HAL
open science

La base de données du Deep Sea Drilling Project : exploitation relationnelle et application à l'étude de la sédimentation néogène

Patrick Zeyen

▶ **To cite this version:**

Patrick Zeyen. La base de données du Deep Sea Drilling Project : exploitation relationnelle et application à l'étude de la sédimentation néogène. Sciences de la Terre. Université Claude Bernard - Lyon 1, 1991. Français. NNT : . tel-02019925

HAL Id: tel-02019925

https://theses.hal.science/tel-02019925

Submitted on 14 Feb 2019

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

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

AUTEUR 2

N° d'ordre 32-91 Année 1991

UNIVERSITÉ DE LYON
C.S.T.
GÉOLOGIE

THESE

présentée

devant l'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I

pour l'obtention

du DIPLOME DE DOCTORAT

par

Patrick ZEYEN

La base de données du Deep Sea Drilling Project : exploitation relationnelle et application à l'étude de la sédimentation néogène.

Thèse soutenue le 20 Février 1991

Membres du Jury :

MM. :

Bernard BIJU-DUVAL
Pierre COTILLON
Michel HOFFERT
Yves LANCELOT
André SCHAAF

UNIVERSITE DE LYON
C.S.T.
GÉOLOGIE

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON I

Président de l'Université	M. le Pr. G. FONTAINE
1er Vice-Président Fédération Santé	M. le Pr. P. ZECH
Coordonnateur Fédération Sciences	M. le Pr. Y. LEMOIGNE
Président du Comité de Coordination des Etudes Médicales	M. le Pr. P. ZECH
Secrétaire Général	M. F. MARIANI

FEDERATION SANTE

UFR de Médecine GRANGE BLANCHE	DIRECTEUR : Mme le Pr. H.PELLET
UFR de Médecine ALEXIS CARREL	DIRECTEUR : M. le Pr. J.C. EVREUX
UFR de Médecine LYON-NORD	DIRECTEUR : M. le Pr. L.M. PATRICOT
UFR de Médecine LYON-SUD	DIRECTEUR : M. le Pr. H. DEJOURS
I.S.P.B.L. (PHARMACIE)	DIRECTEUR : M. le Pr. VILLARD
UFR d'ODONTOLOGIE	DIRECTEUR : M. le Pr. H. MAGLOIRE
INSTITUT de TECHNIQUES DE READAPTATION	DIRECTEUR : M. le Pr. M. EYSSETTE

DEPARTEMENTS FEDERATION SANTE

Département de BIOLOGIE HUMAINE	DIRECTEUR : M. le Pr. P.A. BRYON
Département d'INNOVATION et de la COORDINATION PEDAGOGIQUE	DIRECTEUR : M. le Pr. G. LLORCA

FEDERATION SCIENCES

Institut des SCIENCES DE LA MATIERE	DIRECTEUR : M. le Pr. E. ELBAZ
Institut des SCIENCES DE L'INGENIERIE ET DU DEVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE	DIRECTEUR : M. le Pr.
Institut de CHIMIE ET BIOLOGIE MOLECULAIRE ET CELLULAIRE	DIRECTEUR : Mme A. VARAGNAT - M.C.
Institut d'ANALYSE DES SYSTEMES BIOLOGIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES	DIRECTEUR : M. le Pr. J.M. LEGAY
Institut des SCIENCES ET DE LA TERRE, DE L'OCEAN, DE L'ATMOSPHERE, DE L'ESPACE ET DE L'ENVIRONNEMENT	DIRECTEUR : M. le Pr. S. ELMI
UFR DES ACTIVITES PHYSIQUES ET SPORTIVES	DIRECTEUR : M. J. CAMY - Assistant
I.U.T. A	DIRECTEUR : M. le Pr. GIELLY
I.U.T. B	DIRECTEUR : M. le Pr. J.PIVOT

DEPARTEMENTS FEDERATION SCIENCES

Département de 1er cycle pluridisciplinaire Sciences	DIRECTEUR : M. P. PONCET - M.C.
Département de 2ème cycle	
- Sciences de la vie et de la terre	DIRECTEUR : M. le Pr. J.P. BLANCHET
- Sciences pour l'ingénieur	DIRECTEUR : M. le Pr. P. BETHEAUX
- Sciences de l'analyse et de la matière	DIRECTEUR : M. le Pr. J.L. VIALLE

Remerciements

Cette thèse a été réalisée grâce à une bourse MRT. Elle constitue l'aboutissement de trois années de travail et je remercie toutes les personnes qui ont aidé directement ou indirectement à sa réalisation que ce soit à l'Université Claude Bernard de Lyon ou à l'Université de Bretagne Occidentale de Brest.

Cette thèse n'aurait pu aboutir sans le support financier apporté par ODP et l'IFREMER qui ont chacun contribué à l'acquisition du matériel informatique.

Je remercie en premier lieu André SCHAAF qui m'a accordé sa confiance en m'accueuillant dans son laboratoire de Brest et qui m'a proposé cette étude. J'espère que ce travail est à la mesure de ses espérances.

Je remercie Bernard BIJU-DUVAL, Pierre COTILLON, Michel HOFFERT ainsi que Yves LANCELOT pour avoir accepté de participer à mon jury de soutenance.

L'aide considérable que m'ont apporté Patrick SAISOU et Gilbert MAUDIRE du Centre Océanographique de Bretagne ainsi que Michel DIETRICH à l'Université de Bretagne Occidentale m'a été très utile pour résoudre certains problèmes informatiques. Je leur en suis très reconnaissant.

Je remercie également Dominique BARBE et Jean MONNIER qui ont participé à l'élaboration finale de ce manuscrit.

Je pense à tous mes camarades de Brest, Dijon et Lyon que je n'oublerai jamais et plus particulièrement à LIU XIN BING à qui je souhaite tous mes vœux de réussite dans son nouvel institut de Xuzhou.

Je suis reconnaissant à mes parents qui m'ont permis de réaliser des études supérieures.

Enfin je tiens à dédier cette thèse à MIRIAM qui m'a supporté et toujours soutenu dans mon travail.

SOMMAIRE

Introduction ---------- 3

PREMIERE PARTIE ---------- 5

Chapitre 1 - Le concept de bases de données ---------- 6

I - Informatisation et bases de données ---------- 6
II - Les problèmes de l'élaboration d'une base de données ---------- 7
A - Le modèle conceptuel ---------- 8
B - Les modèles organisationnel et opérationnel ---------- 9
C - L'élaboration d'une base de données par la méthode MERISE ---------- 9
III - Les principaux modèles logiques de bases de données ---------- 11
A - Le modèle hiérarchique de base ---------- 11
B - Le modèle en réseau ---------- 12
C - Les bases de données relationnelles ---------- 12
IV - Les principaux modèles physiques de données ---------- 14
A - La méthode d'accès séquentiel simple ---------- 14
B - La méthode d'accès séquentiel indexé ---------- 14
V - Cas des systèmes de gestions de bases de données ---------- 15
A - Remarques sur les modèles hiérarchiques et en réseau ---------- 15
B - Les systèmes de gestion de bases de données relationnelles (SGBDR) ---------- 15

Chapitre 2 - La base de données du D.S.D.P. ---------- 23

I - La base de données du D.S.D.P. ---------- 23
A - Historique des forages en mer du D.S.D.P. ---------- 23
B - La base de données du D.S.D.P. sur CD-ROM - Structure des données ---------- 23
II - La base de données sur station de travail Sun ---------- 33
A - Présentation de la station de travail ---------- 33
B - Structure de la base de données du D.S.D.P. sur station Sun ---------- 35
III - L'application PALEODATA ---------- 36
A - Structure de l'application ---------- 36
B - Lancement de l'application - Le menu principal ---------- 38
C - Les extractions ---------- 38
D - Les applications ---------- 44

DEUXIEME PARTIE ---------- 55

Chapitre 3 : La sédimentation marine néogène : implications paléocéanographiques et paléoclimatiques ---------- 56

I - Introduction ---------- 56
II - La sédimentation marine néogène - Ses caractéristiques ---------- 56
A - Recherche des taux et des vitesses d'accumulation ---------- 56
B - Résultats ---------- 59
III - La sédimentation marine néogène - Ses significations ---------- 75
A - Etude paléocéanographique et paléoclimatologique dans le Pacifique nord est équatorial à partir de la base de données du D.S.D.P. ---------- 75
B - Etude paléoclimatologique dans le Pacifique ouest ---------- 85
C - Etude paléoclimatologique dans l'Atlantique nord ---------- 86
D - Etude paléoclimatologique dans l'océan indien ---------- 87
E - Synthèse mondiale ---------- 88

IV - Conclusion ---------- 91
A - Intégration des résultats dans un schéma eustatique global ---------- 91
B - Synthèse des cartes d'isopaques ---------- 93

Chapitre 4 : Application de la méthode des associations unitaires à un problème biochronologique concret - Etude dans la région de Panama ---------- 101

I - La méthode des associations unitaires ---------- 101
A - Introduction à la théorie des graphes ---------- 101
B - Construction du graphe biostratigraphique ---------- 103
C - Détection et élimination des configurations interdites ---------- 104
D - La détermination des associations unitaires et de leur succession ---------- 107
E - La détection des remaniements ---------- 110
F - Détermination des biochronozones ---------- 111
E - Remarques sur la méthode des associations unitaires ---------- 115
II - Application de la méthode des associations unitaires à la base de données du D.S.D.P. ---------- 116
A - Implantation du programme de Guex sur la station de travail Sun-3/50 ---------- 116
B - Extraction et codage des données de la base de données du D.S.D.P. ---------- 116
III - Biochronologie quantitative dans la région de Panama ---------- 118
A - Exemple dans le Pacifique est ---------- 118
B - Exemple dans l'Atlantique ouest ---------- 125
C - Conclusion ---------- 129

Conclusion ---------- 135

Annexe A - Courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulations pour les sites étudiés ---------- 141

Annexe B - Histogrammes des fréquences des maximums et des minimums de sédimentation ---------- 163

Annexe C - Cartes de contourages dans l'Atlantique, le Pacifique et l'océan Indien ---------- 167

Annexe D - Liste des espèces utilisées dans le tracé des courbes des taux et des vitesses d'accumulation ---------- 203

Liste des figures ---------- 207

Table des matières ---------- 215

Références bibliographiques ---------- 219

UNIVERSITÉ DE C.S.T. GÉOLOGIE

Introduction

Les nombreuses campagnes de forages en mer réalisées par le Glomar Challenger dans le cadre du projet du Deep Sea Drilling Project (D.S.D.P.) ont fourni aux géologues une masse considérable de données concernant des domaines aussi variés que la géophysique, la sédimentologie, la géochimie ou la paléontologie.

Ces données sont stockées à l'origine dans les rapports initiaux du D.S.D.P. (Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project) appelés également les "Blue Books". Ceux-ci sont édités au terme de chacune des missions du Glomar Challenger. La consultation obligatoire des "Blue Books" rend toute exploitation des données du D.S.D.P. longue et fastidieuse.

Il s'est donc rapidement avéré urgent de stocker le contenu des Blue Books au sein d'une base de données. Cela est devenu une réalité à partir de 1987. En 1988, une version définitive de la base de données du D.S.D.P. sur disques optiques numériques (au nombre de deux) voit le jour avec, en outre, des programmes permettant d'effectuer des extractions.

Face à une telle masse de données, ces extractions restent malheureusement relativement rudimentaires et, finalement, aucune application proprement dite n'a été réellement développée pour exploiter au mieux la base de données du D.S.D.P. sur disques optiques numériques.

L'objectif principal de mon travail était de remédier en partie à ce problème majeur et de prouver qu'il était possible d'utiliser facilement les données du D.S.D.P. au sein d'applications performantes. J'ai en fait travaillé sur une base de données réduite à la paléontologie gérée par le gestionnaire de bases de données INGRES et implantée sur une station de travail de type SUN-3/50.

Le principal support de ce travail est donc constitué par l'outil informatique. C'est pour cela que la première partie de cette thèse lui est consacrée au travers deux chapitres :

- le premier tente d'expliquer le plus clairement possible le concept de bases de données ainsi que les principaux types de gestionnaires de bases de données,

- le deuxième chapitre décrit les bases de données du D.S.D.P. (celle élaborée au cours de ce travail et les précédentes) ainsi que les programmes qui permettent de les exploiter (toute une partie de ce chapitre est consacrée à la description des programmes que j'ai conçus pour exploiter la base de données réduite du D.S.D.P.).

La seconde partie de ce travail fait elle aussi l'objet de deux chapitres; nous avons utilisé, à titre d'exemple, la base de données réduite du D.S.D.P. et les programmes qui lui sont associés (a travers l'application PALEODATA) pour essayer de caractériser la sédimentation marine durant le Néogène :

- nous essayerons dans le troisième chapitre de définir les grandes tendances qui ont régies la sédimentation marine durant le Néogène; pour cela, nous avons tracé les courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation pour 74 sites du D.S.D.P. localisés dans l'océan Pacifique, l'océan Atlantique et l'océan Indien; nous tenterons, dans la deuxième partie de ce chapitre, d'en comprendre les variations et nous porterons en priorité notre attention sur l'influence de la fluctuation des paléotempératures sur la sédimentation néogène (nous utiliserons pour cela l'abondance de certaines espèces fossiles caractéristiques de conditions particulières

de températures dans plusieurs sites du D.S.D.P. localisés dans l'océan Atlantique, l'océan Pacifique et l'océan Indien); nous effectuerons ensuite, à partir des résultats obtenus, une synthèse paléoclimatologique mondiale que nous intégrerons dans l'étude sédimentologique,

- nous aborderons, dans le quatrième chapitre, une méthode permettant de construire des échelles biochronologiques (suivant la méthode des associations unitaires de Guex et Davaud) et qui est maintenant applicable à la base de données du D.S.D.P. sur la station de travail SUN; après avoir décrit la méthode proprement dite, nous l'appliquerons à un exemple concret : la construction d'une échelle biochronologique dans la région de Panama à partir de la base de données du D.S.D.P..

PREMIERE PARTIE

LA BASE DE DONNES DU DEEP SEA DRILLING PROJECT (D.S.D.P.)

Elaboration et exploitation

Cette première partie comporte deux chapitres.

Nous ferons dans le premier chapitre un survol des généralités sur un concept essentiel dans la gestion des données et sur la création de tout système d'informations, celui des bases de données et des gestionnaires de bases de données.

Nous décrirons dans le second chapitre les différentes bases de données élaborées avec les résultats du Deep Sea Drilling Project (D.S.D.P.) et plus particulièrement celles utilisées dans ce travail. Ce chapitre s'achèvera par une présentation rapide des applications spécialement créées pour son exploitation. Cette base de donnée et les programmes d'exploitation serviront de support à l'étude qui sera entreprise dans la seconde partie de ce travail.

CHAPITRE 1 - Le concept de bases de données

I - Informatisation et bases de données

La Géologie comme tous les domaines scientifiques, est caractérisée par un accroissement de plus en plus rapide des échanges d'informations. C'est là le prix du progrès. Ce fait est inhérent aux sociétés actuelles et la science en général ne peut y échapper. Il en résulte un vaste ensemble de données informatiques à gérer. Seul l'outil informatique, de par sa puissance et sa capacité de traitement, permet une gestion relativement aisée et en tout état de cause facilitée de ces données.

L'informatisation à outrance comporte pourtant certains dangers tels que la "surinformation" ou une normalisation excessive qui risquent de perturber la plus grande partie des utilisateurs tout en enfermant les autres dans une élite d'où la majorité est exclue. En outre, dans un tel univers où l'abstraction domine, les communications peuvent se limiter à un dialogue homme-écran. Dans ce cas l'écran devient à la fois le moyen de communiquer mais aussi celui de s'isoler. Ces inconvénients sont néanmoins négligeables face aux bénéfices apportés (Miranda & Busta, 1988).

Cet outil, depuis sa création, est en perpétuelle évolution. Les besoins de calculs scientifiques et techniques importants ont conduit dès le départ à la conception d'ordinateurs capables de résoudre des problèmes de plus en plus ardus. L'évolution de l'informatique des 25 dernières années est caractérisée par une décroissance constante du prix du matériel, de son volume, et par une augmentation des capacités de traitement, de stockage et de la fiabilité des installations : les machines des années 50 sont aujourd'hui remplacées par des calculateurs de plus en plus petits et performants. Pratiquement, la vitesse de calcul a été multipliée par un million et le prix d'un calcul donné divisé par 10 000. A cela s'ajoute une évolution dans le même sens des langages de programmation qui tendent à se simplifier et à se normaliser ce qui rend l'ordinateur accessible à des millions d'utilisateurs de par le monde, particulièrement dans les milieux scientifiques et para-scientifiques. Il ne faut pourtant pas considérer l'informatique comme un outil palliatif à toutes les tâches mais plutôt comme une aide facilitant considérablement la résolution de nombreux problèmes. Depuis 1960, l'informatique ne cesse de se développer dans des voies successives qui viennent en élargir le champ d'applications. Les applications informatiques sont par conséquent multiples.

L'objet de ce chapitre est de présenter brièvement et le plus clairement possible une des branches majeures de l'univers informatique qui est la gestion des données et plus particulièrement le traitement des données au sein d'une base de données. La gestion des fichiers (archivages, consultations...) a donné lieu à de multiples recherches qui ont débouchées, voici 20 ans, sur l'apparition d'un nouveau concept, celui des bases de données. Il peut se définir comme un ensemble d'informations conservées à long terme dans les mémoires d'un ordinateur, mais accessibles à tout moment par voie d'interrogation. Cela suppose, dès le stade de la conception de la base de données, une démarche extrêmement rigoureuse qui interdit toute improvisation. Cette rigueur peut sembler superflue au novice tant le concept de bases de données paraît simple mais son absence aboutit le plus souvent à une base de données de mauvaise qualité voire inexploitable.

Il faut au préalable décrire les schémas généraux de représentation des données (le modèle conceptuel) puis, en fonction de ces modèles, mettre au point les procédures d'implémentation et d'interrogation de la base de données (cela correspond au modèle logique de représentation des données). Il faut finalement décrire le mode de stockage des données sur un support magnétique par exemple (modèle physique des données). Ces trois modèles permettent de définir une base de données. Ils seront expliqués plus en détail dans la suite de ce chapitre.

Lorsque ces trois modèles ont été clairement définis par le concepteur d'une base de données, celle-ci répond forcément aux quatres principes fondamentaux suivant :

- l'intégration et la corrélation des données,
- la flexibilité (ou l'indépendance) des données,
- la disponibilité (ou la performance des accès aux données),
- la sécurité des données.

Dans un système de gestion de fichiers (SGF) classique, une donnée doit être dupliquée si elle apparaît dans plusieurs applications. Ceci implique une inévitable redondance de ces données et, par conséquent, une déperdition de stockage. Une base de données constitue, au contraire, un "réservoir" commun de données que peuvent se partager plusieurs applications. Cela représente le principe d'intégration des données.

Une base de données doit également répondre au principe de corrélation, c'est-à-dire qu'elle doit modéliser au mieux l'univers réel qu'elle représente.

La notion de flexibilité (on parle du principe d'indépendance dans le cas d'une base de données) est essentielle dans la conception de toute base de taille importante. Une base de données est dite indépendante lorsqu'il n'est pas nécessaire de programmer à nouveau ses applications en cas de changement d'ordinateur.

Il est évident qu'une base de données doit, en outre, satisfaire aux principes de disponibilité (l'aspect "performance" est crucial dans la mise en œuvre d'une base de données) et de sécurité (en cas de panne ou d'accès invalide) sans pour autant porter préjudices aux deux premiers principes.

Une base de données est donc constituée d'un ensemble d'informations qui peuvent être manipulées par plusieurs utilisateurs et qui sont l'objet d'applications définies au sein de programmes. Il est nécessaire de bien différencier la notion de bases de données de celle de banques de données. Une banque de données est un système documentaire permettant d'obtenir une information (une référence bibliographique...) alors qu'une base de données sous entend un type de données factuelles (un nombre, un nom, une date...).

Par exemple, à la question "Quelle est la définition de la zone à *pseudomenardii* ?", une banque de données pourra signaler la référence bibliographique d'une charte biostratigraphique alors qu'une base de données indiquera qu'il s'agit d'une zone définie par l'extension totale de *Planorotalites pseudomenardii.*

II - Les problèmes de l'élaboration d'une base de données

L'élaboration d'une base de données passe par trois stades ou niveaux qui sont (figure 1) :
- le niveau conceptuel,
- le niveau organisationnel,
- le niveau opérationnel.

Ces trois niveaux affectent les données ainsi que leurs traitements .

Niveaux	Traitements	Données	Choix
conceptuel	modèle conceptuel	modèle conceptuel	de gestion
organisationnel	modèle organisationnel	modèle logique	d'organisation
opérationnel	modèle opérationnel	modèle physique	technique

Figure 1 - Les trois niveaux de l'élaboration d'une base de données (d'après Miranda & Busta, 1986).

Le niveau conceptuel consiste à penser la base de données sans envisager aucun concept lié à l'organisation, tant du point de vue des données que de celui des traitements. Il consiste à se poser les deux questions suivantes "Quoi faire ?" (modèle conceptuel des traitements) et "avec quelles données ?" (modèle conceptuel des données). Le modèle conceptuel sert à définir les lois de gestion des données dont on dispose.

Le niveau organisationnel consiste à intégrer à l'analyse qui précède les critères liés à l'organisation. Du point de vue du traitement des données on envisage le partage des tâches entre l'homme et la machine, le temps nécessaire à une application, etc... Du point de vue des données on commence à étudier leur organisation compte tenu du logiciel utilisé mais sans s'occuper des méthodes de stockage et d'accès qui sont l'objet du niveau opérationnel.

En effet, le niveau opérationnel consiste à apporter des solutions aux problèmes techniques de l'élaboration d'une base de données. Du point de vue des données on effectue des choix sur les méthodes de stockages et d'accès. Du point de vue des traitements automatiques on étudie les programmes d'applications (Matheron, 1988).

A - Le modèle conceptuel

Le modèle conceptuel est sensé représenter le plus fidèlement possible un univers concret (l'univers réel). Un bon schéma conceptuel, en plus du fait qu'il doit modéliser aussi fidèlement que possible l'univers réel, se distingue par sa puissance de représentation (en tenant compte des contraintes entre les données), une bonne stabilité et une grande flexibilité (mises-à-jour non contraignantes) tout en restant le plus simple possible afin de faciliter la compréhension et donc l'utilisation de la base de données. Le modèle conceptuel constitue une vue abstraite et unique de la base de données.

Le modèle OLE (Objet-Lien-Entité) est l'un des modèles conceptuels les plus couramment utilisés. C'est ce modèle que j'ai utilisé lors de la conception de ma base de données. Il utilise deux notions intuitives, celles d'objet et de lien. La notion d'entité en dérive.

Un objet est la plus petite abstraction qui a une signification pour l'utilisateur (Miranda & Busta, 1988). Il s'agit des titres des colonnes d'un tableau de données. Les liens sont des associations entre les objets qui traduisent des contraintes de l'univers modélisé. Une entité est un ensemble d'objets unis par des liens inter-objets. Il existe également des liens inter-entités.

Pour concevoir intuitivement ces notions de base du modèle conceptuel OLE, considérons une donnée quelconque, "*Planorotalites pseudomenardii* " (figure 2).

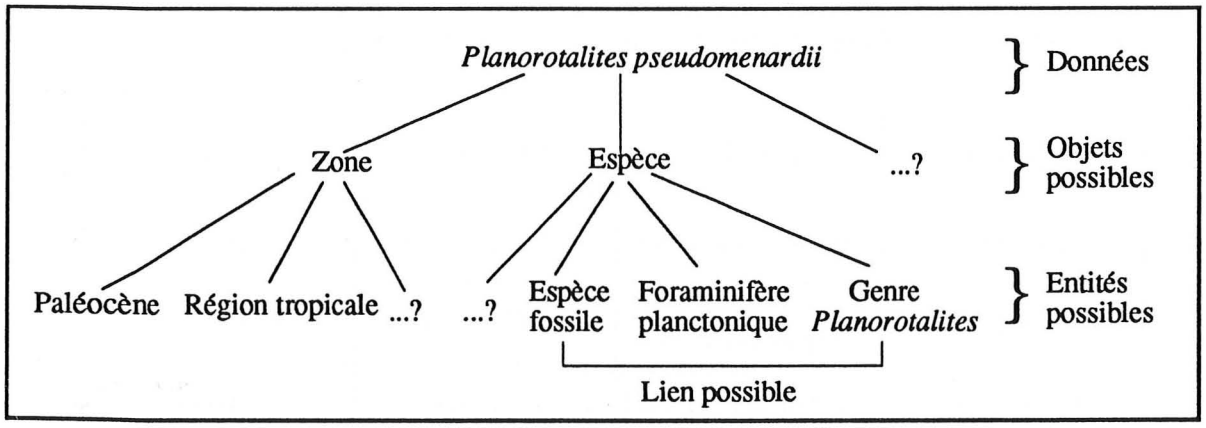


Figure 2 - Descriptif associé à la valeur "*Planorotalites pseudomenardii* ".

Planorotalites pseudomenardii est le nom d'une espèce fossile de foraminifère planctonique du genre *Planorotalites*. C'est aussi le nom d'une zone du Paléocène. Dans le cas où *Planorotalites pseudomenardii* est considérée comme le nom d'une espèce (l'objet est le nom d'espèce), il peut représenter une valeur effective dans plusieurs tableaux (ou entités) possibles, celui renfermant tous les noms d'espèces du genre *Planorotalites* par exemple.

Les deux notions d'entités et d'objets ne suffisent pas. Il faut également, par le biais de liens sémantiques, exprimer les liaisons existant entre et à l'intérieur des entités pour schématiser au mieux la réalité. Un lien inter-entité peut par exemple être défini entre les entités "Genre *Planorotalites*" et "Espèces fossiles" car le genre *Planorotalites* est constitué de plusieurs espèces fossiles.

L'élaboration d'un modèle conceptuel de type OLE est l'étape primordiale dans la conception de toute base de données. Elle est malheureusement le plus souvent empirique tant il est parfois difficile de bien comprendre la réalité.

B - Les modèles organisationnel et opérationnel

Une fois le modèle conceptuel élaboré, des choix d'organisation sont effectués desquels découlent certaines règles fixant les orientations générales des traitements. Ces choix concernent par exemple les tâches que l'on désire effectuer sur les données. De même, un modèle opérationnel devra être établi.

Ces deux modèles se traduisent au niveau des données respectivement par des modèles logiques (qui dépendent des logiciels de gestion de données mis en œuvre) et des modèles physiques (qui dépendent du matériel dont on dispose). Les principaux modèles physiques et logiques seront discutés ultérieurement.

C- L'élaboration d'une base de données par la méthode MERISE

L'une des méthodes d'élaboration de bases de données les plus en vogue actuellement est la méthode MERISE.

MERISE est née en 1978 à la suite d'une vaste consultation lancée en 1977 par le Ministère de l'Industrie pour choisir plusieurs sociétés de services et de conseils en informatique et le Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE) d'Aix-en-Provence afin de mettre au point une méthode de conception et de réalisation de systèmes d'informations (Matheron, 1988).

Plus qu'une méthode, MERISE est avant tout un "état d'esprit" qui demeurera toujours en amont de l'ordinateur. MERISE apporte des solutions à des problèmes conceptuels et organisationnels. Quant aux problèmes opérationnels ils relèvent de l'informatique.

Je n'exposerai ici que les traits fondamentaux de la démarche MERISE car la méthode est d'une grande complexité. Comme je l'ai signalé précédemment, plus qu'une méthode d'analyse MERISE est une méthode de construction de systèmes d'informations en général et de bases de données en particulier. Un aspect important de MERISE consiste à mener de front l'étude des données (modèle conceptuel des données) et celle de leur traitement (modèle conceptuel des traitements), ces deux études s'ignorant l'une l'autre dans un premier temps. Le modèle conceptuel des traitements doit être conçu de telle sorte que l'on puisse y injecter ensuite des choix organisationnels.

L'idéal, dans l'optique de MERISE, serait de faire mener ces deux études par des concepteurs différents. Si la chose n'est pas possible, le concepteur devra veiller, lors de l'étude des données, à ne pas être influencé par celle des traitements et vice versa. Il reste alors à faire coïncider les deux modèles puis à s'occuper du modèle physique des données (leur stockage...).

La difficulté de la démarche MERISE réside surtout dans le fait qu'elle ne peut se dérouler

de façon linéaire mais selon trois axes principaux appelés cycles (figure 3) :
- le cycle d'abstraction,
- le cycle de vie,
- le cycle de décision.

Le cycle d'abstraction correspond à l'élaboration proprement dite des modèles conceptuel, organisationnel et opérationnel.

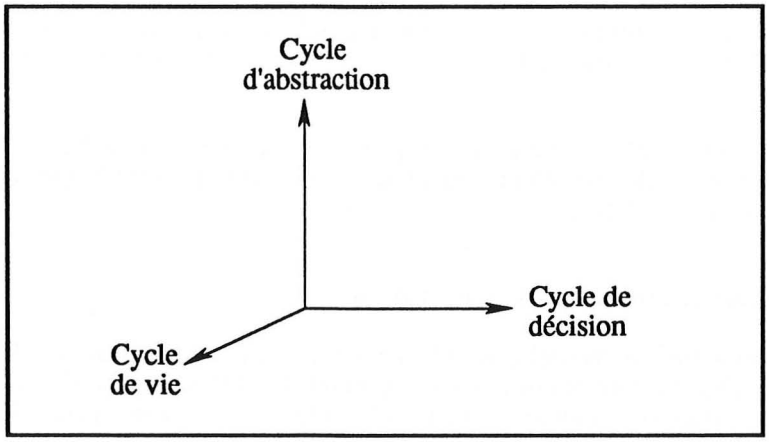


Figure 3 - Les trois cycles de la démarche de MERISE.

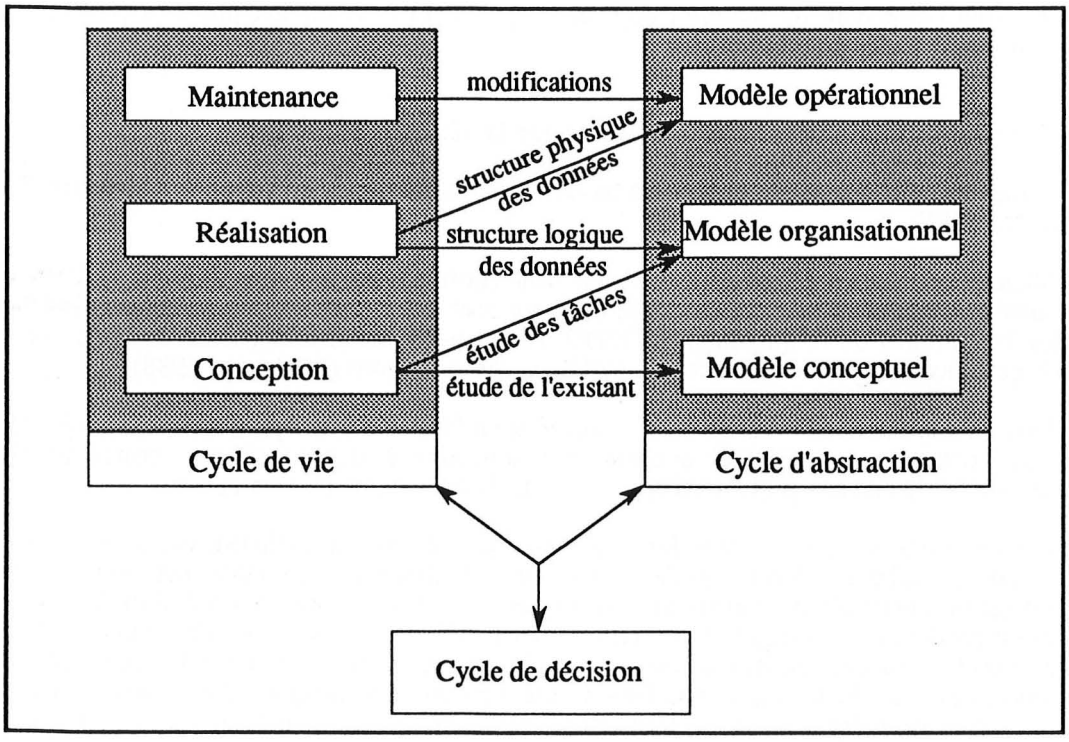


Figure 4 - Schéma des principales étapes de la méthode MERISE.

Le cycle de vie comporte également trois niveaux :
- la conception qui correspond à la période d'étude du réel et du système à mettre en place; elle intervient lors des niveaux conceptuels et organisationnels,
- la réalisation qui recouvre la mise en œuvre et l'exploitation de la base de données; elle

comporte la programmation, l'implantation des fichiers de données, du système de gestion des données et intervient donc lors des niveaux organisationnels et opérationnels,
- la maintenance qui devra permettre à la base de données de s'adapter aux modifications d'environnements et aux nouveaux objectifs.

Le cycle de décision intervient à tout moment de l'étude. Il est influencé par les besoins de l'utilisateur de la base de données.

III - Les principaux modèles logiques de bases de données

Il existe actuellement trois types de modèles logiques de bases de données :
- le modèle hiérarchique de base,
- le modèle en réseau,
- le modèle relationnel.

Le modèle conceptuel est indépendant du choix du logiciel de gestion de fichiers utilisé. Le modèle logique dépend directement du logiciel de gestion dont on dispose car c'est lui qui traduit le modèle d'organisation des données que l'on a choisi.

A - Le modèle hiérarchique de base

Il s'agit de la structure la plus simple et une des plus répandue. Née avec le programme APOLLO d'atterrissage sur la Lune, en 1965, le type hiérarchique a été le premier commercialisé.

La représentation du modèle hiérarchique consiste en un arbre ordonné dont les nœuds sont les entités et les branches les liens établis par le modèle conceptuel. L'arbre généalogique d'un individu est un bon exemple d'arbre ordonné. Pour déduire le modèle hiérarchique d'un modèle conceptuel de type OLE, il suffit de choisir n'importe quelle entité du modèle conceptuel ayant un lien hiérarchique émergeant comme racine de l'arborescence et on s'assure qu'un suivi des liens permet de parcourir toutes les entités de la base de données. Dans un tel modèle, la recherche d'une donnée commence toujours par la racine pour remonter les branches de l'arborescence.

Le modèle hiérarchique présente pour tous avantages une implantation facile et, surtout, une adéquation évidente à tout univers présentant naturellement une structure arborescente, comme en systématique par exemple (figure 5).

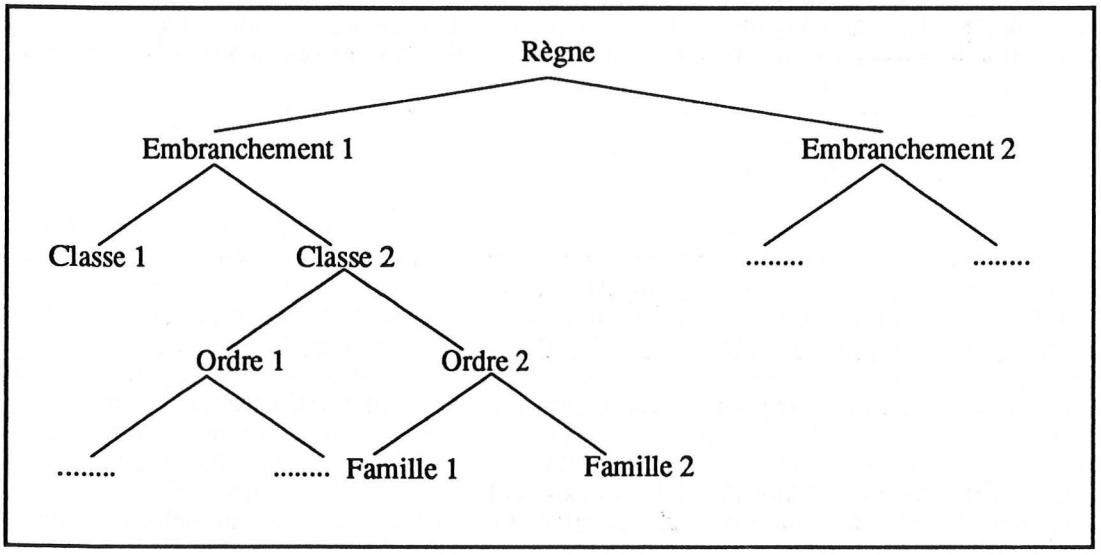


Figure 5 - Exemple de base de données hiérarchique en systématique.

Les inconvénients d'une tel modèle sont nombreux. L'élimination d'une donnée par exemple (un nœud de l'arbre) entraîne l'élimination de tous les nœuds descendants et l'on risque de perdre ainsi des données uniques. Ce problème correspond à l'anomalie de destruction.

Dans le cas de l'exemple de la figure 5, l'insertion d'une nouvelle espèce ne peut se faire que si l'on connait son statut générique. Cela correspond à l'anomalie d'insertion.

B - Le modèle en réseau

Le modèle en réseau est représenté sous forme d'un graphe (ou réseau) qui connecte les entités entre elles à l'aide de pointeurs logiques (Miranda & Busta, 1988). Un pointeur est un emplacement de mémoire ou zone d'un enregistrement destiné à recevoir l'adresse ou l'indicatif d'un autre emplacement de mémoire ou enregistrement qui lui est associé (Politis, 1986).

Le modèle en réseau présente l'avantage de remédier à la plupart des inconvénients du modèle hiérarchique. Il se caractérise en effet par une absence des anomalies pour les opérations de stockage (qui se traduit par un accroissement de la flexibilité) et par une représentation naturelle des liens entre les données.

L'inconvénient majeur du modèle en réseau réside dans la procéduralité (un langage est dit procédural lorsque l'utilisateur doit spécifier les chemins d'accès aux données) importante des langages de manipulation des données (langages de requêtes).

C - Les bases de données relationnelles

Codd, mathématicien du Centre de Recherche IBM à San José (Californie), publie en 1969 un article qui va définir les bases du modèle relationnel (Codd, 1970). Sa conception dépend uniquement des liens inter-objets. Il permet :

- une description simple, sous forme tabulaire (de tableaux), des entités,
- une mise à jour des données sans anomalies de stockage,
- une manipulation non procédurale des données (Miranda & Busta, 1988).

1 - Représentation des données sous forme de tableaux

Codd s'est servi de la notion mathématique de relation pour représenter les données en faisant une totale abstraction de toute technique informatique, de ses exigences et de ses contraintes. Une base de données relationnelle est composée d'un ensemble de relations (ou tableaux de données) liées les unes aux autres par un ou plusieurs domaines, dans lesquels un domaine est le titre d'une colonne (les domaines sont assimilables aux objets du modèle conceptuel de type OLE).

Prenons comme exemple très simple la base de données fictive "MINERAL" composée de trois relations A, B et C (figure 6).

Les relations A et B sont jointes par un domaine unique (aussi appelé une clé primaire), le domaine "NOM" qui regroupe les noms des minéraux. Les relations B et C sont également jointes par un domaine unique (qui est une clé primaire dans la relation C et une clé étrangère dans la relation B). Bien que les données soient réparties sur plusieurs tableaux, il est possible d'accéder à n'importe quelle information de la base de données à partir du nom d'un minéral. Cette façon naturelle de représenter les données possède des avantages conséquents dont le principal est la simplicité offerte à l'utilisateur pour décrire ou manipuler les données. En effet, ces dernières sont stockées sous forme tabulaire sans aucune référence à l'implantation ou aux méthodes d'accès. Il existe une indépendance totale entre le niveau logique des données et des tables manipulées par l'utilisateur et le niveau physique des données enregistrées dans les mémoires de l'ordinateur avec leurs chemins d'accès. Une base de données relationnelle peut ainsi être manipulée par des non informaticiens.

Le modèle relationnel semble particulièrement approprié à un univers dynamique en proie à une perpétuelle évolution et dont l'utilisation est mal connue à priori.

Le principal inconvénient du modèle relationnel réside dans le fait qu'il existe actuellement encore peu de systèmes de gestion de bases de données relationnelles commercialisées (Oracle, INGRES...).

RELATION A

NOM	COM	SYS	ALL	SOP
enstatite	SiO_3 Mg	orthorh.	+	+
wollastonite	SiO_3 Ca	triclin.		-
anthophyllite	$Si_8O_{22}(OH)_2Mg_7$	monoclin.	+	-
jadéite	Si_2O_6 Na Al	monoclin.	+	+

RELATION C

FAM	CLI
pyroxène	87
amphibole	55

RELATION B

NOM	FAM	COU
enstatite	pyroxène	incolore
wollastonite	pyroxène	incolore
anthophyllite	amphibole	incolore
jadéite	pyroxène	incolore

NOM : Nom du minéral
COM : Composition chimique
SYS : Système cristallin
ALL : Allotropie
SOP : Signe optique
FAM : Famille minéralogique
COU : Couleur du minéral
CLI : Clivage

Figure 6 - Visualisation de la base de données "MINERAL".

2 - La manipulation des données dans le modèle relationnel

a - La mise à jour des données

La suppression ou l'ajout (qui correspondent aux opérations de mise à jour) de données ne modifie en rien la structure et l'intégrité de la base de données dans le modèle relationnel. Ces opérations sont d'une grande simplicité. Il suffit d'effectuer les modifications dans la relation que l'on désire sans tenir compte des autres sauf si elles concernent la valeur d'une clé dans une autre relation. Par exemple, dans le cas de notre base de données "MINERAL" (figure 6), supposons que les angles de clivages ne soient plus exprimés en degrés mais en radians. Il suffira de changer les valeurs de la relation C concernant les clivages des pyroxènes et des amphiboles. Par le biais des liens entre les relations, ces modifications s'appliqueront à l'enstatite, à la wollastonite, à la jadéite

(qui sont des pyroxènes) ainsi qu'à l'anthophyllite (qui est une amphibole) sans jamais toucher aux relations A et B (Roubault, 1982).

b - La recherche des données

Comme je l'ai signalé précédemment, contrairement aux modèles hiérarchiques ou en réseau, l'utilisateur n'a pas à spécifier les chemins d'accès aux données puisqu'ils sont à la charge des systèmes dans le modèle relationnel. L'utilisateur indique uniquement le résultat qui l'intéresse et laisse le soin au système d'écrire la meilleure procédure d'accès vers les données et de naviguer automatiquement dans la structure d'accès sous-jacente au schéma relationnel (Miranda & Busta, 1988).

Tous les langages de requêtes sont dits fermés dans le modèle relationnel, c'est-à-dire que toute manipulation de relation par le langage de requête génère une relation qui peut être manipulée à son tour.

IV - Les principaux modèles physiques de données

Une base de données est toujours stockée sur des supports physiques à accès direct. Les données, sur ce type de support, sont stockées sur les pistes concentriques d'un disque. On appelle cylindres les ensembles de pistes verticalement alignées et volume l'unité physique de mémoire contenant les différents cylindres; il s'agit du disque dur des ordinateurs.

Les quatres principaux modèles physiques d'organisation d'un fichier correspondent à :
- l'organisation séquentielle (simple ou indexée),
- l'organisation à accès direct,
- l'organisation par liste de pointeurs,
- l'organisation à structure arborescente.

Je ne présenterai que le modèle d'organisation séquentielle car c'est le seul à avoir été mis en œuvre dans notre cas.

A - La méthode d'accès séquentiel simple

Dans une organisation séquentielle simple, l'ordre logique des enregistrements correspond à l'ordre physique de stockage sur les supports.

L'avantage principal d'une telle organisation réside dans son adéquation à toute recherche séquentielle. La recherche d'un enregistrement stocké dans un fichier à organisation séquentielle s'effectue par balayage de tous ses prédécesseurs.

Le principal inconvénient d'un tel modèle est le temps d'accès considérable à une donnée dans un fichier de taille importante. Ce problème est fortement atténué dans la méthode d'accès séquentiel indexé.

B - La méthode d'accès séquentiel indexé

Par cette méthode, l'utilisateur accède à une donnée par la valeur de son index. Seuls les index sont lus lors d'une recherche. L'index fournit en fait l'adresse de la donnée recherchée.

Cette méthode, somme toute séquentielle (la lecture des index est en effet séquentielle), présente l'avantage d'être beaucoup plus rapide que la méthode d'accès séquentielle simple. La lecture ne concerne que les index et non plus tout le tableau de données.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la déperdition de stockage engendrée par la

création des index. Comme presque toujours en informatique les gains de temps ne sont pas gratuits.

V - Cas des systèmes de gestions de bases de données

L'ensemble des programmes qui permettent la création, l'exploitation et la modification d'une base de données forme un Système de Gestion de Bases de Données (SGBD).

Il existe plusieurs modèles logiques d'organisation des données et, par conséquent, plusieurs modèles de SGBD. L'architecture d'un SGBD suit la norme américaine ANSI-SPARC. En effet, dans le cadre du groupe de normalisation nord-américain (ANSI), un comité a été créé en 1969, le Standard Planning And Requiement Committee (SPARC) pour étudier l'impact des SGBD dans les systèmes d'informations.

A - Remarques sur les modèles hiérarchiques et en réseau

Certains systèmes, en dépit de ce qui a été dit précédemment sur le modèle hiérarchique, ont l'avantage de résoudre les anomalies de stockage (redondance des données, modifications contraignantes...) et permettent de manipuler les données à l'aide d'un langage non procédural. Par exemple, S2000 est un système offrant un langage de requête permettant d'éviter le parcours arborescent pour l'utilisateur.

En ce qui concerne le modèle en réseau, de nombreux SGBD actuellement commercialisés l'ont intégrés. C'est le cas par exemple de IDMS (Integrated Data Management System) sur matériel IBM 370. Pour IDS-II la description du langage logique de manipulation des données est proche du langage de programmation COBOL (surtout utilisé dans les programmes de gestion). La description des enregistrements, des chemins d'accès... sont nécessairement intégrés dans un programme COBOL. Pour entrer un enregistrement, l'utilisateur doit obligatoirement connaître le moyen d'accéder à l'occurrence de la donnée.

Dans une base de données en réseau, à la différence d'une base de données hiérarchique, il n'existe pas un seul chemin entre deux occurrences d'enregistrements mais plusieurs. Il est donc nécessaire de repérer les enregistrements par un indicateur de positionnement (Currency Indicator) qui est en fait un pointeur.

B - Les systèmes de gestion de bases de données relationnelles (SGBDR)

Dans les SGBD implantant le modèle relationnel, les trois niveaux fonctionnels décrits au début de ce chapitre sont clairement dissociés. Ce type de SGBD, en pleine expansion actuellement, permet en outre d'envisager la gestion de bases de données intégrant de nouveaux types de données (textes, images, sons...).

Il existe deux types de SGBDR correspondant à deux générations de systèmes de gestion.

1 - SGBDR de première génération

Les SGBDR de première génération (figure 7) correspondent à l'approche descendante de développement qui consiste à concevoir le SGBD comme une interface relationnelle construite sur le système de gestion de fichiers (SGF). A un fichier du SGF peut correspondre une relation ou un domaine de la base de données ou les deux.

Les inconvénients d'un tel SGBDR résident dans le fait que la manipulation des données est très limitée. Une relation est décrite au travers du SGF ce qui restreint fortement l'indépendance physique des données.

En fait, ici, il existe une grande dépendance entre les programmes d'application et les données physiques. Toute modification des données entraîne un important effort de reprogrammation : l'utilisateur est prisonnier des structures physiques du SGF. De plus, l'accès aux données est rendu malaisé par l'ouverture successive de nombreux fichiers. Ce type de SGBDR possède cependant des avantages indiscutables, comme la possibilité de manipuler des fichiers avec des opérateurs relationnels en utilisant des moyens de programmation classiques (Miranda & Busta, 1986).

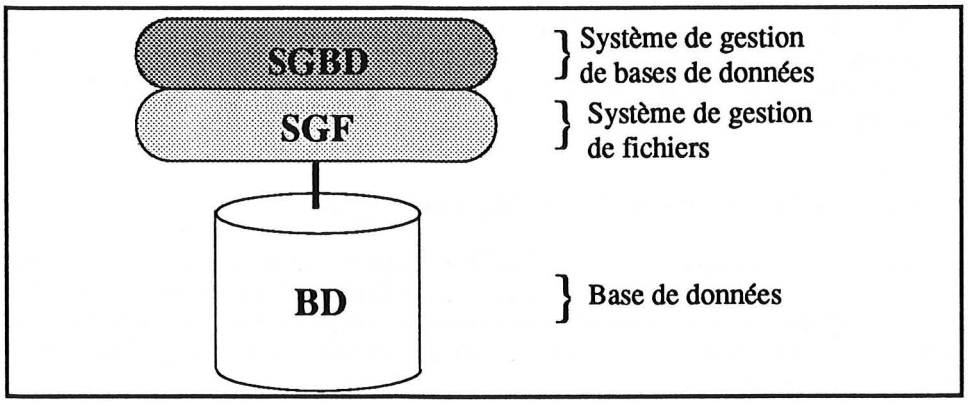


Figure 7 - Approche descendante de développement pour les SGBDR de première génération.

2 - SGBDR de deuxième génération

Ici, une distinction claire a été introduite entre niveaux logique (d'organisation des données) et physique (d'implantation des données). Très utilisés sur mini-ordinateurs, ces SGBDR (ORACLE, INGRES...) sont de plus en plus implantés sur micro-ordinateurs. De tels SGBDR possèdent leur propre système de gestion de l'organisation physique des données (figure 8), le système de gestion de pages (SGP). Ces SGBDR sont indépendants des systèmes de gestion des fichiers et sont, de ce fait, d'une grande portabilité. La portabilité est l'aptitude pour des fichiers, des logiciels... à s'adapter à diverses machines.

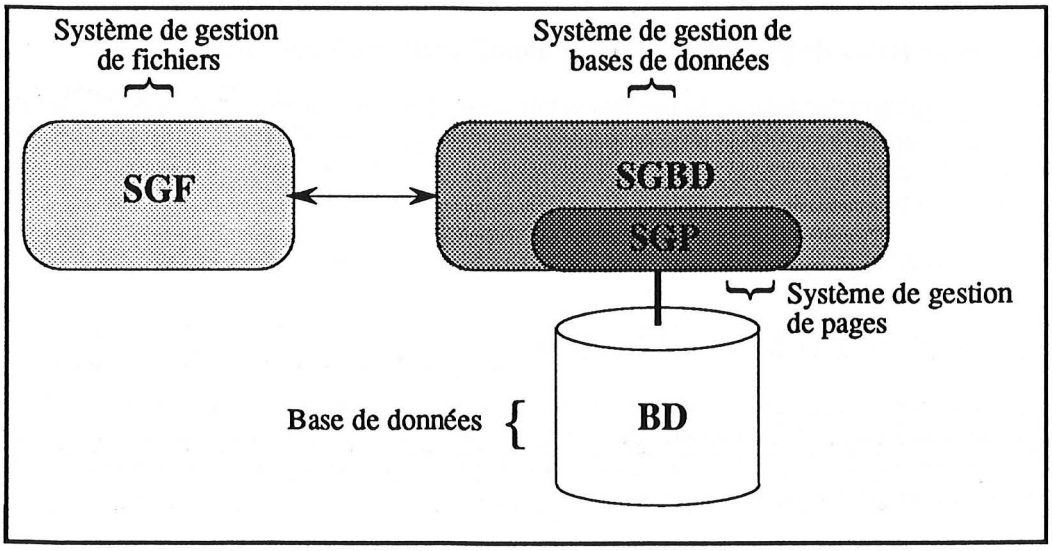


Figure 8 - Approche ascendante de développement pour les SGBDR de deuxième génération.

3 - Un exemple de SGBDR : INGRES version 5.0

a - Présentation - Les modules de INGRES

INGRES (INteractive Graphics and REtrieval System) est un gestionnaire de bases de données relationnelles développé par Relational Technology. Il est très utilisé sur les moyens et gros systèmes informatiques. Il est cependant de plus en plus utilisé dans un environnement micro-ordinateur de type PC.

Les principales caractéristiques de INGRES sont les suivantes :
- il s'agit d'un produit d'une grande convivialité grâce à l'interface utilisateur construite autour de menus,
- il offre la possibilité de connexions vers d'autres ordinateurs,
- dans un environnement réseau, INGRES supporte les fonctions de transaction, sécurité et intégrité,
- le logiciel est aisé à installer.

Pour lancer INGRES, il suffit d'exécuter la commande suivante :

rtingres *nom de la base de données*

Le menu principal de INGRES apparaît alors à l'écran. Un écran INGRES est toujours divisé en deux parties : un menu et une fenêtre. Le menu est situé en haut de l'écran et l'utilisateur introduit ses données dans la fenêtre. Le menu sert également à la communication avec l'utilisateur.

Le premier écran de INGRES présente les différents modules disponibles dans le logiciel. Il s'agit des modules QUERY, QBF (Query-By-Forms), REPORT, RBF (Reports-By-Forms), ABF (Applications-By-Forms), TABLES, VIFRED (VIsual FoRms EDitor), QUEL, et SQL.

L'utilisateur non informaticien recourt avant tout aux modules TABLES et QBF qui ne nécessitent aucun effort de programmation, alors que le concepteur d'utilisations est davantage tenté par les fonctions VIFRED, REPORT, ABF et SQL (ou QUEL).

Tous ces modules peuvent être activés soit à partir de INGRES soit directement depuis le système d'exploitation. Il existe trois manières de sélectionner une option dans un écran :
- en amenant le curseur (avec les touches de direction) sur l'option choisie et en tapant sur la touche F5 (pour lancer l'option),
- en amenant le curseur sur l'option choisie, en entrant dans la fenêtre avec la touche F2, puis en tapant sur la touche F5 (pour lancer l'option),
- en amenant le curseur dans la fenêtre puis en tapant la première lettre correspondant à l'option choisie.

Dans INGRES, les touches de fonction possèdent un effet bien précis et ce quel que soit le menu actif. Nous allons maintenant décrire succinctement les principaux modules de INGRES.

Le module TABLES est destiné aux non informaticiens. Il permet de créer des tableaux, d'examiner les renseignements concernant un tableau et d'effectuer des recherches au sein d'une relation.

Il est également possible d'ajouter, de supprimer ou de modifier des données grâce aux commandes Append (pour ajouter), Delete (pour supprimer) et Update (pour modifier) du module QBF. Ces opérations s'effectuent très simplement et ne demandent pas à l'utilisateur un effort de programmation.

Le module VIFRED permet de construire des formes (un ensemble de tableaux de données avec des menus et des messages ajoutés par l'utilisateur et une fenêtre dans laquelle on spécifie les options choisies) sophistiquées et utilisables par des non spécialistes (figure 9).

La compréhension de la notion de formes est fondamentale pour la réalisation d'une application : toutes les applications ou extractions de la base de données du D.S.D.P. en tiennent compte. Avec VIFRED, on peut :

- supprimer l'affichage de certaines colonnes,
- afficher des messages à l'utilisateur,
- spécifier l'ordre dans lequel les différentes zones (colonnes, lignes...) d'une forme seront parcourues par le curseur,
- définir des contraintes de validation sur les valeurs introduites (si l'on ne désire que des nombres entiers supérieurs à 100 par exemple...),
- spécifier qu'une zone est obligatoire (il est nécessaire d'y introduire une valeur),
- afficher dans une zone le résultat de calculs effectués sur d'autres zones.

Le module QUEL (QUEry Language) est au même titre que SQL (Structured Query Language), un langage de requête de bases de données. Nous n'utiliserons, pour ce qui nous concerne, que SQL. Le choix de l'un des deux langages de requêtes s'effectue lors de l'implantation du logiciel. Notre choix s'est effectué aux vues de l'engouement suscité pour l'utilisation de SQL (au détriment de QUEL) qui tend à faire penser que SQL sera (s'il n'est déjà) le standard des langages de requêtes de bases de données relationnelles.

RENSEIGNEMENTS SUR LE LEG SELECTIONNE. } *Commentaires*

renseignements sur le leg : 12

numero du site	code forage	latitude	longitude	ocean	hémisphere	mer
111		50.426	-46.368	ATL	N	
111	A	50.426	-46.368	ATL	N	
112		50.017	-46.604	ATL	N	
112	A	50.017	-46.604	ATL	N	
113		56.790	-48.332	ATL	N	
114		59.933	-26.800	ATL	N	
115		58.907	-21.117	ATL	N	
116		57.496	-15.924	ATL	N	
116	A	57.496	-15.924	ATL	N	

} *Tableau de données*

BAS (L2) **HAUT (L3)** **RETOUR (L4) :** [ ] } *Fenêtre où l'on spécifie une option du menu*

Menu

Figure 9 - Exemple d'une forme obtenue avec le module VIFRED de INGRES.

b - Notions de langages de requêtes - SQL

Comme cela a été précisé précédemment, un SGBD comporte trois niveaux d'abstraction. Cette distinction entre niveaux a des répercussions lors de l'implémentation d'un langage voué à la gestion des bases de données (Pasleau, 1988). Parallèlement aux recherches techniques, des études linguistiques ont permis d'améliorer les différents langages d'un point de vue syntaxique.

Certains langages possèdent la propriété d'être non procéduraux : ils établissent simplement ce que le résultat de la question doit être sans spécifier les modalités d'obtention de ce résultat. A l'expérience, un tel langage s'avère plus puissant qu'un langage procédural (qui décrit toutes les étapes nécessaires pour atteindre le but désiré). L'utilisateur peut être non programmeur : il indique uniquement le résultat qui l'intéresse (le QUOI) et le système détermine la meilleure procédure d'accès aux données (le COMMENT). La complexité d'interrogation s'est déplacée de l'utilisateur final vers le système : c'est une tendance générale en informatique depuis ses débuts. L'ère du non informaticien qui définit et manipule une base de données débute avec la mise en œuvre d'un véritable SGBD relationnel.

En 1975, les chercheurs d'IBM présentent un tel langage, SQUARE, fondé sur un modèle relationnel. Le langage SQUARE présente cependant un défaut majeur, sa syntaxe, fort proche de celle pratiquée dans les notations mathématiques. L'évolution nécessaire de SQUARE a donné naissance à SEQUEL (Structured English as a Query Langage) ou, plus simplement, SQL. Ce langage, basé sur un ensemble de mots clés, est destiné aussi bien aux non spécialistes qu'aux programmeurs professionnels. Le développement de SQL a rendu possible son utilisation à partir de langages de programmations de haut niveau tels que PL/1, C, PASCAL. L'évolution finale de SQL a en fait abouti à l'élaboration d'un nouveau langage, toujours appelé SQL, qui est devenu davantage qu'un instrument d'interrogation. Il s'agit en définitive de trois langages de définition des données, de définition de vues et de manipulation de données qui fournissent un outil essentiel à la création et à la gestion des SGBD. Ces multiples raisons font de SQL le standard dans le domaine des bases de données relationnelles. SQL est un langage de requête de bases de données relationnelles non procédural de type L4G (langage de quatrième génération).

Nous utiliserons essentiellement ESQL (Embedded SQL) qui est une version de SQL directement incorporable dans un langage de programmation (ici le langage C). Il est ainsi possible de développer des applications d'une très grande interactivité basée sur l'utilisation de tableaux et de menus. La création de tableaux de données permet de concevoir des applications pour lesquelles, par la suite, l'accès à la base de données n'est pas nécessaire. L'accès à la base de données par le biais d'ESQL permet la manipulation des données, c'est-à-dire :

- de manipuler la structure des données; il est possible de créer, détruire ou modifier activement les relations de la base de données,
- de manipuler les données; les commandes SELECT, INSERT, UPDATE et DELETE peuvent être utilisées pour respectivement retirer, insérer, mettre à jour ou supprimer des données.

Pour illustrer cette dernière remarque, considérons la base de données imaginaire de la figure 6 (base de données "MINERAL"). Les ordres SQL permettant de trouver les noms de minéraux (NOM) dont le signe optique (SOP) est négatif et qui font partie de la famille (FAM) des pyroxènes seront les suivant :

```
SELECT DISTINCT premier.NOM
FROM A premier,  B deuxième
WHERE (premier.NOM  = deuxième.NOM
            and premier.SOP=' + '
            and deuxième.FAM = ' pyroxène ');
```

Les instructions "premier" et "deuxième" sont respectivement affectées aux relations A et B. Elles permettent de définir à quelles relations appartiennent les variables utilisées (ainsi la variable SOP appartient à la relation A car "premier" est affecté à la relation A). Dans le cas de ESQL ces

ordres seraient identiques, à la différence qu'ils seraient intégrés dans un programme C.

Cette requête pourrait se traduire en langage courant par : "on effectue la recherche dans les relations A et B; on sélectionne les noms de minéraux dans le tableau A dont le signe optique est positif; on recherche ensuite dans la relation B les noms de minéraux répondant à cette requête; parmi ces noms, on recherche toujours dans la relation B ceux appartenant à la famille des pyroxènes".

Ces ordres SQL sont intéressants à deux titres en ce sens qu'ils illustrent une commande fondamentale de SQL (la commande SELECT qui permet de sélectionner des données de la base selon certaines conditions) et qu'ils démontrent la possibilité d'effectuer une recherche à travers plusieurs relations (ici deux car la variable NOM est commune aux deux relations A et B). Ceci illustre toute la puissance des bases de données relationnelles et de leur langage de requête SQL.

ESQL donne l'accès à SQL/FORMS qui est un outil pour créer des applications basées sur des formes (ces formes sont créées au préalable avec le module VIFRED). Les fonctions SQL/FORMS permettent :

- d'afficher et de naviguer à travers les formes,
- de transférer des données à l'intérieur ou en dehors de formes (on peut également effectuer des transferts de la base vers des formes et inversement),
- d'effectuer des opérations sur les formes par l'intermédiaire de menus,
- de valider des données dans les formes et d'afficher des messages d'erreur ou d'aide.

Le préprocesseur ESQL convertit les commandes SQL en un langage source compréhensible par le compilateur C. Cependant certaines versions de INGRES utilisent un préprocesseur FORTRAN. Les commandes du langage de programmation proprement dit ne sont pas affectées par le préprocesseur.

c - Elaboration d'une application avec INGRES (ABF)

ABF est le module de INGRES qui permet de construire des applications. Une application ABF utilise les notions classiques de menu et de forme pour accéder à une base de données afin d'effectuer des opérations de recherche ou de mise à jour. En recourant à ABF, l'utilisateur peut définir, tester et exécuter des applications sans faire usage d'un langage de programmation.

ABF sert de guide tout au long du développement d'une application. Autant dire qu'en ce qui nous concerne il s'agit du module de INGRES le plus souvent utilisé (avec VIFRED). En fait, lorsque l'utilisateur crée les différentes composantes de l'application, il mobilise les différents modules spécifiques de INGRES. Par exemple, lorsqu'il choisit l'option VIFRED dans le menu d'ABF, il dispose automatiquement de toutes les possibilités de VIFRED pour définir une forme. Lorsque la forme est créée, VIFRED retourne au menu d'ABF. ABF permet notamment :

- de construire l'application,
- de définir les procédures de l'application (c'est-à-dire les programmes nécessaires à sa mise en oeuvre),
- de tester l'application aux différentes étapes de sa réalisation,
- de créer une image de l'application (c'est-à-dire un programme exécutable) lorsqu'elle est parfaitement au point,
- d'exécuter l'image à partir du système d'exploitation (Pasleau, 1988).

Avant d'entreprendre la construction d'une application au moyen du module ABF, il faut se définir au préalable le but poursuivi par cette application. En utilisant les commandes disponibles à partir d'ABF, voici la marche à suivre pour créer une application :

- définir le nom de l'application,
- créer l'application,
- construire les relations nécessaires,
- développer les formes (à partir de VIFRED),
- développer les procédures (à partir d'ESQL).

Dans le contexte du développement d'applications, ABF offre beaucoup d'avantages :
- un environnement de test dynamique,
- la possibilité de recourir à n'importe quel autre module de INGRES,
- la possibilité d'utiliser un langage de type L4G (SQL en ce qui nous concerne),
- l'économie de lignes de code par rapport à la programmation classique.

Avec ABF, l'utilisateur accède directement à son éditeur (celui défini au moment de l'installation de INGRES c'est-à-dire Vi pour nous) et à VIFRED lorsqu'on crée les éléments de l'application. Ensuite ABF gère tous les fichiers nécessaires à l'application créée.

CHAPITRE 2 - La base de données du D.S.D.P.

I - La base de données du D.S.D.P.

A - Historique des forages en mer du D.S.D.P.

Le Deep Sea Drilling Project (D.S.D.P.), vaste projet de forages profonds en mer, est le fruit d'une coopération de grande ampleur de la communauté scientifique internationale, qui a durée de 1968 à 1984. Il persiste actuellement au travers de l'Ocean Drilling Program (O.D.P.). Le projet D.S.D.P. a mis en œuvre durant près de deux décennies un navire océanographique de forage, le Glomar Challenger (aujourd'hui le Joides Resolution pour le programme O.D.P.) qui, au cours de près d'une centaine de croisières (les Legs 1 à 96), a effectué des forages en 624 sites se répartissant sur l'ensemble des mers du globe. Chaque site proprement dit pouvant être l'objet de plusieurs forages, le nombre de forages total réalisés durant le projet D.S.D.P. est donc nettement supérieur à 624.

B - La base de données du D.S.D.P. sur CD-ROM - Structure des données

Les nombreuses missions du Glomar Challenger ont livré aux scientifiques une multitude de données couvrant des domaines aussi divers que la géophysique, la sédimentologie, la géochimie ou la paléontologie.

Ces données sont inventoriées dans des ouvrages imposants édités à la fin de chaque mission, appelés les Rapports Initiaux du D.S.D.P. (Initial Reports of the D.S.D.P.) ou, plus communément les "blue books". Cette façon de stocker les données, pour être complète et exhaustive, empêche tout traitement informatique ou, autrement dit, une exploitation intensive et rapide des résultats dont nous disposons. On peut constater que, sous cette forme de stockage, les données du D.S.D.P. sont peu utilisées ou, en tout cas, sous exploitées. En effet, toute recherche dans les "Blue Books" est fastidieuse et la cause de pertes de temps considérables. C'est pourquoi, du temps même du projet D.S.D.P., des responsables du N.G.D.C. (National Geophysic Data Center) de Boulder (Colorado), animés par la volonté de rendre les données du D.S.D.P. largement utilisables par tous, se sont chargés d'archiver la plus grande partie de ces données dans des fichiers utilisables par des programmes informatiques. Ces données sont directement tirées des rapports initiaux du D.S.D.P..

Pour chaque fichier de données des formats standards ont été créés ainsi qu'une documentation générale et des renseignements relatifs aux codes utilisés. En 1987, une version définitive de ces fichiers était enfin disponible pour le grand public. C'est justement à cette époque que l'on envisage pour la première fois de transférer ces données sur des disques optiques numériques (DON) de type CD-ROM (Compact Disc-Read Only Memory). On commence enfin en 1988 la production de ces DON ainsi que l'élaboration des programmes permettant l'extraction des données.

En plus des avantages propres aux DON (que je décrirai par la suite), les données actuellement disponibles ont la mérite d'être corrigées. Les corrections affectent surtout l'orthographe. Certaines informations ont aussi été ajoutées.

J'ai débuté ce travail avec des données tirées des bandes magnétiques. Celles ci m'ont été fournies par le Bureau National des Données Océaniques (B.N.D.O.) du Centre Océanologique de Bretagne (C.O.B.) de Brest. La base de données que j'utilise actuellement renferme les nouvelles données, celles des DON.

Avant de poursuivre plus loin l'étude des données du D.S.D.P., j'exposerai maintenant les principes fondamentaux des DON.

1 - Notions de disques optiques numériques

a - Les différentes technologies

Les DON, nouveaux nés dans la grande famille des supports de stockages, sont sans doute voués à un avenir prometteur (figure 10). Leur capacité de stockage est telle que l'on peut s'attendre à un remplacement progressif des mémoires de masse classiques (disques durs...) par les DON. En fait, ces deux façons de stocker les données ne sont pas incompatibles et peuvent opérer sur une même station de travail. Un ordinateur pourra par exemple être connecté à un lecteur de DON (alors considéré comme un simple périphérique au même titre qu'une imprimante) pour l'archivage d'une base de données et à un disque dur classique qui regroupera les logiciels et les applications nécessaires à la gestion de cette base de données. Si les DON ne se substituent pas toujours aux disques durs des ordinateurs ils en sont parfois les obligatoires compléments.

	1988	1989	1991	1993
REINSCRIPTIBLE	2	18	240	1519
WORM	16	40	185	601
CD-ROM	75	160	555	1774

Figure 10 - Estimation des ventes de DON dans le monde (en milliers d'unités).

Le principe de fonctionnement des DON est d'une extrême simplicité (figure 11). Il se résume au balayage d'un support (le disque) par un faisceau laser. Le signal transmis est perçu par un capteur optique.

Quant au support, il est constitué d'une couche centrale isolante composée d'air entourée par un substrat et une couche plastique protectrice (la couche la plus externe). C'est le substrat qui renferme les informations stockées sous forme de creux et de bosses (codage binaire sous forme de 1 et de 0). Le tout donne un disque d'une taille réduite (environ dix centimètres)

Il existe trois types de DON qui se distinguent par la possibilité ou non de modifier les données qu'ils contiennent. Il s'agit :

- du CD-ROM,
- du DON-WORM (Disque Optique Numérique-Write Once Read Many),
- du DON-WMRA (Disque Optique Numérique-Write Many Read Always) ou disque réinscriptible.

L'objectif du CD-ROM est d'archiver de manière fiable divers types d'informations. La sécurité du CD-ROM réside dans le fait que l'on ne peut ni modifier ni détruire les données. Lorsque les données (les 0 ou les 1) sont inscrites sur le substrat du disque, il n'est plus possible de les modifier. Le CD-ROM repose sur une technologie de lecture simple. Lorsque la saisie des données est réalisée et une fois la matrice achevée, une production en grande quantité et à faible prix peut être envisagée. Le CD-ROM (comme tous les DON d'ailleurs) possède une capacité exceptionnelle de stockage (au delà de 600 Mo) qui lui permet de recevoir des informations exigeant une quantité importante de mémoire, comme des images numérisées, des schémas industriels, des catalogues ou des encyclopédies.

Le DON-WORM est un pur produit de la technologie optique. Sur une surface thermo-sensible qui recouvre le disque et qui est protégée par du verre, l'inscription des données s'effectuera par un balayage du faisceau laser. L'inscription et la lecture sont simultanées. L'information lue par le capteur optique sera interprétée comme une information binaire. Le lecteur peut ainsi vérifier la validité de l'information transcrite. En phase d'écriture, le laser émet un faisceau lumineux d'une puissance de dix milliwatts pendant 80 nannosecondes, temps suffisant pour conduire la couche thermo-sensible à son point de fusion et pratiquer un trou : l'altération du support est alors définitive. La lecture, elle, s'effectue avec le même laser, mais celui-ci émet une puissance plus faible, inférieure à un milliwatt. Le DON-WORM permet donc l'enregistrement d'informations sans possibilité de les détruire. Toute destruction accidentelle est désormais impossible. La capacité d'un DON-WORM va de quelques centaines de Méga-octets à 224 Giga-octets (Go). La longévité d'un DON-WORM est estimée à plusieurs décennies c'est-à-dire beaucoup plus que n'importe quel autre support de stockage (un an pour une disquette, trois ans pour une bande magnétique...).

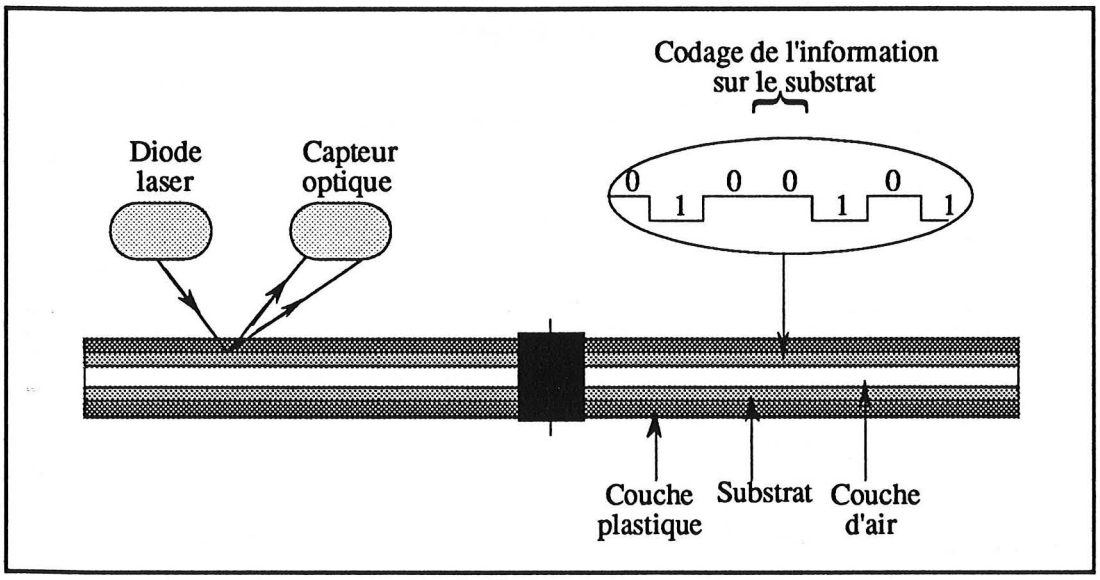


Figure 11 - Principe de fonctionnement du DON.

La technologie du DON réinscriptible ou WMRA est évidemment plus sophistiquée. Elle fait appel à la structure moléculaire du substrat du disque. La combinaison laser plus flux magnétique modifie de façon réversible cette structure moléculaire ce qui se traduit par une modification des données inscrites sur le disque. On peut ainsi effectuer autant d'inscriptions ou de modifications des données sur le disque optique qu'on le désire.

b - Avantages et inconvénients des DON

Les avantages du DON sont multiples. Nous n'en citerons que les principaux (figure 12) :

- la sécurité et la longévité qui résultent du principe même du DON,
- la capacité de stockage; le DON apporte, sous un faible volume, une grande capacité de stockage,
- l'accès direct; un DON se comporte comme un disque dur classique,
- la portabilité; l'interface sur le DON est standard; de nombreux environnements lui sont donc ouverts (DOS, SYSTEM MAC, UNIX...).

Le seul inconvénient majeur du DON réside dans la lenteur des temps d'accès aux données (figure 12). Ceux-ci peuvent être 20 fois supérieurs aux temps d'accès à un disque dur classique.

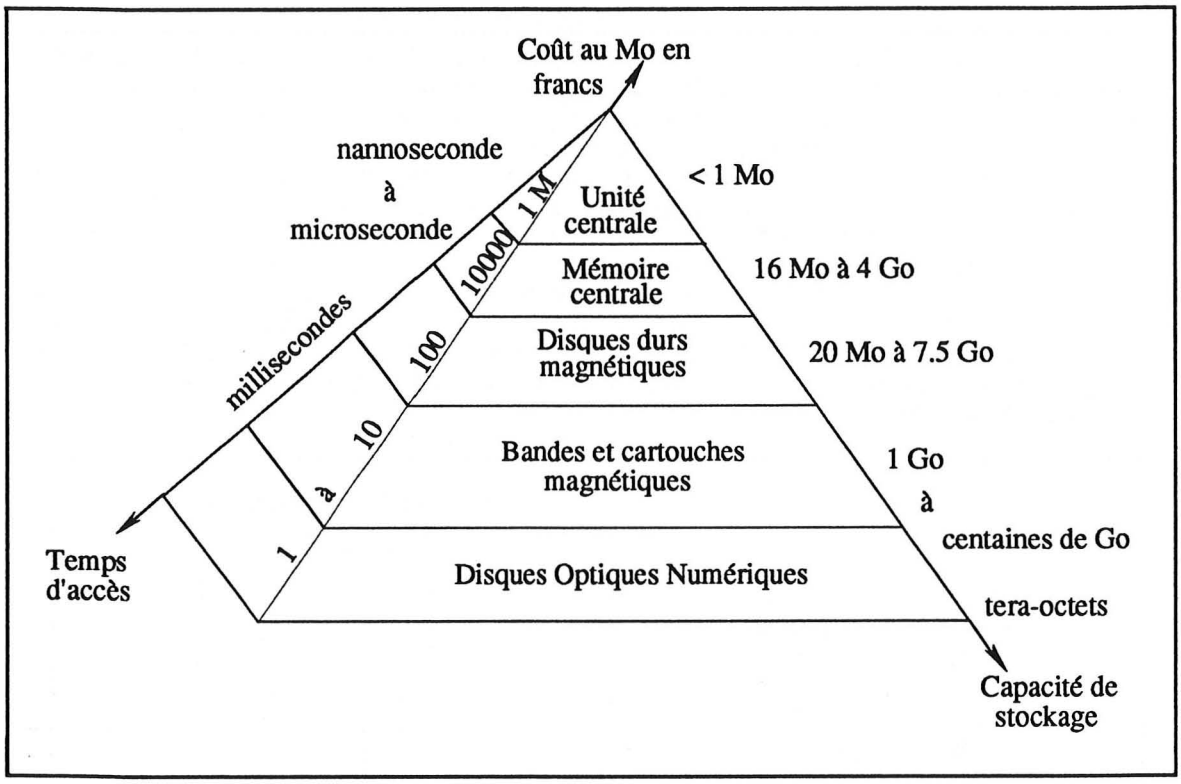


Figure 12 - Comparaison entre divers types de supports de stockages.

2 - Les disques du D.S.D.P.

a - Généralités

Pour la première fois les données du D.S.D.P. collectées entre 1968 et 1984 sont donc disponibles sur CD-ROM. Il est désormais possible de les consulter ou même de les extraire. Les avantages de ce nouveau procédé sont conséquents. Auparavant, la consultation des données sur bandes magnétiques imposait des manipulations longues et des programmes fastidieux. La base de données du D.S.D.P. est dorénavant facilement consultable grâce à l'emploi de programmes d'extractions accompagnant les DON. Il est à prévoir que la diffusion de ces disques va susciter un regain d'intérêt au sein de la communauté scientifique internationale pour la base de données du D.S.D.P..

b - Contenu des DON du D.S.D.P.

Tous les fichiers de la base de données sont sous forme ASCII (American Standard Code for Information Interchange). Cette forme est largement utilisée comme code de caractères en transmission de données et comme code interne par certains ordinateurs. Cela signifie que ces fichiers sont "directement lisibles" à partir d'un éditeur de texte par exemple.

- le premier disque

Le premier DON ou volume I contenant la base de données du D.S.D.P. (aussi appelé "Sediment/Hardrock & Reference Files") contient, en plus des fichiers de données, une documentation relative aux données elles-mêmes, leurs formats et les références bibliographiques correspondantes. Les fichiers sont archivés dans sept répertoires (ou dossiers) que je décrirai brièvement (figure 13).

Cette description, bien que rébarbative, présente un intérêt, ne serait ce que pour extraire des fichiers de la base de données sans utiliser les programmes d'extraction accompagnant les DON.

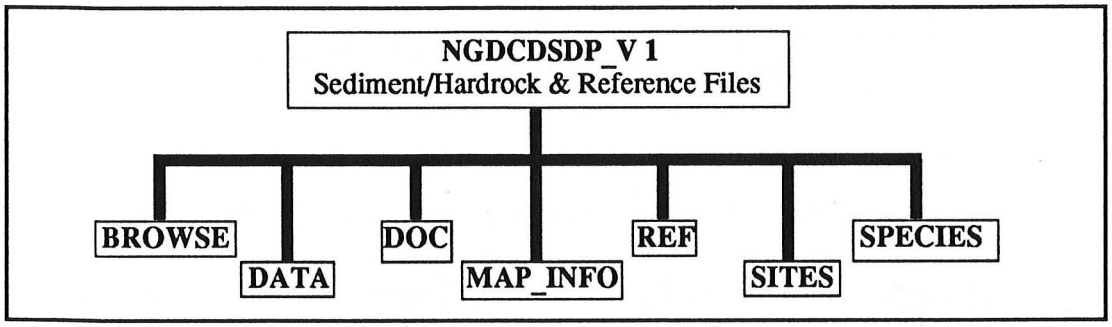


Figure 13 - Structure du premier volume de la base de données du D.S.D.P. sur DON.

Le répertoire DATA contient tous les fichiers de données du D.S.D.P. (données paléontologiques...) sous la forme dans laquelle ils étaient stockés à l'origine sur les bandes magnétiques. Ces fichiers sont directement utilisables par des applications.

Le répertoire BROWSE contient la version "lisible" des fichiers de données du répertoire DATA. Tous les codes ont disparu. A chaque fichier du répertoire DATA correspond un fichier du répertoire BROWSE d'une taille évidemment plus importante. Lors des consultations simples, ce sont les fichiers de ce répertoire qui sont utilisés.

Le répertoire DOC regroupe tous les fichiers de documentation relative aux fichiers du répertoire DATA (explication des codes utilisés, des techniques de forages...). Il est intéressant de pouvoir consulter ces fichiers pour bien comprendre la signification des variables figurant dans les fichiers du répertoire DATA. D'autres renseignements d'ordre plus général y figurent également.

Le répertoire MAP_INFO contient les données nécessaires à toute représentation graphique utilisant des projections cartographiques. Il contient notamment les fichiers de traits de côtes mondiaux ainsi que ceux renfermant les coordonnées géographiques des sites du D.S.D.P.. Notons au passage que toutes les projections cartographiques sont réalisées par le logiciel NCAR (National Center for Atmospheric Research). Nous aurons l'occasion d'en reparler par la suite.

Le répertoire REF regroupe des fichiers de documentation générale (tels que ceux concernant la géochimie...) qui ne font pas partie du répertoire DOC.

Le répertoire SITES (figure 14) contient les index permettant d'extraire les données des répertoires BROWSE et DATA. Le répertoire SITES est lui-même divisé en sept sous répertoires (GROUP0 à GROUP6). Le GROUP0 par exemple contient les index pour extraire les données des sites 1 à 99. Le GROUP6 contient les index permettant d'extraire les données des sites 600 à 624. Le répertoire SITES permet l'extraction d'informations de la base de données grâce à un numéro de leg. Il est possible dans les répertoires GROUP d'extraire des données à partir d'un numéro de site. Dans les sous-répertoires ("site") des répertoires GROUP il est possible d'extraire des données à partir d'un numéro de site et d'un numéro de forage. Au niveau le plus bas (dans les répertoires "hole") il est possible d'extraire des données à partir d'un numéro de carotte.

Le répertoire SPECIES renferme trois types de fichiers pour chaque groupe fossile :
- un fichier contenant le nom d'espèces fossiles appartenant au groupe et qui ne sont pas représentées dans la base de données,
- un fichier contenant les numéros de forages où a été reconnu ce groupe,
- un fichier contenant les noms des espèces de ce groupe avec la liste des forages où elles ont été reconnues.

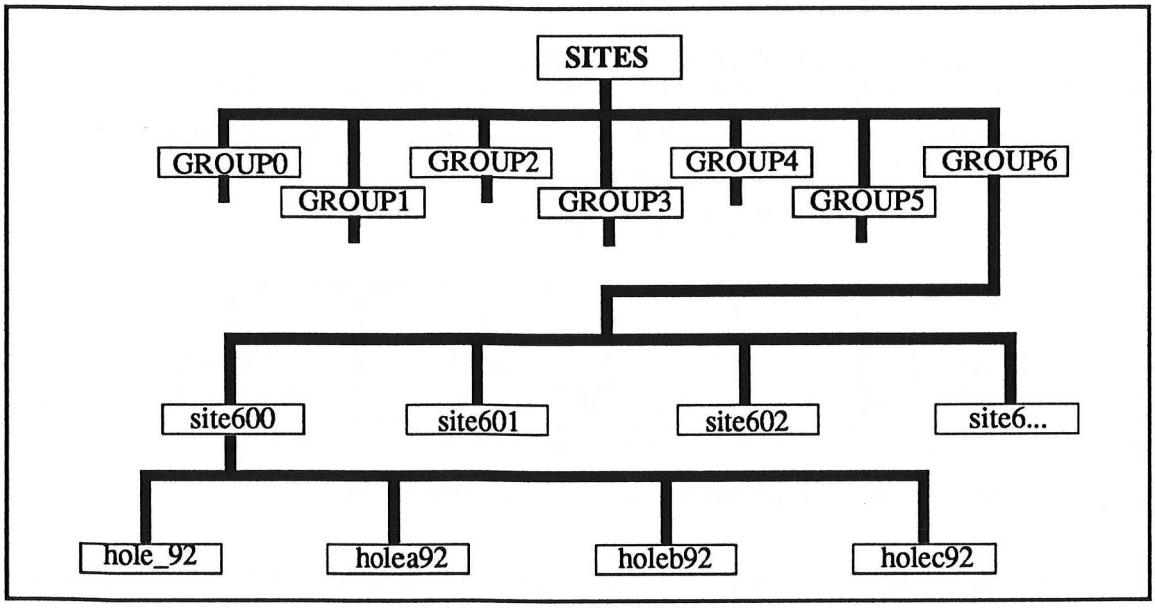


Figure 14 - Structure du répertoire SITES.

- le deuxième disque

Ce disque est divisé en cinq répertoires (figure 15). Le volume II (Downhole Logs and Underway Geophysics) contient essentiellement des données géophysiques.

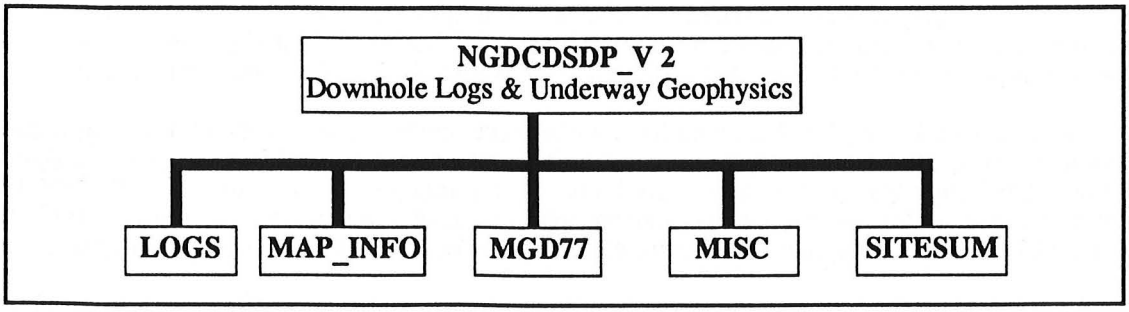


Figure 15 - Structure du deuxième volume de la base de données du D.S.D.P. sur DON.

c - La sélection et l'extraction des données sur CD-ROM

Les extractions s'effectuent à partir de menus. Les programmes d'extraction des données du D.S.D.P. sur CD-ROM ne peuvent se comparer aux SGBD tels que nous les avons décrits dans le premier chapitre.

Ces programmes d'extraction sont écrits en langage C. Ils permettent uniquement de copier une partie d'un fichier de la base de données dans un fichier du disque dur (il s'agit, en fait, d'un transfert de données répondant à certains critères) ou de visualiser sur l'écran le résultat d'une requête simple. Le problème de modifications ou de mises à jour des données ne se pose pas, les données sur CD-ROM étant par définition non modifiables.

On se rend vite compte par la pratique que les performances des programmes d'extraction sont limitées. L'utilisateur serait en droit de s'attendre à des requêtes plus élaborées face à une telle masse d'informations.

- Les extractions des données du volume I

Le premier menu (menu principal) marque le commencement et l'étape obligatoire pour toute recherche de données (figure 16). Il existe quatre façons d'effectuer une sélection de données :

- à partir d'une projection cartographique,
- à partir d'un numéro de leg,
- en précisant les numéros de forages et de sections,
- par type de données.

MAIN SELECTION MENU

Select by :

Geographic Area
Leg
Hole/Core
Type of Data

View/Copy :

Documentation
Summary & Codes Files
References Files
System Notes

Quit the Program

Select data by ocean area or latitude/longitude.

F1 - Help

Figure 16 - Menu principal pour les extractions des données du volume I.

Chaque chemin (suivant la hiérarchie des fichiers) pour arriver aux données désirées se termine par un menu donnant le choix entre visualiser les données sur l'écran ou les copier dans un fichier dont on spécifie le nom.

Je ne donnerai ici qu'un exemple d'extraction. Cherchons par exemple les données concernant les nannofossiles calcaires d'un forage réalisé dans le Golfe du Mexique. Après avoir exprimé la volonté d'extraire des données selon un critère géographique (figure 16) un menu (figure 17) propose le choix entre diverses régions du monde et nous permet d'opter pour l'option "Gulf of Mexico". Une représentation cartographique détaillée centrée sur le Golfe du Mexique avec les sites du D.S.D.P. figurés par des croix est dessinée à l'écran. Un quadrilatère en surbrillance (dont la taille et la forme sont modifiables à volonté grâce aux touches de direction) délimite une portion de la carte dans laquelle il est possible de sélectionner les sites désirés. Une fois la sélection des sites achevée, un tableau donnant des renseignements (numéros de legs, de sites, de forages, latitudes...) et les données disponibles sur chaque site apparaît à l'écran (figure 18).

Un nouvel écran apparaît dans lequel chaque ligne correspond à un des forages sélectionnés sur la carte (figure 19). Le fait de se déplacer de ligne en ligne a pour effet d'afficher en bas de l'écran des renseignements supplémentaires sur le forage correspondant (profondeur du forage, types de sédiments...). On peut alors sélectionner un forage, le 096 par exemple.

Le fait que l'on ne puisse sélectionner qu'un seul forage à la fois illustre la faiblesse des programmes d'extraction. Contrairement aux extractions effectuées avec SQL, il n'est pas possible d'extraire plusieurs forages en même temps. La sélection d'un forage a pour effet d'afficher un menu donnant la liste des types de données que l'on peut extraire (figure 20). Nous choisirons dans notre exemple d'extraire les données paléontologiques concernant le site 96 du D.S.D.P. en validant l'option "Paleontology".

MAP SELECTION MENU

Select from one of the following maps

World Map	**Gulf of Mexico**
Aegean Sea	Greenland Sea
Antarctic Ocean	Indian Ocean
Arabian Sea	Sea of Japan
North Atlantic Ocean	Mediterranean Sea
South Atlantic Ocean	Norwegian Sea
Bering Sea	North Pacific Ocean
Black Sea	South Pacific Ocean
Caribbean Sea	Philippine Sea
Coral Sea	Red Sea
Gulf of Aden	Ross Sea
Gulf of California	Tasman Sea

ESC - Return to Main Selection Menu

Figure 17 - Sélection d'une aire géographique où s'effectuera l'extraction.

GEOGRAPHIC AREA SELECTED HOLE LIST

Hole	Leg	Latitude	Longitude	Data Types Available (F1 == Help)	
96	10	23.7427	-85.7633	Sed: CARB DENS SIZ GRP SMEAR	WAT XRD
				Rock : Mag :	
				Paleo : NAN RAD	
97	10	23.8842	-84.4457	Sed: CARB DENS SIZ GRP SMEAR	WAT XRD
				Rock : Mag :	
				Paleo : NAN RAD	

Esc-Exit PgUp-Page Up PgDn-Page Down Home-Begin of List End-End of List

Figure 18 - Données disponibles pour chaque forage de la sélection.

HOLE SELECTION MENU :

Select one of the following Hole Number :

Hole	Leg	Latitude	Longitude
096	**10**	**23.7427**	**-85.7633**
097	10	23.8842	-84.4457
535	77	23.7080	-84.5162
536	77	23.4898	-85.2097

HOLE MENU -- Information

Feature : KNOLL Total Penetration (m) : 332 # Sed. Cores: 5
Oldest Sed : Core 5 Age : UPPER PALEOCENE
Sed Des : FORAM-NANNO-CHALK
Type Crust : Oceanic Depth to Basement (m) : # Rock Cores :
Rock Des :

Use cursor pad keys to scroll through help text

Figure 19 - Sélection d'un forage.

DATA TYPE SELECTION MENU
LEG 10 HOLE 096_
PROCEED TO Core Level Search

Sediment Data

Carbon/Carbonate	Density-Porosity	Grain Size	G.R.A.P.E.
Paleontology	Pore Water	SCREEN	Smearslide
Sonic Velocity	Vane Shear	Visual Text	X-Ray Mineralogy

Igneous/Metamorphic Rock Data

Major Elements	Minor Elements	Thin Sections	Visual Core Desc

Paleomagnetics

AFD Sediment	Discrete Sediment	Long-core Sed	Hard Rock

Reference

Age Profile Core Depths

select this field to view fossil groups available

Esc - Return to Geographic Area Hole Selection Menu

Figure 20 - Sélection d'un type de données.

DATA TYPE SELECTION MENU
LEG 10 HOLE 096_

PROCEED TO Core Level Search

Sediment Data

Carbon/Carbonate	Density-Porosity	Grain Size	G.R.A.P.E.
Paleontology	Pore Water	SCREEN	Smearslide

PALEONTOLOGY SELECTION MENU

Algae	Crinoïds	Phytolitharia
Ammonites	Diatoms	Planktonic Forams
Aptichy	Dinoflagellates	Pollen & Spores
Archaemonads	Ebrid/Actinicidians	Radiolaria
Benthic Forams	Fish Debris	Rhynchollites
Bryozoans	**Nannofossils**	Silicoflagellates
Calcispherulides	Ostracods	Trace fossils

Esc - Return to Data Type Selection Menu

Esc - Return to Geographic Area Hole Selection Menu

Figure 21 - Sélection d'un groupe fossile.

Le menu suivant indique les groupes fossiles représentés dans le site 96 (figure 21). Nous choisirons d'extraire les données concernant les nannofossiles calcaires.

La sélection des données est terminée. Il ne reste plus qu'à préciser si l'on veut visualiser les informations retirées de la base de données ou les copier dans un fichier (figure 22).

L'option "COPY" retire les données au sein du répertoire DATA alors que l'option BROWSE utilise les données du répertoire BROWSE. Nous choisissons de copier les données sélectionnées dans un fichier NANNOS.DAT (figure 23).

BROWSE/COPY SELECTION MENU

You have selected :
Nannofossils
for
LEG 01

Would you like to
BROWSE the selected item or
COPY the selected item to disk.

Esc - Return to Data Type Selection Menu

Figure 22 - Sélection de l'option "COPY" permettant de copier les données extraites dans un fichier.

COPY FILE WINDOW
Please enter the file name to copy the selected item to :

NANNOS.DAT

The file name may consist of a drive specifier, a path, and/or an extension.

Please make sure all disk drives are ready for I/O.

Press any key when ready.

Esc - Return to Browse/Copy Selection Menu.

Figure 23 - Choix du nom du fichier de copie.

- Les extractions des données du volume II

Je me limiterai à la présentation du menu principal des extractions du volume II (figure 24).

MAIN MENU SELECTION
Select by :
Downhole logs
Underway geophysics

View/Copy :
Site Summary Information
General Log Information
General Geophysical Information
System Notes

Quit the Program
Logs in the LIS format for 82 holes, 35 legs
F1 - Help

Figure 24 - Menu principal pour les extractions du volume II.

II - La base de données sur station de travail Sun

A - Présentation de la station de travail

L'ordinateur voué à l'exploitation des données du D.S.D.P. sur disque dur classique (et non plus sur CD-ROM) est une station de travail du type SUN-3/50.

Une station de travail se compose d'un calculateur (l'unité centrale) et de ses périphériques d'entrées et de sorties (le clavier, le moniteur, le support de stockage...), le tout formant une entité se suffisant à elle-même. D'autres périphériques (terminaux, imprimantes...) peuvent s'ajouter à l'architecture classique de la station de travail.

Il n'est pas dans mon intention d'effectuer ici un inventaire exhaustif des caractéristiques de la station Sun. Je me limiterai à une présentation générale dans le seul but de pouvoir aider l'utilisateur à mettre en œuvre les programmes décrits plus loin.

1 - La station de travail Sun-3/50

La station de travail Sun-3/50 est un mini ordinateur performant constitué autour d'un processeur Motorola MC 68020, d'une capacité de traitement de 1,5 Mips (possibilité de traiter 1,5 million d'instructions à la seconde), cadencé à 16 MHz. La station Sun-3/50 possède en outre un écran graphique monochrome de grandes dimensions (1152 par 900 pixels ou éléments d'images), une souris pouvant entre autre effectuer des pointages ou des sélections sur l'écran et un clavier de type américain. Elle est dotée d'un disque dur d'une capacité de 150 Mo. Sa mémoire centrale (mémoire vive ou RAM) est de 4 Mo.

Les stations Sun possèdent un système d'exploitation qui leur est propre. Il s'agit de SunOs (Sun Operating System).

Un système d'exploitation regroupe tous les programmes et toutes les librairies qui permettent le bon fonctionnement de la machine. Il permet la gestion des fichiers, des mémoires de l'ordinateur, du langage de commandes, etc... SunOs est un dérivé d'UNIX system III de l'Université de Berkeley en Californie, amélioré d'utilitaires propres au système Sun tels que :

- un compilateur C et un compilateur Fortran dans notre cas (il est aussi possible de créer des programmes écrits en Pascal ou en Assembleur),
- des supports de communications (Ethernet ...) qui permettent d'intégrer facilement la station de travail dans un réseau local ou non,
- des éditeurs de texte performants (ed, vi, nroff, troff...).

Le système d'exploitation MS-DOS (très répandu en micro informatique sur des ordinateurs de type PC) est un dérivé du système UNIX. Ce dernier a été créé il y a une vingtaine d'années en même temps que le langage de programmation C avec lequel il est écrit. Sa puissance n'est plus à démontrer et elle justifie le fait que le langage C d'une part et le système UNIX d'autre part tendent à devenir progressivement les standards dans respectivement les langages de programmation et les systèmes d'exploitation sur mini ordinateurs et gros systèmes (et de plus en plus sur micro ordinateurs). Le couple UNIX/langage C aboutit à des applications très performantes et d'une grande portabilité (Dax, 1988).

En ce qui concerne notre station de travail, le système d'exploitation UNIX proprement dit occupe un espace disque équivalent à 30 Mo ce qui donne une idée de l'étendue de ces moyens.

Je n'entrerai pas plus dans les détails pour ce qui est du système d'exploitation de la station de travail Sun-3/50. On notera seulement que l'utilisateur de MS-DOS retrouvera dans UNIX de nombreuses commandes qui lui sont familières.

2 - Les périphériques

La station Sun est connectée à une imprimante laser de type LaserWriter II NTX (d'Apple) par l'intermédiaire d'une liaison de type TopSun. Cette imprimante est dotée d'un processeur 68020 cadencé à 16,5 MHz, de 1 Mo de ROM et de 2 Mo de RAM. Sa résolution d'impression est de 300 dpi (300 points par pouce en texte et graphisme). La vitesse d'impression théorique est de huit pages par minute mais dépend essentiellement du contenu de chaque page. L'imprimante laser supporte le langage graphique Postscript. Son rôle est d'imprimer avec une qualité exceptionnelle toutes les sorties à caractère graphique.

Une imprimante matricielle à impact neuf aiguilles de type FX-1050 d'Epson est vouée à l'impression rapide de tous les documents ASCII à très grande vitesse (264 caractères par seconde) tout en garantissant une qualité d'impression remarquable.

La station de travail Sun-3/50 est enfin connectée à un traceur qui permet d'imprimer des graphiques de grandes dimensions (format A1) avec un choix de huit couleurs. La qualité de l'impression est, là encore, exceptionnelle.

3 - Connexion d'un terminal - Transferts du CD-ROM vers la station

La station Sun est reliée à un ordinateur de type PC par l'intermédiaire d'une sortie RS-232. Ce terminal est un Compaq 386s Deskpro faisant appel au système d'exploitation MS-DOS et fonctionnant avec un processeur 80386 d'Intel cadencé à 16 MHz. Il est doté d'un disque dur d'une capacité de 40 Mo. C'est à cet ordinateur qu'est connecté le lecteur de CD-ROM pouvant lire les DON.

Les programmes d'extraction des données sur DON sont implantés sur le disque dur de cet ordinateur. Le transfert des fichiers du disque dur du Compaq vers la station Sun s'effectue grâce à un logiciel de communication, Smarterm 220. Les données transférées peuvent ensuite être traitées par les programmes implantés sur la station Sun (il est à noter que les transferts de données peuvent s'effectuer dans les deux sens et ne concernent que les fichiers ASCII). Le logiciel de communication permet à deux utilisateurs de travailler en même temps sur la station Sun, avec le même système d'exploitation soit à partir de la station Sun elle-même soit à partir du Compaq. Il est à tout moment possible d'interrompre la communication et de libérer le PC de la station de travail. L'utilisateur du Compaq retrouve instantanément son système d'exploitation et les applications implantées sur sa machine.

L'ensemble station Sun/PC (figure 25) constitue un outil performant et complet permettant le stockage, l'extraction et le traitement des données du D.S.D.P..

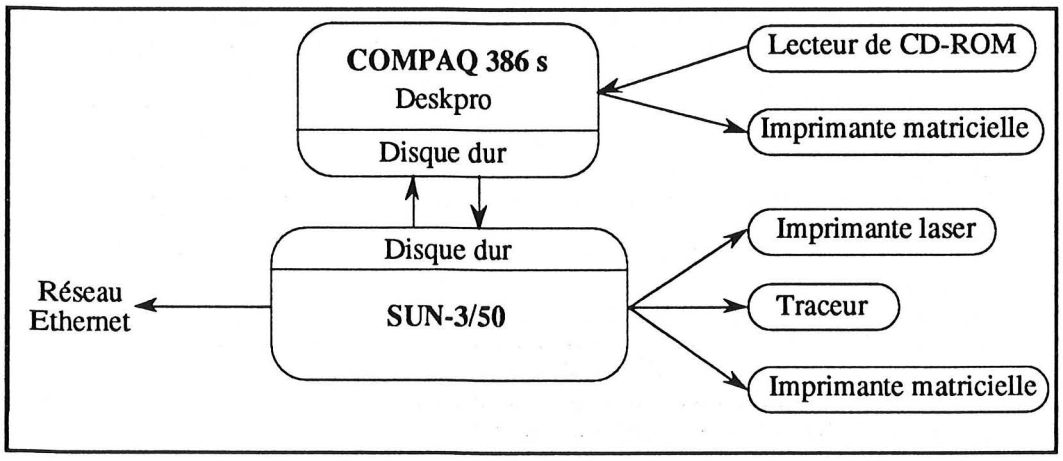


Figure 25 - Architecture de la station de travail.

UNIVERSITÉ DE LYON C.S.T. GÉOLOGIE

4 - Les logiciels

En plus du système d'exploitation propre à la station Sun et du SGBDR (INGRES), l'installation de quelques logiciels et librairies s'est révélée nécessaire. Je ne ferai que les décrire brièvement mais nous aurons l'occasion de les rencontrer par la suite.

NCAR est une librairie de cartographie permettant la réalisation de projections cartographiques à l'échelle mondiale (projections cylindriques équidistantes, de Mercator...). NCAR sera utilisé par exemple dans un programme qui situe les sites du D.S.D.P. sur une projection cylindrique mondiale. NCAR couvre l'ensemble du globe et possède, en outre, une fonction de contourage. Deux logiciels graphiques permettent l'utilisation de NCAR. Il s'agit de GKS (Graphical Kernel System) et de son dérivé français, GKSbx version 7.1 (développé par le Centre Interuniversitaire de Bordeaux). GKS constitue une interface fonctionnelle conviviale entre un programme d'application et une configuration de dispositif d'entrée (le clavier ou la souris en ce qui nous concerne) et de sortie (écran graphique, imprimante laser...). Un des avantages de GKS réside dans sa grande portabilité. En effet, depuis juin 1983, date de sa normalisation par l'Organisation de Standardisation (ISO), GKS représente la norme internationale des langages graphiques en deux dimensions. Le choix de la sortie d'un document graphique sur un écran ou sur une imprimante, par exemple, ne se fera qu'au niveau du contrôleur d'interface. Il suffira de sélectionner le driver pour écran graphique monochrome (un driver est un ensemble de programmes de gestions des Entrées-Sorties) ou le driver pour imprimante laser (ou les deux en même temps).

GKSBx offre, outre les nombreux avantages de GKS, la possibilité de travailler en mode fenêtres sous Suntools (Suntools est un ensemble de programmes intégré au système Sun qui permet de créer, détruire, déplacer ...des fenêtres). Cette facilité permet, entre autre, l'usage de la souris comme releveur de coordonnées dans une projection cartographique par exemple.

B - Structure de la base de données du D.S.D.P. sur station Sun

Je n'entrerai pas dans les détails de la structure de cette base de données.

Elle a été élaborée en tenant compte des principes énoncés dans le premier chapitre : l'intégrité, la flexibilité, la performance et la sécurité. Elle est réduite comparée à celle des DON.

Je l'ai conçue en fonction des applications que je désirais développer (adéquation de la base de données avec des études biostratigraphiques ou paléoécologiques) en ayant toujours à l'esprit un soucis de performance dans les temps d'accès et les contraintes de place imposées par le disque dur.

