques des sédiments de la carotte TM KS 1.
- XL - Analyses chimiques de boues métallifères du facies à goethite dans quelques fosses de la Mer Rouge (dans Bignell *et al.*, 1976).

\* - en annexe

## SUMMARY

"Metalliferous sediments" were first described by Boström and Peterson (1966, 1969) as amorphous Fe-Mn oxyhydroxides rich, Al poor sediments. They were located at 6° North and between 6° South and 12° South at the axis of the East Pacific Rise. These authors considered that they have a hydrothermal origin. Since then, the terms "metalliferous sediment" and "hydrothermal sediment" are often used as synonyms.

This may be true in environments where hydrothermal processes are observed. Nevertheless, such an origin is more uncertain for sediments with the same mineralogical and chemical characteristics and that are situated in non-hydrothermal environments.

The purpose of this work is to compare metalliferous sediments of different ages and from different places (Bauer Deep, sediments in contact with the oceanic floor cored during the Deep Sea Drilling Project, metalliferous sediments from the Troodos (Cyprus) and the Red Sea) with sediments at 13° North at the axis of the East Pacific Rise where hydrothermal processes are significant. These have been chosen because of the numerous french cruises that took place in that region during the years 1980 to 1984 (Searise, Clipperton, Cyatherm and Cyarise).

The study of this latter zone permits us to define a "reference metalliferous sediment" in order either to see the transformations that analogous sediments undergo during diagenesis (sediments cored during the Deep Sea Drilling Project, sediments of Cyprus) or to compare their mineralogical and chemical characteristics with sediments located in non-hydrothermal environments (Bauer Deep) or again with metalliferous sediments in a newly born ocean (Shaban Deep in the Red Sea).

Two types of metalliferous sediments based upon their origin, have been defined.

### 1 - Hydrothermal metalliferous sediments

- two types of hydrothermal metalliferous sediments coexist at 13° North :

- . sediments situated in the central graben as well as on the western flank of the rise and on the seamounts. They are characterized by a fine texture, a brown-chocolate colour, dominant amorphous Fe-Mn oxyhydroxides. They contain no sulphides and the calcareous and siliceous microorganisms are marked by a strong dissolution.
- . sediments closely bound to inactive hydrothermal edifices from which they form by alteration in seawater. They consist of limonite (75 %), sulphides (25 %) and the microorganisms are almost completely dissolved.

- the metalliferous sediments cored during the DSDP, at the basalt-sediment interface belong to the most common sediments observed at 13° North.

- in Cyprus, the two types described at 13° North are here, observed. These are "umbers" and "ochres".

- in the Red Sea, the hydrothermal metalliferous sediments belong to the "Goethite-Amorphous" facies and are characterized by iron phases that are more crystallized than those of the Pacific sediments.

### 2 - Metalliferous sediments of multiple origins

- the surface metalliferous sediments in the Bauer Deep are the result of many influences (carbonate dissolution, hydrogenous and probably hydrothermal influences).

### Hydrothermal tracers

Two chemical elements (As and Se) have been measured. The results show that Se seems to indicate a proximal and recent hydrothermal environment.

The diagenetic transformations in the metalliferous sediments are restricted to a tendency for goethite to crystallize.

## RESUME

Le concept de "sédiment métallifère" est né à partir de la description par Boström et Peterson (1966, 1969) de sédiments riches en oxyhydroxydes Fe-Mn amorphes et pauvres en Al, situés à 6° Nord et entre 6° Sud et 12° Sud sur la dorsale du Pacifique Est. Ces auteurs leur ont attribué une origine hydrothermale.

Dès lors, les termes "sédiment métallifère" et "sédiment hydrothermal" sont souvent employés comme synonymes. Ceci peut effectivement se concevoir dans les environnements où des phénomènes hydrothermaux sont reconnus. Néanmoins, l'existence de sédiments aux caractéristiques minéralogiques et chimiques proches, dans des domaines où ce phénomène n'a pas été observé, rend difficile une telle interprétation.

Le but de ce travail est de comparer des sédiments métallifères d'âges et de provenances différents (dépression de Bauer, sédiments du Pacifique forés à l'interface basalte-sédiments pélagiques, par le Glomar Challenger, sédiments métallifères du Troodos à Chypre et de la fosse Shaban, Nord - mer Rouge) en s'appuyant sur une étude détaillée de sédiments situés vers 13° Nord sur la dorsale du Pacifique Est. Ce site, où les phénomènes hydrothermaux sont importants, a été choisi pour les nombreuses missions françaises qui s'y sont déroulées entre 1980 et 1984 (Searise, Clipperton, Cyathern et Cyarise).

A la suite de l'étude de ce site, une définition de sédiment métallifère de "référence" est donnée qui permet ensuite d'appréhender les évolutions subies par les sédiments métallifères de même nature au cours de la diagenèse (sédiments forés par le Glomar Challenger, sédiments de Chypre) ou de comparer leurs caractéristiques minéralogiques et chimiques avec des sédiments situés dans des environnements non hydrothermaux (dépression de Bauer), ou encore avec des sédiments métallifères associés à un océan en voie de formation (fosse Shaban en mer Rouge).

Deux types de sédiments sont ainsi définis selon leur origine :

1 - *Les sédiments métallifères d'origine hydrothermale*

- Deux types de sédiments métallifères hydrothermaux sont reconnus à 13° Nord :

- . des sédiments ayant une large répartition, aussi bien dans le graben central que sur le flanc ouest de la dorsale et les seamounts, et qui sont caractérisés principalement par une texture fine (vase d'argiles), une couleur brun-chocolat, une composition caractérisée par la dominance des oxyhydroxydes Fe-Mn amorphes, une absence de sulfures et une forte dissolution des organismes calcaires et siliceux.
- . des sédiments étroitement liés aux édifices hydrothermaux inactifs dont ils dérivent par altération directe dans l'eau de mer. Leur minéralogie est dominée par de la limonite (75 %) et des sulfures (25 %) et les organismes y sont très fortement dissous.

- Les sédiments métallifères du Pacifique forés par le Glomar Challenger à l'interface basalte - sédiments pélagiques appartiennent au type le plus commun observé à 13° Nord.

- A Chypre, les deux types décrits à 13° Nord sont observés. Les "terres d'ombre", correspondant au premier type, et les "ocres" correspondant au second.

- en mer Rouge, les sédiments métallifères hydrothermaux correspondent au faciès "amorphe et à goethite" et sont caractérisés par une plus grande cristallinité des phases ferrifères.

2 - *Des sédiments métallifères d'origines multiples*

- Les sédiments métallifères de surface de la dépression de Bauer résultent de la combinaison de plusieurs facteurs (dissolution des carbonates, apport hydrogène et probablement hydrothermal).

Des traceurs de l'hydrothermalisme

Devant l'absence de critères minéralogiques permettant de tracer l'hydrothermalisme, deux éléments chimiques (As et Se) ont été dosés. Il semble que la présence de sélénium puisse indiquer un milieu hydrothermal proche et récent.

L'évolution diagénétique des sédiments métallifères est faible et se traduit par une tendance à la cristallisation de goethite.