C'est pourquoi j'ai limitai ma base de données aux données relatives à la paléontologie. Elle est constituée d'une vingtaine de relations (figure 26) que je présenterai brièvement :

- **ttt** contient les coordonnées géographiques de chaque site du D.S.D.P.,
- **site** contient des informations générales sur les sites du D.S.D.P. (les numéros de legs, les forages,...),
- **codeage** et **coddage** renferment les codes attribués aux âges des espèces fossiles (la différence entre les deux relations est subtile et concerne la variable "âge" qui dans la première relation est un entier et dans la deuxième un réel, certains programmes nécessitant des données d'entrée sous forme entière et d'autres sous forme réelle),
- **din** contient toutes les données relatives aux dinoflagellés et aux silicoflagellés,
- **bfor** renferme les données concernant les foraminifères benthiques,
- **pfor** renferme les données concernant les foraminifères planctoniques,
- **nan** contient les données relatives aux nannofossiles calcaires,
- **rad** renferme les données relatives aux radiolaires,
- **dia** renferme les données relatives aux diatomées,
- **div** (pour divers) renferme les données relatives à d'autres groupes moins représentés (végétaux fossiles, ammonites,...),
- **bio** contient les données relatives aux sites où sont représentés simultanément les

radiolaires, les nannofossiles calcaires, les diatomées et les foraminifères planctoniques (cela représente environ 60 forages),
- **biochron** contient les données relatives aux foraminifères planctoniques, aux nannofossiles calcaires, aux diatomées et aux radiolaires considérés comme ayant une bonne valeur biostratigraphique durant le Cénozoïque (environ 700 espèces),
- **codesp** contient les données relatives aux codes des espèces fossiles,
- **paleonto** contient les codes associés à des espèces utilisées pour la définition des zones du Cénozoïque,
- **bioesp** contient les codes fossiles de toutes les espèces de la relation biochron.

Divers index ont été créés sur ces relations. Ils permettent des extractions d'une grande rapidité surtout en ce qui concerne les relations de grande taille.

III - L'application PALEODATA

L'application PALEODATA est constituée d'un ensemble de programmes d'extraction de données afin de les visualiser ou de les traiter au sein d'applications. Ces programmes sont gérés par le module ABF de INGRES. Ils sont implantés dans le répertoire courant de INGRES et, de ce fait, l'application PALEODATA doit être nécessairement lancée depuis ce répertoire. Il suffit de taper le nom de l'application (PALEODATA, en lettres minuscules ou majuscules).

Comme son nom l'indique, l'application PALEODATA utilise les données du D.S.D.P. concernant la paléontologie, mais aussi d'autres types de données telles que celles précisant la position géographique des sites par exemple.

A - Structure de l'application

PALEODATA se caractérise par une structure arborescente (figure 29) dans laquelle il est possible de se déplacer en validant des choix. Chaque écran de l'application PALEODATA est constitué de menus associés ou non à des tableaux de données et de fenêtres dans lesquelles il est possible d'indiquer son choix. Les tableaux de données sont soit le résultat d'une requête (affichage de données vérifiant certaines conditions) soit des tableaux dans lesquels il faut entrer des informations avant de lancer une application. Dans ce dernier cas, il s'agit surtout de la validation de certaines données parmi une liste en indiquant 'O' (pour Oui) dans la case adéquate. On peut entrer à tout moment dans la fenêtre en tapant la touche F2. Si, le menu étant trop long, il ne peut apparaître totalement à l'écran, il suffit de taper à nouveau sur la touche F2 pour découvrir les options "cachées". Généralement, à chaque option du menu correspond une touche de fonction qu'il suffit de taper pour valider le choix. Cependant, et toujours dans le cas de menus proposant un choix important, certaines options ne sont pas associées à des touches de fonction. Pour valider le choix, il suffit de taper la première lettre de l'option (par exemple R en lettre majuscule ou en lettre minuscule pour RETOUR au menu précédent). Dans le cas où il existerait une ambiguïté au niveau de la première lettre (par exemple entre ABONDANCE et ARRET), il est impératif de taper autant de lettres que cela est nécessaire pour lever le doute (AB pour ABONDANCE et AR pour ARRET). Il est utile de noter que chaque menu de l'application possède trois options communes qui sont :
- l'option "INFORMATION" qui fournit, par le biais d'un éditeur de texte, un ensemble d'informations décrivant les applications ou les extractions possibles à partir du menu courant, constituant ainsi une aide à l'utilisateur; il est possible de faire défiler le texte ligne par ligne en tapant sur la touche "return", page par page en tapant sur la barre d'espacements et de sortir de cette option en tapant "q" (pour quitter),
- l'option "RETOUR" qui permet de revenir au menu qui précède le menu courant (cette option devient "Quit" lorsque l'on se trouve dans le menu des extractions brutes et elle n'existe évidemment pas dans le premier menu (le menu principal) puisqu'un retour au menu précédent équivaut dans ce cas à un arrêt de l'application PALEODATA c'est-à-dire à un retour au système,
- l'option "ARRET" qui permet d'arrêter l'application PALEODATA et qui effectue un retour au système.

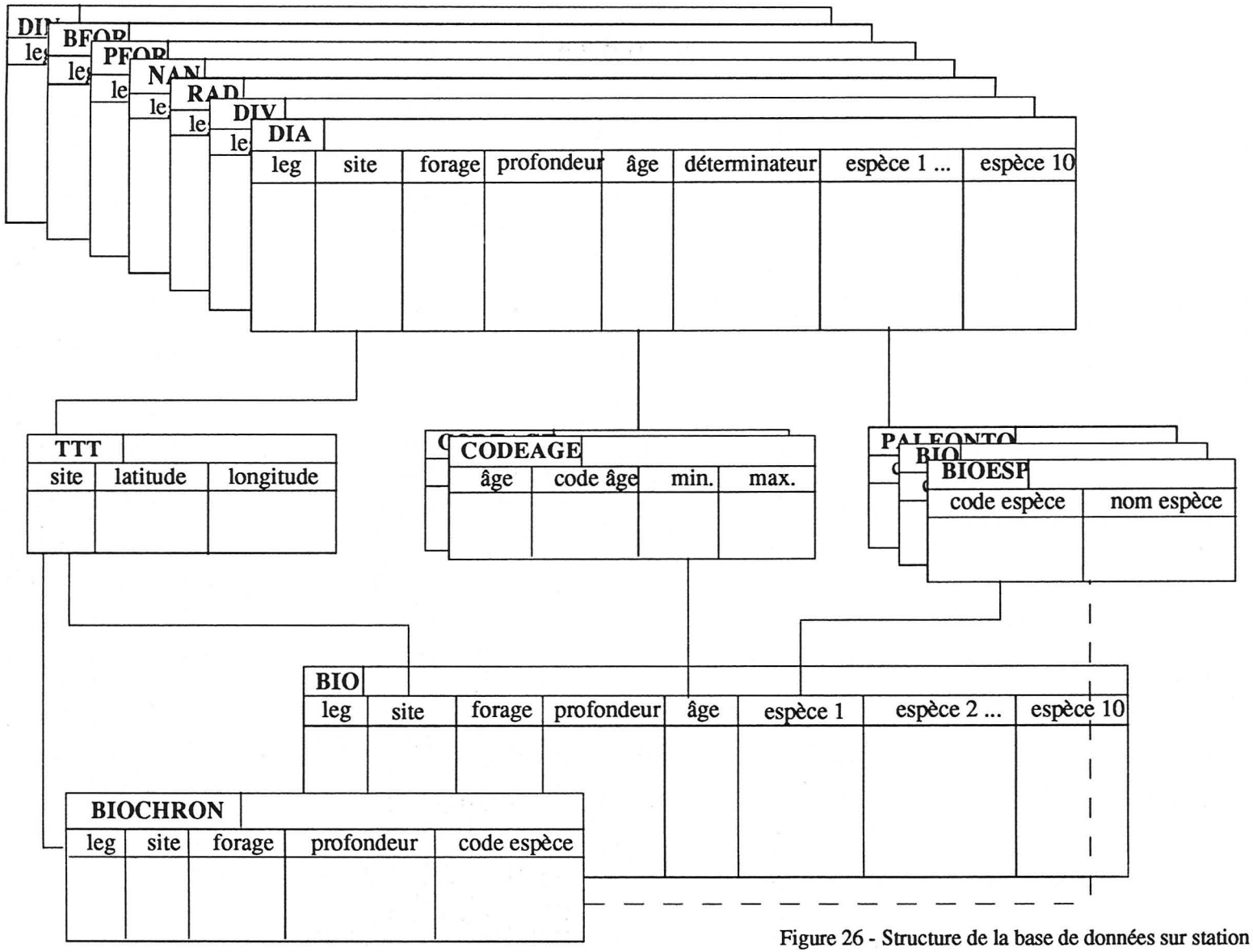


Figure 26 - Structure de la base de données sur station SUN.

B - Lancement de l'application - Le menu principal

Après avoir tapé PALEODATA, le menu principal apparaît à l'écran (figure 28).

MENU PRINCIPAL

Ce menu vous donne le choix entre extraire des données de la base et le lancement d'applications utilisant ces données.
La rubrique "INFORMATIONS" présente dans tous les menus renseigne sur les procédures à suivre. Consultez la en cas de doute...

* EXTRACTIONS
* LANCEMENT D'APPLICATIONS
* EXTRACTIONS BRUTES

* INFORMATIONS
* ARRET

Tapez la touche F2 pour accéder au menu et sélectionnez l'option choisie
EXTRACTIONS(L2) APPLICATIONS(L3) EXTRACTIONS BRUTES(L4) >

Figure 28 - Le menu principal de l'application PALEODATA.

Il indique à l'utilisateur qu'il a la possibilité d'effectuer un choix entre extraire simplement des données ou lancer une application. Les extractions des données paléontologiques du D.S.D.P. peuvent s'apparenter aux extractions des données sur CD-ROM, c'est-à-dire qu'aucun calcul n'entre en jeu au cours de l'extraction. Il s'agit simplement d'une forme de visualisation (d'un feuilletage) des données sans aucun traitement mathématique.

Les applications proprement dites constituent au contraire une nouveauté dans l'exploitation de la base de données du D.S.D.P..

En effet, pour la première fois avec ces données, il est non seulement possible de les extraire mais aussi de les utiliser au sein d'applications performantes et diversifiées. Les possibilités de l'option "APPLICATIONS" seront décrites par la suite.

L'option "INFORMATIONS" fournit un guide d'utilisation précieux que l'on peut consulter à tout moment notamment pour aider à choisir une application et en connaître le but.

C - Les extractions

Intéressons nous aux extractions.

Comme l'indique le menu principal (figure 28), elles sont de deux types :
- les extractions brutes qui permettent de visualiser une partie ou l'ensemble des données d'une des relations de la base de données ,
- les extractions (que nous qualifierons d'élaborées) qui permettent des extractions de données selon une requête prédéfinie dans un menu.

Les extractions brutes au contraire des extractions "élaborées" ne font pas l'objet de programmes. Il s'agit simplement de commandes SQL intégrées dans l'application PALEODATA.

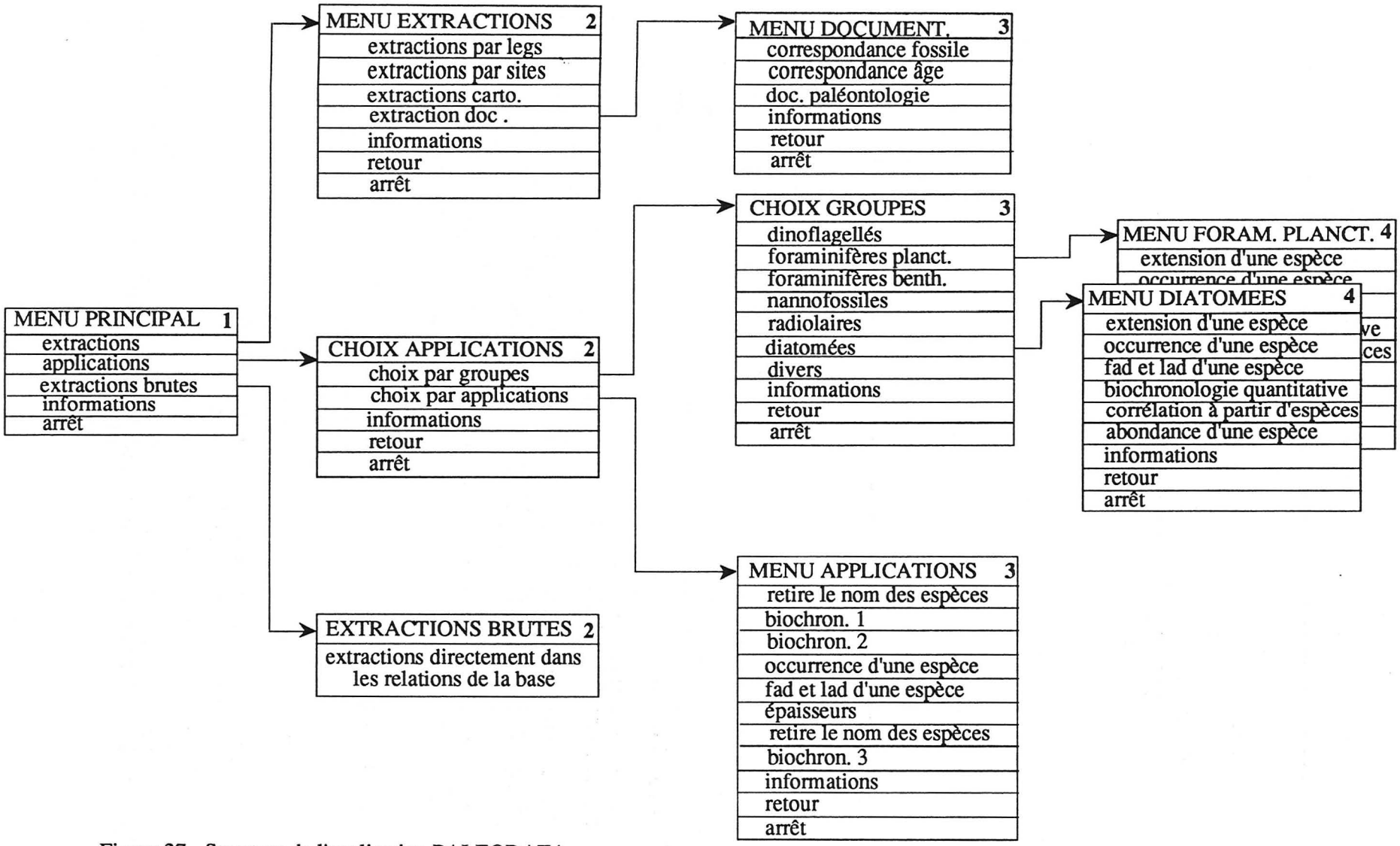


Figure 27 - Structure de l'application PALEODATA

1 - Les extractions brutes

Cette option permet d'extraire des données dans une relation dont on indique le nom lorsque le mot TABLE s'affiche à l'écran. En tapant comme nom de table (ou de relation) DIA qui est le nom de la relation concernant les diatomées, une relation vide de toute donnée s'affiche à l'écran (figure 29).

Query Target Name is DIA

TABLE (S) : DIA

leg	sit	hol	sdt	det	âge	fo1	.....	f10

Go(F5) Blank(L3) LastQuery(L4) Order(R1) Help(R7) Quit(F4) :

Figure 29 - Sélection de la relation DIA avant d'effectuer une requête.

Query Target Name is DIA

TABLE (S) : DIA

leg	sit	hol	sdt	det	âge	fo1	fo2	.....
37	333		146.36	SCHRADER	0	DACTI0050	DCOSC0470	
37	333		147.86	SCHRADER	0	DACTI0050	DCOSC0030	
37	333		147.86	SCHRADER	0	DNITZ0380		
37	333		149.36	SCHRADER	0	DCOSC0470	DCOSC0580	
37	333		150.86	SCHRADER	0	DCOSC0470	DCOSC0580	
37	333		152.23	SCHRADER	0	DCOSC0470	DCOSC0580	
37	333		153.86	SCHRADER	0	DCOSC0470	DCOSC0580	
37	333		165.51	SCHRADER	0	DACTI0090	DCOSC0580	
37	333		167.01	SCHRADER	0	DNITZ0380	DCOSC0030	
37	333		168.51	SCHRADER	0	DCOSC0470	DCOSC0580	
37	333		169.99	SCHRADER	0	DCOSC0470	DCOSC0580	
37	333		173.01	SCHRADER	0	DCOSC0470	DCOSC0580	

Go(F5) Blank(L3) LastQuery(L4) Order(R1) Help(R7) Quit(F4) :

Figure 30 - Recherche des données concernant les diatomées du site 333.

C'est à partir de cette relation vide que nous allons formuler la requête qui nous intéresse. Cette façon de sélectionner les données est la plus simple qu'il puisse exister avec INGRES. Il n'est en effet pas nécessaire de connaître un langage de requête quelconque (SQL ou QUEL) pour effectuer la recherche. Il suffit de donner le résultat de l'une des colonnes pour aller chercher toutes les lignes ayant ce résultat en commun. Par exemple, à partir de la relation vide de la figure 29, il

est possible de sélectionner toutes les lignes concernant les données sur les diatomées du site 333 du D.S.D.P. en tapant 333 dans la colonne "sit". Cette opération revient à visualiser une partie seulement des données répondant à un critère précis (données sur le site 333) et correspond à la création d'une vue (figure 30). Une vue équivaut à un accès direct à une partie de relation. Dans notre cas, une seule relation à la fois est concernée lors de la création d'une vue. Pour accéder au mode requête, il suffit de taper sur la touche L2 (pour Query) et d'indiquer la condition désirée. Il est également possible de visualiser la totalité de la relation en tapant directement la touche de fonction F5 (ou G pour GO) lorsque la table vide apparaît.

2 - Les extractions élaborées

Là encore un choix s'impose. Un nouveau menu s'affiche à l'écran, celui des extractions (figure 31).

MENU DES EXTRACTIONS

Ce menu permet d'extraire les données de la base à partir des numéros de sites, des numéros de legs, de rechercher la position géographique des sites sur une carte ou bien d'extraire une documentation générale sur les codes utilisés...

* EXTRACTION PAR LES NUMEROS DE LEGS
* EXTRACTION PAR LES NUMEROS DE SITES
* EXTRACTION PAR POINTAGE SUR UNE CARTE
* EXTRACTION DE LA DOCUMENTATION

* INFORMATIONS
* ARRET

Tapez la touche F2 pour accéder au menu et sélectionnez l'option choisie

EXTRACTIONS PAR LEGS(L2) EXTRACTIONS PAR SITES(L3) >

Figure 31 - Le menu des extractions.

a - Extractions par numéro de legs

Cette option demande à l'utilisateur d'entrer le numéro d'un des legs du D.S.D.P. (de 1 à 96). Le résultat de cette requête se trouve dans un tableau fournissant les renseignements sur ce leg (situation géographique...). Cherchons les renseignements sur le leg 12 par exemple (figure 32).

Les recherches sont, dans ce cas, quasiment instantanées. En effet, les requêtes sont simples (sur une seule variable, le numéro du leg) et la relation contenant les informations sur les legs du D.S.D.P. est relativement réduite. Il en est tout autrement pour des requêtes complexes s'appliquant sur plusieurs variables et sur des relations de tailles considérables. Dans ce cas la création d'index sur une ou plusieurs variables (celles sur lesquelles s'effectuent les recherches) s'avère indispensable.

b - Extractions par numéro de sites

On peut extraire, par cette option, les renseignements indiqués ci-dessus en entrant cette fois un numéro de site du D.S.D.P. compris entre 1 et 624. Cherchons par exemple les renseignements concernant le site 482 (figure 33).

c - Extractions par pointage sur une carte

L'option "EXTRACTION PAR POINTAGES SUR UNE CARTE" permet de visualiser sur une carte la position des sites du D.S.D.P. avec leurs numéros à partir d'une sélection sur une projection cartographique à l'échelle mondiale. Pour visualiser les sites de l'océan Indien par exemple (figure 35), il suffit d'effectuer un "zoom" d'une partie de la carte mondiale (figure 34). Les agrandissements sont réalisés en cliquant sur deux points de la carte mondiale pour délimiter la portion de carte à agrandir.

RENSEIGNEMENTS SUR LE LEG SELECTIONNE.

Rensignements sur le leg : 12

numéro du site	code forage	latitude	longitude	océan	hémisphère	mer
111		50.426	-46.368	ATL	N	
111	A	50.426	-46.368	ATL	N	
112		54.017	-46.604	ATL	N	
113		56.790	-48.332	ATL	N	
114		59.933	-26.800	ATL	N	
115		58.907	-21.117	ATL	N	
116		57.496	-15.924	ATL	N	
116	A	57.496	-15.924	ATL	N	
117		57.496	-15.399	ATL	N	

BAS(L2) HAUT(L3) RETOUR(L4)

Figure 32 - Visualisation des données sur le leg 12.

EXTRACTION DES DONNEES CONCERNANT LE SITE 482

leg	site	forage	logging	latitude	longitude	océan	hémisphère	mer
65	482			22.790	-107.994	PAC	N	GCALIF
65	482	A		22.790	-107.993	PAC	N	GCALIF
65	482	B		22.790	-107.993	PAC	N	GCALIF
65	482	C	L	22.789	-107.993	PAC	N	GCALIF
65	482	D		22.789	-107.993	PAC	N	GCALIF
65	482	E		22.789	-107.993	PAC	N	GCALIF
65	482	F	L	22.789	-107.993	PAC	N	GCALIF

BAS(L2) HAUT(L3) RETOUR(L4)

Figure 33 - Visualisation des données sur le site 482.

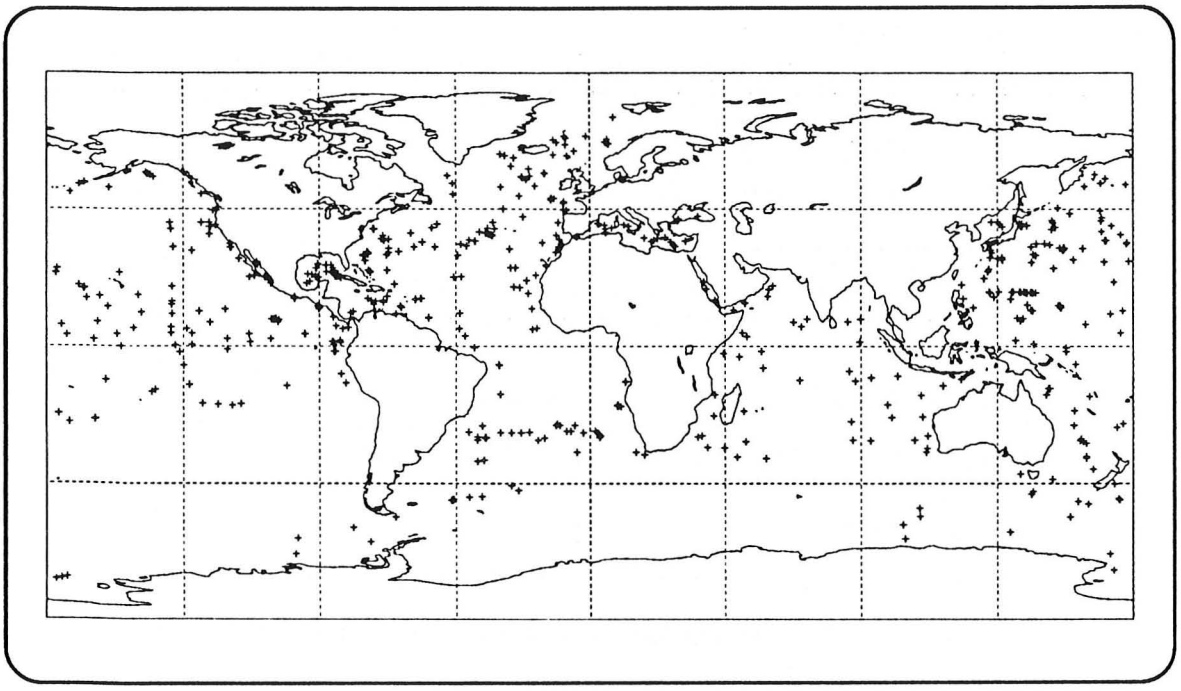


Figure 34 - Visualisation de la position de tous les sites du D.S.D.P. sur une projection cartographique (cylindrique équidistante).

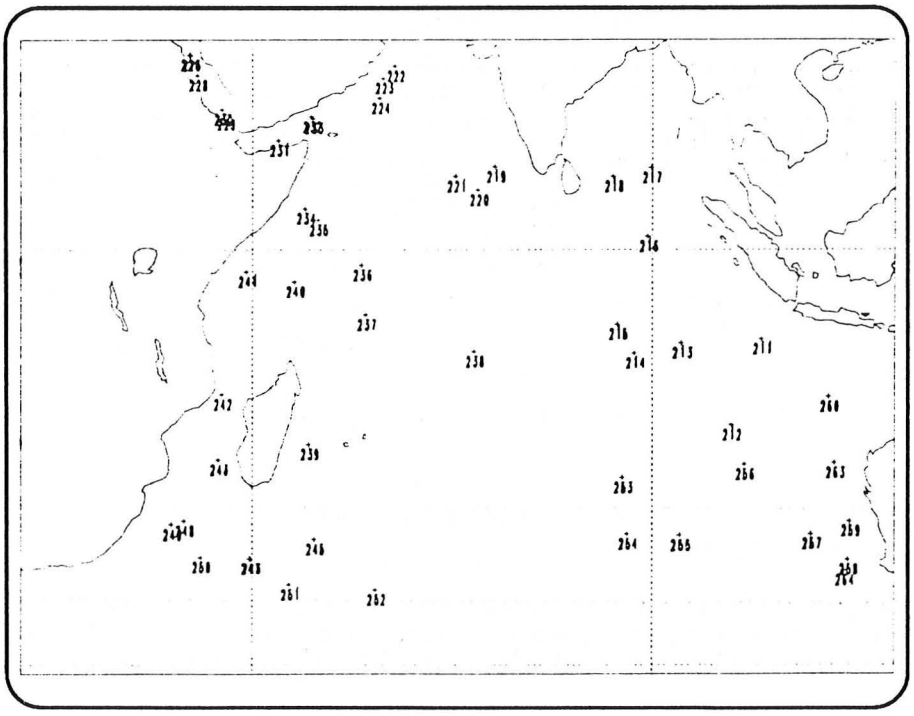


Figure 35 - Visualisation des sites du D.S.D.P. de l'océan Indien.

d - Extraction de la documentation

Cette option permet d'extraire :
- les données concernant les codes fossiles ou les codes âges utilisés dans les différentes relations de la base de données; cherchons par exemple quelle est l'espèce dont le code fossile est "FGLOD0610" (figure 36),
- la documentation générale concernant les données paléontologiques du D.S.D.P. avec des informations sur les techniques utilisées, les profondeurs d'échantillonnage....

Ce tableau donne la correspondance entre les codes fossiles utilisés dans la base de données et les noms d'espèces.

Code fossile	Espèce correspondante
FGLOD0610	GLOBIGERINOIDES TRILOBUS FISTULOSUS

RETOUR (L2) :

Figure 36 - Recherche de la correspondance entre un code fossile et un nom d'espèce fossile.

D - Les applications

Le menu des applications (figure 37) propose un choix parmi deux types d'applications :
- celles concernant un seul groupe fossile,
- celles concernant plusieurs groupes fossiles considérés simultanément.

MENU DES APPLICATIONS

* CHOIX DIRECTEMENT DES APPLICATIONS
* CHOIX DU GROUPE FOSSILE AVANT L'APPLICATION

* INFORMATIONS
* ARRET

Tapez la touche F2 pour accéder au menu et sélectionnez l'option choisie

CHOIX PAR APPLICATIONS(L2) CHOIX PAR GROUPES(L3) >

Figure 37 - Menu des applications.

Cette distinction entre les types d'applications se retrouve dans le schéma structural de la base de données (figure 26).

Elle se justifie par la volonté de créer des applications performantes nécessitant le moins de temps possible. Il serait plus facile de travailler sur une seule relation contenant toutes les données paléontologiques mais, dans ce cas, la moindre recherche demanderait énormément de temps. De plus la création d'index ne s'avère pas toujours possible.

La division de la base de données en de nombreuses relations est, de ce fait, la condition essentielle pour aboutir à des applications performantes.

1 - Les applications groupe par groupe

a - Le choix d'un groupe fossile

Il est nécessaire de choisir le groupe fossile sur lequel l'étude portera. Un choix est donc proposé (figure 38). Choisissons par exemple de travailler sur le groupe des diatomées. Il suffit de taper la touche de fonction associée à ce groupe fossile pour qu'un menu donnant le choix entre plusieurs applications concernant ce groupe s'affiche (figure 39).

Choix du groupe fossile sur lequel s'effectueront les applications.
Choisissez un groupe...

* DIA : LES DIATOMEES
* PFOR : LES FORAMINIFERES PLANCTONIQUES
* BFOR : LES FORAMINIFERES BENTHIQUES
* NAN : LES NANNOFOSSILES
* RAD : LES RADIOLAIRES
* DIN : LES DINOFLAGELLES & LES SILICOFLAGELLES
* DIV : DIVERS

* INFORMATIONS
* ARRET

Tapez la touche F2 pour accéder au menu et sélectionnez l'option choisie

DIA(L2) PFOR(L3) BFOR(L4) NAN(R1) RAD(R2) DIN(R3) DIV(R4) >

Figure 38 - Choix d'un groupe fossile.

MENU DES APPLICATIONS GROUPE DES DIATOMEES

* EXTENSION VERTICALE D'UNE ESPECE DANS UN SITE ('CALCUL')
* OCCURRENCE D'UNE ESPECE DANS TOUS LES SITES DU D.S.D.P. AVEC SON EXTENSION VERTICALE SUR CARTE ('OCCURRENCE')
* FAD ET LAD D'UNE ESPECE DANS LES SITES DU D.S.D.P. ('FAD/LAD')
* BIOCHRONOLOGIE QUANTITATIVE SUR LES DIATOMEES ('BIOCHRONOLOGIE')
* "CORRELATION" DES SITES DU D.S.D.P. BASEE SUR L'AGE D'UNE ESPECE ('CORRELATION 1')
* RECHERCHE DE L'ABONDANCE D'UNE ESPECE CHOISIE DANS TOUS LES DU D.S.D.P. ('ABONDANCE')

* INFORMATIONS
* ARRET

Tapez la touche F2 pour accéder au menu et sélectionnez l'option choisie

CALCUL(L2) OCCURRENCE(L3) FAD/LAD(L4) BIOCHRONOLOGIE(R1) >

Figure 39 - Menu des applications pour le groupe des diatomées.

b - Le choix de l'application

- Recherche des FAD et des LAD d'une espèce

Le FAD (ou First Appearance Datum) d'une espèce est défini par la première occurrence de cette espèce au contraire du LAD (Last Appearance Datum) qui correspond à la dernière occurrence. Il est souvent très utile de pouvoir connaître ces deux événements biostratigraphiques. La plupart des zones du Cénozoïque sont en effet définies par des apparitions ou des disparitions de taxons. Certains biostratigraphes préfèrent prendre en compte le FAD plutôt que le LAD des espèces dans la définition des zones, considérant qu'en cas de remaniement naturel la disparition apparente d'une espèce sera rajeunie. Il faut cependant noter qu'il est intéressant de considérer les LAD des espèces dans les études de forages car ils ne sont pas sujets aux remaniements mécaniques liés à la technique même du forage alors que les FAD peuvent être considérablement vieillis (en cas d'éboulements). Le programme 'FAD/LAD' permet de calculer les LAD (les profondeurs minimums d'occurrence) et les FAD (les profondeurs maximums d'occurrence) d'une espèce donnée dans tous les forages du D.S.D.P. où elle est présente. Cherchons par exemple les FAD et les LAD de *Denticulopsis lauta*, une diatomée très répandue (surtout dans le Pacifique Nord) durant le Miocène moyen. Les résultats sont regroupés au sein d'un tableau (figure 40).

Occurrence d'une espèce donnée dans tous les forages du D.S.D.P. avec le calcul de ses LAD et de ses FAD (en mètres)

nom de l'espèce : DENTICULOPSIS LAUTA

numéro leg	numéro site	code forage	FAD (en mètres)	LAD (en mètres)
19	183		195.10	195.10
57	438	A	725.56	488.11
57	439		850.91	850.91
63	468		185.12	6.31
63	468	B	258.27	41.31
63	469		227.60	133.42
63	470		156.21	95.41
63	472		96.89	53.11
71	512		18.80	1.01
71	513	A	170.60	151.64
86	580		26.52	26.52
86	581		246.10	231.51

BAS(L2) HAUT(L3) RETOUR(L4)

Figure 40 - Recherche des FAD et des LAD de *Denticulopsis lauta*.

- Calcul de l'extension verticale d'une espèce

J'entends par extension verticale d'une espèce, l'épaisseur de la colonne sédimentaire délimitée par son FAD et son LAD en un site donné. Cette opération peut être effectuée par le programme 'CALCUL' qui n'est qu'une variante du programme précédent. Quelques lignes

seulement de programmes ont été ajoutées. Cherchons par exemple l'extension verticale dans tous les sites du D.S.D.P. de *Coscinodiscus excavatus* une espèce de diatomée oligocène très répandue dans les basses latitudes (figure 41).

- Occurrence d'une espèce dans les forages du D.S.D.P.

Une variante plus conviviale du programme précédent est fournie par le programme 'OCCURRENCE 1'. Ce programme calcule l'extension verticale d'une espèce donnée dans tous les sites du D.S.D.P. puis positionne les sites concernés sur une projection cartographique mondiale avec un figuré dont la taille est proportionnelle à l'épaisseur correspondant à l'extension verticale. Connaissant la durée d'existence d'une espèce, il sera ainsi possible d'évaluer le taux de sédimentation en un lieu et pour une période donnée (celle de l'existence de l'espèce). Cherchons par exemple "l'occurrence" de *Coscinodiscus excavatus* (figure 42).

Ce tableau indique tous les legs, les sites et les forages ou se trouve l'espèce sélectionnée

nom de l'espèce : COSCINODISCUS EXCAVATUS

numéro leg	numéro site	code forage	épaisseur de sédiment (m.)
16	161	A	63.42
16	163		0.00
17	167		55.66
30	289		39.51
31	292		18.56
41	366		11.88
41	369	A	29.90
7	64		0.00
7	65		9.02
8	69	A	18.00

BAS(L2) HAUT(L3) RETOUR(L4)

Figure 41 - Calcul de l'extension verticale de *Coscinodiscus excavatus* dans les sites du D.S.D.P..

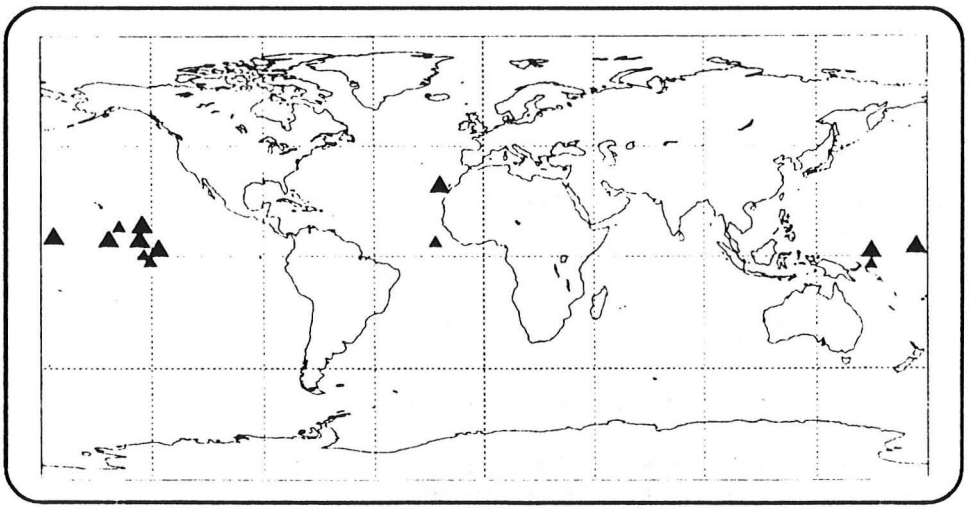


Figure 42 - "Occurrence" de *Coscinodiscus excavatus* dans les sites du D.S.D.P..

- Corrélation des sites par la présence d'une espèce

Le terme de corrélation n'a ici aucune connotation biochronologique. Ce programme demande tout d'abord le nom d'une espèce fossile. Il recherche le FAD et le LAD de cette espèce dans chacun des sites du D.S.D.P. ainsi que les âges géologiques correspondants. Il trace ensuite pour chacun des sites concernés un diagramme figurant l'extension verticale de l'espèce calée sur une échelle géologique (la correspondance entre les âges absolus et les limites d'étages est définie dans la documentation de la base de données du D.S.D.P.). Prenons, là encore, le cas de *Coscinodiscus excavatus* (figure 43).

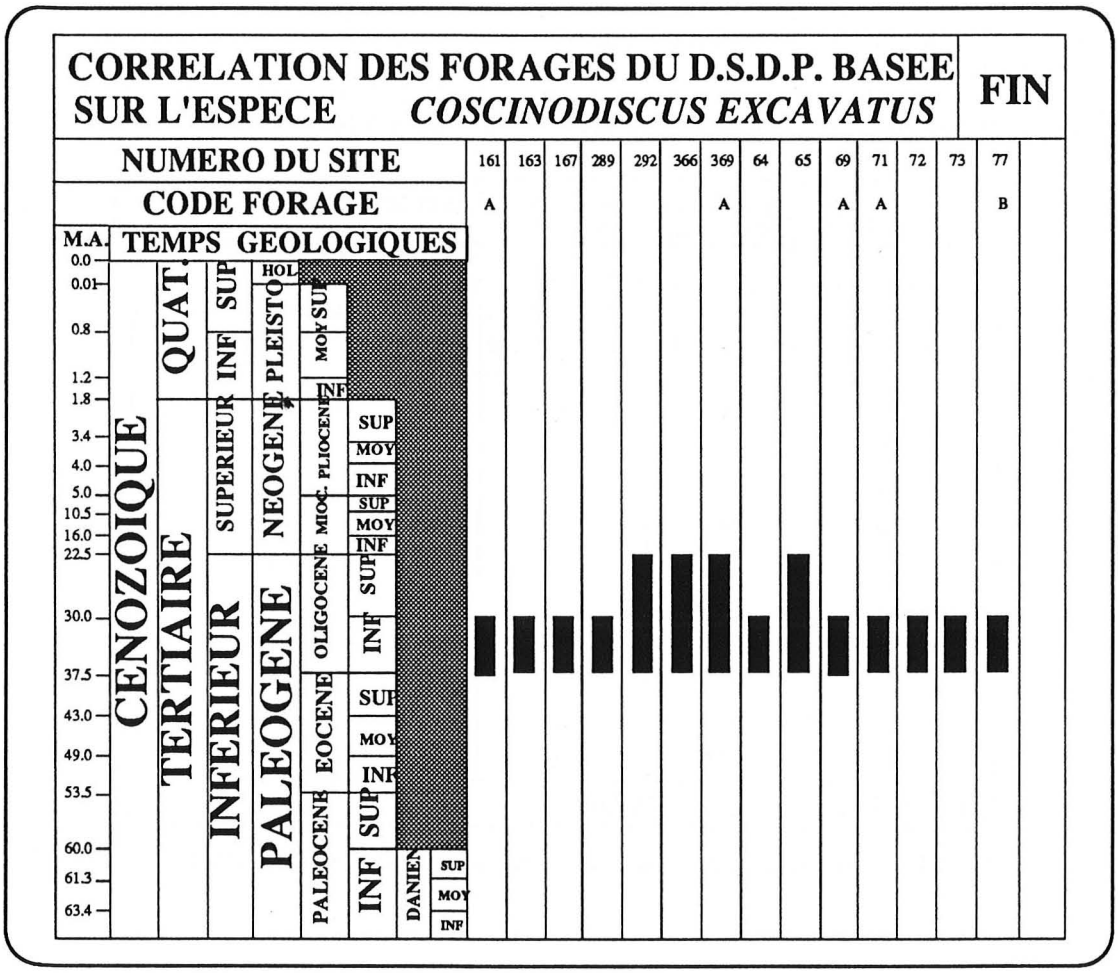


Figure 43 - "Corrélation" des sites du D.S.D.P. basée sur la présence de *Coscinodiscus excavatus.*

- Abondance d'une espèce dans les forages du D.S.D.P.

Le programme 'ABONDANCE' demande tout d'abord à l'utilisateur d'entrer le nom d'une espèce fossile. Pour chaque forage et chaque profondeur où cette espèce est représentée le programme fournit son abondance. Celle ci, dans la plupart des cas est codée par une lettre :

- T pour traces (moins de 5%, on l'estime à 3% dans les calculs, comme le suggère la documentation du D.S.D.P. sur CD-ROM),
- R pour rare (de 5% à 10%, on l'estime à 7% dans les calculs),
- F pour peu (il n'y a pas d'indications sur le pourcentage correspondant à ce code dans la documentation du D.S.D.P.; j'assimile ce code, pour ma part, au code R et donc, en pourcentage, à 7%),
- C pour commun (de 10% à 30%, on l'estime à 20% dans les calculs),
- P pour présent (là encore, il n'y a pas d'indications sur la valeur numérique de ce code; je l'assimile au code C et donc, à 20%),

- A pour abondant (de 30% à 60%, on l'estime à 45% dans les calculs),
- D pour dominant (de 60% à 100%, on l'estime à 80%).

Dans certains cas l'abondance relative d'une espèce est indiquée par un pourcentage.

Le principal intérêt de cette application est de vérifier la validité des FAD et des LAD d'une espèce et de détecter les remaniements éventuels dans un forage. En effet, le FAD ou le LAD d'une espèce sera d'autant plus significatif que l'abondance relative de cette espèce sera élevée dans l'échantillon correspondant au FAD ou au LAD.

Cherchons maintenant l'abondance de *Coscinodiscus excavatus* pour chacun des échantillons des sites où cette espèce est représentée (figure 44).

ABONDANCE DANS LES FORAGES DU D.S.D.P. DE *COSCINODISCUS LEWISIANUS*								SUITE
SITE FORAGE	158	166	173	206	266	329	338	
ABONDANCE T : - de 5 % R : 5 à 10 % C : 10 à 30 % A : 30 à 60 % D : 60 à 100 % F : RARE P : PRESENT	198.10 R	14.51 P 20.62 P 22.51 P 66.81 P 69.85 P 89.22 P 91.68 P 105.10 P	234.21 F 236.63 F 237.06 R 238.06 R 239.60 R 244.65 R 245.06 F 246.56 R 248.06 R 249.10 F 253.51 R 254.45 R 256.06 R 257.10 F 262.56 R 264.08 R 265.10 R 273.10 R	0.00 A 8.00 C	196.61 R 201.11 R 202.61 R 204.11 R 215.91 C 217.11 C 217.71 C 218.61 C 220.11 C 257.61 R 370.29 P	560.12 R	77.61 R 78.09 R 79.05 R 87.10 R 98.10 R 106.06 R 107.56 R 108.01 R 115.56 R 117.91 R 174.10 R 184.91 R	CLIQUER DANS SUITE

Figure 44 - Abondance de *Coscinodiscus excavatus* dans les sites du D.S.D.P..

- Biochronologie quantitative

Ce programme est le résultat de l'adaptation du programme de Guex (utilisant la méthode des associations unitaires) à la station Sun d'une part et à la base de données du D.S.D.P. d'autre part.

Il est maintenant possible de réaliser un fichier d'entrée pour le programme de Guex à partir d'un codage automatique des données paléontologiques de la base de données du D.S.D.P..

Je décrirai la méthode des associations unitaires (ainsi que son informatisation sur station Sun) par la suite lorsque je l'utiliserai.

2 - Les applications sur plusieurs groupes fossiles

Il peut s'avérer intéressant de travailler sur plusieurs groupes fossiles simultanément notamment en ce qui concerne la biochronologie quantitative.

Les programmes s'exécutent plus rapidement que dans le cas précédent car nous travaillons avec des index et, qui plus est, sur une base de données réduite.

Un menu (figure 45) propose plusieurs applications.

a - Occurrence d'une espèce dans les forages du D.S.D.P.

Ce programme est équivalent à celui décrit précédemment .

Il s'applique maintenant à environ 700 espèces fossiles sélectionnées parmi toutes les espèces de la base de données du D.S.D.P.. Elles sont considérées comme ayant une bonne valeur biochronologique. La liste des 700 espèces peut être examinée en validant l'option 'ESPECE 1'.

b - Recherche des FAD et des LAD d'une espèce

Là encore il s'agit du même programme que celui décrit ci-dessus. Il s'applique là aussi à environ 700 espèces de radiolaires, nannofossiles calcaires, diatomées et foraminifères planctoniques.

Opérations sur environ 700 espèces fossiles significatives du Cénozoïque
Ces applications portent sur des radiolaires, des foraminifères planctoniques, des diatomées et des nannofossiles. Allez dans 'INFORMATION' pour plus de renseignements.

* ESPECE 1	: RETIRE LES NOMS DES 700 ESPECES
* BIOCHRON. 1	: BIOCHRONOLOGIE QUANTITATIVE EN SELECTIONNANT LES ESPECES ET LES SITES DANS DES TABLEAUX
* BIOCHRON. 2	: BIOCHRONOLOGIE QUANTITATIVE EN SELECTIONNANT LES ESPECES DANS UN TABLEAU ET LES SITES SUR CARTE
* OCCURRENCE	: OCCURRENCE D'UNE ESPECE DANS TOUS LES SITES AVEC SON EXTENSION VERTICALE SUR UNE CARTE
* FAD/LAD	: FAD ET LAD D'UNE ESPECE DANS LES SITES ('FAD/LAD')
* EPAISSEURS	: CALCUL DE L'EPAISSEUR ENTRE 2 EVENEMENTS BIOSTRATI AVEC CONTOURAGE SUR UNE CARTE D'ISOEPAISSEURS

Opérations sur environ 200 espèces fossiles significatives dans la détermination des zones du Cénozoïque (Radiolaires, Diatomées, Foraminifères planctoniques et Nannofossiles calcaires).

* ESPECE 2	: RETIRE LES NOMS DES 200 ESPECES
* BIOCHRON. 3	: BIOCHRONOLOGIE QUANTITATIVE EN SELECTIONNANT LES ESPECES ET LES SITES DANS DES TABLEAUX

* INFORMATIONS
* ARRET

Tapez la touche F2 pour choisir une option dans le menu.

ESPECE 1(L2) BIOCHRON. 1(L3) BIOCHRON. 2(L4) OCCURRENCE(R1) >

Figure 45 - Menu des applications sur plusieurs groupes.

c - Calcul des épaisseurs entre deux événements biostratigraphiques (tracé de cartes d'isopaques)

Ce programme demande à l'utilisateur d'entrer le nom de deux espèces fossiles et de spécifier si l'on veut travailler sur leurs FAD ou leurs LAD. Il faut, en tout état de cause, choisir deux événements biostratigraphiques.

Choisissons, par exemple, de sélectionner les deux événements biostratigraphiques correspondants au FAD de *Pseudoemilina lacunosa* et au LAD d' *Emiliana huxleyi* (figure 46).

Le programme va extraire ces informations dans tous les forages du D.S.D.P. où ces deux espèces ont été reconnues pour calculer, pour chacun d'eux, l'épaisseur de sédiment comprise entre les deux événements biostratigraphiques choisis.

Une projection cartographique mondiale se dessine à l'écran dans laquelle chaque forage contenant les deux espèces est figuré par une étoile.

Cette carte possède un menu (au bas de l'écran) permettant de choisir entre trois océans (les océans Atlantique, Pacifique et Indien). Le choix d'une des options de ce menu aboutit à une carte de contourage (les contours correspondant à des courbes d'isoépaisseurs ou isopaques de sédiments entre les deux événements biostratigraphiques) pour l'océan choisi (figures 47, 48, 49).

Chaque carte apporte des informations multiples :
- la localisation (figurée par des croix) des sites intervenant dans l'étude avec la valeur (ici l'épaisseur de sédiment entre les deux événements biostratigraphiques) qui leur est attribuée,
- le tracé des courbes de même valeur suivant une méthode d'estimation mathématique (estimation par triangulation).

Ce programme possède un double intérêt : il permet de visualiser l'épaisseur d'une zone (par exemple si celle-ci est définie par deux événements biostratigraphiques connus) et par conséquent d'estimer les taux d'accumulation en un lieu et durant une tranche de temps donnée lorsque les deux événements biostratigraphiques sont parfaitement datés. Il s'applique aux 700 espèces utilisées dans les deux programmes précédents.

Vous devez entrer le nom de 2 espèces fossiles (l'espèce 1 et l'espèce 2). Il faudra ensuite choisir entre le FAD et le LAD de l'espèce 1 puis entre le FAD et le LAD de l'espèce 2.
Le FAD ou le LAD de l'espèce 1 doit être sous le FAD ou le LAD de l'espèce 2.
Le programme calculera ensuite l'épaisseur de sédiment comprise entre les événements (FAD ou LAD) de l'espèce 1 et de l'espèce 2 pour chaque forage du D.S.D.P. où ces 2 événements sont représentés en même temps.

ESPECE 1 :

NOM DE L'ESPECE : PSEUDOEMILIANA LACUNOSA

Répondre O (pour Oui) dans la case désirée et N (pour non) dans l'autre :

FAD ? : O LAD ? : N

ESPECE 2 :

NOM DE L'ESPECE : EMILIANA HUXLEYI

Répondre O (pour Oui) dans la case désirée et N (pour non) dans l'autre :

FAD ? : N LAD ? : O

Fin de la sélection (L2)

Figure 46 - Sélection de deux événements biostratigraphiques (le FAD de *Pseudoemiliana lacunosa* et le LAD d' *Emiliana huxleyi*).

Le tracé des cartes d'isopaques permet seulement d'estimer globalement les épaisseurs de dépôts dans un bassin mais ne peuvent en rien prouver l'existence de phénomènes érosifs ou de resédimentation.

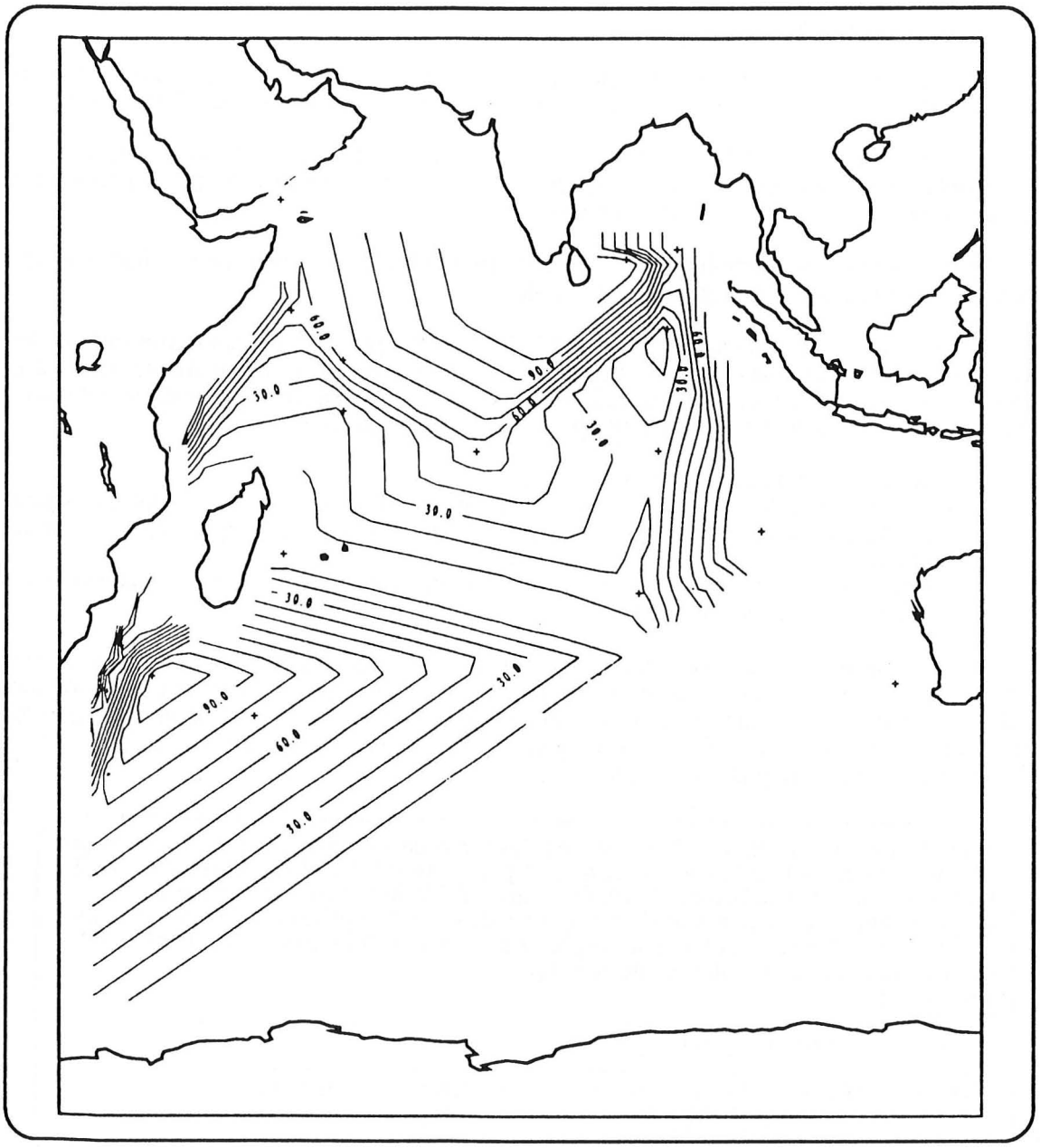


Figure 47 - Tracé des isopaques dans l'océan Indien (correspondant à "l'épaisseur" de la zone NN11 définie entre le FAD et le LAD de *Discoaster quinqueramus*.

d - Biochronologie quantitative en choisissant les espèces dans un tableau et les forages sur une carte

Lorsque l'on ne travaille que sur un groupe fossile il n'est pas possible de lancer le programme de biochronologie quantitative en choisissant des espèces au préalable. Dans ce cas, on ne peut que choisir les forages. C'est seulement ensuite que l'on peut éliminer des espèces.

UNIVERSITÉ DE LYON I
C.S.T.
GÉOLOGIE

Ici, au contraire, le programme ('BIOCHRON 2') demande de choisir dans un tableau les espèces (parmi 700) puis les sites de l'étude sur une carte (en sélectionnant une portion de la carte mondiale).

e - Biochronologie quantitative en choisissant les espèces et les sites dans un tableau

Le programme ('BIOCHRON 1') est comparable au programme précédent sauf que, dans ce cas on sélectionne les sites de l'étude non plus sur une carte mais dans un tableau.

Le programme BIOCHRON 3' est en tout point similaire au programme 'BIOCHRON 1' mais il s'applique à environ 200 espèces (les plus "importantes" d'un point de vue biostratigraphique). Il est donc plus rapide. La liste des 200 espèces peut être visualisée en validant l'option 'ESPECE 2'.

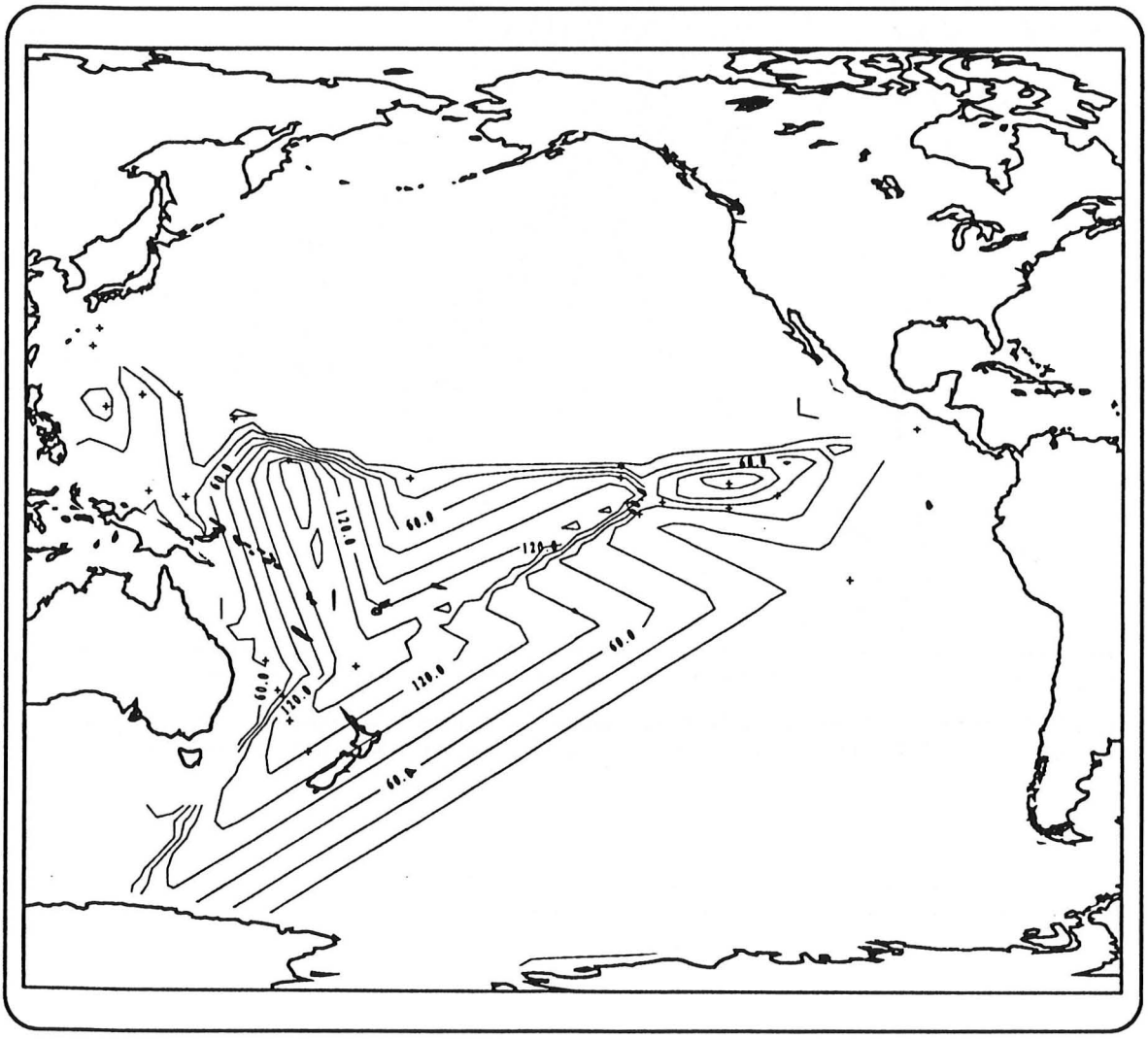


Figure 48 - Tracé des isopaques dans l'océan Pacifique (correspondant à "l'épaisseur" de la zone NN6 définie entre le FAD de *Discoaster kugleri* et le LAD de *Sphenolithus heteromorphus*).

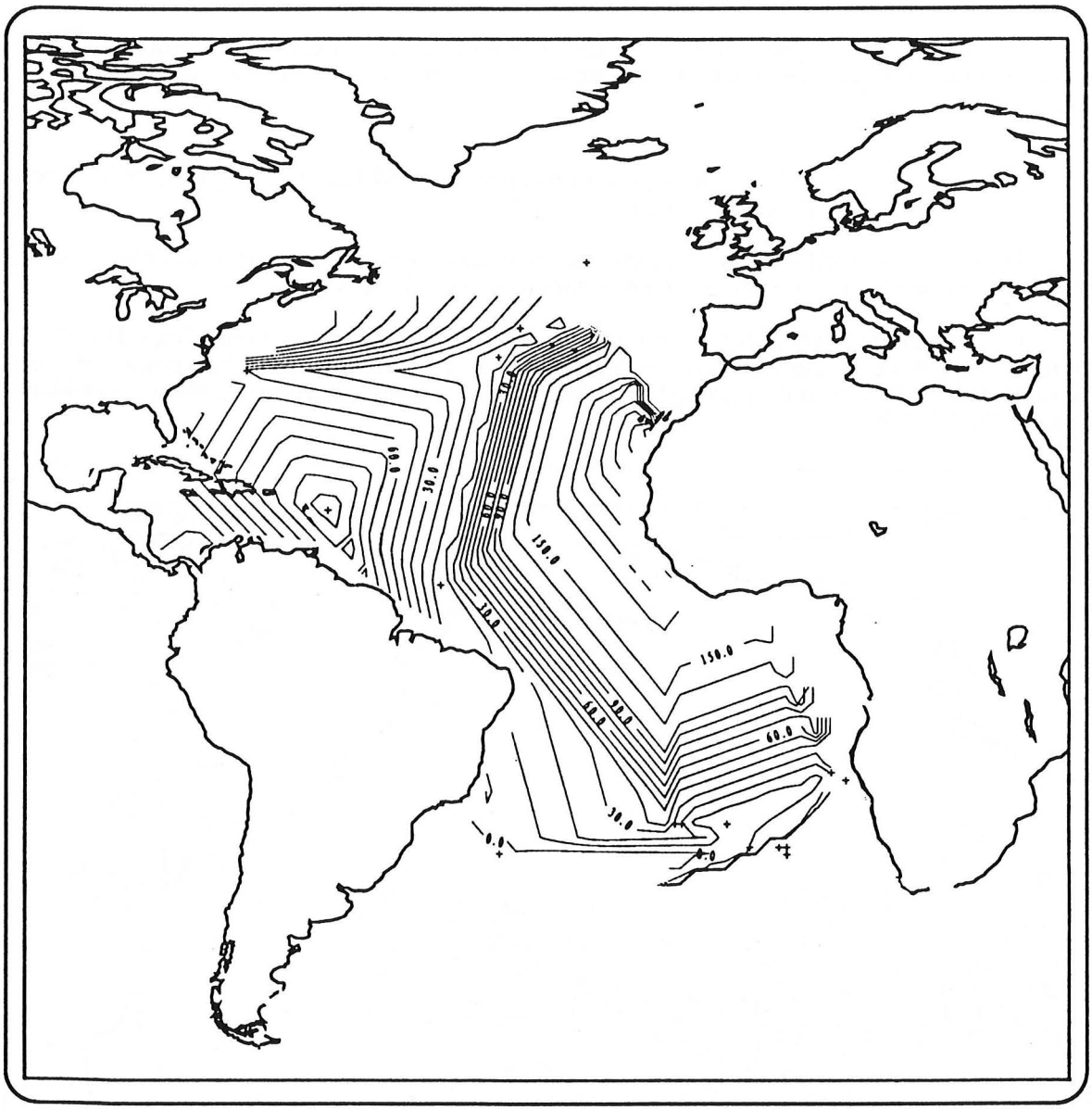


Figure 49 - Tracé des isopaques dans l'océan Atlantique (correspondant à "l'épaisseur" de la zone NN14 définie entre le FAD de *Discoaster asymmetricus* et le LAD de *Amaurolithus tricorniculatus*).

DEUXIEME PARTIE

LA SEDIMENTATION MARINE NEOGENE

Implications paléocéanographiques

Cette deuxième partie se compose de deux chapitres.

Dans le troisième chapitre nous effectuerons une étude détaillée de la sédimentation mondiale durant le Néogène. Nous en chercherons les grandes tendances et comparerons les résultats obtenus avec les études précédentes.

Nous essayerons dans la seconde partie du troisème chapitre de rechercher à travers les phénomènes paléoclimatiques, paléogéographiques ... les causes possibles ayant pu affecter la sédimentation durant le Néogène.

Nous terminerons cette partie (quatrième chapitre) par une étude biochronologique (utilisant la méthode des associations unitaires) que nous essayerons de corréler avec l'étude précédente.

CHAPITRE III : La sédimentation marine néogène : implications paléocéanographiques et paléoclimatiques

I - Introduction

Jusque dans les années 1960 les géologues imaginaient que les grands fonds océaniques étaient calmes et que la sédimentation n'y était jamais interrompue. Lorsqu'en 1968 débuta le projet du Deep Sea Drilling Project (D.S.D.P), on pensait décrire au mieux l'histoire des océans depuis 180 Ma par l'étude de séries lithologiques stratigraphiquement complètes.

Près de deux décennies et 624 sites de forages ont apporté la preuve que les séries complètes sont rares et que la sédimentation suit des rythmes dont la logique peut être recherchée dans les phénomènes paléogéographiques, paléoclimatiques ou les paléocirculations océaniques. Les lacunes de sédimentation (ou hiatus sédimentaires) sont fréquentes : leur présence peut être mondialement observée ou au contraire, à cause de conditions particulières, locale. Un hiatus est une absence de dépôt dans une séquence sédimentaire pendant une période donnée. Ces hiatus peuvent résulter de l'action érosive d'un courant de fond, de la dissolution des carbonates ou de la silice biogène par des eaux profondes corrosives ou encore d'une faible productivité de surface (Van Andel *et al.*, 1975). De nombreux travaux ont permis de recenser ces hiatus pour le Cénozoïque (Moore *et al.*, 1978; Barron et Keller, 1982; Keller et Barron, 1983, 1987) et d'en chercher le "moteur" dans des phénomènes paléocéanographiques globaux.

Le but de ce chapitre est d'étudier, à partir des données du D.S.D.P. et à l'aide des programmes de l'application PALEODATA la sédimentation marine néogène et d'en chercher les grandes tendances pour essayer de les corréler avec des phénomènes paléocéanographiques globaux (fluctuation des phénomènes climatiques, variations eustatiques dans l'océan mondial...) ou au contraire locaux (phénomènes tectoniques, circulations océaniques particulières...). Nous nous intéresserons en premier lieu aux variations des taux d'accumulations sédimentaires dans de nombreux sites du D.S.D.P. dans l'océan Atlantique, l'océan Pacifique et l'océan Indien au cours du Néogène et tout particulièrement aux moments où sont observées des variations de ces taux d'accumulations. Nous chercherons ensuite s'il est possible d'assimiler les fluctuations des taux d'accumulations avec des variations réelles de la sédimentation. Pour cela, nous procéderons à la décompaction de la colonne sédimentaire pour certains sites du D.S.D.P.. Nous conclurons cette étude des taux d'accumulations par une synthèse qui aura pour but de définir des cycles sédimentaires reconnus dans l'océan Atlantique, l'océan Pacifique et l'océan Indien. Nous essayerons de définir, dans la deuxième partie de cette étude, à partir de l'abondance de certaines espèces caractéristiques, des cycles climatiques dans différentes parties de l'océan mondial (Pacifique est, Pacifique ouest, Atlantique nord et océan Indien), et nous en chercherons les effets sur la sédimentation néogène ainsi que sur les paléocirculations océaniques. Nous terminerons ce chapitre en essayant d'intégrer les résultats obtenus dans un schéma eustatique global. Ces résultats seront progressivement comparés avec ceux émanant d'études précédentes.

II - La sédimentation marine néogène - Ses caractéristiques

A - Recherche des taux et des vitesses d'accumulation

1 - Méthode d'étude

On utilise les événements biostratigraphiques datés correspondant à des apparitions ou FAD ou à des disparitions ou LAD d'espèces de diatomées, de radiolaires, de foraminifères planctoniques et de nannofossiles calcaires durant le Néogène. Les datations de ces événements sont

basées sur celles des anomalies magnétiques du Néogène. Barron (Barron et *al.*, 1985) propose un découpage très fin du Miocène (avec une résolution d'environ 100 000 ans) à partir des 175 événements biostratigraphiques datés d'espèces de diatomées, de radiolaires, de foraminifères planctoniques et de nannofossiles calcaires parmi les plus intéressantes d'un point de vue biostratigraphique. Bon nombre d'entre elles figurent d'ailleurs dans la définition des zones ou des sous-zones du Miocène (Bolli *et al.*, 1985).

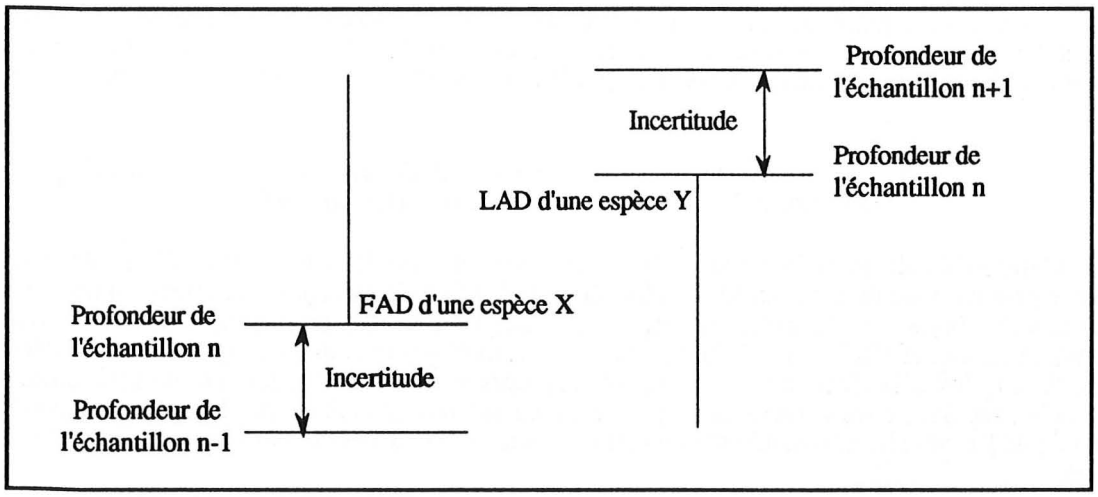


Figure 50 - Calcul des incertitudes sur les profondeurs des FAD et des LAD.

J'utilise pour ma part une synthèse des "nouvelles" datations de Berggren (Berggren, 1985) auxquelles j'ajoute d'anciennes de ses datations non modifiées (Berggren, 1984). C'est ainsi que les événements biostratigraphiques datés utilisés dans cette étude (annexe D) portent sur les apparitions et/ou les disparitions de 143 espèces (29 diatomées, 48 foraminifères planctoniques, 40 nannofossiles calcaires et 26 radiolaires). Les programmes de l'application PALEODATA permettent d'extraire les LAD et les FAD de ces 143 espèces dans tous les forages du D.S.D.P.. Si l'on peut considérer que les âges attribués à ces FAD et à ces LAD sont justes il n'en est pas de même pour les profondeurs auxquelles on les trouve. En effet, les profondeurs de ces événements biostratigraphiques ne sont qu'apparentes et il est, de ce fait, nécessaire de tenir compte pour chacune d'elles de l'incertitude qui est directement liée à la densité de l'échantillonnage. Pour la profondeur du FAD d'une espèce dans un forage donné l'incertitude sera égale à la profondeur de l'échantillon directement situé sous le FAD apparent à laquelle on soustrait celle du FAD apparent. Au contraire, pour la profondeur du LAD d'une espèce l'incertitude sera égale à la profondeur du LAD apparent à laquelle on soustrait celle de l'échantillon situé au dessus (figure 50).

Connaissant les profondeurs des événements biostratigraphiques choisis pour cette étude (avec leurs incertitudes) pour chaque forage du D.S.D.P. et les âges qui leur sont attribués il est possible de les reporter sur un diagramme Age=f(Profondeur). De ce diagramme pourront être déduites deux courbes l'une représentant les taux d'accumulation l'autre les vitesses d'accumulation. Comme le signale Schaaf (1984), il est préférable de parler d'accumulation plutôt que de sédimentation. Compte tenu des nombreux facteurs pouvant agir sur un sédiment depuis le moment de son dépôt (diagenèses précoce ou tardive, compaction...) le taux d'accumulation ne reflète pas forcément la réalité du taux de sédimentation.

J'ai utilisé, pour obtenir ces courbes une méthode d'approche empirique permettant d'éliminer les points manifestement "extravagants" (sans doute imputables à des remaniements ou peut-être à des erreurs de détermination...) suivie d'une méthode mathématique pour le tracé des courbes. Cette méthode mathématique connue sous le nom d'ajustement cubique (Cubic spline), permet à partir de n points, de tracer une courbe constituée d'une suite de polynômes de troisième degré tout en tenant compte de l'incertitude portée sur ces n points.

a - L'élimination des points "anormaux"

Le programme "Age-Depth Plot" (version 1.4.1) de Lazarus (écrit en Basic pour tout ordinateur de la gamme Macintosh) permet de reporter des points sur un diagramme Age=f(Profondeur) en autorisant des incertitudes sur les profondeurs puis de tracer une courbe passant par ces points (ou près de ces points suivant le facteur de tension appliqué à la courbe). Les points reportés sur le graphique ont des figurés différents en fonction du groupe fossile représenté. Il est possible par cette méthode d'approche d'éliminer les points les plus écartés de la courbe qui, par la suite, rendraient impossibles les tracés des courbes de taux et de vitesse d'accumulation.

b - Le tracé des courbes de taux et de vitesse d'accumulation par la méthode de l'ajustement cubique (Cubic spline)

Cette méthode mathématique utilisée par Schaaf (1984) a le mérite d'être objective. L'ajustement cubique de n points de coordonnées Xn, Yn fournit une courbe continue composée de segments de polynômes du troisième degré telles que les dérivées premières et secondes soient également continues (Reinsch, 1967). La courbe constituée par la suite de polynômes de troisième degré illustre les taux d'accumulation (en mètres) alors que la dérivée première de cette suite de polynômes représente les vitesses instantanées d'accumulation (en mètres par Ma). Comme pour la méthode de Lazarus il est possible d'effectuer un lissage des courbes en leur affectant un facteur de lissage.

2 - Analyse des taux et des vitesses d'accumulation

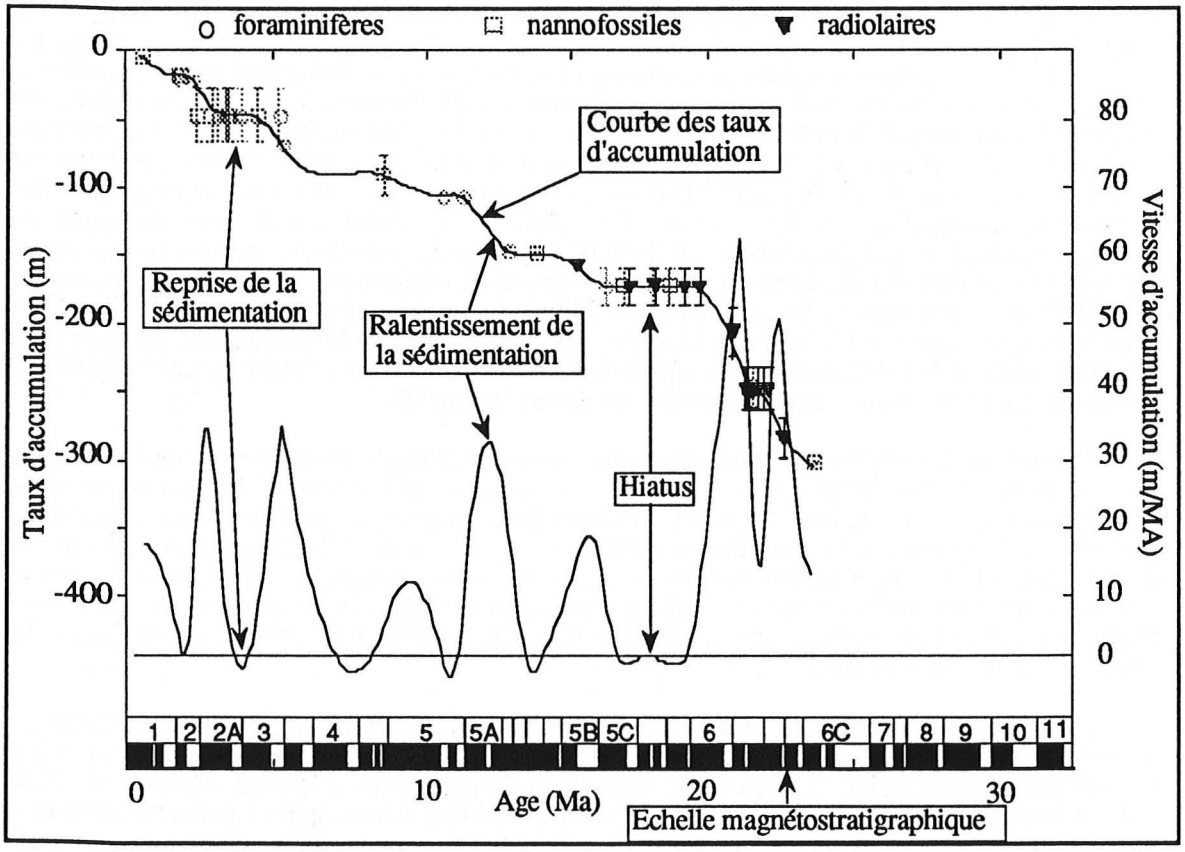


Figure 51 - Signification des courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation.

Les âges figurant sur les diagrammes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation sont indiqués par une échelle magnétostratigraphique, celle élaborée par Berggren (1985). Une échelle magnétostratigraphique est basée sur le principe de l'extension des fonds océaniques au niveau de certaines rides médioocéaniques durant les temps géologiques. La construction d'échelles chronologiques utilise le fait que les polarités successives du champ magnétique terrestre sont enregistrées dans les sédiments et dans les zones d'accrétion océanique. Il suffit de corréler ces anomalies magnétiques avec des événements datés pour construire un référentiel daté, l'échelle magnétostratigraphique, qui peut être assimilée à une échelle d'âges absolus (Hailwood, 1989).

La courbe des taux d'accumulation à une pente d'autant plus forte que l'accumulation est importante (figure 51). Cette courbe présente des convexités positives correspondant à des périodes où la sédimentation devient plus conséquente (la convexité de la courbe des vitesses d'accumulation instantanée est négative et correspond bien à une reprise de la sédimentation) et des convexités négatives ce qui indique une sédimentation devenant plus faible (ces convexités positives ou maximums de la courbe des vitesses d'accumulation instantanées indiquent bien un ralentissement de la sédimentation). Dans certains cas, les vitesses d'accumulation instantanées peuvent être négatives. Ces anomalies résultent du principe même de l'ajustement cubique. Elles ne constituent pas un inconvénient majeur (bien qu'il soit préférable de les atténuer en affectant à la courbe un facteur de lissage plus important) car elles caractérisent dans bien des cas une lacune sédimentaire. Dans ce cas, les taux et les vitesses d'accumulation peuvent être considérés comme nuls. Il sera intéressant, en plus des répartitions spatio-temporelles des lacunes sédimentaires, de repérer celles des maximums (ralentissements de la sédimentation) et des minimums (reprise de la sédimentation) de la courbe des vitesses d'accumulation instantanées pour essayer de trouver la logique des variations des rythmes sédimentaires au cours du Néogène et d'en chercher les causes possibles.

B - Résultats

FORAGE	POSITION	FORAGE	POSITION	FORAGE	POSITION
592	Pacif. sud	470	Pacif. nord	558	Atlant. nord
590 B	Pacif. sud	155	Pacif. nord	30	Atlant. nord
208	Pacif. sud	573 B	Pacif. nord	31	Atlant. nord
206	Pacif. sud	577	Pacif. nord	354	Atlant. nord
205	Pacif. sud	500	Pacif. nord	116	Atlant. nord
317 B	Pacif. sud	84	Pacif. nord	139	Atlant. nord
288	Pacif. sud	83 A	Pacif. nord	106 B	Atlant. nord
80 A	Pacif. sud	296	Pacif. nord	94	Atlant. nord
587	Pacif. sud	173	Pacif. nord	153	Atlant. nord
289	Pacif. sud	167	Pacif. nord	563	Atlant. nord
438 A	Pacif. nord	581	Pacif. nord	250 A	Océan Ind.
166	Pacif. nord	357	Atlant. sud	223	Océan Ind.
292	Pacif. nord	360	Atlant. sud	238	Océan Ind.
71	Pacif. nord	513 A	Atlant. sud	217	Océan Ind.
55	Pacif. nord	525 A	Atlant. sud	219	Océan Ind.
200	Pacif. nord	362	Atlant. sud	216	Océan Ind.
171	Pacif. nord	519	Atlant. sud	231	Océan Ind.
574 A	Pacif. nord	364	Atlant. sud	214	Océan Ind.
436	Pacif. nord	603	Atlant. nord	251 A	Océan Ind.
572 D	Pacif. nord	407	Atlant. nord	253	Océan Ind.
158	Pacif. nord	610	Atlant. nord	242	Océan Ind.
448	Pacif. nord	149	Atlant. nord	212	Océan Ind.
443	Pacif. nord	396	Atlant. nord	235	Océan Ind.
459 B	Pacif. nord	608	Atlant. nord	265	Océan Ind.
65	Pacif. nord	391 A	Atlant. nord		

Figure 52 - Liste des forages étudiés.

Les courbes des taux d'accumulation et des vitesses d'accumulation instantanées ont été tracées pour 74 forages du D.S.D.P. (figures 52, 53, annexe A). Le choix de ces 74 sites parmi tous les sites du D.S.D.P. est guidé par le nombre important d'espèces biochronologiquement significatives que l'on y rencontre.

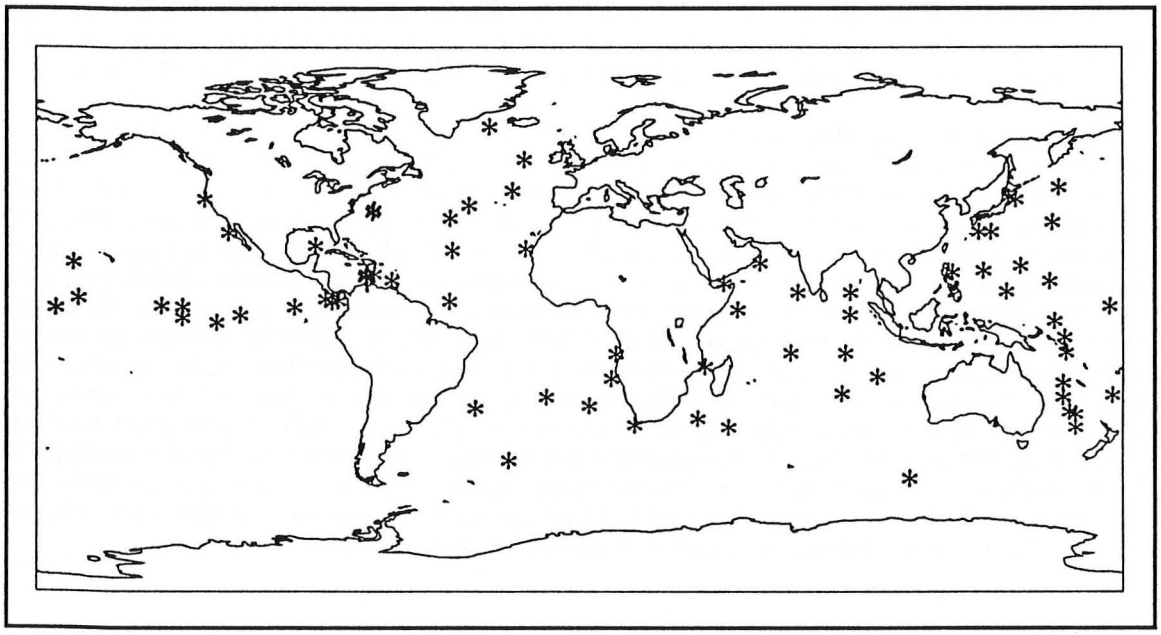


Figure 53 - Situation géographique des forages étudiés.

1 - La décompaction des sédiments

Tout sédiment subit, dès son dépôt, des phénomènes de compaction. La compaction d'un sédiment contribue à la diminution de son volume initial, à sa perte en eau et , le plus souvent, par la double action des diagenèses précoce et tardive à son induration. La compaction sédimentaire a des causes multiples (qui s'ajoutent la plupart du temps). Elle est due à des facteurs tels que la charge sédimentaire ou la charge de la colonne d'eau. Elle varie suivant la nature du sédiment (Brunet, 1981).

Les accumulations de sédiments que l'on peut observer dans les sites du D.S.D.P. ne reflètent pas forcément , compte tenu de la compaction, la réalité des dépôts sédimentaires. Il est vrai que la connaissance des flux sédimentaires (quantité de sédiments déposée par unité de surface et par unité de temps) est très importante, mais, dans le cadre de cette étude, seules les accélérations et les ralentissements de la sédimentation nous intéressent. Il est toutefois bon de vérifier que les inversions de vitesses d'accumulation (les maximums et les minimums des courbes de vitesses d'accumulation) correspondent bien à des inversions de vitesses de sédimentation. Nous chercherons, pour cela, les courbes de taux d'accumulation décompactées pour quelques uns des sites étudiés. La décompaction des sédiments s'effectue grâce à deux programmes (DEPOR pour DEpth-PORosity et BURSUB pour BURial SUBsidence écrits en FORTRAN 77) élaborés par Stam et ses collaborateurs (1987).

La porosité des roches est en général fonction de la compaction. Le programme DEPOR calcule une courbe faisant intervenir la porosité en fonction de la profondeur pour chacune des lithologies d'un forage en utilisant soit les mesures de porosités en fonction de la profondeur et de la lithologie soit les mesures de vitesses soniques en fonction de la profondeur. Pour chaque lithologie la courbe de la porosité en fonction de la profondeur qui est une fonction linéaire ou exponentielle est définie par deux paramètres F et C où F est la porosité initiale du sédiment avant sa compaction et où C représente la décroissance de F pour chaque mètre supplémentaire d'enfouissement.

Dans le cas d'une fonction linéaire la porosité est estimée par la fonction suivante :

Porosité = (F-C.Profondeur).

Dans le cas d'une fonction exponentielle la porosité est estimée comme suit :
Porosité = (F.exp (-C.Profondeur)).

Les paramètres F et C sont utilisés comme paramètres d'entrée dans le programme BURSUB.

Le programme BURSUB permet de calculer le taux d'enfouissement d'un horizon sédimentaire et de restaurer les épaisseurs initiales des sédiments en tenant compte de la charge sédimentaire et de la charge de la colonne d'eau. Nous n'avons pas tenu compte de ce dernier paramètre dans le cadre de cette étude. Nous considérons, dans ce cas, que la compaction est uniquement due à la charge sédimentaire.

Nous avons appliqué ces deux programmes à plusieurs sites du D.S.D.P.. Nous ne présenterons que les résultats concernant les sites 149 et 354 dans l'Atlantique nord (figures 54 et 55), le site 519 (figure 56) dans l'Atlantique sud, le site 214 (figure 57) dans l'océan Indien et les sites 65, 166 et 173 (figures 58, 59 et 60) dans le Pacifique nord. Le choix de ces sites est dicté avant tout par la continuité et l'abondance des mesures de porosités (je n'ai pas utilisé les données concernant les vitesses soniques). Celles ci doivent être aussi nombreuses que possible pour obtenir des résultats valables.

Nous avons volontairement placé les courbes décompactées sous les courbes de taux d'accumulation (figures 54 à 60). Il est ainsi plus aisé de les comparer. Plusieurs remarques s'imposent alors :

- comme nous pouvions nous y attendre, la compaction est d'autant plus élevée que la profondeur augmente (cela est très net dans le cas du site 519 pour lequel malgré des profondeurs d'enfouissement faibles la différence entre les courbes compactées et décompactées est relativement importante au contraire du site 214 pour lequel les courbes compactées et décompactées sont toujours très proches),
- les allures des courbes compactées et décompactées sont rigoureusement identiques ce qui signifie que les maximums et les minimums de la courbe des taux d'accumulation correspondent effectivement à des reprises et à des ralentissements de la sédimentation.

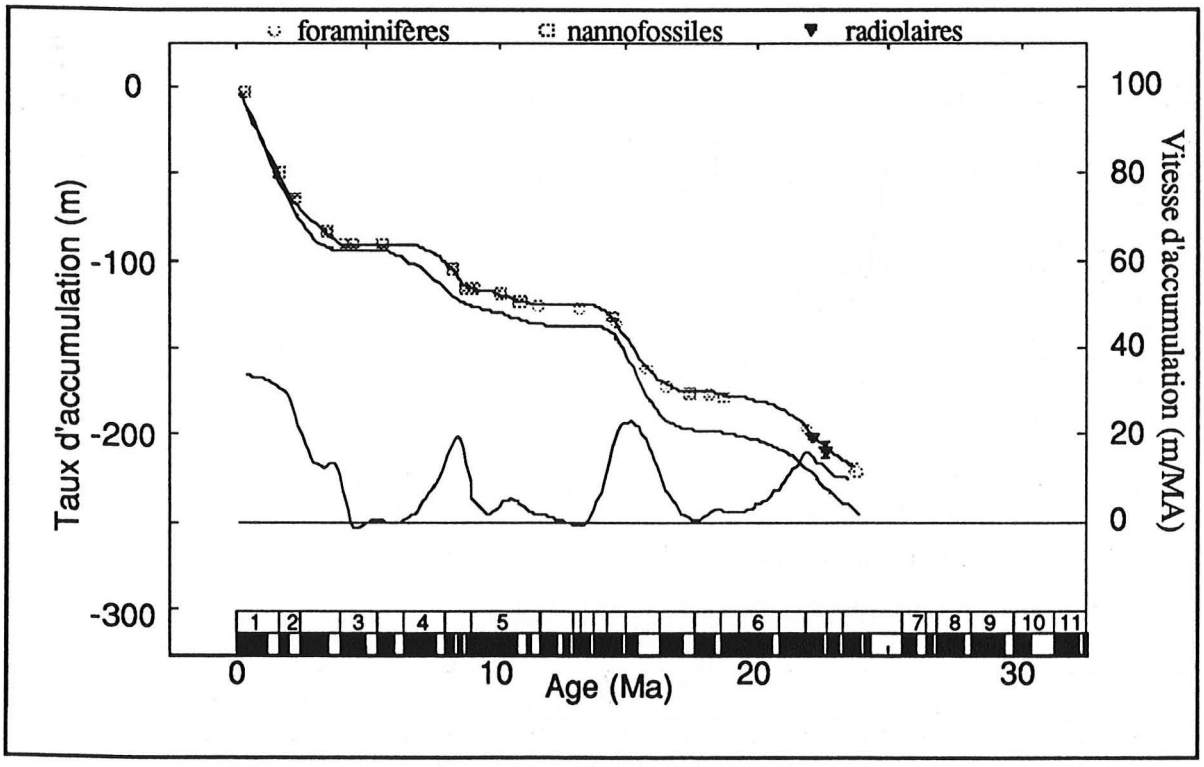


Figure 54 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 149 (Atlantique nord).

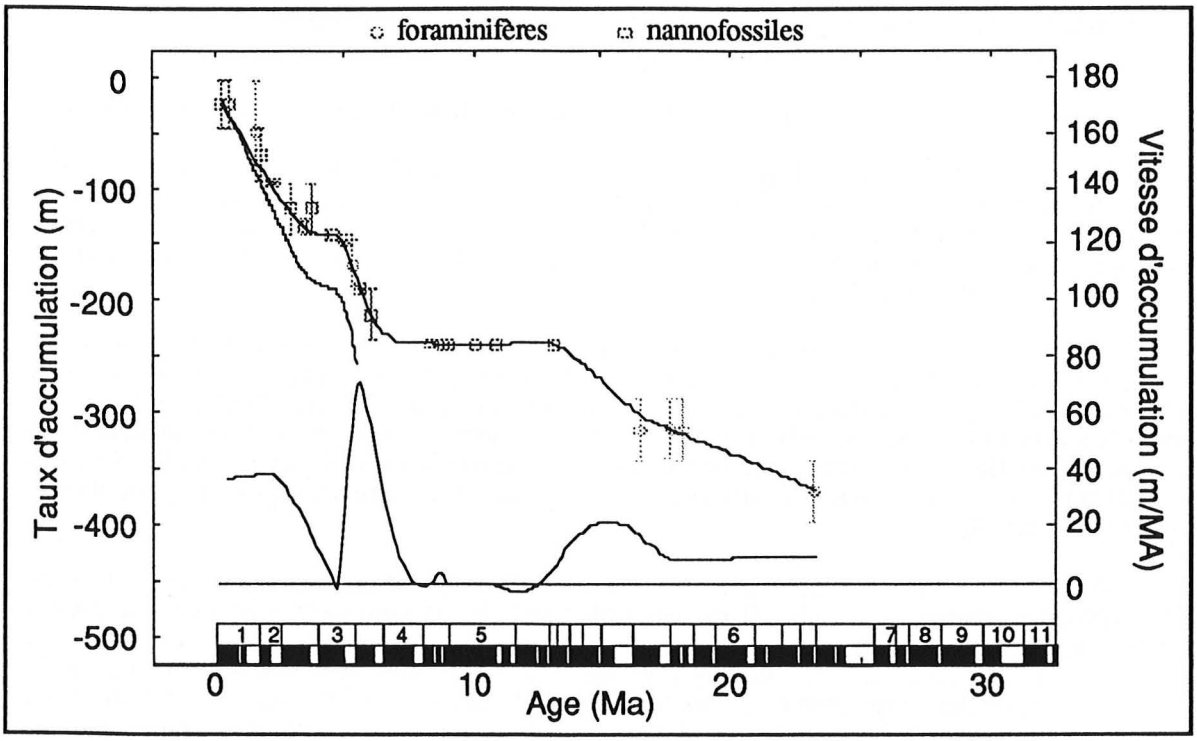


Figure 55 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 354 (Atlantique nord). La courbe décompactée est incomplète en raison des mesures de porosités discontinues pour ce site.

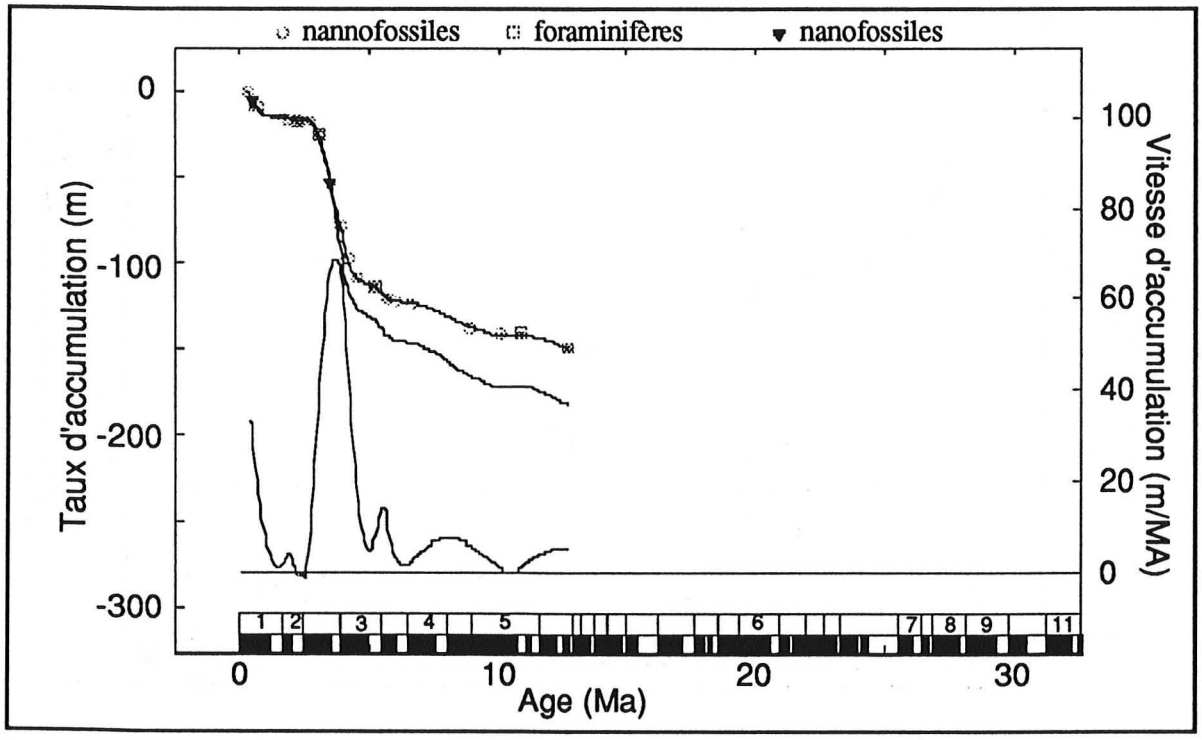


Figure 56 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 519 (Atlantique sud).

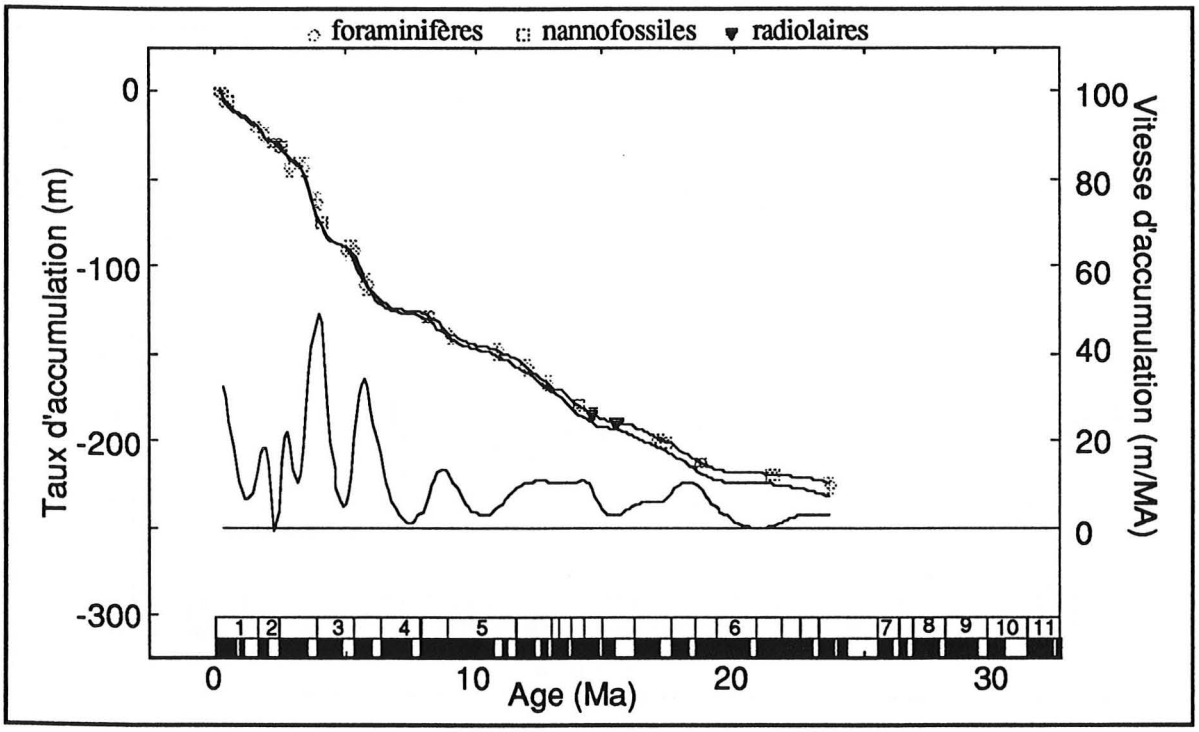


Figure 57 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 214 (océan Indien).

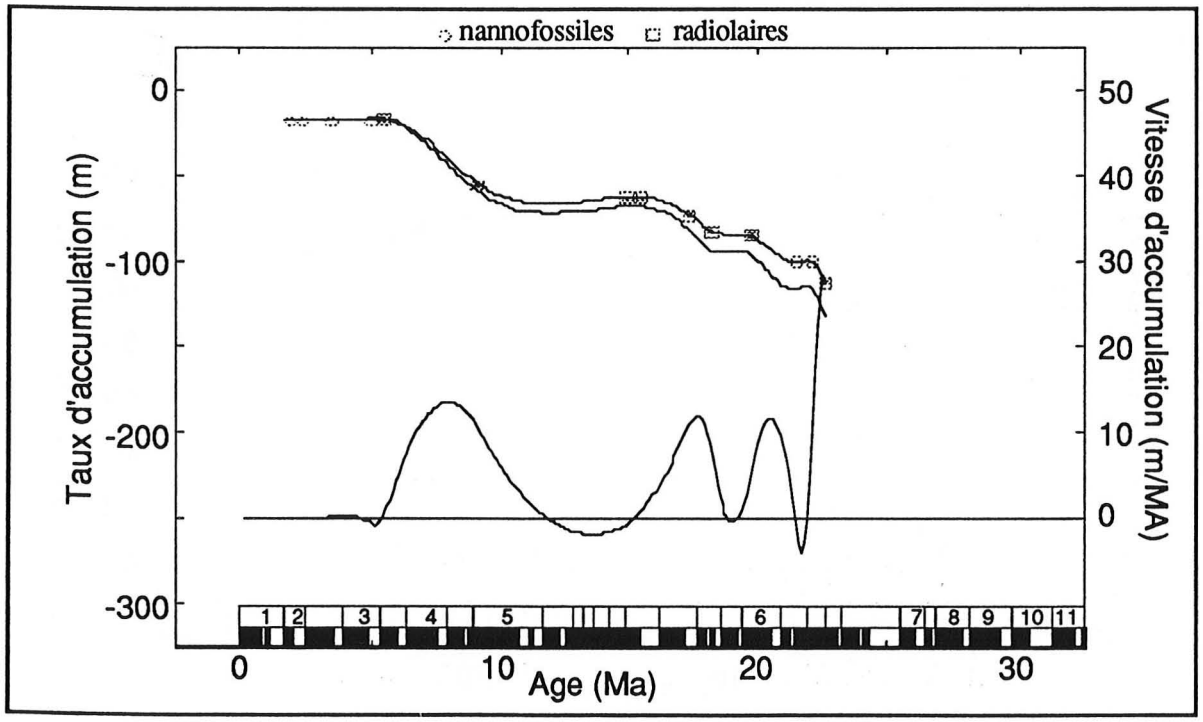


Figure 58 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 65 (Pacifique nord).

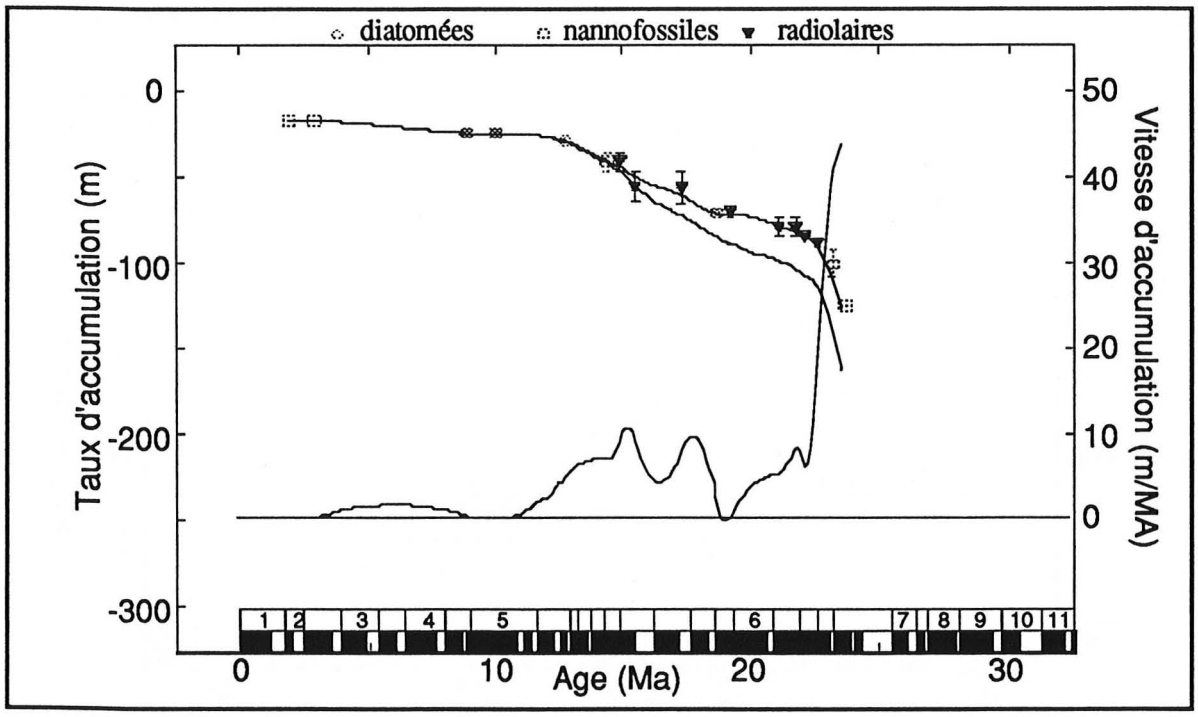


Figure 59 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 166 (Pacifique nord).

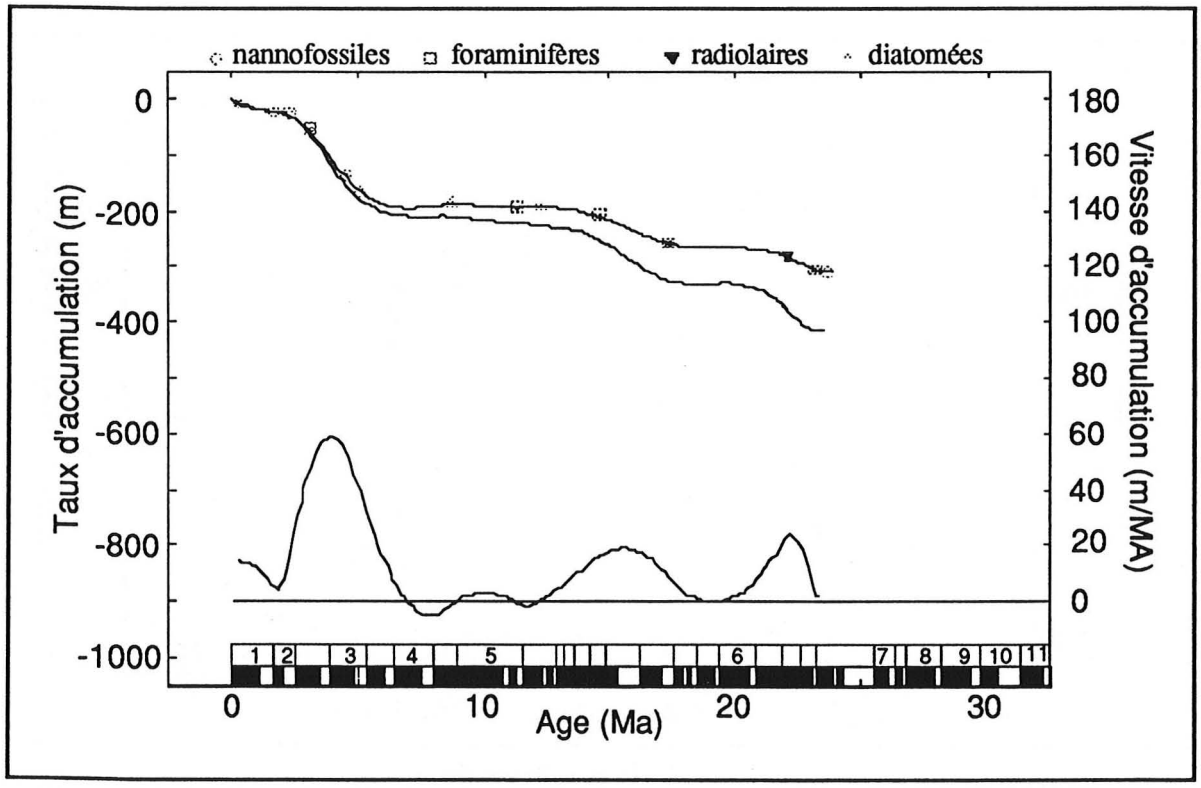


Figure 60 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 173 (Pacifique nord).

2 - Etude des courbes de taux et de vitesses instantanées d'accumulation

Préoccupons nous maintenant de l'allure générale des courbes de taux et de vitesses instantanées d'accumulation. Comme nous l'avons précisé précédemment seule l'allure et non l'amplitude de ces courbes nous intéresse.

Nous étudierons dans un premier temps la répartition spatio-temporelle des hiatus qui ont affecté la sédimentation durant le Néogène. Nous comparerons les résultats obtenus avec des études précédemment effectuées sur ce sujet. Nous terminerons l'étude des courbes de taux et de vitesses instantanées d'accumulation par une recherche de la répartition dans l'espace et dans le temps des minimums et des maximums de ces courbes dans le but de mettre en évidence des reprises et des ralentissements de la sédimentation néogène.

Nous avons, pour chacun des sites étudiés (figure 52) recherché graphiquement les maximums, les minimums et les hiatus qui affectent les courbes des vitesses instantanées d'accumulation tous les 0,4 Ma entre 0 et 24 Ma (annexe A). Nous avons donc, pour chacune de ces 60 périodes effectué l'inventaire des sites dans lesquels étaient détectés un maximum, un minimum ou un hiatus. Pour tous ces événements on note si le site appartient au domaine néritique (proche du continent) ou au contraire au domaine océanique franc (en dehors du plateau continental) ou bien à une zone de rifting ceci dans le seul soucis de comprendre leur répartition (la documentation accompagnant la base de données du D.S.D.P. sur CD-ROM est utile pour obtenir ces renseignements).

a - Recherche des hiatus à l'échelle mondiale

Nous avons calculé tous les 0,4 Ma deux coefficients ß et ∂ :

- ∂ est égal au nombre de hiatus détectés par tranche d'âge divisé par le nombre total de sites étudiés, il est d'autant plus élevé que le nombre de hiatus détectés est important,
- ß est égal au nombre de hiatus - le nombre de maximums divisé par le nombre total de sites étudiés (lors d'une période durant laquelle dominent les hiatus on peut penser que le nombre de maximums est peu important; dans le cas où le nombre d'observations est restreint, il peut être utile de considérer cet indice).

Les coefficients ß et ∂ sont d'autant plus élevés que le nombre de hiatus est important. L'information est évidemment plus riche pour les âges les plus récents. Le nombre de hiatus ou de points d'inflexion dans les courbes des vitesses instantanées d'accumulation est donc plus grand pour ces âges. Il est donc important dans le calcul des deux coefficients d'effectuer une division par le nombre total de sites étudiés pour être certain qu'un nombre faible de points d'inflexions ou de hiatus n'est pas lié tout simplement à un manque d'informations.

Dans le calcul du coefficient ß le nombre de maximums entre en jeu. On peut penser en effet que le nombre de hiatus est inversement proportionnel au nombre de maximums. Si les maximums sont sensés représenter un ralentissement de la sédimentation, ils signifient également que la sédimentation est conséquente à cet instant précis.

- Répartition spatio-temporelle des hiatus néogènes

Nous allons maintenant étudier l'évolution dans le temps de la valeur des coefficients ß et ∂ (figures 61 et 62). On peut noter, selon toute attente, que l'évolution des coefficients ß et ∂ est comparable en de nombreux points. Cependant, en ce qui concerne certaines périodes le coefficient ß apporte des informations supplémentaires et complète ainsi le coefficient ∂.

Les pics (figures 61 et 62) représentent des périodes durant lesquelles les hiatus sont les plus nombreux. Cherchons maintenant pour chacun de ces pics si les hiatus sont inféodés à une aire géographique restreinte ou si, au contraire ils présentent une répartition mondiale. Nous nous sommes efforcés, pour cela, de tracer une carte de répartition mondiale de ces hiatus tous les 0.4 Ma entre 0 et 24 Ma. Ceci représente 60 cartes. Aux vues de ces cartes et des figures 61 et 62, il est ainsi

possible de déterminer des périodes dominées par des hiatus mondialement reconnus. C'est ainsi que sept hiatus ont été définis sur une période allant de 20 Ma à l'actuel. Etant donné le manque d'informations au delà de 20 Ma nous n'avancerons aucune hypothèse quant à la période comprise entre 20 et 24 Ma.

Ces sept hiatus ont la répartition temporelle suivante :
- le hiatus n° 1 entre 2 et 2,8 Ma (figure 63),
- le hiatus n° 2 entre 4,8 et 5,2 Ma (figure 64),
- le hiatus n° 3 entre 6,8 et 7,6 Ma (figure 65),
- le hiatus n° 4 entre 10,4 et 10,8 Ma (figure 66),
- le hiatus n° 5 entre 12 et 12,4 Ma (figure 67),
- le hiatus n° 6 entre 13,2 et 13,6 Ma (figure 68),
- le hiatus n° 7 entre 17,6 et 19,2 Ma (figure 69).

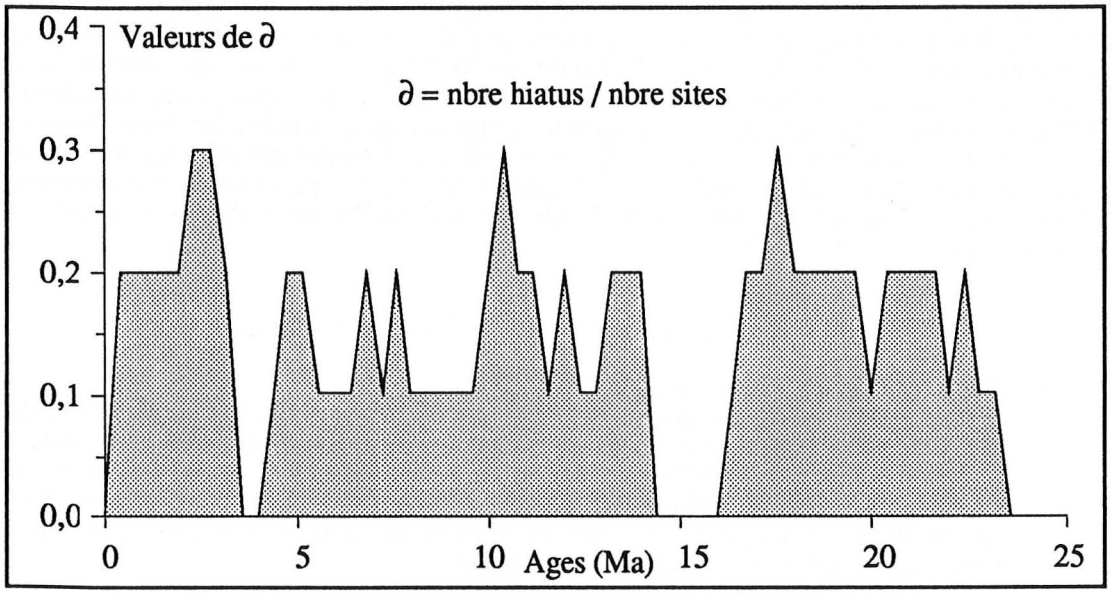


Figure 61 - Evolution de ∂ en fonction du temps (∂ est égal au nombre de hiatus - le nombre de maximums divisé par le nombre total de sites étudiés).

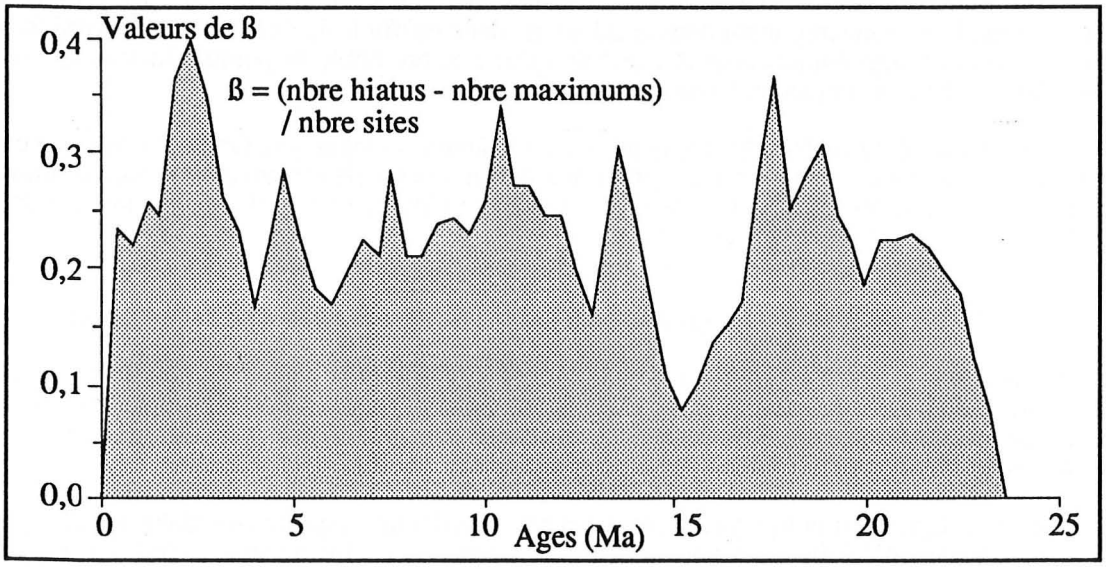


Figure 62 - Evolution de ß en fonction du temps (ß est égal au nombre de hiatus détectés par tranche d'âge divisé par le nombre total de sites étudiés).

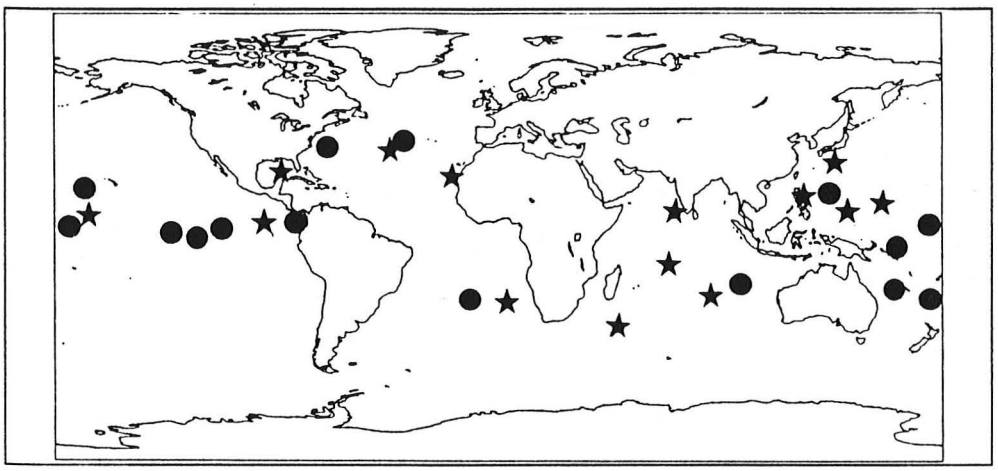


Figure 63 - Répartition géographique des hiatus entre 2 et 2,8 Ma (hiatus n°1). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 2 et 2,8 Ma.

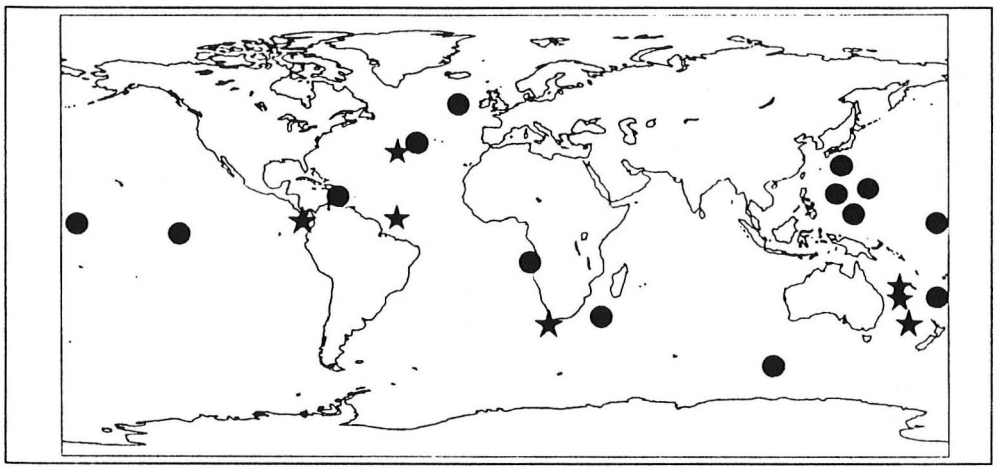


Figure 64 - Répartition géographique des hiatus entre 4,8 et 5,2 Ma (hiatus n°2). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 4,8 et 5,2 Ma.

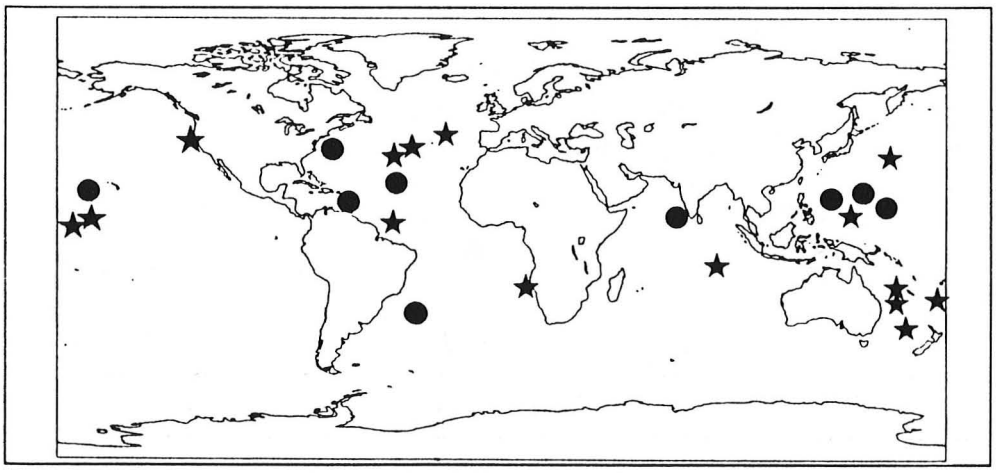


Figure 65 - Répartition géographique des hiatus entre 6,8 et 7,6 Ma (hiatus n°3). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 6,8 et 7,6 Ma.

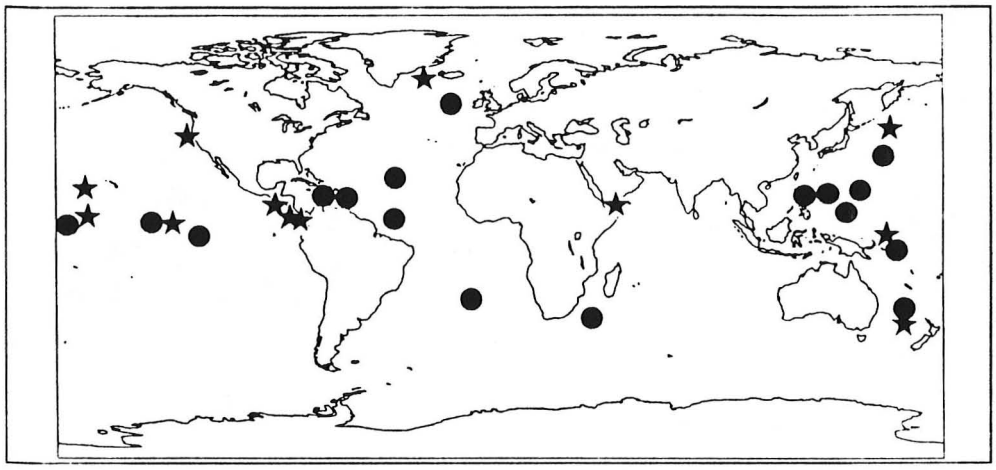


Figure 66 - Répartition géographique des hiatus entre 10,4 et 10,8 Ma (hiatus n°4). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 10,4 et 10,8 Ma.

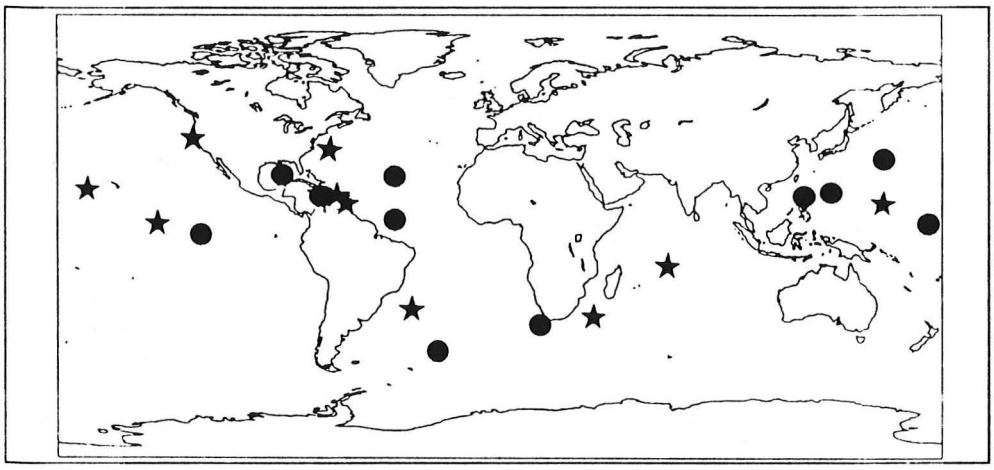


Figure 67 - Répartition géographique des hiatus entre 12 et 12,4 Ma (hiatus n°5). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 12 et 12,4 Ma.

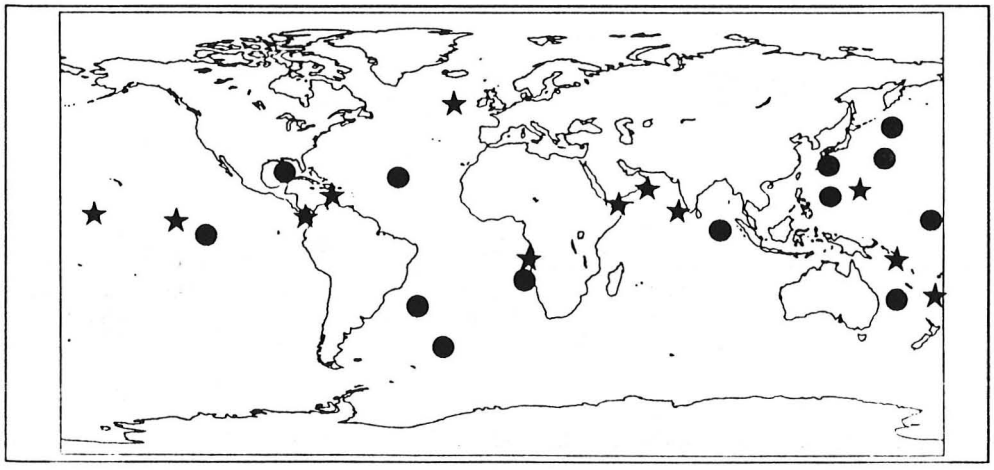


Figure 68 - Répartition géographique des hiatus entre 13,2 et 13,6 Ma (hiatus n°6). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 13,2 et 13,6 Ma.

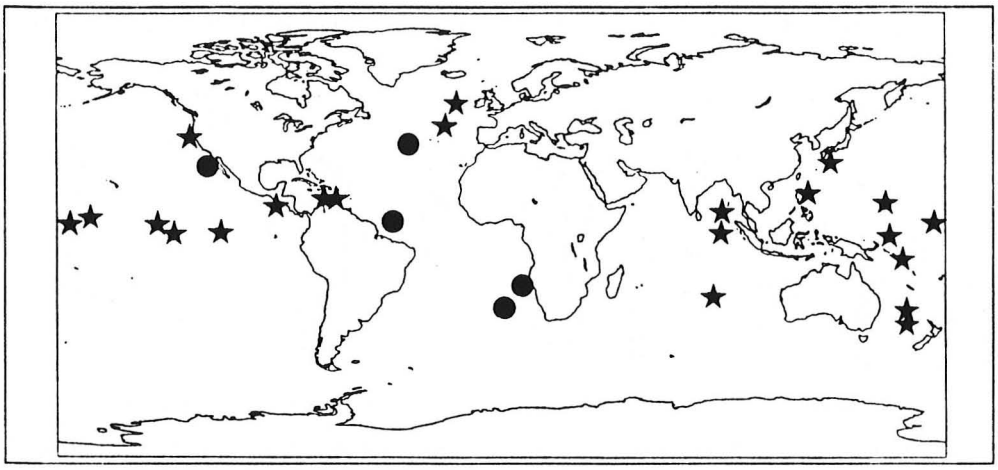


Figure 69 - Répartition géographique des hiatus entre 17,6 et 19,2 Ma (hiatus n°7). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 17,6 et 19,2 Ma.

Nous allons maintenant décrire les cartes de répartition des hiatus sans pour autant avancer d'hypothèses sur leur présence. Cela fera l'objet de la suite de ce travail.

La distribution des hiatus a pour principal intérêt de pouvoir reconstituer les courants océaniques profonds qui sont la cause fréquente d'érosion des sédiments marins profonds (Johnson, 1972; Watkins et Kenneth, 1972). Les courants océaniques superficiels, quant à eux, pourront être déduits de la dispersion des foraminifères planctoniques par exemple (Berggren et Hollister, 1974).

Le hiatus n° 1 (figure 63) entre 2 et 2,8 Ma est très bien représenté dans tous les océans du globe et présente un caractère permanent (nombreux ronds noirs). Il est prédominant dans les parties occidentale et équatoriale de l'océan Pacifique.

Le hiatus n° 2 (figure 64) entre 4,8 et 5,2 Ma est moins bien individualisé que le hiatus n° 1. Il est notamment moins bien représenté dans l'océan Indien, dans la partie orientale de l'océan Pacifique et dans l'Atlantique sud où il reste cantonné à la marge africaine.

Le hiatus n° 3 (figure 65) entre 6,8 et 7,6 Ma n'est pas du tout reconnu dans le Pacifique ouest et est peu représenté, là encore, dans l'océan Indien. On l'observe surtout dans l'Atlantique nord et dans la partie occidentale du Pacifique.

Le hiatus n° 4 (figure 66) entre 10,4 et 10,8 Ma présente, comme le hiatus n° 1 un caractère permanent et ubiquiste bien qu'il soit peu développé dans l'océan Indien.

Le hiatus n° 5 (figure 67) entre 12 et 12,4 Ma est moins développé que le hiatus n° 4 notamment dans la partie orientale de l'océan Pacifique.

Le hiatus n° 6 (figure 68) entre 13,2 et 13,6 Ma présente une répartition à peu près semblable à celle du hiatus n° 5 dans l'Atlantique et dans le Pacifique est. On le trouve ponctuellement dans le nord de l'océan Indien. Il est très développé et présente un caractère permanent dans tout le Pacifique ouest.

Le hiatus n° 7 (figure 69) s'étend sur une durée relativement longue entre 17,6 et 19,2 Ma mais présente un caractère nettement ponctuel dans tout le Pacifique et l'océan Indien. Il n'y a que dans l'océan Atlantique où ce hiatus persiste durant 1,6 Ma. Il est possible que ce hiatus corresponde à toute une série de petits hiatus ponctuels, c'est sans doute le cas dans l'océan Indien et dans l'océan Pacifique.

- Comparaison avec les études précédentes

Comparons les hiatus détectés dans ce travail avec ceux émanant d'études précédentes (figure 70).

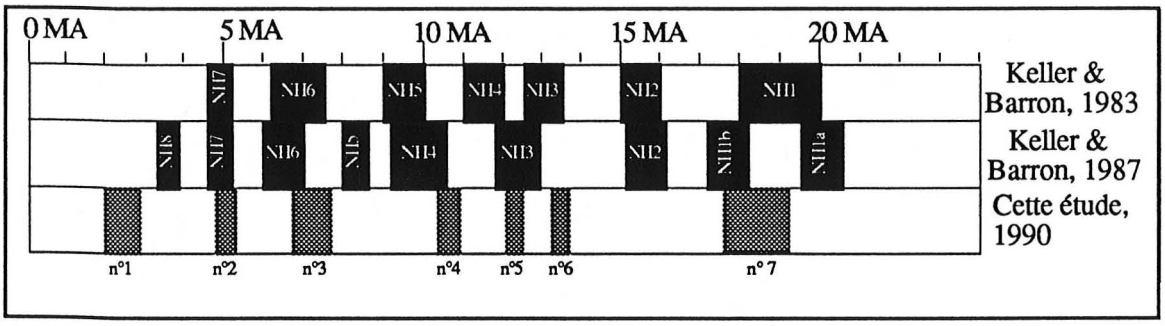


Figure 70 - Répartition temporelle des hiatus mondialement reconnus durant le Néogène par Barron et Keller en 1983 et en 1987 et dans cette étude (l'échelle temporelle est identique dans les trois cas).

Moore (Moore *et al.*, 1978) a effectué un recensement des hiatus dans l'océan mondial durant le Tertiaire. La durée moyenne des hiatus détectés était de l'ordre de 3 Ma. Déjà le lien entre les glaciations de l'Antarctique et les hiatus était suggéré.

Barron et Keller (1982) définissent huit hiatus (d'une durée moyenne d'environ 1 Ma chacun) durant le Miocène qui affectent tous les océans du monde. Ils mettent en évidence la coexistence de ces hiatus avec des assemblages fossiles caractéristiques d'eaux froides et des périodes de régression autrement dit des baisses du niveau eustatique marin (Vail et Hardenbol, 1979). Ils en déduisent que les hiatus miocènes résultent d'une intensification des courants marins profonds (corrosifs) eux-mêmes dus à des phénomènes de glaciation aux pôles.

En 1983 (figure 70), ils reprennent ces hiatus en leur donnant un nom (PH pour le plus ancien et de NH1 à NH7 pour les autres). Ils attribuent les hiatus PH (entre 22,5 et 23 Ma) et NH1 (entre 18 et 20 Ma) à un vaste courant profond circum équatorial (Barron et Keller, 1983). Pour eux la limite Miocène inférieur-Miocène moyen serait le cadre d'une vaste réorganisation de la sédimentation marine profonde résultant de changements de la circulation océanique. Le hiatus NH2 (entre 15 et 16 Ma) dans la région caraïbe indiquerait une rupture du courant circum équatorial coïncidant avec une déflexion vers le nord des courants profonds. Le modèle actuel de circulations océaniques se serait mis en place vers 12,5-13,5 Ma (hiatus NH3), période coïncidant avec l'établissement d'une vaste calotte glaciaire en Antarctique. Pour les hiatus NH4 (entre 11 et 12 Ma), NH5 (entre 9 et 10 Ma), NH6 (entre 6,2 et 7,5 Ma) et NH7 (entre 4,7 et 5,2 Ma), ils seraient dus à des érosions sous marines à grande échelle correspondant à des baisses du niveau eustatique.

En 1987 (Keller et Barron, 1987) grâce à des études biostratigraphiques plus fines et notamment avec l'amélioration de l'échelle magnétostatigraphique de Berggren (1985) et , qui plus est, en appliquant leur investigation à de plus nombreux sites du D.S.D.P., Barron et Keller arrivent à définir neuf hiatus mondiaux (NH1 à NH8).

Les hiatus recensés dans la présente étude, au nombre de sept pour toute la durée du Néogène, sont de plus courte durée (0,5 Ma en moyenne excepté pour le hiatus n° 7 qui persiste durant 1,6 Ma) que ceux décelés par Barron et Keller en 1983.

Le hiatus n° 1 de notre étude pourrait correspondre au hiatus NH8 de Keller et Barron (1987). Il serait dans ce cas plus récent .

Le hiatus n° 2 correspond au hiatus NH7 de Keller et Barron (1983 et 1987). Il est, dans ce cas, de plus courte durée.

Le hiatus n° 3 (entre 6,8 et 7,6 Ma) semble correspondre au hiatus NH6 défini par Keller et Barron entre 6,2 et 7,5 Ma en 1983 et entre 6 et 7 Ma en 1987.

Le hiatus n° 4 (entre 10,4 et 10,8 Ma) ne trouve pas de correspondance exacte dans les hiatus définis au cours d'études précédentes. Tout au plus recouvre t-il en partie le hiatus NH4 défini en 1983. Il est à noter que le hiatus NH5 défini entre 9 et 10 Ma en 1983 et entre 8 et 8,6 Ma en 1987 ne se retrouve pas dans notre étude.

Le hiatus n° 5 (entre 12 et 12,4 Ma) correspond en partie au hiatus NH3 (entre 11,8 et 12,9 Ma) défini en 1987.

Le hiatus n° 6 (entre 13,2 et 13,6 Ma) n'a jamais été décrit précédemment. Il recouvre en partie le hiatus NH3 tel qu'il était défini en 1983.

Notons que le hiatus NH2 défini entre 15 et 16 Ma en 1983 et entre 15,1 et 16,1 Ma en 1987 ne se retrouve pas dans notre étude.

Le hiatus n° 7 correspond en partie au hiatus NH1.

Comme dans le cas du hiatus NH2, le hiatus NH1a (défini entre 19,5 et 20,5 Ma en 1987) n'apparaît pas dans les résultats de notre étude.

Plusieurs raisons peuvent expliquer les différences entre les résultats de cette étude et ceux émanant des travaux de Keller et Barron.

L'échelle magnétostratigraphique utilisée par Keller et Barron en 1983 diffère de celle qu'ils utilisent en 1987. La position du LAD ou du FAD de certaines espèces par rapport aux chrons a pu également être modifiée. De plus, ils étudient en 1987 un nombre deux fois plus important de sites qu'en 1983. Ces trois raisons justifient à elles seules les différences de résultats entre 1983 et 1987.

Quant aux différences entre cette étude et celle de Keller et Barron en 1987, elles ont également plusieurs causes possibles. Les études portent sur des sites qui ne sont pas toujours les mêmes. Keller et Barron utilisent environ 150 sites (soit deux fois plus que dans ce travail) pour lesquels ils datent les hiatus. Cependant, pour une partie de ces sites, ils datent les hiatus en utilisant les résultats d'autres auteurs. Pour l'autre partie ils tracent, d'après leurs observations paléontologiques, des diagrammes âge=f(profondeur d'enfouissement) pour chaque site sans tenir compte de l'incertitude sur la profondeur des LAD ou des FAD des espèces qu'ils utilisent. Le tracé des courbes d'enfouissement est effectué sans l'aide d'une quelconque méthode mathématique.

b - Etude de la répartition spatio-temporelle des reprises et des ralentissements de la sédimentation

Nous avons étudié la répartition spatio-temporelle des maximums et des minimums détectés. Nous avons pour cela tracé les histogrammes de fréquence des pics et des creux dans les courbes des vitesses instantanées d'accumulation pour les 74 sites étudiés (figures 52 et 53). Nous avons repéré par trois figurés différents (figure 71 et annexe B) les événements recherchés pour différencier les forages effectués en milieu marin profond (domaine océanique franc), en milieu marin moins profond (proches des continents) ou en zone de rifting. Nous avons tracé des histogrammes pour l'Atlantique nord, l'Atlantique sud, le Pacifique nord, le Pacifique sud et l'océan Indien (annexe B) ainsi que l'histogramme des fréquences cumulées (qui est déduit des cinq autres) qui est sensé représenter les rythmes sédimentaires dans l'océan mondial (figure 71).

Nous décrirons dans un premier temps les événements sédimentaires qui dominent au Néogène dans l'océan mondial. Nous chercherons ensuite les différences entre ce schéma global et les tendances globales océan par océan. Nous essayerons de comparer les résultats tirés de ce travail avec différentes études déjà effectuées sur ce sujet et notamment celles mettant en jeu les phénomènes de variations du niveau marin puisqu'il est actuellement admis que sédimentation et eustatisme sont étroitement liés.

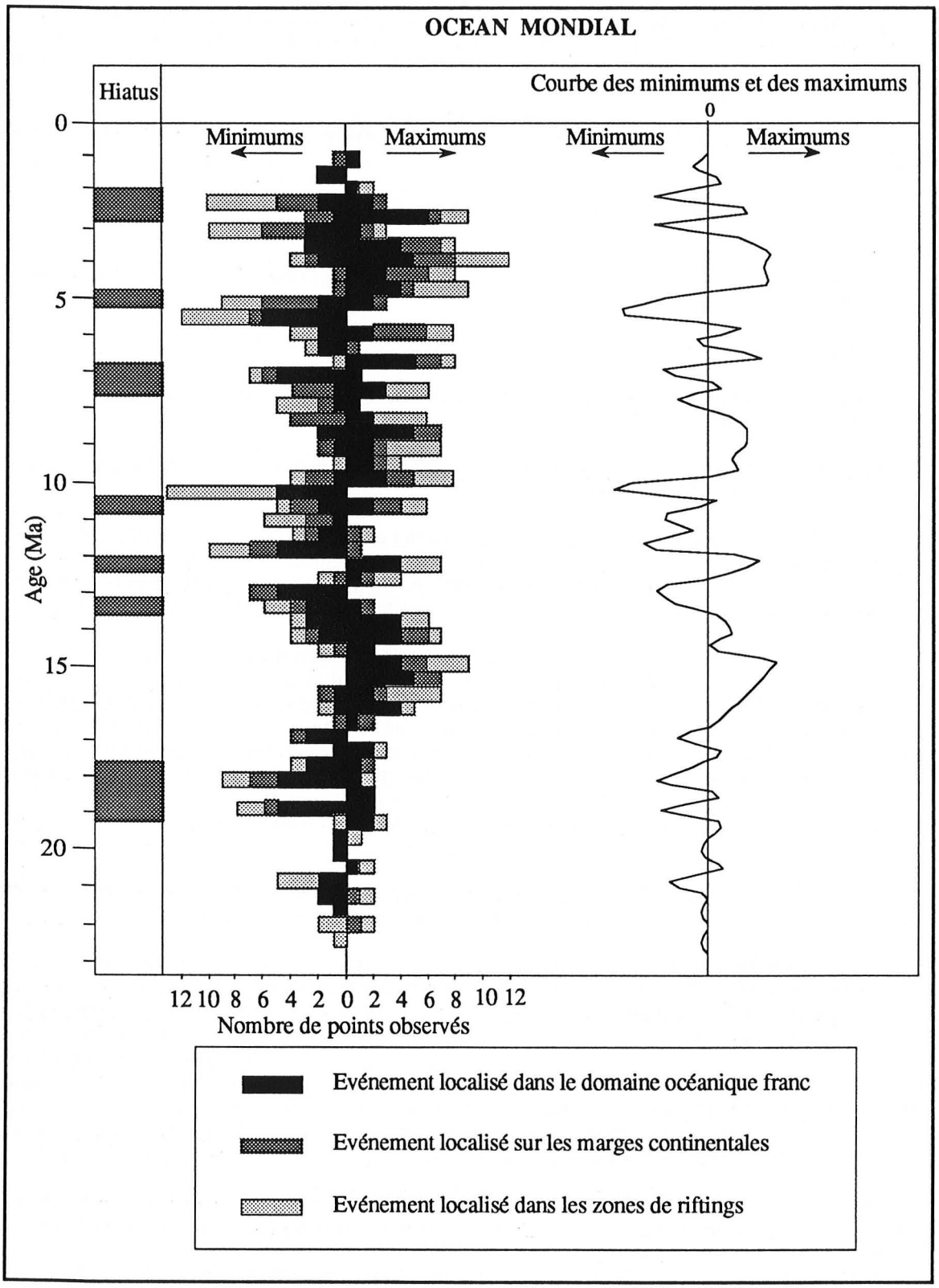


Figure 71 - Les événements sédimentaires néogènes détectés dans l'océan mondial (le diagramme en bâtons de gauche représente l'histogramme des fréquences des minimums et des maximums en fonction de l'âge; la courbe de droite est la courbe des fréquences cumulées des maximums et des minimums calculée à partir du diagramme de distribution des fréquences des maximums et des minimums).

Nous effectuerons fréquemment, afin d'illustrer notre propos, des renvois à l'annexe C qui contient des cartes synthétisant les valeurs des vitesses instantanées d'accumulation calculées site par site et océan par océan.

Ces cartes sont basées sur le principe du contourage, chaque contour délimitant une aire géographique pour laquelle les valeurs des vitesses instantanées d'accumulation sont identiques. De telles cartes ont été tracées tous les 0,4 Ma. Nous n'en présentons que les plus intéressantes. Le programme de contourage utilisé n'est en fait qu'une variante du programme de contourage des isoépaisseurs entre deux événements biostratigraphiques, programme décrit dans la première partie de ce travail. Nous avons tracé (figure 71) en plus de l'histogramme des fréquences cumulées pour les maximums et les minimums, une courbe x=f(y) où x représente les âges (tous les 0,4 Ma) et où y est le nombre des maximums pour chaque âge auquel on retranche le nombre de minimums correspondant, ceci dans le but de voir, pour chaque âge, si la tendance globale est à la reprise ou au contraire à l'affaiblissement de la sédimentation.

Nous parlerons très souvent de taux de sédimentation. Il serait en fait plus juste de parler de taux d'accumulations sédimentaires.

L'histogramme des fréquences de la figure 71 regroupant tous les maximums et les minimums détectés dans les 74 sites nous amène à effectuer plusieurs remarques.

Il existe apparemment de grandes tendances bien marquées dans la sédimentation néogène. Certaines périodes sont dominées par des reprises de la sédimentation (c'est le cas par exemple entre 5,0 et 5,8 Ma où le nombre de minimums est important). D'autres périodes, au contraire, sont le cadre d'une baisse générale de la sédimentation (entre 3,2 et 4,8 Ma par exemple, le nombre de maximums est élevés).

Il est parfois impossible de déceler une tendance générale car certaines périodes sont l'objet d'augmentation du taux de sédimentation en certains sites et d'affaiblissement du taux de sédimentation en d'autres sites et cela dans des proportions équivalentes. C'est le cas à 14 Ma. Cela est sans doute du à des conditions de sédimentation locales particulières et qui ne sont plus régies par des tendances globales (non décelables à ce niveau de l'étude, nous les aborderons par la suite). Dans ce cas, la courbe des minimums et des maximums cumulée ne montre aucune tendance particulière.

Il est cependant possible de définir sept périodes où dominent les reprises de sédimentation (sept minimums) et six périodes dominées par des ralentissements de la sédimentation (six maximums). On peut ainsi, dans notre étude diviser le Néogène en 13 périodes dominées alternativement par des tendances sédimentaires opposées (on peut se référer également à l'annexe C dans laquelle, pour chaque âge mentionné ci-dessous figurent une ou plusieurs cartes de contourages concernant l'océan Pacifique, l'océan Atlantique ou l'océan Indien.

- Entre 22,4 Ma et 16,8 Ma, la tendance globale, bien que sujette à des variations multiples, est plutôt à la reprise de l'activité sédimentaire à l'échelle mondiale. En fait cela est très nuancé et la fréquence des maximums et des minimums est assez réduite que ce soit dans l'océan Atlantique, l'océan Pacifique ou l'océan Indien (annexe B). On peut trouver deux causes à ce phénomène lorsque l'on observe les courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation (annexe A) :
    - d'une part, l'information est souvent moins importante pour les âges supérieurs à 20 Ma et, dans ce cas, la réduction du nombre de maximums et de minimums ne serait imputable qu'à une lacune documentaire,
    - d'autre part, le nombre réduit des maximums et des minimums pour cette période indique une stabilité relative de la sédimentation qui est moins sujette à des variations brutales.

Pour cette période relativement stable du point de vue de la sédimentation on remarque (figure 71) deux événements importants à 18,8 Ma puis à 18 Ma où la sédimentation s'accélère fortement dans l'océan Atlantique et l'océan Pacifique.

Notons que nous avons détecté un hiatus d'ampleur mondiale (hiatus n° 7) qui débute à 19,2 Ma pour se terminer à 17,6 Ma. La sédimentation est très faible voir souvent nulle à cette époque (annexe C) et ceci dans tous les océans du monde. 18,8 Ma et 18 Ma annoncent une reprise de la sédimentation et, par la même, la fin du hiatus n° 7.

- De 16,8 Ma à 13,6 Ma, la sédimentation tend à se ralentir que ce soit dans l'océan Indien, l'océan Pacifique ou l'Atlantique nord. Cette tendance est plus nuancée dans l'Atlantique sud. Ce ralentissement de la sédimentation aboutit à des accumulations sédimentaires nulles en de nombreux sites du Pacifique, de l'Atlantique sud ou du nord de l'océan Indien à 13,6 Ma (annexe C). 13,6 Ma correspond d'ailleurs au commencement du hiatus n° 6 défini ci-dessus entre 13,6 et 13,2 Ma.

- De 13,6 Ma à 12,8 Ma, la sédimentation s'accélère à nouveau.

- On note une nouvelle tendance au ralentissement de la sédimentation sauf dans l'Atlantique sud entre 12,8 Ma et 12 Ma surtout dans le Pacifique nord. On note aucune tendance dans le Pacifique sud où la sédimentation reste stable. 12 Ma correspond à la fin du hiatus n° 5.

- Entre 12 Ma et 10 Ma la sédimentation s'accélère à nouveau avec cependant quelques à coup, notamment à 10,4 Ma (au cœur du hiatus n° 4), âge durant lequel il existe plus de maximums que de minimums. Cela implique un ralentissement de la sédimentation en certains sites de l'océan Pacifique. La sédimentation est d'ailleurs très faible dans la quasi totalité de l'océan Pacifique à cette époque (annexe C).

- Entre 10 Ma et 8 Ma le nombre de maximums est nettement supérieur au nombre de minimums surtout dans l'océan Indien et l'océan Pacifique. La sédimentation se ralentit nettement durant cette période. On remarque par exemple (annexe C) que la sédimentation est globalement plus importante dans l'océan Indien (sauf dans le nord) à 9,6 Ma qu'à 8,8 Ma.

- Entre 8 Ma et 6,8 Ma la tendance s'inverse à nouveau bien qu'à 7,2 Ma, dans le Pacifique nord et l'océan Indien elle soit plutôt au ralentissement de la sédimentation.

- Entre 6,8 Ma et 5,6 Ma la sédimentation s'affaiblit à nouveau.

- Entre 5,6 Ma et 4,8 Ma, les trois océans sont le contexte d'une reprise de la sédimentation. Celle ci, très faible à cette époque spécialement dans l'océan Pacifique (c'est à peu près l'époque du hiatus n° 2) s'accélère (annexe C).

- Entre 4,8 Ma et 3,2 Ma la sédimentation tend très nettement à s'affaiblir. Cela semble annoncer le hiatus n°1 qui commence à 2,8 Ma.

- Entre 3,2 Ma et 2,8 Ma on assiste, là encore à une reprise de la sédimentation à l'échelle mondiale, sauf dans l'Atlantique nord pour le site 610 où la tendance est au ralentissement de la sédimentation. Celle ci est cependant très importante à cette époque dans l'Atlantique nord (annexe C).

- Entre 2,8 Ma et 2,4 Ma on note une tendance globale inverse. Dans le Pacifique nord, l'océan Atlantique et l'océan Indien la sédimentation se ralentit. Seul le Pacifique sud n'affiche pas cette tendance. En effet, à 2,4 Ma la sédimentation s'accélère pour les sites 288 et 587.

- Enfin entre 2,4 Ma et 2,0 Ma la sédimentation s'accélère surtout dans le Pacifique nord et l'océan Indien.

- Entre 2 Ma et l'actuel on note aucune tendance particulière globale. Il faut dire que, paradoxalement, nous n'avons que peu d'informations pour cette période. Signalons cependant qu'à 0,4 Ma la sédimentation est relativement importante (souvent supérieure à 20 m/Ma pour les vitesses instantanées d'accumulation) dans l'Atlantique.

III - La sédimentation marine néogène - Ses significations

Nous venons de définir plusieurs grandes tendances de dépôts (à l'échelle de l'océan mondial) durant le Néogène. L'étude qui suit a pour but de définir les conditions dans lesquelles se sont réalisés ces dépôts au travers quelques exemples pris dans le Pacifique ouest, le Pacifique est, l'Atlantique nord et l'océan Indien et cela à partir de la base de données du D.S.D.P. en utilisant les programmes de l'application PALEODATA. Nous mettrons en priorité l'accent sur l'influence des paleotempératures et des paléocirculations océaniques en surface ou en milieu profond.

A - Etude paléocéanographique et paléoclimatologique dans le Pacifique nord est équatorial à partir de la base de données du D.S.D.P.

1 - Généralités

De multiples études paléocéanographiques et paléoclimatologiques ont été réalisées dans la partie nord est du Pacifique équatorial. Il est vrai que cette région est intéressante à plusieurs titres. D'un point de vue géodynamique la fermeture de l'isthme de Panama au Pliocène inférieur (Pujos, 1987; Keigwin, 1981) a des conséquences importantes sur les circulations océaniques profondes et de surface. De plus les tendances évolutives varient fortement entre les espèces atlantiques et les espèces pacifiques qui sont désormais géographiquement séparées. Une étude détaillée des faunes ou des flores fossiles peuvent mettre en évidence les stades successifs de la fermeture de l'isthme de Panama (Pujos, 1987). D'un point de vue strictement paléontologique, les assemblages fauniques et floristiques dans ces régions équatoriales sont d'une grande abondance et d'une grande diversité ce qui facilite forcément les études biostratigraphiques. En outre, la densité des forages du D.S.D.P. est très importante dans cette région. La quantité des données dont nous disposons facilite là encore toutes les études géologiques.

Les eaux de surface dans cette partie de l'océan Pacifique sont régies par de grands courants (figure 72) : le courant nord équatorial, le courant sud équatorial, le courant de Californie nord sud qui longe les côtes californiennes dans l'hémisphère nord et le courant du Pérou-Chili qui longe du sud au nord les côtes d'Amérique du Sud dans l'hémisphère sud. Il existe également en profondeur un courant équatorial qui circule d'ouest en est (Wyrtki, 1966; Barron, 1984).

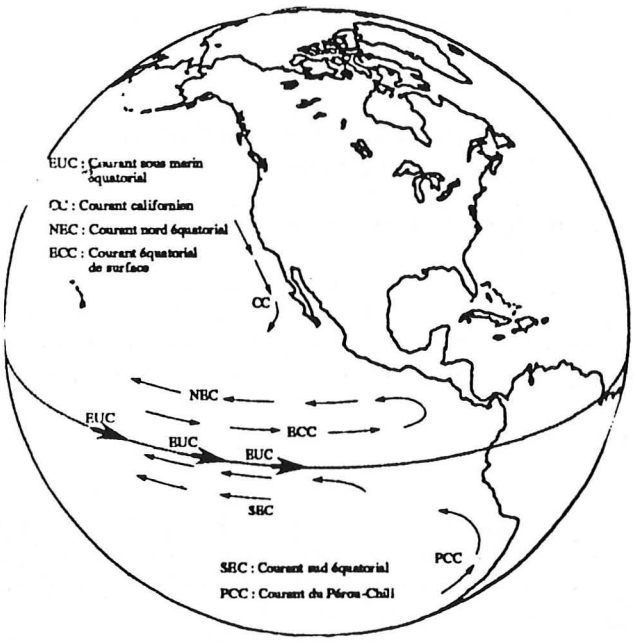


Figure 72 - Carte de répartition des courants océaniques superficiels ou profonds dans le Pacifique est (d'après Wyrtki, 1966, modifié).

2 - Approches paléocéanographiques et paléoclimatologiques

L'étude des contenus fossilifères des sédiments peut apporter des informations précieuses sur les milieux de dépôts notamment en ce qui concerne l'hydrologie des bassins de sédimentation (paléosalinité, paléobathymétrie, paléotempératures...). Attardons nous pour l'instant sur quelques unes des méthodes permettant d'estimer la température (relative et parfois même absolue) des eaux de surfaces ou profondes.

Certaines de ces méthodes utilisent les variations des rapports isotopiques $^{18}O/^{16}O$ et $^{13}C/^{12}C$ du test des foraminifères en fonction du temps pour retracer la paléoclimatologie des océans. Lorsque l'on peut établir une succession dans le temps de stades isotopiques définis à partir du $\partial^{18}O$ par exemple, ces rapports peuvent servir de cadre chronologique à l'échelle du globe. Ces méthodes ont été introduites par Emiliani et Epstein (1953) et Emiliani (1955a et b, 1966). Le $\partial^{18}O$ varie proportionnellement en fonction de la mise en glace des pôles et reflète de ce fait les événements climatologiques et hydrologiques du globe. La température des eaux de surface peut ainsi être estimée par le $\partial^{18}O$ du test des foraminifères planctoniques, celle des eaux profondes par le rapport isotopique $\partial^{18}O$ du test des foraminifères benthiques. Le $\partial^{13}C$ quant à lui augmente en même temps que l'oxydation de la matière organique et permet de mettre en évidence la présence de masses d'eaux profondes résidentes. Ces méthodes, aujourd'hui très utilisées, sont la base de nombreuses études. Savin et ses collaborateurs (1975, 1981) utilisent ces mêmes méthodes pour estimer les températures des eaux superficielles et profondes depuis le Maestrichtien jusqu'à l'actuel dans l'océan mondial. On pourrait également citer de nombreux autres travaux comme ceux de Moore et ses collaborateurs (1981) pour l'océan mondial au Cénozoïque, ou ceux de Vergnaud-Grazzini (1978, 1983, 1985) et de Van der Zwaan et Gudjonsson (1986) pour la Méditerranée, ceux de Shackleton et Opdyke (1977), de Loutit et ses collaborateurs (1983) pour le Pacifique, ceux de Shackleton et Cita (1979) pour l'Atlantique ou ceux de Shackleton et Vincent (1978) pour ce qui est de l'océan Indien.

Une autre méthode consiste à étudier les variations de l'abondance d'une ou de plusieurs espèces fossiles caractéristiques d'eaux froides (ou d'eaux chaudes). C'est avec cette méthode que Keller et Barron (1983) définissent, par l'étude des variations de l'abondance de foraminifères planctoniques et diatomées d'eaux froides, 14 événements "froids" et 12 "chauds" dans le nord est Pacifique au cous du Miocène entre 18 et 6,2 Ma. Bon nombre de ces événements ont également été reconnus (à l'aide d'analyses isotopiques ou d'abondance de microfossiles) dans l'océan Atlantique (Haq, 1980; Poore, 1981) et dans l'océan Pacifique nord équatorial (Keller, 1980, 1981; Woodruff et *al.*, 1981; Keigwin, 1979) ce qui fait supposer qu'ils sont liés à des phénomènes climatiques globaux.

a - Recherche des variations d'abondance d'espèces caractéristiques

J'ai adopté une méthode en de nombreux points similaire à celle employée par Keller et Barron (en ce sens qu'elle utilise l'abondance relative de certaines espèces) pour les sites 173, 470 (sur la marge nord est du Pacifique), le site 572 D situé dans une zone de forte productivité du Pacifique équatorial est et le site 158 qui est localisé dans le Golfe de Panama (figure 73). J'ai cherché les variations du pourcentage de plusieurs espèces de diatomées et de nannofossiles calcaires caractéristiques de divers types de masses d'eaux. Le choix de ces sites se justifie par le fait que l'on y trouve de nombreuses espèces pouvant caractériser la température des masses d'eaux dans lesquelles elles vivaient.

Pour ce qui est des nannofossiles calcaires, j'ai considéré l'abondance relative de deux espèces, *Reticulofenestra pseudoumbilica* et *Coccolithus pelagicus*. Lohmann et Carlson (1981), sur la base d'une analyse factorielle, définissent plusieurs assemblages fossiles dans le Pacifique au Miocène terminal. Ces divers assemblages fossiles dépendent principalement de deux facteurs qui sont la dissolution et le climat. Il est vrai que la dissolution joue considérablement sur la composition des assemblages fossiles et, en agissant, elle leur confère une connotation plus "tempérée" (Lohmann et Carlson, 1981). Un des assemblages fossile définis par Lohmann et Carlson est constitué de *Reticulofenestra pseudoumbilica* et de *Coccolithus pelagicus*. Cet assemblage serait l'indice, dans

cette étude, de masses d'eaux superficielles "tempérées froides". Bien que que *Coccolithus pelagicus*. soit en effet caractéristique d'eaux superficielles froides des hautes latitudes, cette espèce se trouve actuellement dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord (McIntyre & Bé, 1967; Ruddiman & McIntyre, 1976; Haq, 1980; Poore, 1981; Raffi & Rio, 1981), il est en fait couramment admis que *Reticulofenestra pseudoumbilica* est une espèce généralement inféodée aux latitudes moyennes et les incursions de cette espèce dans les hautes latitudes peuvent être considérées comme l'indice d'un réchauffement (Haq, 1980). Comme le souligne Haq (1980), la comparaison des abondances relatives de *Coccolithus pelagicus* et de *Reticulofenestra pseudoumbilica* (en effectuant un rapport des abondances des deux espèces par exemple) peut être utilisée en temps qu'indice paléoclimatique.

Figure 73 - Localisation des sites 158, 173, 470 et 572 D du D.S.D.P..

Pour ce qui est des diatomées, nous avons considéré *Coscinodiscus marginatus*, *Denticulopsis praedimorpha*, *Denticulopsis hyalina*, *Denticulopsis lauta*, *Denticulopsis hudstedtii*, *Rhizosolenia barboi*, *Rhizosolenia praebarboi* et *Thalassiosira antiqua*. Ces diatomées sont caractéristiques d'eaux superficielles froides (Kanaya & Koizumi, 1966; Jousé *et al.*, 1971; Koizumi, 1973; Barron, 1980 et 1981). Nous avons également pris en considération deux autres espèces de diatomées *Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima* caractéristiques des eaux froides riches localisées dans les régions d'upwellings (Burckle, 1978; Sancetta, 1983). Il est en effet important d'isoler les diatomées caractéristiques des régions d'upwellings des autres car elles pourraient "fausser" les interprétations paléoclimatologiques. Pour les diatomées (toutes caractéristiques d'eaux superficielles froides ou de zones d'upwellings), les abondances portées sur les figures 74, 75, 76 et 77 sont calculées en effectuant la somme des abondances relatives de chacune des espèces.

En ce qui concerne les nannofossiles calcaires (*Coccolithus pelagicus* et *Reticulofenestra pseudoumbilica*), j'ai calculé un indice P (l'abondance relative de *Coccolithus pelagicus* à laquelle on soustrait l'abondance relative de *Reticulofenestra pseudoumbilica*). La recherche des maximums et des minimums de cet indice permettra de définir des événements chauds et des événements froids, ou, en d'autres termes, des variations de températures des eaux baignant les sites étudiés (imputables à des fluctuations climatiques). Les figures 74, 75, 76 et 77 illustrent les variations des abondances de toutes ces espèces en fonction de la profondeur dans les sites 158, 173, 470 et 572 D. Les âges correspondant aux maximums ou aux minimums d'abondance peuvent être déduits des profondeurs en utilisant les courbes des taux d'accumulation (annexe A).

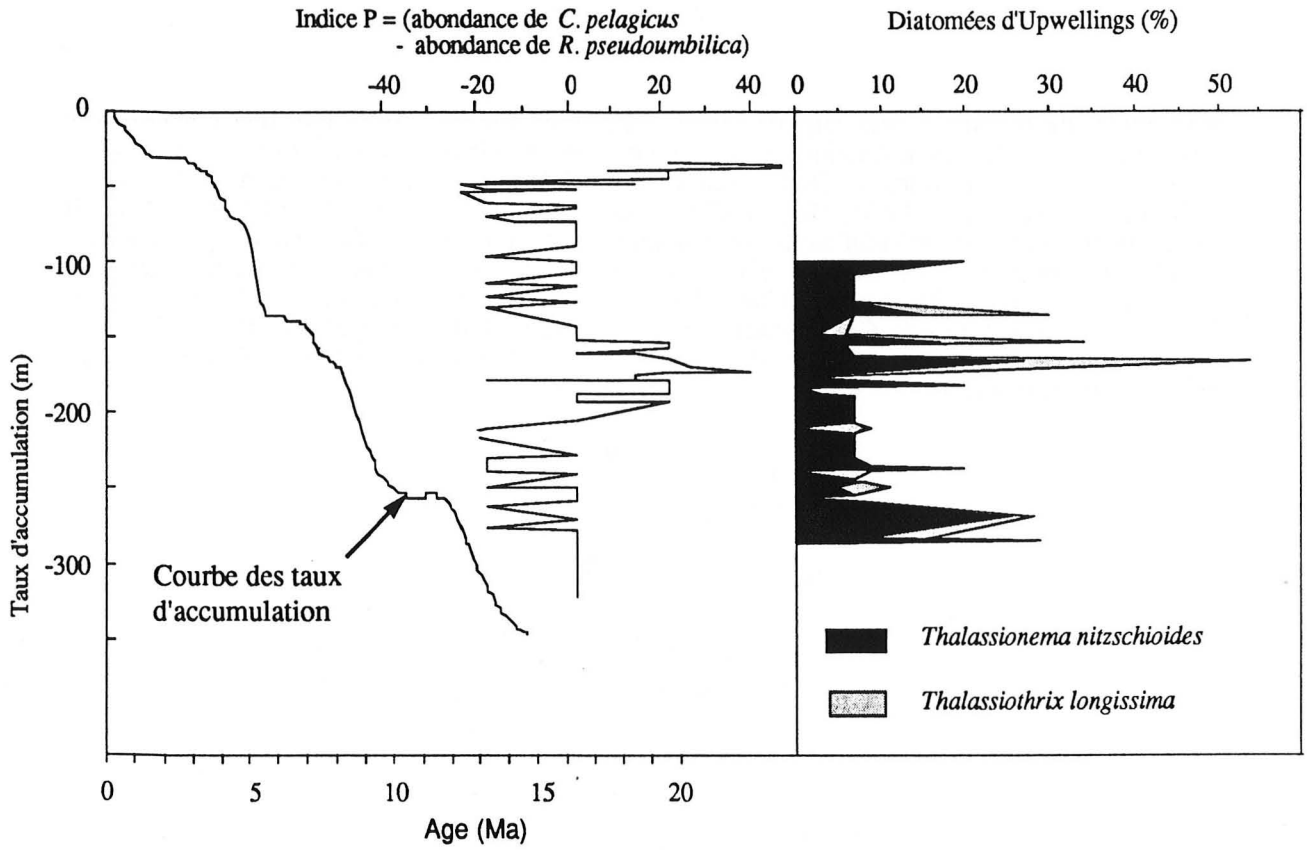


Figure 74 - Abondance des diatomées caractéristiques d'upwellings (*Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima*) et valeurs de l'indice P (abondance de *Coccolithus pelagicus* - abondance de *Reticulofenestra pseudoumbilica*) en fonction de la profondeur (et de l'âge) dans le site 158 du D.S.D.P..

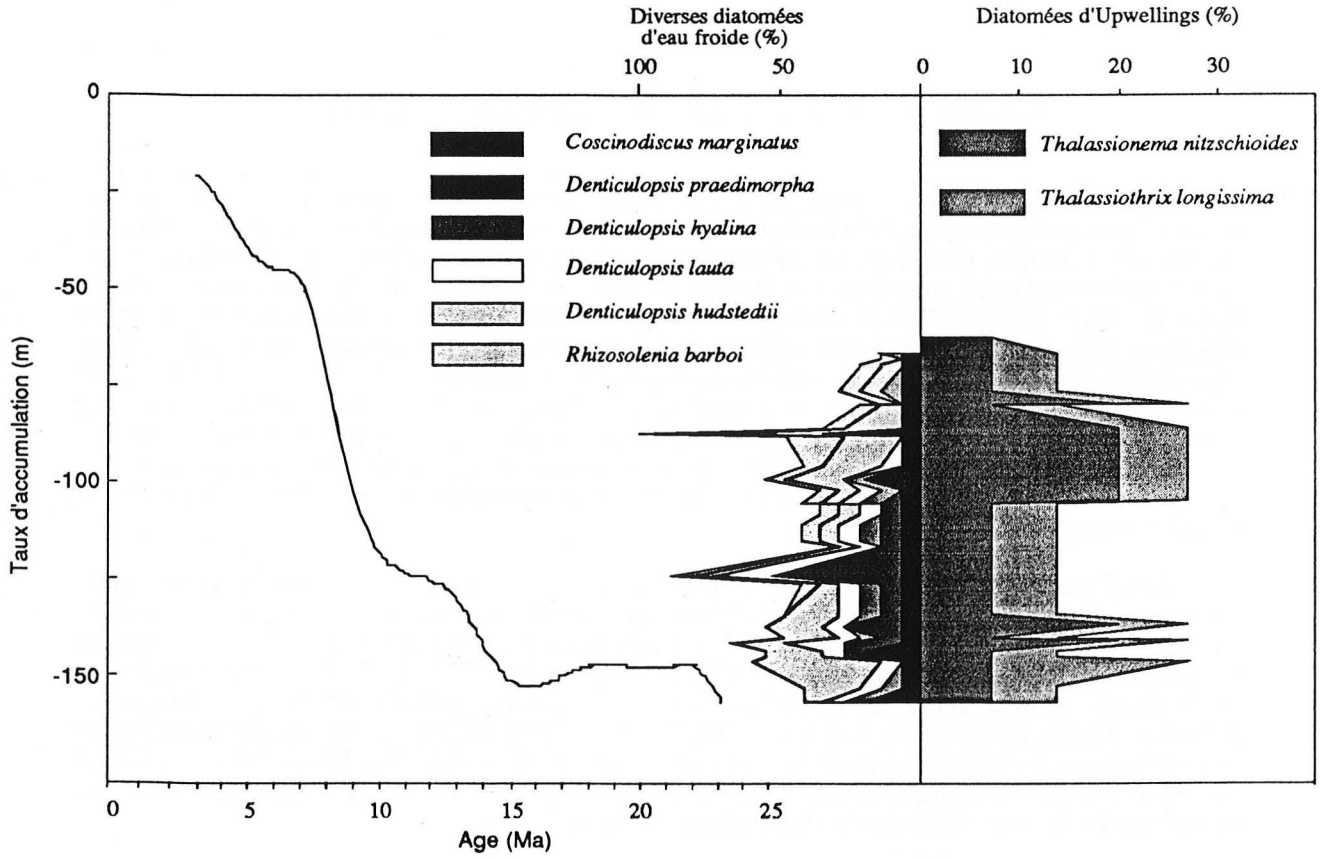


Figure 75 - Abondance des diatomées caractéristiques d'upwellings (*Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima*) et de diverses diatomées caractéristiques d'eaux froides (*Coscinodiscus marginatus, Denticulopsis praedimorpha, Denticulopsis hyalina, Denticulopsis lauta, Denticulopsis hudstedtii* et *Rhizosolenia barboi*) en fonction de la profondeur (et de l'âge) dans le site 470 du D.S.D.P..

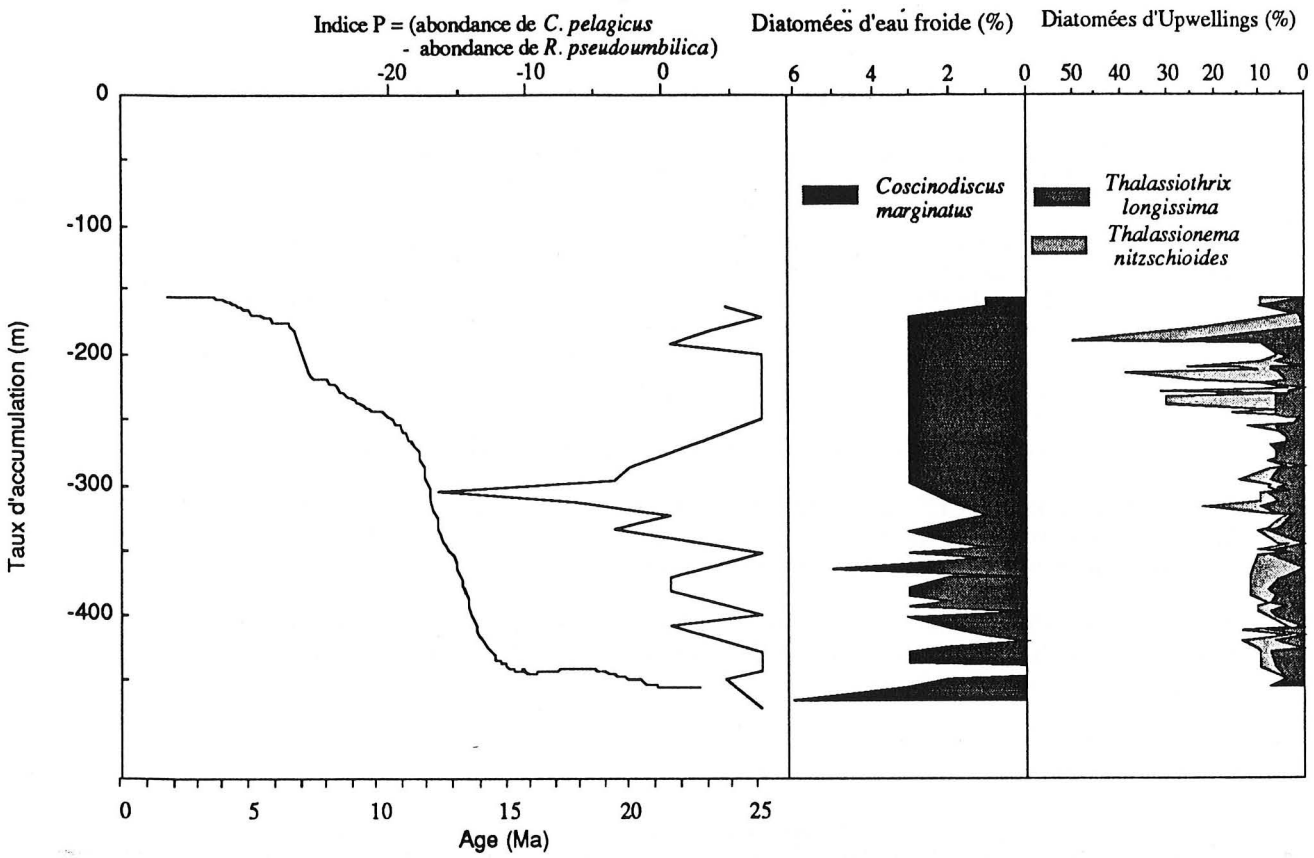


Figure 76 - Abondance des diatomées caractéristiques d'upwellings (*Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima*), des diatomées caractéristiques d'eaux froides (*Coscinodiscus marginatus)* et valeurs de l'indice P (abondance de *Coccolithus pelagicus* - abondance de *Reticulofenestra pseudoumbilica*) en fonction de la profondeur (et de l'âge) dans le site 572 D du D.S.D.P..

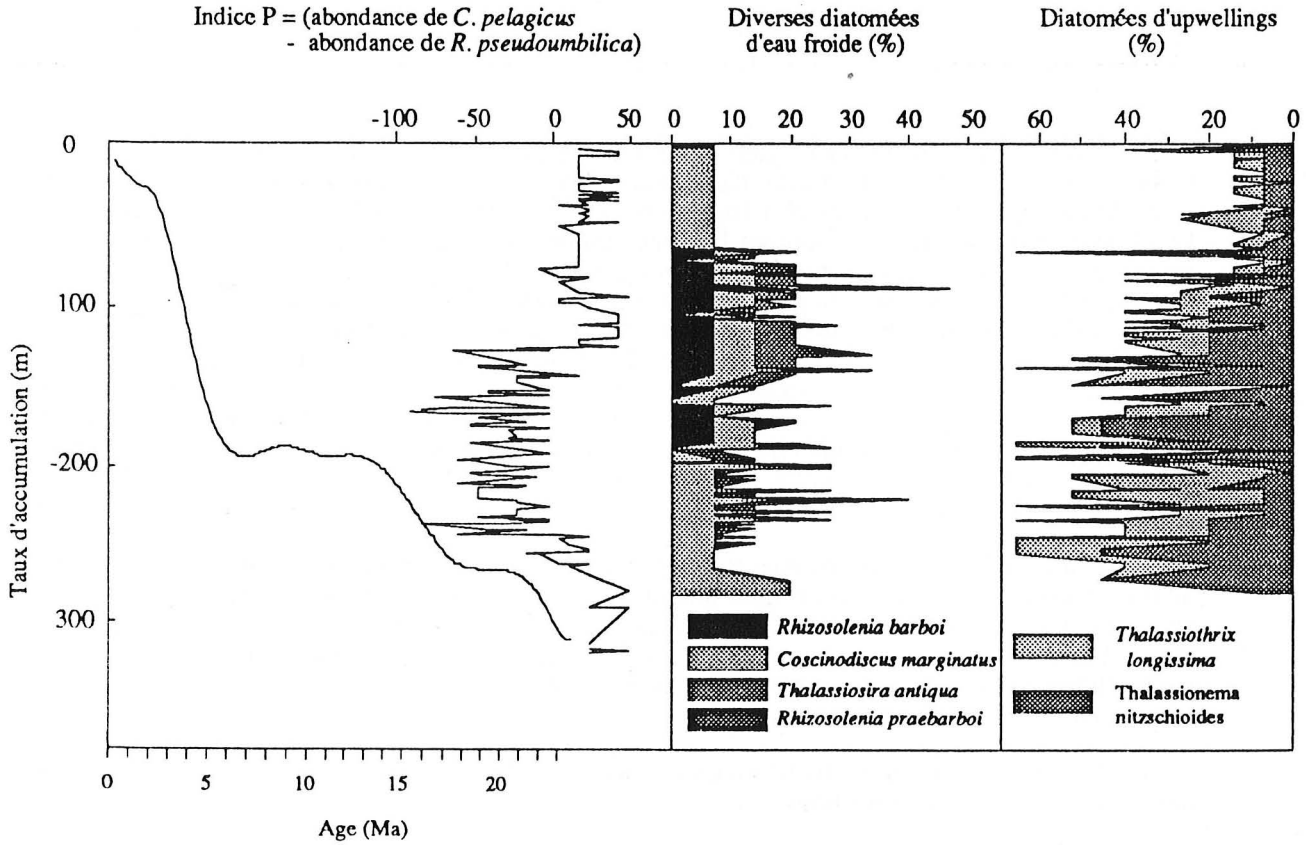


Figure 77 - Abondance des diatomées caractéristiques d'upwellings (*Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima*), de diverses diatomées d'eaux froides (*Cosinodiscus marginatus, Rhizosolenia barboi, Rhizosolenia praebarboi* et *Thalassiosira antiqua)* et valeurs de l'indice P (abondance de *Coccolithus pelagicus* - abondance de *Reticulofenestra pseudoumbilica*) en fonction de la profondeur (et de l'âge) dans le site 173 du D.S.D.P..

b - Constatations

Les variations des pourcentages des diatomées d'eaux froides (dans les sites 173 et 470) et de l'indice P (dans le site 173) sont sensées refléter, d'après Barron et Keller (1983), les fluctuations d'intensité du courant froid californien qui dépendent elles-mêmes des variations du gradient thermique entre le pôle nord et l'équateur. L'activité du courant froid californien s'intensifie en même temps que le gradient thermique entre le pôle nord et l'équateur augmente. Bukry (1973), Ingle (1973), Keller (1978, 1980) ont déjà essayé de reconstituer l'histoire paléoclimatologique du site 173 en utilisant des silicoflagellés et des foraminifères planctoniques.

Le site 173, localisé à 40° de latitude nord est le plus septentrional des quatres sites étudiés ici (figure 73). Le site 470 localisé dans la partie terminale du courant californien, en subit par conséquent moins les influences que la région du site 173 qui est situé plus au nord.

Quant aux sites 158 et 572 D leur localisation nettement "plus équatoriale" les place sous l'influence des courants superficiels équatoriaux sud pour le site 572 D (à laquelle s'ajoute peut être l'action de la terminaison nord du courant du Pérou-Chili) et nord pour le site 158.

Le site 158 est situé dans le Golfe de Panama et l'on peut supposer que, de par sa situation, la fermeture de l'Isthme de Panama a nettement influencé la sédimentation dans cette région (et, dans une moindre mesure, la sédimentation dans la région du site 572 D).

- Le site 173

De l'actuel jusqu'à environ 3,4 Ma les diatomées d'eaux froides y sont peu représentées (moins de 10% pour quatre espèces de diatomées d'eaux froides) alors que les nannofossiles calcaires, entre 0 et 4,4 Ma sont dominés par l'occurrence d'une espèce froide, *Coccolithus pelagicus* (figure 77). En effet, entre 0 et 4,4 Ma l'indice P est toujours positif (compris entre 10 et 50), ce qui atteste de la domination de *Coccolithus pelagicus* sur *Reticulofenestra pseudoumbilica*. Durant cette période les diatomées caractéristiques des régions d'upwellings sont assez peu représentées (généralement moins de 20% pour *Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima*) sauf à 3,4 Ma où l'on observe un pic à plus de 60 %. On peut penser que pour cette période l'activité du courant froid longeant les côtes de la Californie est importante, avec cependant des variations d'intensité.

On remarque un net changement des valeurs de l'indice P à 4,4 Ma qui devient négatif dans le site 173 (figure 77) ce qui atteste d'une domination de *Reticulofenestra pseudoumbilica* sur *Coccolithus pelagicus* et cela jusqu'à 16,4 Ma et, donc, d'une activité réduite du courant californien. Les fluctuations de l'indice P sont en fait très nombreuses pour cette période. Cet indice passe successivement de valeurs positives importantes à des valeurs nulles voire légèrement négatives démontrant un équilibre entre la proportion de *Coccolithus pelagicus* et celle de *Reticulofenestra pseudoumbilica*. Pour cette période l'abondance des diatomées d'eaux froides, bien que sujette elle aussi à de nombreuses fluctuations est en général peu importante (moins de 20% avec quelques pics entre 30 et 40%). Les diatomées d'upwellings peuvent être très abondantes pour cette période durant laquelle on observe de nombreux pics à plus de 60%. Notons que le premier des deux hiatus détectés dans le site 173 (figure 77) entre environ 6 et 13 Ma nous interdit toute interprétation concernant cette période. Cependant, à cette époque (entre 6 et 13 Ma), la proportion des diatomées d'upwellings est très importante.

Entre 16,4 et 23,2 Ma l'indice P est à nouveau positif ce qui traduit vraisemblablement une activité intense du courant californien durant cette période. Les diatomées d'eaux froides sont cependant peu abondantes : seule *Coscinodiscus marginatus* est assez bien représentée (entre 10 et 20%). Les diatomées d'upwellings sont dominantes (plus de 60%) vers environ 17 Ma. Cette domination des diatomées d'upwellings semble liée à la présence du deuxième grand hiatus détecté dans le site 173.

Ce hiatus ainsi que celui cité précédemment semblent liés à une érosion des sédiments par des courants de fonds d'upwellings.

Nous n'avons plus d'informations concernant les diatomées au delà de 20 Ma.

- Le site 470

La lacune sédimentaire observée entre 6 et 13 Ma dans le site 173 n'est pas détectée dans le site 470 (figure 75). Cependant, là encore, il existe un hiatus entre 18 et 22 Ma qui est aussi lié à une reprise des courants d'upwellings (30% de *Thalassionema nitzschioides* et de *Thalassiosira longissima*). Cela correspond sans doute à une action intensifiée du courant de fond équatorial qui se traduit dans cette région par des courants d'upwellings vigoureux. L'étude de l'abondance du contenu des assemblages fossiles dans ce site indique une domination importante des diatomées d'eaux froides à 8,4 Ma, à 10,8 Ma et également entre 13,6 et 14,2 Ma et, donc, des tendances climatiques plus froides à ces époques.

Nous n'avons pu calculé l'indice P pour le site 470 car ni *Coccolithus pelagicus* ni *Reticulofenestra pseudoumbilica* n'y ont été observés.

- les sites 572 D et 158

Comme l'explique Pujos (1987), deux grands événements affectent l'hydrodynamique de l'océan Pacifique au Néogène :

- de 15 à 7 Ma, la couverture de glace antarctique influence la circulation océanique,
- de 7 à 2 Ma, l'émersion progressive de l'Isthme de Panama entraîne tout d'abord des remontées d'eaux froides (upwellings) avant que s'installe le modèle de circulation océanique actuel. D'après Keigwin (1978) et Pujos (1987) l'histoire de la formation de l'Isthme de Panama se reflète dans la distribution des assemblages fossiles par l'intermédiaire des fluctuations des masses d'eaux où ces organismes vivaient.

Pujos définit 4 stades dans le processus de fermeture de l'Isthme de Panama (figure 78).

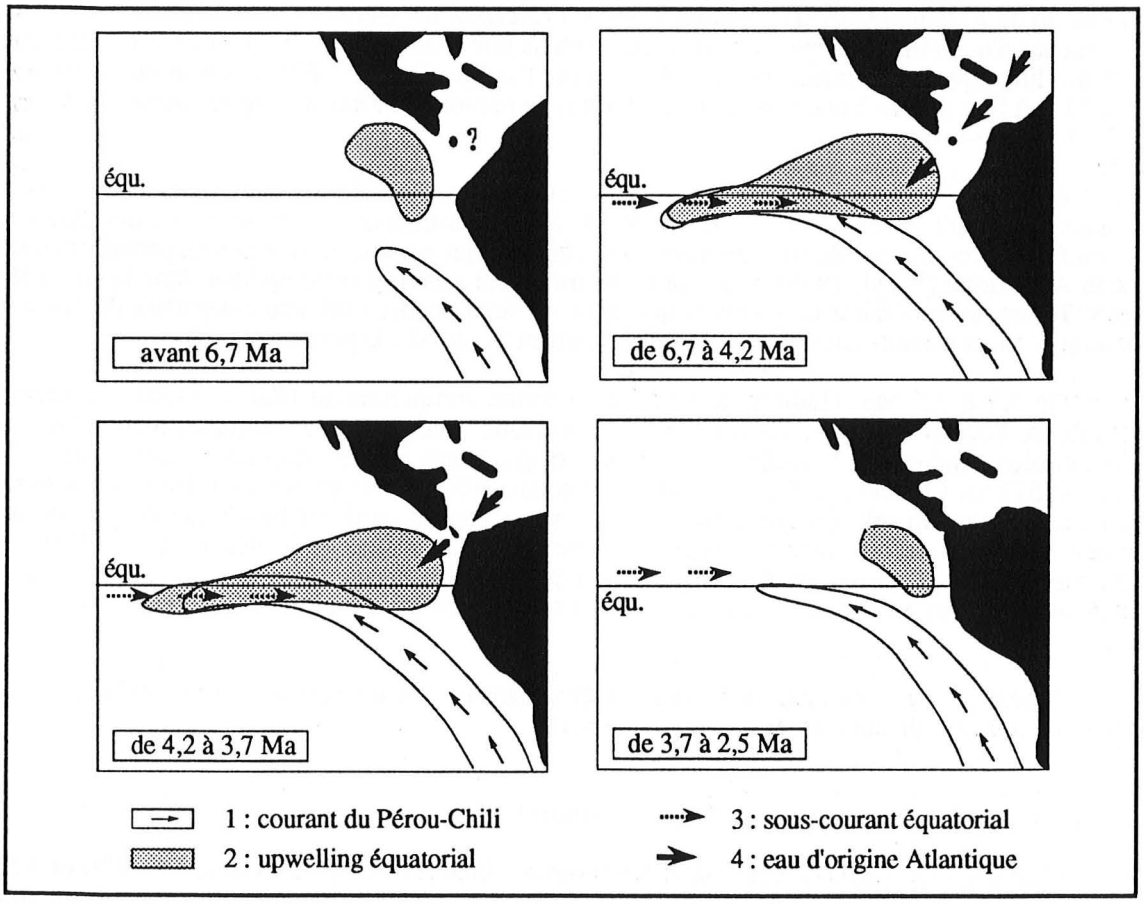


Figure 78 - Etablissement des régimes d'upwellings tropical et équatorial au Mio-Pliocène dans le Pacifique équatorial central et oriental (d'après Pujos, 1987).

Avant 6.7 Ma, les Caraïbes et l'océan Pacifique communiquent totalement. Les eaux superficielles dans le Pacifique oriental sont froides et productives mais subissent des incursions plus où moins prononcées d'eaux chaudes, salées et riches en carbonates (Emiliani et *al.*, 1972) provenant de l'océan Atlantique. Ces arrivées d'eaux chaudes engendrent, d'après Baldauf (1985), un phénomène de remontée d'eaux qu'il appelle upwelling équatorial (figure 78). D'après Pujos (1987), ces remontées d'eaux froides n'atteignent pas les sites du leg 85 dont fait partie le site 572 D. La figure 76 montre cependant qu'à environ 7 Ma *Thalassiothrix longissima* et *Thalassionema nitzschioides* dominent fortement dans les assemblages fossiles (plus de 50%). On peut penser qu'il existait des remontées d'eaux froides de type upwelling à cette époque au site 572 D. Les arrivées d'eaux de l'océan Atlantique semblent de ce fait sous estimées par Pujos du moins pour cette époque. Il existe également un maximum d'abondance des espèces d'upwellings dans le site 158 (figure 74) à 6,8 Ma (pic à plus de 30%). Les courbes, pour les sites 158 et 572 D montrent en fait de nombreux pics dont les amplitudes sont variables. Cela peut sans doute être interprété comme le reflet des fluctuations des arrivées d'eaux chaudes en provenance de l'océan Atlantique. En règle générale la proportion des diatomées d'upwellings est moins importante dans le site 572 D que dans le site 158 qui subit plus l'influence des incursions d'eaux chaudes de l'océan Atlantique que le site 572 D. Cela se traduit dans le site 158 par des phénomènes d'upwellings (maximum aux environs de 8 Ma) plus marqués que dans le site 572 D (où ces phénomènes peuvent parfois s'observer malgré l'hypothèse de Pujos). Nous n'avons pas d'informations sur les diatomées d'eaux froides pour le site 158 et l'abondance de *Coscinodiscus marginatus* dans le site 572 D est toujours très faible (moins de 6%).

De 6,7 à 4,2 Ma, les échanges d'eaux profondes entre Pacifique et Atlantique s'interrompent. Seules les eaux superficielles de l'océan Atlantique se déversent encore dans l'océan Pacifique et se mélangent aux eaux du courant du Pérou-Chili pour repousser l'upwelling équatorial vers l'ouest où la masse d'eau atlantique se répand en suivant l'équateur (Pujos, 1987). D'après les courbes d'abondances tracées pour les sites 158 et 572 D (figures 74 et 76), l'upwelling équatorial semble disparaître du site 158 (*Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima* sont en quantité inférieure à 20% et les valeurs de l'indice P entre 6,8 et 4 Ma sont négatives ou nulles attestant d'une domination de *Reticulofenestra pseudoumbilica* sur *Coccolithus pelagicus* incompatible avec des phénomènes d'upwelling). Cependant, dans notre étude nous n'observons pas de reprise de l'activité de l'upwelling équatorial entre 6,7 et 4,2 Ma (comme l'indique Pujos, 1987) sauf peut être entre 4,4 et 5,2 Ma où l'on assiste à une légère augmentation du nombre de *Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima* .

Entre 4,2 et 3,7 Ma, la communication entre les deux océans diminue très nettement : le seuil de Panama poursuit son émersion. C'est à cette époque que l'influence du courant du Pérou-Chili est maximum (figure 78) car elle n'est plus entravée par celle des eaux superficielles en provenance de l'océan Atlantique (Weyl, 1968). L'indice P est fortement positif à cette époque dans le site 158 (figure 74) ce qui tendrait à faire penser que celui ci subit encore l'influence des eaux de l'océan Atlantique. Nous n'avons pas d'informations concernant le site 572 D pour cette période.

De 3,7 à 2,5 Ma, l'Isthme de Panama se ferme complètement (Saito, 1976). La partie orientale de l'océan Pacifique ne subit plus les influences de l'océan Atlantique. Nous n'avons d'ailleurs plus d'indices de l'existence de courants d'upwellings pour cette période dans le site 158 ou le site 572 D. Cependant, d'après Baldauf (Baldauf, 1985), il est vraisemblable qu'une masse d'eau à caractère d'upwelling équatorial stationne encore dans la partie du bassin la plus proche de l'Isthme de Panama (figure 78). Il est vrai que le pic à 3,2 Ma dans la courbe des valeurs de l'indice P pour le site 158 (témoignant d'une domination de *Coccolithus pelagicus* sur *Reticulofenestra pseudoumbilica*) atteste de la présence d'eaux froides à cette époque dans le Golfe de Panama (figure 74).

Après 2,5 Ma, la circulation des masses d'eau dans le Pacifique équatorial oriental et central est très similaire à celle qui existe encore actuellement.

c - Synthèse paléoclimatologique

C'est dans un soucis de synthétiser les résultats obtenus pour les sites 158, 173, 470 et 572 D que j'ai tracé une courbe moyenne des événements chauds et des événements froids qui ont affectés la partie orientale de l'océan Pacifique durant le Néogène (figure 79).

J'ai pour cela regroupé par âge (les âges étant obtenus en reportant la valeur de la profondeur sur les courbes des taux d'accumulation de l'annexe A) les maximums et les minimums détectés dans les courbes des valeurs de l'indice P.

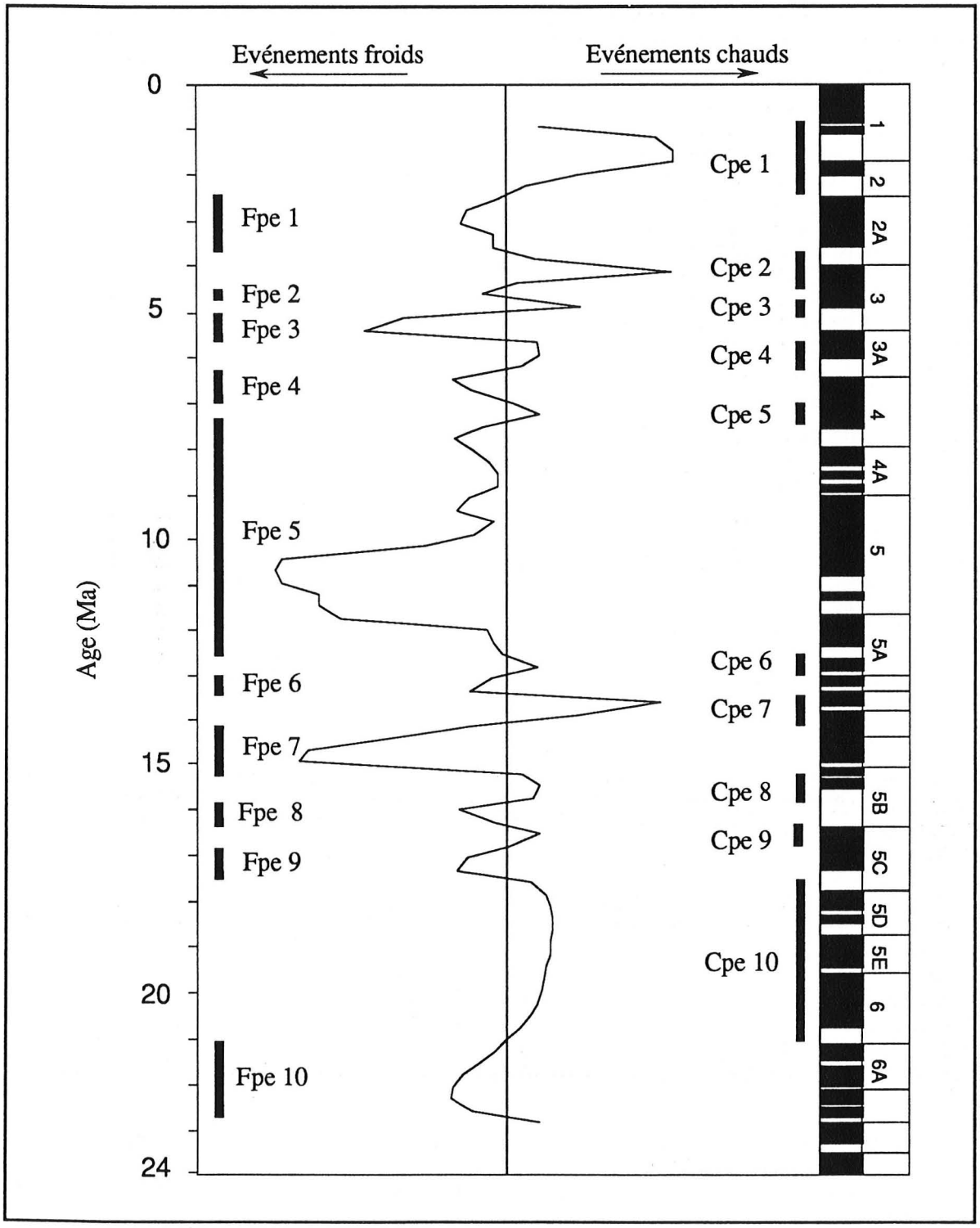


Figure 79 - Courbe synthétisant les événements chauds (Cpe 1 à Cpe 10) et les événements froids (Fpe 1 à Fpe 10) durant le Néogène dans le Pacifique oriental.

Il ressort de cette étude dix événements chauds (Cpe 1 à Cpe 10 correspondant à des périodes durant lesquelles l'indice P est en moyenne négatif) et dix événements froids (Fpe 1 à Fpe 10 correspondant à des périodes durant lesquelles l'indice P est en moyenne positif) pour tout le Néogène dans le Pacifique équatorial est (figure 79). La durée de ces 20 événements est très variable : elle varie de 0,25 Ma environ pour le plus court (événement froid Fpe 2) à 6 Ma pour le plus long (événement froid Fpe 5). Les dix événements chauds et les dix événements froids se répartissent comme suit.

Les événements chauds :
- Cpe 1 entre 0,75 et 2,3 Ma,
- Cpe 2 entre 3,7 et 4,5 Ma,
- Cpe 3 entre 4,75 et 5 Ma,
- Cpe 4 entre 5,7 et 6,3 Ma,
- Cpe 5 entre 7 et 7,3 Ma,
- Cpe 6 entre 12,5 et 13 Ma,
- Cpe 7 entre 13,4 et 14,1 Ma,
- Cpe 8 entre 15,2 et 15,8 Ma,
- Cpe 9 entre 16,3 et 16,8 Ma,
- Cpe 10 entre 17,6 et 21 Ma.

Les événements froids :
- Fpe 1 entre 2,3 et 3,7 Ma,
- Fpe 2 entre 4,5 et 4,75 Ma,
- Fpe 3 entre 5 et 5,7 Ma,
- Fpe 4 entre 6,3 et 7 Ma,
- Fpe 5 entre 7,3 et 12,5 Ma,
- Fpe 6 entre 13 et 13,4 Ma,
- Fpe 7 entre 14,1 et 15,2 Ma,
- Fpe 8 entre 15,8 et 16,3 Ma,
- Fpe 9 entre 16,8 et 17,6 Ma,
- Fpe 10 entre 21 et 22,7 Ma.

Comparons les résultats de cette étude avec la courbe des paléotempératures établie par Barron et Keller (1983) dans cette région (figure 80).

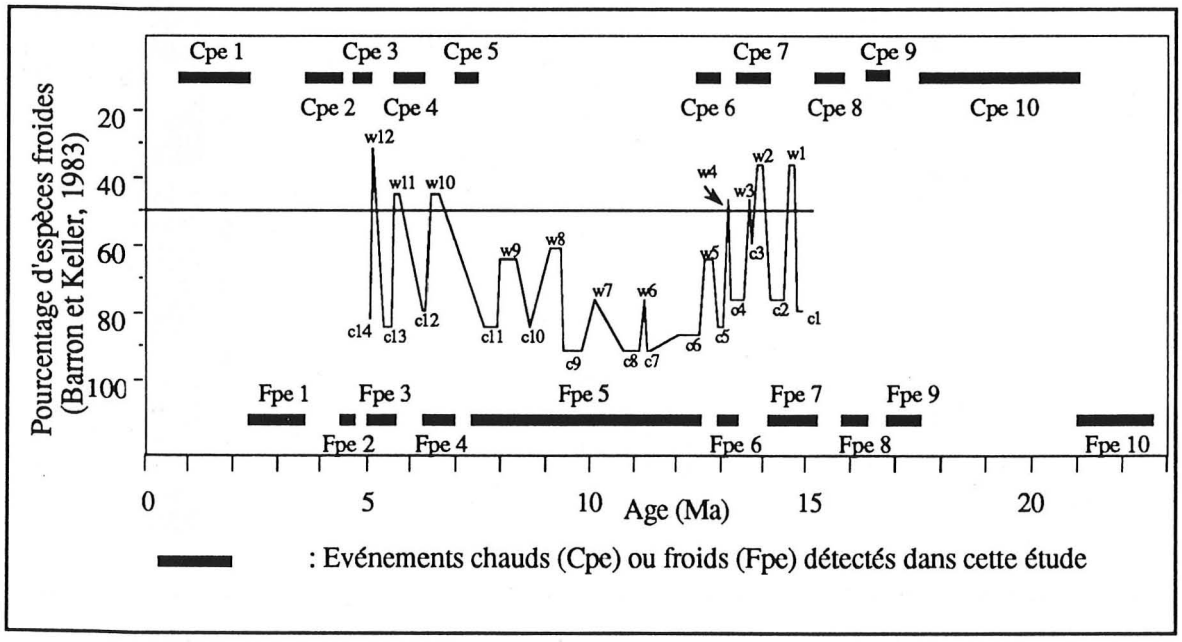


Figure 80 - Comparaison des événements chauds et des événements froids détectés dans cette étude avec la courbe des paléotempératures relatives établie par Barron et Keller en 1983 entre 15 et 5 Ma.

UNIVERSITÉ DE LYON I C.S.T. GÉOLOGIE

Barron et Keller (1983) ont établi une courbe des paléotempératures relative pour le Miocène inférieur et moyen dans le nord est Pacifique entre 5 et 15 Ma.

Leurs résultats reposent sur l'étude de l'abondance d'espèces fossiles caractéristiques d'eaux froides et, plus particulièrement, de diatomées (comme *Coscinodiscus marginatus* ou des espèces du genre *Denticulopsis*) et de foraminifères planctoniques (comme *Globigerina bulloides*, *Globigerina quadrilatera*...) dans les sites 173 et 470 du D.S.D.P. ainsi que dans la coupe à terre de Newport Beach en Californie.

Ils arrivent ainsi à établir l'existence de 14 événements froids (C1 à C14) et de 12 événements chauds (W1 à W12) dans le nord est Pacifique au Miocène inférieur et moyen (figure 80). Le nombre des événements chauds ou froids établis par Barron et Keller est plus important que dans la présente étude. Cependant, un certain nombre d'entre eux ne sont décrits que dans la coupe à terre de Newport Beach. C'est notamment le cas pour les événements C14, W12, C12, W10 et C1. Au premier abord, il n'y a pas de grandes similitudes entre les événements chauds et froids définis par Barron et Keller en 1983 et ceux établis dans cette étude par l'analyse des variations de l'indice P en fonction de l'âge (figure 80).

Il est normal que les résultats de Barron et Keller ne coïncident pas forcément avec ceux de cette étude et cela pour plusieurs raisons dont certaines ont déjà été évoquées précédemment :

- les sites étudiés dans les deux cas ne sont pas identiques; seul le site 173 est commun aux deux études (l'indice P n'a pas été calculé pour le site 470 car ni *Coccolithus pelagicus* ni *Reticulofenestra pseudoumbilica* n'ont été décrits dans ce site); de plus, Barron et Keller n'ont pas pris en compte les sites 158 et 572 D,
- la recherche des taux d'accumulation (essentielle pour l'attribution des âges) ne se fait pas de la même manière dans les deux études,
- les faunes étudiées ne sont pas identiques; Barron et Keller recherchent les maximums et les minimums d'abondance de diatomées et de foraminifères planctoniques d'eaux froides alors que, pour ma part, j'ai recherché les variations de l'indice P (en fonction de l'âge) défini par l'abondance de *Coccolithus pelagicus* à laquelle on soustrait celle de *Reticulofenestra pseudoumbilica* (deux espèces de nannofossiles calcaires).

Ces diverses remarques suffisent à expliquer les différences entre les résultats des deux études. Cependant plusieurs observations s'imposent. La première concerne l'allure générale de la courbe des paléotempératures relative de Barron et Keller et de celle définie dans cette étude (figures 79 et 80). Bien que l'on observe dans le détail des différences dans la répartition des événements chauds et des événements froids, l'allure générale des courbes émanant des deux études présente des similitudes.

Dans les deux cas on remarque en effet qu'entre environ 5 et 7 Ma les événements chauds alternent successivement avec les événements froids et qu'aucune tendance générale ne semble dominer durant cette période. Il en est de même entre 13 et 15 Ma. Par contre, entre 7 et 13 Ma, les variations de l'indice P (figure 79) attestent généralement d'une nette domination de *Coccolithus pelagicus* sur *Reticulofenestra pseudoumbilica* et donc d'une tendance froide marquée (événement froid Fpe 5). Barron et Keller (figure 80) définissent pourtant cinq périodes chaudes (W 9, W 8, W 7, W 6, W 5) et sept périodes froides (C 11, C 10, C 9, C 8, C 7,C 6, C 5).

Cependant, lorsque l'on observe la courbe des paléotempératures établie par Barron et Keller, on s'aperçoit que, entre 7 et 13 Ma, le pourcentage des espèces froides est toujours nettement supérieur à 50%. On peut, de ce fait, se demander si le nombre des événements froids ou chauds définis par cette méthode n'est pas surestimé par Barron et Keller.

B - Etude paléoclimatologique dans le Pacifique ouest

Une étude similaire dans le Pacifique ouest sur les sites 292, 200 et 592 du D.S.D.P. nous a cette fois permis de faire ressortir l'existence de sept événements froids (Fpo 1 à Fpo 7) et de six événements chauds (Cpo 1 à Cpo 6) dans le Pacifique occidental au cours du Néogène.

Les événements chauds :
- Cpo 1 entre 3,1 Ma et 3,8 Ma,
- Cpo 2 entre 4,7 Ma et 5,2 Ma,
- Cpo 3 entre 5,5 Ma et 6 Ma,
- Cpo 4 entre 6,9 Ma et 9,2 Ma,
- Cpo 5 entre 11 Ma et 12 Ma,
- Cpo 6 entre 12,6 Ma et 16,3 Ma.

Les événements froids :
- Fpo 1 entre 1,2 Ma et 3,1 Ma,
- Fpo 2 entre 3,8 Ma et 4,7 Ma,
- Fpo 3 entre 5,2 Ma et 5,5 Ma,
- Fpo 4 entre 6 Ma et 6,9 Ma,
- Fpo 5 entre 9,2 Ma et 11 Ma,
- Fpo 6 entre 12 Ma et 12,6 Ma,
- Fpo 7 entre 16,3 Ma et 23,2 Ma.

Concluons cette études du Pacifique occidental par quelques remarques concernant d'autres études sur le même sujet. Kenneth et Von der Boch (1985), à partir de l'étude des variations des isotopes de l'oxygène dans des sites du leg 90 (dans le sud ouest Pacifique) observent que le $\partial^{18}O$ mesuré sur des tests d'organismes benthiques met en évidence plusieurs événements froids en relation directe avec les étapes successives de la glaciation antarctique (Loutit, Kenneth and Savin, 1983). Certains de ces événements ont été reconnus dans cette étude :
- ils définissent un événement froid au delà de 19,5 Ma (événement froid Fpo 7), un autre entre 12,5 Ma et 11,5 Ma (semblant correspondre à l'événement froid Fpo 6), un événement froid entre 11 Ma et 9 Ma (événement froid Fpo 5) et un autre entre 6,2 Ma et 5 Ma (ce qui pourrait correspondre aux événements froids Fpo 4 et Fpo 5 définis dans le Pacifique ouest),
- ils définissent également un événement chaud entre 9 Ma et 6,5 Ma (événement chaud Cpo 4) et un autre entre 5 Ma et 4 Ma (correspondant peut être à l'événement chaud Cpo 2).

Par contre leur étude fait ressortir des événements que nous n'avons pas détectés dans le Pacifique ouest comme un grand événement chaud entre 16,5 Ma et 19,5 Ma. Rappelons que l'étude de Kenneth et Von der Boch (1985) ne concerne que des sites du sud ouest Pacifique. Les différences entre leurs résultats et ceux de la présente étude peuvent être dues au fait que nous considérons en plus du site 592 (situé dans le sud ouest Pacifique), deux autres sites localisés dans l'hémisphère nord.

C - Etude paléoclimatologique dans l'Atlantique nord

Nous avons cette fois suivi la même démarche pour trois sites du D.S.D.P. localisés dans l'Atlantique nord : les sites 407 (63,94 de latitude nord, 30,58 de longitude ouest), 608 (42,84 de latitude nord, 23,09 de longitude ouest) et 610 (53,22 de latitude nord, 18,89 de longitude ouest).

Nous avons pu mettre en évidence huit événements froids (Fat 1 à Fat 8) en alternance avec neuf événements chauds (Cat 1 à Cat 9) dans l'Atlantique nord entre l'actuel et 24 Ma.

Les événements froids s'ils ne dominent pas en nombre sont prédominants pour ce qui est de leur durée. Les événements froids représentent une durée totale de 15 Ma (moyenne de 1,8 Ma par événement froid) et les événements chauds seulement 8,4 Ma (moyenne de 0,9 Ma par événement chaud) pour une période comprise entre 0,6 Ma et 24 Ma.

Les événements chauds :
- Cat 1 entre 0,6 Ma et 1,6 Ma,
- Cat 2 entre 3,9 Ma et 7,4 Ma,
- Cat 3 entre 9,7 Ma et 10,2 Ma,
- Cat 4 entre 12,7 Ma et 13,1 Ma,

- Cat 5 entre 15,7 Ma et 15,9 Ma,
- Cat 6 entre 16,4 Ma et 16,8 Ma,
- Cat 7 entre 17,1 Ma et 18 Ma,
- Cat 8 entre 19,4 Ma et 20,5 Ma,
- Cat 9 entre 23,6 Ma et 24 MA.

Les événements froids :
- Fat 1 entre 1,6 Ma et 3,9 Ma,
- Fat 2 entre 7,4 Ma et 9,7 Ma,
- Fat 3 entre 10,2 Ma et 12,7 Ma,
- Fat 4 entre 13,1 Ma et 15,7 Ma,
- Fat 5 entre 15,9 Ma et 16,4 Ma,
- Fat 6 entre 16,8 Ma et 17,1 Ma,
- Fat 7 entre 18 Ma et 19,4 Ma,
- Fat 8 entre 20,5 Ma et 23,6 Ma.

Comme l'on signalé de nombreux auteurs, le refroidissement tertiaire s'est effectué en plusieurs étapes.

La formation de la glace antarctique s'est amorcée au début de l'Oligocène (38 Ma). La calotte glaciaire antarctique a atteind à peu près son volume actuel durant le Miocène moyen (14 Ma - 12 Ma). Son volume atteindrait son maximum au cours du Messinien (6 Ma - 5 Ma). Le refroidissement important du pôle nord a commencé vers 8 Ma. On peut corréler ce phénomène avec l'événement froid Fat 2 décrit dans l'Atlantique nord entre 9,7 Ma et 7,4 Ma.

Dès 3,5 Ma des galets isolés, indices de lâchages glaciaires (ice-rafting), sont régulièrement observés dans les sédiments de la baie de Baffin (Arthur *et al.*, 1986). Cela correspond à peu près au début de l'événement froid Fat 1 daté à 3,9 Ma.

La première glaciation à grande échelle des continents septentrionaux s'est développée il y a environ 2,5 Ma (au sein de l'événement froid Fat 2 daté entre 3,9 Ma et 1,6 MA où l'on observe un maximum de la tendance froide à environ 2,9 Ma).

D - Etude paléoclimatologique dans l'océan Indien

Nous avons encore une fois synthétisé les événements chauds et les événements froids détectés dans les sites 251 A, 231 et 238 dans l'océan Indien.

Cette synthèse permet de mettre en évidence quatre événements froids (Foi 1 à Foi 4) en alternance avec quatre événements chauds (Coi 1 à Coi 4) dans l'océan Indien entre l'actuel et 16 Ma environ .

Les événements froids :
- Foi 1 entre 1,7 Ma et 2,8 Ma,
- Foi 2 entre 4,7 Ma et 5,1 Ma,
- Foi 3 entre 6,9 Ma et 7,3 Ma,
- Foi 4 entre 12,3 Ma et 15,6 Ma.

Les événements chauds :
- Coi 1 entre 1,3 Ma et 1,7 Ma,
- Coi 2 entre 2,8 Ma, et 4,7 Ma,
- Coi 3 entre 5,1 Ma et 6,9 Ma,
- Coi 4 entre 7,3 et 12,3 Ma.

Nous ne disposons pas d'informations concernant les âges supérieurs à 16 Ma.

E - Synthèse mondiale

Nous avons regroupé tous les événements climatiques détectés dans l'océan Pacifique, l'océan Atlantique et l'océan Indien en une seule courbe synthétisant les événements climatiques d'ampleur mondiale durant le Néogène (figure 81). La courbe synthétique est tracée en cumulant pour chaque âge les valeurs obtenues dans l'océan Atlantique, l'océan Pacifique et l'océan Indien.

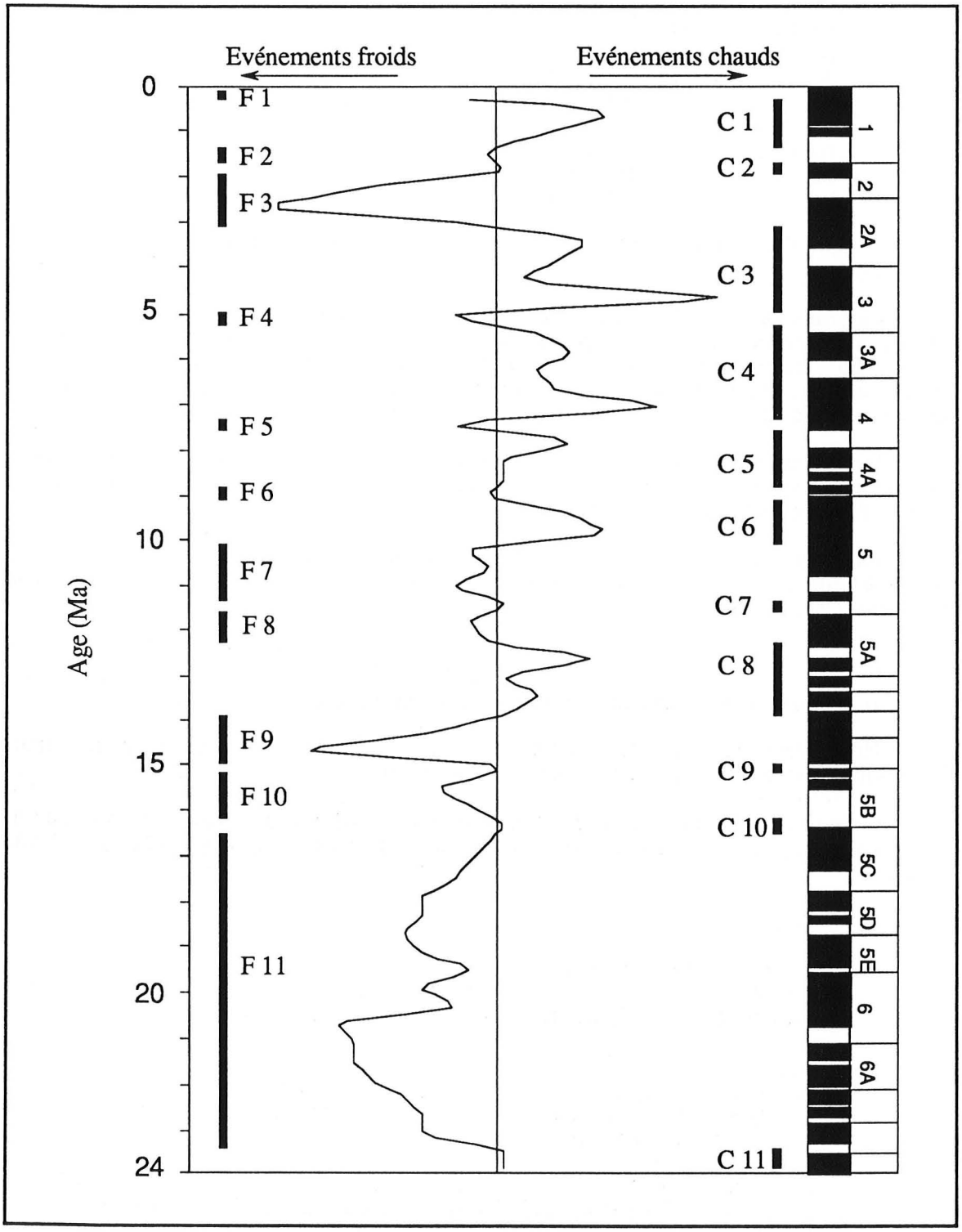


Figure 81 - Courbe synthétisant les événements chauds et les événements froids détectés dans le Pacifique ouest, le Pacifique est, l'Atlantique nord et l'océan Indien.

On arrive à isoler ainsi 11 événements chauds (C 1 à C 11) et dix événements froids (F 1 à F 11) durant le Néogène dans l'océan mondial (figure 81).

Les événements chauds se répartissent comme suit :
- l'événement C 1 entre 0,3 Ma et 1,3 Ma,
- l'événement C 2 entre 1,7 Ma et 1,9 Ma,
- l'événement C 3 entre 3 Ma et 4,9 Ma,
- l'événement C 4 entre 5,2 Ma et 7,3 Ma,
- l'événement C 5 entre 7,6 Ma et 8,8 Ma,
- l'événement C 6 entre 9,1 Ma et 10,1 Ma,
- l'événement C 7 entre 11,2 Ma et 11,4 Ma,
- l'événement C 8 entre 12,2 Ma et 13,9 Ma,
- l'événement C 9 entre 15 Ma et 15,2 Ma,
- l'événement C 10 entre 16,1 Ma et 16,5 Ma,
- l'événement C 11 entre 23,4 Ma et 23,9 Ma.

Les événements froids se répartissent comme suit :
- l'événement F 1 entre 0,1 Ma et 0,3 Ma,
- l'événement F 2 entre 1,3 Ma et 1,7 Ma,
- l'événement F 3 entre 1,9 Ma et 3 Ma,
- l'événement F 4 entre 4,9 Ma et 5,2 Ma,
- l'événement F 5 entre 7,3 Ma et 7,6 Ma,
- l'événement F 6 entre 8,8 Ma et 9,1 Ma,
- l'événement F 7 entre 10,1 Ma et 11,2 Ma,
- l'événement F 8 entre 11,4 Ma et 12,2 Ma,
- l'événement F 9 entre 13,9 Ma et 15 Ma,
- l'événement F 10 entre 15,2 Ma et 16,1 Ma,
- l'événement F 11 entre 16,5 Ma et 23,7 Ma.

La durée moyenne des événements chauds est de 0,95 Ma alors que celle des événements froids est de 1,25 Ma.

Plusieurs remarques s'imposent aux vues de la courbe synthétique de la figure 81 :
- entre 23,4 Ma et 13,9 Ma (c'est-à-dire entre la fin de l'Oligocène supérieur et le début du Miocène moyen), une tendance climatique froide domine (avec les événements froids F 9, F 10 et F 11),
- hormis entre 3 Ma et 1,3 Ma (entre la fin du Pliocène et le début du Pléistocène) et entre 12,2 Ma et 10,1 Ma (fin du Miocène moyen) où des événements froids dominent (les événements froids F 2 et F 3 pour la première période et les événements froids F 7 et F 8 pour la deuxième), la période comprise entre 13,9 Ma et l'actuel est dominée par de nombreux événements chauds de longue durée (les événements chauds C 1, C 2, C 3, C 4, C 5, C 6, C 7 et C 8 avec une durée moyenne de 1,2 Ma) entrecoupés par des événements froids de courte durée (les événements froids F 1, F 2, F 3, F 4, F 5, F 6, F 7 et F 8) avec une durée moyenne de 0,5 Ma.

Juste avant le Miocène inférieur (fin de l'Oligocène supérieur), les eaux de surface de l'océan mondial sont considérées (Savin *et al.*, 1975) comme chaudes. Ce fait est illustré (figure 81) par la présence d'un événement chaud, l'événement C 11 (entre 23,4 Ma et 23,9 Ma).

Savin et ses collaborateurs (1985), dans une étude des variations de températures des eaux de surface de l'océan mondial durant le Néogène (à l'aide des isotopes de l'oxygène), notent un réchauffement progressif des eaux de surface durant le Miocène inférieur dans la quasi totalité des sites qu'ils ont étudiés (localisés dans l'océan Pacifique, l'océan Atlantique et l'océan Indien).

On note effectivement, pour notre part, cette tendance avec le passage "progressif" de l'événement froid F 11 (entre 16,5 Ma et 23,7 Ma) à l'événement chaud C 10 (entre 16,1 Ma et 16,5 Ma).

Savin et ses collaborateurs (1985) observent également qu'entre la fin du Miocène inférieur et le Miocène terminal (entre 16 Ma et 5 Ma), les températures des eaux de surface continuent à

augmenter dans l'océan Pacifique surtout dans les basses et les moyennes latitudes alors que dans les hautes latitudes elles se refroidissent ou restent inchangées. Ils constatent, durant cette période, une augmentation du gradient thermique entre les basses et les moyennes latitudes dans l'océan Pacifique. Quant aux eaux de surface des hautes latitudes de l'Atlantique nord et de la marge orientale de l'Atlantique équatorial, elles tendent à se refroidir également. Dans l'hémisphère sud, les eaux de surface de l'océan Atlantique se réchauffent ou restent inchangées.

On note en effet des événements froids de longue durée et de grande amplitude dans l'Atlantique nord (avec les événements froids Fat 2, Fat 3 et Fat 4) alors que, dans le Pacifique occidental les événements chauds dominent. Il en est de même dans le Pacifique oriental (figure 79) sauf entre 7,3 Ma et 12,5 Ma où l'on observe la présence d'un événement froid (l'événement froid Fpe 5).

Pour ce qui est de l'océan Indien, hormis l'événement froid Foi 4, les événements chauds dominent ici encore.

Cela se traduit sur la courbe synthétique de la figure 81 par une prédominance des événements chauds, avec des événements d'amplitude croissante entre la fin du Miocène inférieur et le Miocène supérieur (événements chauds C 10, C 9, C 8, C 7, C 6, C 5, C 4 et C 3).

Sauf pour ce qui est des événements froids F 7 et F 8 (figure 81), il n'est pas possible d'observer le refroidissement de l'Atlantique nord défini par Savin et ses collaborateurs (1985). Cela est surtout du au fait que le nombre des sites étudiés dans l'océan Pacifique et l'océan Indien (où la tendance chaude ne fait pas de doute) est plus important que le nombre de sites étudiés dans l'Atlantique nord.

Savin et ses collaborateurs (1975) indiquent qu'une brusque baisse de température des eaux de surface de l'océan mondial survient au Pliocène terminal tout au moins dans les hautes latitudes. Ils attribuent cette baisse des températures à un phénomène de glaciation polaire. Il s'agit de l'événement froid de grande amplitude F 3 défini entre 1,9 Ma et 3 Ma (figure 81) qui est observé aussi bien dans le Pacifique est (figure 79) que le Pacifique ouest ou l'Atlantique nord et l'océan Indien .

Comparons ces résultats avec ceux émanant de l'étude des taux et des vitesses instantanées d'accumulation.

Rappelons qu'au travers de cette étude (voir ci-dessus) nous avons défini sept hiatus mondialement reconnus :

- le hiatus n° 1 entre 2 Ma et 2,8 Ma,
- le hiatus n° 2 entre 4,8 Ma et 5,2 Ma,
- le hiatus n° 3 entre 6,8 Ma et 7,6 Ma,
- le hiatus n° 4 entre 10,4 Ma et 10,8 Ma,
- le hiatus n° 5 entre 12 Ma et 12,4 Ma,
- le hiatus n° 6 entre 13,2 Ma et 13,6 Ma,
- le hiatus n° 7 entre 17,6 Ma et 19,2 Ma.

Il est évident que, à l'exception d'un seul hiatus (le hiatus n° 6 entre 13,2 Ma et 13,6 Ma), tous les autres hiatus sont liés à un événement froid (figure 82).

C'est ainsi que :

- le hiatus n° 1 (défini entre 2 Ma et 2,8 Ma) est lié à l'événement froid F 3 (entre 1,9 Ma et 3 Ma),
- le hiatus n° 2 (défini entre 4,8 Ma et 5,2 Ma) est lié à l'événement froid F 4 (entre 4,9 Ma et 5,2 Ma),
- le hiatus n° 3 (défini entre 6,8 Ma et 7,6 Ma) est lié à l'événement froid F 5 (entre 7,3 Ma et 7,6 Ma),
- le hiatus n° 4 (défini entre 10,4 Ma et 10,8 Ma) est lié à l'événement froid F 7 (entre 10,1 Ma et 11,2 Ma),
- le hiatus n° 5 (défini entre 12 Ma et 12,4 Ma) est lié à l'événement froid F 8 (entre 11,4 Ma et 12,2 Ma),

- le hiatus n° 7 (défini entre 17,6 Ma et 19,2 Ma) est lié à l'événement froid F 11 (entre 16,5 Ma et 23,7 Ma).

Rappelons également que Van Andel *et al.* (1975) et Moore et *al.* (1978) avaient suggeré que les hiatus miocènes correspondaient aux périodes durant lesquelles la glaciation antarctique s'intensifiait notablement en entraînant de ce fait une augmentation de l'activité des eaux profondes antarctiques, plus puissantes et plus corrosives. De part leur double action chimique et mécanique, les eaux de fond entraînent, lors d'un refroidissement climatique, soit une lacune de sédimentation soit, tout au moins, des accumulations sédimentaires réduites.

Aux vues de ces constatations on comprend aisément le lien entre six des sept hiatus définis lors de la présente étude et l'existence des événements froids F 3, F 4, F 5, F 7, F 8 et F 11.

Autant il semble évident qu'il existe un lien étroit entre les événements climatiques froids et les hiatus, autant les maximums de sédimentation coïncident souvent avec des périodes durant lesquelles dominent les événements chauds (figure 82).

D'un point de vue plus général on peut facilement mettre en évidence le lien fréquent qu'il existe entre la coexistence d'un hiatus ou d'un minimum de sédimentation avec un événement climatique froid et celle d'un maximum de sédimentation avec un événement climatique chaud (figure 82).

Pour étayer ces constatations, nous citerons plusieurs exemples caractéristiques de ces phénomènes.

Mise en évidence de liens entre événements climatiques chauds et maximums de sédimentation (figure 82) :

- la période de "maximums" entre 3,2 Ma et 4,8 Ma (figure 82) correspond avec la présence d'un événement chaud, l'événement C 3 défini entre 3 Ma et 4,9 Ma,
- les maximums de sédimentation entre 5,7 Ma et 6,8 Ma environ semblent liés à la présence de l'événement chaud C 4 défini entre 5,2 Ma et 7,3 Ma,
- la période de "maximums" entre environ 8 Ma et 10 Ma (figure 82) coïncide avec les deux événements chauds C 5 (défini entre 7,6 Ma et 8,8 Ma) et C 6 (défini entre 9,1 Ma et 10,1 Ma); la légère inflexion de la courbe des maximums aux environs de 9 Ma pourrait par conséquent correspondre à l'événement froid de courte durée F 6 (entre 8,8 Ma et 9,1 Ma) intercalé entre les événements chauds de longue durée C 5 et C 6,
- à 15 Ma on observe un pic correspondant à des maximums de sédimentation; celui-ci semble lié à l'événement chaud C 9 défini entre 15 Ma et 15,2 Ma.

Mise en évidence de liens entre événements climatiques froids et minimums de sédimentation (figure 82) :

- le lien entre les hiatus et les événements climatiques froids ont été clairement établis ci-dessus,
- lorsque un événement froid ne se traduit pas par un hiatus il est souvent lié à une sédimentation peu importante (augmentation du nombre des minimums); c'est le cas par exemple de l'événement froid F 9 qui, s'il ne se traduit pas par un minimum de sédimentation, entraîne une chute remarquable du nombre des maximums (figure 82); de plus, l'événement froid F 11 (entre 16,5 Ma et 23,7 Ma) se traduit en plus du hiatus n° 7 par une période durant laquelle le nombre des minimums de sédimentation l'emporte sur le nombre des maximums (figure 82).

IV - Conclusion

A - Intégration des résultats dans un schéma eustatique global

En guise de conclusion à ce chapitre, nous allons maintenant essayer de corréler (figure 82) les résultats obtenus dans cette étude avec la courbe des événements eustatiques élaborée par Haq et ses collaborateurs (1987).

Les cycles globaux des changements relatifs du niveau de la mer ont été établis à l'origine par Vail et *al.* (1977) et Vail et Hardenbol (1979). Ces cycles sont définis à partir de profils sismiques mettant en évidence des transgressions littorales sur les bordures de plates-formes. En 1987, Haq et ses collaborateurs, en réponse à de nombreuses critiques, révisent la courbe initiale des variations eustatiques en y intégrant un grand nombre de données supplémentaires (provenant notamment de coupes à terre), et aboutissent à une courbe modélisant les variations du niveau de l'océan mondial depuis le Trias.

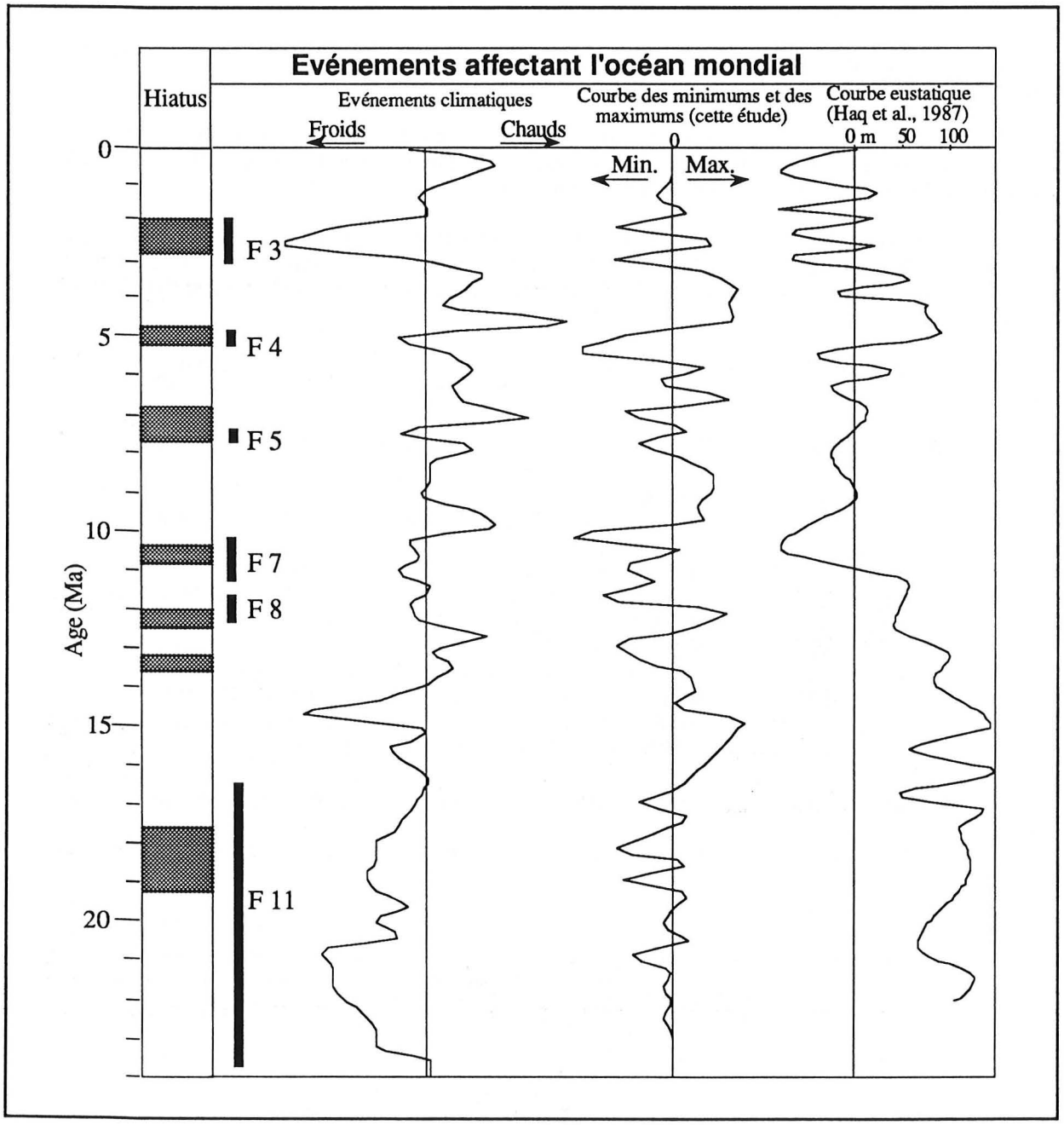


Figure 82 - Comparaison entre la courbe des maximums et des minimums de sédimentation, celle des événements chauds et des événements froids (définies dans cette étude) et celle des fluctuations du niveau marin (définie par Haq et ses collaborateurs en 1987) pour le Néogène.

Monjanel (1987) a réalisé une synthèse des hiatus néogènes dans l'Atlantique nord. Il ressort de ses travaux que les hiatus les plus représentés dans l'Atlantique nord correspondent aux périodes de régressions majeures de l'histoire néogène. Ces périodes de régressions correspondent quant à elles aux minimums de la courbe de Vail.

Même s'il existe, dans notre étude, des différences notoires entre la courbe des maximums et des minimums de sédimentation et la courbe de Vail, notamment entre 10 Ma et 14,5 Ma et avant 1,5 Ma, bon nombre des pics de la courbe des minimums et des maximums de sédimentation se retrouvent dans la courbe des variations eustatiques.

Comparons maintenant la courbe des événements climatiques détectés dans cette étude dans l'océan mondial au cours du Néogène avec la courbe des variations eustatiques durant la même période.

Là encore, hormis quelques différences, on peut mettre en parallèles de nombreuses variations identiques sur les courbes.

Nous ne citerons que quelques exemples caractéristiques :

- l'événement froid F 3 (figure 82) défini entre 1,9 Ma et 3 Ma peut être corrélé avec deux minimums de la courbe de Vail. Ainsi, on peut avancer l'hypothèse suivant laquelle le hiatus n° 1 (entre 2 Ma et 2,8 Ma) est lié à l'événement froid F 3 ainsi qu'à la période de bas niveau marin défini par la courbe de Vail. Il est en effet couramment admis qu'une lacune sédimentaire est souvent liée à une période de bas niveau marin lors d'un refroidissement climatique notable (accompagné d'un phénomène de piégeage de l'eau des océans dans les calottes glaciaires),
- de même le hiatus n° 2 (entre 10,4 Ma et 10,8 Ma), qui est lui-même lié à l'événement froid F 7 (figure 82), coïncide avec une période bas niveau marin sur la courbe de Vail .

Cependant quelques différences importantes entre les deux courbes ne manquent pas d'attirer notre attention.

Il semble que certaines fluctuations climatiques n'expliquent pas à elles seules les variations du niveau marin. C'est le cas par exemple à environ 7,8 Ma où un événement chaud (l'événement chaud C 5) coïncide avec une période de bas niveau marin.

Quelles peuvent être les raisons d'une telle discordance entre les deux courbes ?

Il est évident que les variations du niveau marin ne sont pas uniquement dues à des changements climatiques. D'autres hypothèses ont été avancées comme celle faisant intervenir les changements des vitesses d'accrétion des fonds océaniques, ces phénomènes modifiant la forme et la capacité des bassins océaniques.

De plus certains des événements climatiques définis dans cette étude, même s'ils sont perceptibles sur une courbe synthétique, peuvent être plus ou moins localisés. Il en est de même pour la courbe des maximums et des minimums.

Ces précisions apportées, on constate néanmoins que la quasi totalité des hiatus détectés dans cette étude sont corrélés avec des événements climatiques froids (également définis dans cette étude). Certains d'entre eux peuvent également être mis en parallèle avec des périodes de bas niveau marin.

De plus, d'un point de vue plus général, bon nombre des événements froids coïncident avec une période de bas niveau marin (et de sédimentation peu importante). A l'inverse, de nombreux événements chauds correspondent à des périodes de haut niveau marin (et de sédimentation importante).

B - Synthèse des cartes d'isopaques

En tout, 180 cartes d'isopaques (soit 60 par océan) ont été tracées pour l'océan Atlantique l'océan Pacifique ou l'océan Indien durant le Néogène. L'annexe C n'en présente qu'une petite partie (près d'un tiers). Il était nécessaire de présenter les résultats fournis par la totalité de ces cartes.

Nous avons pour cela synthétisé les résultats des cartes d'isopaques au sein de diagrammes (un par océan) à trois dimensions dans lesquels l'axe des abscisses porte les âges (entre 0,4 Ma et 22,8 Ma pour l'Atlantique, entre 0,4 Ma et 23,2 Ma pour l'océan Pacifique et entre 0,4 Ma et 16,8 Ma pour l'océan Indien), l'axe des ordonnées indiquant les sites étudiés avec leurs latitudes (ordonnées des plus fortes aux plus basses de haut en bas) et l'axe des Z les vitesses instantanées d'accumulation en mètres par Ma (figures 100, 101 et 102). Si l'échelle des âges et celle des vitesses instantanées d'accumulation sont continues, celle des latitudes ne l'est pas.

1 - L'océan Atlantique

L'équateur actuel se trouve à peu près au niveau du site 354, le site le plus septentrional étant le site 407 (63,9° de latitude nord) alors que le plus austral est le site 513 A (avec -47,6° de latitude sud).

Plusieurs remarques s'imposent aux vues de la figure 83.

On note que les sites localisés dans l'Atlantique nord ont une évolution sensiblement identique durant le Néogène en ce qui concerne les vitesses instantanées d'accumulation. Pour comprendre ce phénomène, effectuons quelques rappels sur la sédimentation dans cette région durant le Néogène.

Il est actuellement établi que les dépôts siliceux sont localisés soit au niveau des zones d'upwellings soit dans les zones de divergences antarctiques ou équatoriales (Berger, 1974), c'est-à-dire là où les masses d'eaux profondes, enrichies en éléments nutritifs issus de la décomposition du microplancton, remontent vers la surface.

Comme l'indique Monjanel (1987), la silice biogène permet de mettre en évidence des zones de fortes productivités de surface liées à la présence d'upwellings le long des côtes européennes et africaines au Miocène inférieur et le lien entre les périodes de hiatus (et les périodes de régressions) et les dépôts siliceux dans les régions d'upwellings paraît évident.

Vers 16 Ma (Miocène moyen), Keller et Barron (1983) signalent que la silice biogène se déplace des basses latitudes de l'océan Atlantique vers les océans Pacifique et Indien.

C'est à cette époque que se déposent (entre 6-8 Ma et 16 Ma) des sédiments siliceux sur le pourtour de l'Atlantique nord, sur et au pied des marges américaine, africaine et européenne et sur les haut-fonds du plateau de Rockall (entre l'Islande et l'Irlande). Keller et Barron (1983) suggèrent que la subsidence de la plate-forme de Faeroé (datée à 16 Ma) provoquerait la formation d'eaux profondes (froides) dans la Mer de Norvège et donc une intensification des courants d'upwellings (Vogt, 1972; Sclater *et al.*, 1977; Roberts *et al.*, 1979; Shor et Poore, 1979).

D'après Monjanel (1987), ce n'est qu'à la fin du Miocène que les dépôts de silice biogène se raréfient dans l'Atlantique nord. En effet, depuis la fin du Miocène terminal, les dépôts de silice biogène sont cantonnés dans la Mer de Norvège et la Mer du Labrador et aux environs de la dorsale médio-océanique dans les moyennes latitudes.

Les sites 407, 116 et 610 (sur la marge orientale du Groenland pour le premier et dans la région du plateau de Rockall pour les deux autres) reflètent bien l'évolution des vitesses instantanées d'accumulation dans l'Atlantique nord (figure 83). On remarque que les principaux pics pour ces trois sites sont datés à 1,6 Ma, 2 Ma, 4 Ma, 7,6 Ma, 9,6 Ma, 11,2 Ma, 15 Ma et 17 Ma ce qui correspond à des événements froids définis précédemment dans l'Atlantique nord. Cela confirme le fait qu'une sédimentation importante n'est pas forcément incompatible avec une période froide.

Sauf pour le site 139 (sur la marge africaine), les vitesses instantanées d'accumulation sont généralement beaucoup plus importantes pour les sites les plus nordiques. Elles sont relativement élevées entre 22,8 Ma et 10,4 Ma (près de 40 m/Ma) et deviennent très importantes entre 10,4 Ma et l'actuel (près de 60 m/Ma pour les sites les plus septentrionaux).

Les sites localisés sur la marge est de l'Amérique du nord (les sites 391 A, 603, 106 B et 94) ainsi que le site 558 (sur la dorsale médio-océanique) présentent la même évolution que les sites les plus nordiques, mais, dans ce cas, les vitesses instantanées d'accumulation commencent à baisser considérablement entre 5 Ma et 3,5 Ma (début du Pliocène). Ces remarques confirment le fait que la sédimentation siliceuse dans les sites du pourtour de l'Atlantique nord est directement liée aux courants d'upwellings induits par des incursions d'eaux froides d'origine polaire (elles-mêmes liées à des refroidissements climatiques). On constate qu'elle est d'autant plus importante que la latitude des sites est élevée. Elle est limitée aux sites les plus nordiques à partir du début du Pliocène (figure 83).

Le site 396 localisé sur la ride médio-océanique dans une zone de faible productivité ne présente jamais de vitesses instantanées d'accumulation élevées durant la totalité du Néogène.

Le site 139, localisé au pied de la marge ouest africaine (dans la région des îles du Cap Vert) est le cadre de fortes vitesses d'accumulation entre 19,2 Ma et 12 Ma et entre 7,2 Ma et 2,8 Ma (figure 83). Cette région est sujette à l'action de vigoureux courants d'upwellings (Ruddiman *et al.*, 1989). Pour Stabel (1989) qui a étudié la distribution des diatomées d'eaux froides dans cette région, 2,8 Ma est un âge au cours duquel s'effectue un changement climatique notable sur le continent africain adjacent.

Les sites 31, 153, 30 et 354, localisés sur la marge nord du continent sud américain, sont le cadre d'accumulations sédimentaires très peu importantes durant la totalité du Néogène sauf à partir d'environ 2,8 Ma où les vitesses instantanées d'accumulation augmentent sensiblement (figure 83). Il est d'ailleurs établi que les accumulations sont peu importantes dans cette région et qu'elles augmentent avec les sédiments les plus récents.

Par exemple, les vitesses d'accumulation plus importantes dans le site 30 seraient dus à des apports de matériel détritique fin d'origine volcanique. Des apports turbiditiques peuvent également intervenir pour ces sites au Plio-Pléistocène (Benson *et al.*, 1969).

Comme le montre la figure 83 et comme l'indiquent Hodell et Kennett (1985), trois grandes périodes peuvent être distinguées dans la sédimentation néogène dans l'Atlantique sud. Signalons que trois grandes tendances sédimentaires dominent dans l'Atlantique sud :

- la sédimentation sur la marge ouest africaine (sites 360, 362, 364),
- la sédimentation sur la marge est américaine (sites 357 et 519),
- la sédimentation "centrale" (sites 513 A et 519).

Hodell et Kennett (1985) signalent que les conditions hydrologiques sont sensiblement équivalentes dans l'Atlantique sud entre 22 Ma et 16 Ma. La figure 83 montre en effet des vitesses instantanées d'accumulation faibles mais constantes entre 22,8 Ma et 16 Ma. Aucun indice d'upwelling n'est alors décelable. Ils indiquent également que la sédimentation change considérablement entre 16 Ma et 8 Ma sur la marge africaine et reflètent la naissance de courants d'upwellings dans ces régions. Ces phénomènes sont une conséquence de l'influence prépondérante des courants d'origine polaire qui longent la côte africaine (eux-mêmes induits par un accroissement de la calotte glaciaire antarctique). Les vitesses d'accumulation deviennent effectivement importantes à partir de 16 Ma (site 360) et à 13,2 Ma (sites 362 et 364). Les vitesses instantanées d'accumulation pour les autres sites ne semblent pas affectées par ce phénomène. Hodell et Kennett (1985) ajoutent que cette tendance s'intensifie encore à partir de 8 Ma. La figure 83 montre effectivement un maximum des vitesses d'accumulation dans cette région (site 362) à 8 Ma.

Quant aux sites centraux de l'Atlantique sud, leurs vitesses d'accumulation restent inchangées (et faibles) durant tout le Néogène.

Pour ce qui est des sites 357 et 525 A (sur la marge ouest de l'Atlantique sud), les vitesses instantanées d'accumulation n'augmentent légèrement qu'à partir d'environ 8 Ma, ce qui pourrait illustrer une intensification du courant côtier des Falklands longeant les côtes de l'Amérique latine.

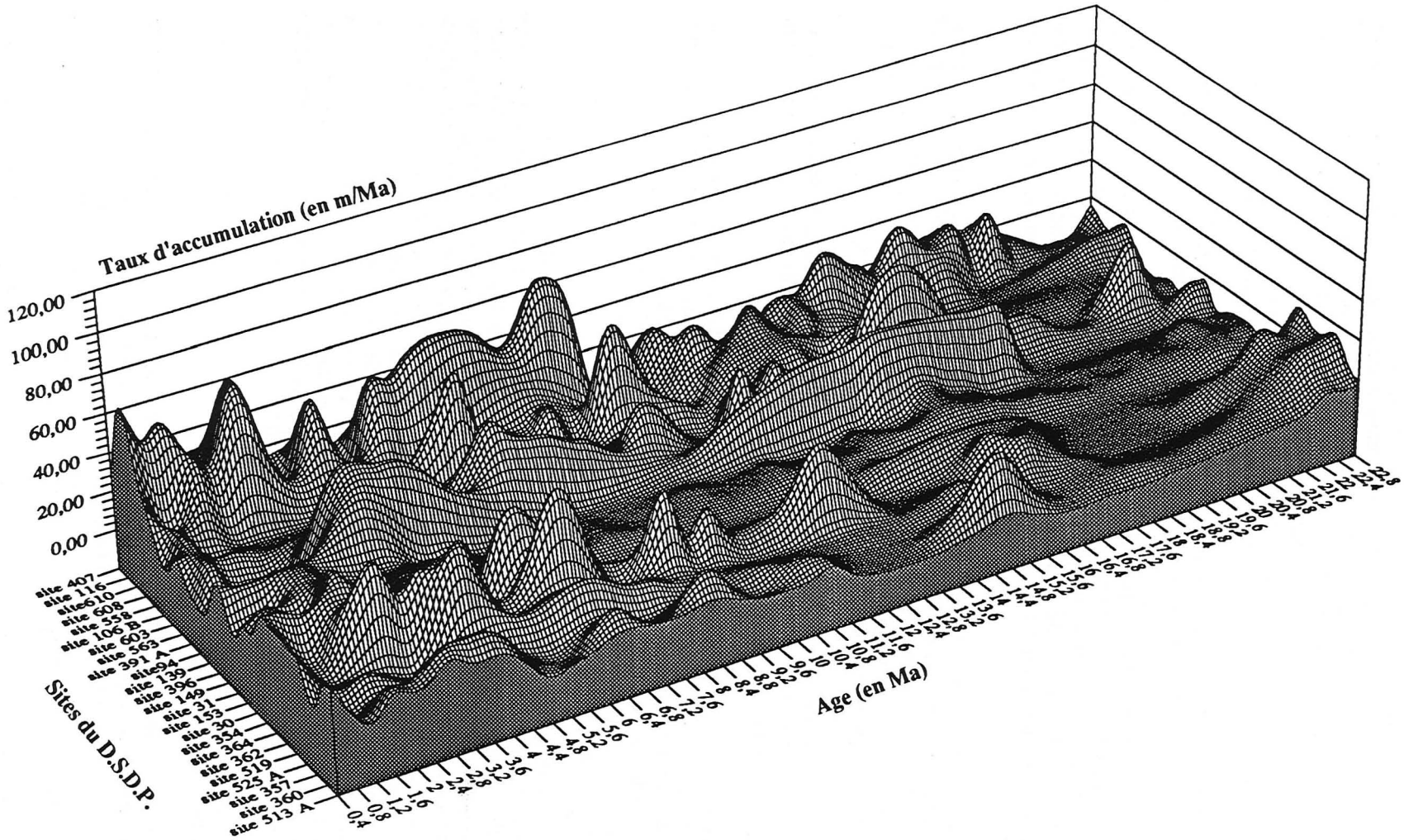


Figure 83 - Diagramme synthétisant l'évolution des vitesses instantanées d'accumulation dans les sites étudiés dans l'océan Atlantique durant le Néogène. L'axe des abscisses est l'axe temporel. Sur l'axe des ordonnées sont portés les sites du D.S.D.P. classés par latitudes décroissantes. Le troisième axe illustre les vitesses instantanées d'accumulation (par site et par âge) exprimées en mètres par Ma

2 - L'océan Pacifique

La figure synthétisant l'évolution des vitesses instantanées d'accumulation dans l'océan Pacifique (figure 84) est plus délicate à interpréter. Dans ce cas, les nombreux pics de grande amplitude affectant la figure en rendent la lecture moins aisée que dans le cas précédent. On peut cependant s'attarder sur quelques points caractéristiques.

Les sites 158, 155, 84 et 83 A présentent une évolution sensiblement identique au cours du Néogène. Les vitesses instantanées d'accumulation y sont stables et demeurent peu élevées avant 7,2 Ma. Elles deviennent considérables à partir de cet âge. Cette augmentation coïncide avec le début de la fermeture de l'Isthme de Panama et la création de courants d'upwellings dans le Golfe de Panama. Les vitesses d'accumulations diminuent ensuite puis amorcent une très nette reprise cers 2,8 Ma. Cet âge correspond à la clôture définitive de l'Isthme de Panama et à la création de courants d'upwellings vigoureux bien installés dans cette région.

La même tendance s'observe également dans les sites 572 D, 573 B, 574 A et 80 A (avec cependant des vitesses d'accumulation mois élevées) confirmant le fait que la sédimentation dans cette région (comme nous l'avons déjà suggéré dans ce chapitre) est également influencée par la fermeture de l'Isthme de Panama. Signalons que Houghton (1989) indique que l'augmentation de la densité de *Coccolithus pelagicus* à la fin du Pliocène (vers 2,8 Ma) dans le site 677 A du programme O.D.P. (localisé dans le Golfe de Panama) reflète une intensification des courants d'upwellings liés à la fermeture de l'Isthme de Panama.

Les sites 289, 288, 317 B, 205, 208, 590 B, 592 et 587 présentent également une évolution semblable. L'évolution des vitesses instantanées d'accumulation du site 592 reflète en grande partie celle des sites localisés au large de la marge occidentale australienne. On remarque que bon nombre des maximums du site 592 coïncident avec des périodes chaudes définies précédemment dans le Pacifique ouest et que la plupart des minimums correspondent avec des périodes froides. Le lien suggéré précédemment entre événements climatiques et tendances sédimentaires est là encore décelable. Par exemple, les maximums d'accumulation détectés à 3,2 Ma, 5,6 Ma, 9 Ma, 11,6 Ma, 14,4 Ma et 16 Ma (figure 84) dans le site 592 coïncident avec des événements chauds définis dans cette région qui sont respectivement les événements Cpo 1, Cpo 3, Cpo 4 et Cpo 6 pour les deux derniers pics.

Considérons maintenant le cas des sites localisés sur la marge nord-ouest de l'océan Pacifique (sites 292, 448, 296, 438, 436, 443 et 581).

Les vitesses d'accumulation peuvent être considérables dans ces sites. De part leur localisation sur ou près d'une marge active, ils fonctionnent (surtout entre 10 Ma et l'actuel) comme de véritables pièges à sédiments. Mann et Müller (1977) signalent que les dépôts sédimentaires dans ces régions varient entre des apports terrigènes importants provenant de l'arc du Japon et des dépôts de silice biogène. Cela est très net sur la figure 84 pour les sites 436, 296, 438 et 292.

Quant aux sites localisés dans la zone intertropicale du Pacifique central, ils sont situés dans une zone de faible productivité de surface et les vitesses instantanées d'accumulation y sont par conséquent faibles durant tout le Néogène. Cela se devine seulement sur la figure 84 (les nombreux pics présents sur la figure "masquent" les périodes de faible accumulation) mais est nettement visible sur les cartes de l'annexe C.

3 - L'océan Indien

La figure 85, plus facile à lire que la précédente, synthétise l'évolution des vitesses instantanées d'accumulation dans l'océan Indien.

Trois grandes tendances peuvent être observées sur la figure 85. Chacune d'elles caractérise la sédimentation dans une portion de l'océan Indien.

La première tendance est illustrée par les sites 212, 214, 216, 217 et 238. Ces sites sont localisés dans la partie orientale de l'océan Indien entre l'Australie et le sud de la péninsule indienne.

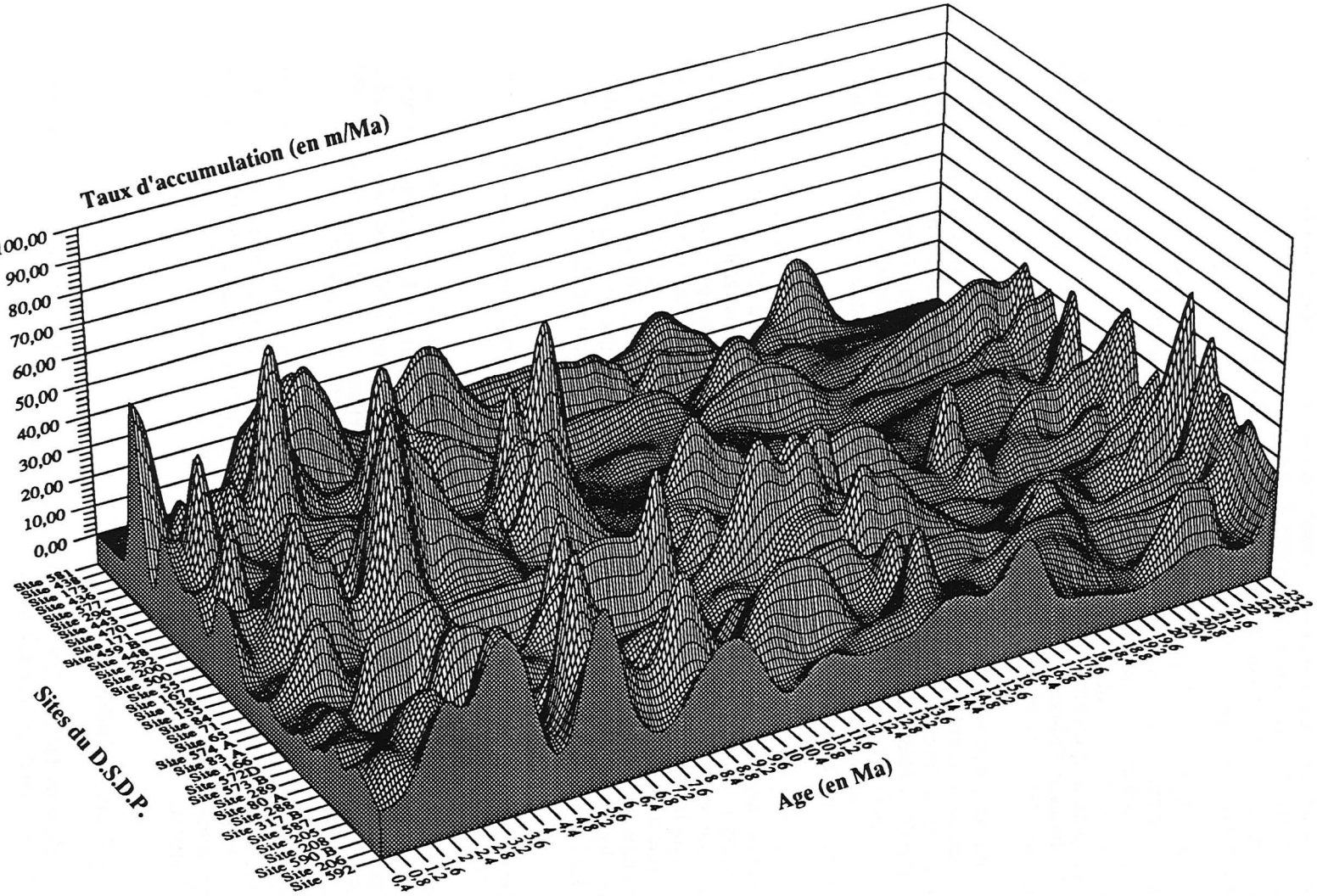


Figure 84 - Diagramme synthétisant l'évolution des vitesses instantanées d'accumulation dans les sites étudiés dans l'océan Pacifique durant le Néogène. L'axe des abscisses est l'axe temporel. Sur l'axe des ordonnées sont portés les sites du D.S.D.P. classés par latitudes décroissantes. Le troisième axe illustre les vitesses instantanées d'accumulation (par site et par âge) exprimées en mètres par Ma

Les vitesses instantanées d'accumulation présentent peu de variations durant le Néogène dans ces sites. Elles restent le plus souvent peu élevées (en général moins de 10 m/Ma) mais elles peuvent atteindre 30 m/Ma pour les sites 238 et 214 vers 4,4 Ma. Notons que cette période coïncide avec l'événement chaud Coi 2 défini précédemment entre 2,8 Ma et 4,7 Ma.

Les sites 223, 231, 219 et 235 localisés sur la marge nord-est de l'océan Indien évoluent différemment. Pour ces sites, les vitesses d'accumulation sont très faibles après 12,2 Ma mais peuvent être très importantes entre cette période et l'actuel. Les vitesses instantanées d'accumulation peuvent alors atteindre 60 m/Ma et ne présentent de fortes diminutions qu'à 5 Ma (événement froid Foi 2) et à 9,2 Ma (fin du grand événement froid Foi 4 défini dans l'océan Indien).

Cette tendance s'observe partiellement dans les sites 250, 242 et 251 A localisés sur la marge sud-ouest de l'Afrique. Elle est identique pour la quasi totalité de la période étudiée sauf entre 0,4 Ma et 0,8 Ma où les vitesses d'accumulation sont faibles et après 12,8 Ma où elles sont élevées.

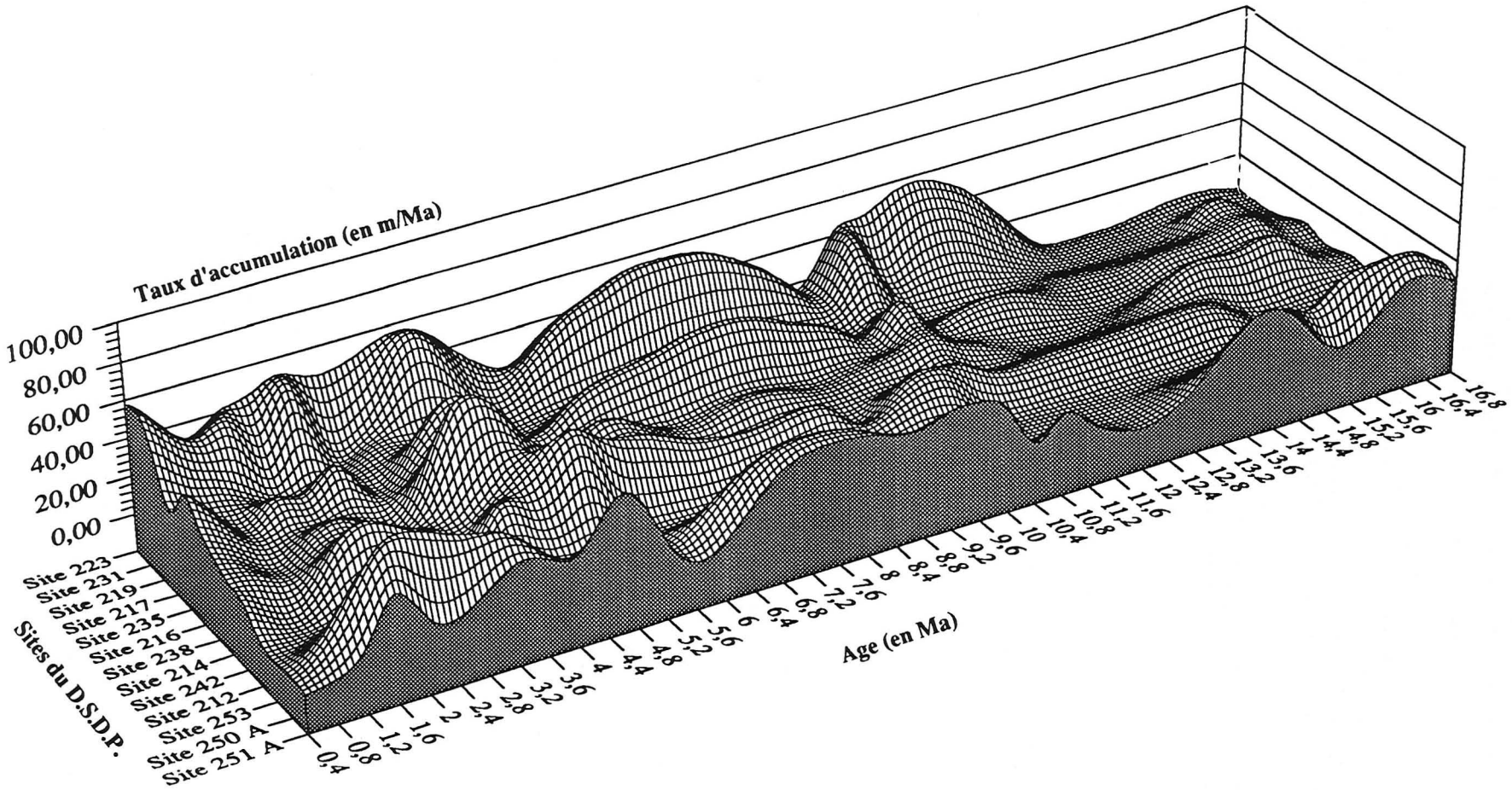


Figure 85 - Diagramme synthétisant l'évolution des vitesses instantanées d'accumulation dans les sites étudiés dans l'océan Indien durant le Néogène. L'axe des abscisses est l'axe temporel. Sur l'axe des ordonnées sont portés les sites du D.S.D.P. classés par latitudes décroissantes. Le troisième axe illustre les vitesses instantanées d'accumulation (par site et par âge) exprimées en mètres par Ma

CHAPITRE 4 - Application de la méthode des associations unitaires à un problème biochronologique concret - Etude dans la région de Panama

Mettons tout d'abord l'accent sur la différence entre biostratigraphie et biochronologie. D'après Guex (1979), la biostratigraphie s'applique d'une manière générale à tout ce qui touche à l'étude du contenu fossilifère des roches (en incluant les études paléontologiques, celles des biofaciès...) alors que la biochronologie s'occupe uniquement des taxons, au sein d'un assemblage fossile, susceptibles de pouvoir approximer l'âge d'un dépôt sédimentaire contenant cet assemblage fossile.

I - La méthode des associations unitaires

Une échelle biochronologique discrète élaborée par la méthode des associations unitaires est définie comme une succession irréversible d'événements biologiques mutuellement exclusifs (les coexistences d'espèces). La méthode des associations unitaires qui est déterministe (et non pas statistique) permet de mettre en évidence des ensembles exclusifs d'espèces (les associations unitaires) et d'en découvrir la séquence chronologique en vue de constituer une échelle biochronologique discrète, c'est-à-dire dont les subdivisions ou zones ne sont pas forcément contigües (Guex, 1977).

L'élaboration d'une telle échelle s'avère difficile pour deux raisons majeures :
- les documents paléontologiques dont on dispose sont très fragmentaires et nous ne percevons qu'une partie du domaine d'existence spatio-temporelle des espèces fossiles (figure 86),
- les apparitions et les disparitions des espèces sont hétérochrones d'une région à l'autre et l'on ne peut trouver des éléments de synchronisme qu'en considérant les intervalles de coexistences de plusieurs espèces, d'où l'intérêt d'utiliser des associations d'espèces (Guex, 1977).

Avant de présenter plus en détail la méthode des associations unitaires, il est utile de rappeler quelques définitions dont certaines peuvent pourtant sembler triviales :
- la présence d'une espèce fossile dans une unité lithostratigraphique indique que ce niveau sédimentaire s'est déposé durant au moins une partie de l'intervalle d'existence de cette espèce,
- deux espèces (et par extension plusieurs) espèces sont dites compatibles si elles ont coexisté réellement (coexistence observée) ou virtuellement, auquel cas il s'agit d'une coexistence déduite (figure 87),
- une association unitaire est un ensemble maximum d'espèces compatibles.

Selon Guex (1978), les espèces géographiquement confinées engendrent une multiplication des associations unitaires qui n'ont de ce fait plus aucune valeur chronologique. Seules les associations unitaires identifiables sur de vastes étendues géographiques (elles sont dites reproductibles) sont chronologiquement significatives.

La méthode des associations unitaires fait appel à un concept mathématique complexe, la théorie des graphes. La construction d'une échelle biochronologique basée sur cette méthode est considérablement facilitée par l'utilisation d'un programme (le programme DV 86) élaboré par Guex et Davaud (1978, 1982, 1984). La description de ce programme et son utilisation dans le contexte de la base de données du D.S.D.P. seront abordés plus loin.

A - Introduction à la théorie des graphes

Un graphe est défini comme un ensemble de points (les sommets) reliés par des segments de droites orientés (les arcs) ou non (les arètes).

Il est possible de représenter un graphe par une matrice carrée qui regroupe les relations déduites du graphe. Graphe et matrice représentent les relations biostratigraphiques entre les espèces. La méthode des associations unitaires est basée sur l'étude de ces matrices et de ces graphes.

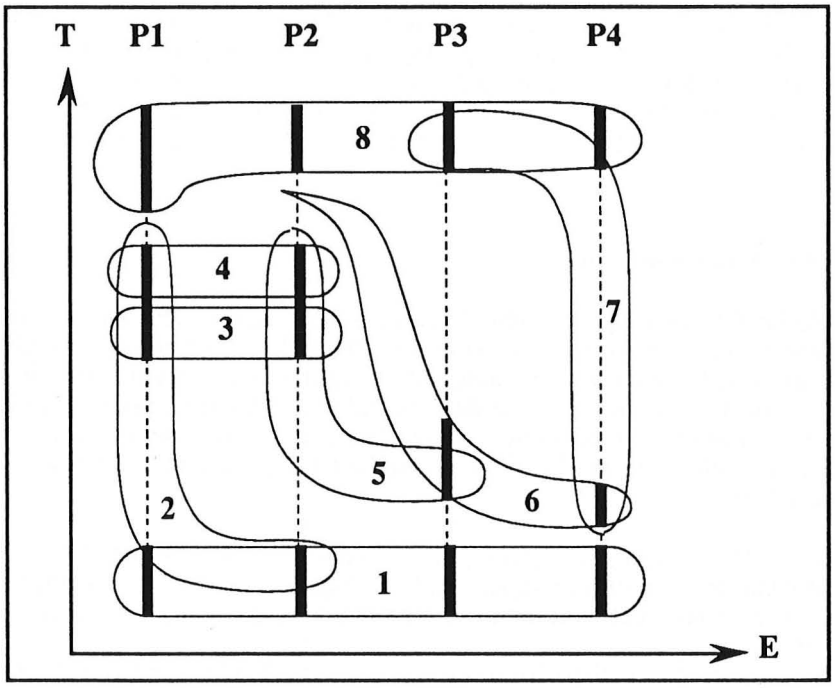


Figure 86 - Projection plane des domaines d'existence spatio-temporels (T est l'axe temporel et E l'axe spatial) de 8 espèces (numérotées de 1 à 8). Les pointillés verticaux représentent la trace des profils stratigraphiques discontinus P1 à P4 qui traversent ces domaines d'existence et enregistrent partiellement les domaines d'existences de chaque espèce. Les traits verticaux épais représentent les existences observées des espèces dans les profils P1, P2, P3 et P4 (d'après Guex, 1987).

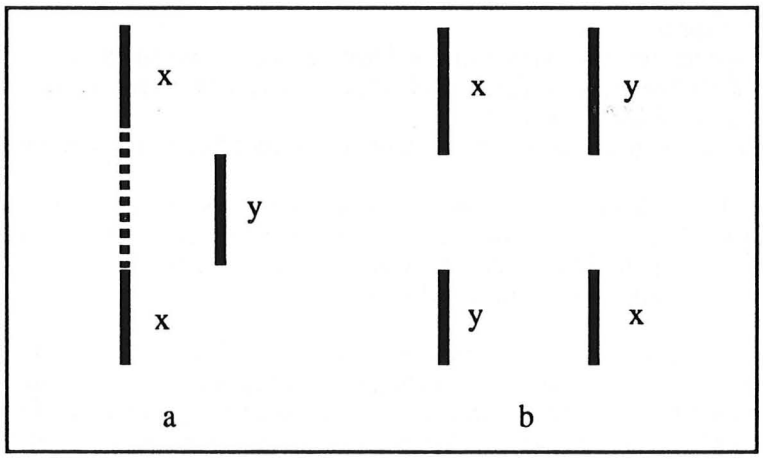


Figure 87 - Les deux cas dans lesquels on peut déduire une coexistence entre deux espèces x et y (coexistence virtuelle). Dans le cas a l'extension de l'espèce x dans un profil local est discontinue. Dans le cas b, on observe des superpositions stratigraphiques inversées des espèces x et y dans deux profils distincts (d'après Guex, 1987).

B - Construction du graphe biostratigraphique

La méthode des associations unitaires faisant appel à des notions mathématiques relativement complexes, je la présenterai le plus clairement possible à travers un exemple. Le lecteur intéressé par ces concepts pourra se référer aux publications de Guex et de Davaud ainsi qu'à l'ouvrage de Berge (1983).

Cet exemple est tiré d'une compilation des travaux de Guex (1987) réalisés entre 1977 et 1984. Il s'agit d'une étude biochronologique utilisant la méthode des associations unitaires basée sur 15 espèces d'alvéolines réparties dans 11 profils en Yougoslavie.

Le graphe créé (figure 88) pour cet exemple modélise les relations stratigraphiques entre les espèces. Chaque sommet représente une des 15 espèces. Les arètes traduisent les relations de coexistences. Les espèces 8 et 9 coexistent, c'est-à-dire qu'on les rencontre dans le même niveau dans au moins un profil. Les arcs représentent les relations de superposition entre les espèces. L'arc orienté de l'espèce 11 vers l'espèce 10, par exemple, indique que l'espèce 11 a été observée au moins une fois sous l'espèce 10 ou au même niveau que l'espèce 10.

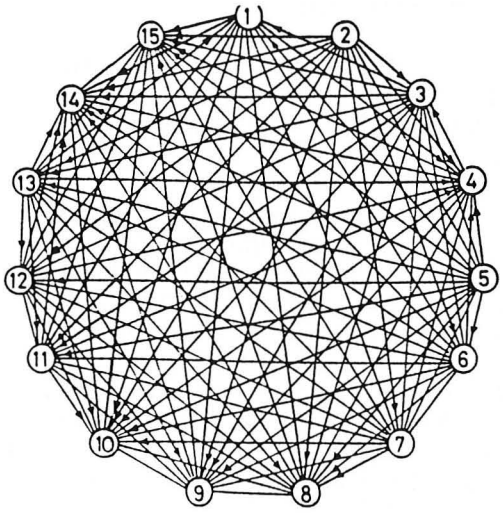


Figure 88 - Graphe biostratigraphique traduisant les relations de coexistences et de superpositions entre les 15 espèces d'alvéolines de Yougoslavie (d'après Guex, 1987).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0
2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0
4	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
5	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
7	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
13	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figure 89 - Matrice associée au graphe biostratigraphique de la figure 88.

Les informations contenues dans le graphe biostratigraphique sont reportées dans une matrice appelée matrice incidente ou associée du graphe biostratigraphique (figure 89). Les relations de coexistences ou de superpositions entre les espèces se traduisent cette fois par des 0 (lorsqu'une espèce est au dessus d'une autre) et des 1 (lorsqu'une espèce est observée sous ou au même niveau qu'une autre, c'est par exemple le cas avec l'espèce 8 qui est sous ou au même niveau que l'espèce 1).

C - Détection et élimination des configurations interdites

1 - Les différents types de configurations interdites

La matrice associée au graphe biostratigraphique traduit exactement les relations entre les espèces telles qu'elles ont été observées dans les profils. Le caractère discontinu de l'enregistrement fossile ou de la sédimentation auquel s'ajoutent certains phénomènes tels que les remaniements induisent très souvent des relations incohérentes appelées par Guex (1982) configurations interdites. Le programme DV 86 se charge de les détecter dans un premier temps et tente de les éliminer de façon logique par la suite.

Avant d'aborder les processus d'élimination de ces incohérences par le programme DV 86, il est nécessaire de définir les différents types de configurations interdites et d'en comprendre la signification (figure 90). Parmi les configurations interdites on distingue des cycles, des circuits semi-orientés et des circuits orientés.

Les circuits orientés d'ordre 3 (C3, impliquant trois espèces reliées par trois arcs) ou supérieur (Cn, impliquant n espèces reliées par n arcs) n'apportent aucune information quant à la succession des espèces impliquées. Aucune coexistence virtuelle ne peut être déduite d'une telle structure et de ce fait, il est impossible de les éliminer directement en remplaçant par exemple des arcs par des arètes. Nous envisagerons ce cas particulier par la suite.

Les circuits semi-orientés d'ordre 3 (S3) et d'ordre 4 (S4) sont facilement éliminés en remplaçant, dans les deux cas, les deux arcs impliqués par des arètes. La figure 89 prouve que les relations de superpositions observées localement (2 sous 3 et 3 sous 2 dans le cas d'un S3 et 1 sous 3 et 4 sous 2 dans le cas d'un S4) permettent de définir des coexistences virtuelles (Guex, 1981) car elles n'ont en fait jamais été observées.

Les cycles d'ordre 4 (appelés Z4 lorsqu'ils ne possèdent pas d'arc, Z'4 lorsqu'ils en contiennent un et Z"4 lorsqu'ils en ont deux) s'éliminent aisément dans le cas des Z4 et des Z"4 car il est évident que les quatre espèces impliquées dans ces cycles coexistent du moins virtuellement (figure 90). Dans le cas où l'une des superpositions est connue (cas des espèces 1 et 2 dans le cycle Z'4 de la figure 90), le couple d'espèces mutuellement exclusives (les espèces 3 et 4) a virtuellement coexisté.

2 - L'élimination des configurations interdites par le programme DV 86

a - Cas des cycles C3 et Cn

Le programme DV 86 s'occupe en premier lieu de détecter les circuits Cn. Il fournit la liste des espèces impliquées dans ces cycles (elles sont qualifiées de fortement connexes) ainsi qu'une matrice traduisant les relations de superpositions entre ces espèces. On remarque ainsi que les espèces 1, 3, 4, 11 et 13 sont impliquées dans des cycles C3 ou Cn (figure 91).

Le programme DV 86 calcule ensuite une matrice carrée (espèces, espèces) dans laquelle n'entrent en compte que les espèces fortement connexes. Il s'agit en fait d'une portion de la matrice associée au graphe biostratigraphique de la figure 89. A partir de cette sous-matrice il est aisé de tracer deux graphes orientés dont l'un englobe tous les cycles orientés de type Cn et l'autre ne contient que les cycles orientés de type C3 (figure 91).

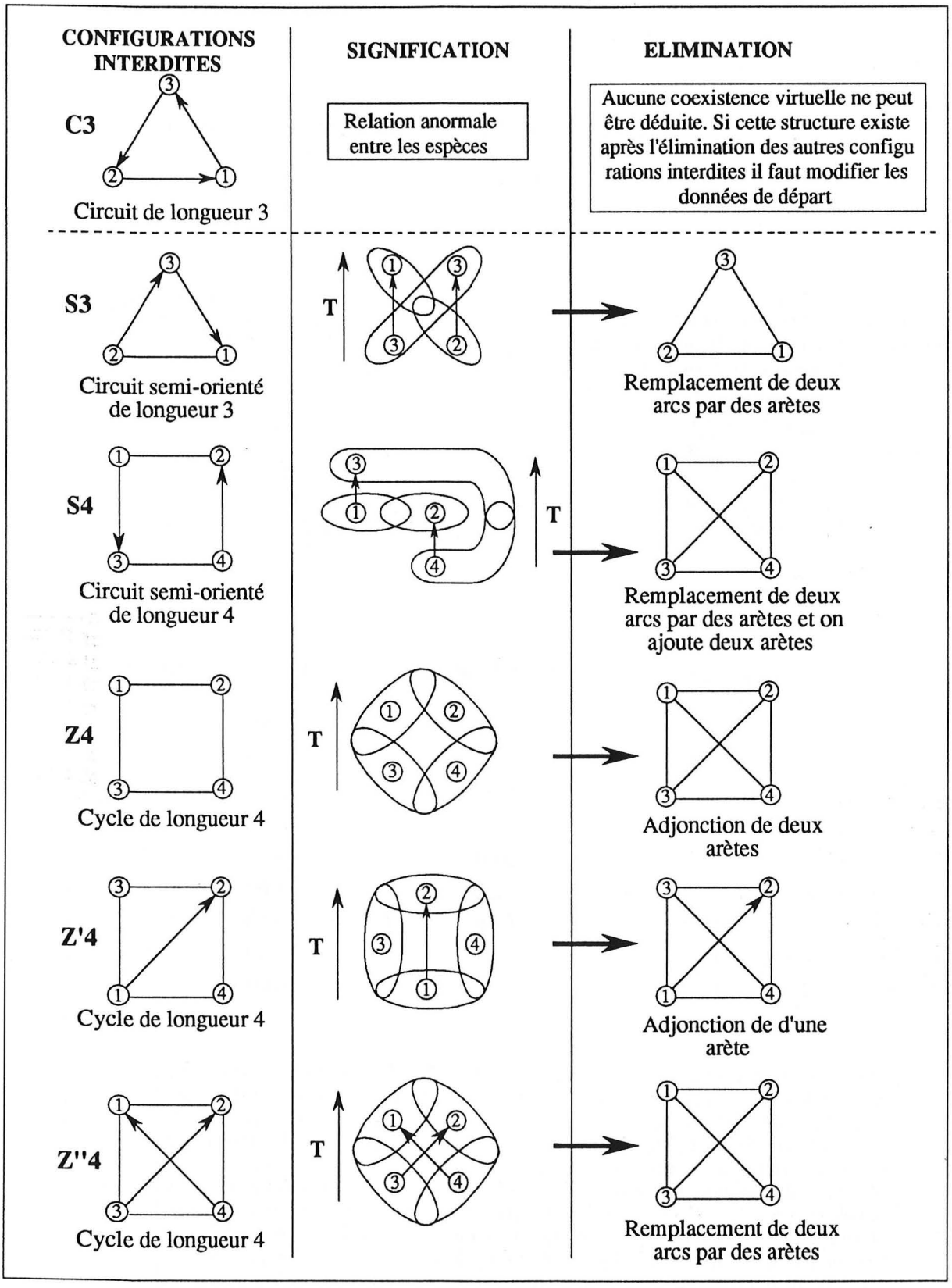


Figure 90 - Principales configurations interdites présentes dans un graphe biostratigraphique, avec leur signification et leur élimination. Les numéros dans les cercles représentent les espèces, les traits les relations de coexistence, les arètes les relations de superposition et les ellipses les domaines d'existence des espèces. L'axe T représente les âges (d'après Guex, 1980 modifié).

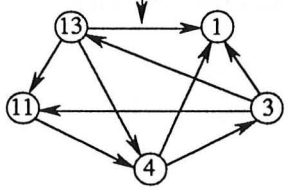
Composantes fortement connexes détectées 1 3 4 1 13

Liste des espèces impliquées dans des circuits C3 ou Cn (avec n> 3)

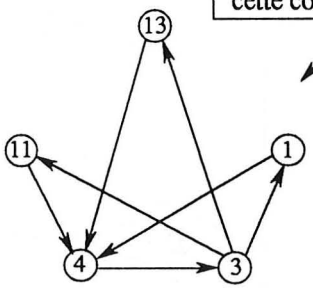
	1	3	4	11	13
1	1	1	0	1	1
3	0	1	1	0	0
4	1	0	1	1	1
11	1	1	0	1	1
13	0	1	0	0	1

Matrice carrée (espèces, espèces) indiquant les relations de superpositions entre les espèces impliquées dans les circuits C3 et Cn

Composante forte réunissant les circuits C3 et Cn représentant les relations de superposition entre les alvéolines ilerdiennes de Yougoslavie



Circuits C3 présents dans cette composante forte



Arc	Fréq. occ. cycle	Fréq. occ. stratigra.	Rapport R	Fréq. occ. cycle 3	Rapport S	Numéro section
1 → 4	2	2	1.00	1	0.50	
3 → 1	1	1	1.00	1	1.00	2
3 → 11	1	2	0.50	1	0.50	
3 → 13	3	3	1.00	1	0.33	
4 → 3	5	1	5.00	3	3.00	1
11 → 4	2	1	2.00	1	1.00	4
13 → 1	1	2	0.50	0	0.00	
13 → 4	1	1	1.00	1	1.00	6
13 → 11	1	2	0.50	0	0.00	

Statistiques sur les arcs impliqués dans les cycles C3 (les 3 dernières colonnes) et dans les cycles Cn (les autres colonnes). La première colonne indique les arcs impliqués dans les cycles Cn. La deuxième indique le nombre de fois où l'arc spécifié dans la première est impliqué dans un cycle Cn. La troisième colonne indique le nombre de profils dans lesquels on trouve cet arc (si on observe cet arc dans un seul profil, le numéro du profil est indiqué dans la dernière colonne). R représente le rapport de la deuxième et de la troisième colonne. La cinquième colonne indique le nombre de fois où l'arc spécifié dans la première colonne est impliqué dans un cycle C3. La valeur S représente le rapport du nombre de fois où l'on rencontre l'arc dans un cycle C3 sur le nombre de profils où cet arc est observé.

Figure 91 - Liste des espèces et des arcs impliqués dans les cycles C3 et Cn du graphe biostratigraphique des alvéolines de Yougoslavie.

Le programme DV 86 fournit ensuite la liste des arcs impliqués dans les cycles orientés Cn (où n est supérieur ou égal à trois) et calcule pour chacun d'eux plusieurs coefficients (figure 91). Les plus intéressants sont les rapports S (pour les cycles C3) et R (pour les cycles Cn). Plus ils sont élevés plus l'arc concerné est impliqué dans de nombreux cycles de type C3 (pour le rapport S) ou Cn (pour le rapport R) et moins cet arc est reproductible. Cela signifie que la relation de superposition induite par cet arc à de grandes chances d'être erronée.

Le programme DV 86 n'élimine pas directement les configurations interdites de type Cn. Il donne cependant les indications nécessaires (par le biais de statistiques sur les arcs impliqués) pour que l'on puisse modifier les données de départ. On ôtera préférentiellement des données de départ les espèces entrant dans les arcs pour lesquels les valeurs de S et de R sont les plus élevées.

Cependant, dans bien des cas, il n'est pas nécessaire de modifier les données de départ pour éliminer les cycles Cn. En effet, l'élimination des autres configurations interdites se fait grâce au remplacement de certains arcs par des arètes. Il est donc possible que les arcs impliqués dans les circuits Cn soient remplacés par des arètes lors de l'élimination des circuits de type S3, S4, Z4, Z'4 ou Z"4. Si cela n'est pas le cas, le programme ne peut continuer son exécution et il est nécessaire de changer les données initiales.

b - Cas des cycles S3, S4, Z4, Z'4 et Z"4

L'élimination de ces configurations interdites n'est pas tout à fait conforme à ce qui est décrit dans la figure 90. En effet, l'adjonction systématique d'arètes ou le remplacement des arcs par des arètes altère considérablement l'information biostratigraphique de départ.

Le programme DV 86 possède une procédure d'optimisation pour l'élimination des configurations interdites qui ne remplace en fait par des arètes que les arcs les plus souvent impliqués dans des configurations interdites (S3, S4, Z4, Z'4 ou Z"4). Lorsque deux arcs ont la même fréquence d'occurrence on détruira préférentiellement celui qui relie les espèces les moins fréquentes.

Toutes les configurations interdites (de type S3, S4, Z4, Z'4 et Z"4) disparaissent lors de la première procédure d'élimination (ou itération). Cependant, les remplacements des arcs par des arètes peuvent aboutir à la création d'autres configurations interdites qui seront elles-mêmes éliminées lors d'une deuxième itération. Le programme réitère sa procédure d'élimination tant qu'il existe des configurations interdites.

A chaque itération le programme DV 86 donne la liste des arcs et des arètes impliquées dans les configurations interdites avec leur fréquence d'occurrence ainsi qu'un rapport S identique à celui des arcs des cycles Cn puis indique les arcs qui sont remplacés par des arètes et par conséquent les espèces qui ont virtuellement coexistées.

D - La détermination des associations unitaires et de leur succession

Une fois le graphe biostratigraphique épuré de toute configuration interdite on en obtient un nouveau constitué d'arcs et d'arètes. Intéressons nous maintenant à la partie non orientée (qui ne contient que des arètes) du graphe biostratigraphique transformé. Ce graphe traduit les coexistences réellement observées (coexistences réelles) ainsi que celles induites par la destruction des configurations interdites (coexistences virtuelles).

Un ensemble de sommets voisins reliés deux à deux par des arètes est appelé une clique. Une clique est dite maximale lorsqu'elle ne peut être contenue dans une autre plus grande.

La recherche des associations unitaires se résume à définir les cliques maximales dans la partie non orientée du graphe biostratigraphique transformé. Chaque clique maximale de ce graphe correspond par définition à une association unitaire car les espèces appartenant à une même clique sont mutuellement compatibles.

Par cette méthode, le programme DV 86 extrait sept cliques maximales (ou associations unitaires) du graphe non orienté des alvéolines de Yougoslavie. Leur composition spécifique est donnée par une matrice (figure 92) dans laquelle l'occurrence d'une espèce dans une association unitaire est indiquée par un 1 et son absence par un 0.

Associations unitaires \ espèces	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1
4	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1
5	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
6	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1
7	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1

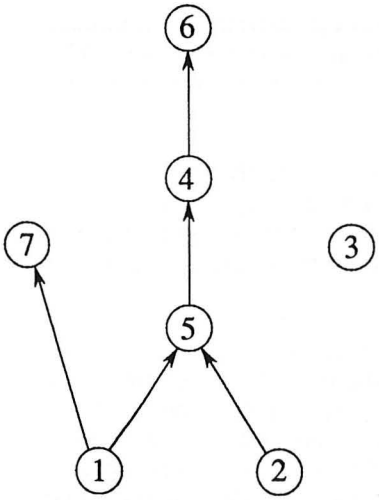
Figure 92 - Matrice (associations unitaires, espèces) indiquant la composition spécifique des sept associations unitaires déduites du graphe biostratigraphique transformé des alvéolines de Yougoslavie.

Une fois les associations unitaires définies, il est nécessaire de leur donner un ordre chronologique relatif. L'ordre de succession stratigraphique des associations unitaires (figure 93) est établi dans chaque profil étudié en tenant compte des informations contenues dans la partie orientée (celle qui ne contient que des arcs) du graphe biostratigraphique transformé par l'élimination des configurations interdites (Guex, 1981).

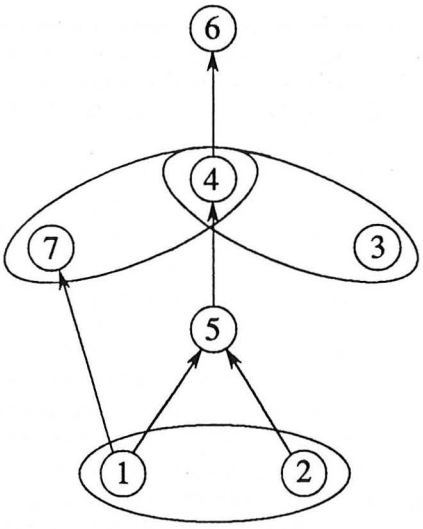
Section	Séquence d'A.U. identifiée
1	1 → 7
2	2 → 5 → 4 → 6
3	1 → 5 → 4 → 6
4	4 → 6
6	5 → 6
5	
7	1 → 5
8	1 → 5 → 6
9	3
10	4
11	6

Associations unitaires \ Associations unitaires	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	1	0	0
5	1	1	0	1	1	0	0
6	1	1	0	1	1	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0

Figure 93 - Séquences d'associations unitaires détectées dans chaque profil et matrice synthétisant les relations de superpositions entre ces associations unitaires pour les alvéolines de Yougoslavie.



Graphe G K



Graphe L

Chemin détecté en G K : 3
Chemin détecté en G K : 6 4 5 1
Chemin détecté en G K : 6 4 5 2
Chemin détecté en G K : 3
Chemin détecté en G K : 7 1
Chemin détecté en G K : 3

Réunion des associations unitaires 1 et 2
ainsi que des associations unitaires 3, 4 et 7

L'association unitaire 1 est réunie à l'association unitaire 2
L'association unitaire 3 est réunie à l'association unitaire 4
L'association unitaire 7 est réunie à l'association unitaire 4

Graphe L'
Séquence ordonnée finale
des associations unitaires

L'association unitaire 1 représente l'association unitaire initiale 6

L'association unitaire 2 représente la réunion des associations unitaires initiales 3, 4 et 7

L'association unitaire 3 représente l'association unitaire initiale 5

L'association unitaire 4 représente la réunion des associations unitaires initiales 1 et 2

Espèces

Associations unitaires	3	7	2	5	15	6	13	4	8	9	10	1	11	12	14
1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
2	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
3	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau d'extension 1

Composition spécifique des associations unitaires finales

Figure 94 - Construction du graphe montrant les relations stratigraphiques entre les associations unitaires et réduction de ce graphe orienté en un chemin unique d'associations unitaires pour les alvéolines de Yougoslavie.

Une matrice carrée (associations unitaires, associations unitaires) synthétisant les relations de superpositions entre les associations unitaires est fournie par le programme DV 86 (figure 93). La lecture de cette matrice est conforme à celle de la matrice associée au graphe biostratigraphique de départ. Le graphe orienté associé à cette matrice est appelé graphe G_k.

On recherche, au sein du graphe G_k, les différentes séquences d'arcs (également appelées chemins). On remarque que le graphe G_k constitué à partir des alvéolines de Yougoslavie (figure 94) contient deux chemins principaux, l'un formé par les arcs reliant les associations unitaires 1, 5, 4 et 6, l'autre reliant les associations unitaires 2, 5, 4 et 6. L'arc reliant les associations unitaires 1 et 7 forme également un chemin du graphe G_k.

Le programme DV 86 simplifie le graphe Gk en le réduisant à un chemin unique formant de ce fait une séquence d'associations unitaires chronologiquement significative. Pour ce faire il est nécessaire de réunir certaines associations unitaires (figure 94) voire même d'en éliminer quand celles-ci sont fortement perturbatrices (associations unitaires impliquées dans des circuits de type Z4, Z'4 ou Z''4). Lorsque le graphe G_k renferme des cycles (tels que les cycles décrits précédemment) la suite du programme ne peut être exécutée et le seul moyen de remédier à ce problème est de modifier les données de départ.

La réunion des associations unitaires s'effectue de deux manières possibles suivant que leurs relations de superpositions sont connues ou non :

- les associations unitaires 1 et 2 (figure 94) sont reconnues sous l'association unitaire 5 mais on ne sait pas quelle est la position de 1 par rapport à 2; dans ce cas il est possible de réunir 1 et 2 en une seule association unitaire (4) qui est constituée par le contenu spécifique de 1 et de 2,
- les associations unitaires 7, 3 et 4 peuvent également être réunies en une seule (2); la réduction du graphe G_k en un chemin unique passe par la réunion des associations unitaires 7 et 3 avec une autre; dans un tel cas cette réunion est conditionnée par le fait qu'elle concerne les associations unitaires présentant le plus grand nombre d'espèces en commun et dont on ne connaît pas les relations de superpositions (entre elles); les associations unitaires 3, 4 et 7 répondent à cette double condition.

La réduction du graphe G_k en un chemin unique aboutit à une séquence ordonnée finale d'associations unitaires (appelée graphe L').

Lorsque cette séquence est établie il résulte de nouvelles associations unitaires, en nombre plus réduit, et dont la composition spécifique est données par une matrice que Guex appelle le tableau d'extension 1 (figure 94).

E - La détection des remaniements

Une espèce fossile est fréquemment enregistrée de façon fragmentaire (selon les aléas des processus de fossilisation); en d'autres termes sa distribution stratigraphique locale est très souvent discontinue. Il est cependant nécessaire de rappeler qu'une espèce peut présenter partout une distribution stratigraphique discontinue alors que sa distribution biochronologique est continue. Les phénomènes de remaniements ont pour conséquences d'affecter la continuité stratigraphique d'une espèce fossile. Il est donc intéressant de pouvoir distinguer, parmi les espèces dont la distribution stratigraphique est discontinue, celles qui ont effectivement été remaniées (Guex, 1987).

Plusieurs méthodes permettent de mettre en évidence les remaniements. La valeur biochronologique des espèces impliquées dans ces phénomènes est nulle et il est nécessaire de les éliminer des données de départ avant d'exécuter à nouveau le programme DV 86.

C'est ainsi que les espèces les plus fortement perturbatrices (c'est-à-dire celles entrant dans la composition des cycles Cn pour lesquels le rapport S est le plus élevé) ont de bonnes chances d'avoir une distribution biochronologique discontinue.

Plusieurs méthodes peuvent prouver la distribution discontinue de certaines espèces.

On peut procéder par exemple en retirant des données de départ les espèces les plus fréquemment impliquées dans les circuits Z4 et les circuits semi-orientés S3 et S4. Les corrélations effectuées en leur absence doivent nous faire découvrir celles dont la distribution est anormale.

Le programme DV 86 permet de détecter directement les espèces dont la distribution biochronologique est discontinue. Pour cela il calcule une matrice appelée tableau d'extension 2 (figure 95).

		Espèces														
		3	7	2	5	15	6	13	4	8	9	10	1	11	12	14
Niveaux assignés aux associations unitaires	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
	2	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
	3	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau d'extension 2

Figure 95 - Tableau d'extension 2 calculé à partir des données biostratigraphiques des alvéolines de Yougoslavie.

Cette matrice effectue l'inventaire des espèces présentes dans chaque niveau assigné à une association unitaire. On remarque que l'espèce 3 qui entre dans la composition de l'association unitaire 3 (tableau d'extenxion 1) est absente de tous les niveaux assignés à cette association unitaire (tableau d'extension 2).

En règle générale, les espèces qui se trouvent dans les niveaux assignés à deux associations unitaires non adjacentes (par exemple l'espèce 3 dans les associations unitaires 2 et 4) et qui sont absentes de tous les niveaux assignés à une association unitaire située entre les deux premières (par exemple l'espèce 3 avec l'association unitaire 3) ont une distribution biochronologique discontinue.

Pour interpréter la distribution discontinue de l'espèce 3, Guex (1987) précise qu'il est nécessaire d'examiner les données biostratigraphiques de départ et le tableau de corrélation finale (semblable à celui de la figure 97). Cette espèce est présente dans les niveaux qui appartiennent à l'association unitaire 4 des profils 2, 3 et 7 et elle se trouve d'autre part dans le niveau 4 du profil 1 qui est assigné à l'association unitaire 2. Guex suspecte ce dernier niveau de contenir une faune remaniée. Il ajoute que cette constatation est confirmée par les observations sédimentologiques qui montrent que les alvéolines appartenant à cet horizon sont arrondies mécaniquement et détériorées.

Pour décrire la suite de la méthode des associations unitaires nous utiliserons les données biostratigraphiques de départ en prenant soin d'enlever l'espèce 3 du niveau 4.

F - Détermination des biochronozones

Le programme DV 86 fournit pour cela une matrice appelée matrice de reproductibilité (figure 96) et un tableau appelé tableau de corrélation finale (figure 98).

1 - Indications sur la reproductibilité des associations unitaires

La matrice de reproductibilité indique pour chaque profil de l'étude les associations unitaires qui y ont été détectées (avec un 1 si l'association unitaire est observée et un 0 sinon). On l'appelle matrice de reproductibilité car elle permet de visualiser l'extension géographique d'une association

unitaire. La figure 96 indique que l'association unitaire 2 est la plus reproductible (elle est observée dans sept sections sur 11). Au contraire, l'association unitaire 4 est la moins reproductible; elle n'est observée que dans trois sections sur 11.

		Numéros des sections										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Associations unitaires	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1
	2	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
	3	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
	4	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
	5	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0

Figure 96 - Matrice de reproductibilité (associations unitaires, sections) permettant de visualiser l'extension géographique des associations unitaires pour les alvéolines de Yougoslavie.

2 - Le tableau de corrélation finale

Le tableau de corrélation finale (figure 98) fournit plusieurs types d'informations concernant chaque niveau de chaque section. Le numéro d'association unitaire dans la colonne de droite indique que le niveau correspondant est assigné uniquement à cette association unitaire lorsque la colonne centrale est vide. Dans l'exemple des alvéolines (figure 98), le niveau 3 de la section 1 est strictement assigné à l'association unitaire 2. Lorsque la colonne centrale contient également un numéro, cela signifie que le niveau en question n'est pas assignable à une association unitaire unique. Il ne contient effectivement pas d'espèce caractéristique d'une association unitaire. Dans ce cas, l'intervalle de coexistence des espèces dans ce niveau peut être interprété de plusieurs façons (figure 97) :

- intercalé entre deux associations unitaires bien déterminées et différentes (cas b),
- intercalé entre deux associations unitaires bien déterminées mais non différentes dont certaines des espèces caractéristiques sont reconnues dans le niveau (cas c),
- une coexistence d'espèces caractéristiques de plusieurs associations unitaires au dessus (au dessous) de la première (de la dernière) association unitaire strictement identifiée (cas a).

Section n

Niveau	Associations unitaires	
7	1	2
6	——	3
5	4	5
4	——	6
3	1	8
2	——	7
1	——	8

Cas a : le niveau 7 n'est pas assigné à une seule association unitaire mais il contient des espèces caractéristiques des associations unitaires 1 et 2 juste au dessus de la première association unitaire identifiée (numéro 3) qui est différente des associations unitaires 1 et 2

Cas b : le niveau 5 contient des espèces caractéristiques de plusieurs associations unitaires (4 et 5) et est intercalé entre 2 niveaux contenant des associations unitaires strictement identifiées et différentes (associations unitaires 3 pour le niveau 6 et 6 pour le niveau 4)

Cas c : le niveau 3 contient des espèces caractéristiques de plusieurs associations unitaires (1 à 8) mais il est intercalé entre 2 niveaux contenant des associations unitaires strictement identifiées mais non différentes (certaines des espèces caractéristiques des associations unitaires 6 pour le niveau 4 et 7 pour le niveau 2 sont également présentes dans le niveau 3)

Figure 97 - Séquence de huit associations unitaires strictement identifiées (niveaux 1, 2, 4 et 6) ou non (niveaux 3, 5 et 7). Les trois cas possibles dans lesquels des niveaux ne sont pas assignés à une seule association unitaire sont illustrés dans cette figure (d'après Guex, 1984, modifié).

Section 1	Section 2	Section 3	Section 4	Section 5	Section 6
Niveau A.U.	Niveau A.U.	Niveau A.U.	Niveau A.U.	Niveau A.U.	Niveau A.U.
3 — 2	4 — 1	7 — 1	4 — 1	2 1 2	4 — 1
2 2 4	3 — 2	6 — 1	3 — 1	1 4 5	3 1 2
1 — 5	2 — 3	5 — 2	2 — 2		2 — 2
	1 — 4	4 — 2	1 — 2		1 — 3
		3 — 3			
		2 — 4			
		1 — 5			

Section 7	Section 8	Section 9	Section 10	Section 11
Niveau A.U.	Niveau A.U.	Niveau A.U.	Niveau A.U.	Niveau A.U.
4 — 3	6 — 1	2 — 2	3 — 2	1 — 1
3 — 4	5 — 1	1 1 2	2 1 2	
2 4 5	4 — 3		1 — 2	
1 — 5	3 2 4			
	2 2 4			
	1 — 5			

Figure 98 - Tableau de corrélation finale pour les alvéolines de Yougoslavie.

La construction des biochronozones s'effectue aux vues du tableau de corrélation finale (figure 98) et de la matrice de reproductibilité (figure 96).

Nous avons constaté dans la matrice de reproductibilité que certaines des associations unitaires étaient peu reproductibles. Elles n'ont, de ce fait, que peu de valeur biochronologique. On peut procéder de deux façons pour remédier à ce problème :

- soit on réunit deux ou plusieurs associations unitaires qui ne sont pas reproductibles lorsqu'elles sont isolées mais qui le deviennent quand elles sont réunies,
- soit on réunit une ou plusieurs associations unitaires non reproductibles à une association unitaire qui est reproductible.

Une biochronozone correspond donc soit à une association unitaire reproductible soit à la réunion de plusieurs associations unitaires peu reproductibles lorsqu'on les considère isolément mais qui le deviennent quand on les réunit.

Cependant lorsqu'on observe le tableau de corrélation finale on s'aperçoit que certains niveaux sont assignés à une seule association unitaire alors que d'autres contiennent des espèces caractéristiques de plusieurs (dans le cas de réunions d'associations unitaires).

Compte tenu de ces remarques, voyons comment peut s'opérer la réunion d'associations unitaires pour aboutir à des biochronozones reproductibles (figure 99).

Comme l'indique Guex (1987), la réunion des associations unitaires est empirique. Cependant trois cas reviennent fréquemment (figure 99) :

- dans le cas a, la réunion des associations unitaires 2, 3 et 4 engendre une subdivision biochronologique reproductible, intercalée entre les associations unitaires 1 et 5,
- dans le cas b, si la réunion des associations unitaires 2 et 3 est strictement identifiée

dans le tableau de corrélation finale on les réunira pour former une biochronozone; si cette réunion n'est pas identifiée dans les profils, on réunira les associations unitaires 1 et 2 d'une part et les associations unitaires 3 et 4 d'autre part pour former deux biochronozones reproductibles,

- dans le cas c, si la réunion des associations unitaires 2 et 3 n'est pas identifiée dans les profils P2 et P3, on réunira les associations unitaires 2 et 1 d'une part et les associations unitaires 3 et 4 d'autre part; dans le cas contraire, on réunira 2 et 3.

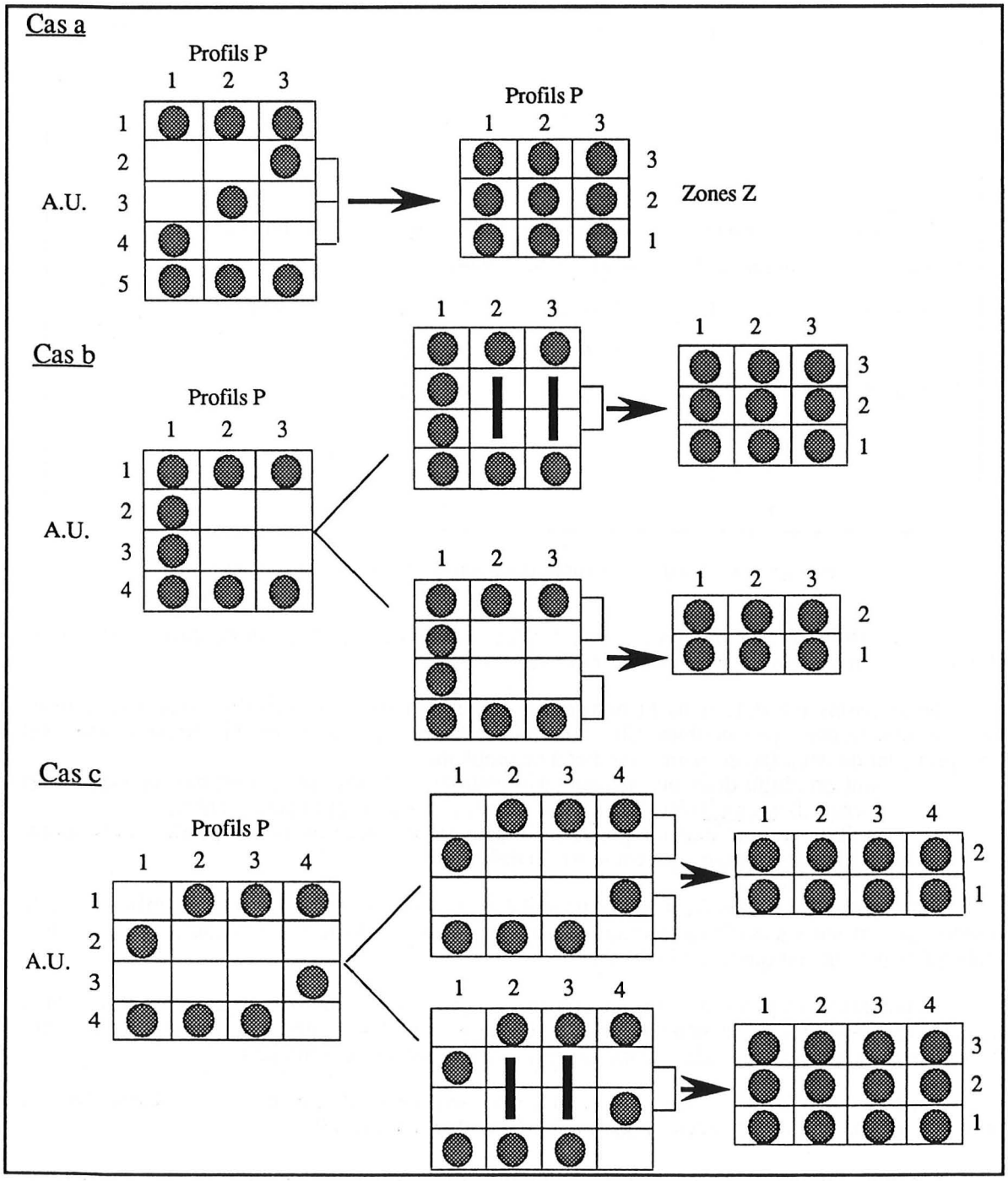


Figure 99 - Réunion d'associations unitaires : trois situations typiques (A.U. : associations unitaires, P : profils, Z : zones). Les cercles grisés indiquent les associations unitaires identifiées dans les profils. Les traits noirs traduisent les réunions d'associations unitaires strictement identifiées (d'après Guex, 1987, modifié).

Reprenons l'exemple des alvéolines de Yougoslavie. En observant le tableau de corrélation finale (figure 98), on constate que seules deux réunions d'associations unitaires sont strictement identifiées. Les réunions d'associations unitaires 1 et 2 d'une part et 4 et 5 d'autre part sont en effet strictement identifiées dans le profil 5. De plus, on remarque dans la matrice de reproductibilité que l' association unitaire 4 est peu reproductible. Il est évident que la réunion des associations unitaires 1 et 2 d'une part et 4 et 5 d'autre part aboutit à la création de trois biochronozones reproductibles.

Ces réunions effectuées on peut tracer sur le tableau de corrélation finale les limites de ces trois biochronozones (figure 100).

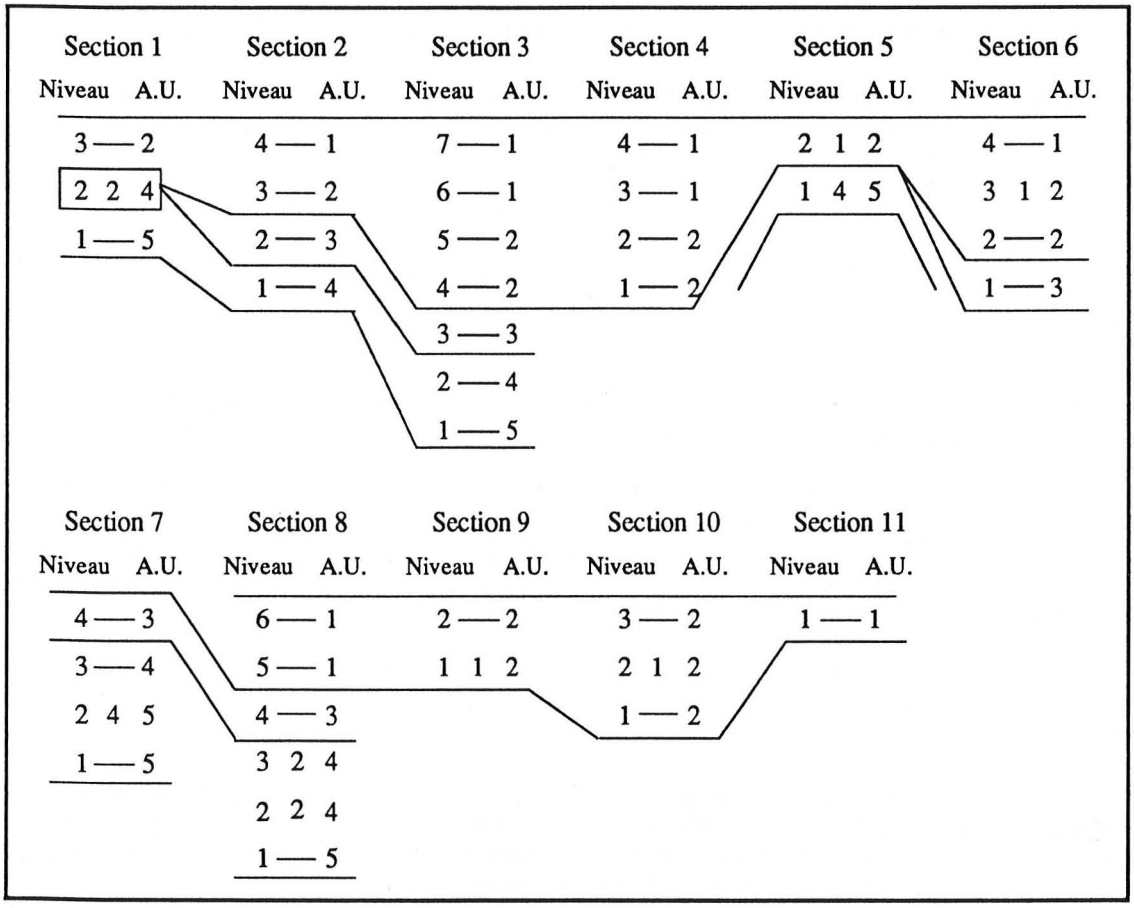


Figure 100 - Corrélation entre les 11 profils de Yougoslavie. Les traits noirs visualisent les limites des biochronozones. Trois zones reproductibles sont définies : la zone 1 établie par la réunion des associations unitaires 1 et 2, la zone 2 correspondant à l'association unitaire 3 et la zone 3 définie par la réunion des associations unitaires 4 et 5.

E - Remarques sur la méthode des associations unitaires

Les zones établies par la méthode des associations unitaires ne sont pas forcément contigües. Par exemple le niveau 2 de la section 1 n'est assigné à aucune zone, une incertitude demeure quant à ce niveau. On sait simplement qu'il est intercalé entre les zones 1 et 3.

Certaines zones peuvent être absentes localement. Par exemple la zone 2 est absente de la section 5 (figure 100). Cela peut être du à un manque d'information (il faut vérifier les intervalles d'échantillonnages) ou à une lacune sédimentaire (présence d'un hiatus). En fait, les causes peuvent être diverses et il incombe au biostratigraphe de les découvrir.

Guex arrive en outre à mettre en évidence des cycles transgressions/régressions par la méthode des associations unitaires.

Il prouve que l'on peut arriver de par cette méthode fiable car objective, à établir non seulement des échelles biochronologiques mais aussi l'existence de phénomènes eustatiques ou sédimentaires (hiatus, remaniements...).

II - Application de la méthode des associations unitaires à la base de données du D.S.D.P.

A - Implantation du programme de Guex sur la station de travail Sun-3/50

Le programme original a été écrit en FORTRAN ASCII pour un ordinateur de type Univac 1100/60. Certaines des fonctions du programme original n'étant pas compatibles avec le FORTRAN de la station de travail Sun-3/50 (par exemple les fonctions ENCODE et DECODE) il a fallu les reprogrammer.

B - Extraction et codage des données de la base de données du D.S.D.P.

1 - Codage des données

Le programme DV 86 permet de corréler un nombre théoriquement illimité de profils stratigraphiques en utilisant jusqu'à 110 espèces.

La première ligne du fichier de données codé (figure 101) est réservée au titre. Si celui-ci débute par un "blanc" le programme listera tous les tableaux et toutes les matrices décrites précédemment. Dans le cas contraire la sortie sera réduite mais s'achèvera toujours par la matrice de reproductibilité et le tableau de corrélation finale, indispensables pour la construction des biochronozones.

La deuxième ligne est constituée de deux entiers (format I3 ou 3 caractères pour chaque entier) dont le premier représente le nombre de profils et le deuxième le nombre d'espèces entrant dans l'étude.

Avec les lignes suivantes commence le codage proprement dit indiquant la position de chaque espèce au sein de chaque profil. Ainsi pour chaque section la première ligne indique le nombre d'espèces qui y ont été observées. Les lignes suivantes sont formées de sept triplets d'entiers (format I3) chacune. Dans chaque triplet d'entiers :

- le premier entier indique l'espèce fossile (chaque espèce est en effet assignée à un nombre),
- le deuxième entier indique le numéro du niveau correspondant à la première occurrence de l'espèce considérée,
- le troisième entier donne le numéro du niveau correspondant à la dernière occurrence de l'espèce.

Ainsi le triplet (1 2 6) signifie que le FAD et le LAD de l'espèce 1 sont reconnus respectivement dans les niveaux 2 et 6 dans un profil stratigraphique donné.

2 - Extraction des données de la base de données du D.S.D.P.

Comme je l'ai signalé dans la première partie de ce travail, il est possible de lancer le programme de biochronologie quantitative de diverses manières possibles :

- on peut choisir les espèces et les sites à corréler dans des tableaux; cela s'applique à plus de 700 espèces fossiles parmi les nannofossiles calcaires, les radiolaires, les foraminifères planctoniques et les diatomées (programme 'BIOCHRON 1'); le

programme 'BIOCHRON 3' ne porte que sur environ 150 espèces et son exécution est, de ce fait, considérablement accélérée (il s'agit de la plupart des espèces entrant dans la définition des zones du Cénozoïque),

- il est également possible de sélectionner les sites de l'étude sur une projection cartographique mondiale; les sites désirés sont compris dans en quadrilatère dont on détermine deux des coins en utilisant la souris; là encore le choix se fait parmi plus de 700 espèces (programme 'BIOCHRON 2'),
- il est également possible d'appliquer la méthode de Guex à un seul groupe fossile (et donc plusieurs milliers d'espèces sont concernées); il est dans ce cas possible de sélectionner les sites du D.S.D.P. désirés dans un tableau mais on ne peut choisir les espèces; il est cependant possible de modifier le fichier codé lorsque celui-ci a été établi par le programme d'extraction.

Dans le dernier cas le programme fournit la correspondance entre les codes associés aux espèces ou aux sections et les noms des espèces fossiles et des sites étudiés.

Dans les trois premier cas les correspondances des codes associés aux sections sont donnés directement; il est possible de retrouver les codes associés aux espèces en consultant (par le biais d'un éditeur de texte) les fichiers tempor2 et tempor10 créés lors de l'exécution du programme d'extraction.

Le temps d'exécution des programmes d'extraction et de corrélation sont inversement proportionnels au nombre d'espèces et de sections sélectionnées. Il est généralement de quelques minutes.

Il peut paraître long dans les cas les plus complexes, mais le gain de temps apporté par l'informatisation des extractions et de la méthode des associations unitaires est considérable.

```
 Alveolines de Yougoslavie
11 15
 6
 2  1  1  4  3  3  6  2  2  7  3  3  8  4  4 12  3  3
10
 1  3  3  3  1  1  5  1  1  6  2  3  7  1  3  9  3  4 11  3  3
12  3  3 13  2  2 14  4  4
11
 2  1  1  3  2  2  6  2  3  7  2  3  9  6  7 10  7  7 11  5  5
12  4  4 13  3  3 14  6  7 15  4  4
10
 1  1  2  4  3  3  7  1  1  8  2  2  9  1  4 10  3  4 11  1  2
12  2  2 14  3  4 15  4  4
 2
 4  2  2  5  1  1
 7
 1  2  2  4  3  3  7  1  2  9  3  3 10  4  4 13  1  1 14  4  4
 6
 2  1  1  3  3  3  5  2  2  7  3  4 13  4  4 15  4  4
 8
 2  1  1  5  1  1  6  3  3  7  2  2  8  5  5 10  6  6 13  4  4
14  5  6
 4
 6  2  2 10  1  2 12  2  2 15  1  1
 6
 1  1  1  6  1  1  8  3  3 10  2  2 11  1  1 12  1  1
 3
 9  1  1 10  1  1 14  1
```

Figure 101 - Exemple de fichier codé d'entrée pour le programme de Guex et Davaud. Il s'agit du codage des données sur les alvéolines de Yougoslavie (l'espèce 3 est ôtée du niveau 4 dans la première section).

II - Biochronologie quantitative dans la région de Panama

Nous avons appliqué la méthode des associations unitaires à des sites du D.S.D.P. localisés de part et d'autre de l'Isthme de Panama, dans l'Atlantique ouest ou le Pacifique est.

A - Exemple dans le Pacifique est

1 - Le choix des sites

Nous avons sélectionné sept sites du D.S.D.P. localisés dans le Pacifique est, les sites 155, 84, 158, 500, 572 D, 573 B et 71 (figure 102). Rappelons que les courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation ont été tracées pour ces sites (annexe A).

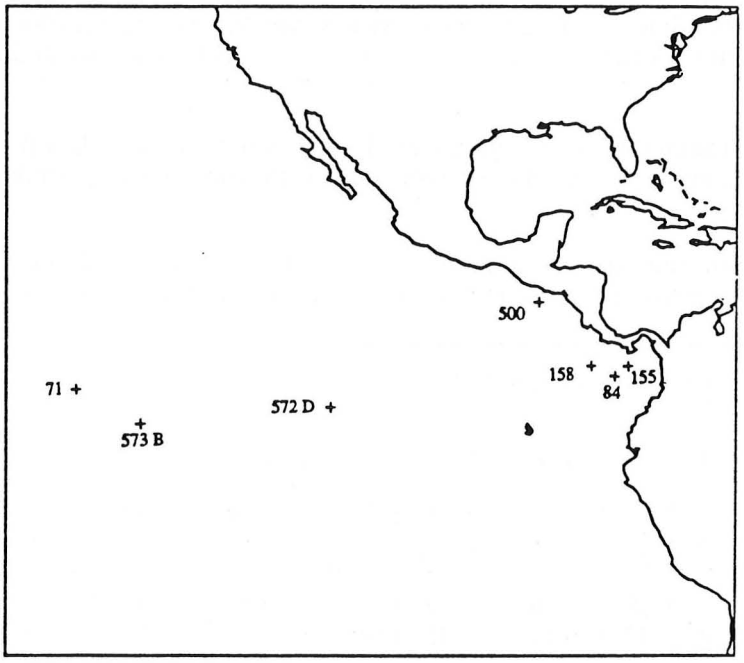


Figure 102 - Localisation des sites 155, 84, 158, 500, 572 D, 573 B et 71 du D.S.D.P..

2 - Le choix des espèces

L'étude porte sur 39 espèces fossiles supposées avoir une bonne valeur biochronologique et appartenant toutes au groupe des nannofossiles calcaires (figure 103).

Cette étude se limite donc à un seul groupe fossile. Pourtant, nous avons vu que les programmes d'extraction de l'application PALEODATA sont susceptibles de s'appliquer à plusieurs groupes fossiles considérés simultanément (nannofossiles calcaires, foraminifères planctoniques, radiolaires et diatomées) et spécialement les applications mettant en œuvre la méthode des associations unitaires.

Le choix de ne traiter qu'un seul groupe fossile (en l'occurrence celui des nannofossiles calcaires) est justifié par deux faits dans notre cas :

- les nannofossiles sont nettement plus représentés que les autres groupes dans les sept sites retenus,

UNIVERSITÉ DE LYON 1 C.S.T. GÉOLOGIE

- les échantillons contenant des nannofossiles calcaires sont dans bien des cas décrits à des profondeurs différentes de ceux renfermant des espèces d'autres groupes et le fait de considérer plusieurs groupes fossiles multiplierait le nombre de niveaux de telle sorte que la méthode des associations unitaires n'aurait plus guère de signification.

3 - Résultats

a - Définition des associations unitaires et des zones

La sortie du programme de Guex et Davaud adapté à la station de travail Sun-3/50 indique qu'aucune configuration n'est déduite du graphe biostratigraphique de départ.

Le graphe G_K est constitué de 21 associations unitaires. Quatre d'entre elles sont réunies afin de réduire le graphe G_K en un chemin unique d'associations unitaires. Il résulte de cette opération 17 associations unitaires dont le contenu spécifique est stocké dans ce que Guex appelle le tableau d'extension 1 (figure 103).

L'association unitaire 1, la plus récente, est constituée de deux espèces, *Gephyrocapsa oceanica* et *Emiliania huxleyi*. Si la première de ces espèces n'est pas seulement caractéristique de cette association unitaire (on la trouve également dans les associations unitaires 2, 3 et 4), la présence d'*Emiliania huxleyi* dans un niveau signifie que celui-ci peut être assigné à l'association unitaire 1.

De même, la seule présence de *Gephyrocapsa aperta* dans un niveau suffit à assigner celui-ci à l'association unitaire 2. Il en va de même avec *Gephyrocapsa caribbeanica* et l'association unitaire 3.

Pour ce qui est de l'association unitaire 4, elle est caractérisée par la présence de *Pseudoemiliania lacunosa*, *Gephyrocapsa oceanica*, *Discoaster tamalis*, *Ceratolithus rugosus*, *Discoaster rugosus* et *Discoaster asymmetricus*.

L'association unitaire 5 est caractérisée par la présence de *Discoaster tamalis*, *Discoaster triradiatus*, *Ceratolithus rugosus*, *Discoaster berggrenii*, *Discoaster asymmetricus*, *Discoaster variabilis*, *Sphenolithus neoabies*, *Reticulofenestra pseudoumbilica*.

L'occurrence de *Discoaster prepentaradiatus* dans un niveau permet d'assigner celui-ci à l'association unitaire 6 car cette espèce n'appartient à aucune autre association unitaire que celle-ci dans les sept sites de l'étude.

Les associations unitaires 7, 8, 10, 12 et 13 ne peuvent être reconnues par une seule espèce mais par des assemblages d'espèces.

Les associations unitaires 9, 11, 14, 15, 16 et 17 peuvent être reconnues dans des niveaux par la présence d'une seule espèce dans chaque cas, les espèces *Discoaster hamatus* (association unitaire 9), *Discoaster druggii* (association unitaire 14), *Sphenolithus ciperoensis* (association unitaire 15), *Sphenolithus distentus* (association unitaire 16), *Discoaster barbadiensis*, *Discoaster saipanensis* ou *Reticulofenestra umbilica* (association unitaire 17).

La matrice de reproductibilité (renseignant sur l'extension géographique de chacune des 17 associations unitaires) indique que certaines des associations unitaires détectées dans cette étude sont peu reproductibles et qu'il est de ce fait nécessaire d'en réunir pour obtenir un référentiel biochronologique significatif pour les sites du Pacifique est (figure 104).

Cette réunion d'associations unitaires aboutit à la création de huit subdivisions biochronologiques reproductibles (pour la plupart de nos sites) que nous appellerons zones (Z1 à Z8).

Espèces fossiles / Associations unitaires	Zones	*Sphenolithus moriformis*	*Coccolithus eopelagicus*	*Discoaster barbadiensis*	*Discoaster saipanensis*	*Reticulofenestra umbilica*	*Sphenolithus distentus*	*Sphenolithus ciperoensis*	*Discoaster druggii*	*Reticulofenestra pseudoumbilica*	*Sphenolithus neoabies*	*Triquetrorhabdulus rugosus*	*Coccolithus miopelagicus*	*Discoaster kugleri*	*Discoaster aulakos*	*Discoaster variabilis*	*Discoaster challengerii*	*Discoaster bellus*	*Catinaster coalithus*	*Discoaster hamatus*	*Discoaster calcaris*	*Discoaster asymmetricus*	*Sphenolithus abies*	*Discoaster pseudovariabilis*	*Discoaster quinqueramus*	*Discoaster loeblichii*	*Discoaster neorectus*	*Discoaster neohamatus*	*Discoaster berggrenii*	*Discoaster surculus*	*Ceratolithus rugosus*	*Discoaster triradiatus*	*Discoaster prepentaradiatus*	*Discoaster tamalis*	*Gephyrocapsa oceanica*	*Pseudoemiliania lacunosa*	*Emiliania annula*	*Gephyrocapsa caribbeanica*	*Gephyrocapsa aperta*	*Emiliania huxleyi*
A. U. 1	Z1																																		*					*
A. U. 2	Z1																																		*	*	*		*	
A. U. 3	Z1																																		*	*	*	*		
A. U. 4	Z2																					*								*	*			*	*	*				
A. U. 5	Z2									*	*					*						*								*	*	*		*						
A. U. 6	Z2									*	*					*	*					*	*		*					*	*	*	*							
A. U. 7	Z3									*	*	*				*	*					*	*		*	*	*		*	*										
A. U. 8	Z4									*	*	*				*	*	*				*	*	*	*	*	*		*											
A. U. 9	Z4									*	*	*				*	*	*				*	*	*	*	*	*	*												
A. U. 10	Z5									*	*	*	*			*	*	*	*	*		*	*	*																
A. U. 11	Z6	*								*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*																			
A. U. 12	Z6	*								*	*	*	*	*	*	*																								
A. U. 13	Z6	*	*							*	*	*	*	*	*																									
A. U. 14	Z7	*	*						*																															
A. U. 15	Z7	*	*					*																																
A. U. 16	Z8	*	*				*																																	
A. U. 17	Z8	*	*	*	*	*																																		

Figure 103 - Contenu spécifique des 17 associations unitaires définies dans le pacifique est.

Associations unitaires	Sections 1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0
3	0	1	0	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0
6	1	1	0	1	0	0	1
7	1	1	0	1	0	0	1
8	1	1	0	0	0	0	0
9	0	1	0	1	0	1	0
10	1	1	0	0	0	1	0
11	0	1	1	0	0	1	0
12	0	0	0	0	0	1	0
13	0	0	0	1	0	1	0
14	0	0	1	1	0	0	0
15	0	0	0	1	0	0	0
16	0	0	0	1	0	1	0
17	0	0	0	0	0	1	0

Figure 104 - Matrice de reproductibilité donnant l'extension géographique des 17 associations unitaires détectées dans le Pacifique est.

La zone Z1 est créée à partir de la réunion des associations unitaires 1, 2 et 3 (figures 103, 105). Elle est observée dans les sites 71, 500 et 158.

La zone Z2 est définie par la réunion des associations unitaires 4, 5 et 6. On la trouve dans les sites 155, 84, 158 et 71. Elle est donc assez reproductible.

La zone Z3 correspond à l'association unitaire 7. Comme la zone Z2, on l'observe dans les sites 155, 84, 158 et 71.

La zone Z4 est définie par la réunion des associations unitaires 8 et 9. Elle est très reproductible puisqu'on l'observe dans cinq des sept sites étudiés (les sites 155, 158, 572 D, 573 B et 71).

La zone Z5 correspond à l'association unitaire 10. Elle peut s'observer dans les sites 155, 158 et 573 B.

La zone Z6 est définie par la réunion des associations unitaires 11, 12 et 13. On l'observe dans les sites 158, 500, 572 D, 573 B et 71.

La zone Z7 correspond à la réunion des associations unitaires 14 et 15. On ne la trouve que dans les sites 500 et 71.

La zone Z8 est constituée par la réunion des associations unitaires 16 et 17. On la détecte dans les sites 573 B et 71.

On remarque que sept zones sont reconnues dans le site 71. Le site 158 présente également une suite relativement complète de zones.

Attardons nous maintenant sur les sites 500, 572 D et 573 B.

Le site 500 se caractérise par l'absence des zones Z2, Z3, Z4, et Z5 entre les zones Z1 et Z6. Les deux niveaux intercalés entre les zones Z1 et Z6 (les niveaux 26 et 27) sont à des profondeurs de respectivement 83,13 et 82,5 mètres. On s'aperçoit, en consultant la courbe des taux et des vitesses d'accumulation pour le site 500 que ces profondeurs coïncident avec une période de très faible dépôt sédimentaire. Ce hiatus explique l'absence des zones Z2, Z3, Z4 et Z5.

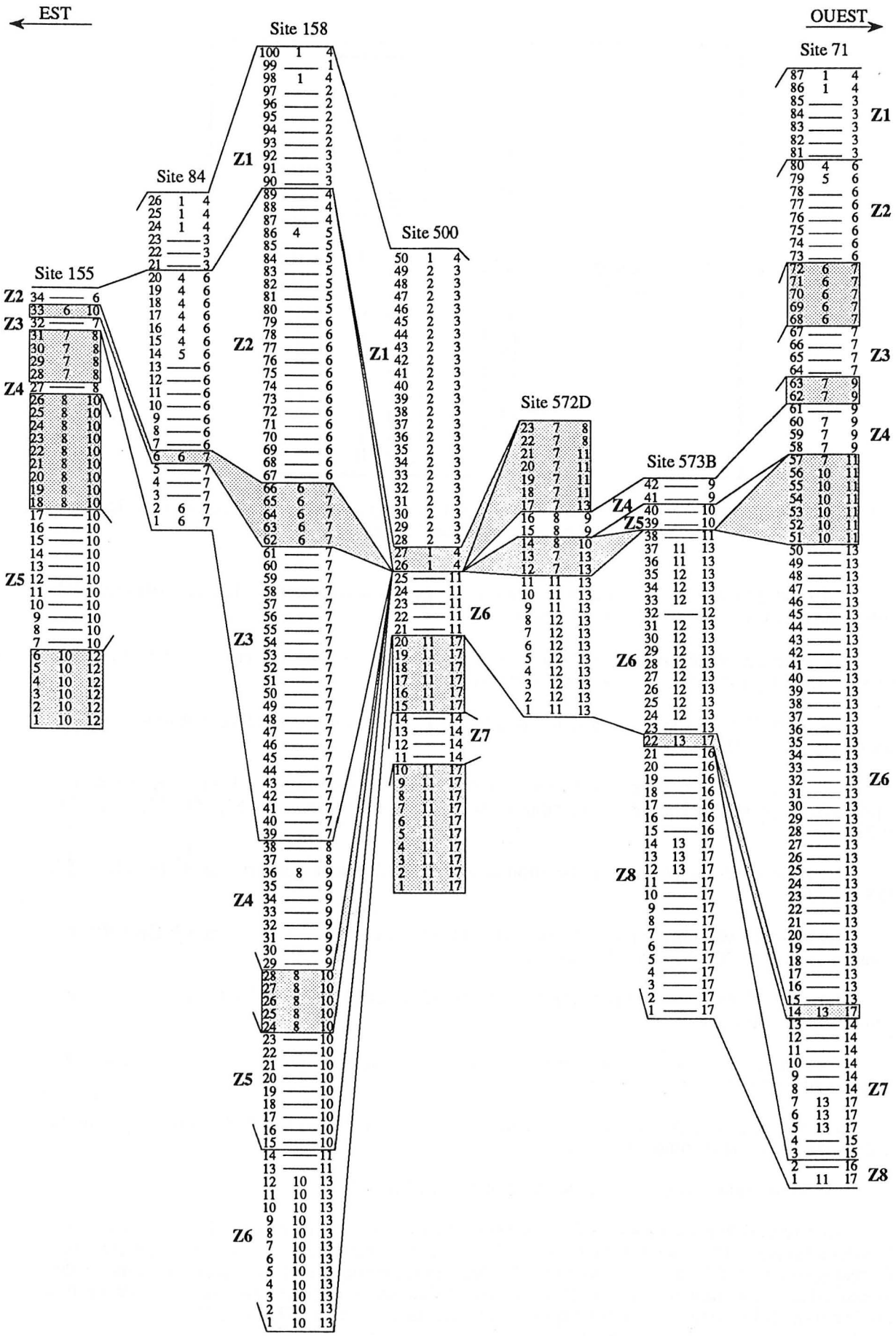


Figure 105 - Tableau de corrélation final fourni par la méthode des associations unitaires appliquée à sept sites dans le Pacifique est.

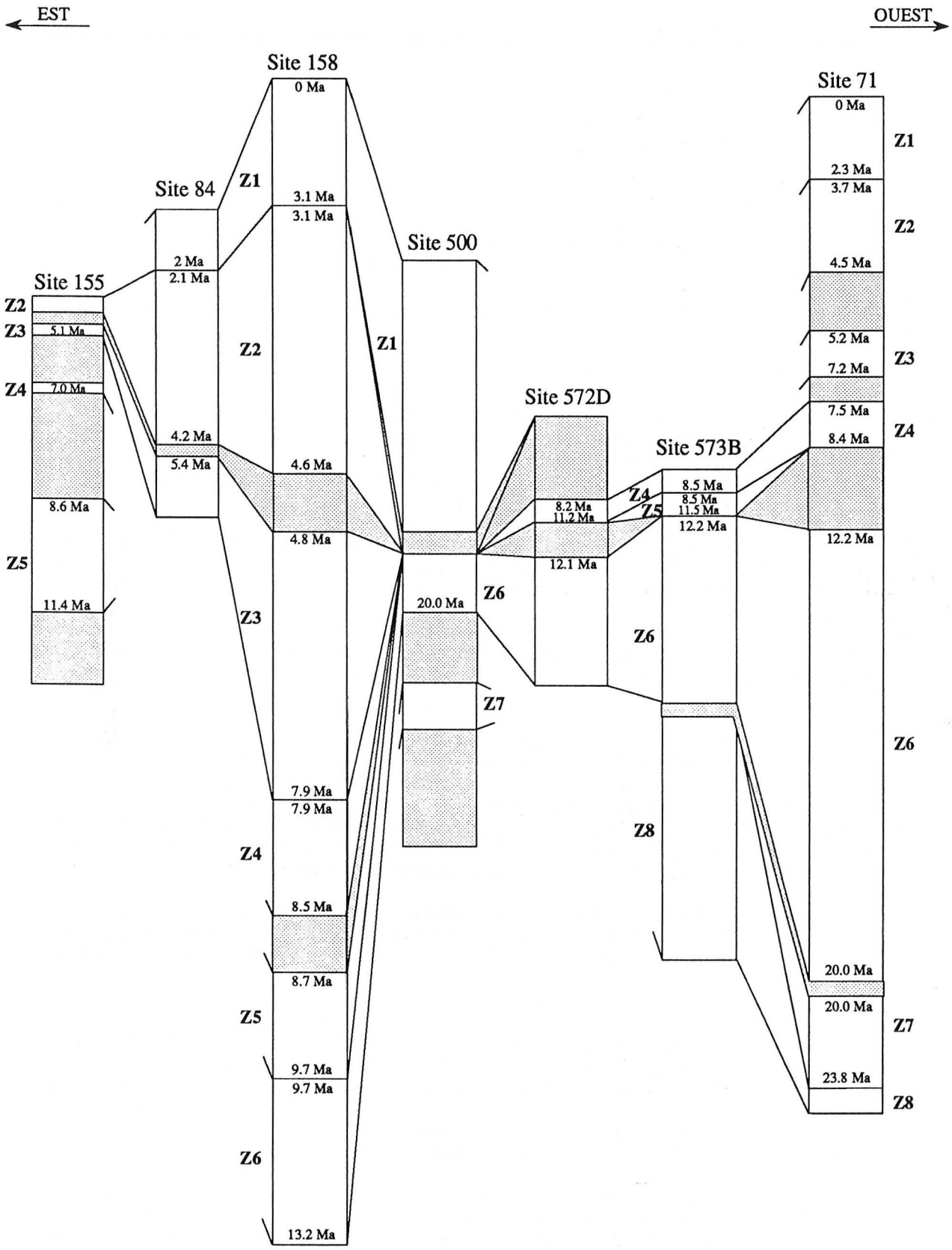


Figure 106 - Datation des limites des zones détectées dans le Pacifique est.

Dans le cas des sites 572 D et 573 B, il semble que l'absence de la zone Z5 soit due à un échantillonnage imprécis aux environs de 300 mètres pour le site 572 D et 350 mètres pour le site 573 B.

b - Datation des associations unitaires et des zones détectées

La datation des limites des associations unitaires ou des zones définies dans cette étude est effectuée en cherchant sur les courbes de l'annexe A les âges correspondant aux profondeurs des niveaux indiqués dans le tableau de corrélation final. Connaissant les profondeurs de chacun des niveaux (elles sont utilisées par les programmes d'extractions), il est à tout moment possible d'en déduire les âges à partir des courbes des taux d'accumulation de l'annexe A.

Nous avons, dans un premier temps, cherché les âges correspondant aux limites de zones (figure 106).

Plusieurs remarques s'imposent.

Certains âges ne sont pas mentionnés et cela pour deux raisons :
- soit l'incertitude sur l'âge est trop importante (dans le cas d'une période caractérisée par des taux d'accumulation très faibles),
- soit le niveau correspondant à la limite de la zone ou de l'association unitaire ne figure pas sur la courbe des taux d'accumulation.

Pour une même zone, les âges déduits des courbes de l'annexe A peuvent être différents d'un site à l'autre (figure 106). Ces variations sont imputables dans la plupart des cas à un échantillonnage parfois imprécis et dans une moindre mesure à l'incertitude de la méthode d'évaluation des âges.

Pour remédier à ces problèmes nous avons tenu à chercher les âges correspondant aux 17 associations unitaires dans chacun des sept sites du D.S.D.P. dans le Pacifique est.

L'association unitaire 1 n'est strictement identifiée que dans le niveau 99 du site 158. On peut assimiler l'âge de ce niveau à 0 Ma. Elle est équivalente à la zone NN21 définie comme elle par l'occurrence d'*Emiliania huxleyi* (Martini, 1971).

L'association unitaire 2 est strictement identifiée entre les niveaux 93 et 97 du site 158. Sa limite inférieure est datée à 1,5 Ma, sa limite supérieure à 0,5 Ma. On peut assimiler l'association unitaire 2 (de par sa distribution temporelle) à la zone à nannofossiles calcaires NN20 dont elle contient le fossile marqueur *Gephyrocapsa oceanica* (définie par Martini en 1971).

L'association unitaire 3 est strictement identifiée dans les sites 84, 158 et 71. Elle est datée entre 1,54 Ma et 1,98 Ma dans le site 84. Sa limite inférieure est également estimée à 1,98 Ma dans le site 71. On ne peut fixer avec précision l'âge de sa limite supérieure dans le site 71 (ni dans le site 158 d'ailleurs). On peut assimiler l'association unitaire 3 à la zone à nannofossiles calcaires NN19 dont elle contient le marqueur *Gephyrocapsa caribbeanica.*

L'association unitaire 4 est datée entre 2,2 Ma et 3,3 Ma dans le site 158 où elle est strictement identifiée entre les niveaux 87 et 84. Cette association unitaire correspond à peu près à la zones à nannofossiles calcaires NN16 dont elle contient le marqueur *Discoaster surculus.*

L'association unitaire 5 est définie entre 3,3 Ma et 3,96 Ma, toujours dans le site 158. Elle correspond à la zone NN16 dont elle contient le marqueur *Reticulofenestra pseudoumbilica.*

La limite inférieure de l'association unitaire 6 est datée avec précision à 4,62 Ma dans les sites 84, 158 et 71 où elle est strictement identifiée. Sa limite supérieure est estimée à 3,74 Ma dans le site 84 et à 3,96 Ma dans les sites 158 et 71. Nous considérerons que cette association unitaire est effectivement datée entre 3,96 Ma et 4,62 Ma. Elle correspond à la base de la zone NN14 et à la totalité de la zone NN13 et contient les fossiles marqueurs de ces deux zones *Discoaster asymmetricus* et *Ceratolithus rugosus.*

L'association unitaire 7 est datée entre 5,5 Ma et 7,7 Ma dans le site 84, entre 5,06 Ma et 7,92 Ma dans le site 158, entre 5,28 Ma et 7,48 Ma dans le site 71. Nous considérerons que cette association unitaire est définie entre 5,28 Ma et 7,50 Ma ce qui la fait correspondre à la quasi totalité de la zone NN11. Elle contient *Discoaster quinqueramus* , le marqueur de cette zone.

L'association unitaire 8 est strictement identifiée uniquement dans le site 158 où elle est définie dans deux niveaux datés à 7,92 Ma.

L'association unitaire 9 est datée entre 8 Ma et 8,46 Ma dans le site 158 et sa limite inférieure est estimée à 8,47 Ma. Cette association unitaire correspond à peu près à la zone NN10.

L'association unitaire 10 est datée entre 8,6 Ma et 9,46 Ma dans le site 154, entre 8,69 Ma et 9,46 Ma dans le site 155 et entre 6,20 Ma et 10,12 Ma dans le site 573 B. Nous considérerons qu'elle est datée entre 8,6 Ma et 9,46 Ma (partie de la zone NN9).

Pour ce qui est des associations unitaires 11 et 12, nous n'avons pu les dater avec précision. Nous savons seulement que les deux niveaux du site 158 dans lesquels l'association unitaire 11 est strictement identifiée sont datés à environ 9,5 Ma.

L'association unitaire 13 est datée entre 12,32 Ma et 17,82 Ma dans le site 71 où elle est strictement identifiée.

L'association unitaire 14 est comprise entre 20,68 Ma et 21,45 Ma dans le site 71.

L'association unitaire 15 est datée entre 23,32 Ma et 23,8 Ma toujours dans le site 71 où elle est strictement identifiée.

L'association unitaire 15 est strictement identifiée dans un seul niveau du site 71 daté à 24,42 Ma.

Nous n'avons pu estimer les âges correspondant aux niveaux assignés à l'association unitaire 17.

Connaissant les âges attribués à la plupart des 17 associations unitaires détectées dans les sept sites du Pacifique est, il est désormais possible de dater avec plus de précision les zones définies précédemment :

- la zone Z1 est datée entre 0 Ma et 1,98 Ma,
- la zone Z2 est datée entre 2,2 Ma et 4,62 Ma,
- la zone Z3 est datée entre 5,28 Ma et 7,5 Ma,
- la zone Z4 est datée entre 7,92 Ma et 8,47 Ma,
- la zone Z5 est datée entre 8,6 Ma et 9,46 Ma,
- la zone Z6 est datée entre 9,5 Ma et 17,82 Ma,
- la zone Z7 est datée entre 20 Ma et 21,45 Ma,
- la zone Z8 n'a pu être datée.

On remarque que les limites de zones définies dans la figure 106 sont pour la plupart compatibles avec ces résultats.

B - Exemple dans l'Atlantique ouest

1 - Le choix des sites

Neuf sites localisés dans l'Atlantique ouest ont été sélectionnés pour une nouvelle application de la méthode des associations unitaires aux données du D.S.D.P.. Il s'agit cette fois des sites 94, 538 A, 153, 31, 603, 106 B, 149, 30 et 354 (figure 107).

Hormis pour le site 538 A, les courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation ont été tracées pour ces sites (annexe A).

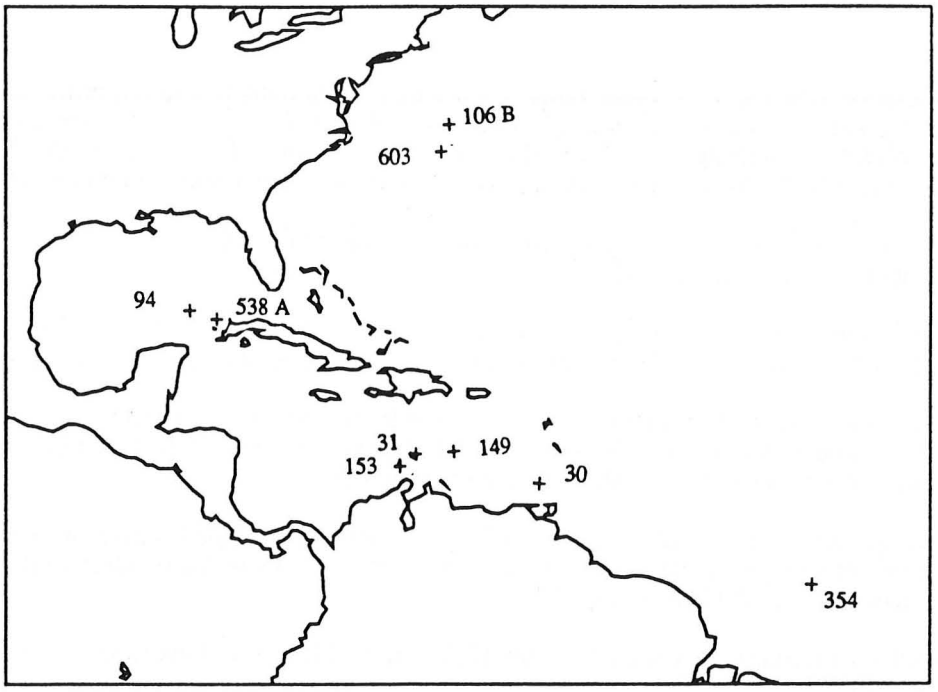


Figure 107 - Localisation des sites 94, 538 A, 153, 31, 603, 106 B, 149, 30 et 354 du D.S.D.P..

2 - Le choix des espèces

51 espèces appartenant là encore au groupe des nannofossiles calcaires ont été retenues (figure 108). En effet, la méthode des associations unitaires appliquée aux neuf sites atlantiques et aux 39 espèces fossiles utilisées dans l'océan Pacifique (figure 103) ne fournissant pas de résultats valables (peu d'associations unitaires reproductibles), nous avons ajouté d'autres espèces.

3 - Résultats

a - Définition des associations unitaires et des zones

Contrairement à l'exemple précédent, d'assez nombreuses configurations interdites sont détectées (367 au total). Cependant aucun cycle C3 ou Cn n'a été détecté dans le graphe biostratigraphique synthétisant les données de départ.

Le graphe G_K, dans ce cas, est bâti autour de 22 associations unitaires. Sa réduction en un chemin unique fournit 14 associations unitaires finales (au lieu de 17 dans l'océan Pacifique) dont la composition spécifique est donnée dans la figure 108.

Nous n'allons pas effectuer un inventaire exhaustif du contenu spécifique de chacune des 14 associations unitaires. Signalons seulement les associations unitaires déduites (dans un niveau) de la présence d'une seule espèce fossile.

Ainsi *Emiliania huxleyi* suffit à assigner un niveau à l'association unitaire 1 (c'est également le cas dans le Pacifique est). Il en est de même avec *Discoaster tamalis* pour l'association unitaire 2, *Amaurolithus amplificus* pour l'association unitaire 4, *Discoaster quinqueramus* pour l'association unitaire 5, *Discoaster challengerii* pour l'association unitaire 6, *Sphenolithus distentus* pour l'association unitaire 9 (c'est également le cas pour l'association unitaire 10 dans l'océan Pacifique), *Discoaster lodoensis* pour l'association unitaire 13 et *Discoaster multiradiatus* pour l'association unitaire 14.

La matrice de reproductibilité associée à cette étude (figure 109) indique que certaines des associations unitaires (les associations unitaires 2, 4,, 8, 11, 13) sont peu reproductibles.

Comme dans le Pacifique est, huit zones reproductibles peuvent être créées dans l'Atlantique ouest (figure 110). Ces zones sont définies comme suit :

- la zone Z1 correspond à l'association unitaire 1,
- la zone Z2 est constituée par la réunion des associations unitaires 2 et 3,
- la zone Z3 est constituée par la réunion des associations unitaires 4 et 5,
- la zone Z4 correspond à l'association unitaire 6,
- la zone Z5 est définie par la réunion des associations unitaires 7, 8 et 9,
- la zone Z6 est constituée par la réunion des associations unitaires 10 et 11,
- la zone Z7 est définie par la réunion des associations unitaires 12 et 13,
- la zone Z8 correspond à l'association unitaire 14.

		Sections								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Associations unitaires	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0
	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	3	1	1	1	0	1	1	1	1	0
	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	5	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	6	0	0	1	0	1	1	1	0	1
	7	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	8	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	9	1	0	0	0	1	0	0	1	0
	10	1	0	1	0	1	0	0	1	0
	11	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	12	0	0	1	0	1	0	0	1	0
	13	1	0	0	0	0	0	0	1	0
	14	1	0	0	0	1	0	0	1	0

Figure 109 - Matrice de reproductibilité donnant l'extension géographique des 14 associations unitaires détectées dans l'Atlantique ouest.

b - Datation des associations unitaires et des zones

Là encore nous avons commencé par chercher les âges correspondant au limites des zones dans chacun des sites retenus dans cette étude. On s'aperçoit (figure 111) que les datations sont sujettes à de nombreuses variations.

Nous préférons, là encore, dater chacune des associations unitaires, partout où elles sont strictement identifiées.

De par l'allure même des courbes figurant les taux d'accumulation pour les sites concernés (présence de nombreux hiatus), les datations, pour ce qui est des associations unitaires, sont également délicates.

Seules cinq associations unitaires ont pu être datées avec précision :

- l'association unitaire 1 est datée entre l'actuel et 0,32 Ma,
- l'association unitaire 3 est datée entre 2,8 Ma et 4 Ma,
- l'association unitaire 4 est datée entre 4,93 Ma et 5,14 Ma,
- l'association unitaire 5 est définie entre 5,67 Ma et 7,32 Ma,
- l'association unitaire 7 est datée entre 9,24 Ma et 14,7 Ma.

Il semble, de plus, que l'association unitaire 8 soit comprise entre 16,17 Ma et 20,16 Ma.

On ne peut donc dater avec précision que la zone Z1 (comprise entre 0,32 Ma et l'actuel) et la zone Z3 (comprise entre 4,93 Ma et 7,32 Ma).

Espèces fossiles / A. U.	Zones	*Discoaster barbadiensis*	*Discoaster lenticularis*	*Discoaster mohleri*	*Discoaster multiradiatus*	*Coccolithus eopelagicus*	*Reticulofenestra umbilica*	*Chiasmolithus gigas*	*Discoaster saipanensis*	*Discoaster lodoensis*	*Sphenolithus moriformis*	*Sphenolithus ciperoensis*	*Sphenolithus distentus*	*Reticulofenestra pseudoumbilica*	*Sphenolithus abies*	*Coccolithus miopelagicus*	*Discoaster aulakos*	*Sphenolithus heteromorphus*	*Sphenolithus belemnos*	*Discoaster pentaradiatus*	*Sphenolithus neoabies*	*Discoaster druggii*	*Discoaster variabilis*	*Discoaster bollii*	*Triquetrorhabdulus rugosus*	*Discoaster brouweri*	*Discoaster challengerii*	*Discoaster kugleri*	*Discoaster surculus*	*Amaurolithus delicatus*	*Catinaster calyculus*	*Catinaster coalithus*	*Discoaster bellus*	*Discoaster calcaris*	*Discoaster hamatus*	*Discoaster neohamatus*	*Discoaster loeblichii*	*Discoaster neorectus*	*Discoaster quinqueramus*	*Amaurolithus amplificus*	*Discoaster berggrenii*	*Ceratolithus acutus*	*Discoaster prepentaradiatus*	*Gephyrocapsa aperta*	*Gephyrocapsa caribbeanica*	*Gephyrocapsa oceanica*	*Pseudoemiliania lacunosa*	*Ceratolithus rugosus*	*Discoaster asymmetricus*	*Emiliania annula*	*Discoaster tamalis*	*Emiliania huxleyi*
A. U. 1	Z1																																													*	*	*	*					*
A. U. 2	Z2													*						*			*			*	*		*													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
A. U. 3	Z2													*	*					*	*		*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*						*	*	*	*	*	*	*	*	*			
A. U. 4	Z3										*			*	*					*	*		*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*			*	*											
A. U. 5	Z3										*			*	*					*	*		*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*														
A. U. 6	Z4					*					*			*	*	*				*	*	*	*	*	*	*	*	*																										
A. U. 7	Z5					*					*			*	*	*	*	*		*	*	*	*	*	*																													
A. U. 8	Z5					*					*			*	*	*	*	*	*	*	*	*																																
A. U. 9	Z5					*					*	*		*	*	*	*	*	*																																			
A. U. 10	Z6					*					*	*	*																																									
A. U. 11	Z6					*	*				*	*																																										
A. U. 12	Z7	*	*			*	*	*	*		*																																										
A. U. 13	Z7	*	*			*	*	*	*	*																																											
A. U. 14	Z8	*	*	*	*																																																

Figure 108 - Contenu spécifique des 14 associations unitaires définies dans l'Atlantique ouest.

C - Conclusion

La méthode des associations unitaires (appelée également biochronologie quantitative) informatisée par Guex et Davaud (programme DV 86) et adaptée pour la première fois à la base de données du D.S.D.P. est une méthode fiable et objective pour corréler rapidement entre-eux les sites du D.S.D.P.. Elle permet de mettre en évidence des ensembles d'espèces (les associations unitaires) et d'en déterminer la séquence chronologique. On aboutit à la construction automatique d'une échelle biochronologique discrète dont les subdivisions biochronologiques (les zones) ne sont pas forcément contiguës. On peut corréler un nombre théoriquement infini de profils stratigraphiques en utilisant jusqu'à 110 espèces fossiles. Le programme DV 86 n'accepte qu'un fichier de départ codé. Ce dernier traduit les relations de superpositions des espèces au sein de chaque section stratigraphique. Jusqu'à maintenant, la construction de ce fichier était manuelle. Le codage des données est aujourd'hui automatique : il suffit de spécifier les espèces fossiles et les sites du D.S.D.P. retenus dans l'étude. Sans cette automatisation du codage du fichier de départ, la méthode des associations unitaires serait inapplicable à la base de données du D.S.D.P..

Les subdivisions biochronologiques que l'on obtient par cette méthode peuvent être nombreuses et leur finesse peut égaler celle des chartes biostratigraphiques traditionnelles.

Nous avons traité deux exemples permettant d'illustrer la méthode des associations unitaires appliquée à la base de données du D.S.D.P.. Le premier concerne sept sites du D.S.D.P. localisés dans le Pacifique est et le second neuf sites de l'Atlantique ouest. Dans les deux cas nous avons retenu des espèces appartenant au groupe des nannofossiles calcaires.

Les sites de l'océan Pacifique permettent d'isoler 17 associations unitaires dont beaucoup correspondent à des zones à nannofossiles calcaires définies dans le Néogène. Ainsi l'association unitaire 1, caractérisée par l'occurrence d'*Emiliania huxleyi* est datée entre l'actuel et 0,5 Ma (les datations sont réalisées en se servant des courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation faisant correspondre un âge à chaque profondeur). Par son marqueur et sa distribution temporelle l'association unitaire 1 peut être assimilée à la zone à nannofossiles calcaires NN21 datée du Pléistocène terminal et également caractérisée par la présence d'*Emiliania huxleyi*. De même, d'autres associations unitaires définies dans le Pacifique est ont pu être mises en parallèle avec des zones à nannofossiles calcaires; c'est le cas par exemple des associations unitaires 2 (correspondant à la zone à nannofossiles calcaires NN20), 3 (NN19), 4 (NN17 et NN16)...

Le nombre de divisions biochronologiques obtenues à l'aide de la méthode des associations unitaires est légèrement inférieur (dans le Pacifique est) au nombre de zones à nannofossiles calcaires définies pour le Néogène (17 associations unitaires pour 21 zones à nannofossiles calcaires). La différence est somme toute négligeable face à la rapidité de la méthode.

Les divisions biochronologiques constituées à partir des neuf sites de l'Atlantique ouest sont moins nombreuses (14 au lieu de 17) et leur datation est très délicate. Alors que nous avons pu dater avec précision la plupart des associations unitaires dans le Pacifique est, seulement six associations unitaires ont pu l'être dans l'Atlantique ouest. Dans ce cas les divisions biochronologiques obtenues par la méthode des associations unitaires est moins fine que la zonation classique.

La confrontation des tableaux de corrélation finaux et des courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation pour les sites concernés par l'étude biochrologique a permis d'effectuer ces datations. Elle montre en outre que l'absence de certaines zones dans les sites du D.S.D.P. correspond à des hiatus sur les courbes des taux d'accumulation ou, tout au moins, à des périodes de très faible dépôt. Dans ce dernier cas, les datations sont délicates voire impossibles.

Comparons maintenant les divisions biochronologiques obtenues de part et d'autre de l'Isthme de Panama.

On trouve peu de similitudes même si le nombre de zones est identique dans les deux cas.

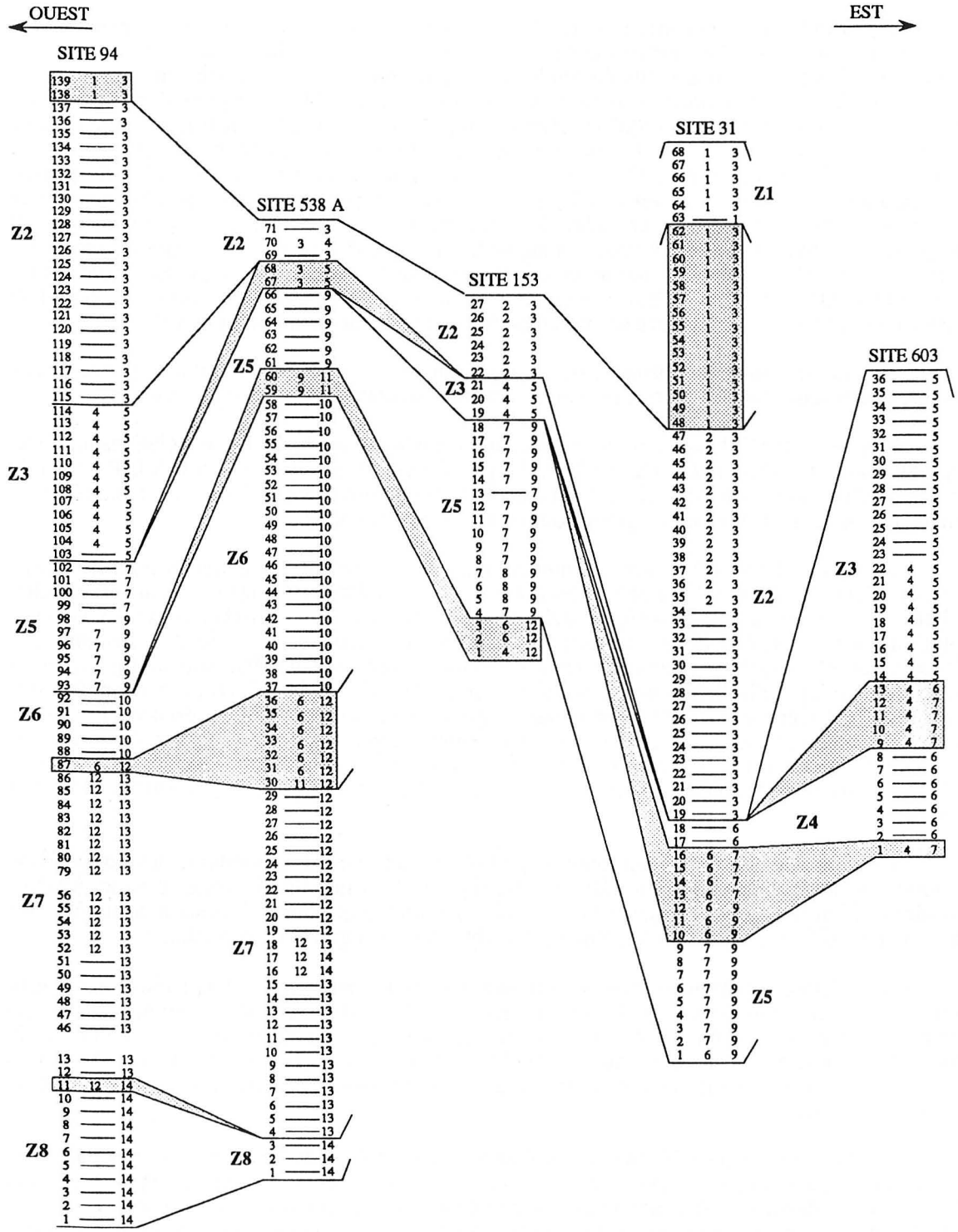
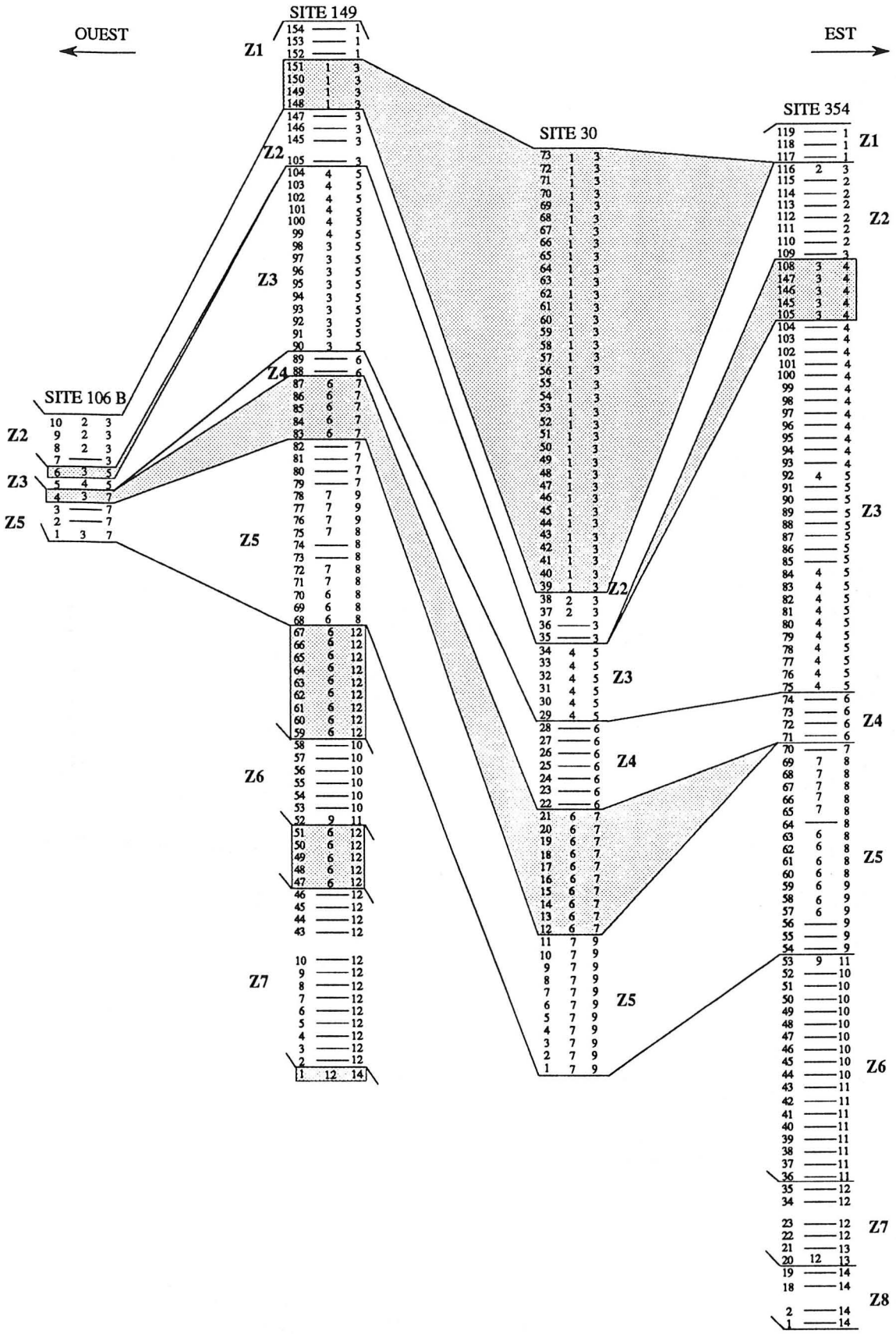


Figure 110 - Tableau de corrélation final fourni par la métode des associations unitaires appliquée à neuf sites dans l'Atlantique ouest.


OUEST
EST
SITE 149
SITE 106 B
SITE 30
SITE 354
Z1
Z2
Z3
Z4
Z5
Z6
Z7
Z8

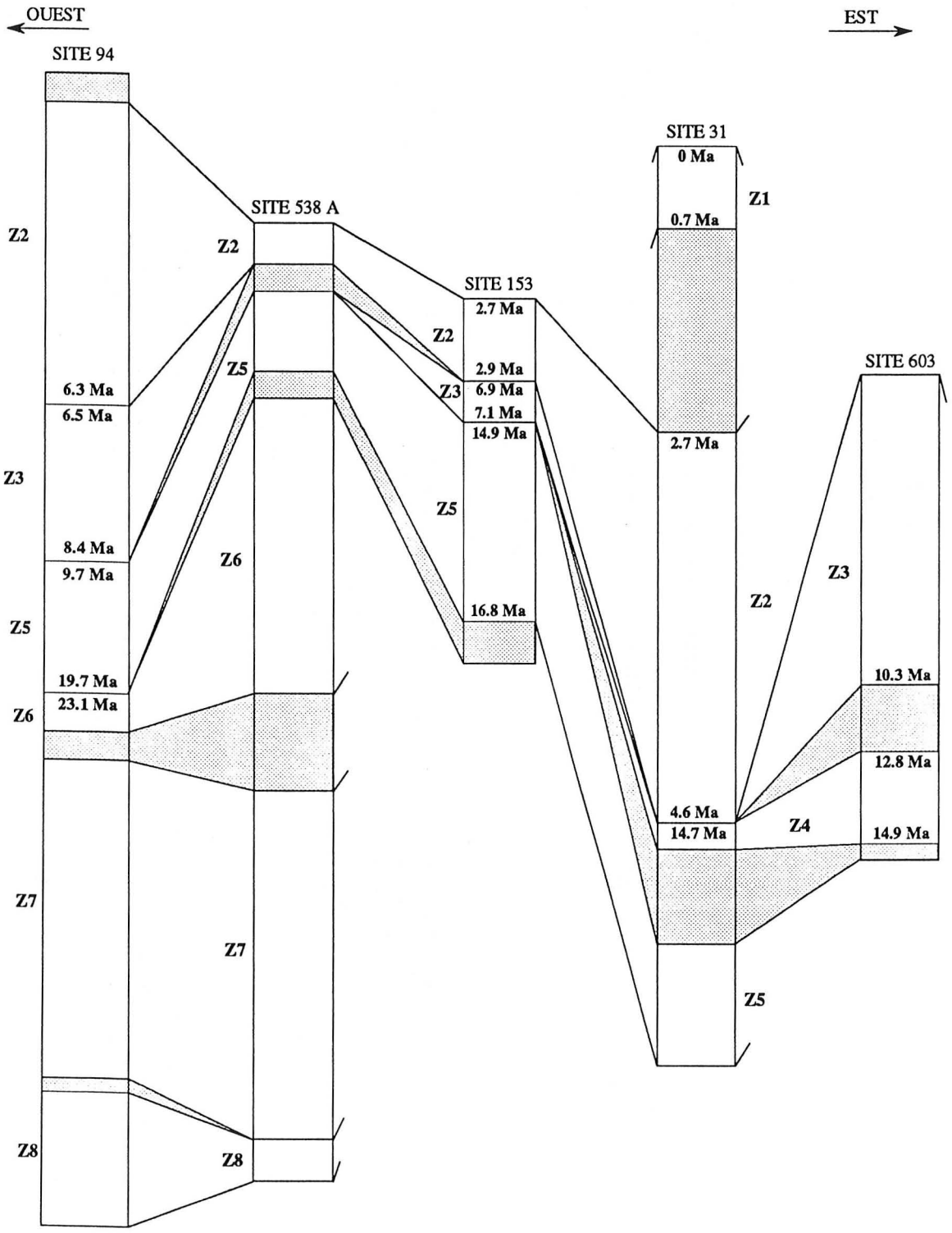
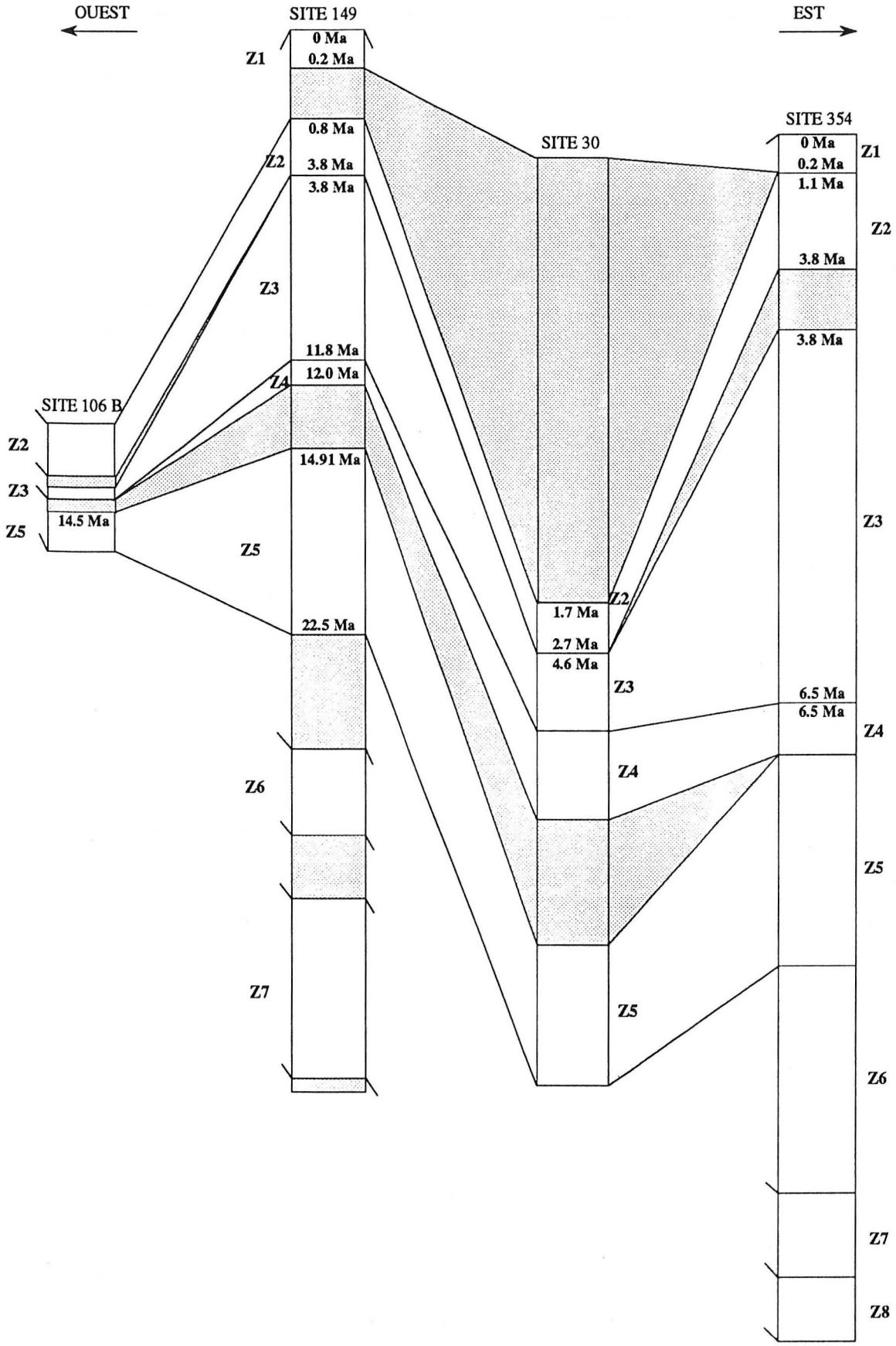


Figure 111 - Datation des limites des zones détectées dans l'Atlantique ouest.


OUEST
EST
SITE 149
SITE 30
SITE 354
SITE 106 B
0 Ma
0.2 Ma
0.8 Ma
3.8 Ma
3.8 Ma
11.8 Ma
12.0 Ma
14.91 Ma
22.5 Ma
14.5 Ma
1.7 Ma
2.7 Ma
4.6 Ma
0 Ma
0.2 Ma
1.1 Ma
3.8 Ma
3.8 Ma
6.5 Ma
6.5 Ma
Z1
Z2
Z3
Z4
Z5
Z6
Z7
Z8

Cependant, de par leur contenu spécifique, les associations unitaires 1 dans l'océan Pacifique et dans l'océan Atlantique peuvent être mises en parallèle.

Dans les deux cas une seule espèce permet d'assigner un niveau à ces associations unitaires, il s'agit d'*Emiliania huxleyi*. De même *Discoaster lodoensis* permet à elle seule d'assigner un niveau donné à l'association unitaire 9 dans l'océan Atlantique et à l'association unitaire 10 dans l'océan Pacifique.

Hormis ces quelques correspondances, les différences sont notables. Rappelons que la fermeture progressive de l'Isthme de Panama au cours du Néogène change considérablement l'hydrologie des régions de part et d'autre de cette barrière pour aboutir finalement à deux masses d'eaux très différentes (salinités, températures...).

Ces variations hydrologiques ont une influence considérable sur les assemblages fossiles de part et d'autre de l'Isthme de Panama. Il est normal que les associations unitaires détectées dans l'océan Pacifique diffèrent de celles définies dans l'océan Atlantique.

Conclusion

L'objectif principal de mon travail consistait avant tout à apporter la preuve, si besoin était, que les données récoltées durant les multiples campagnes de forages du Deep Sea Drilling Project et stockées sur ordinateur, pouvaient servir de base à des applications informatiques qui en optimisent considérablement l'exploitation.

Exploitation de la base de données du D.S.D.P.

Certes les données du D.S.D.P. sont regroupées depuis 1987 sur disques optiques numériques (ou DON), l'un des modes de stockage les plus élaborés actuellement sur ordinateur. Seul un disque optique numérique permettait l'archivage d'une telle masse de données en un si faible volume. Malheureusement, jusqu'à présent, aucune application informatique n'autorisait une exploitation poussée de ces données. En effet, les programmes accompagnant la base de données du D.S.D.P. ne supportent que des extractions de données et, qui plus est, suivant des requêtes simples définies à l'avance par le concepteur de l'application.

A l'aide d'une station de travail Sun-3/50 fonctionnant sous UNIX et d'un puissant gestionnaire de bases de données relationnelles (Ingres de Relational Technology), j'ai constitué ma propre base de données relationnelle, qui se limite en fait aux données paléontologiques de la base de données du D.S.D.P. sur disques optiques numériques. Cette base de données réduite est installée sur le disque dur de la station de travail Sun-3/50.

J'ai ensuite créé une application (PALEODATA) bâtie autour d'un ensemble de programmes permettant d'extraire les données de la base suivant des requêtes précises ou de les employer dans des applications particulières.

Les programmes d'extractions permettent notamment :
- d'extraire des données de la base suivant des requêtes simples prédéfinies (ils s'apparentent de ce fait aux programmes d'extractions accompagnant la base de données du D.S.D.P. sur disques optiques numériques),
- d'extraire des données suivant une requête spécifiée par l'utilisateur (et non plus le concepteur) de l'application.

Les applications sont d'une grande diversité. Leur élaboration a nécessité l'usage de trois langages de programmation : Fortran, langage C et SQL. Elles peuvent se restreindre à l'étude d'un seul des groupes fossiles représentés dans la base de données ou, au contraire, s'appliquer sur plusieurs groupes fossiles considérés simultanément. On peut notamment :
- rechercher l'occurrence d'une espèce fossile dans les sites du D.S.D.P. (avec la projection des sites concernés par la requête sur une carte mondiale),
- rechercher la profondeur correspondant au Fad et/ou au Lad d'une espèce fossile dans chacun des sites du D.S.D.P. où elle est représentée,
- rechercher l'abondance d'une espèce fossile (échantillon par échantillon) dans les sites du D.S.D.P.,
- tracer des cartes d'isopaques dans l'océan de notre choix afin de visualiser l'épaisseur de sédiment comprise entre deux événements biostratigraphiques que l'on spécifie au

préalable,
- appliquer pour la première fois la méthode des associations unitaires (de Guex et Davaud) à la base de données du D.S.D.P..

Ces applications peuvent être d'une grande utilité dans le cadre d'une étude biostratigraphique ou, d'une manière générale, dans tout travail faisant intervenir les données paléontologiques de la base de données du D.S.D.P.. Par exemple, la recherche du Fad et/ou du Lad parfaitement daté d'espèces fossiles peut être utile à la construction de courbes de taux d'accumulation dans les sites du D.S.D.P.. Le tracé de cartes d'isopaques peut aboutir à la visualisation de "l'épaisseur" d'une zone lorsque celle-ci est définie entre deux événements biostratigraphiques connus.

Toutes ces applications ont servi de base à la suite de ce travail.

J'ai pour ma part utilisé l'application PALEODATA comme base à une étude géologique concrète ayant pour objectif de définir certaines des caractéristiques de la sédimentation dans l'océan mondial durant le Néogène.

Nous avons commencé par chercher les Fads et les Lads parfaitement datés de 143 espèces fossiles (parmi les groupes des diatomées, des radiolaires, des nannofossiles calcaires et des foraminifères planctoniques) dans 74 sites du D.S.D.P. répartis dans les trois océans du globe (35 sites localisés dans l'océan Pacifique, 25 dans l'océan Atlantique et 14 dans l'océan Indien).

Connaissant les profondeurs des événements biostratigraphiques retenus (Fads ou Lads) dans chacun de ces sites, nous avons pu tracer par la méthode d'estimation mathématique du Cubic Spline les courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation sédimentaire pour ces sites durant le Néogène.

Nous avons porté une attention particulière aux âges pour lesquels les taux d'accumulation présentaient des variations notables (c'est-à-dire les âges correspondant à des accélérations ou à des ralentissements des vitesses instantanées d'accumulation). Nous avons vérifié préalablement que la compaction sédimentaire (nous nous sommes limités en fait à l'action de charge sédimentaire sur la compaction) n'influençait pas l'allure des courbes des vitesses d'accumulation : nous avons pour cela "décompacté" une dizaine des sites étudiés et comparé l'allure des courbes des taux et des vitesses d'accumulation compactées et décompactées. Bien que l'amplitude des courbes compactées et décompactées soit évidemment différente, leur allure générale est identique confirmant le fait que les taux et les vitesses instantanées d'accumulation sont le reflet des taux et des vitesses de sédimentation.

Les courbes tracées nous ont permis dans un premier temps d'effectuer l'inventaire des périodes dominées par des vitesses d'accumulation importantes et de celles caractérisées par des vitesses d'accumulation faibles (voire nulles).

Les hiatus néogènes

Nous avons ainsi pu définir sept périodes dominées par la présence de hiatus mondialement reconnus au cours du Néogène. Il s'agit :
- du hiatus n° 1 entre 2 Ma et 2,8 Ma, affectant l'ensemble du Pacifique et la majeure partie de l'océan Atlantique,
- du hiatus n° 2 entre 4,8 Ma et 5,2 Ma, affectant principalement le Pacifique ouest, l'Atlantique nord et le sud de l'océan Indien,
- du hiatus n° 3 entre 6,8 Ma et 7,6 Ma, affectant surtout le Pacifique ouest, la totalité de l'Atlantique et le nord de l'océan Indien,
- du hiatus n° 4 entre 10,4 Ma et 10,8 Ma, affectant la totalité de l'océan Pacifique et de l'océan Atlantique,
- du hiatus n° 5 entre 12 Ma et 12,4 Ma, localisé dans le Pacifique ouest, l'océan Atlantique et le sud de l'océan Indien,
- du hiatus n° 6 entre 13,2 Ma et 13,6 Ma, affectant le Pacifique ouest, l'océan

Atlantique et le nord de l'océan Indien,
- du hiatus n° 7 entre 17,6 Ma et 19,2 Ma, localisé dans la totalité de l'océan Pacifique et de l'océan Atlantique et dans la partie occidentale de l'océan Indien.

Bon nombre de ces hiatus ont été définis par Keller et Barron (1983 et 1987). C'est le cas des hiatus n° 1, n° 2, n° 3, n° 5, n° 6 et n° 7. Les différences détectées entre cette étude et celles de Keller et Barron s'expliquent par :
- l'emploi d'espèces et de sites parfois différents,
- l'évolution des datations attribuées aux Fads et aux Lads des espèces retenues dans cette étude,
- une méthode d'estimation différente pour le tracé des courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation.

Les maximums et les minimums de vitesses d'accumulation

En dehors de ces sept hiatus, nous avons pu mettre en évidence l'existence de 13 périodes du Néogène dominées alternativement par des tendances sédimentaires opposées (ralentissements ou accroissements des vitesses d'accumulation sédimentaire correspondant respectivement à des maximums et à des minimums sur les courbes des vitesses instantanées d'accumulation sédimentaire). Ces tendances sédimentaires ont, le plus souvent, une répartition d'ampleur mondiale.

Six périodes dominées par des ralentissements de sédimentation (entre 16,8 Ma et 13,2 Ma, entre 12,8 Ma et 12 Ma, entre 10 Ma et 8 Ma, entre 6,8 Ma et 5,6 Ma, entre 4,8 Ma et 3,2 Ma, entre 2,8 Ma et 2,4 Ma et entre 2 Ma et l'actuel) et sept périodes dominées par des reprises de sédimentation (entre 22,4 Ma et 16,8 Ma, entre 13,6 Ma et 12,8 Ma, entre 12 Ma et 10 Ma, entre 8 Ma et 6,8 Ma, entre 5,6 Ma et 4,8 Ma, entre 3,2 MA et 2,8 Ma et entre 2,4 Ma et 2 Ma) ont ainsi pu être mises en évidence au cours du Néogène.

Implications paléoclimatiques sur la sédimentation néogène

Nous avons ensuite cherché l'influence des conditions paléoclimatiques sur la sédimentation néogène. Pour cela nous avons notamment calculé un indice P (à partir de l'abondance de deux espèces nannofossiles calcaires, l'indice P est défini par l'abondance de *Coccolithus pelagicus* à laquelle on soustrait celle de *Reticulofenestra pseudoumbilica*) qui est supposé caractériser les variations thermiques des eaux de surface des océans dans plusieurs sites du D.S.D.P. localisés dans le Pacifique est, le Pacifique ouest, l'Atlantique nord et l'océan Indien.

Nous avons pu ainsi définir, pour chacune de ces régions, des tendances paléoclimatiques dont la synthèse permet d'isoler 11 événements climatiques chauds et 10 événements climatiques froids durant le Néogène dans l'océan mondial.

On note un réchauffement progressif des eaux de surface de l'océan mondial entre 23,7 Ma et 13,9 Ma. A partir de 13,9 Ma, le réchauffement des eaux de surface de l'océan mondial s'accentue et les événements chauds de longue durée ne sont interrompus que par de brefs événements froids de faible amplitude. Quant aux événements chauds, leur amplitude est de plus en plus importante jusqu'à 3 Ma (Pliocène terminal), période à partir de laquelle s'installe un long événement froid de très grande amplitude (entre 3 Ma et 1,9 Ma). Savin et ses collaborateurs (1975) indiquent effectivement qu'une brusque baisse de température des eaux de surface de l'océan mondial survient au Pliocène terminal. Ils attribuent cette baisse des températures à une intensification des phénomènes de glaciation polaire.

Synthèse des résultats

Il ressort de cette étude que la plupart des sept hiatus définis précédemment coïncident avec des événements climatiques froids. Seul le hiatus n° 6 (défini entre 13,2 Ma et 13,6 Ma) n'a pu être

directement corrélé avec un événement froid.

Van Andel *et al.* (1975) et Moore *et al.* (1978) ainsi que de nombreux autres auteurs, avaient déjà suggéré que les hiatus miocènes correspondaient aux périodes d'intensification des glaciations polaires qui ont pour conséquence une augmentation de l'activité des eaux profondes qui se traduisent soit par des lacunes de sédimentation (hiatus) soit, tout au moins, par des accumulations sédimentaires réduites.

Nous avons ensuite comparé la courbe des événements climatiques définis dans cette étude pour le Néogène avec celle des minimums et des maximums des vitesses instantanées d'accumulation (également définie dans cette étude) et avec la courbe illustrant les variations du niveau eustatique (Haq, 1987).

Nous avons pu montrer que les maximums de sédimentation coïncident le plus souvent avec des périodes durant lesquelles dominent un événement climatique chaud. Durant ces périodes, il est en effet établi que l'activité des courants de fond diminue fortement ce qui favorise les dépôts océaniques.

Il ressort également de cette étude que, non seulement la plupart des sept hiatus et des périodes de faible sédimentation coïncident avec des événements climatiques froids mais que l'on peut également le plus souvent corréler ces événements avec des périodes de bas niveau marin sur la courbe des variations eustatiques de Haq.

A l'inverse, les périodes de forte sédimentation coïncident dans bien des cas avec des événements climatiques chauds et avec des périodes de haut niveau marin.

Cela n'est cependant pas systématique et certaines des périodes étudiées ne coïncident pas forcément avec ce modèle. Il existe par exemple des discordances entre la courbe des événements climatiques et celle des variations du niveau marin : les fluctuations climatiques ne peuvent expliquer à elles seules les variations eustatiques ni les changements dans la sédimentation bien qu'elles y contribuent fortement.

Synthèse des tendances sédimentaires dans l'océan mondial

Au total, 180 cartes d'isopaques (60 par océan pour le Néogène) permettant de délimiter des aires géographiques d'égales valeurs de vitesses instantanées d'accumulation ont été tracées. Elles permettent de visualiser rapidement les pôles d'accumulations importantes ou au contraire les zones soumises à une faible sédimentation dans le Pacifique, l'Atlantique ou l'océan Indien au cours du Néogène.

Synthèse dans l'océan Atlantique

Les vitesses d'accumulation élevées dans l'Atlantique nord au cours du Néogène permettent de mettre en évidence d'importants dépôts de silice biogène dans les zones de forte productivité de surface liée à l'existence de courants d'upwellings vigoureux le long des côtes africaines, européennes ou américaines. Ceux-ci s'intensifient lors des périodes froides ce qui explique pourquoi les accumulations importantes dans l'Atlantique nord sont corrélées avec certaines des périodes froides définies dans cette étude.

Les accumulations importantes sont limitées aux sites les plus nordiques de l'Atlantique nord à partir du début du Pliocène.

Les sites localisés sur la marge nord du continent sud américain présentent des vitesses d'accumulation très peu importantes durant la totalité du Néogène sauf à partir du Pliocène où celles-ci augmentent sensiblement.

L'Atlantique sud présente trois grandes tendances de dépôt au cours du Néogène.

Les sites localisés sur la marge africaine présentent de faibles vitesses instantanées d'accumulation entre 22,8 Ma et 16 Ma. La sédimentation entre 16 Ma et 8 Ma s'intensifie reflétant l'action de vigoureux courants d'upwellings le long des côtes africaines (liés à un accroissement de la calotte glaciaire antarctique). Ce phénomène s'amplifie encore à partir de 8 Ma où les vitesses instantanées d'accumulation sont considérables.

Les sites localisés sur la marge occidentale de l'Atlantique sud sont le cadre d'une sédimentation importante à partir de 8 Ma seulement.

Quant aux sites centraux de l'Atlantique sud, leurs vitesses instantanées d'accumulation restent faibles durant la totalité du Néogène.

Synthèse dans l'océan Pacifique

L'étude des vitesses instantanées d'accumulation dans l'océan Pacifique permet également d'isoler plusieurs tendances sédimentaires.

L'évolution des vitesses instantanées dans le Pacifique oriental durant le Néogène sont principalement régies par la fermeture de l'Isthme de Panama. Elles sont faibles et stables jusqu'à 7,2 Ma, période à partir de laquelle elles commencent à augmenter, reflétant la naissance des courants d'upwellings liés au début de la fermeture de l'Isthme de Panama. Cette tendance s'intensifie à 2,8 Ma, âge correspondant à la clôture définitive de l'Isthme de Panama et à l'installation de vigoureux upwellings dans le Pacifique est.

On constate que bon nombre des maximums d'accumulation détectés dans le sud-ouest Pacifique correspondent avec des événements climatiques froids définis dans le Pacifique occidental.

Les sites localisés sur la marge nord-ouest de l'océan Pacifique peuvent présenter des vitesses d'accumulation considérables durant le Néogène. Ces phénomènes illustrent les apports terrigènes importants pouvant intervenir dans cette région.

Les sites du Pacifique central, dans une zone de faible productivité, présentent des vitesses instantanées d'accumulation généralement faibles durant tout le Néogène.

Synthèse dans l'océan Indien

Trois grandes tendances sédimentaires s'observent dans l'océan Indien durant le Néogène.

Les sites localisés dans la partie est de l'océan Indien sont le cadre d'une sédimentation peu importante durant la quasi totalité du Néogène.

Les vitesses instantanées d'accumulation sont très faibles dans la partie nord-ouest de l'océan Indien jusqu'à 12,2 Ma, période à partir de laquelle elles peuvent être très importantes sauf à 5 Ma et à 9,2 Ma (correspondant à des événements froids).

Cette tendance s'observe également dans la partie sud-ouest de l'océan Indien sauf que, dans ce cas, les vitesses d'accumulation sont élevées après 12,8 Ma.

Biochronologie quantitative

La fin de cette étude illustre, à l'aide de deux exemples, la méthode des associations unitaires (de Guex et Davaud) appliquée à la base de données du D.S.D.P.. Cette méthode permet de mettre en évidence des ensembles exclusifs d'espèces (les associations unitaires) et d'en découvrir la séquence chronologique. On aboutit à l'élaboration d'une échelle biochronologique discrète dont les subdivisions biochronologiques (les zones) ne sont pas forcément contiguës. Cette

méthode élaborée par Guex à été informatisée par Davaud (programme DV 86).

J'ai, pour ma part, adapté ce programme sur la station de travail Sun-3/50 et élaboré les programmes d'extraction nécessaires pour l'appliquer à la base de données du D.S.D.P..

Le premier exemple concerne sept sites du D.S.D.P. localisés dans le Pacifique est et le second neuf sites de l'Atlantique ouest. Dans les deux cas nous avons retenu des espèces appartenant au groupe des nannofossiles calcaires.

Nous avons pu ainsi définir 17 associations unitaires dont la plupart coïncident avec des zones à nannofossiles calcaires du Néogène dans le Pacifique est. 14 associations unitaires sont tirées de l'étude dans l'Atlantique ouest.

Dans les deux cas, huit zones reproductibles (reconnaissables sur de vastes étendues géographiques) permettent de corréler les sites entre eux.

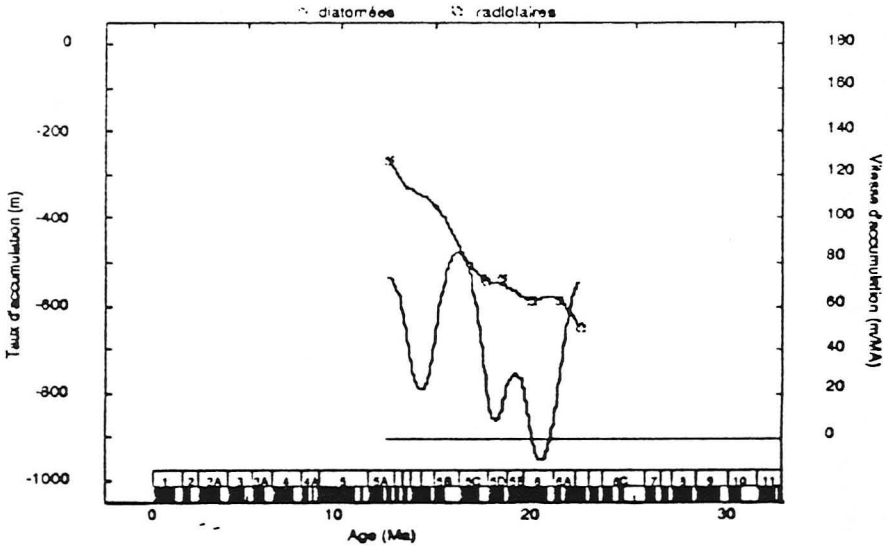
Cela démontre que la méthode des associations unitaires appliquée à la base de données du D.S.D.P., fiable car objective, aboutit à la création de subdivisions biochronologiques qui permettent de corréler rapidement les sites entre eux. Leur précision peut parfois égaler celle des chartes biostratigraphiques traditionnelles (c'est le cas pour les sites du D.S.D.P. localisés dans le Pacifique est).

ANNEXE A.

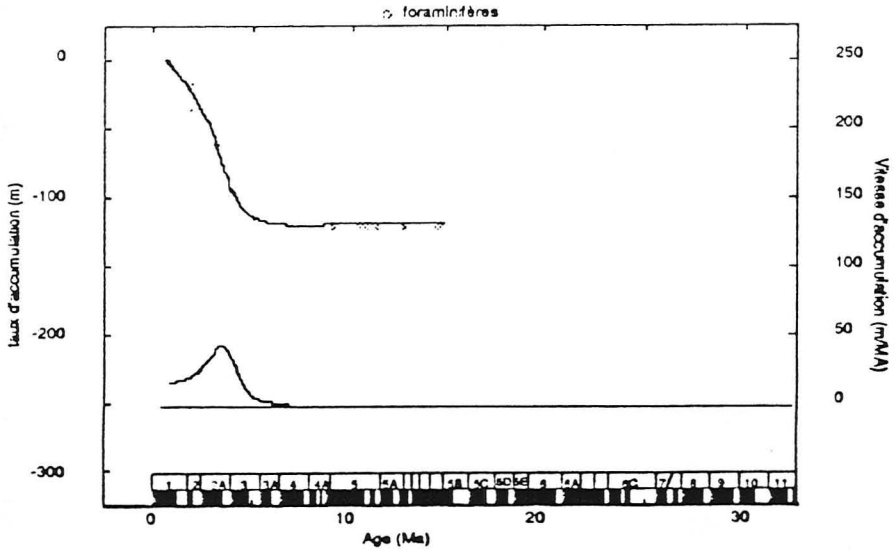
Courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation pour 74 sites du D.S.D.P. répartis dans l'Atlantique sud, l'Atlantique nord, le Pacifique sud, le Pacifique nord et l'océan indien.

ATLANTIQUE NORD

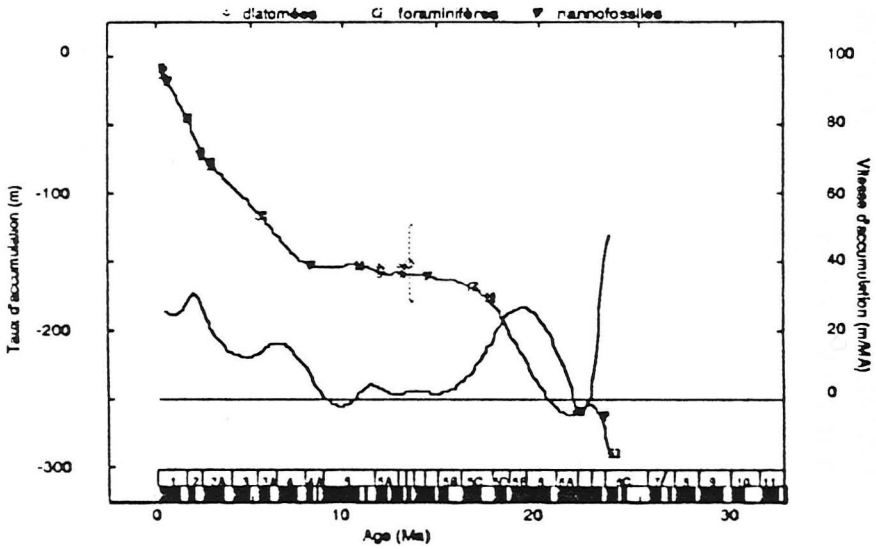
SITE 391 A



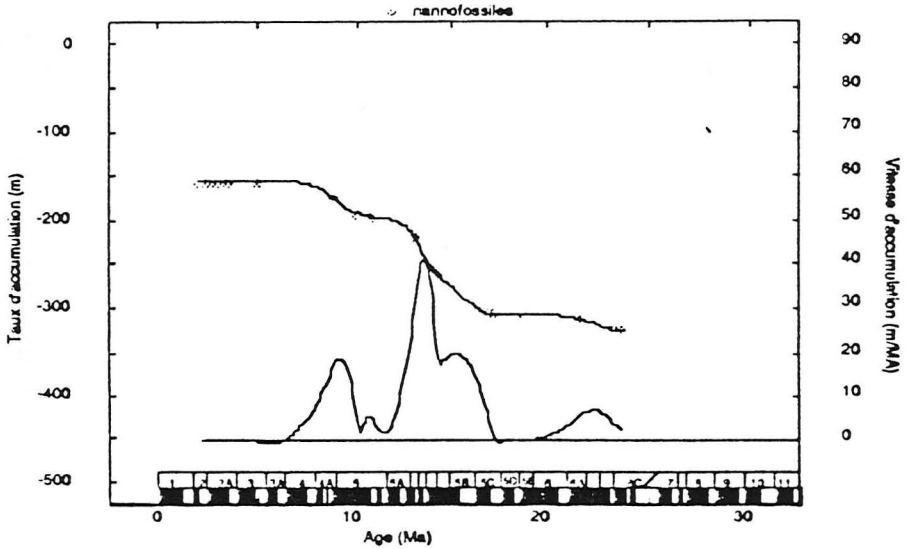
SITE 396



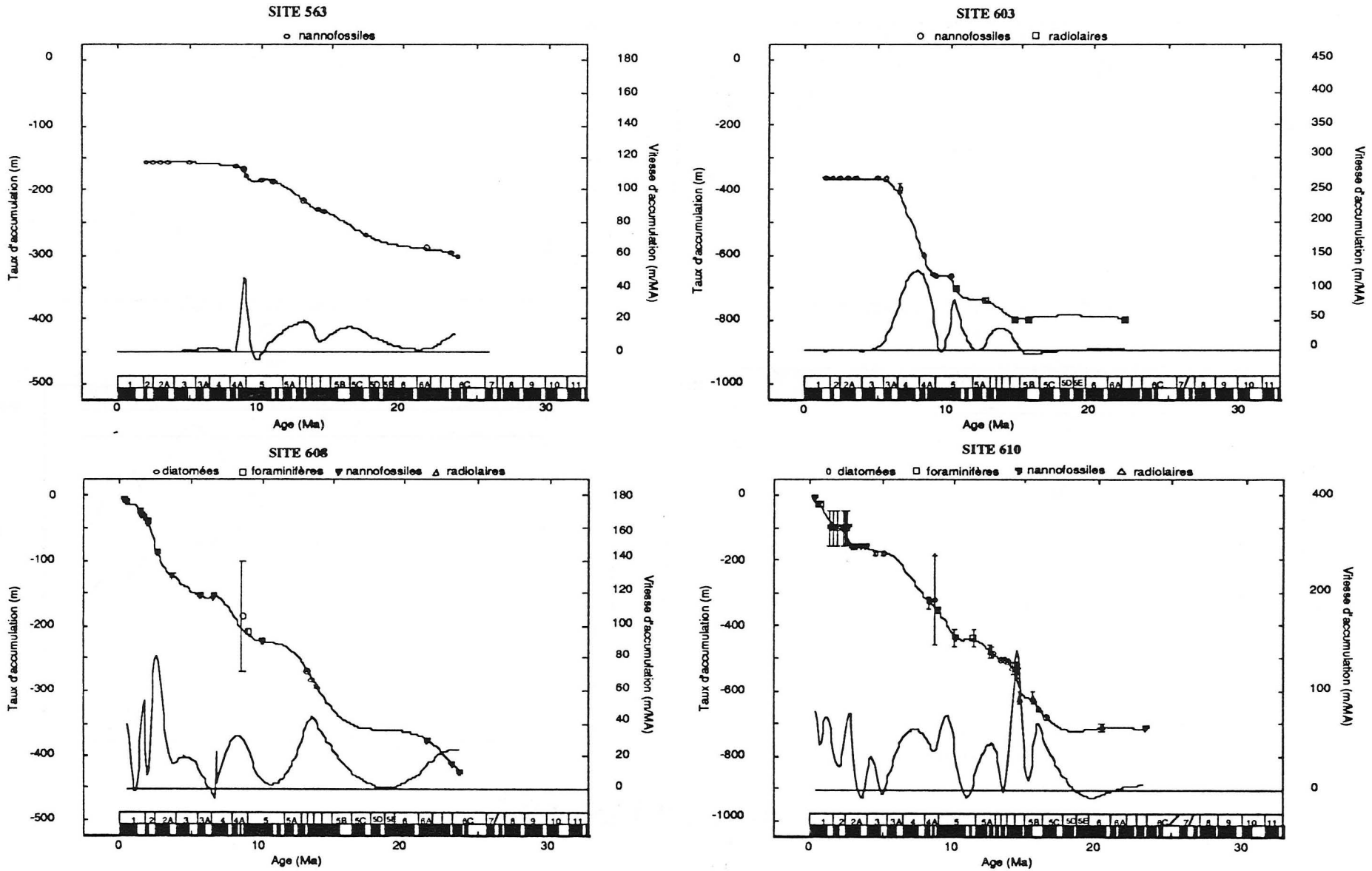
SITE 407



SITE 558

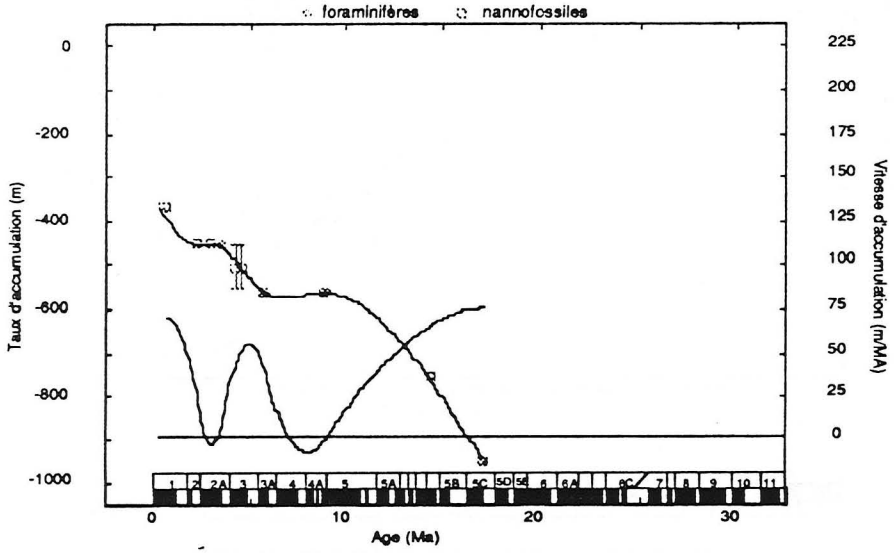


ATLANTIQUE NORD

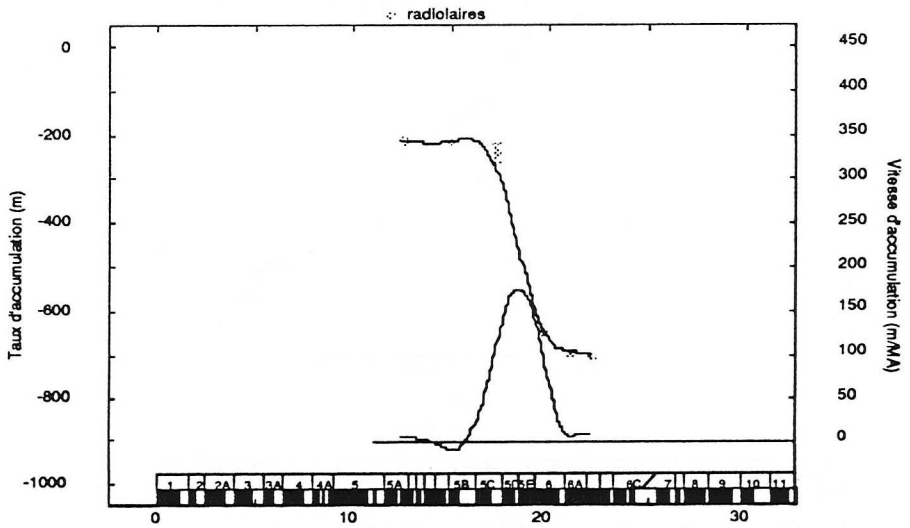


ATLANTIQUE NORD

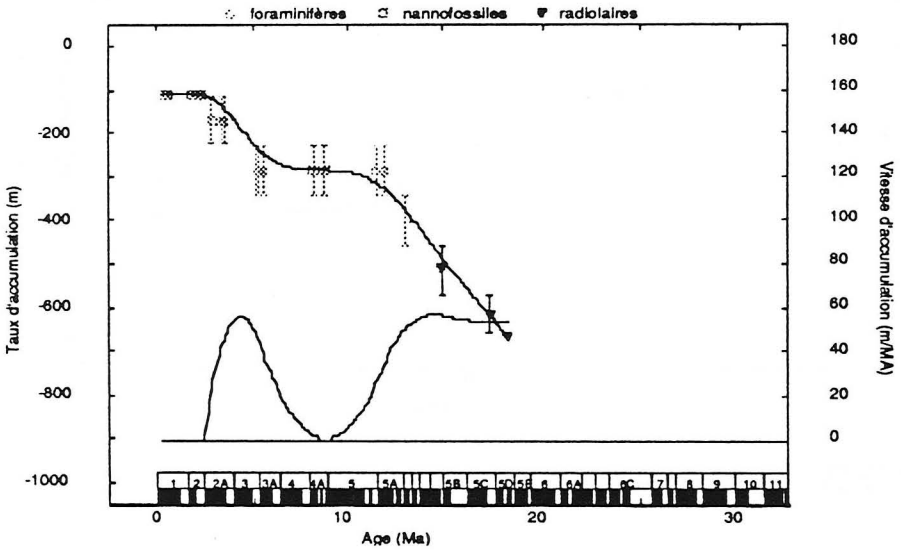
SITE 106 B



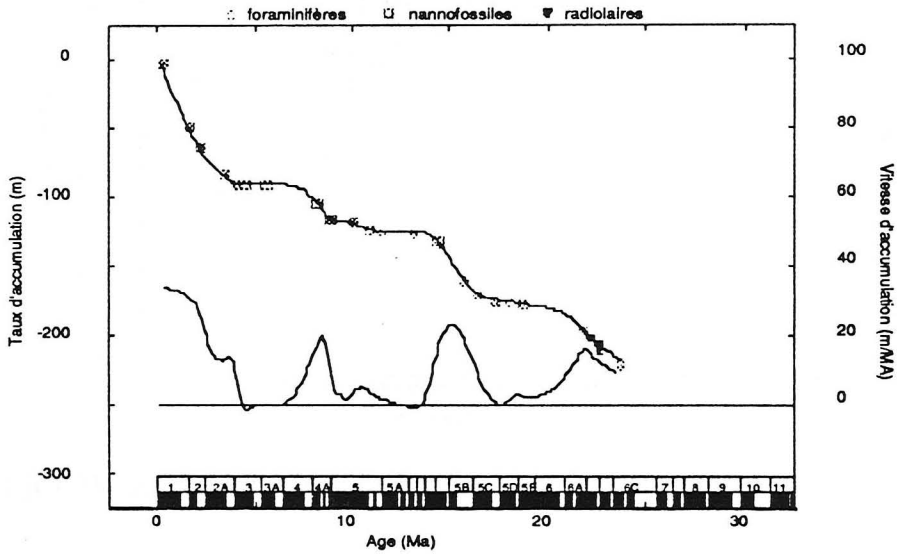
SITE 116



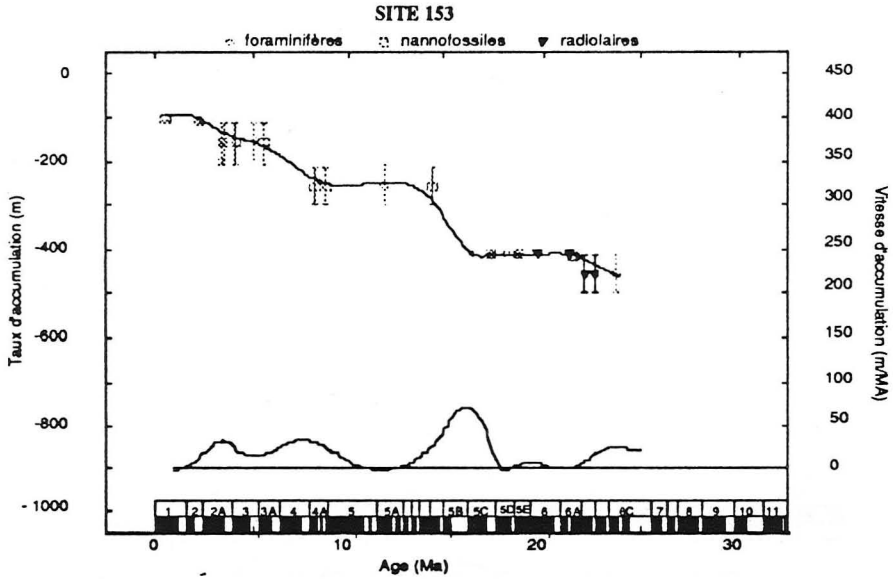
SITE 139

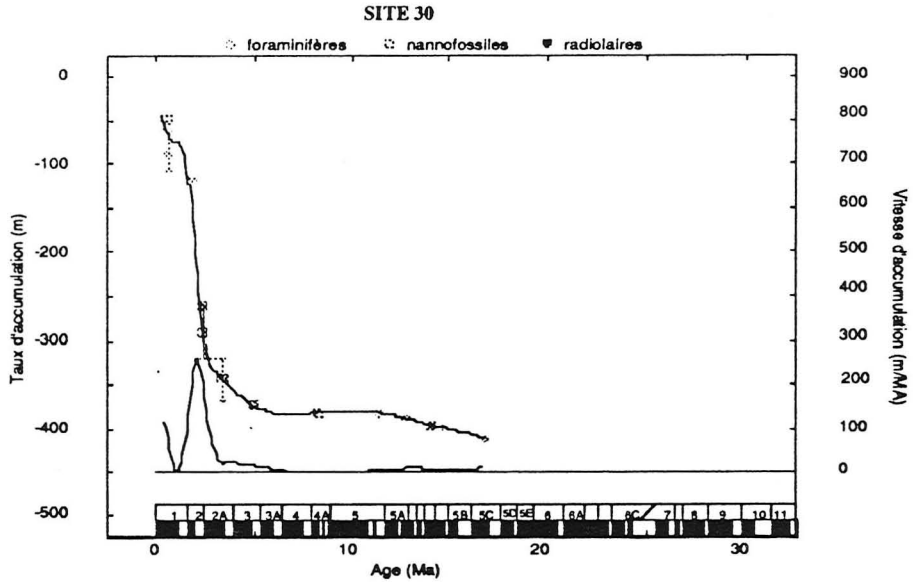


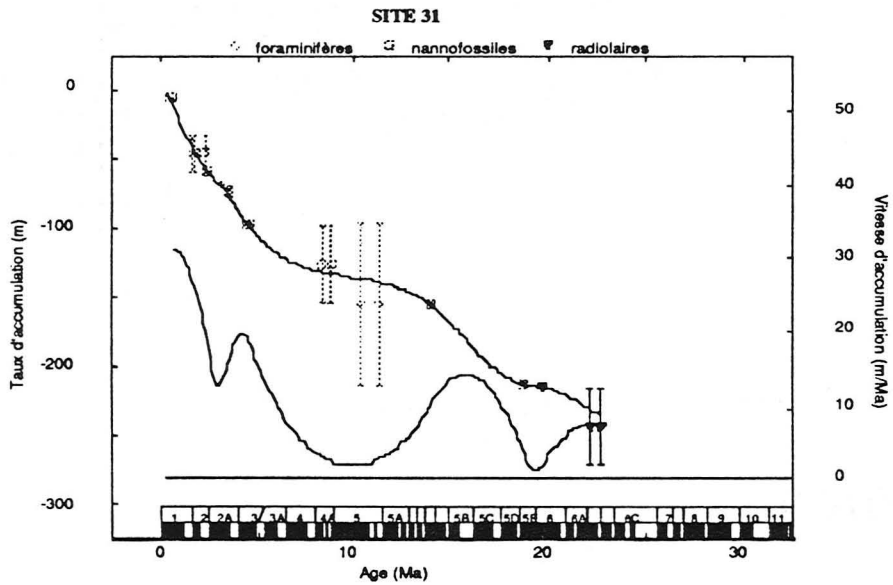
SITE 149

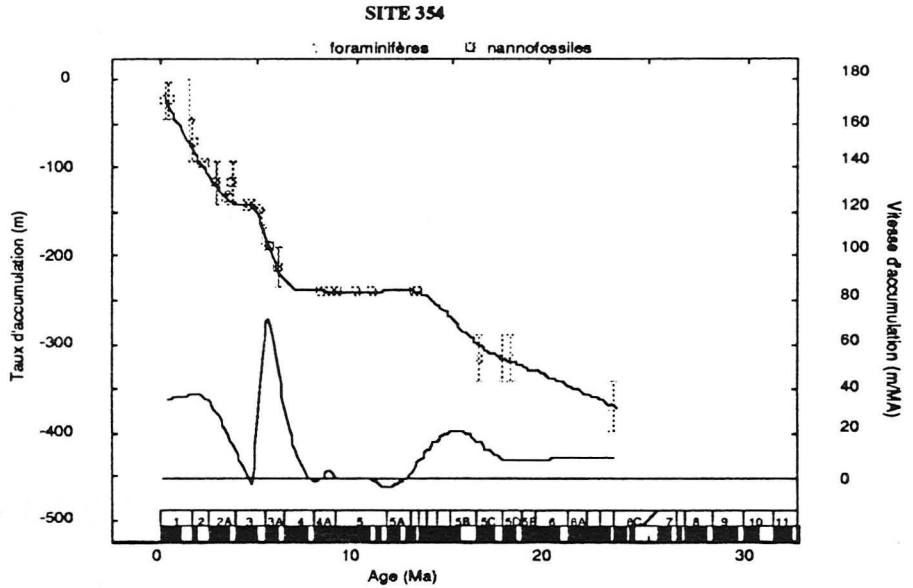


ATLANTIQUE NORD

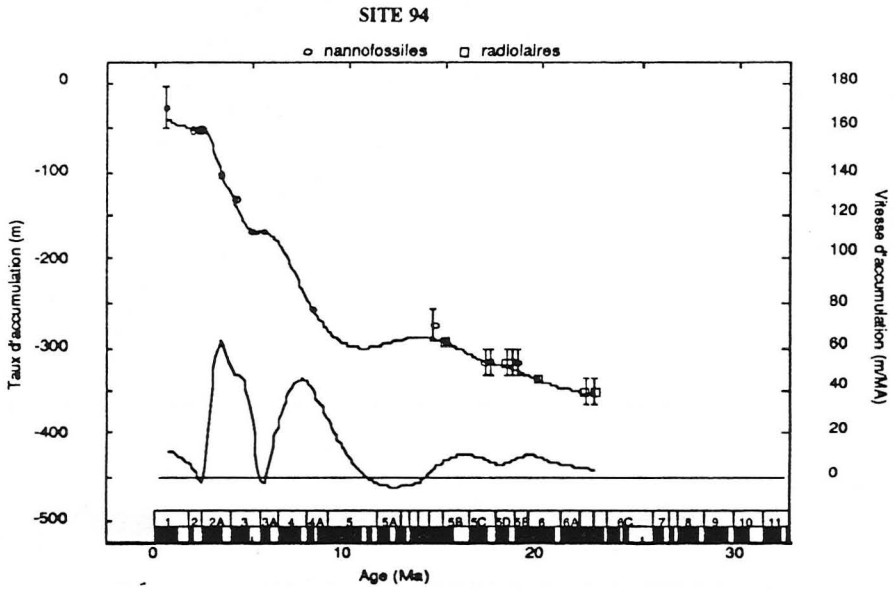




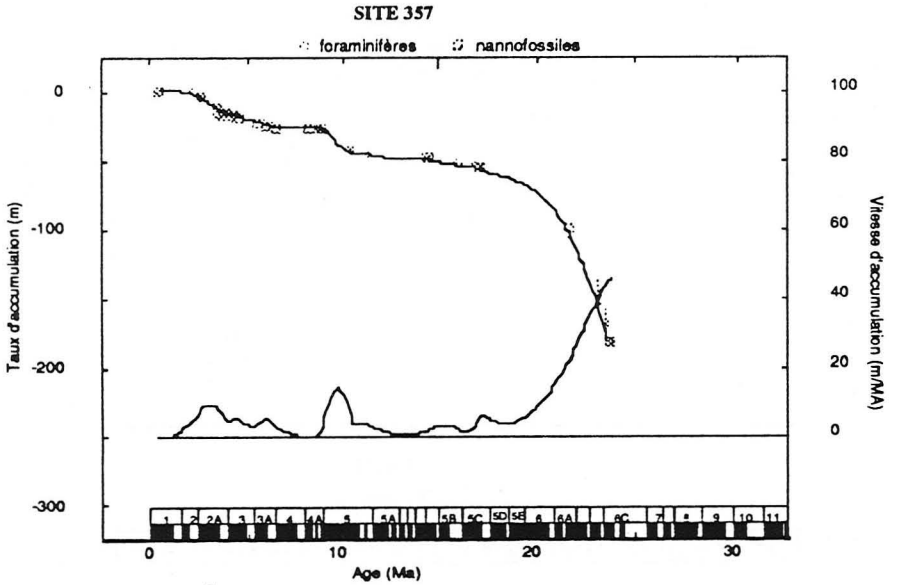


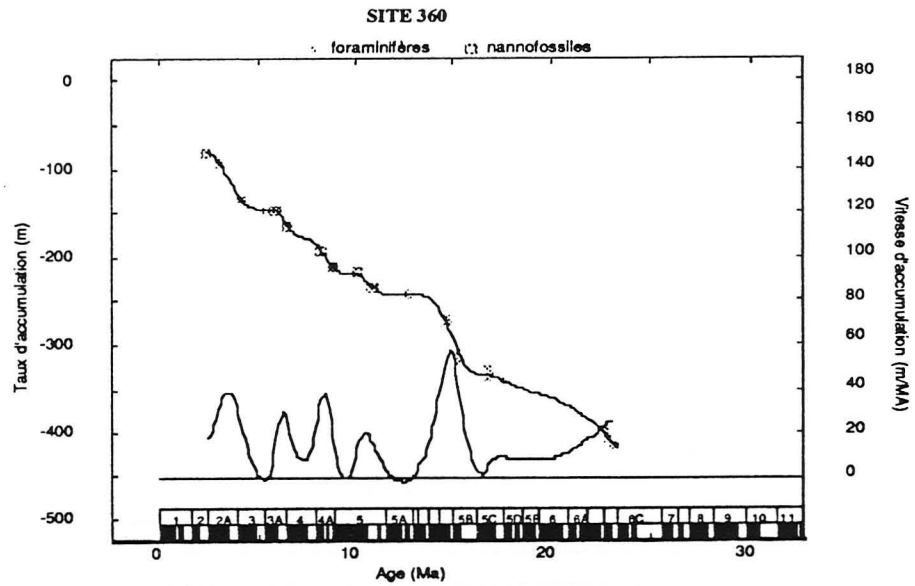


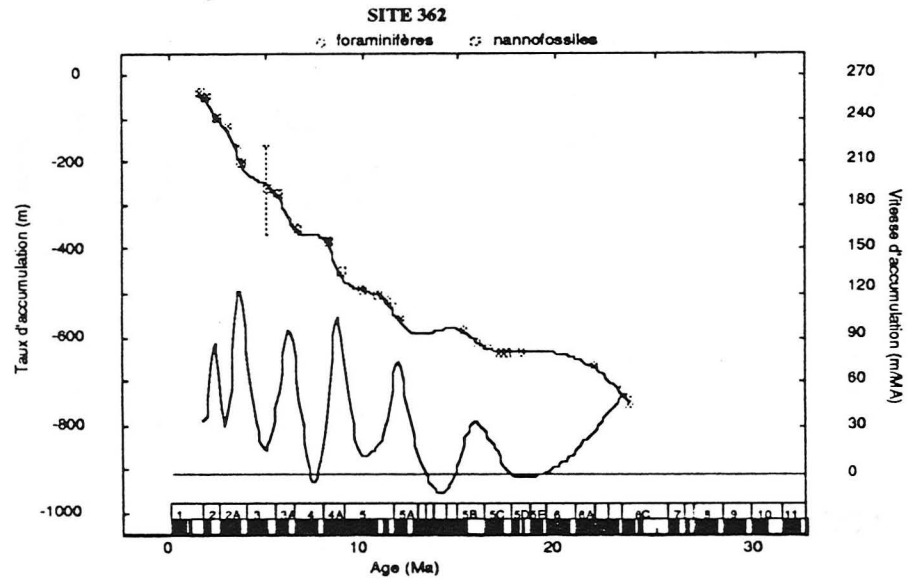
ATLANTIQUE NORD

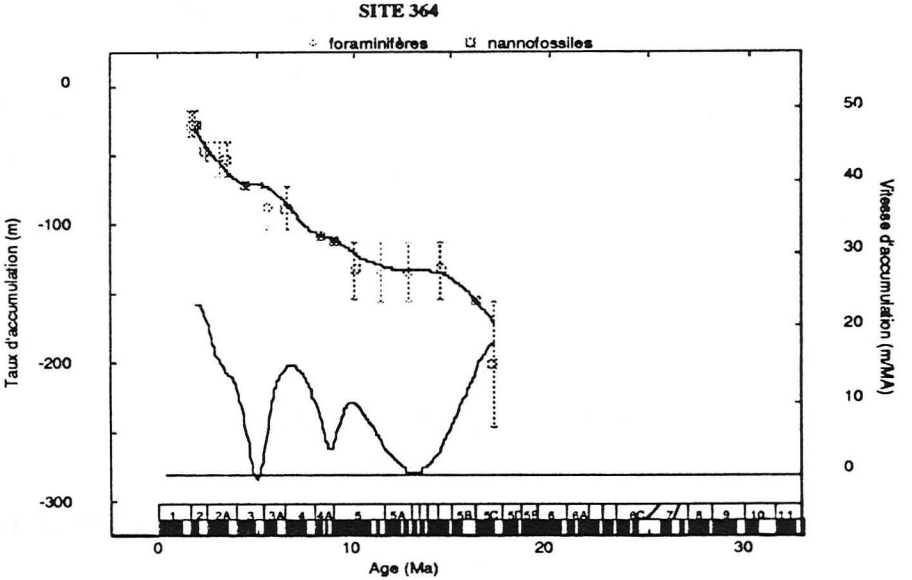


ATLANTIQUE SUD

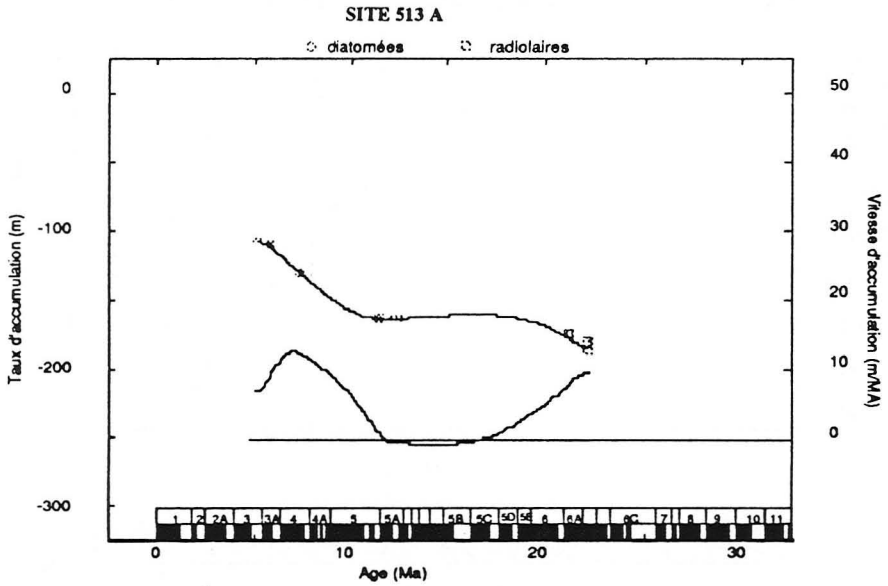


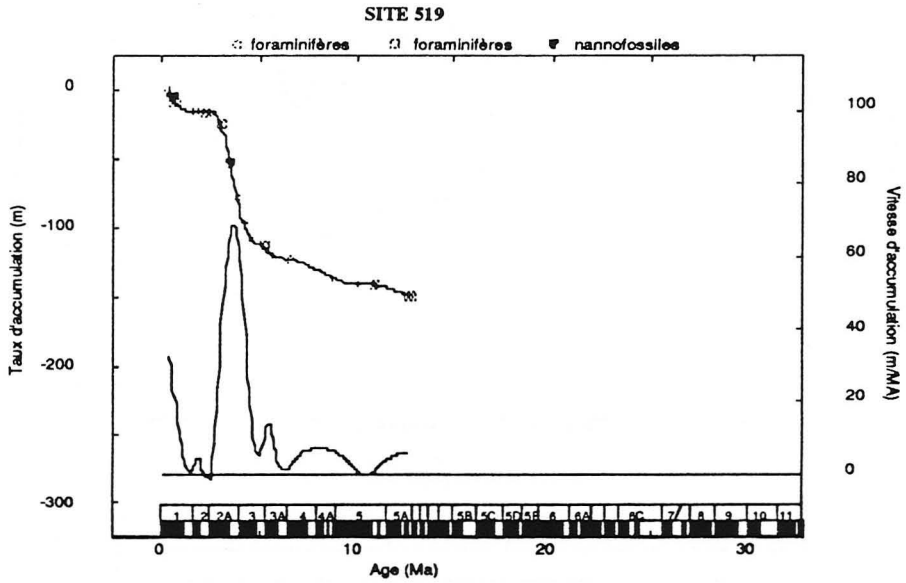


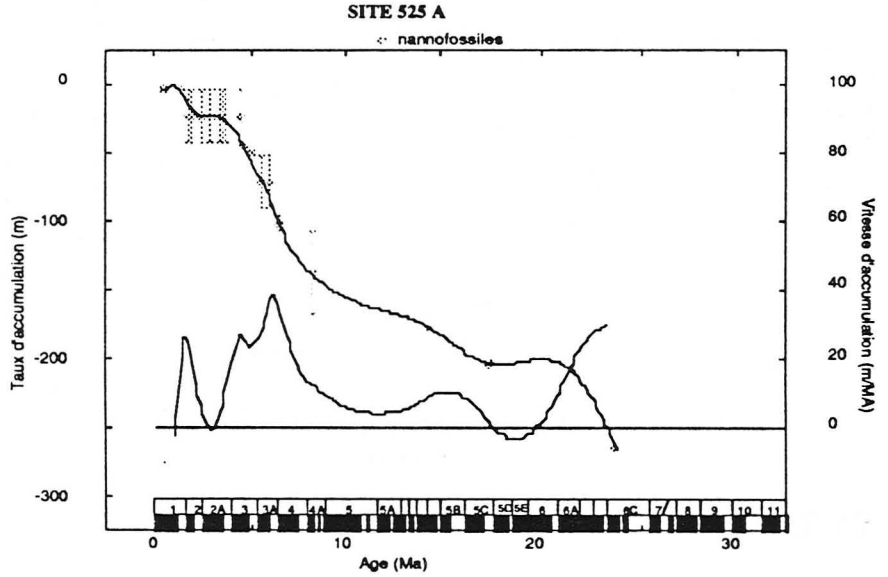




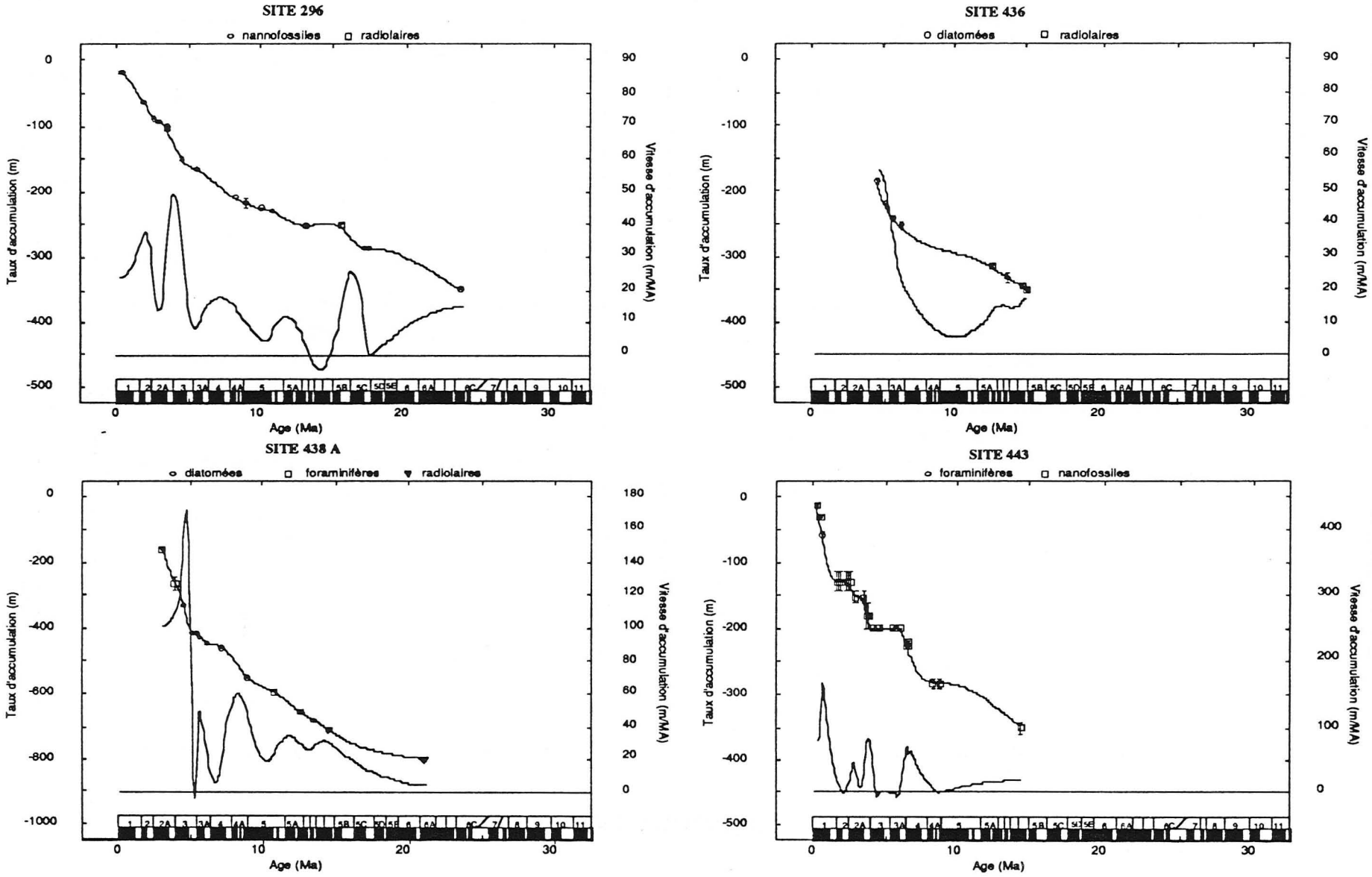
ATLANTIQUE SUD



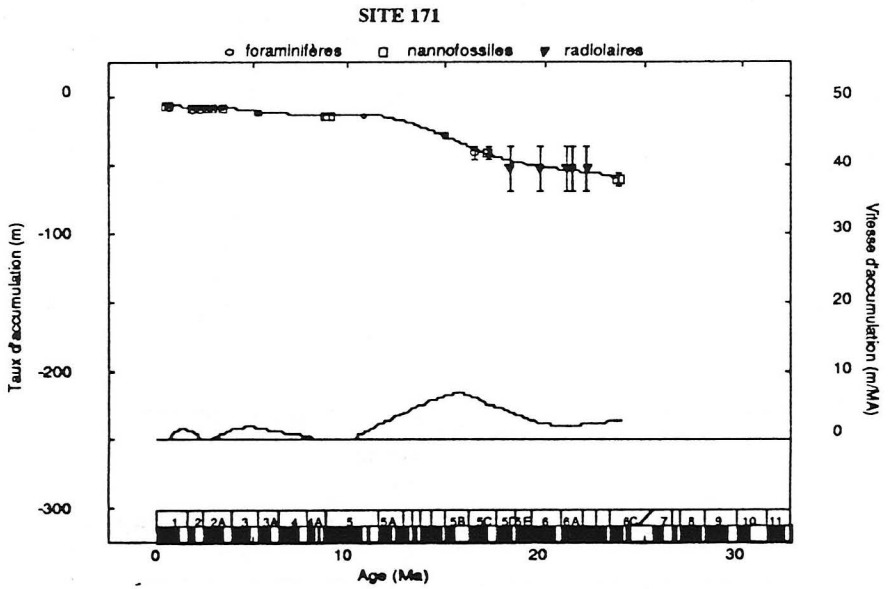


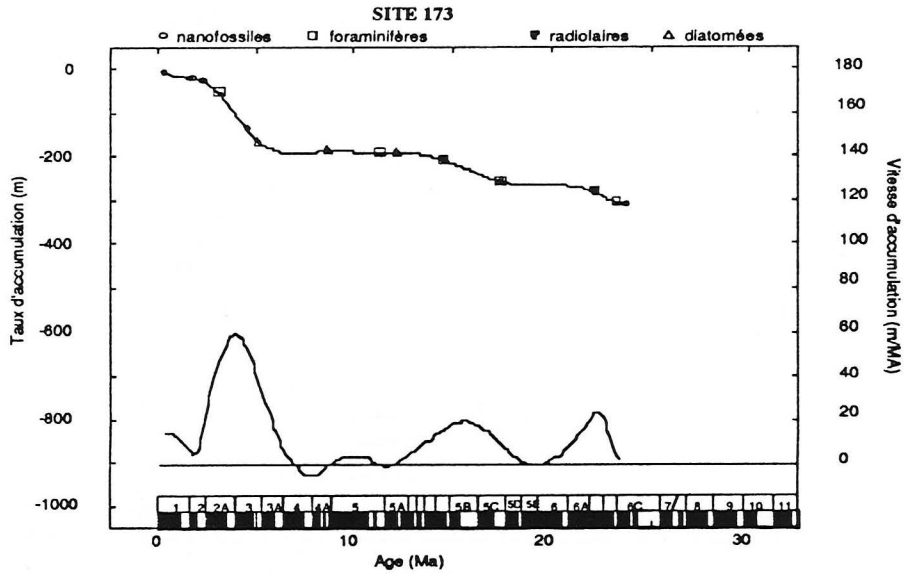


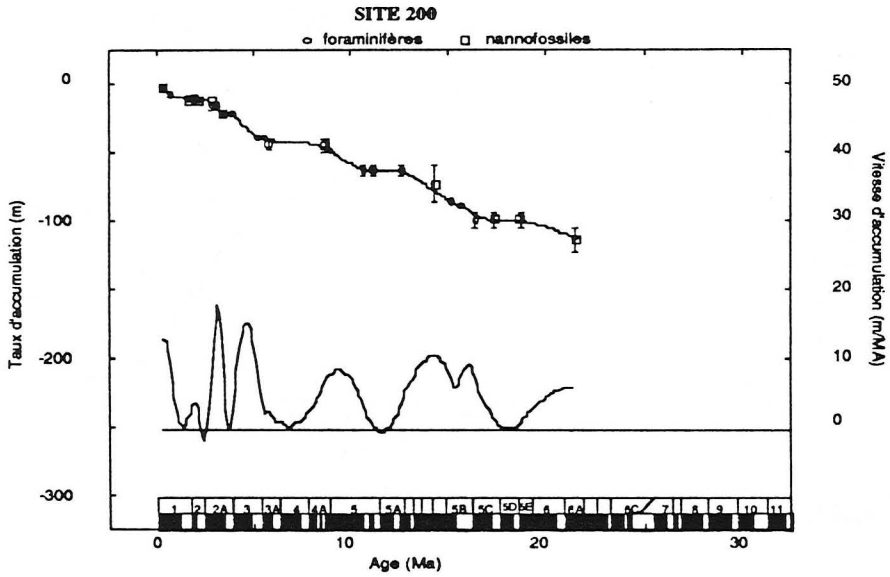
PACIFIQUE NORD

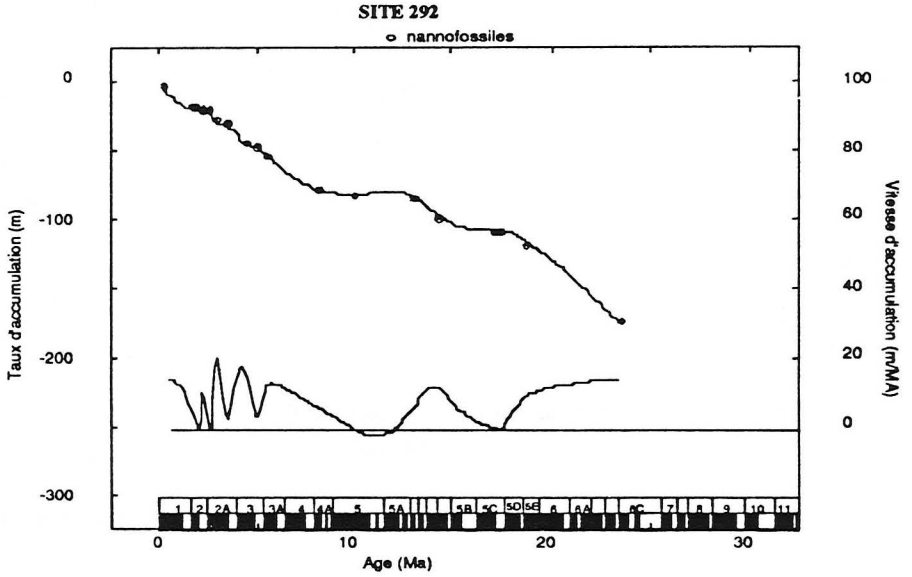


PACIFIQUE NORD



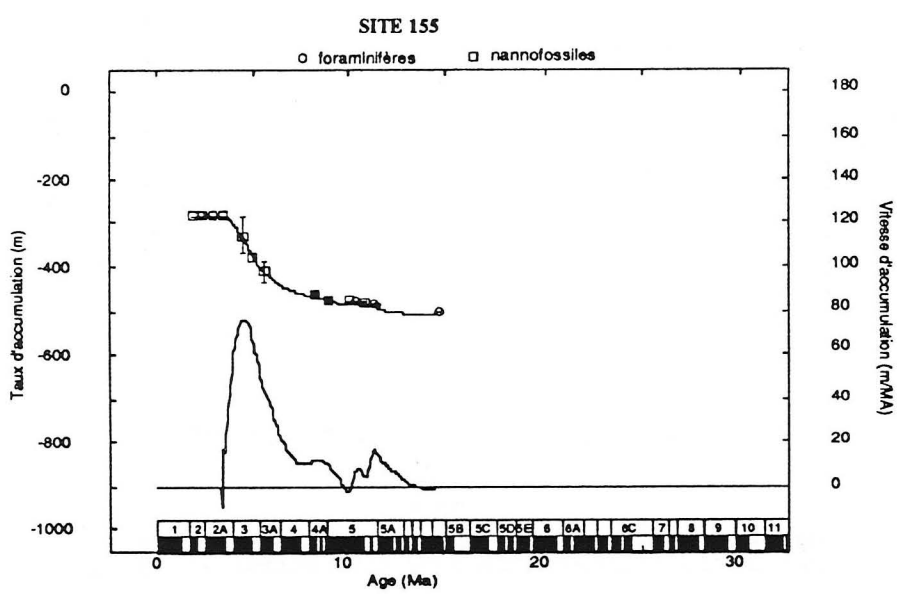




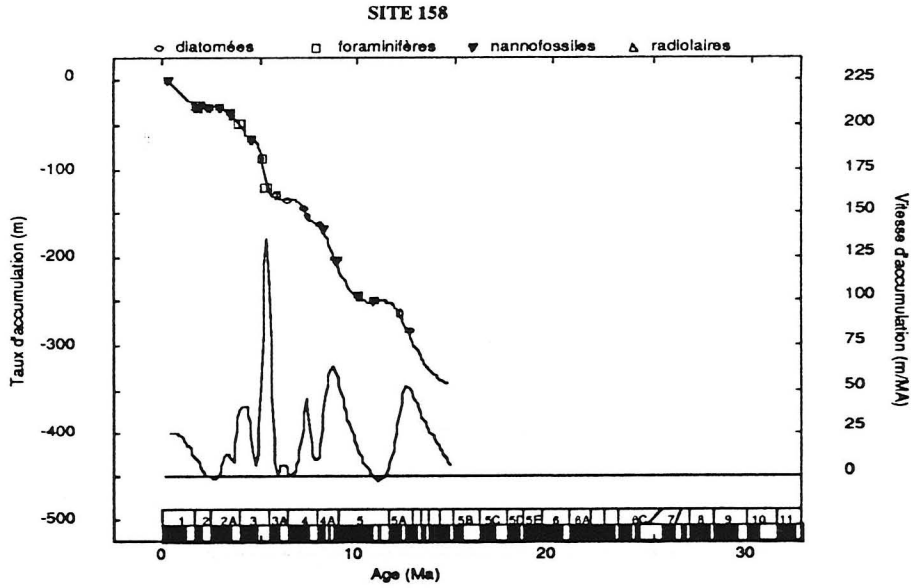


PACIFIQUE NORD

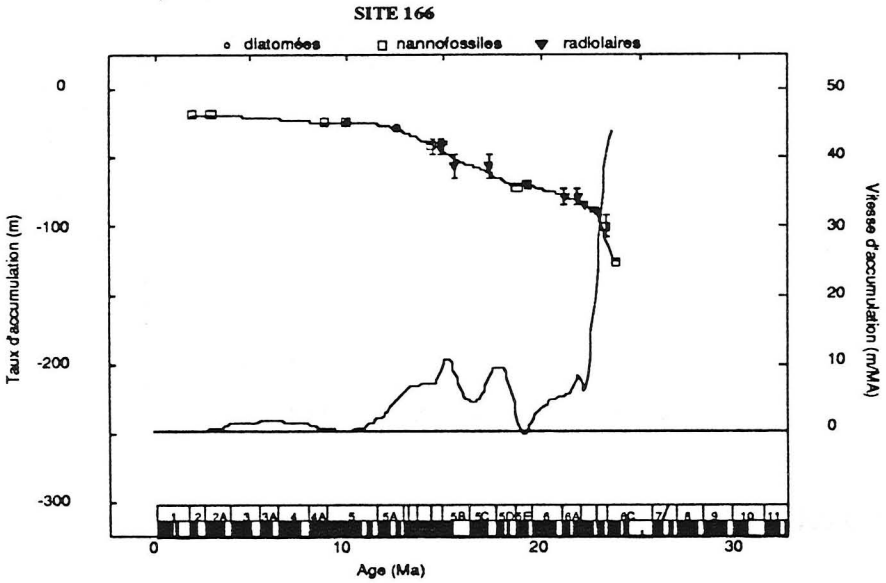
SITE 155



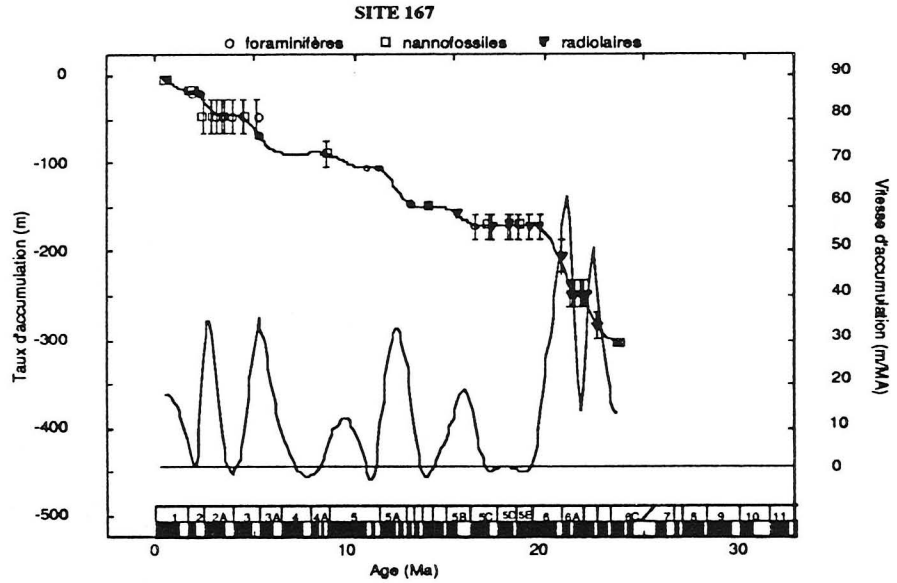
SITE 158



SITE 166

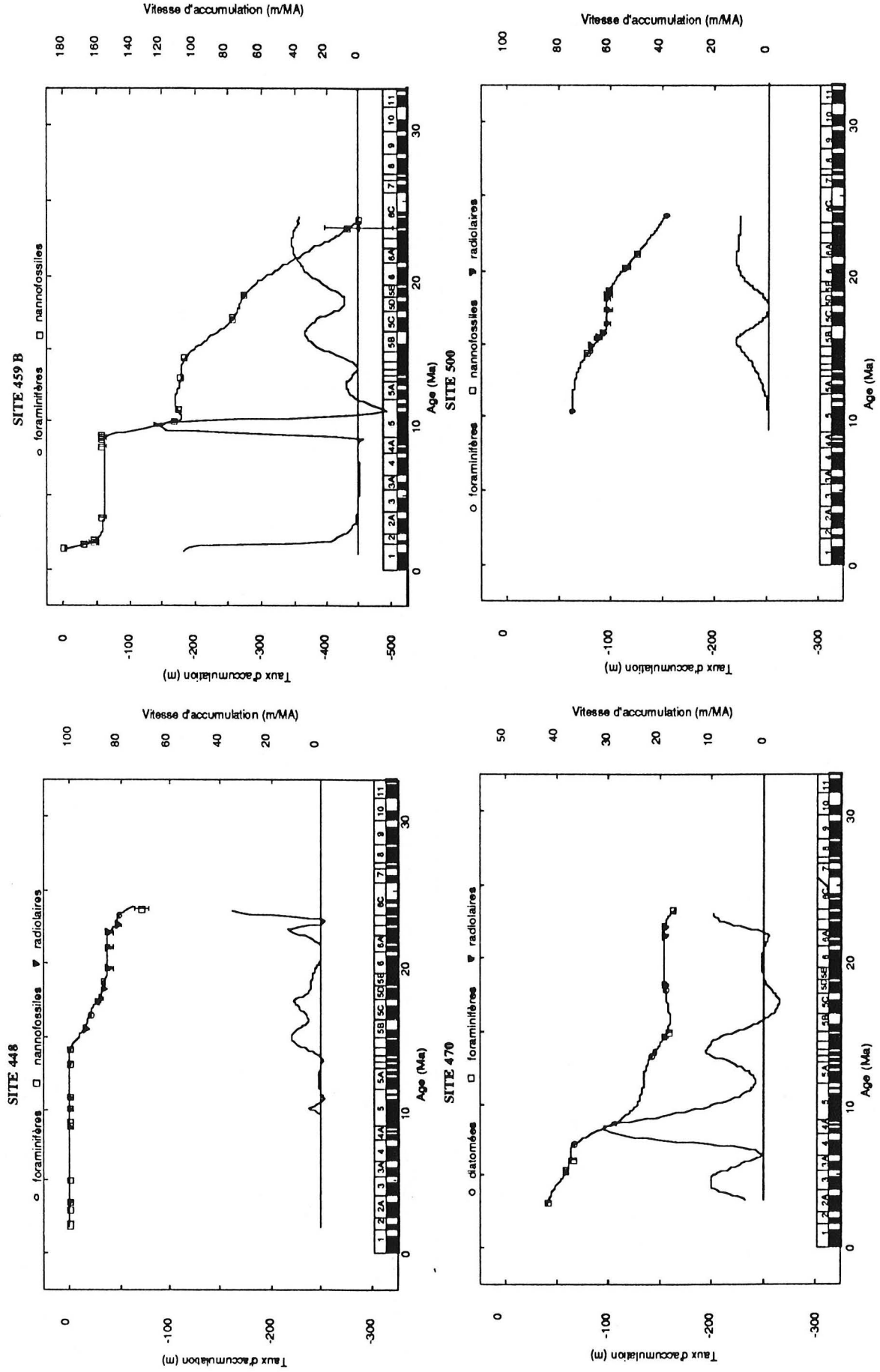


SITE 167

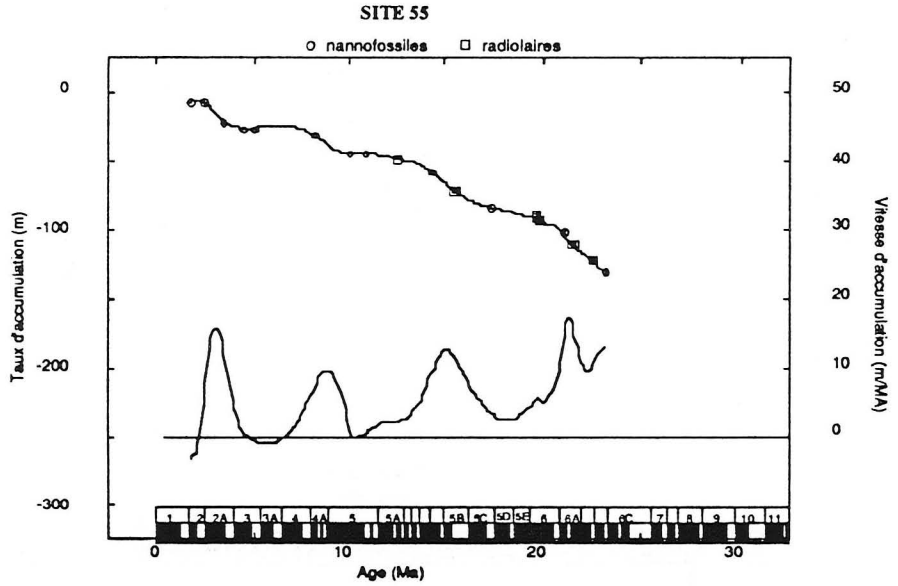


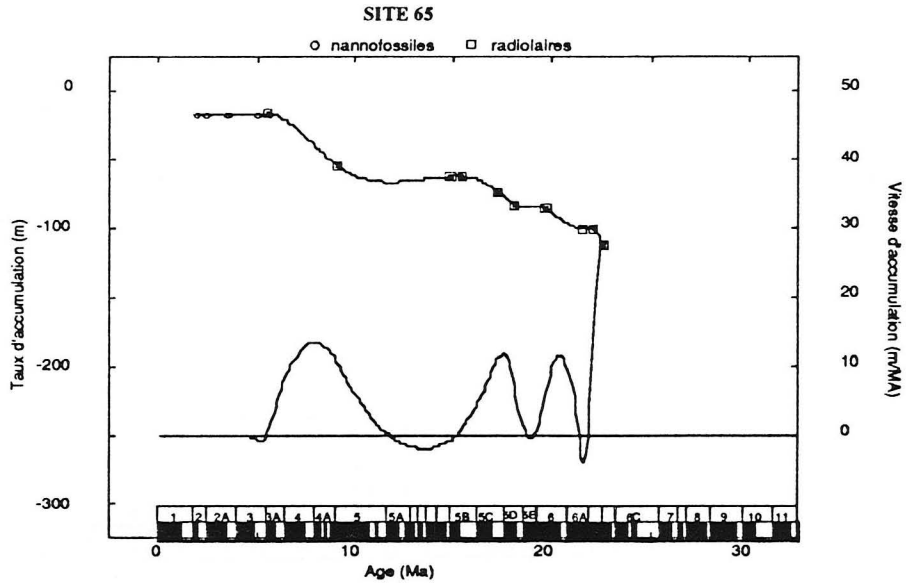
UNIVERSITÉ DE LYON I * C.S.T. GÉOLOGIE

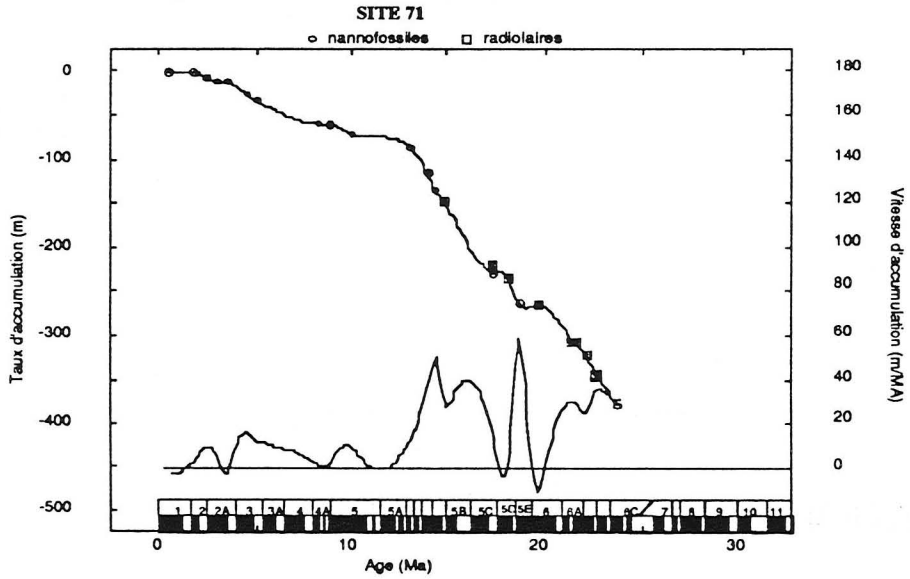
PACIFIQUE NORD

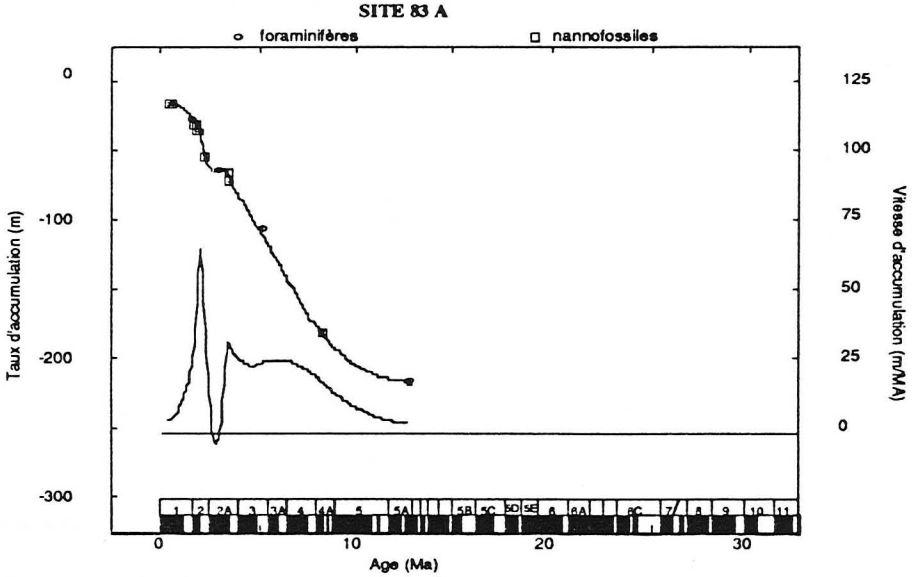


PACIFIQUE NORD

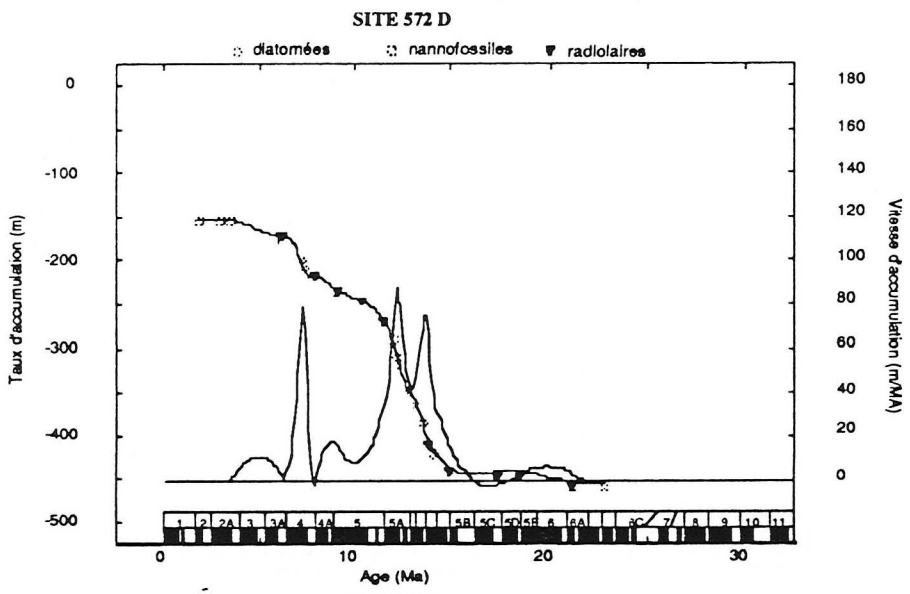


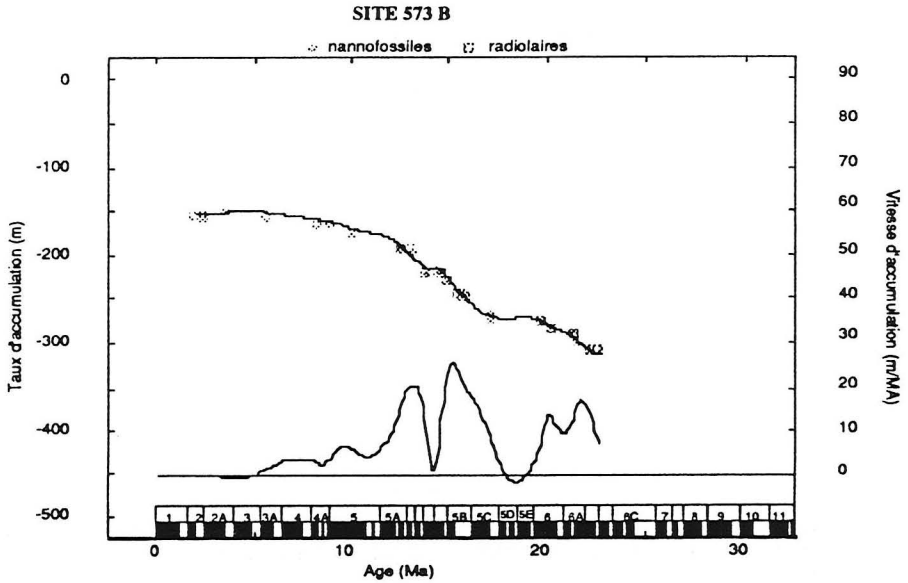


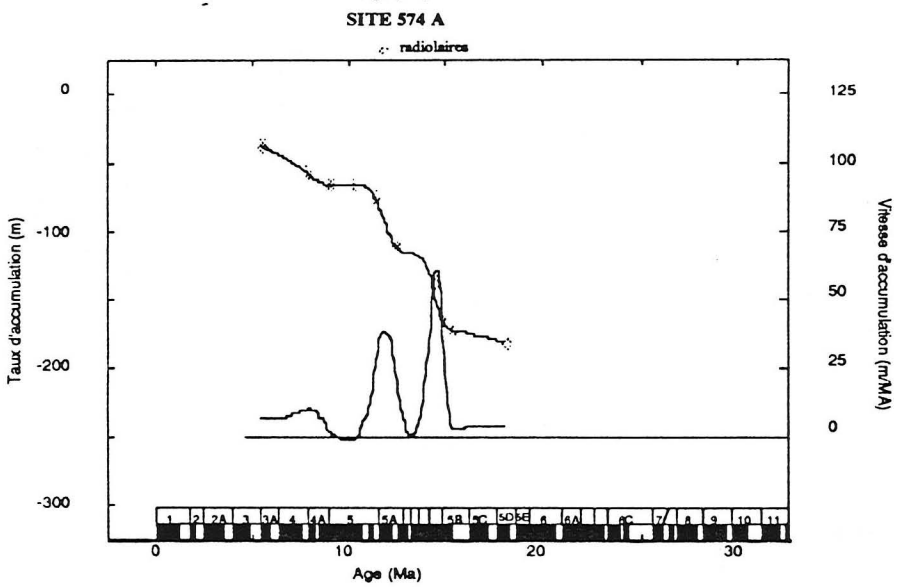


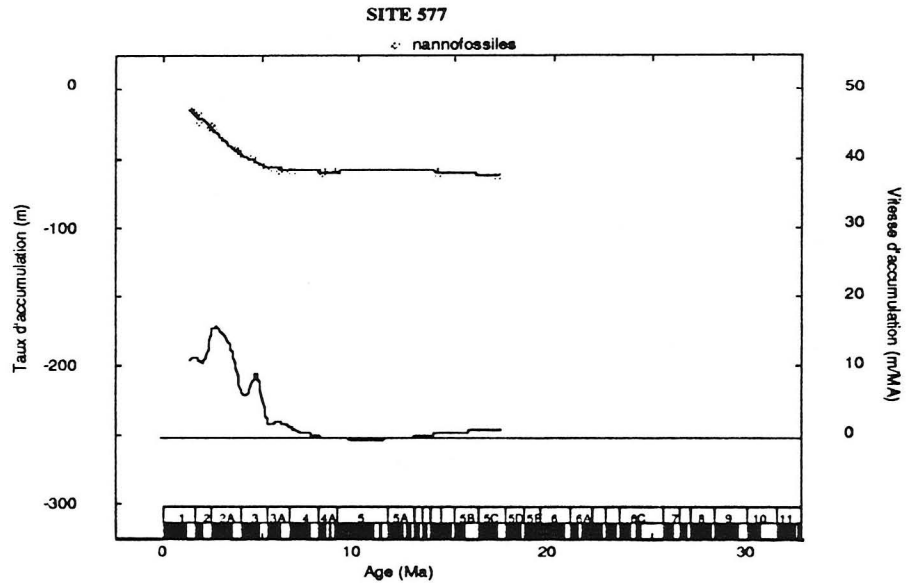


PACIFIQUE NORD

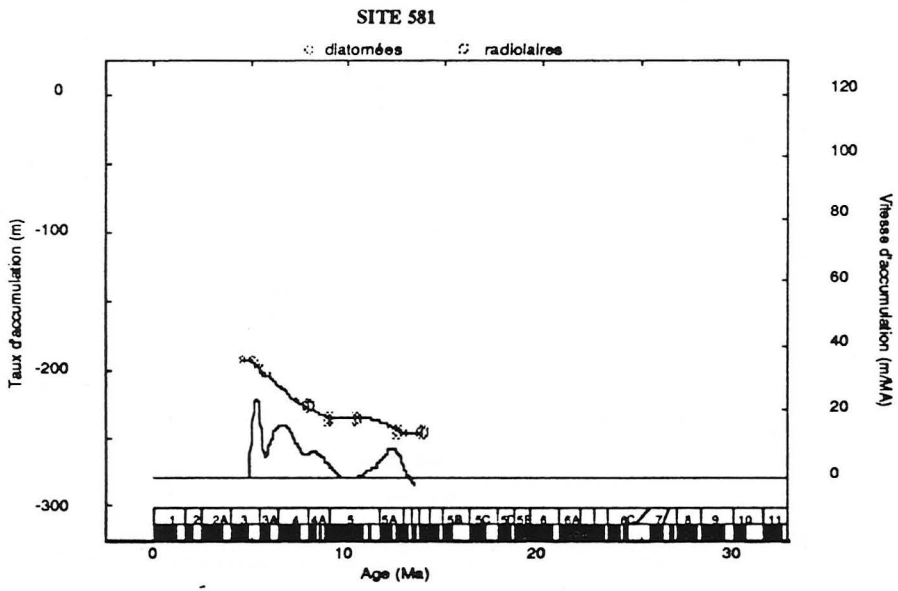


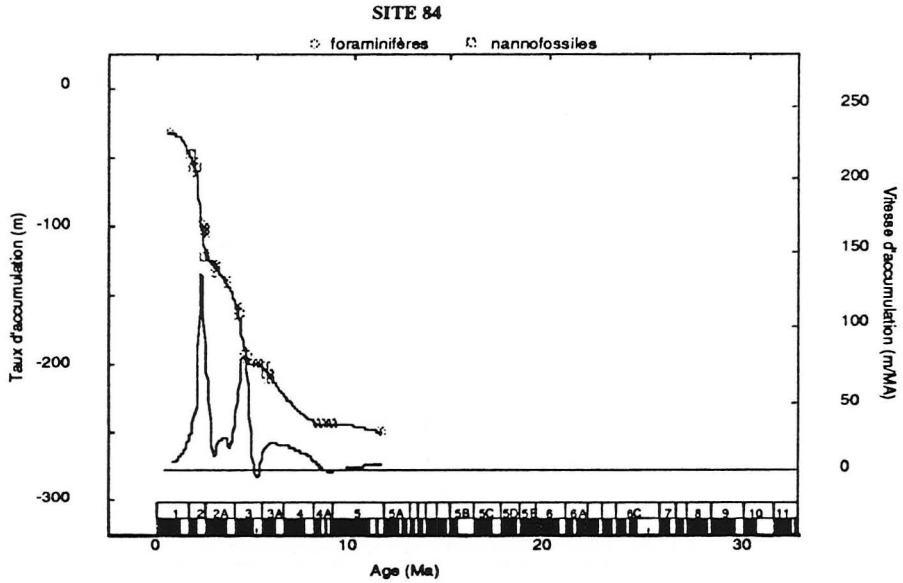




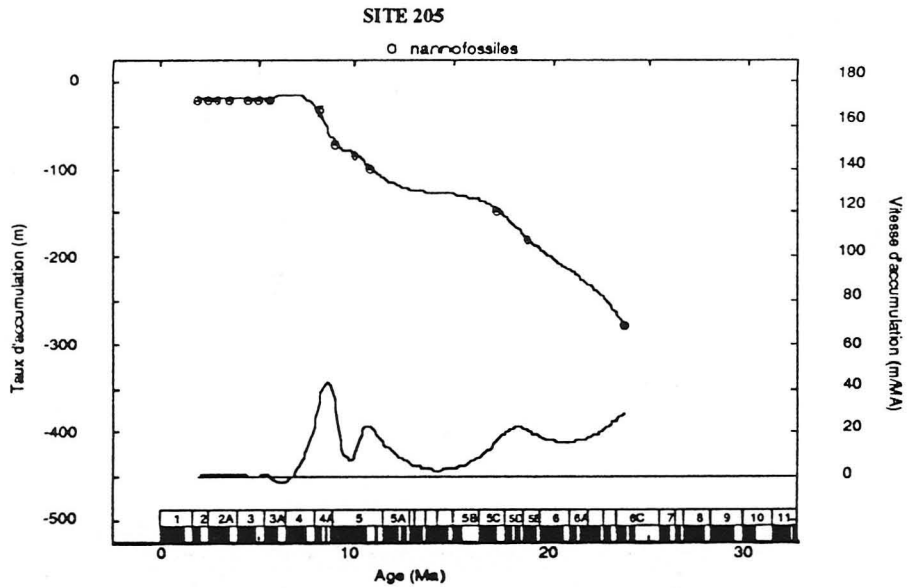


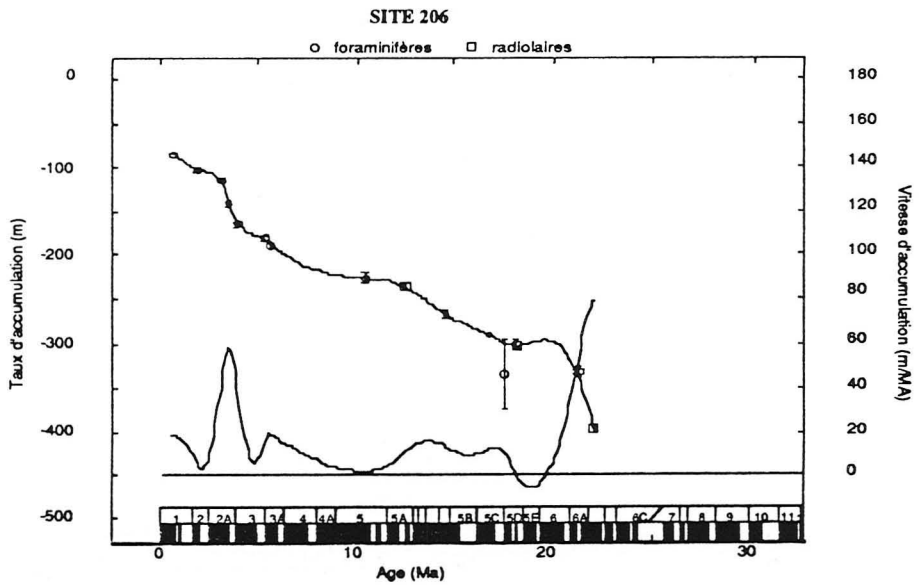
PACIFIQUE NORD

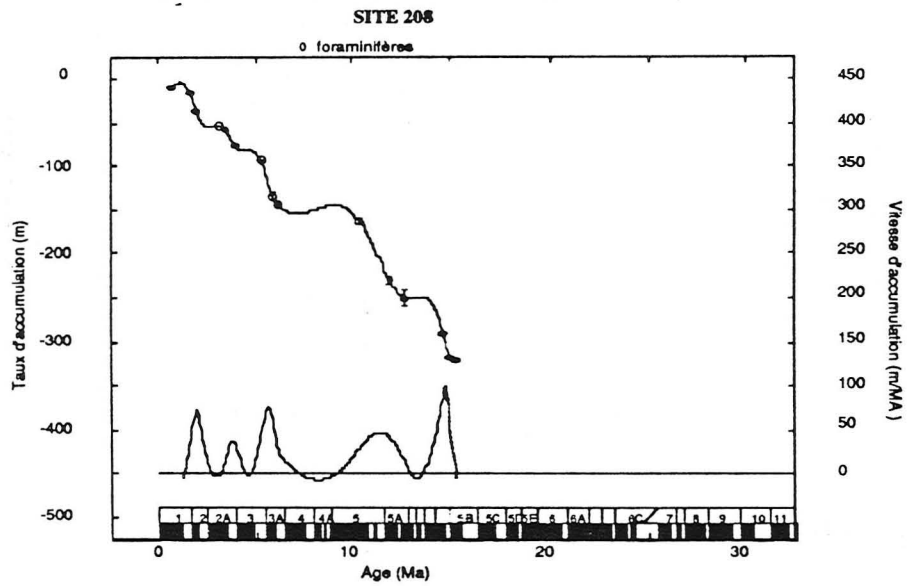


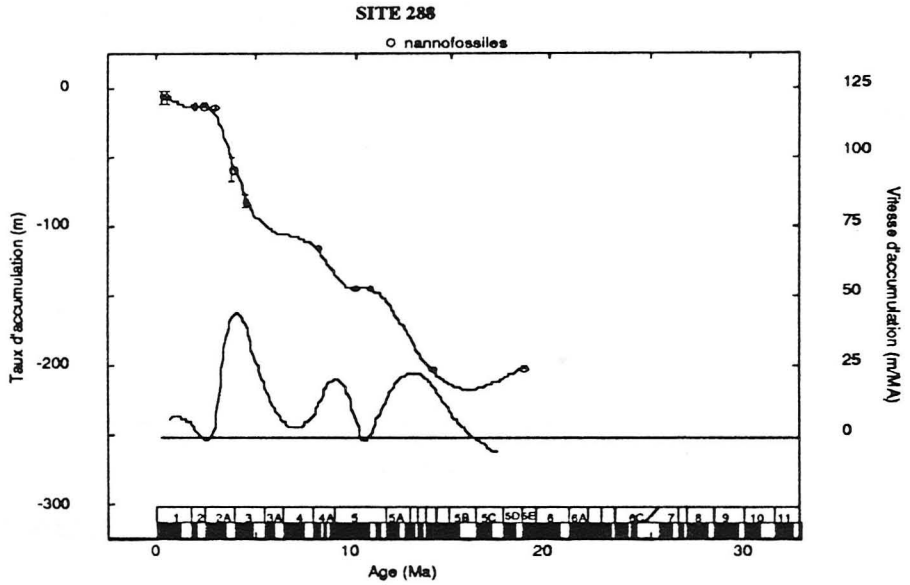


PACIFIQUE SUD

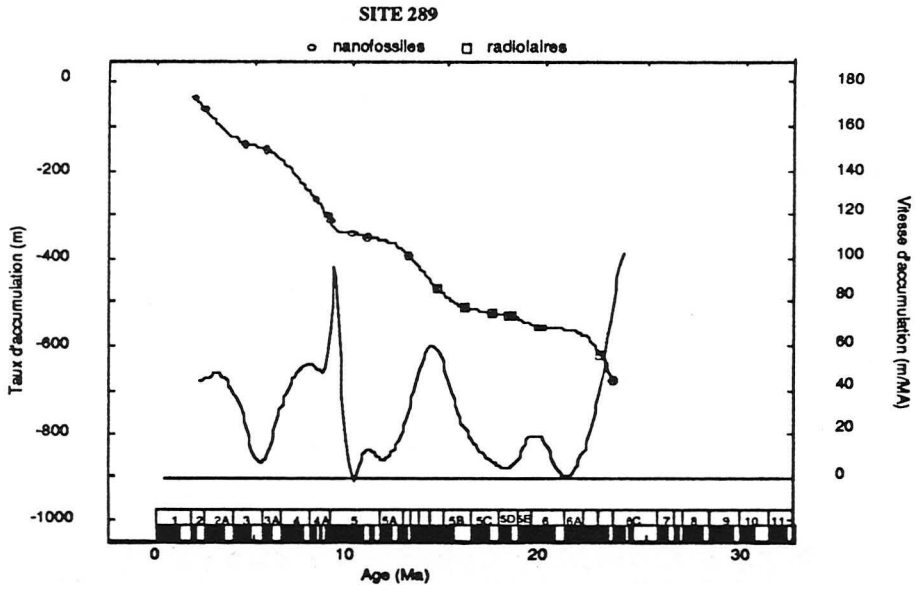


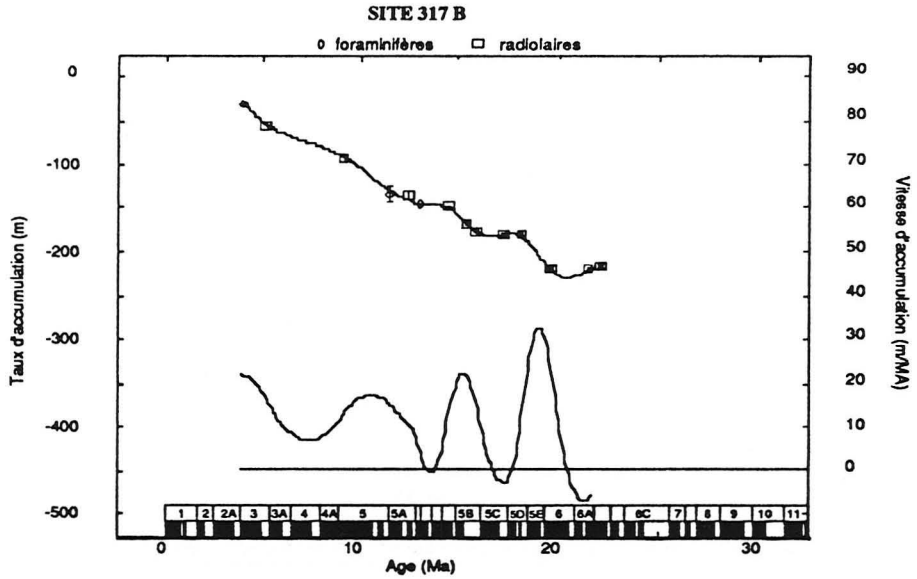


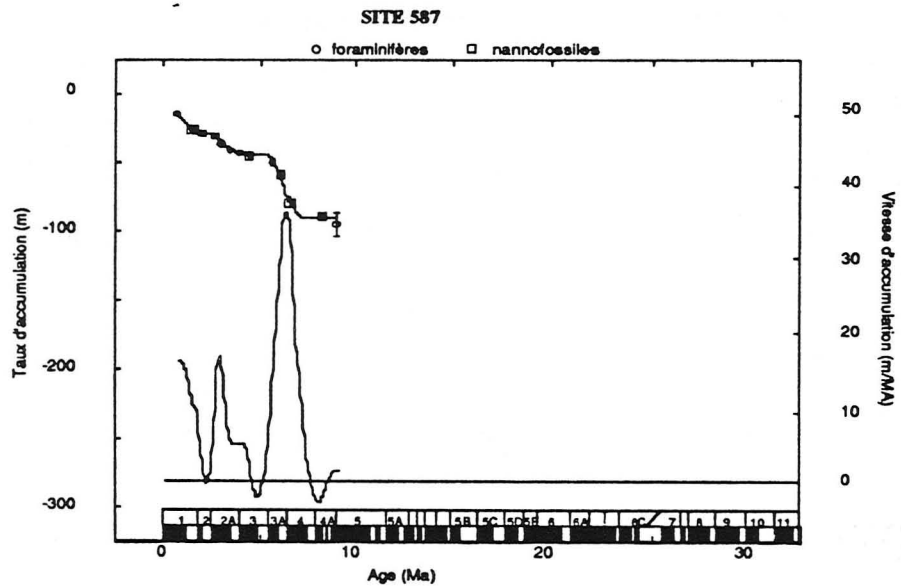


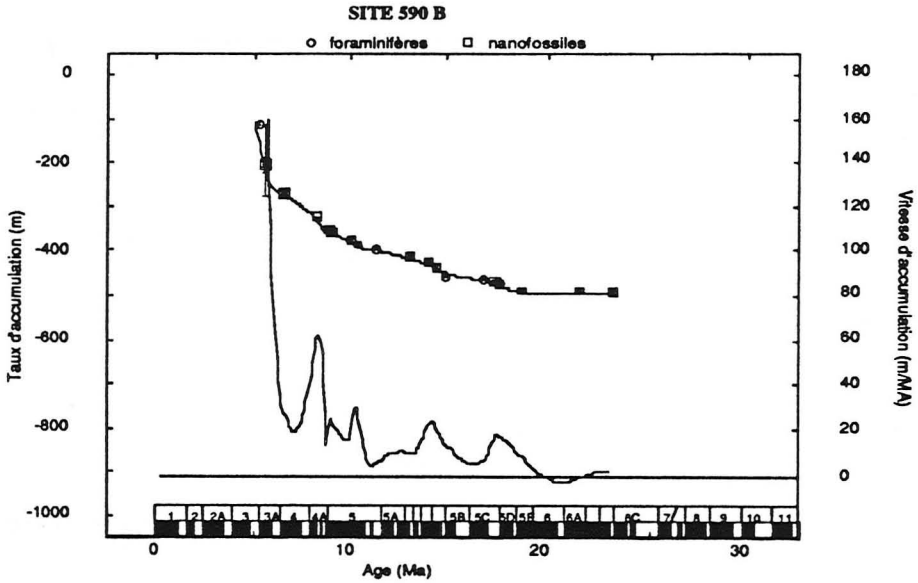


PACIFIQUE SUD

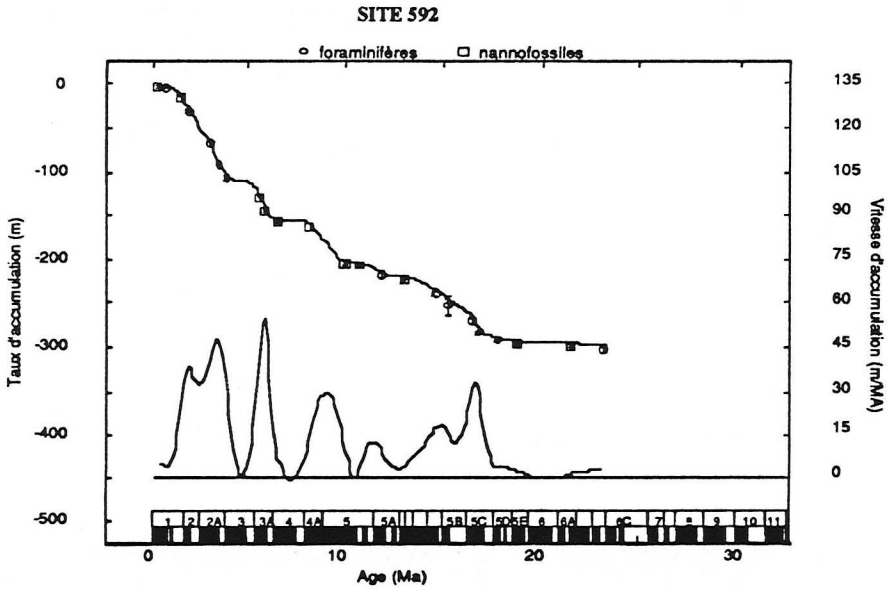


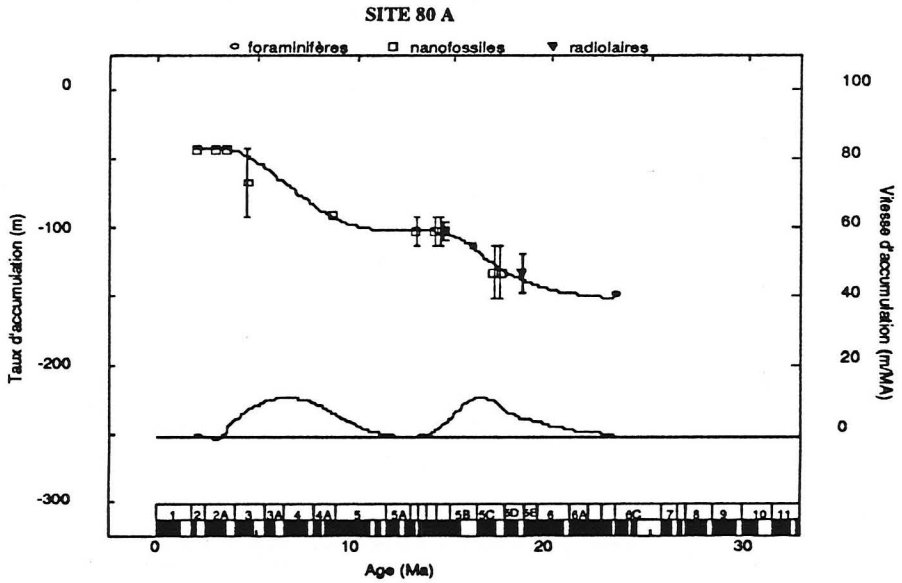




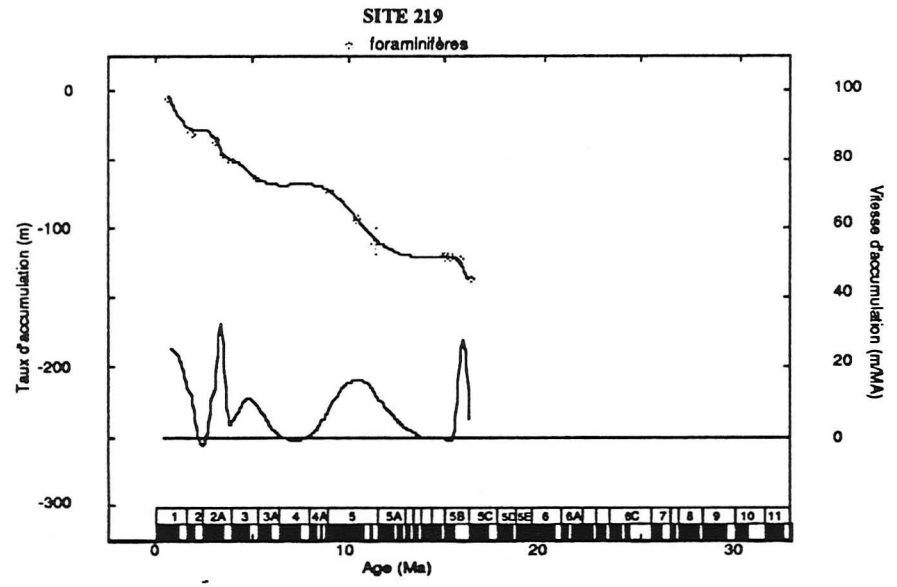


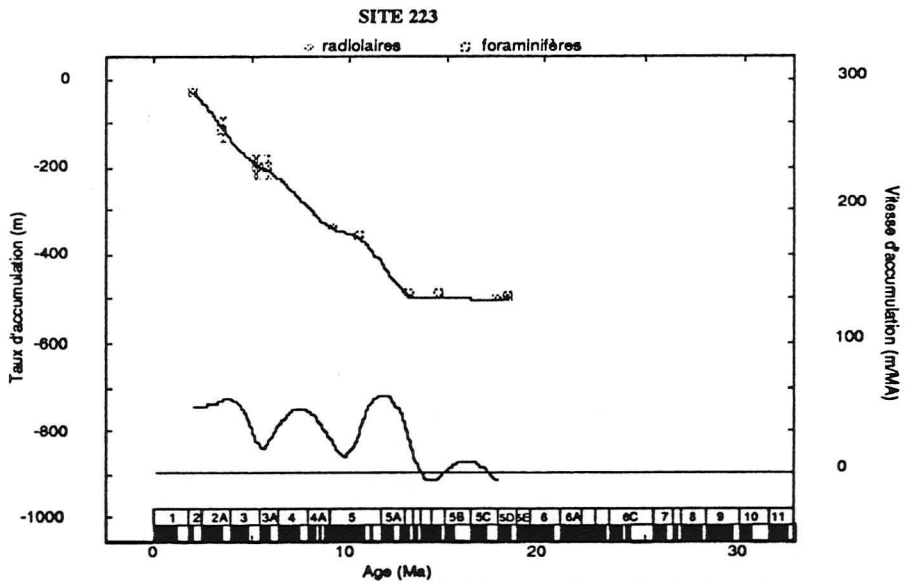
PACIFIQUE SUD

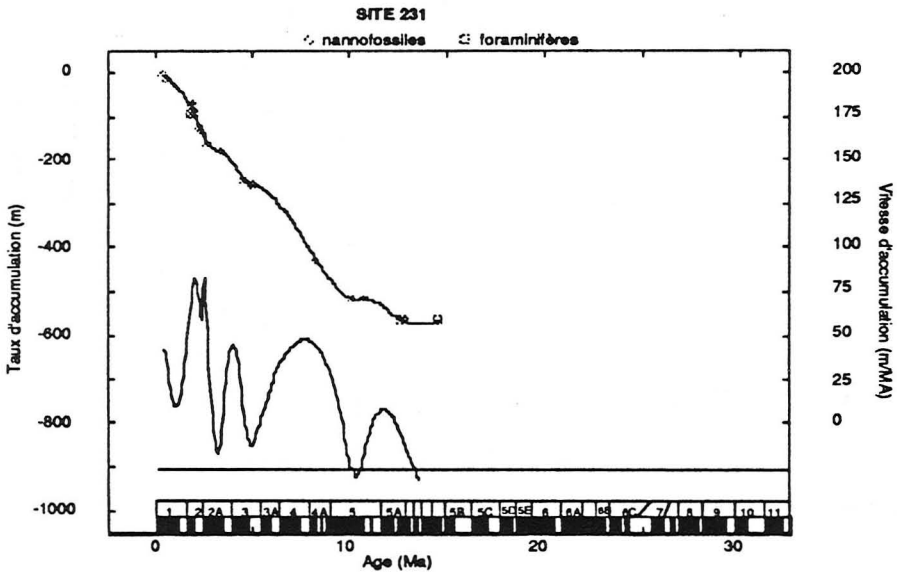


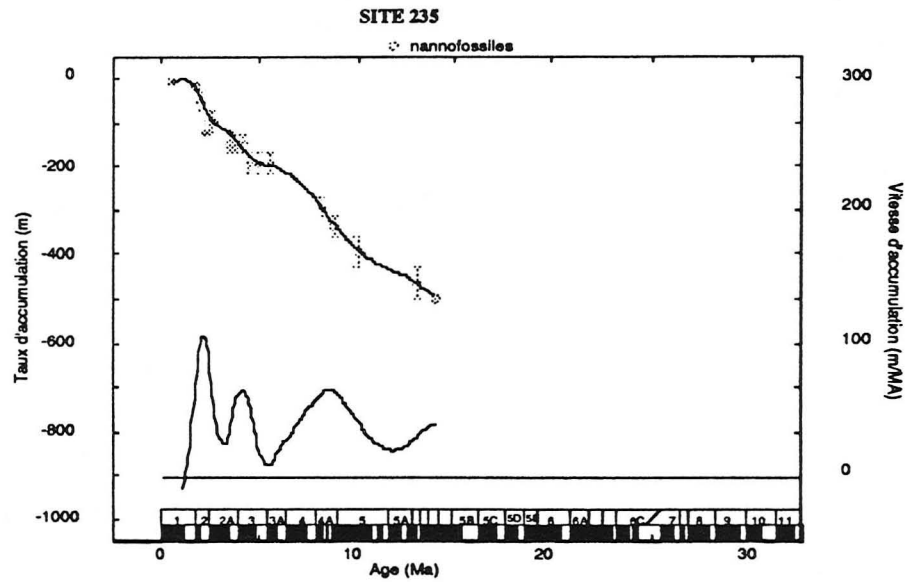


OCEAN INDIEN

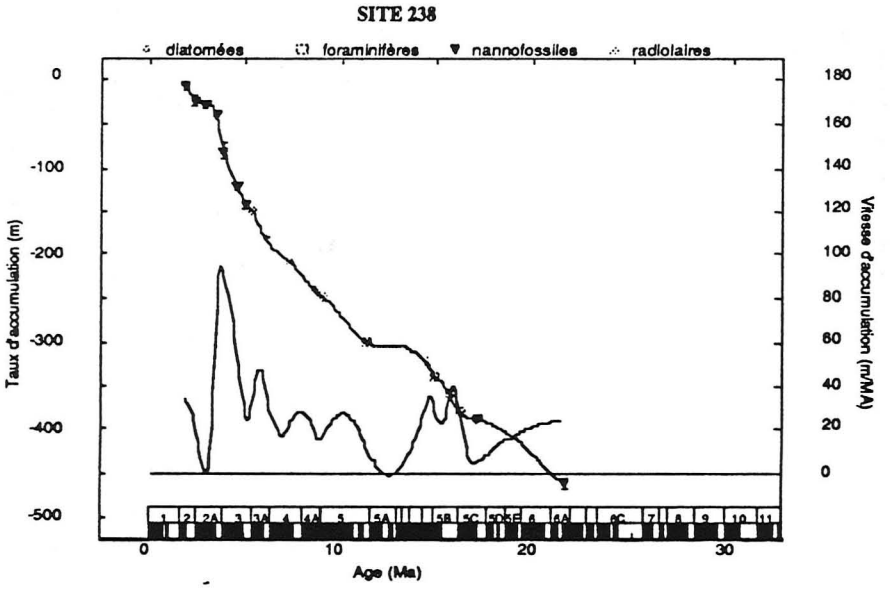


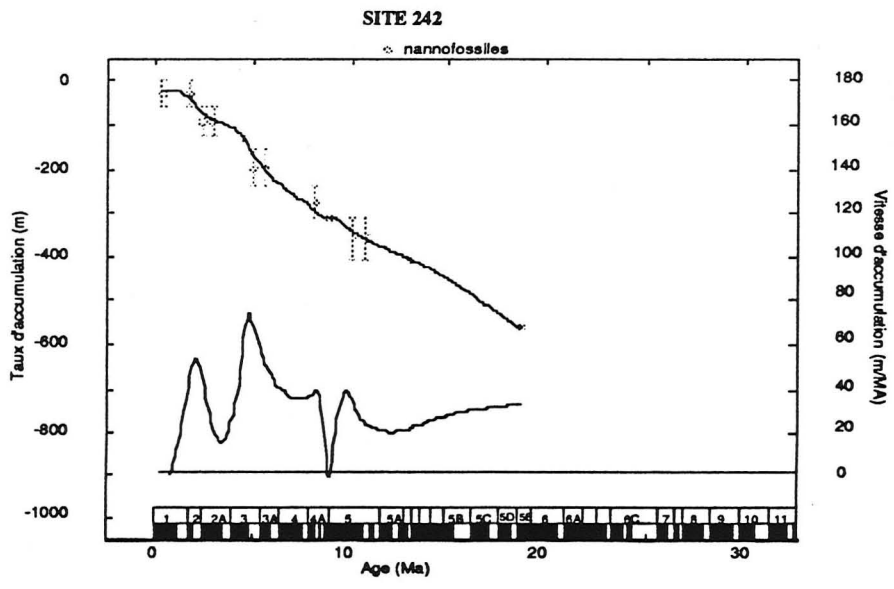


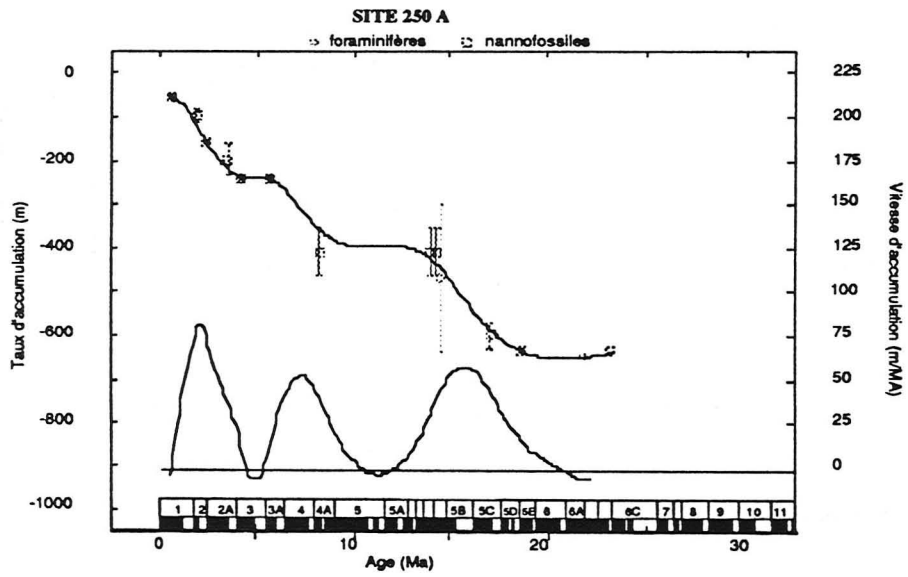


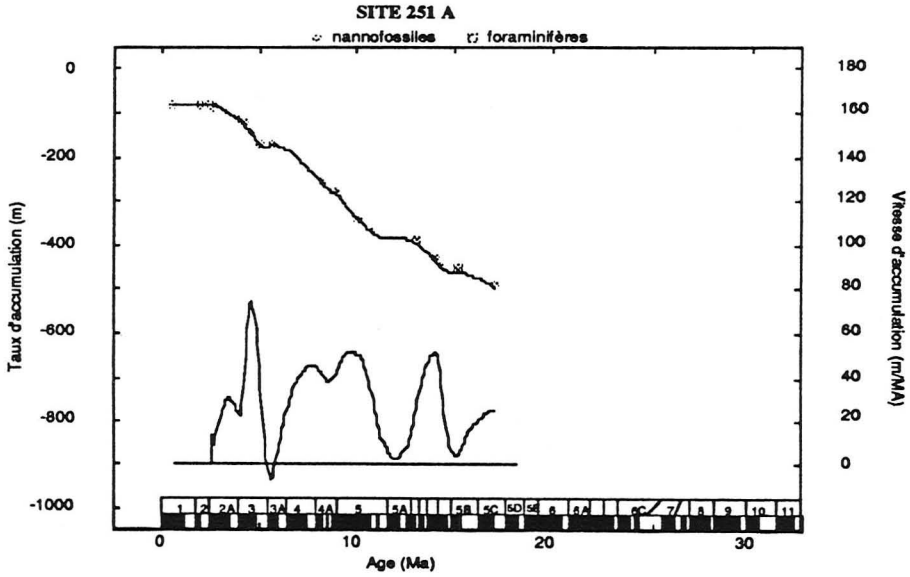


OCEAN INDIEN

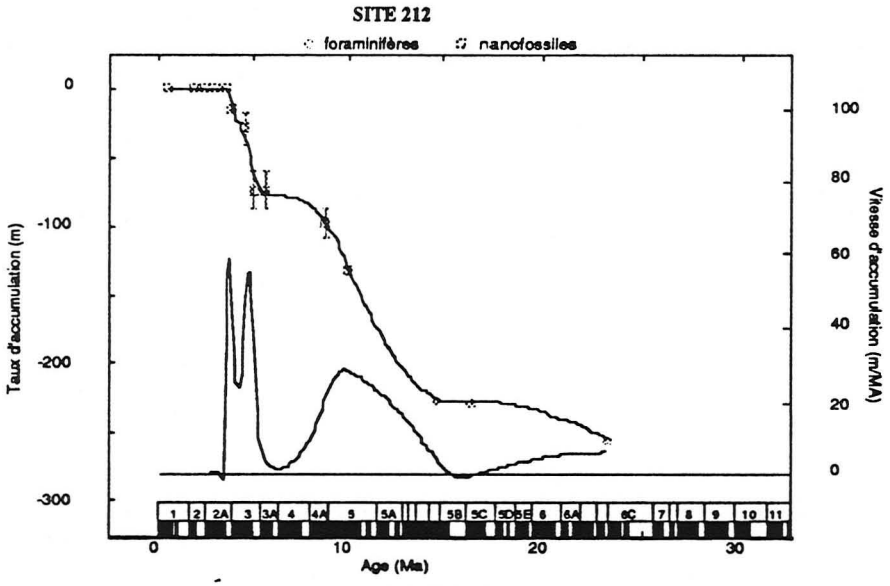


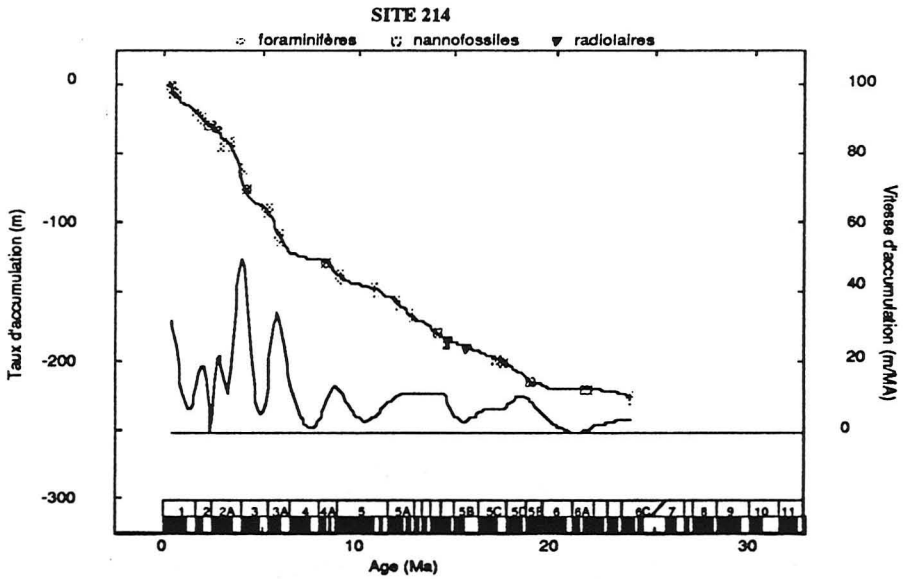


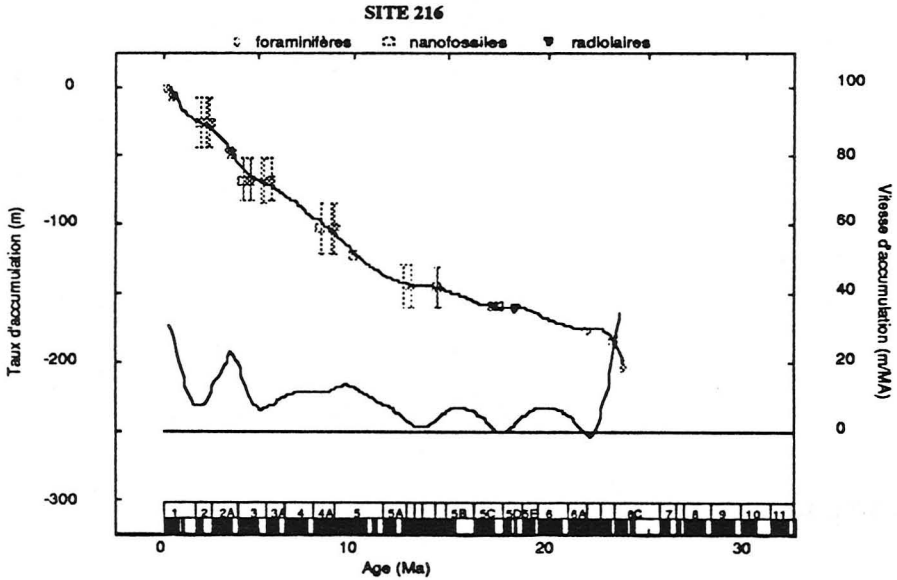


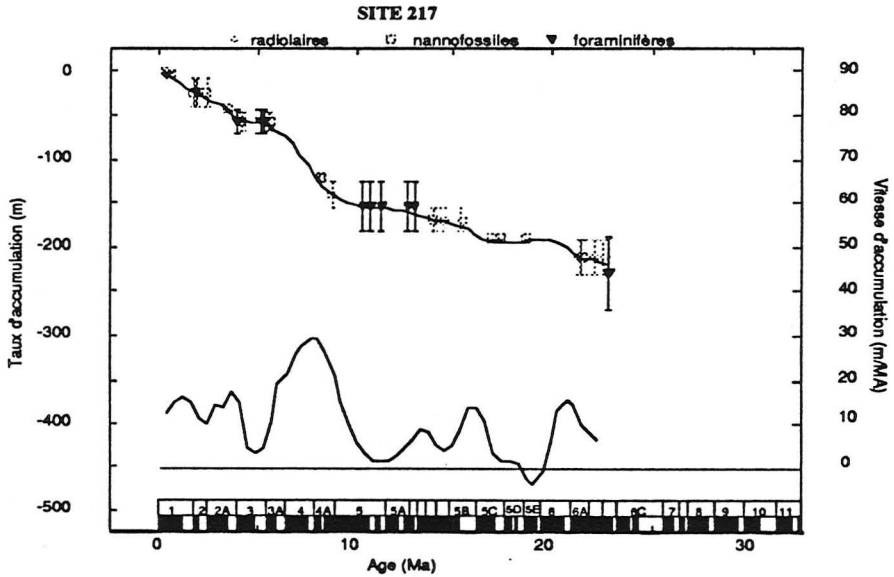


OCEAN INDIEN

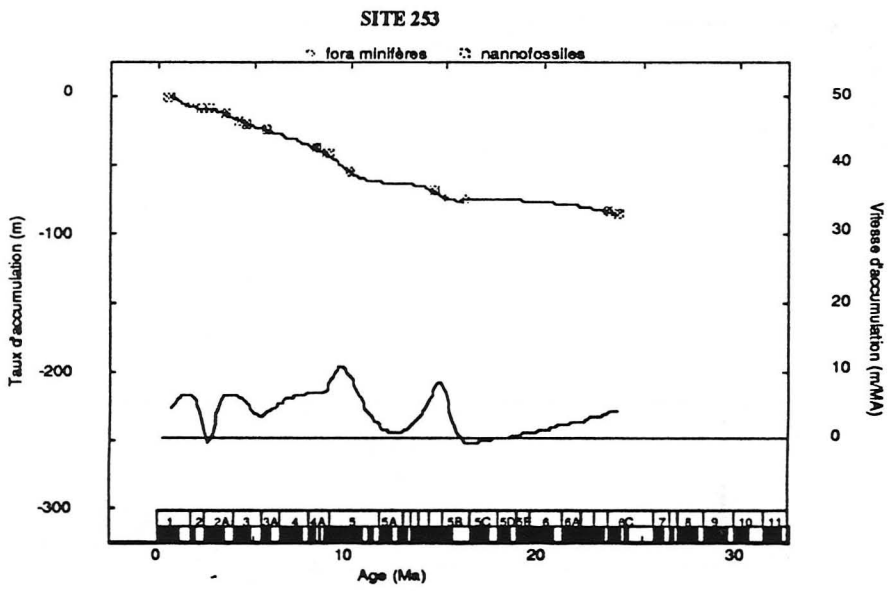


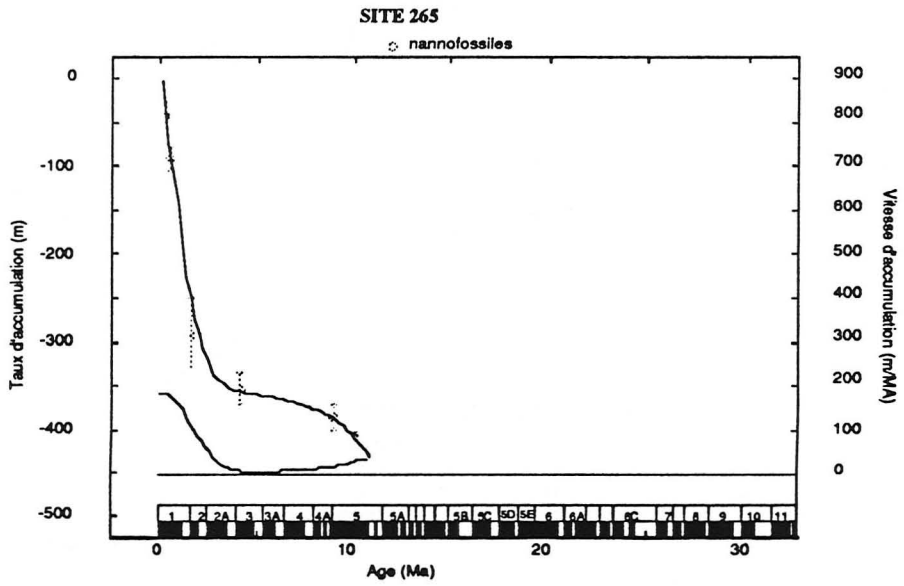






OCEAN INDIEN

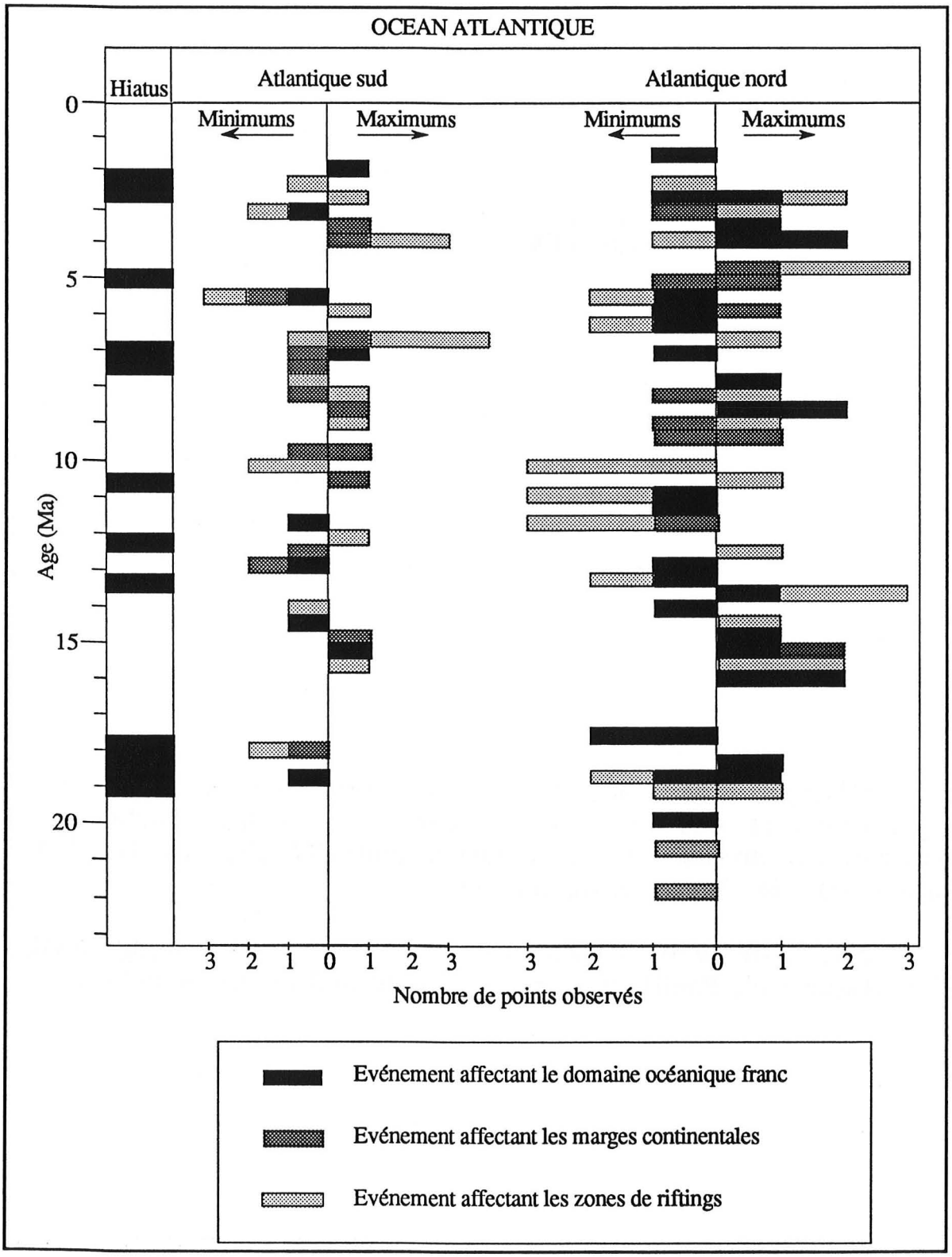




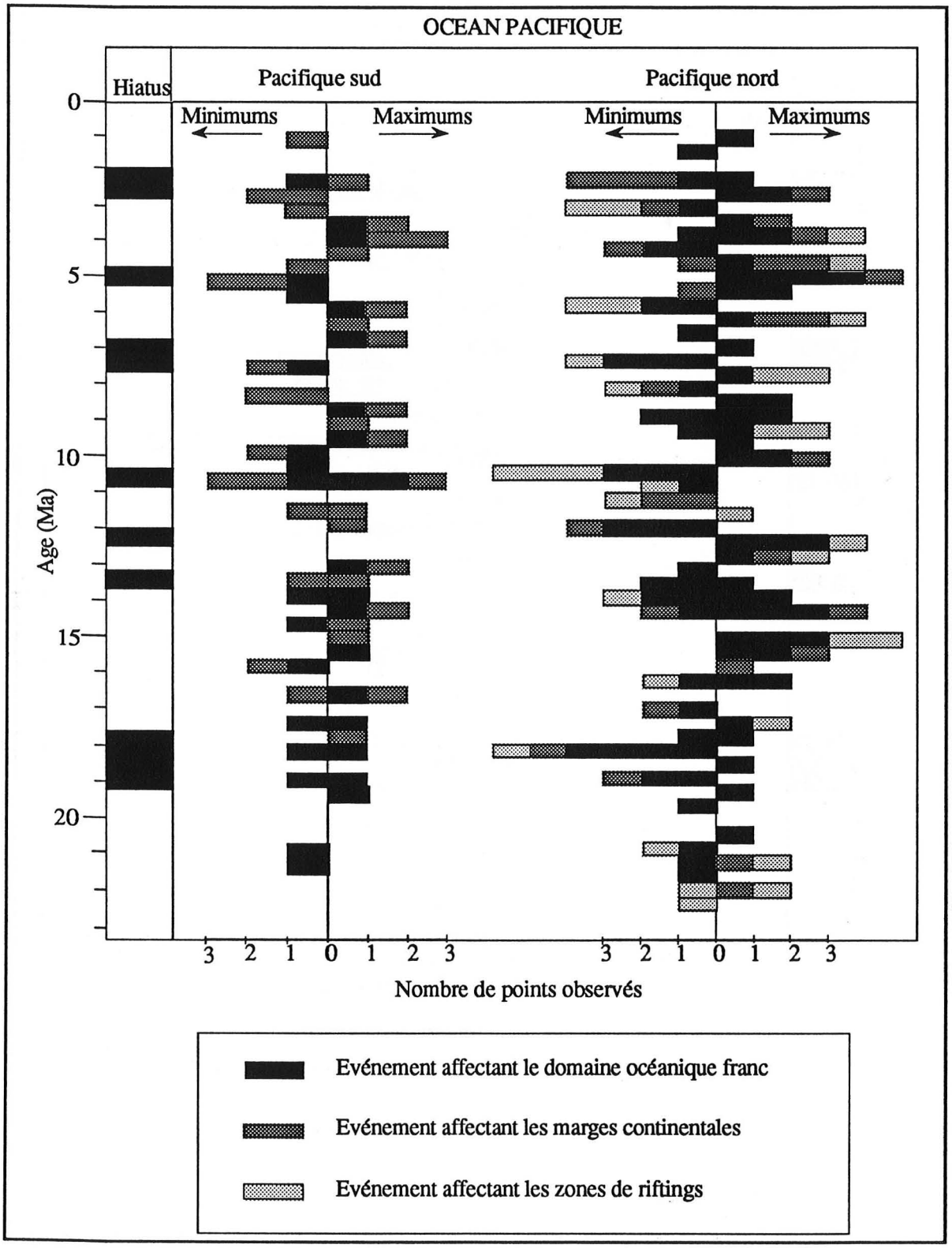
ANNEXE B.

Histogrammes des fréquences tous les 0,4 Ma des maximums et des minimums observés dans les courbes des vitesses instantanées d'accumulation pour 74 sites du D.S.D.P. situés dans les 3 océans du monde.

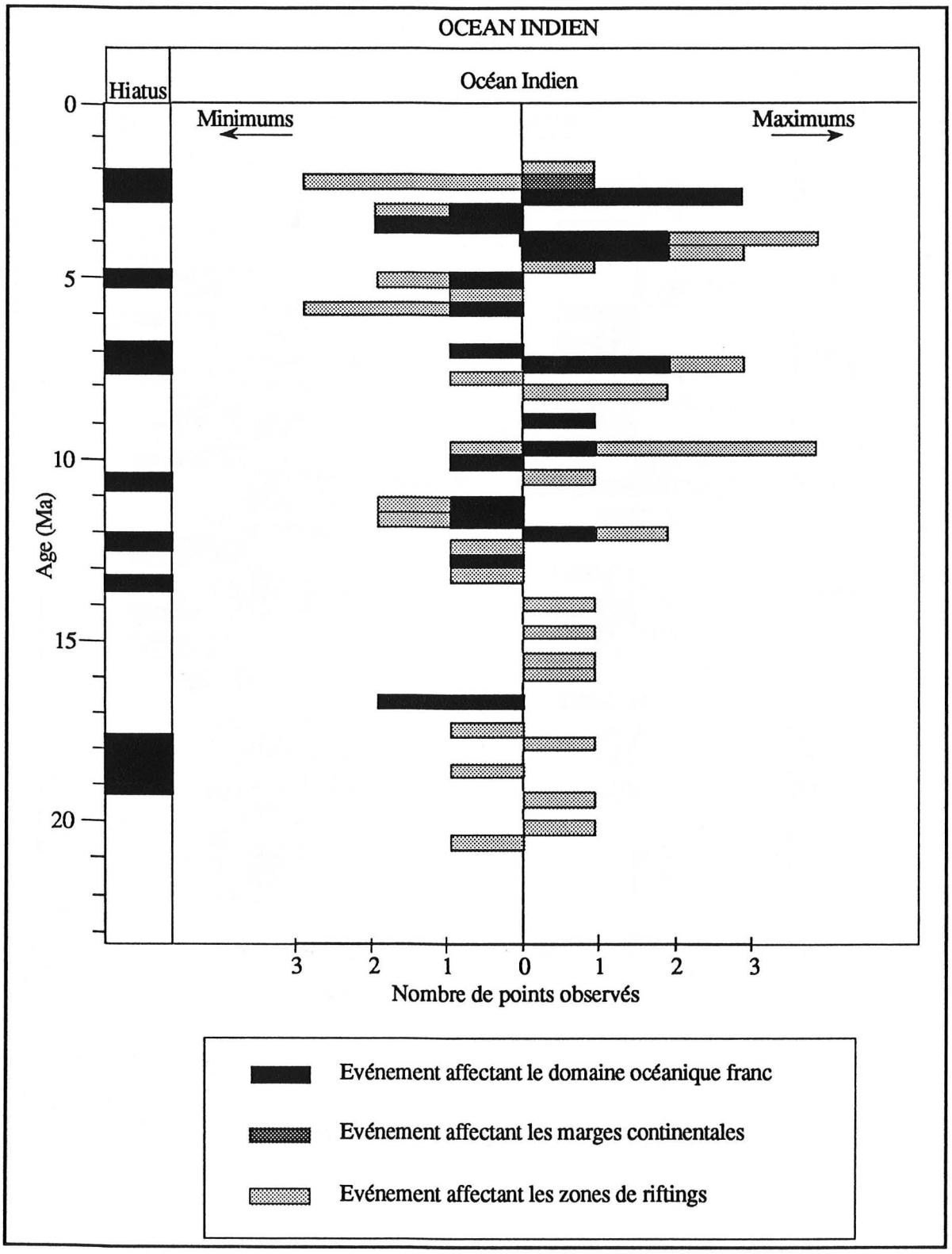
Nous effectuons ici une distinction entre Atlantique nord, Atlantique sud, Pacifique nord, Pacifique sud et océan Indien.



Histogramme des fréquences des maximums et des minimums pour l'Atlantique sud et l'Atlantique nord.



Histogramme des fréquences des maximums et des minimums pour le Pacifique sud et le Pacifique nord.

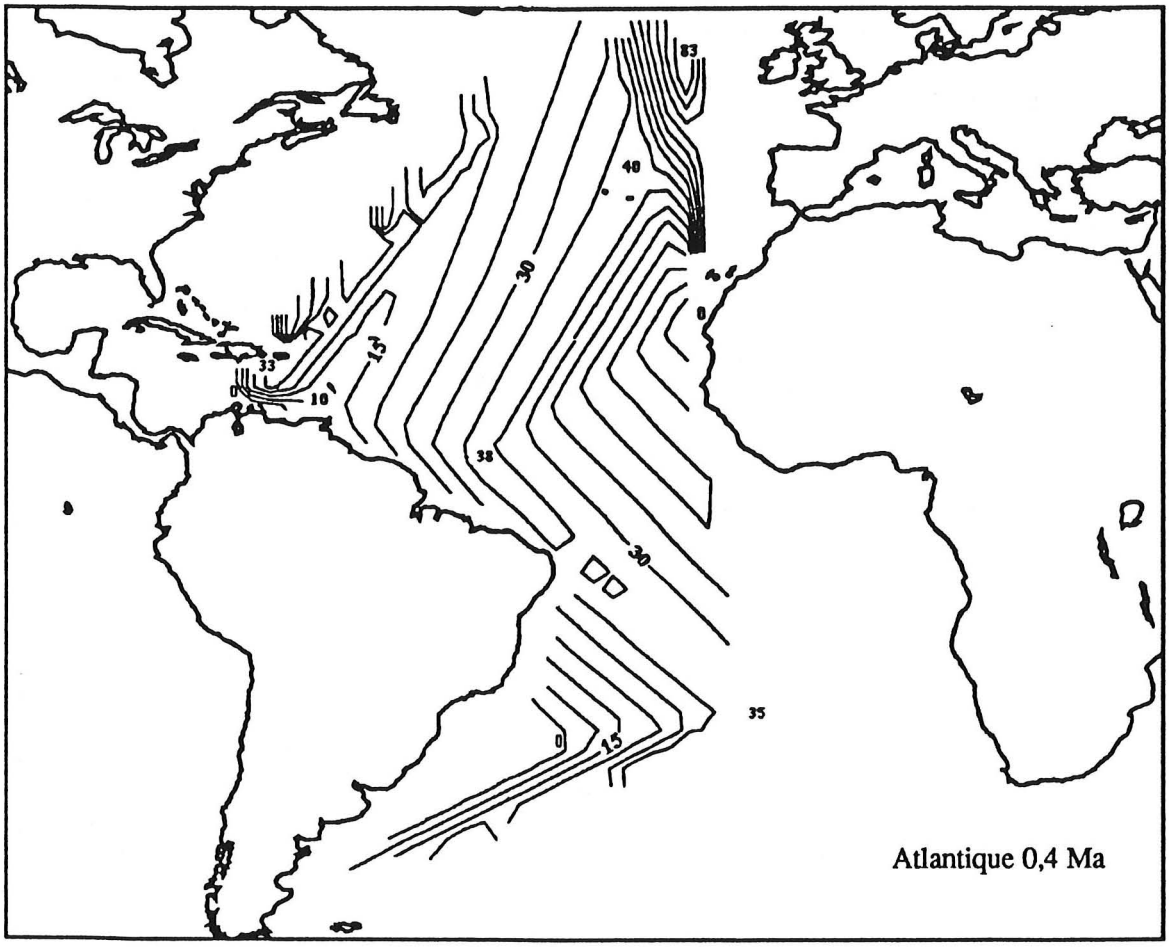


Histogramme des fréquences des maximums et des minimums pour l'océan Indien.

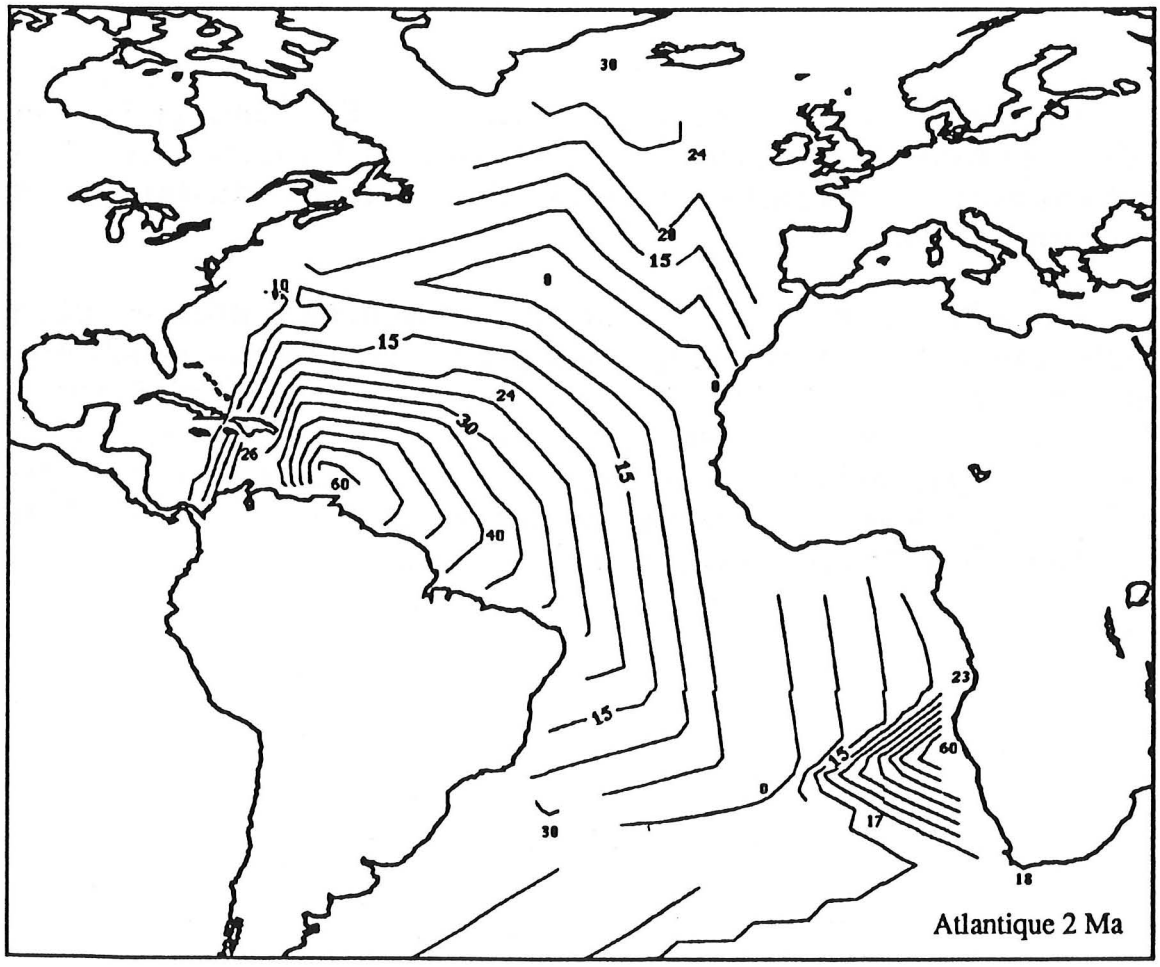
ANNEXE C.

Cartes d'isopaques dans l'Atlantique, le Pacifique et l'océan Indien durant le Néogène. Les contours délimitent des aires géographiques d'égales valeurs de vitesses instantanées d'accumulation.

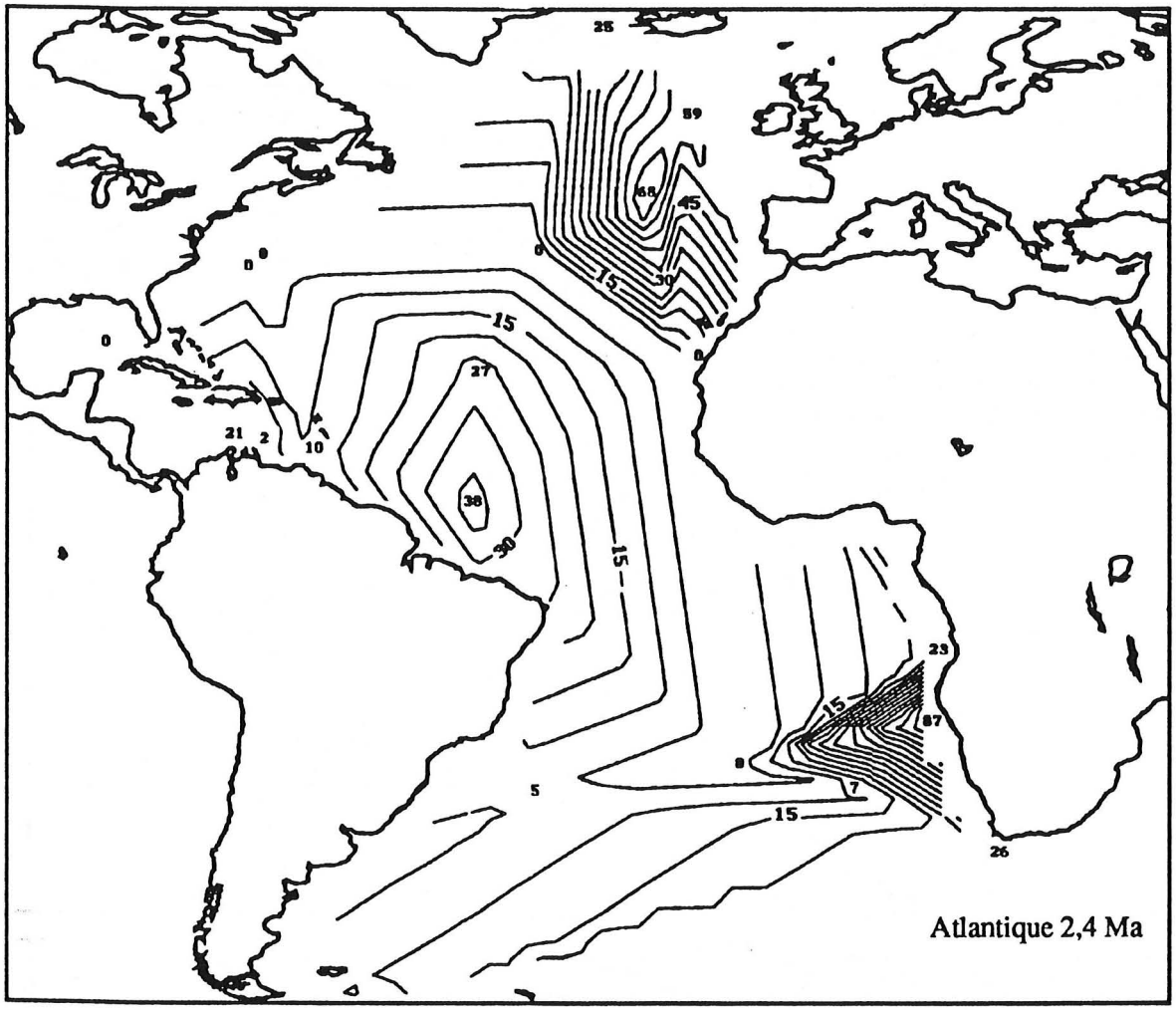
De par la méthode même de contourage utilisée dans l'élaboration des cartes d'isopaques présentées dans cette annexe, les contours d'égales valeurs de vitesses instantanées d'accumulation ne tiennent pas compte du relief des fonds marins, en particulier dans la région des dorsales océaniques. De ce fait, les valeurs des vitesses instantanées d'accumulation dans ces zones doivent être considérées avec beaucoup de précautions.

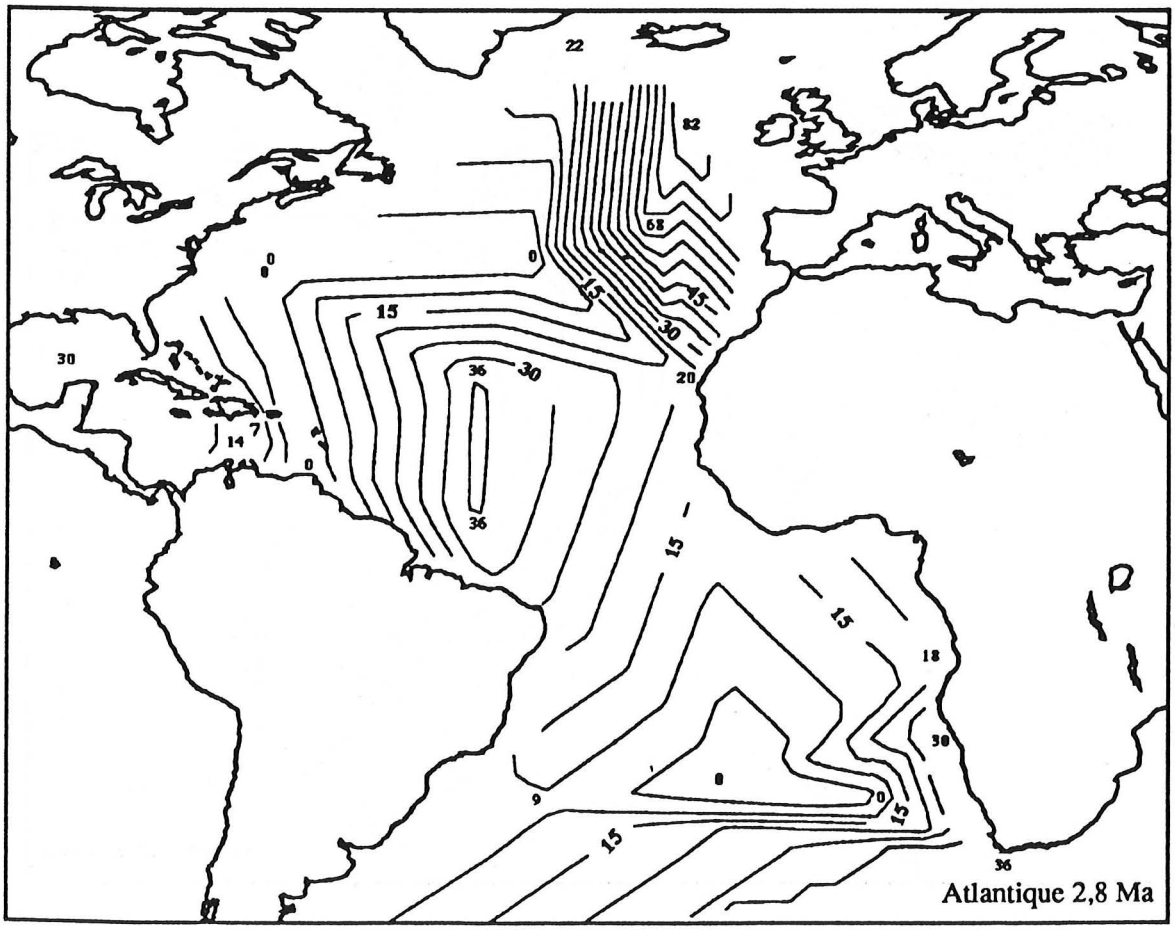


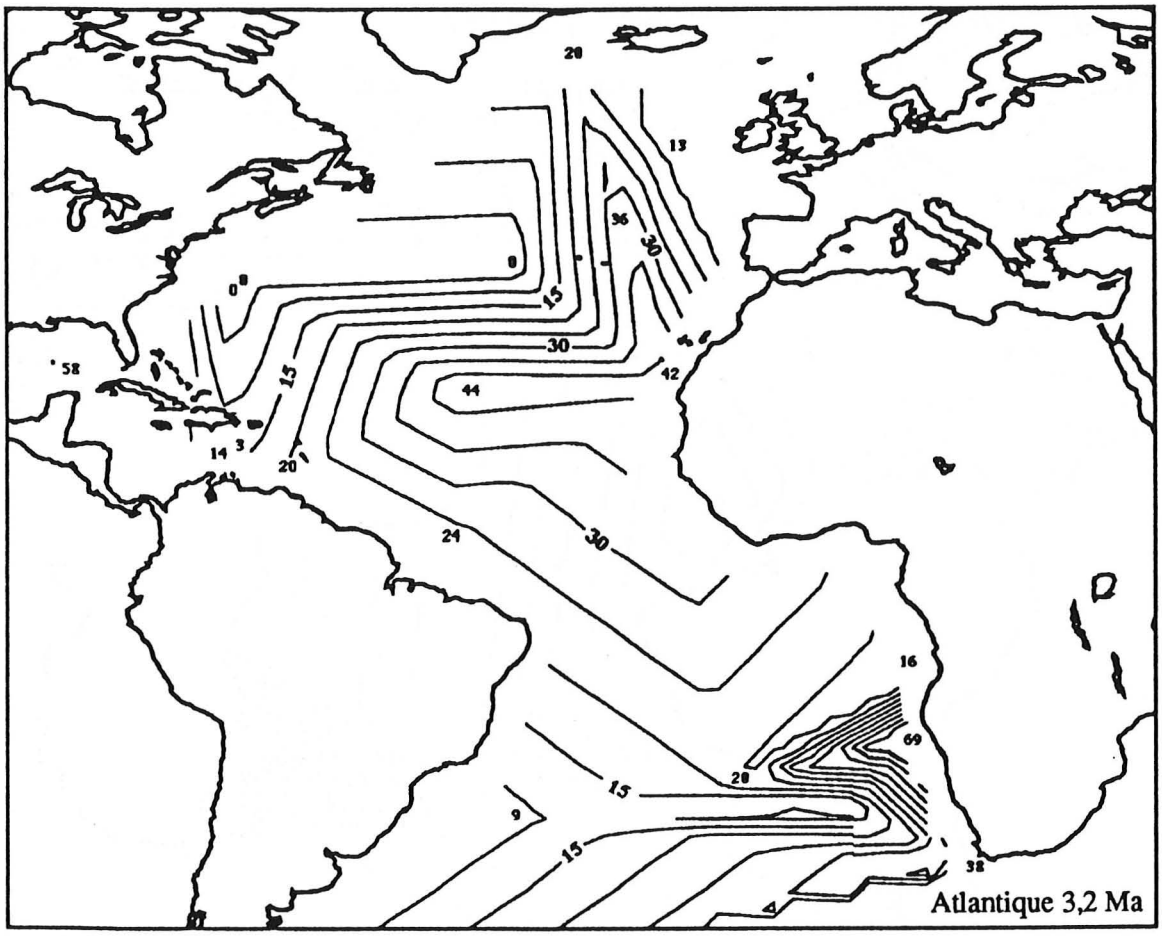
Atlantique 0,4 Ma

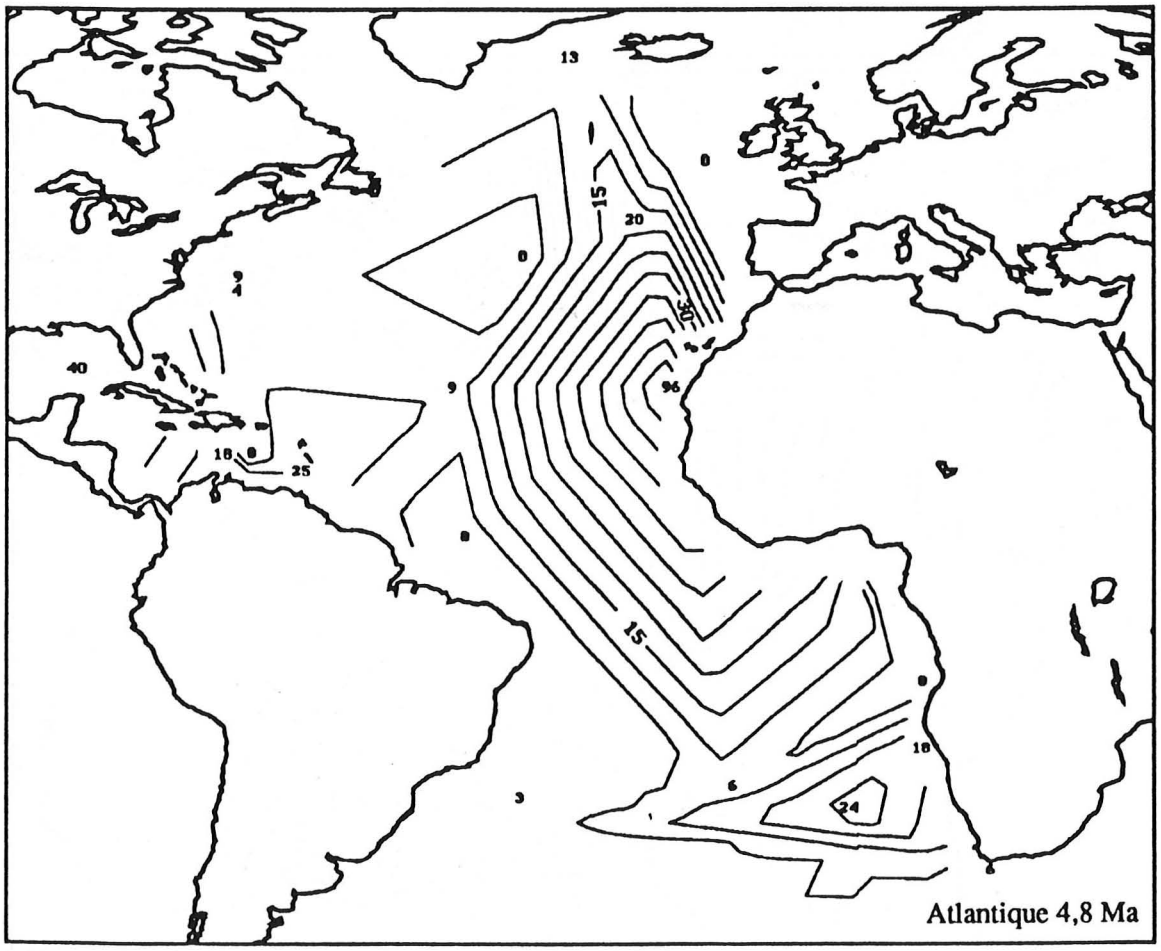


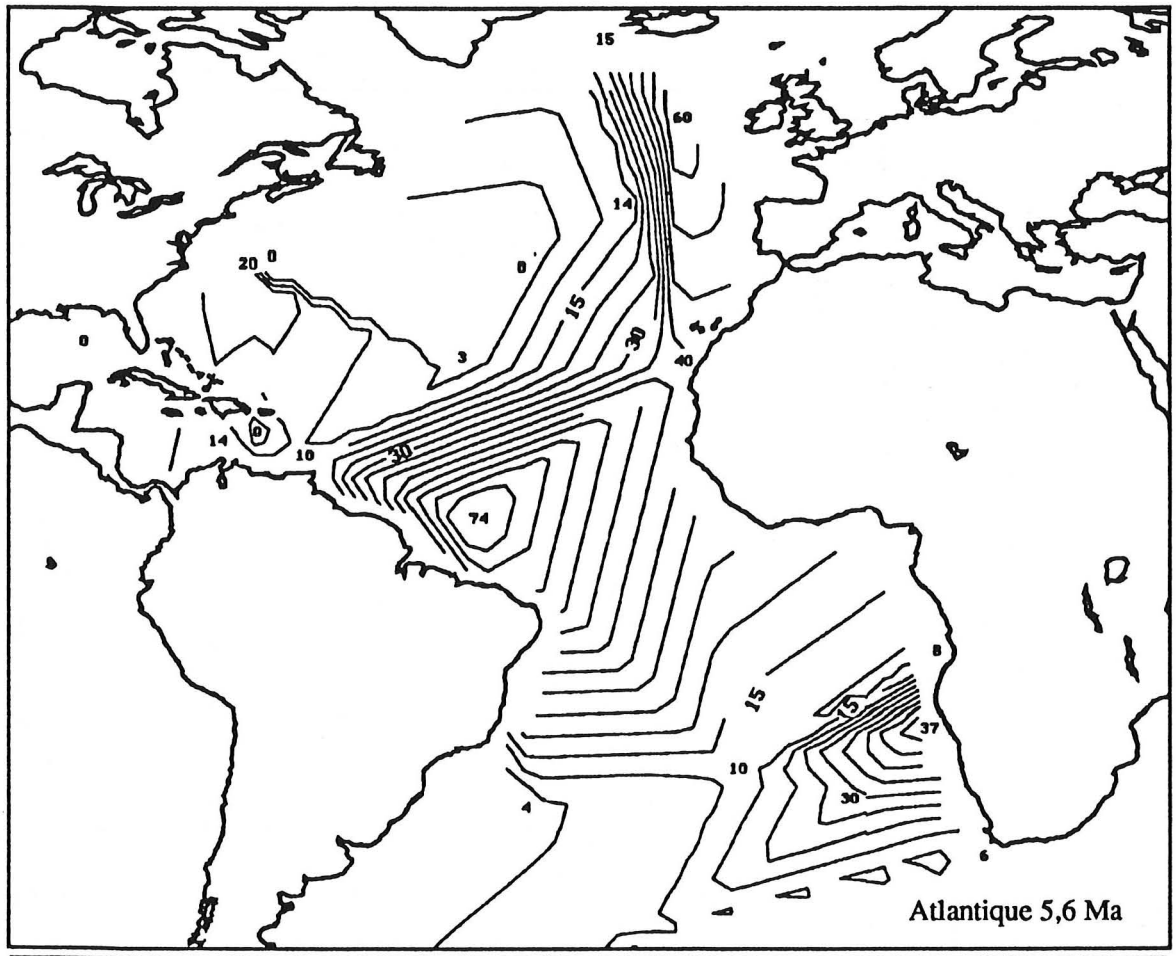
Atlantique 2 Ma


Atlantique 2,4 Ma

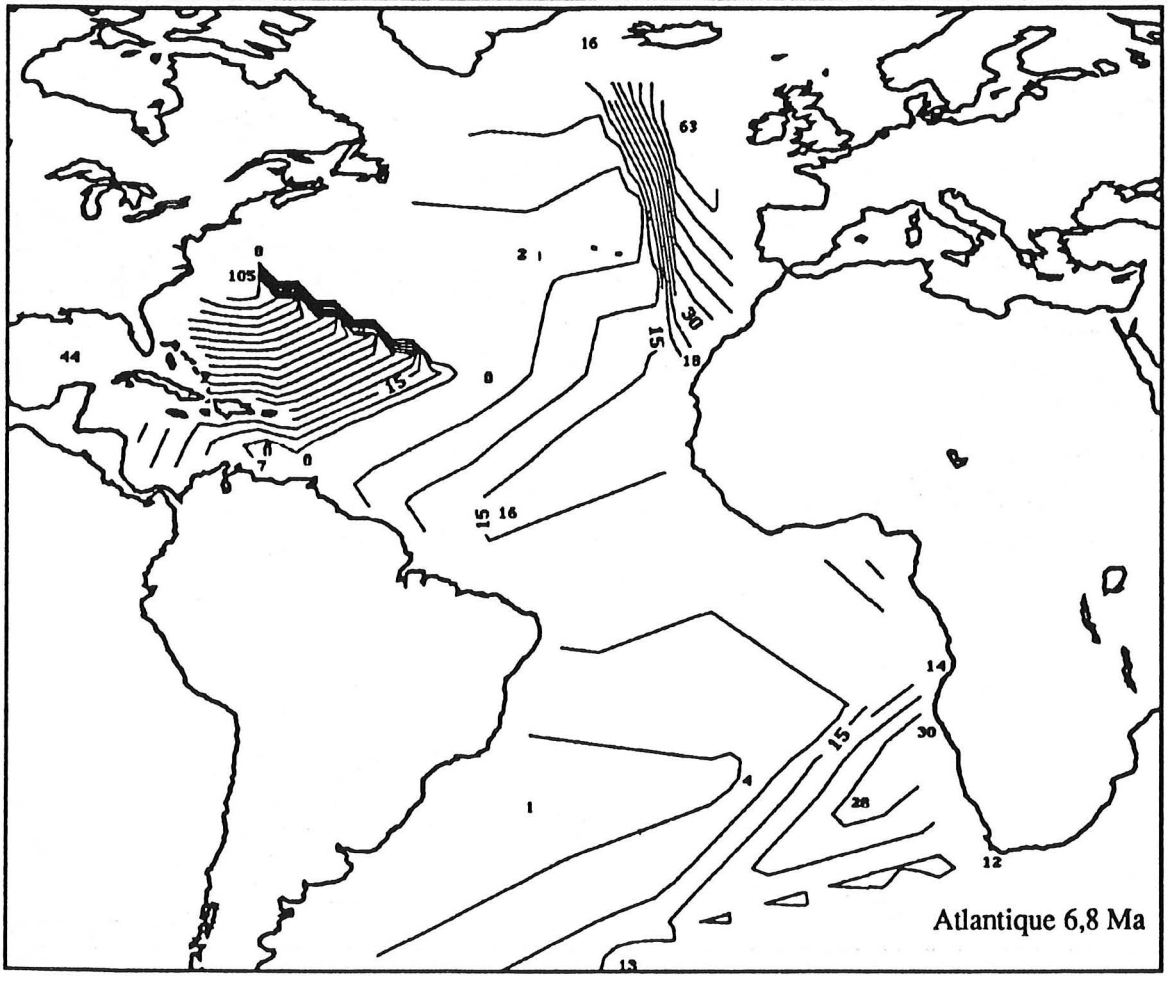

Atlantique 2,8 Ma


Atlantique 3,2 Ma

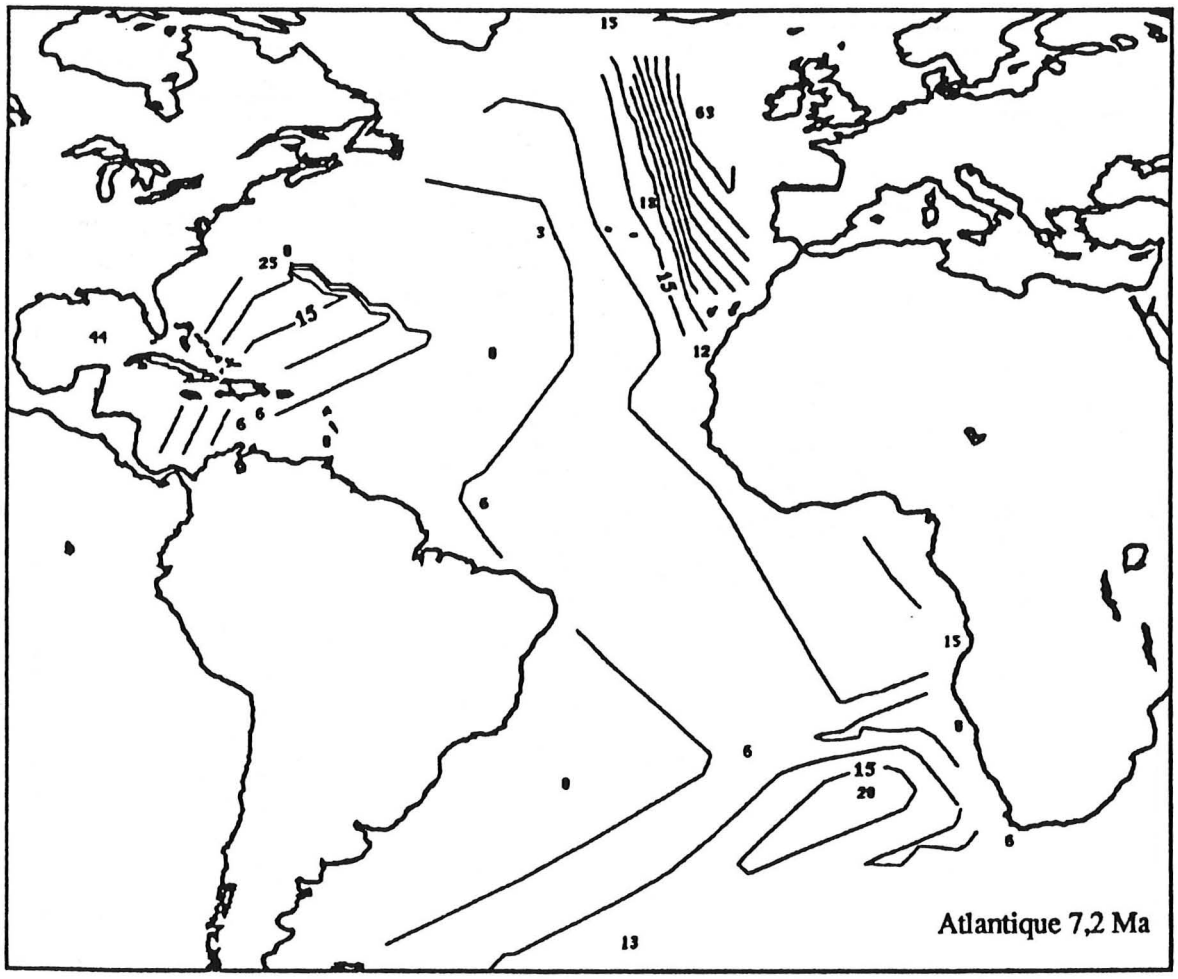

Atlantique 4,8 Ma

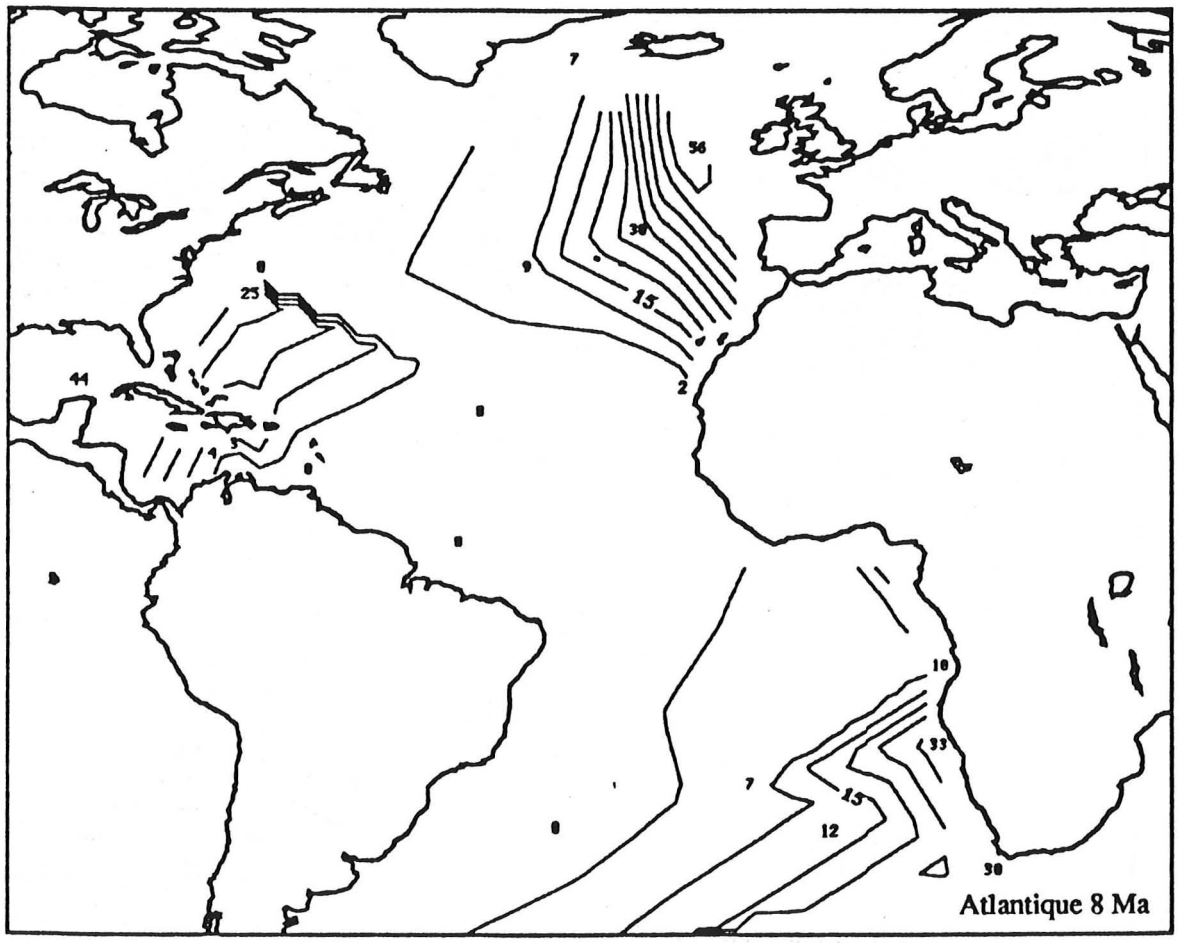


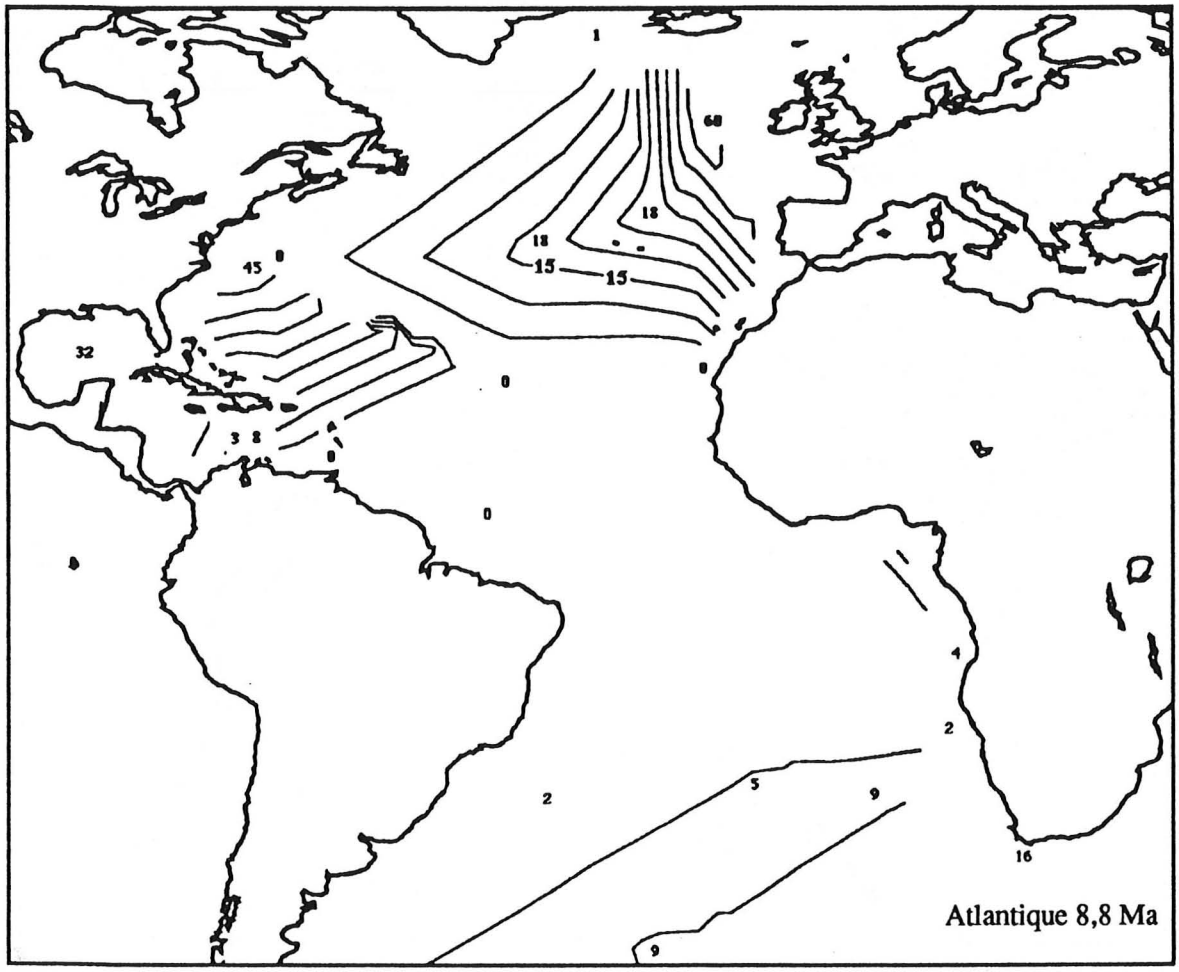
Atlantique 5,6 Ma

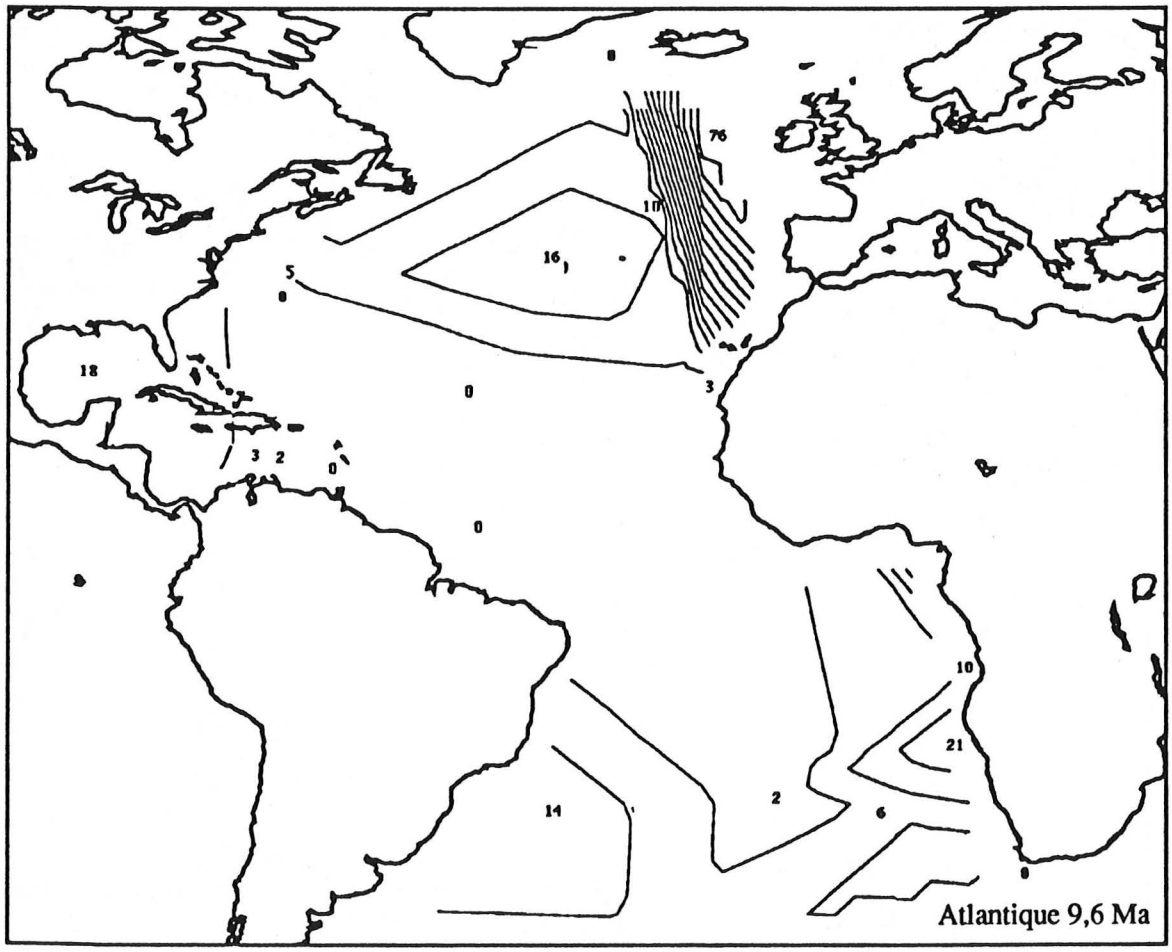


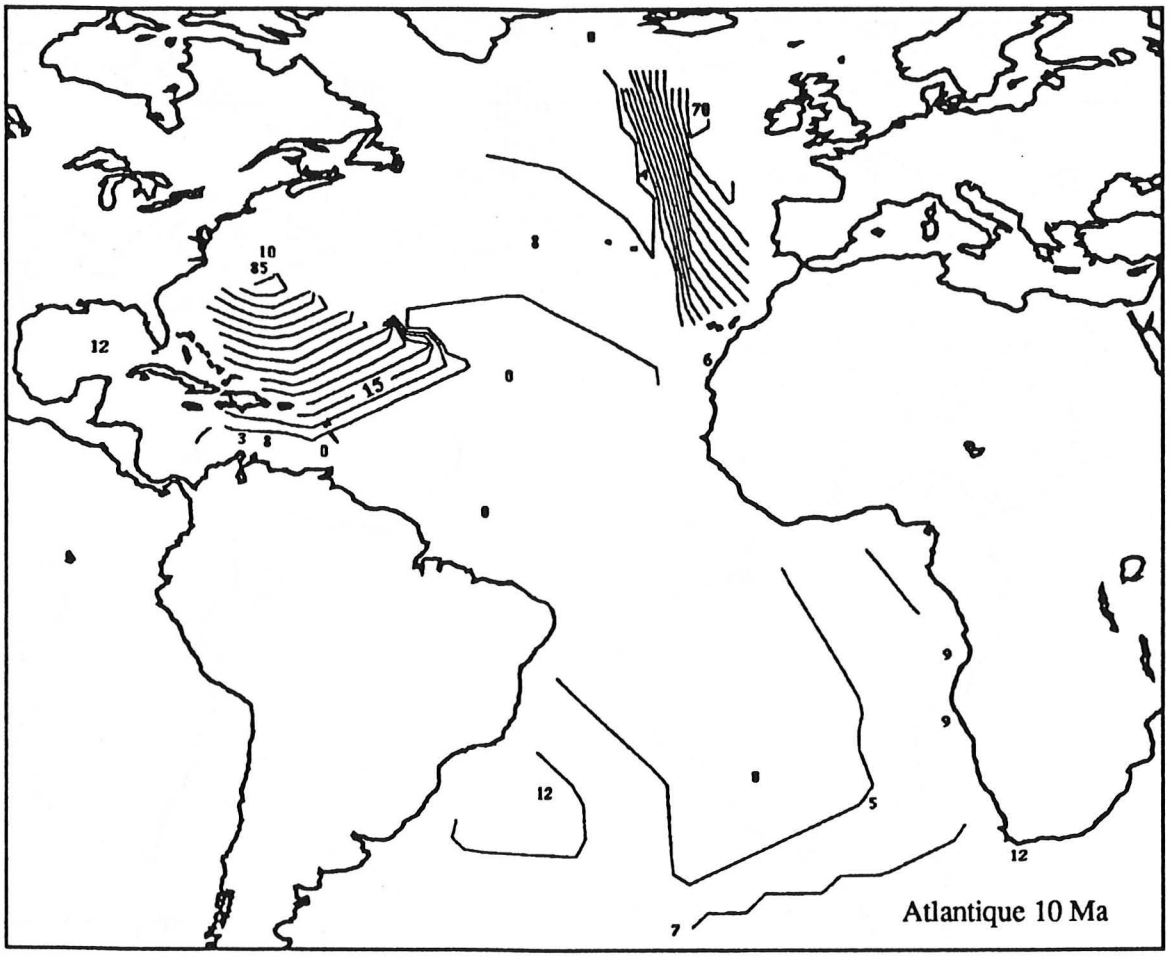
Atlantique 6,8 Ma

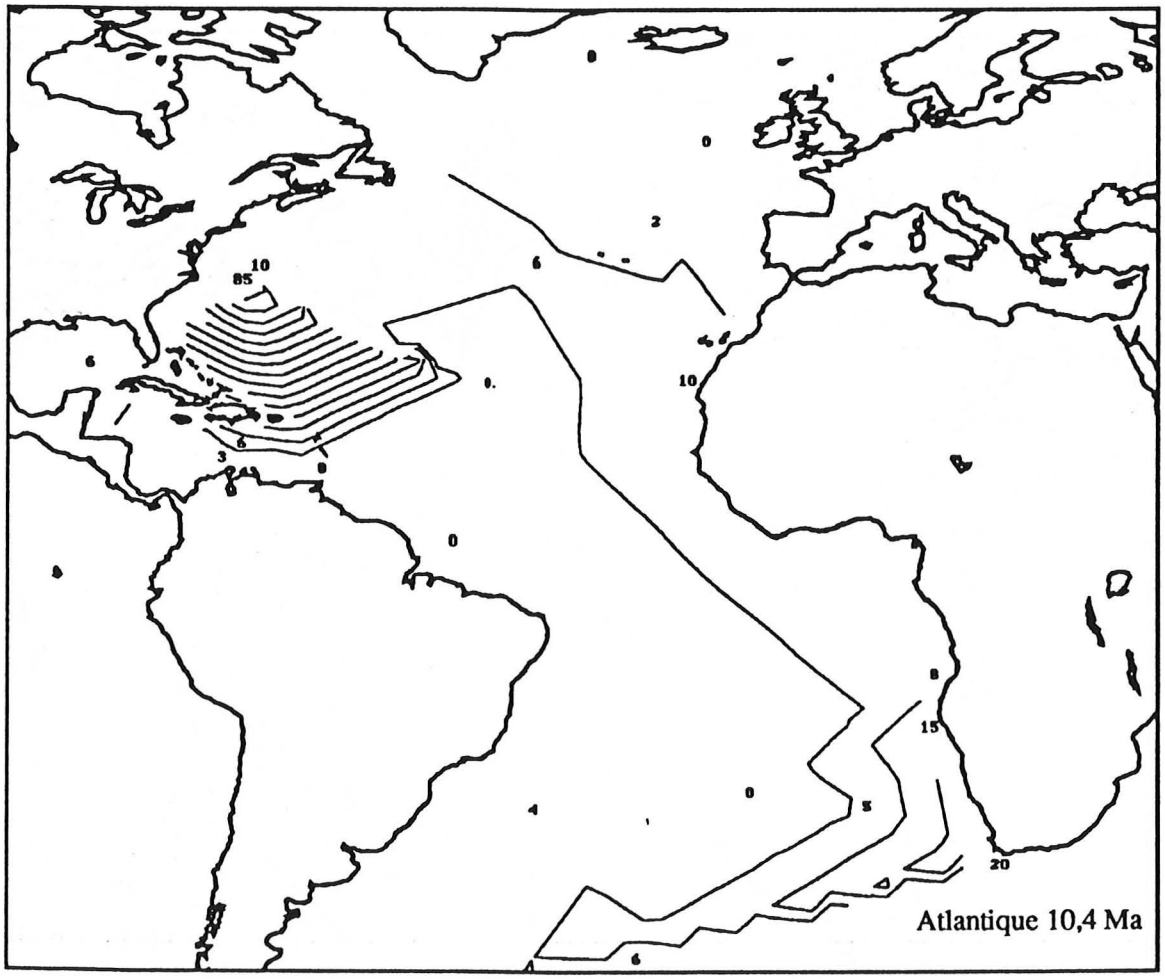

Atlantique 7,2 Ma

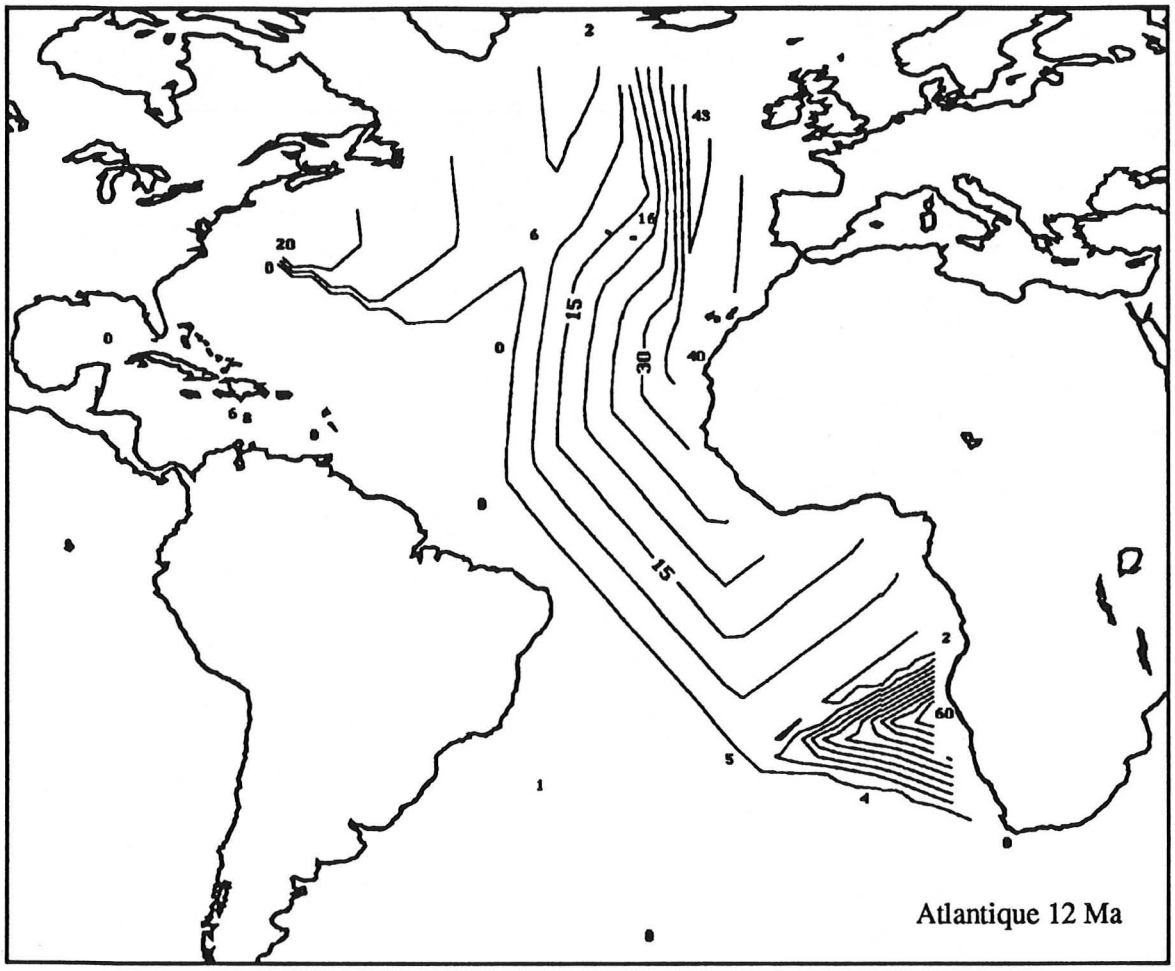

Atlantique 8 Ma

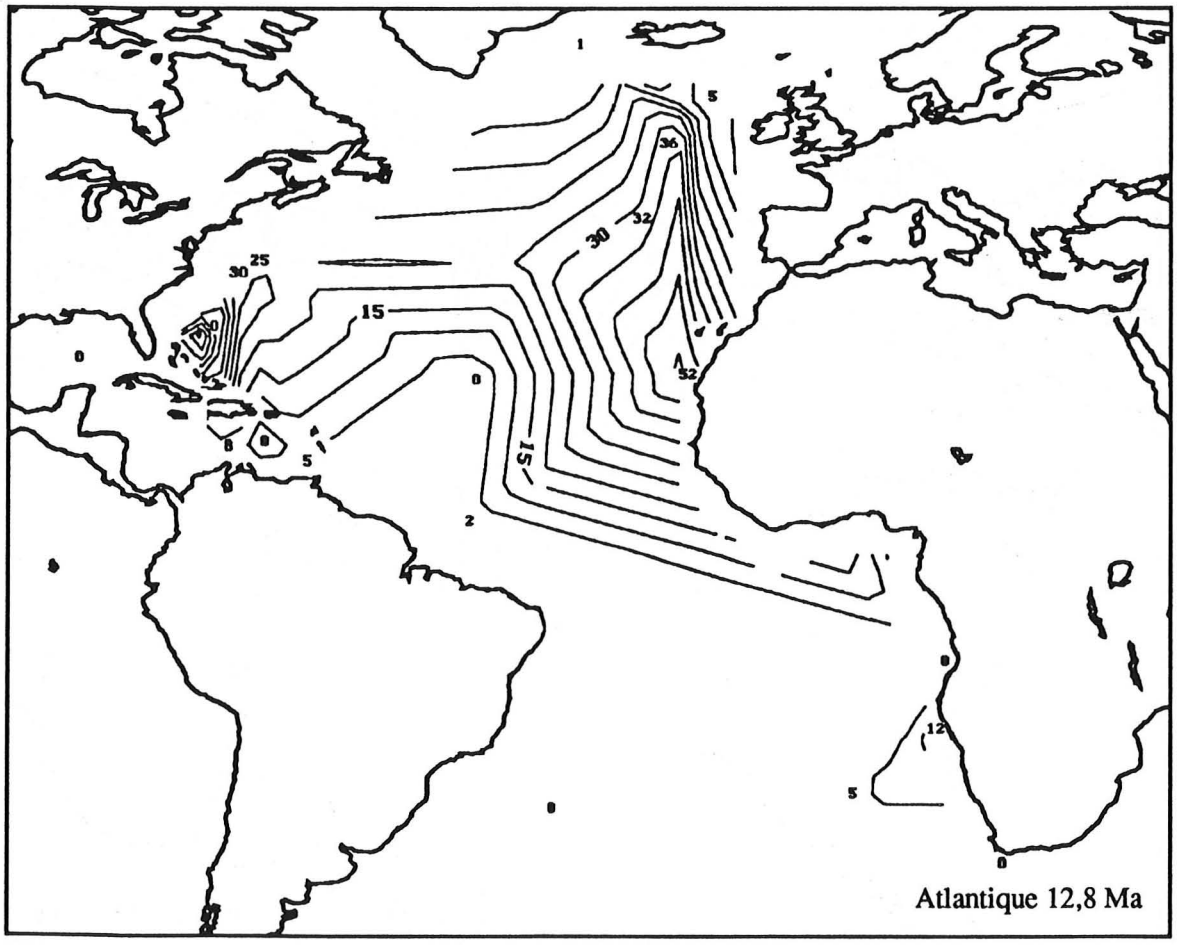

Atlantique 8,8 Ma

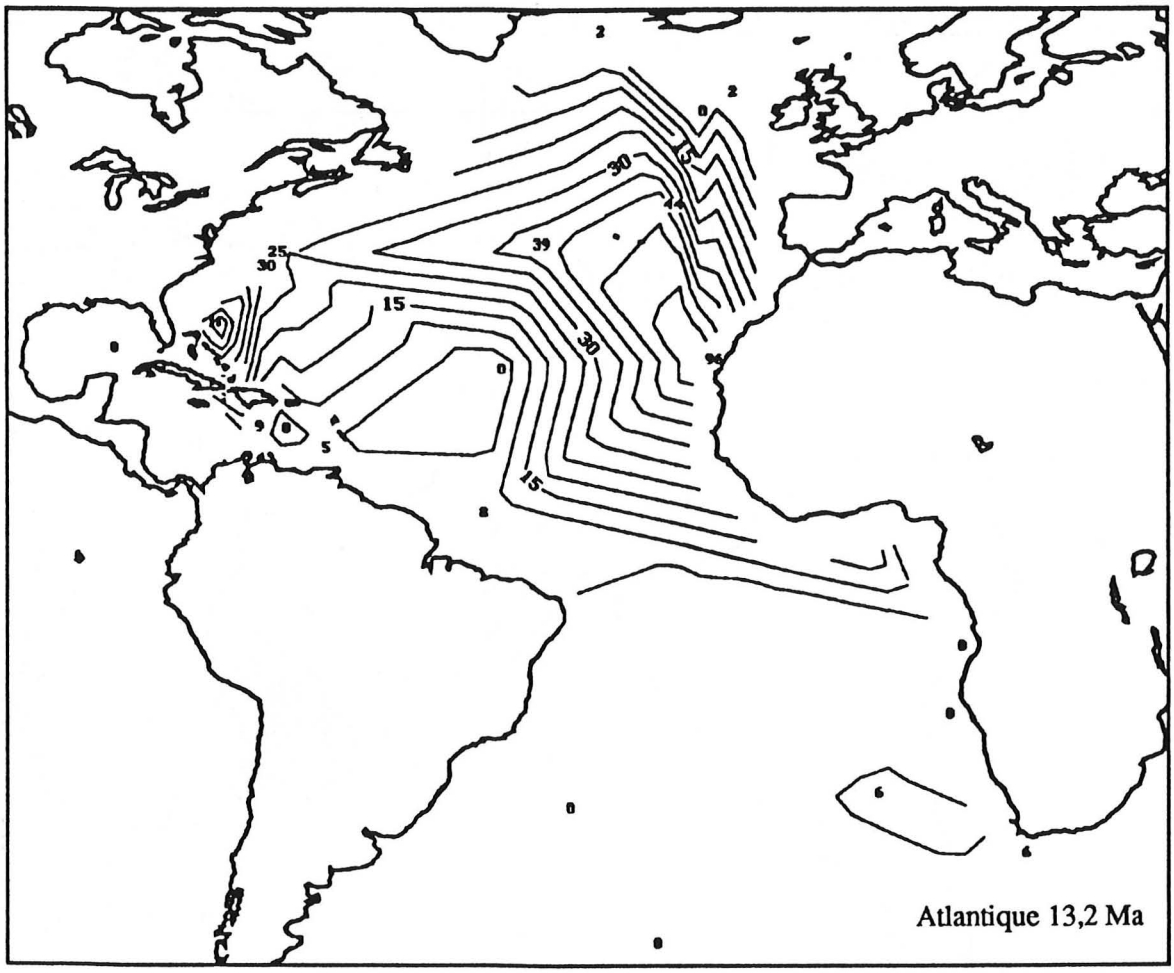

Atlantique 9,6 Ma

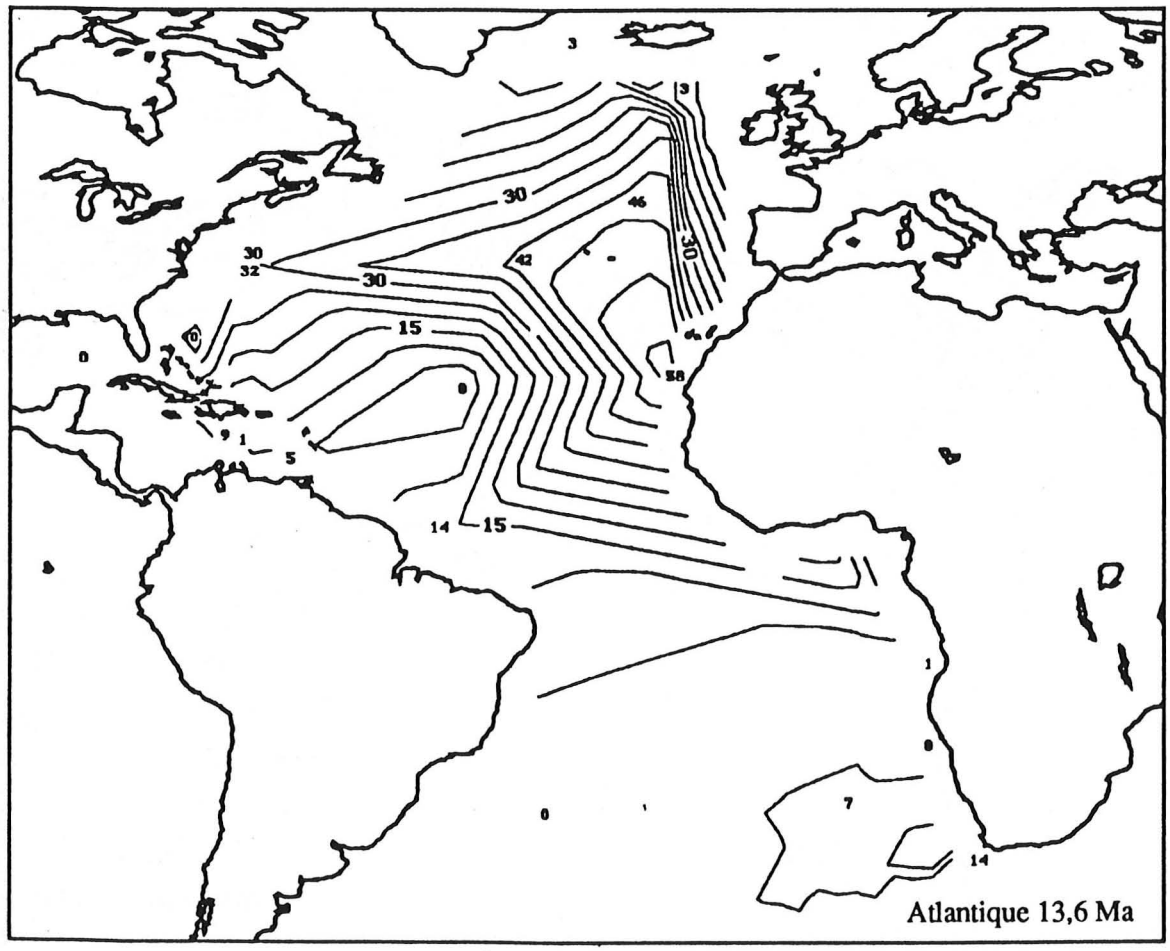

Atlantique 10 Ma

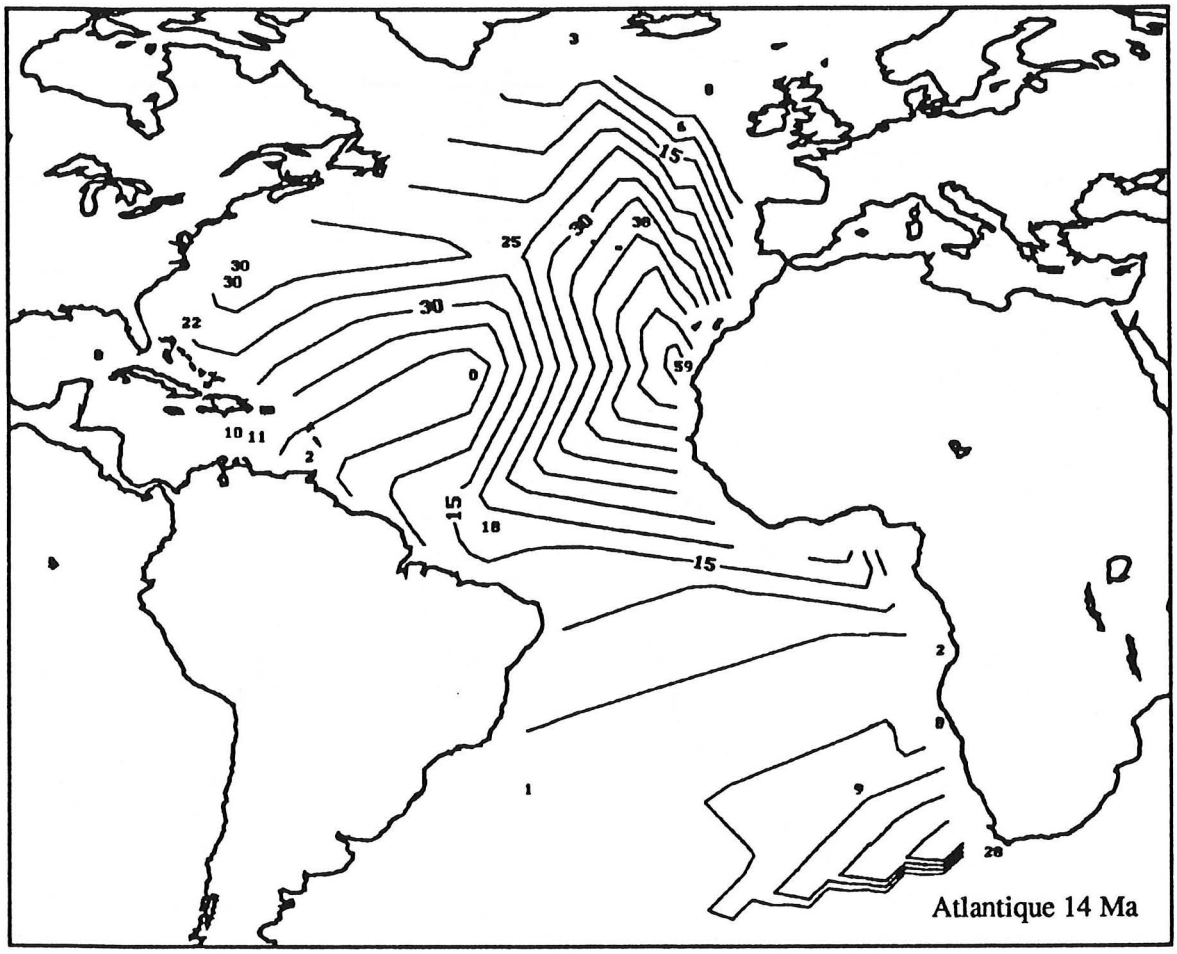

Atlantique 10,4 Ma

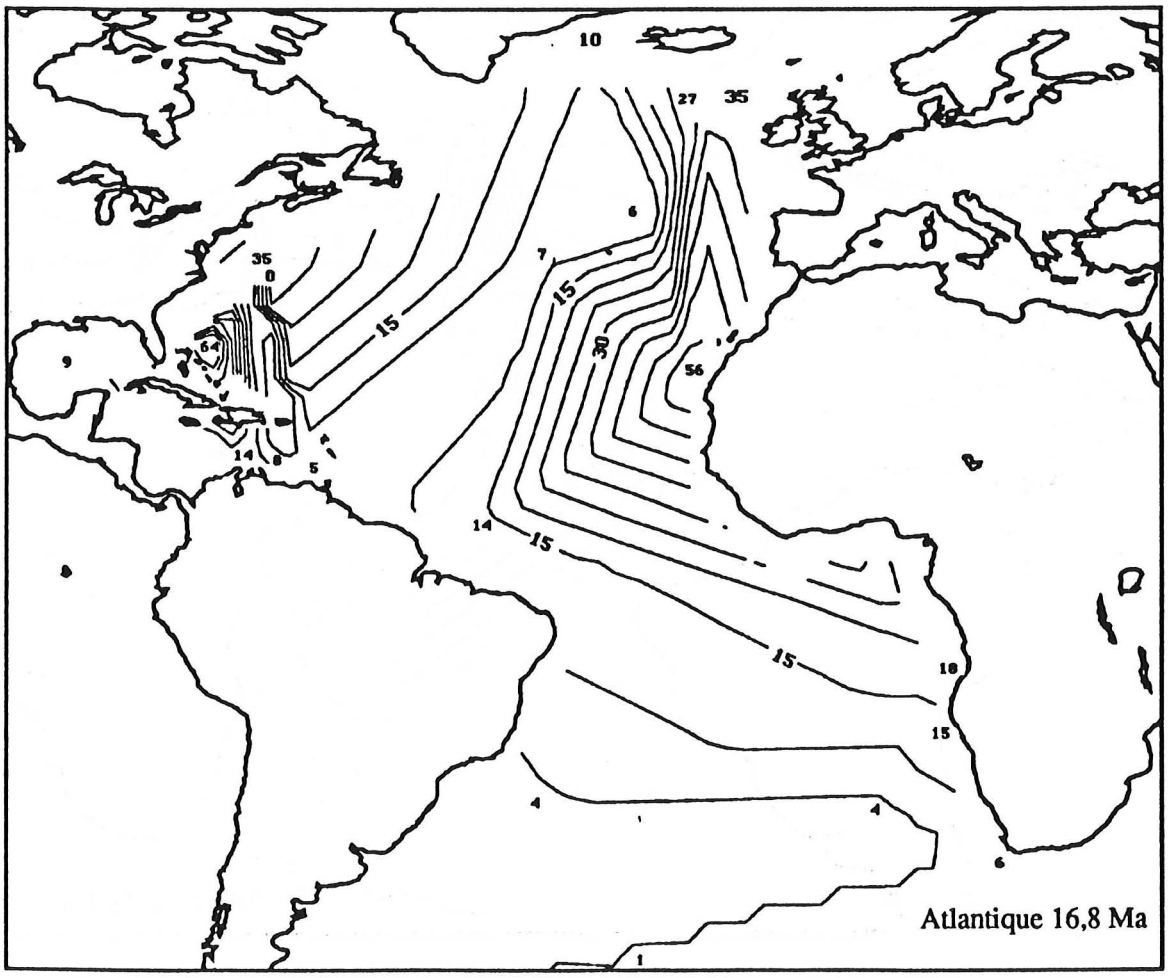

Atlantique 12 Ma

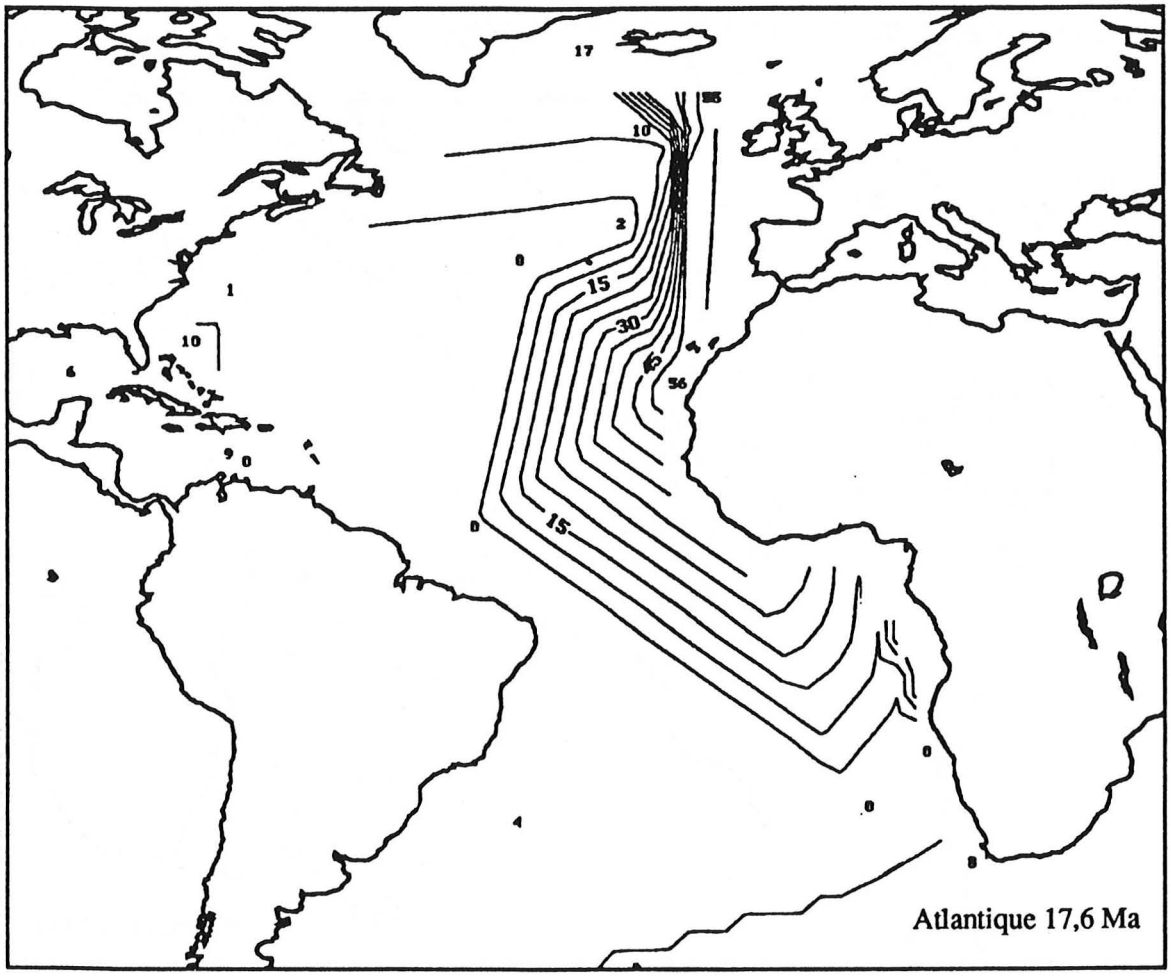

Atlantique 12,8 Ma


Atlantique 13,2 Ma

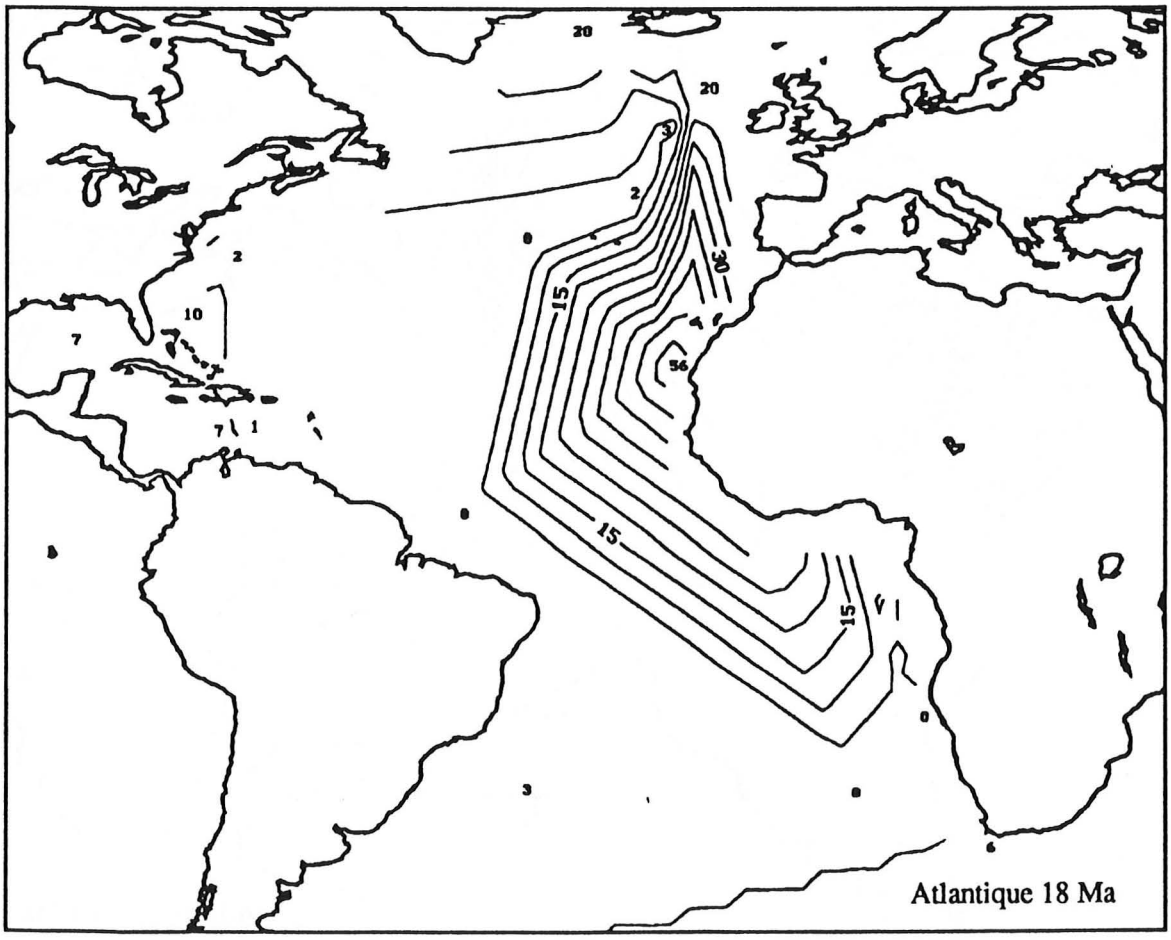

Atlantique 13,6 Ma


Atlantique 14 Ma

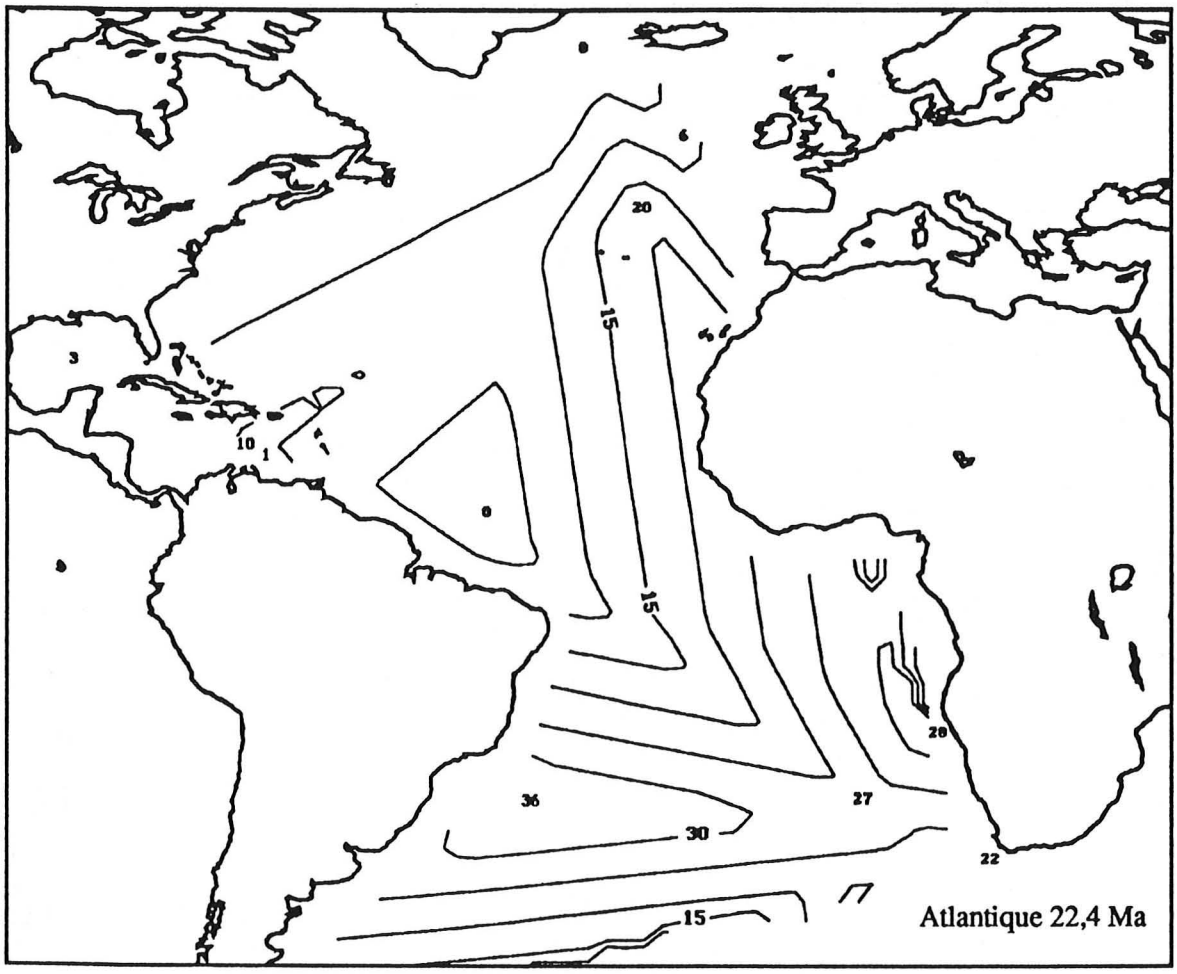

Atlantique 16,8 Ma

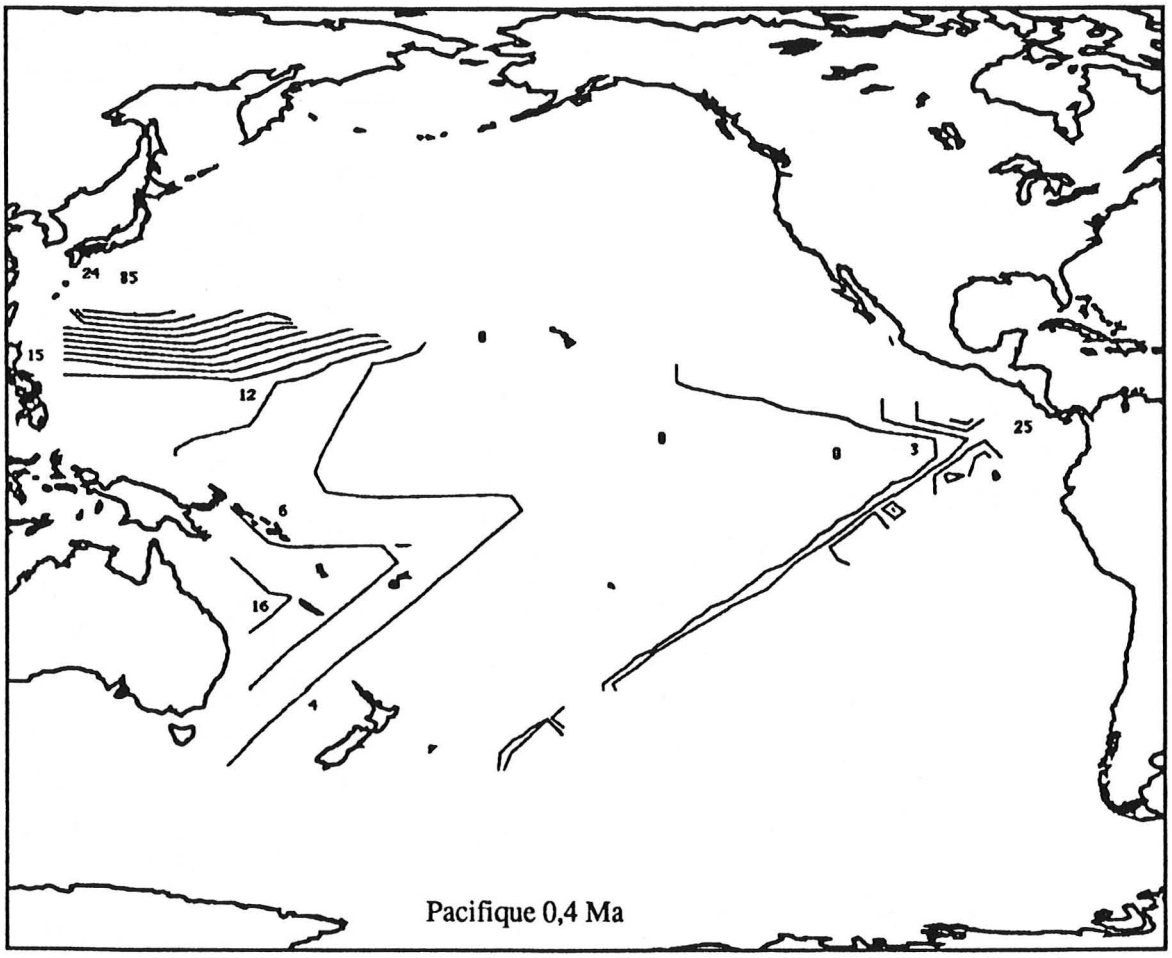


Atlantique 17,6 Ma

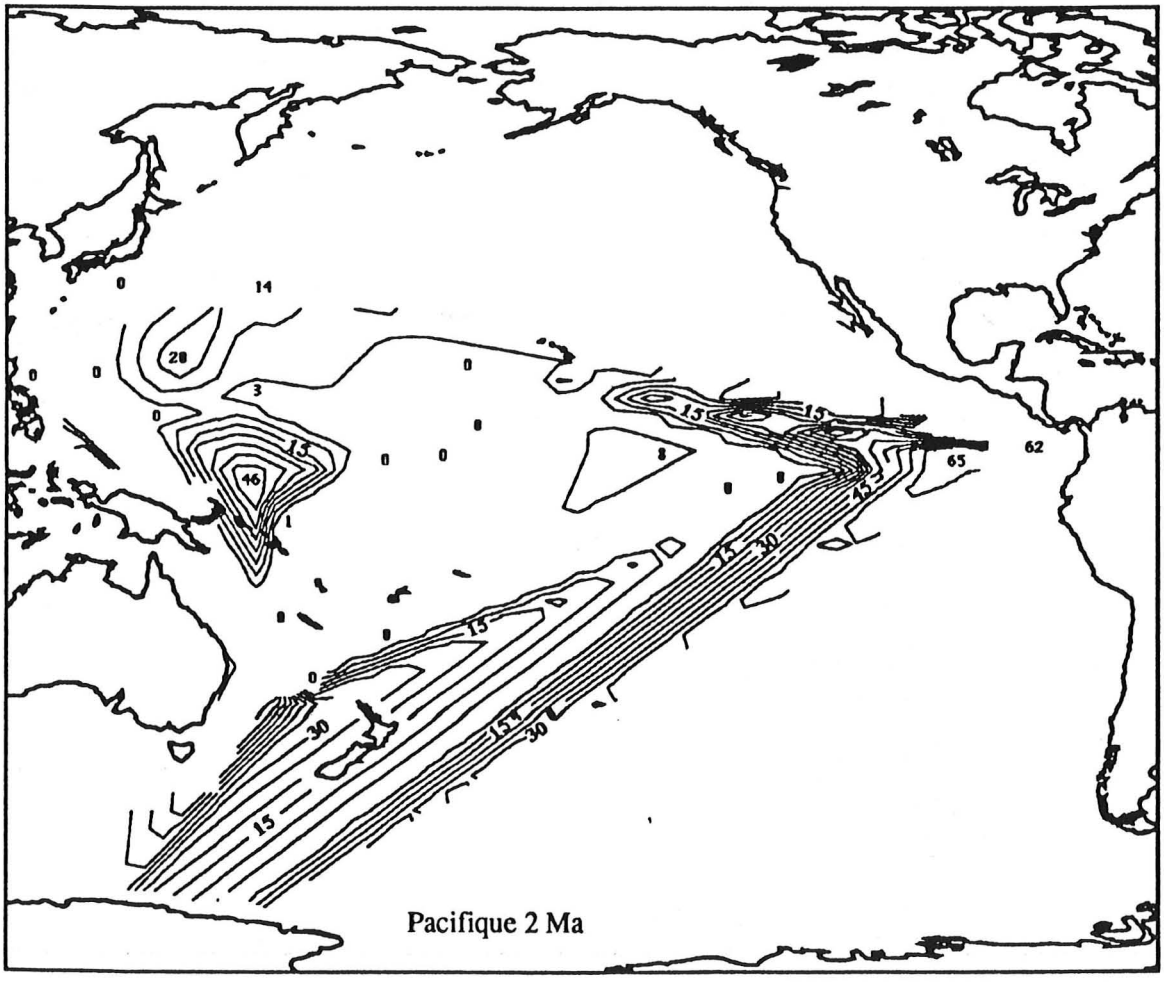


Atlantique 18 Ma

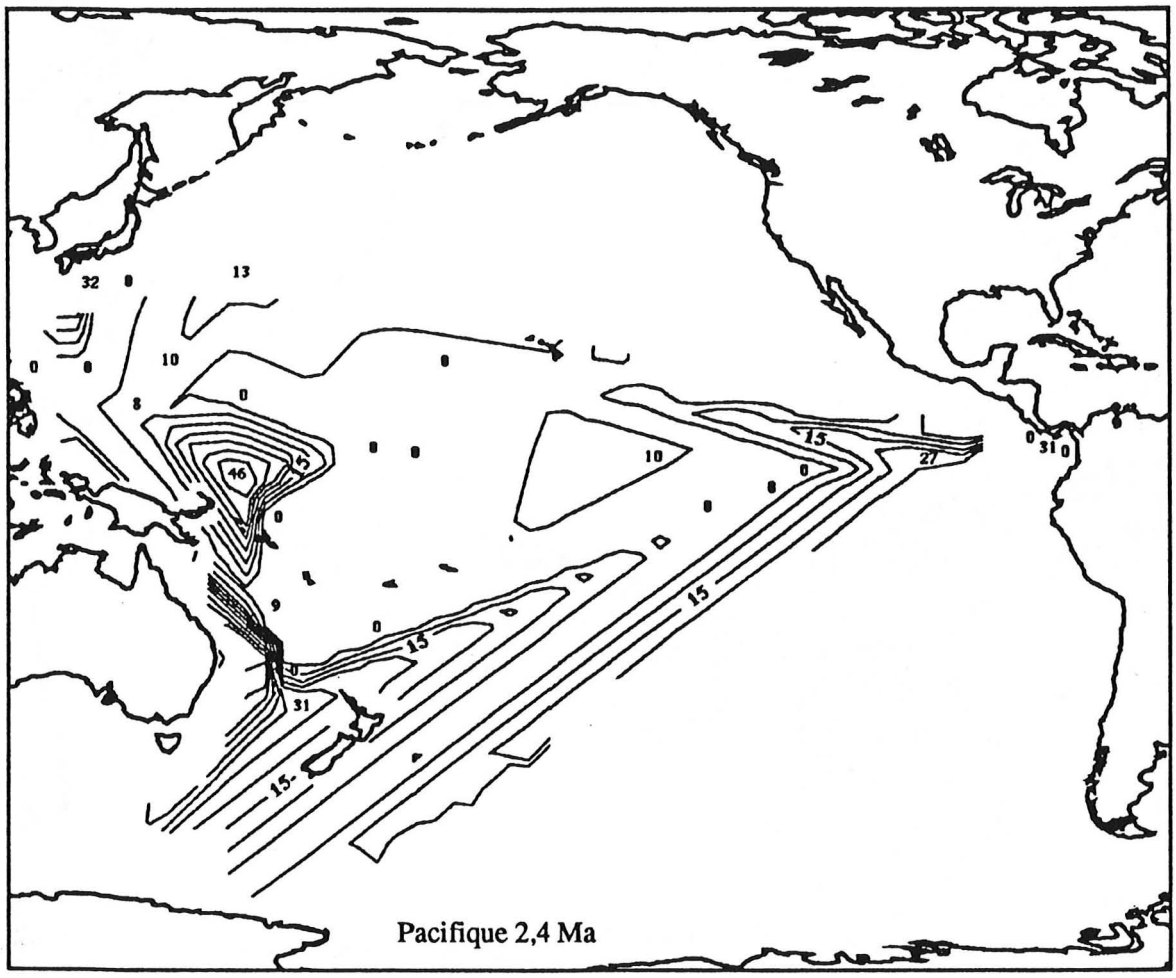

20
15
15
3
10
1
0
36
30
27
28
22
15
Atlantique 22,4 Ma



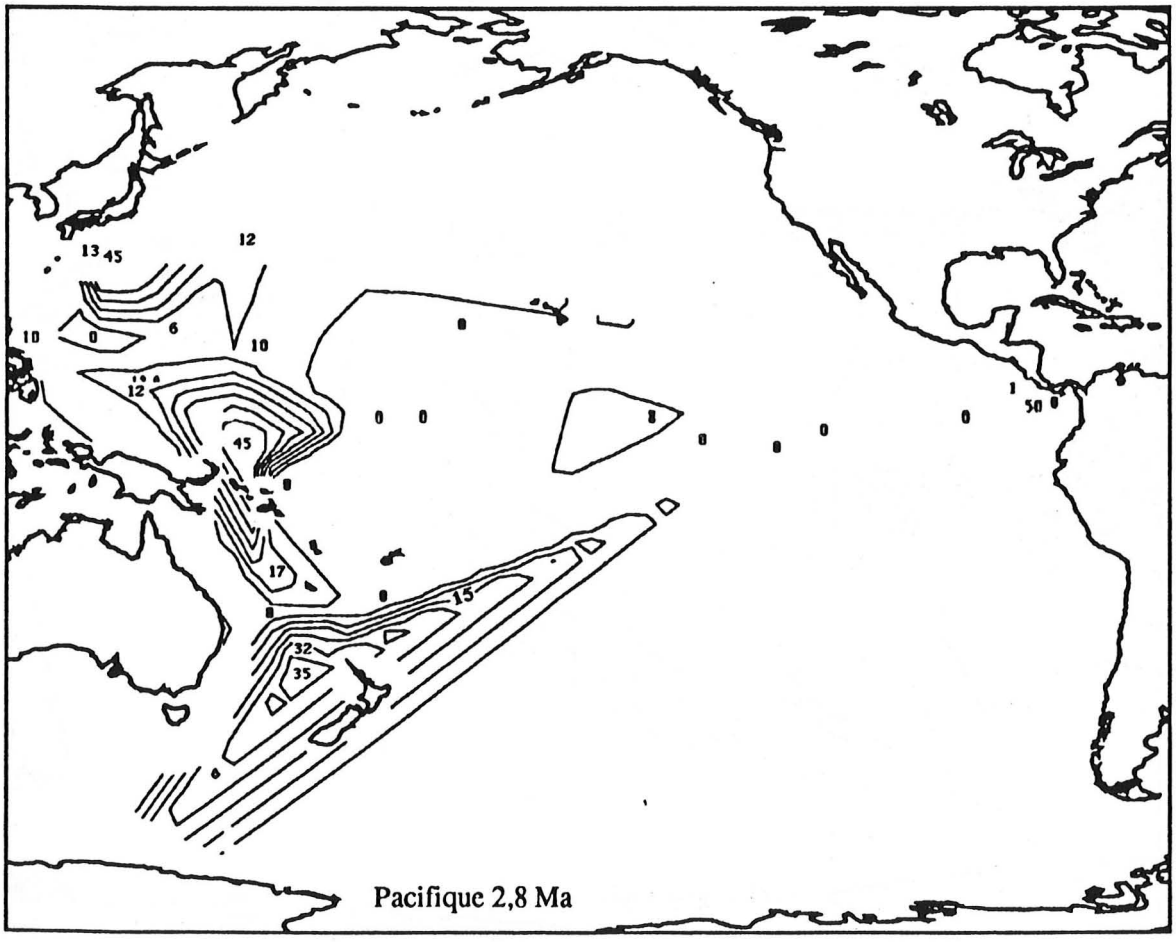
Pacifique 0,4 Ma



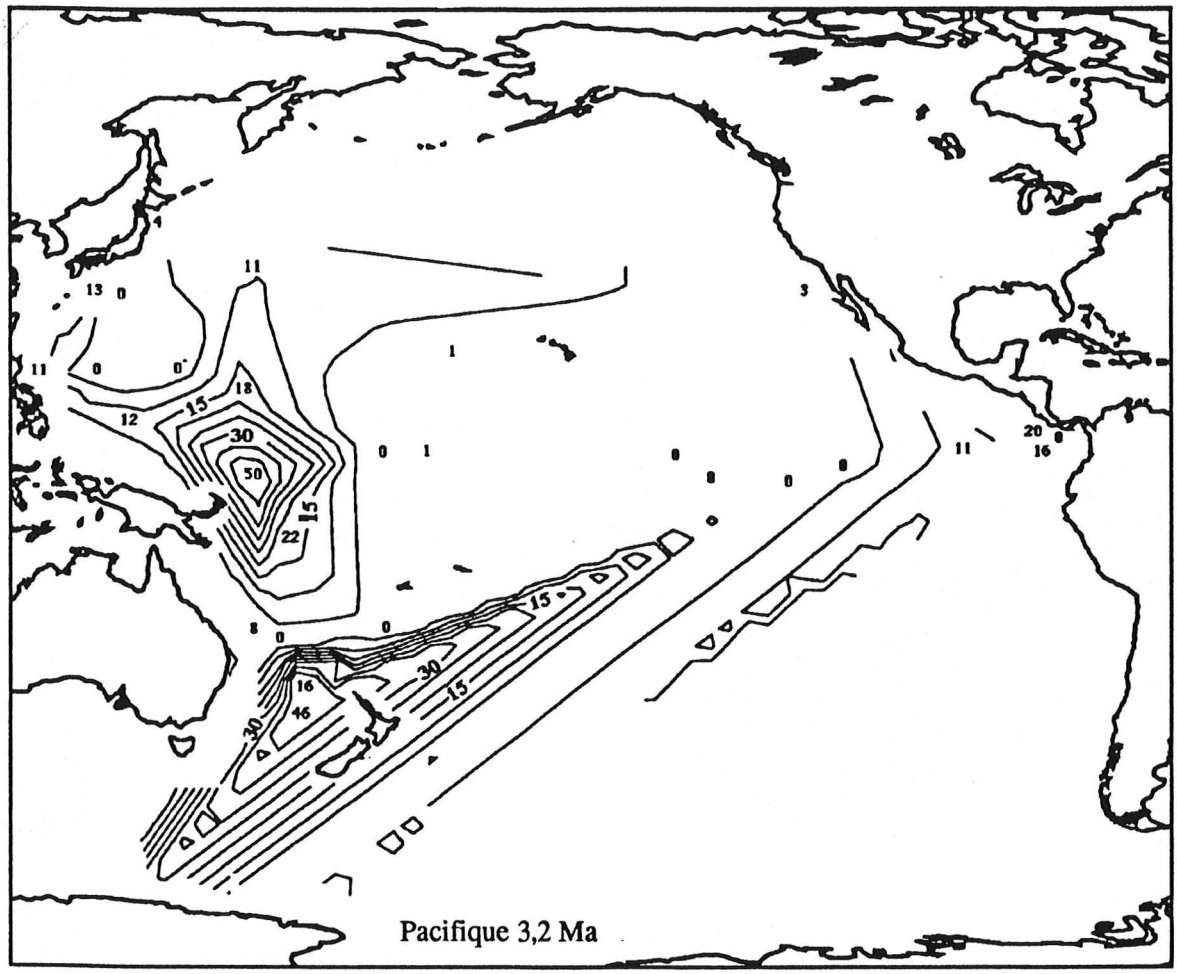
Pacifique 2 Ma



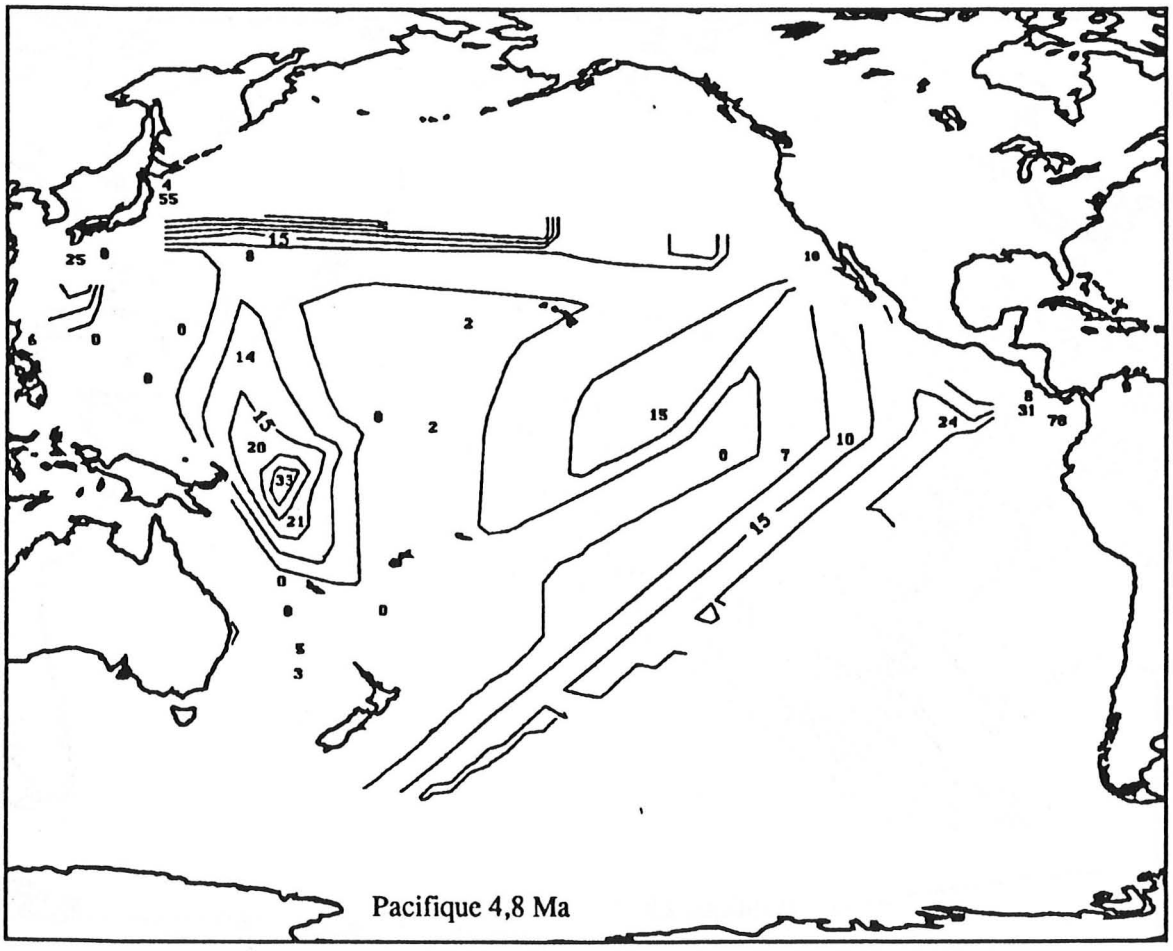
Pacifique 2,4 Ma



Pacifique 2,8 Ma

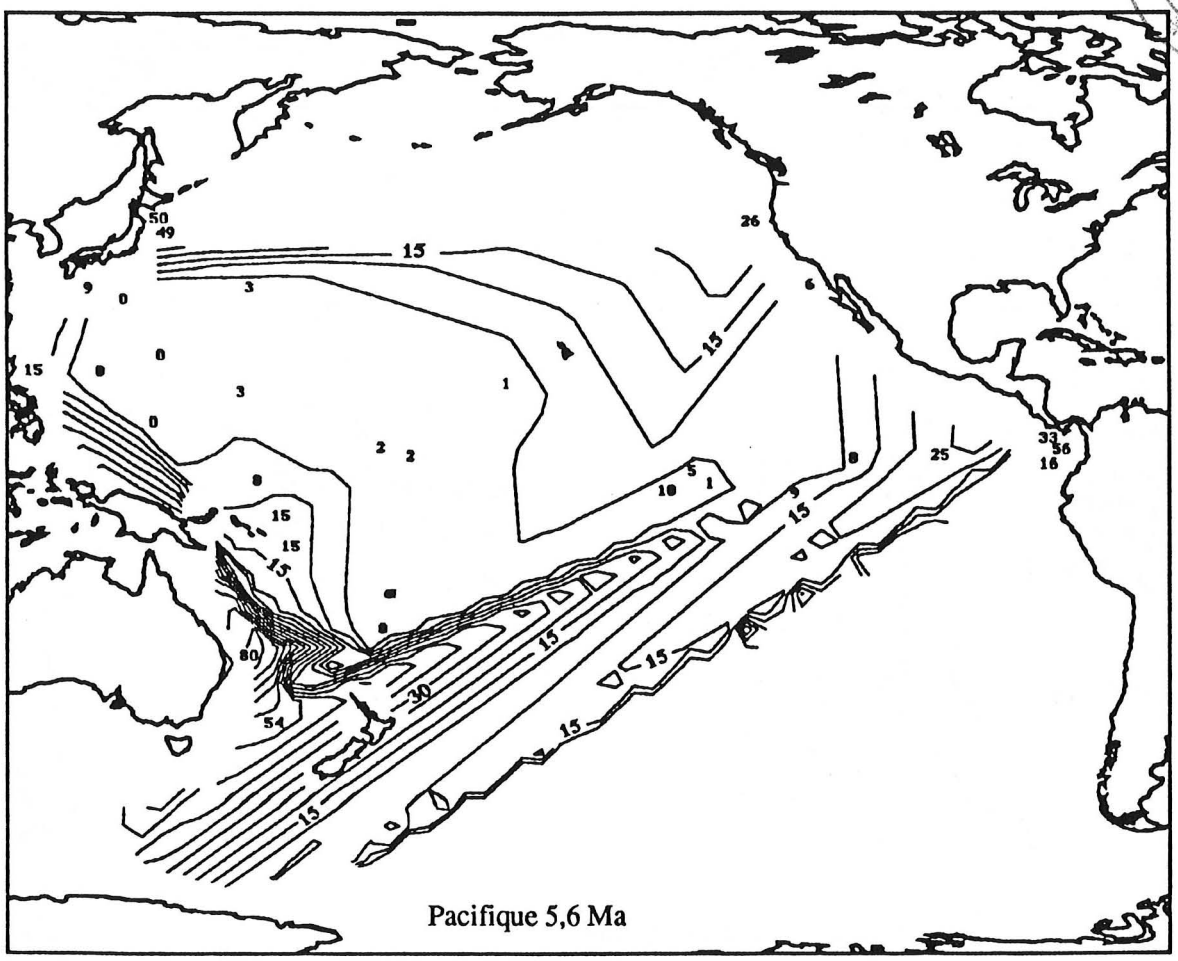


Pacifique 3,2 Ma

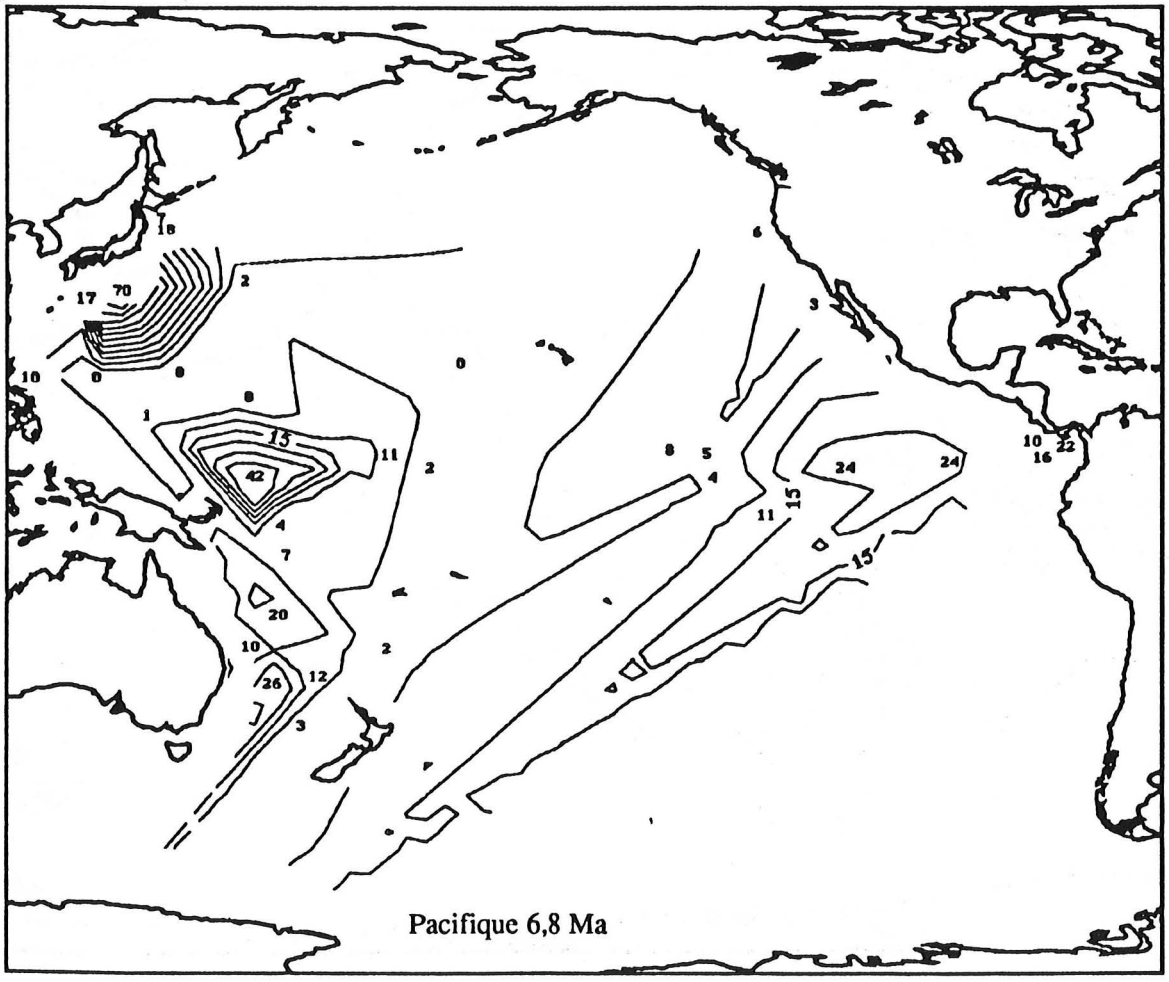


Pacifique 4,8 Ma

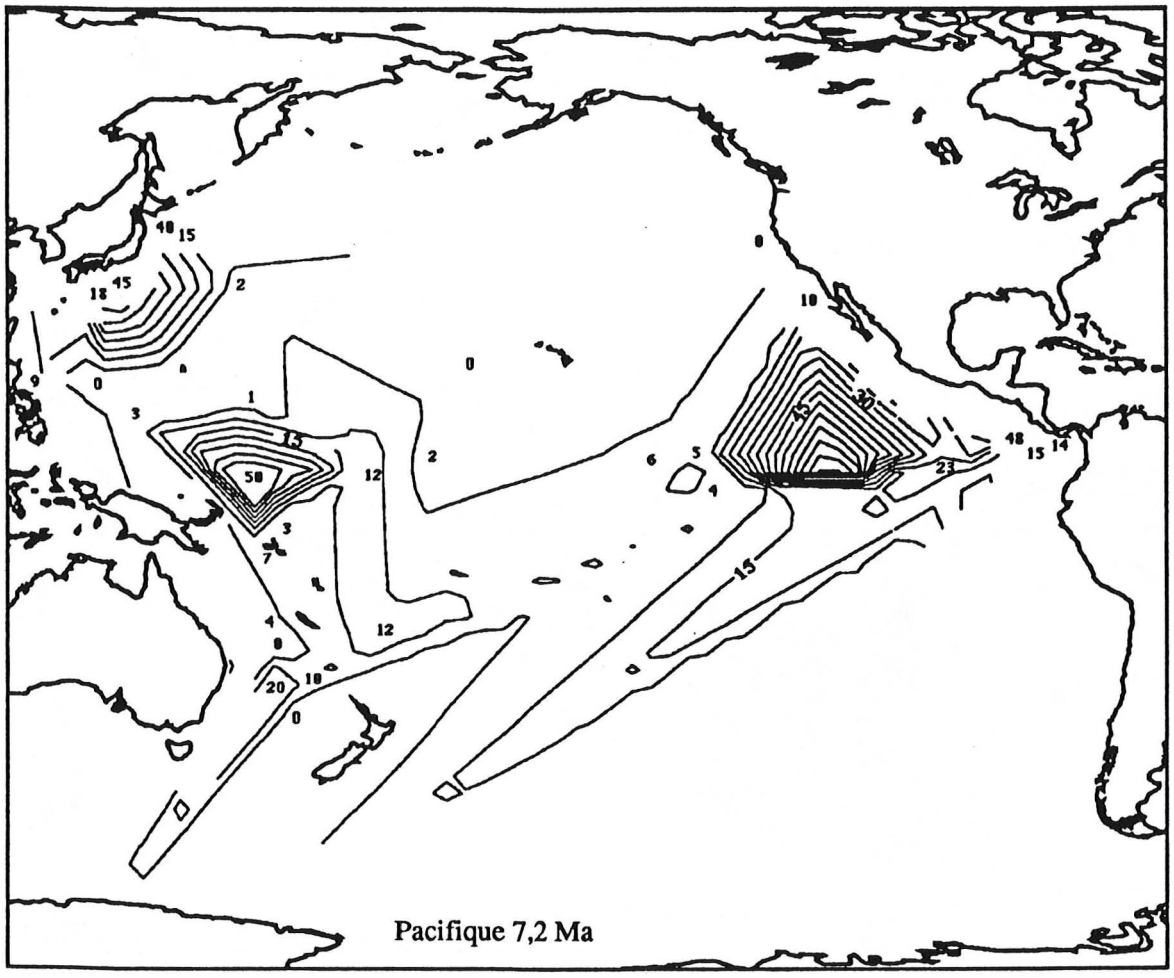
UNIVERSITÉ C.S.T. GÉOLOGIE LYON



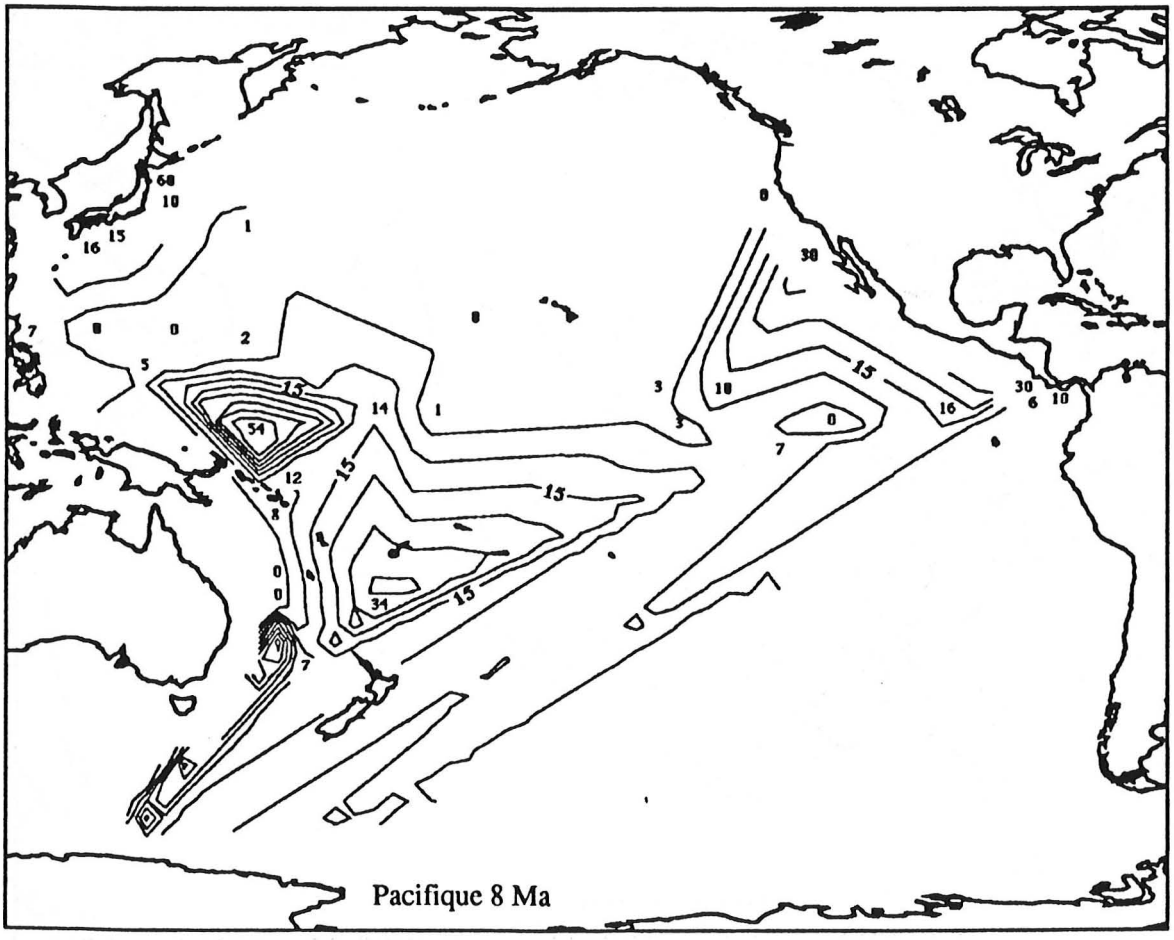
Pacifique 5,6 Ma



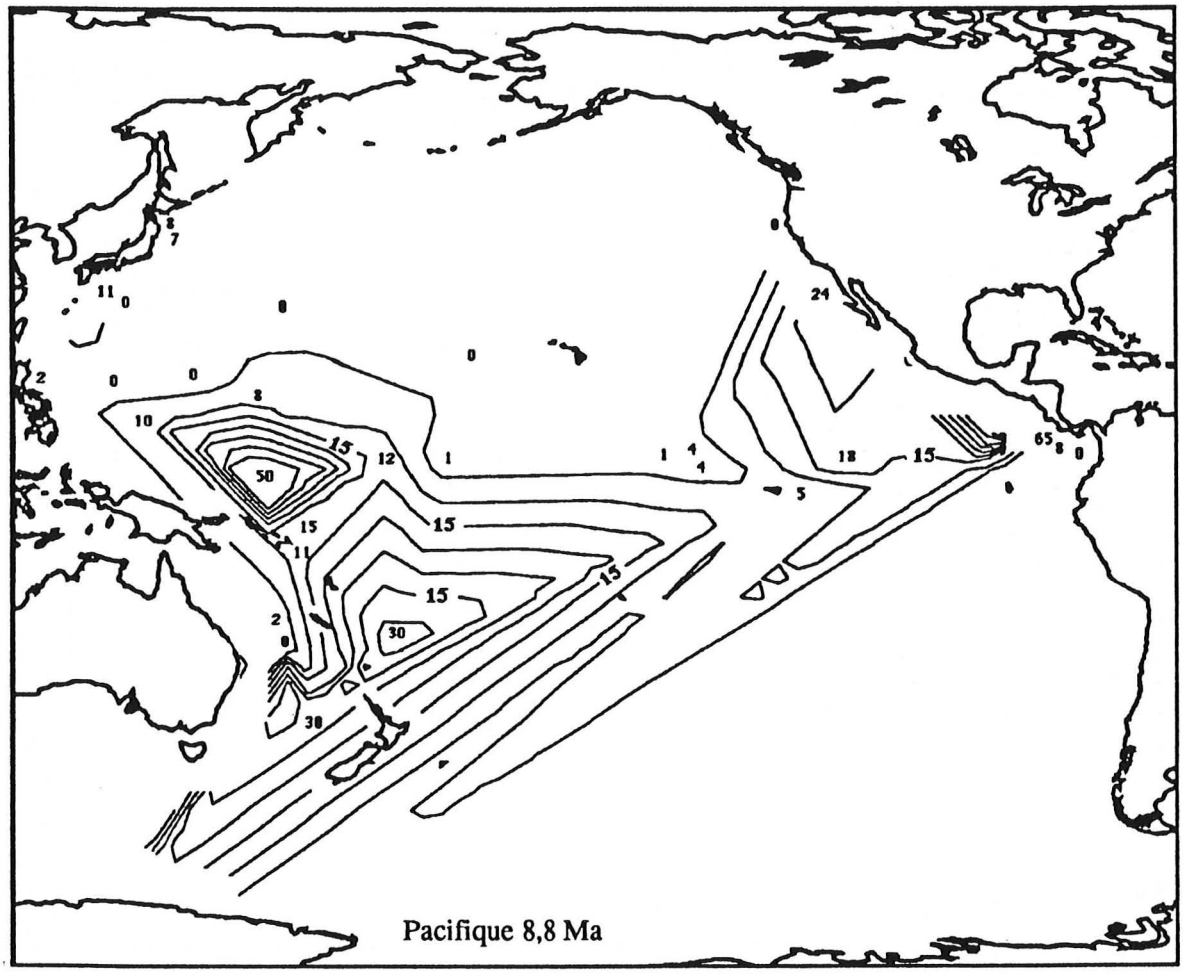
Pacifique 6,8 Ma



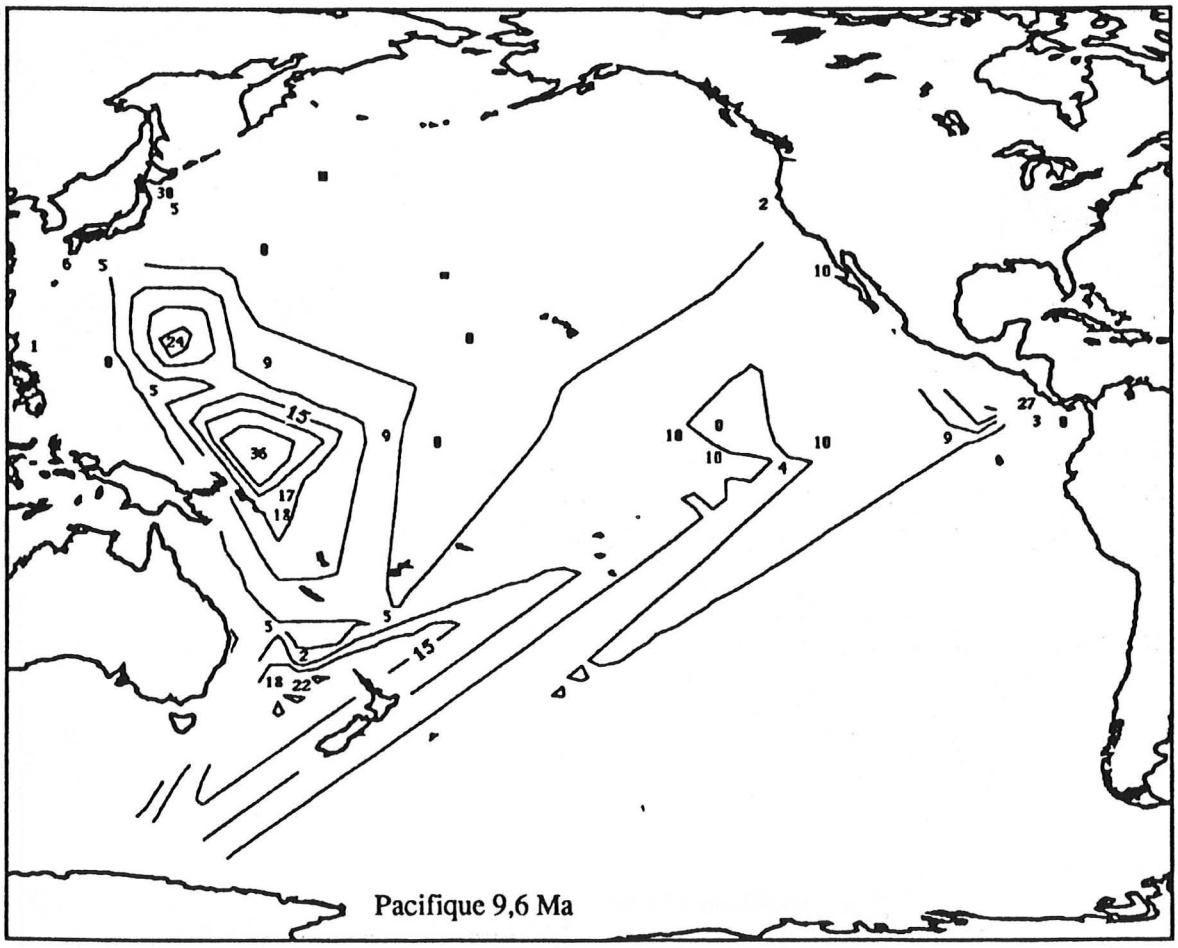
Pacifique 7,2 Ma



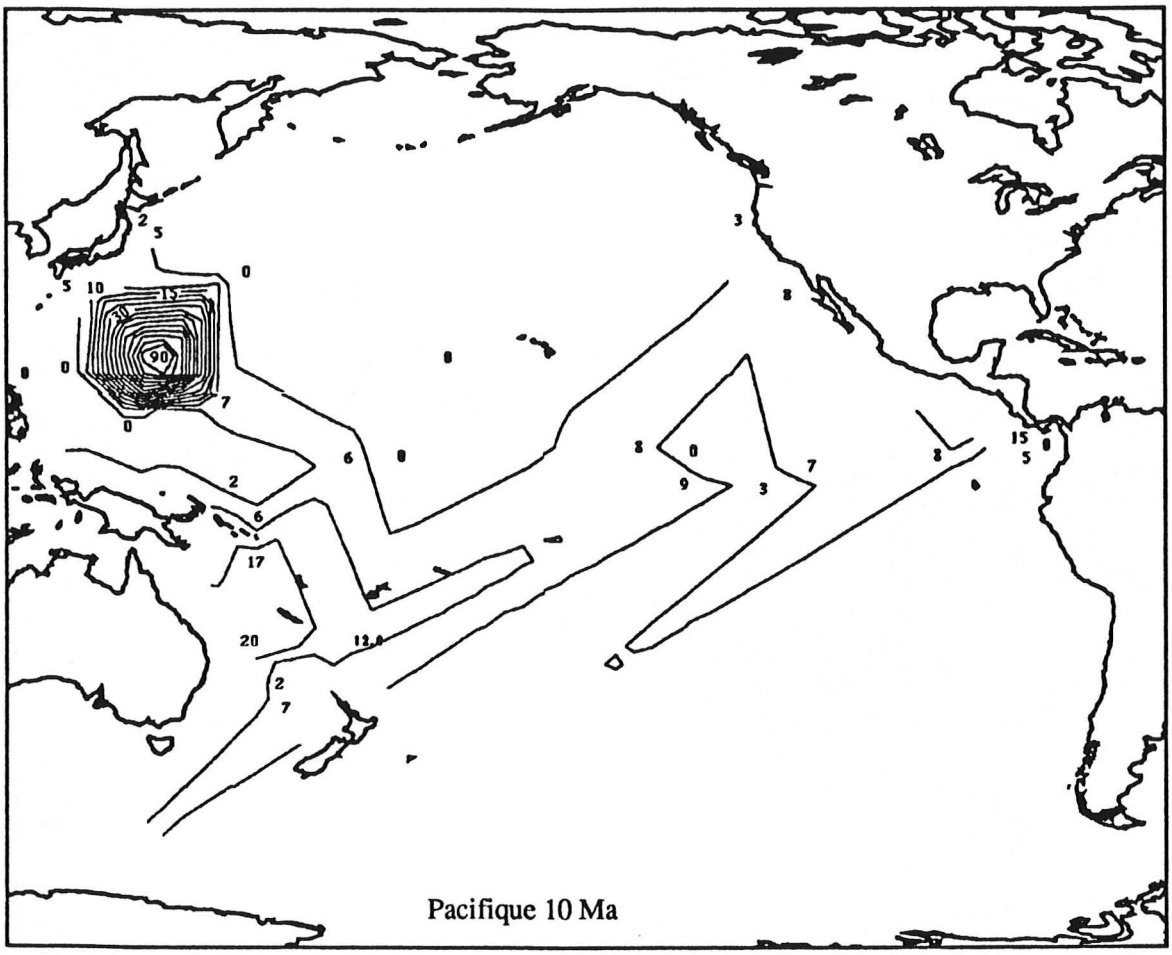
Pacifique 8 Ma



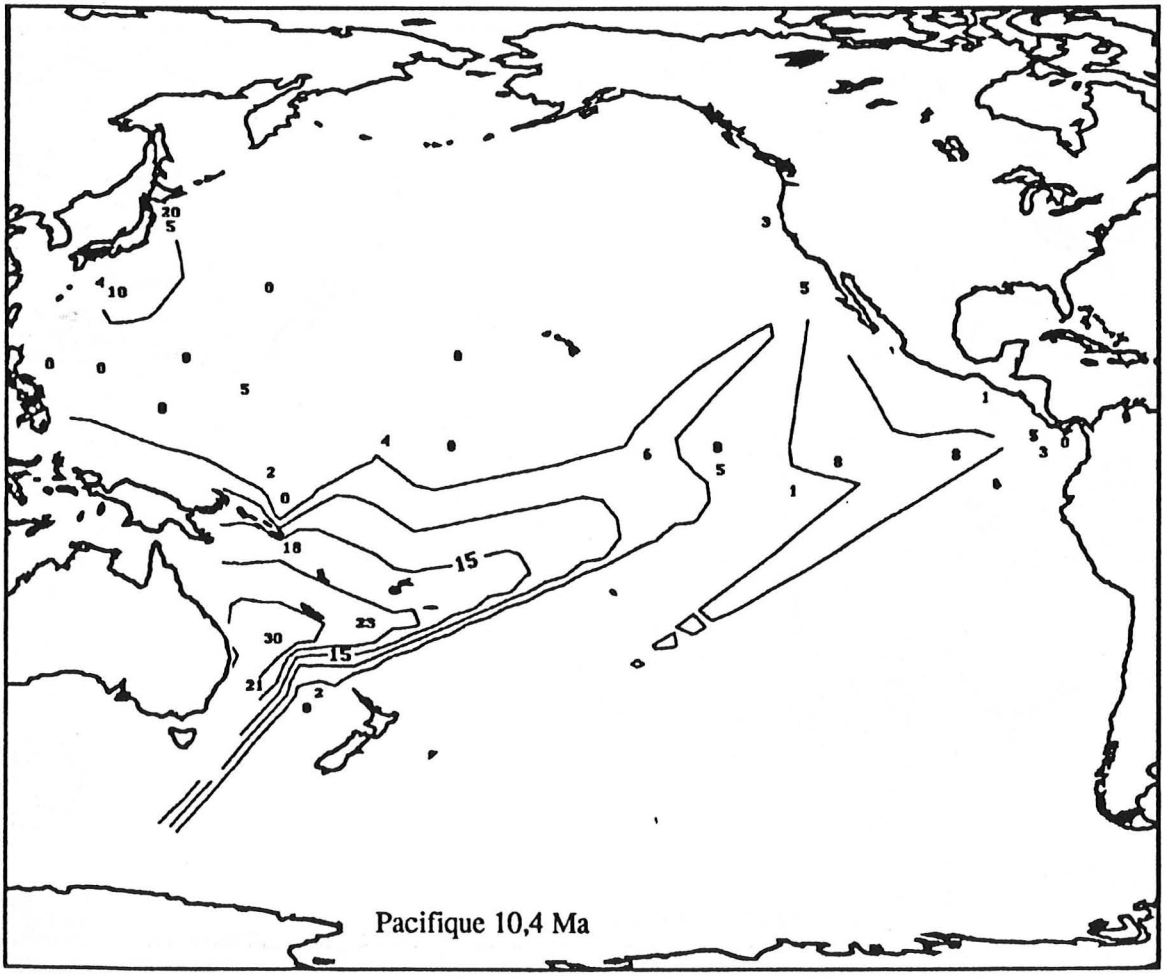
Pacifique 8,8 Ma



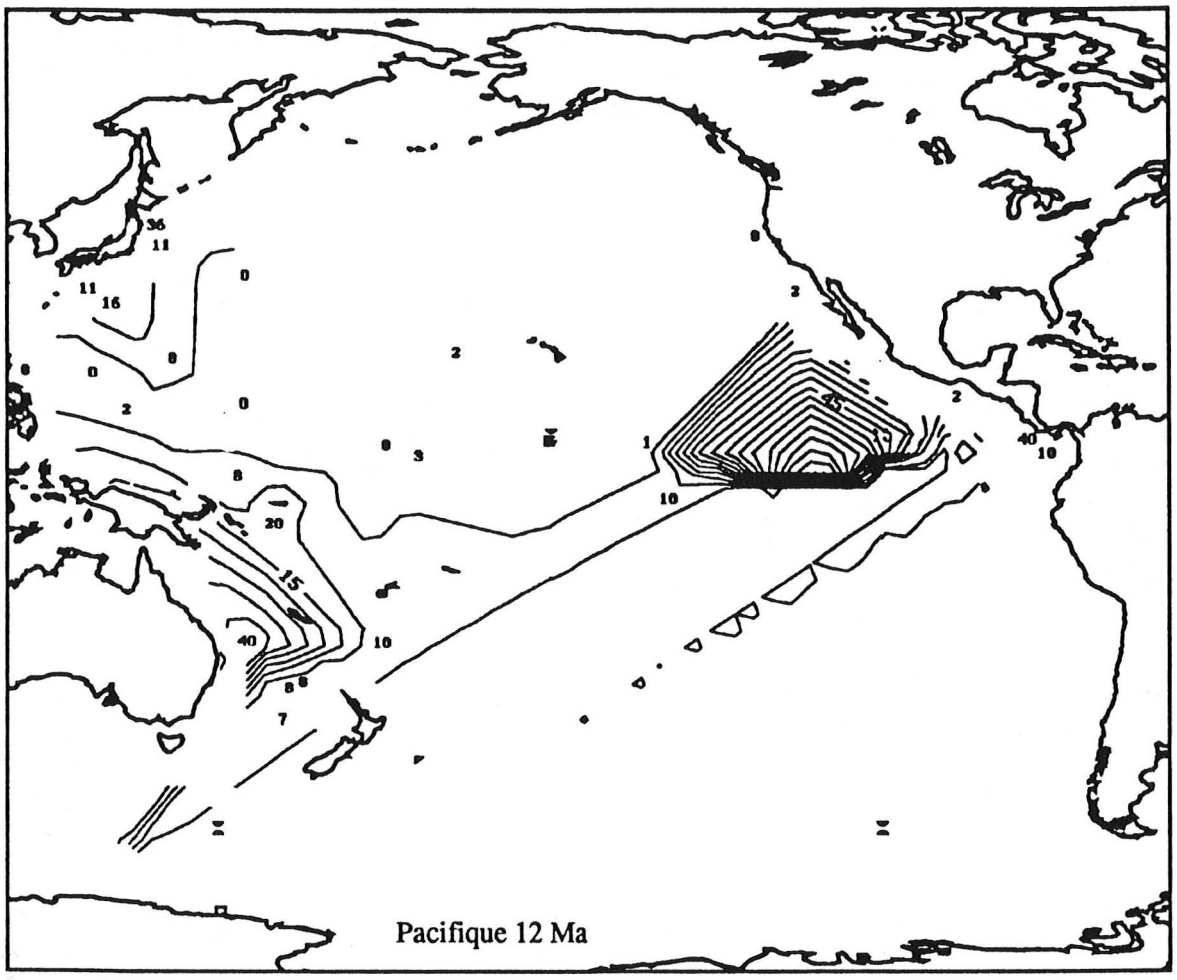
Pacifique 9,6 Ma

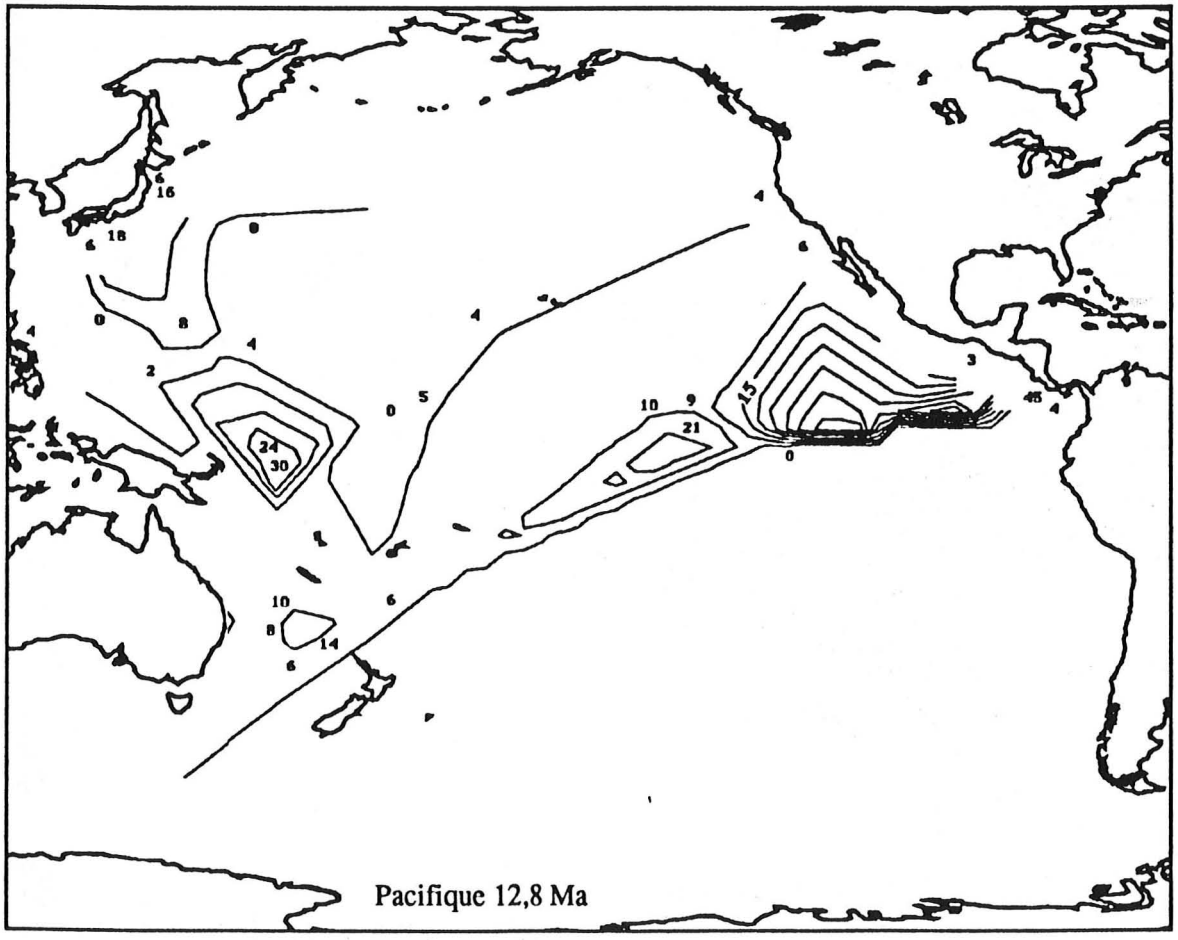


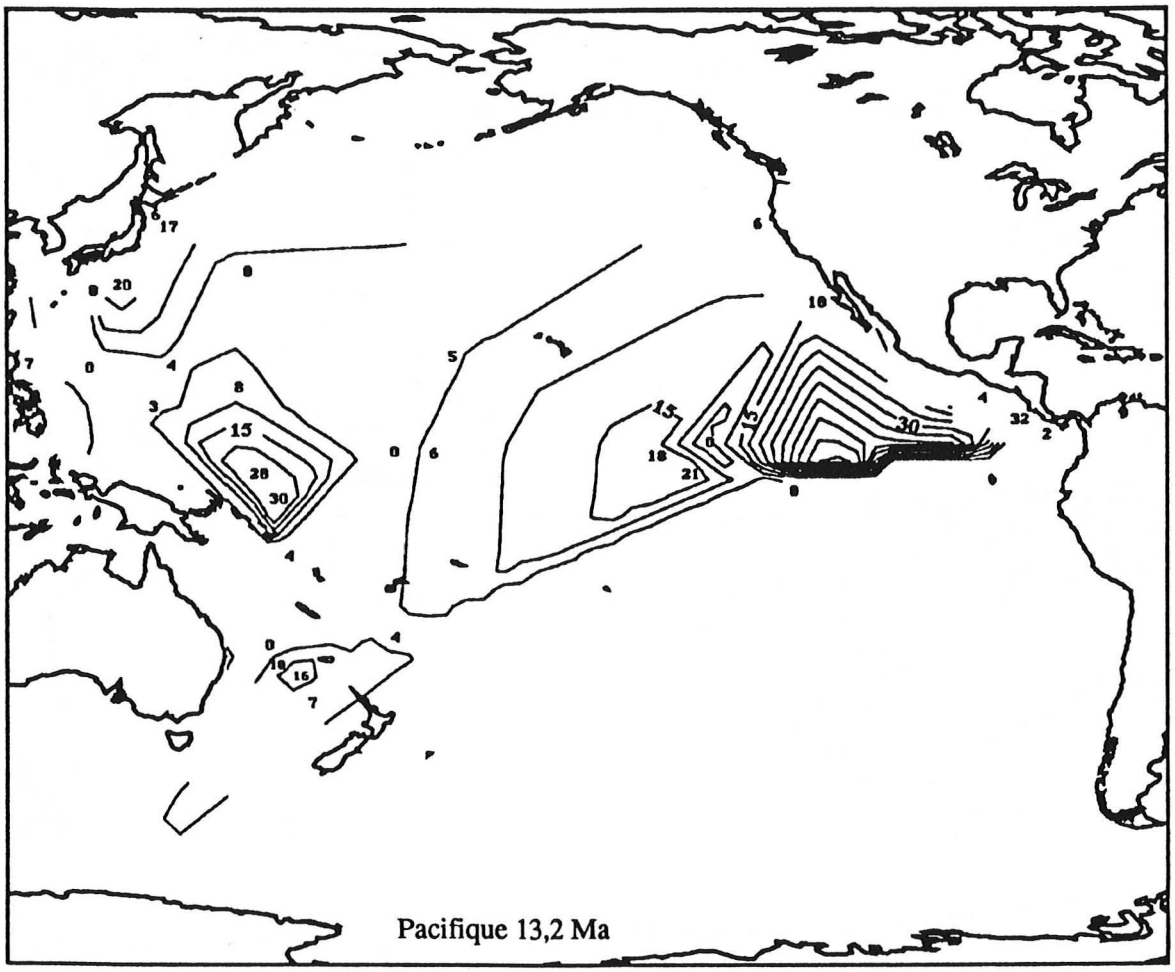
Pacifique 10 Ma



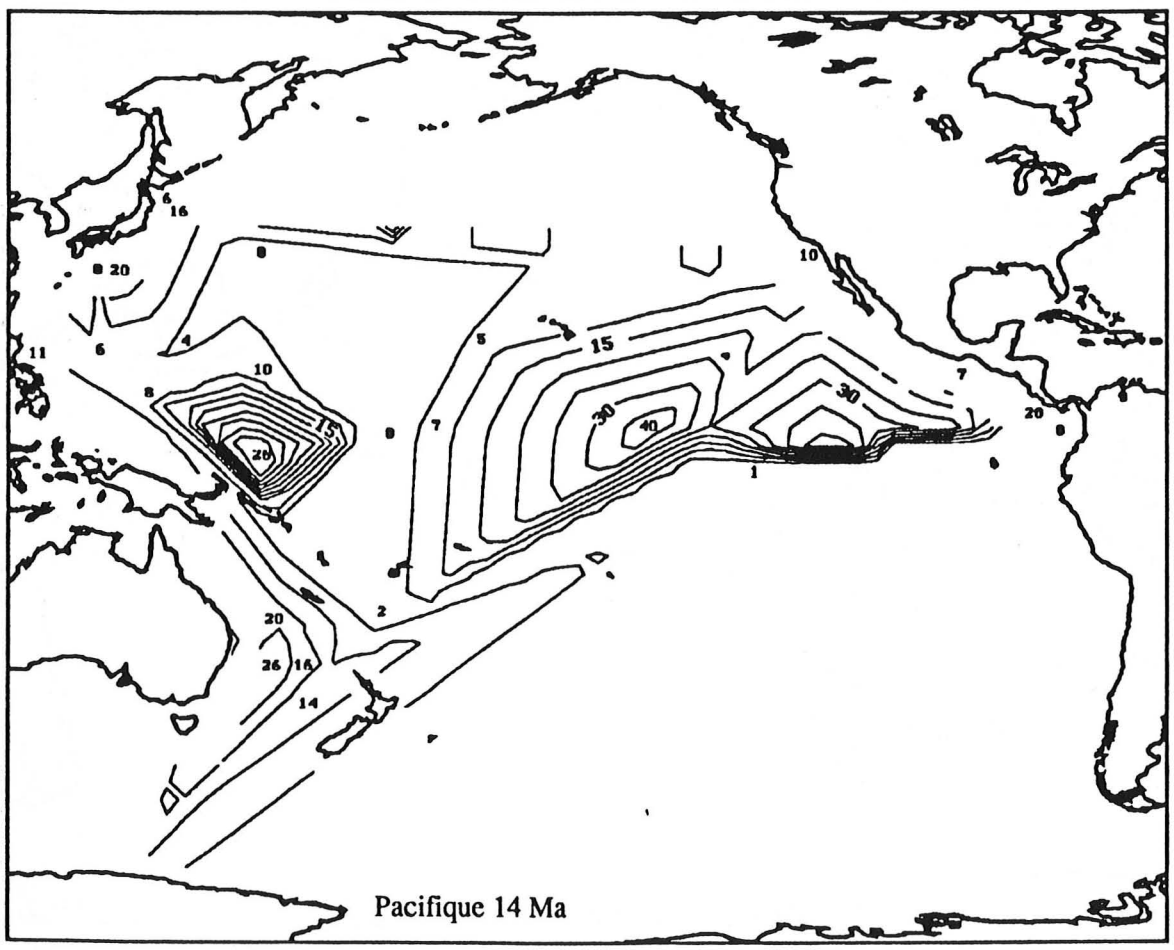
Pacifique 10,4 Ma


Pacifique 12 Ma

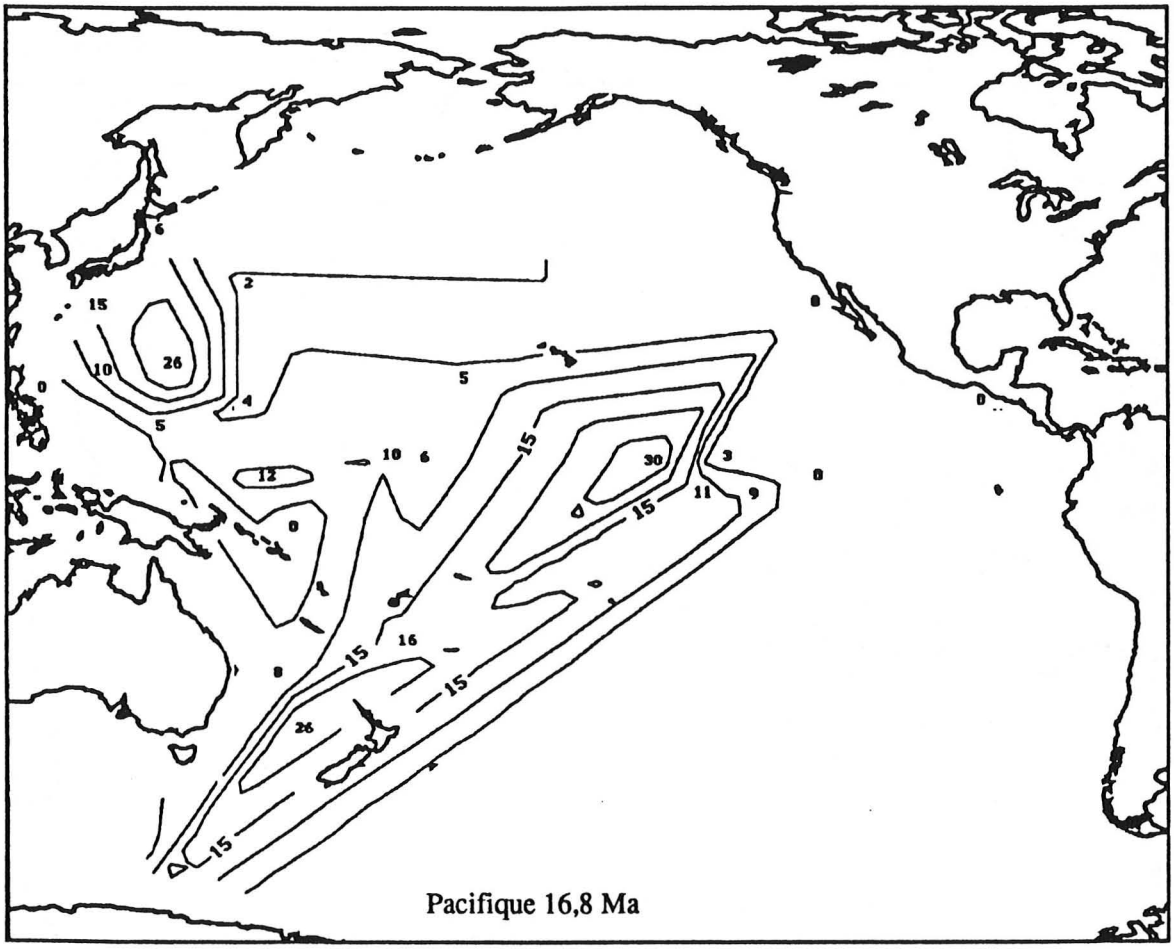

Pacifique 12,8 Ma



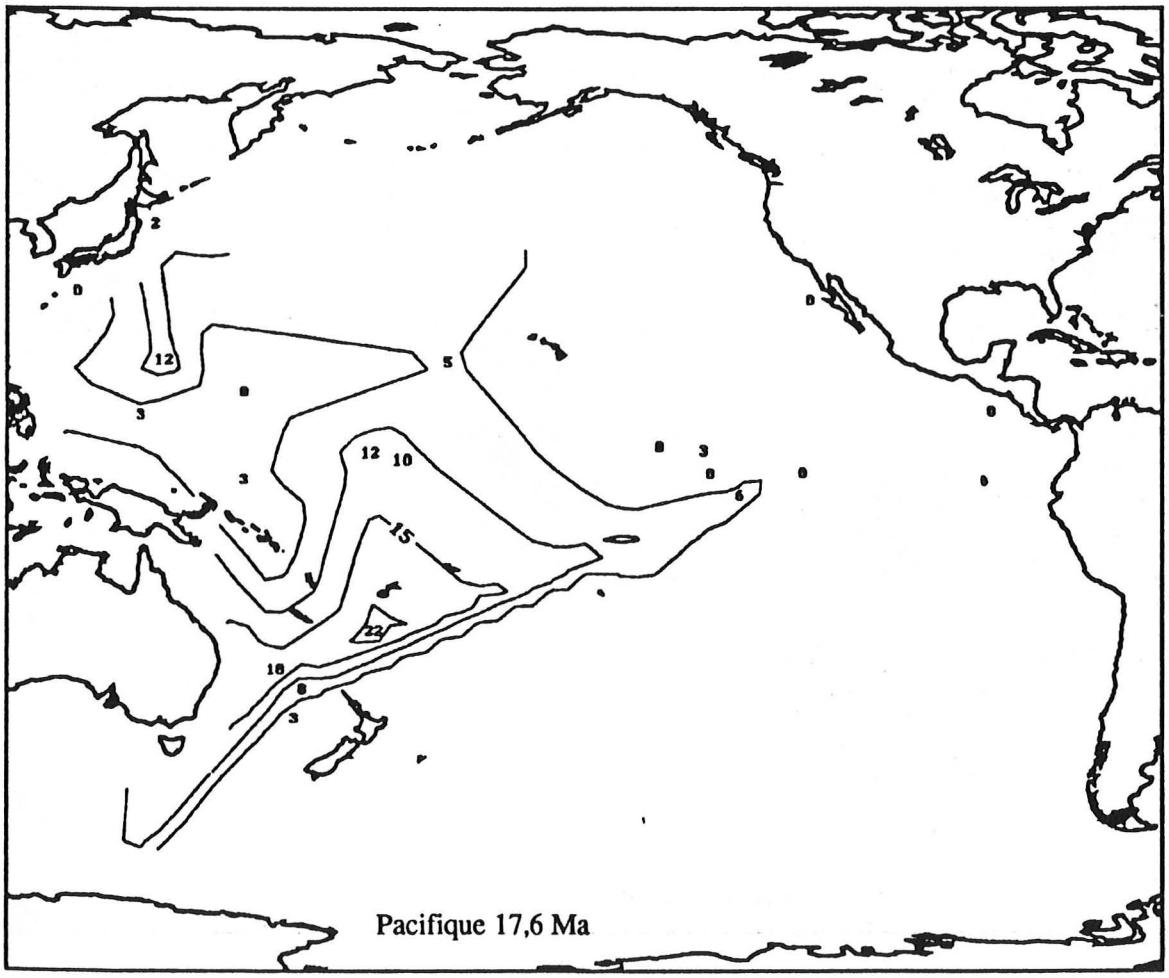
Pacifique 13,2 Ma



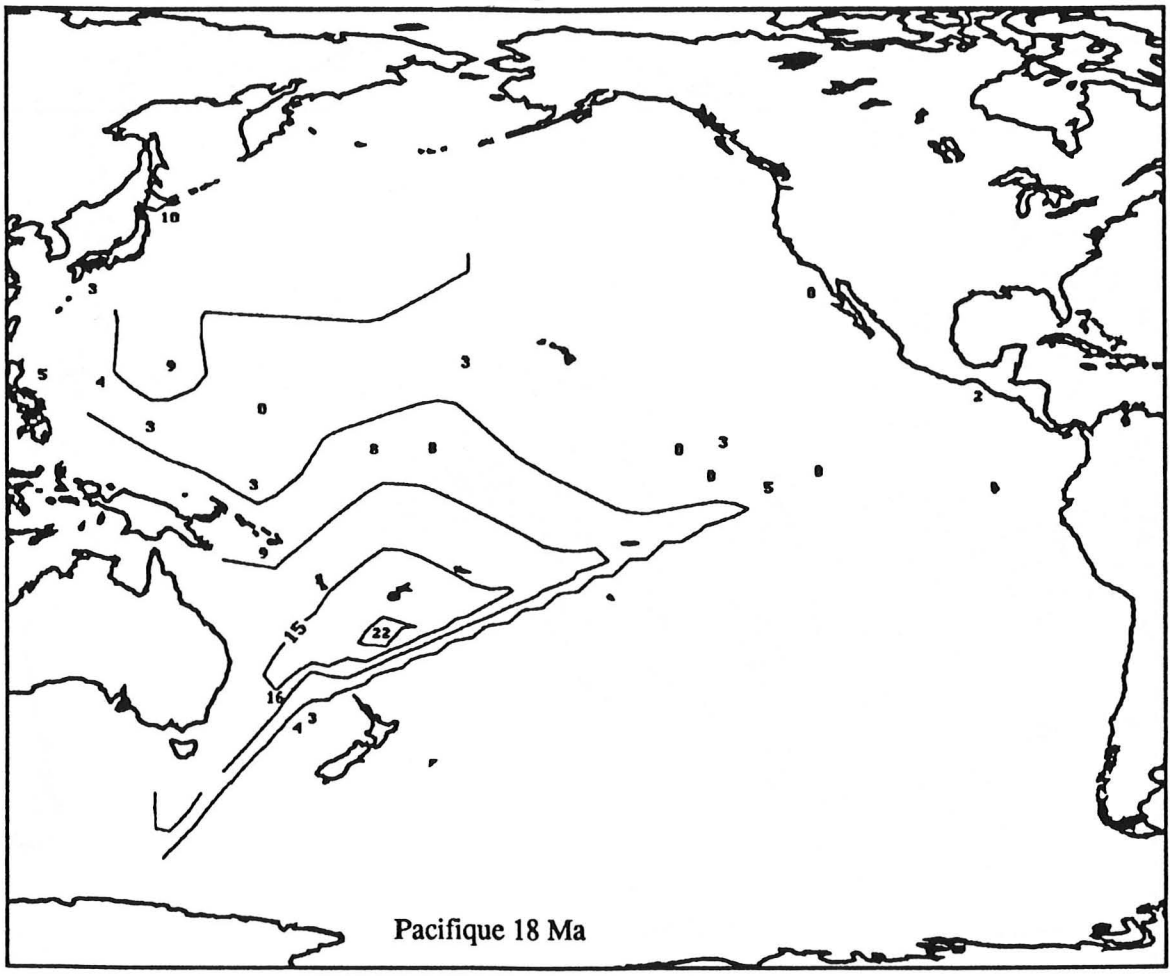
Pacifique 14 Ma



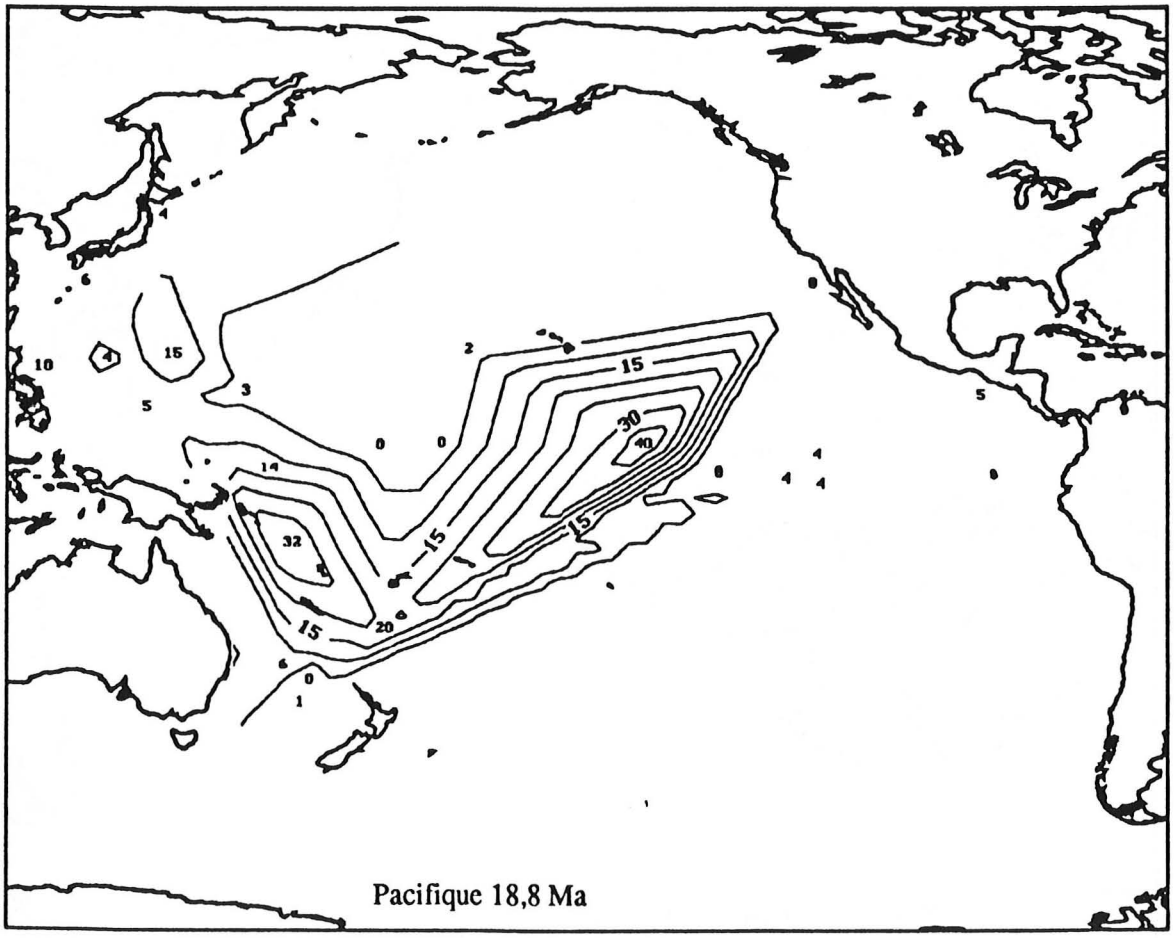
Pacifique 16,8 Ma



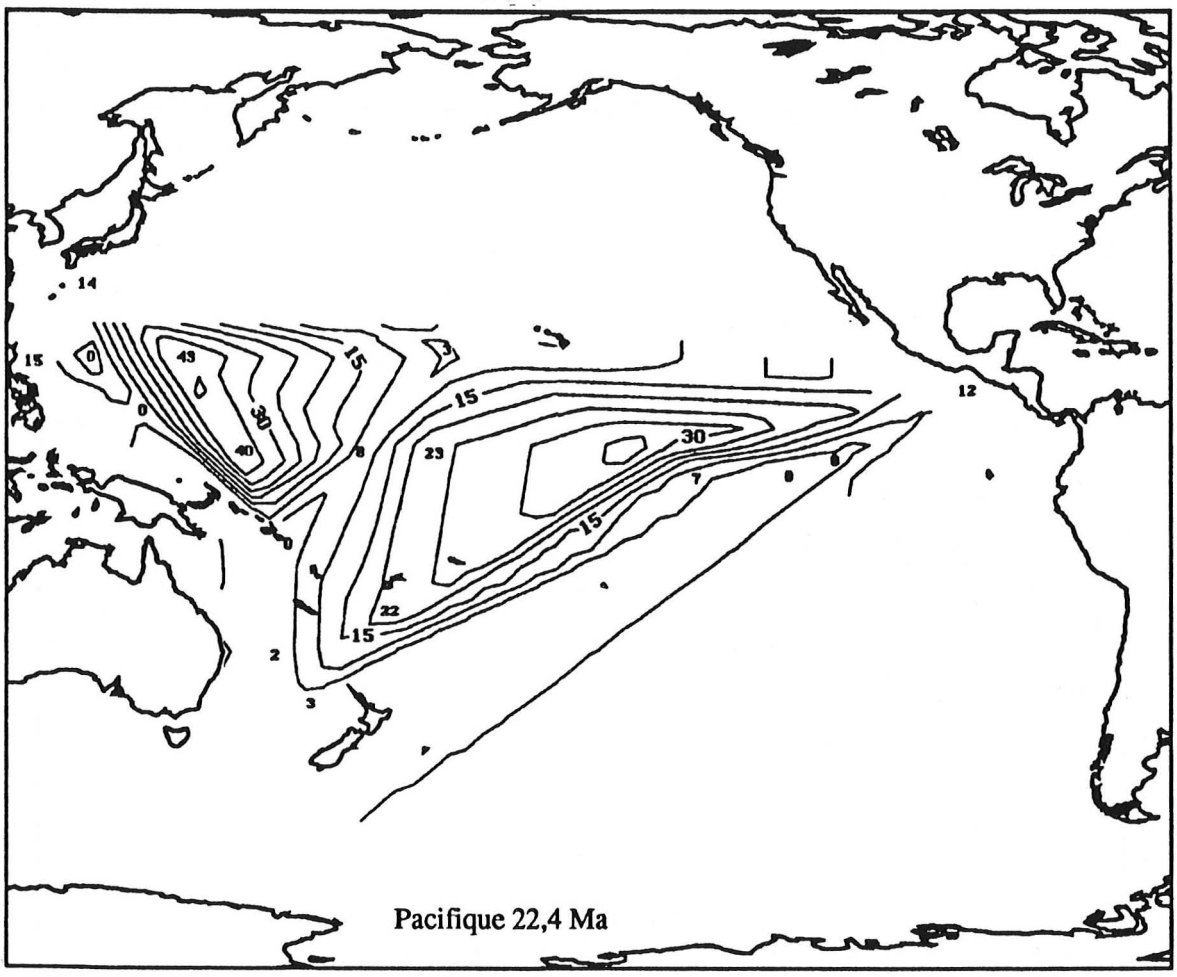
Pacifique 17,6 Ma



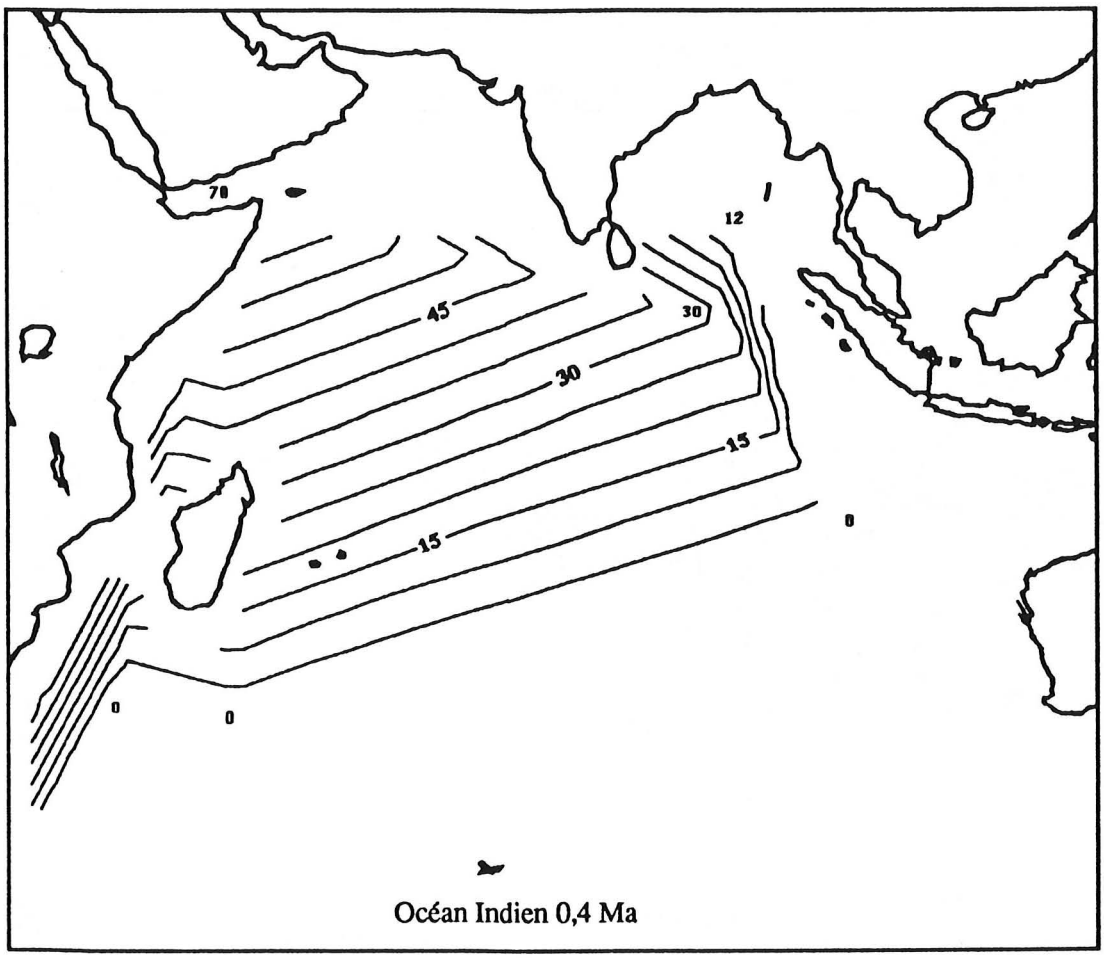
Pacifique 18 Ma



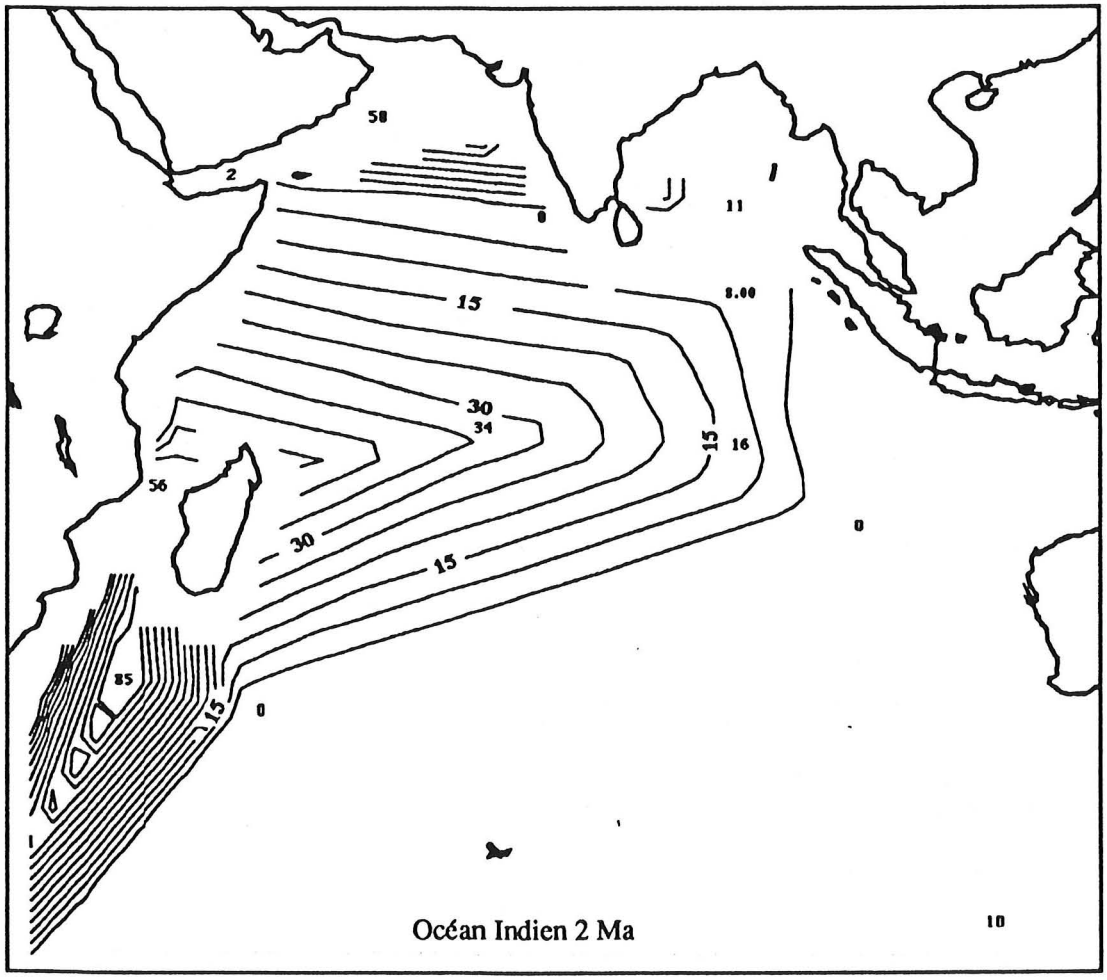
Pacifique 18,8 Ma



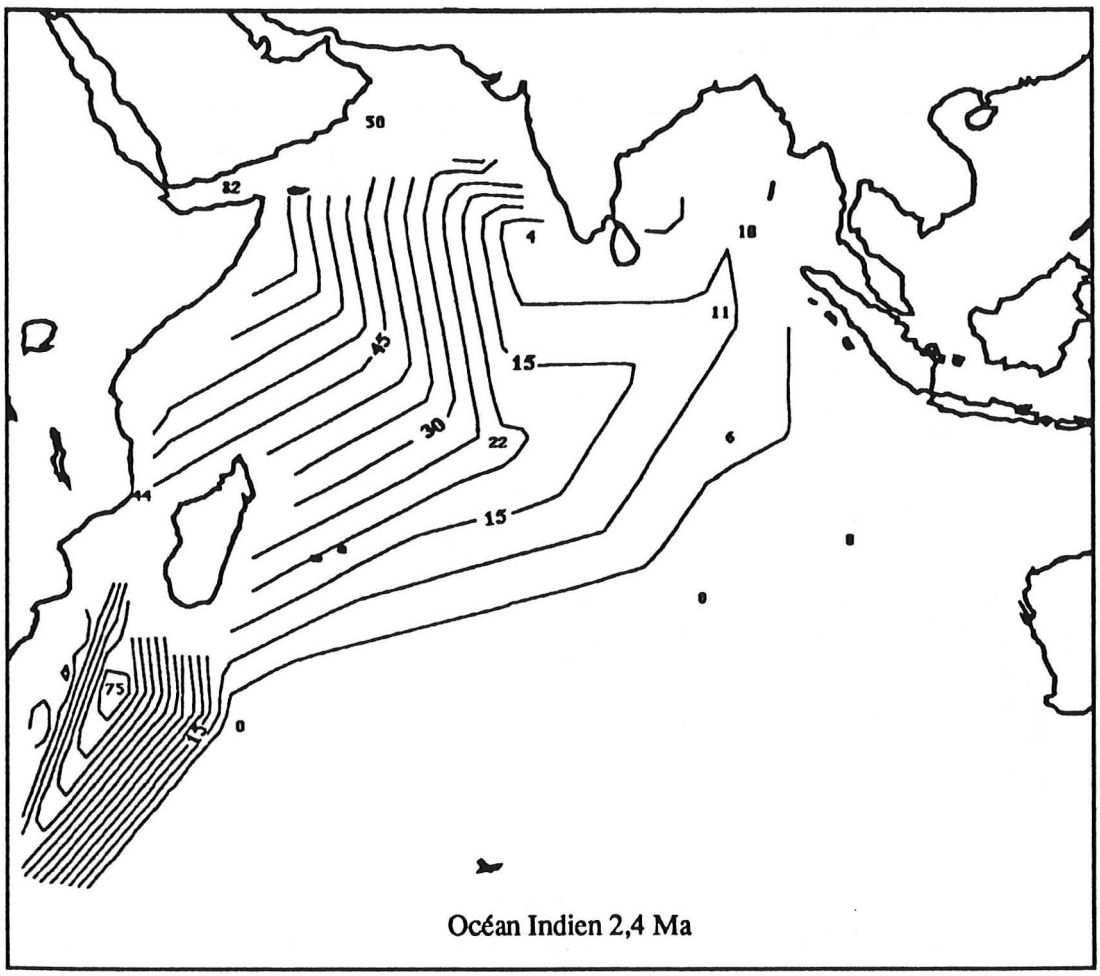
Pacifique 22,4 Ma



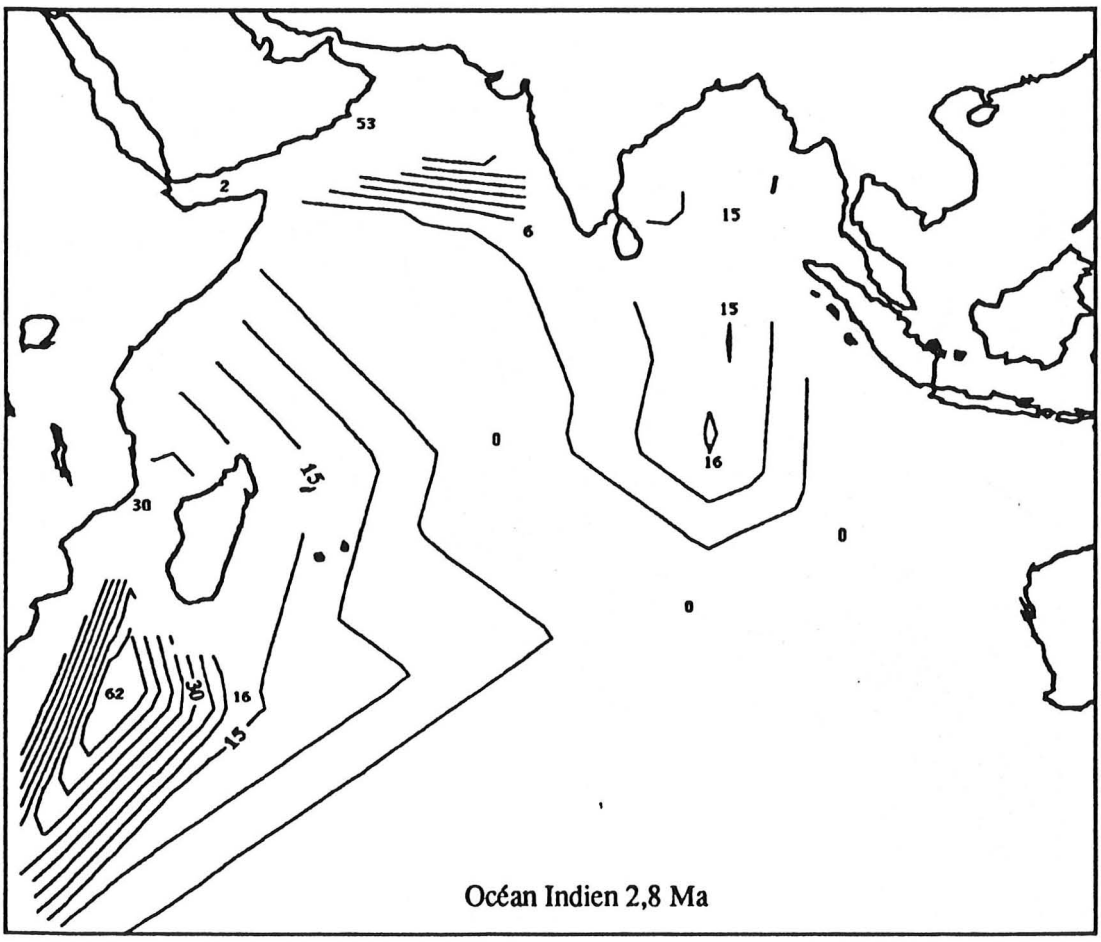
Océan Indien 0,4 Ma



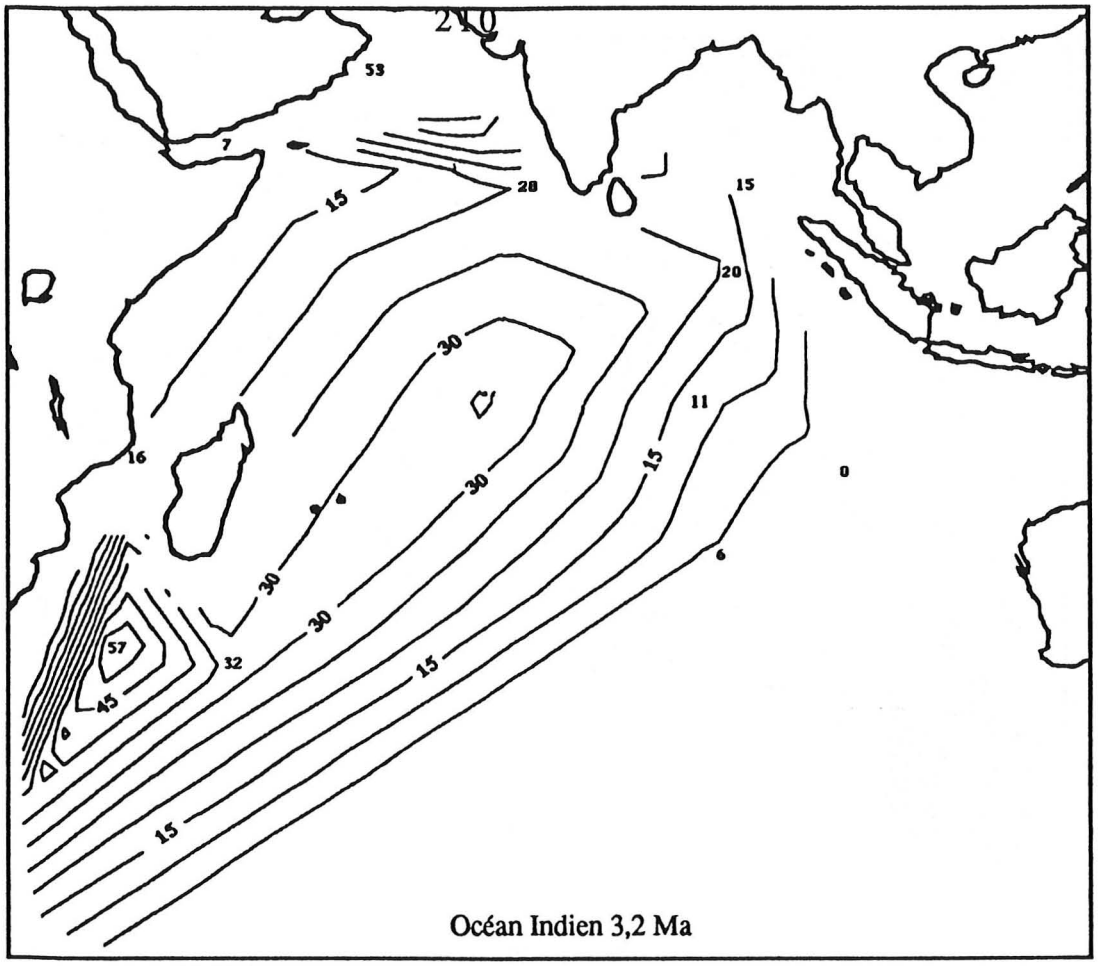
Océan Indien 2 Ma



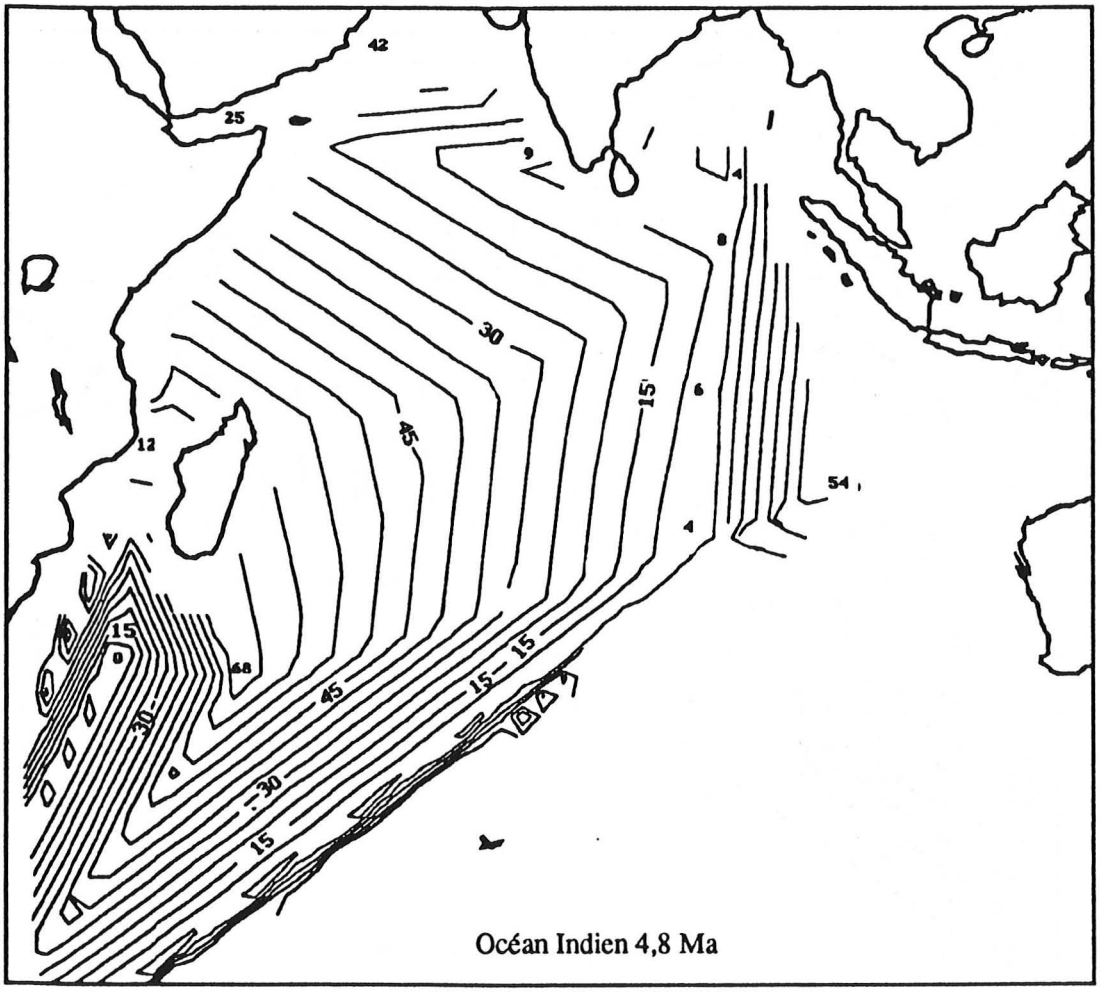
Océan Indien 2,4 Ma



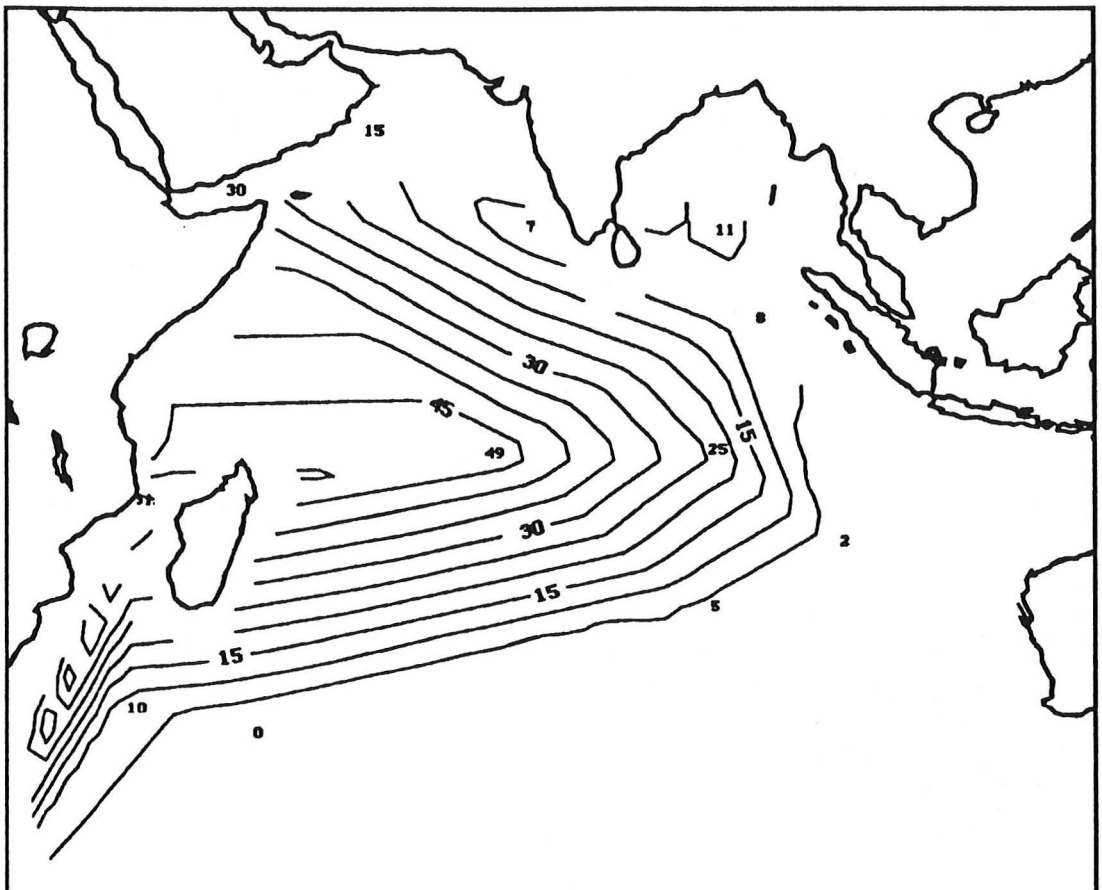
Océan Indien 2,8 Ma



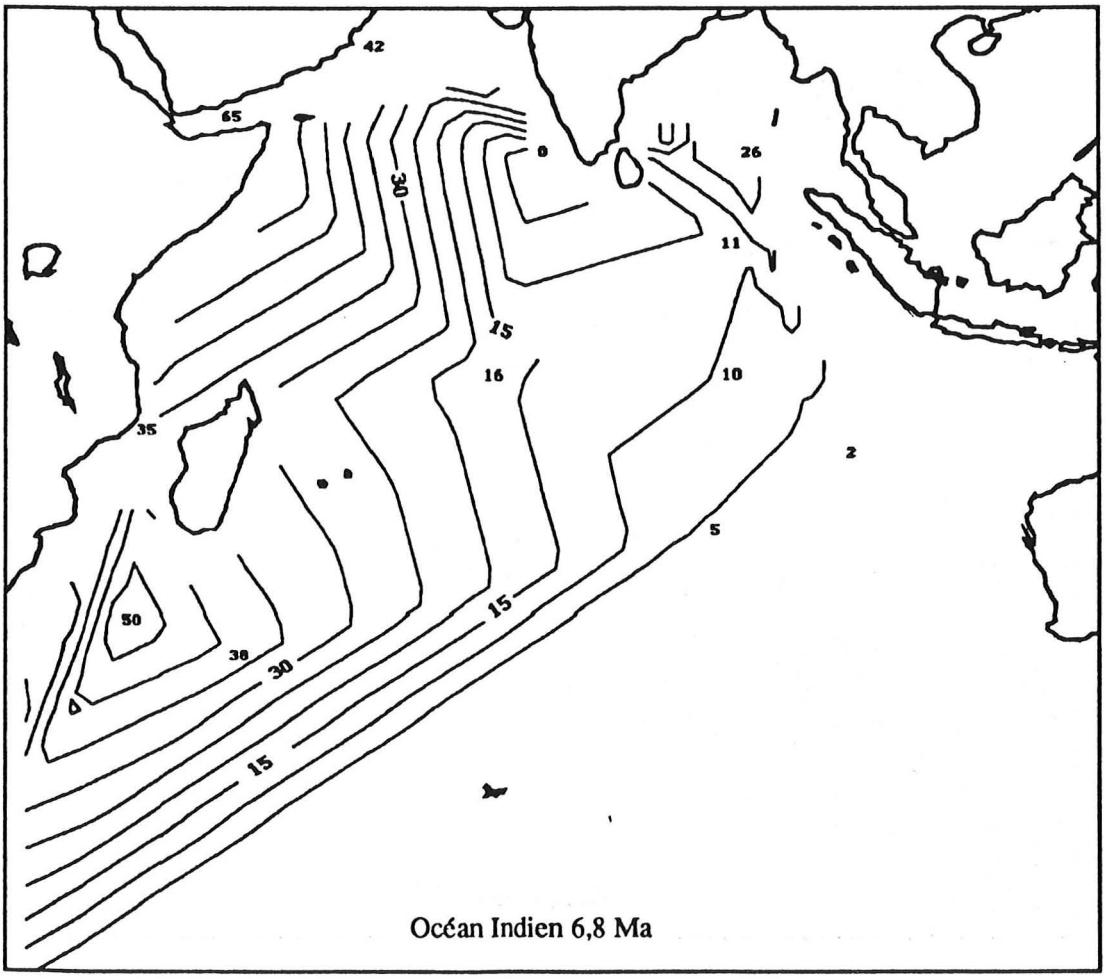
Océan Indien 3,2 Ma



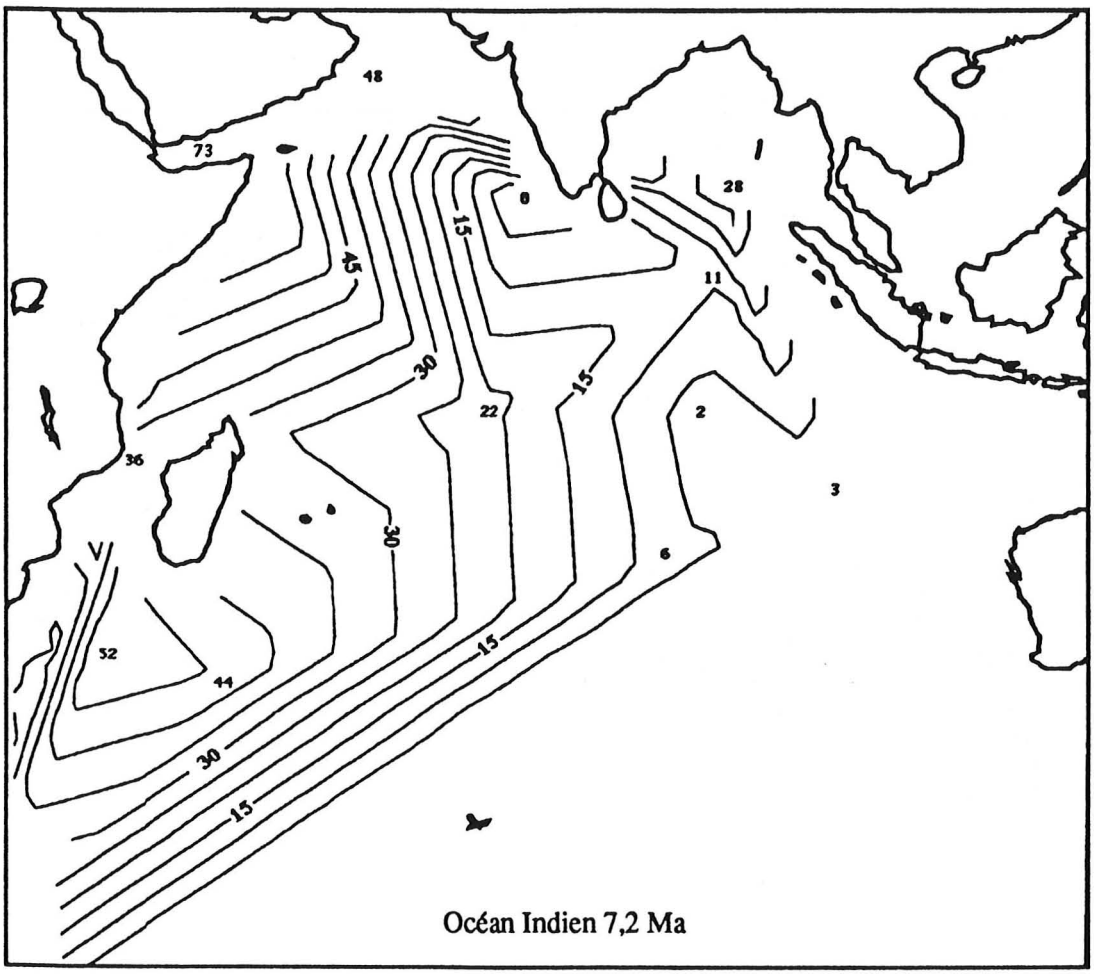
Océan Indien 4,8 Ma



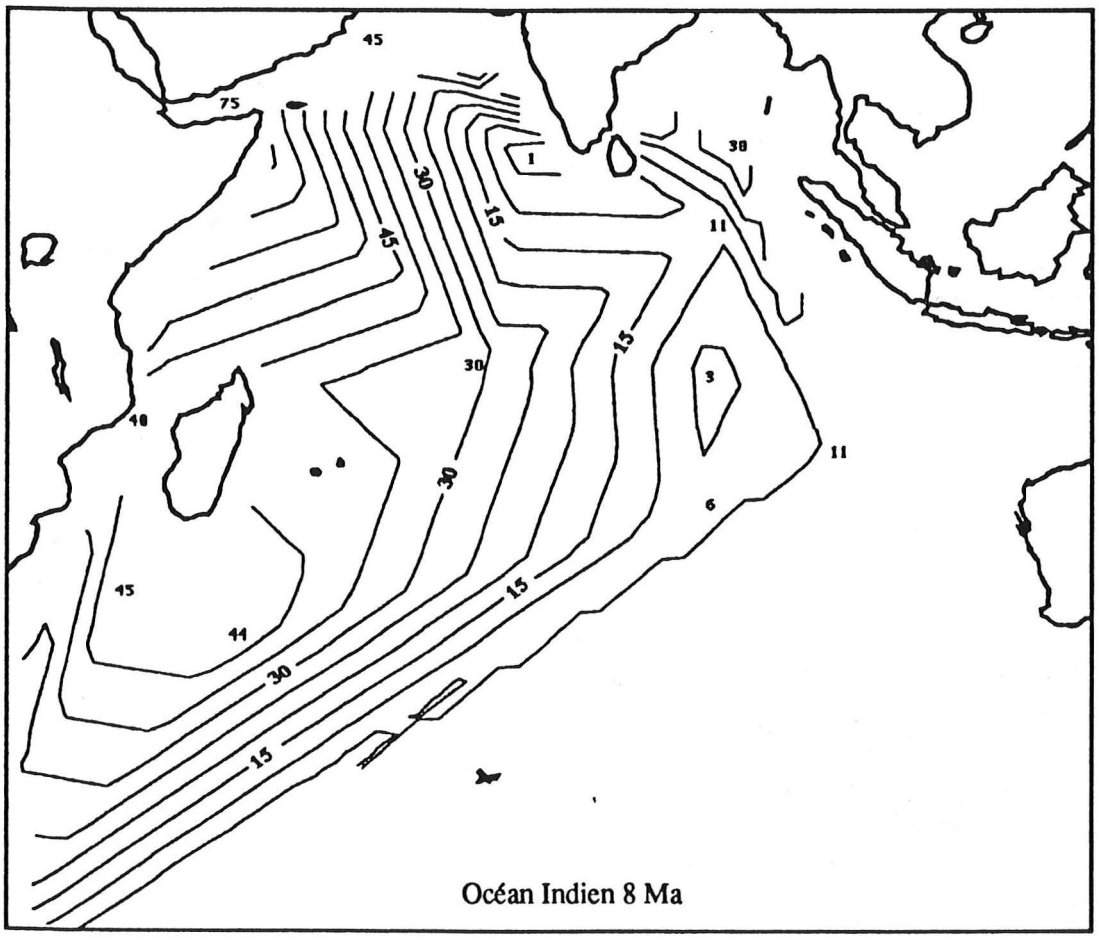
Océan Indien 5,6 Ma



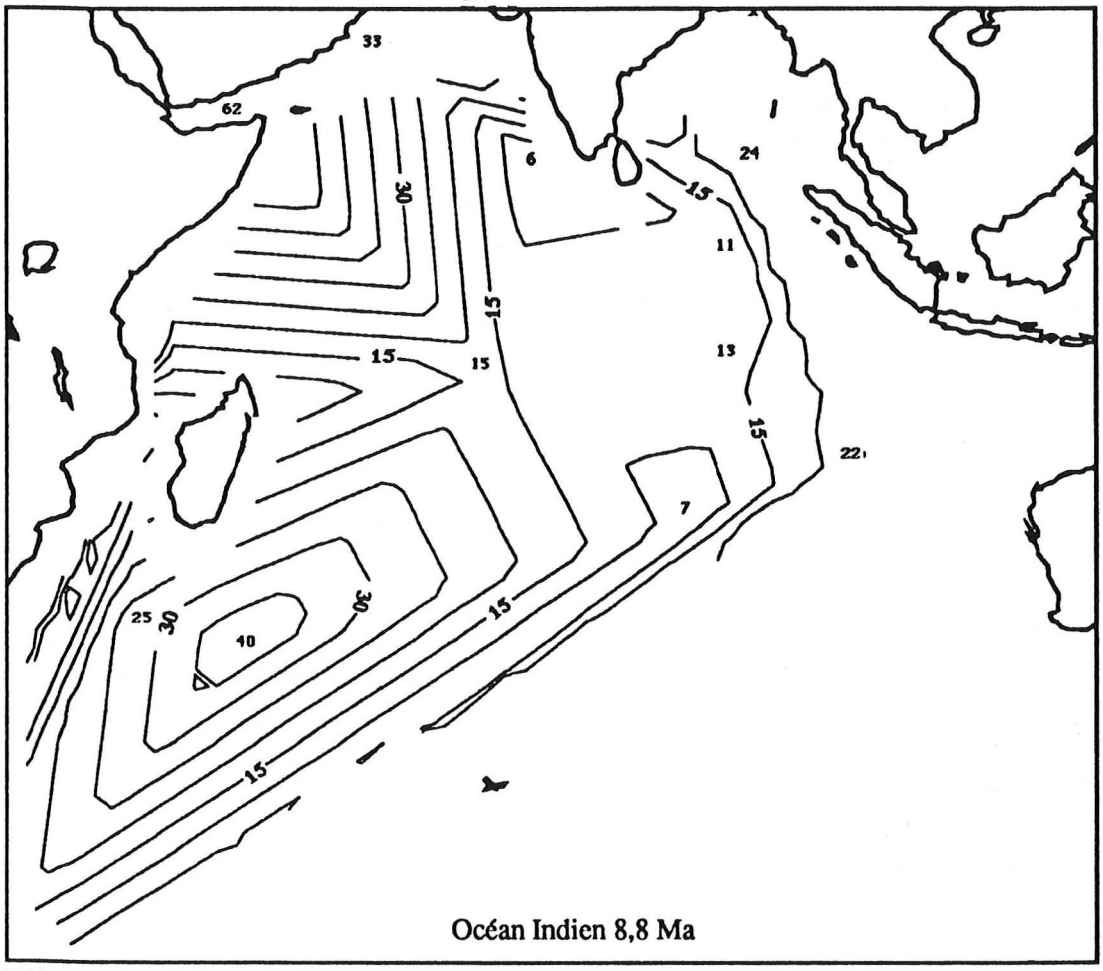
Océan Indien 6,8 Ma



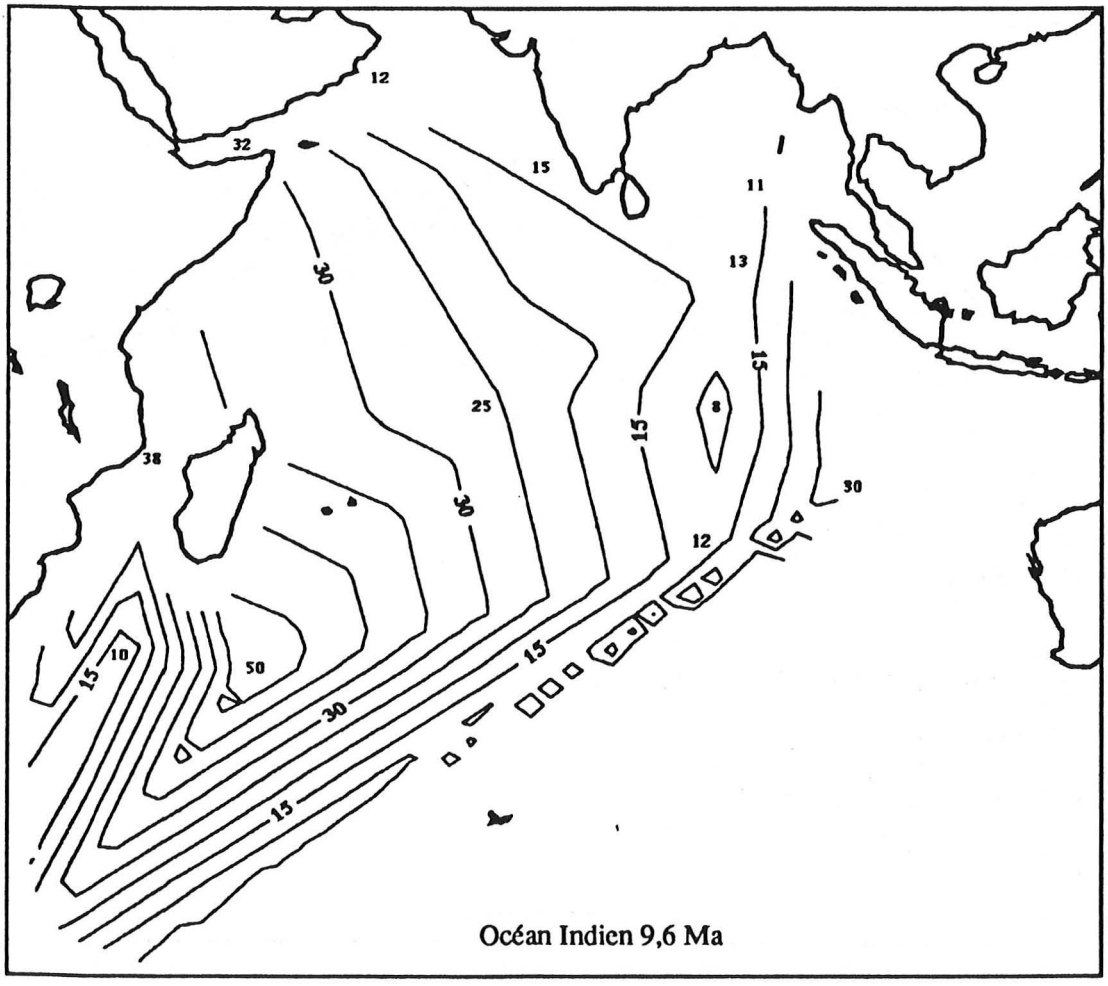
Océan Indien 7,2 Ma



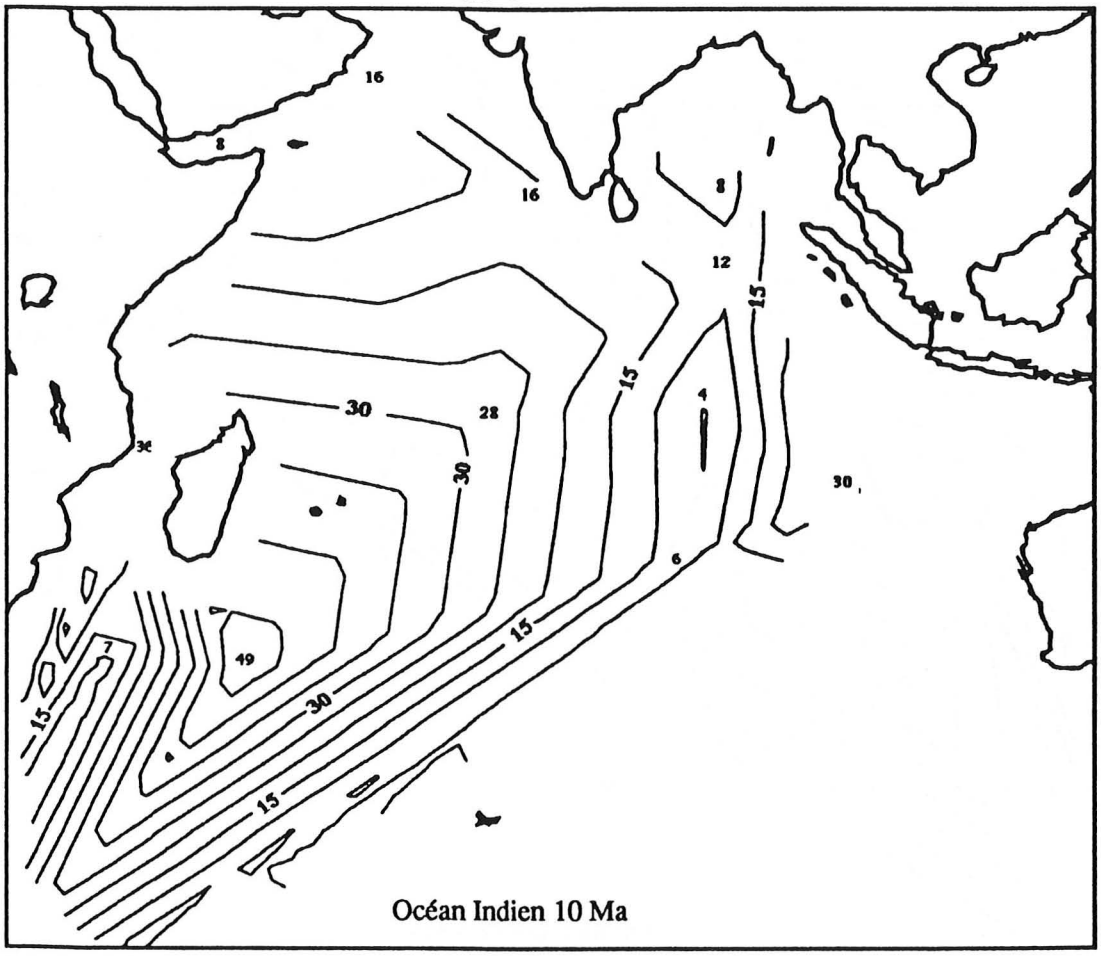
Océan Indien 8 Ma



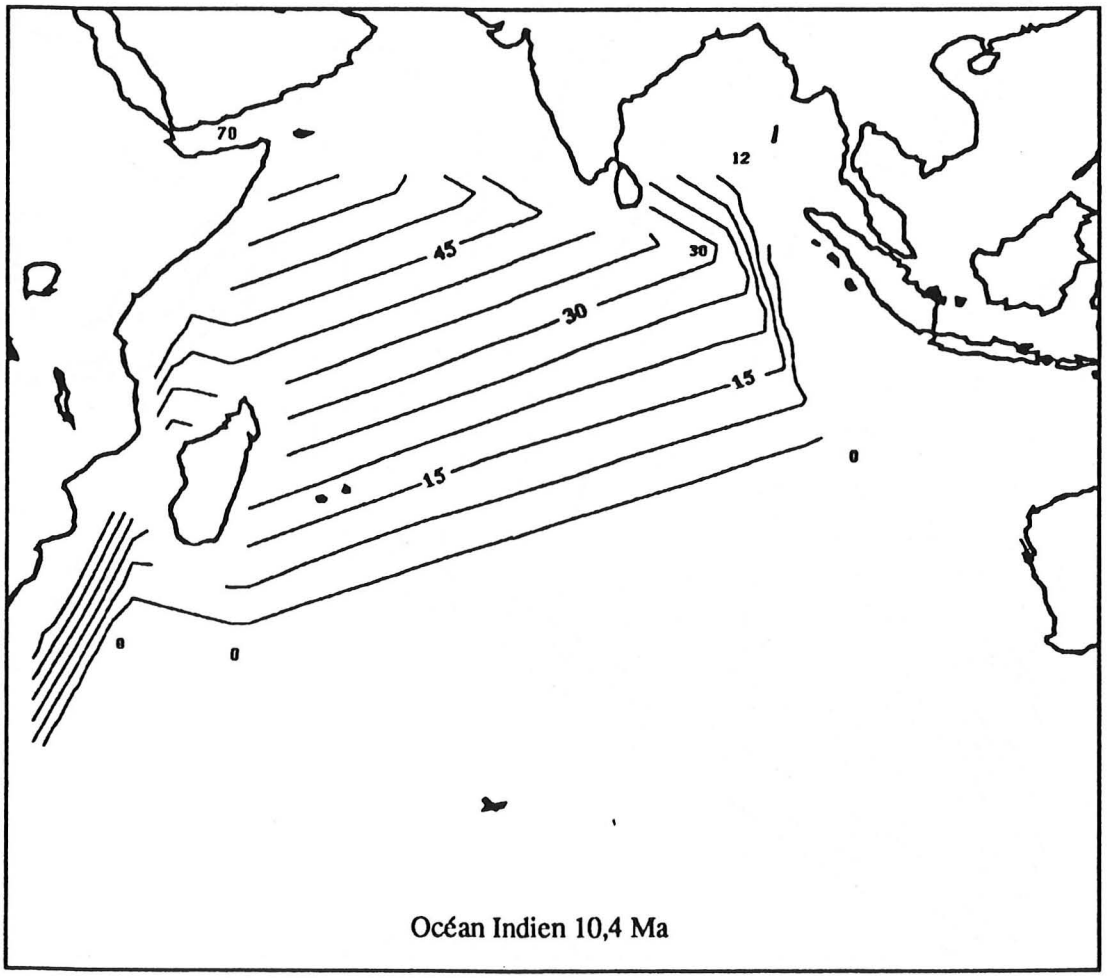
Océan Indien 8,8 Ma



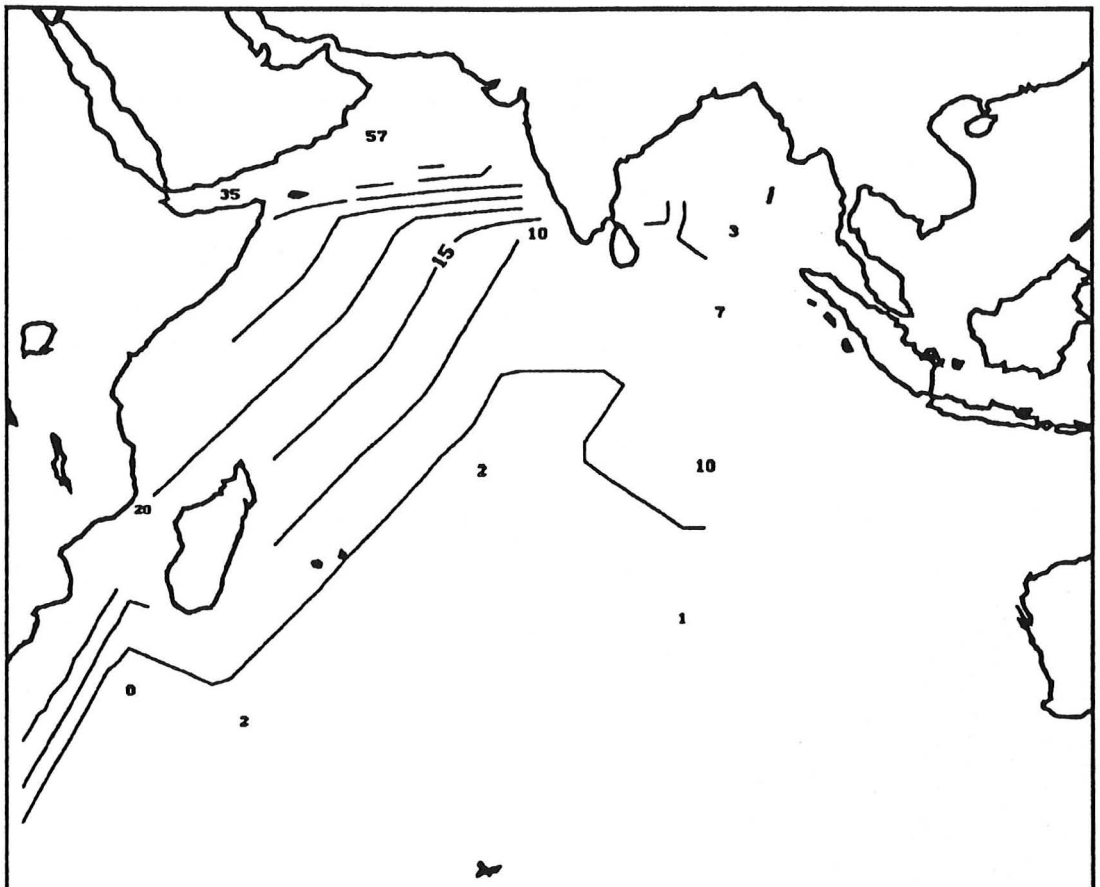
Océan Indien 9,6 Ma



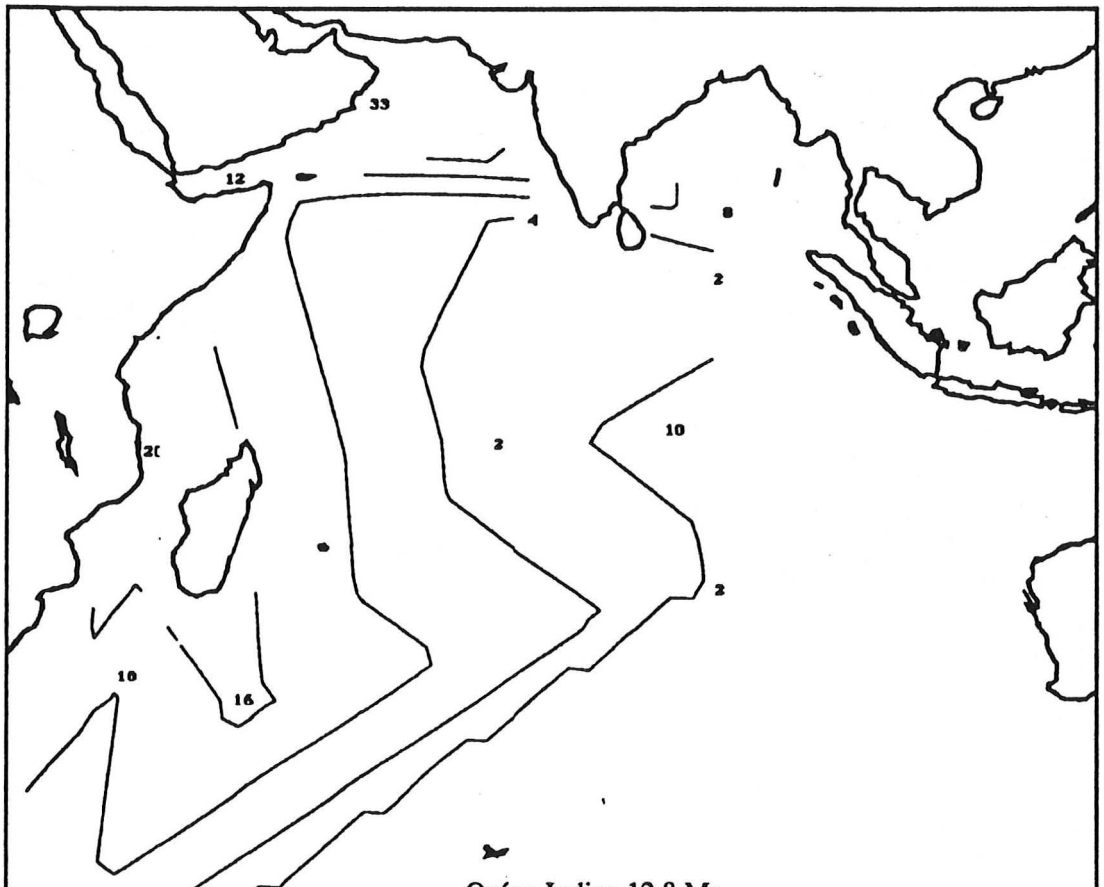
Océan Indien 10 Ma



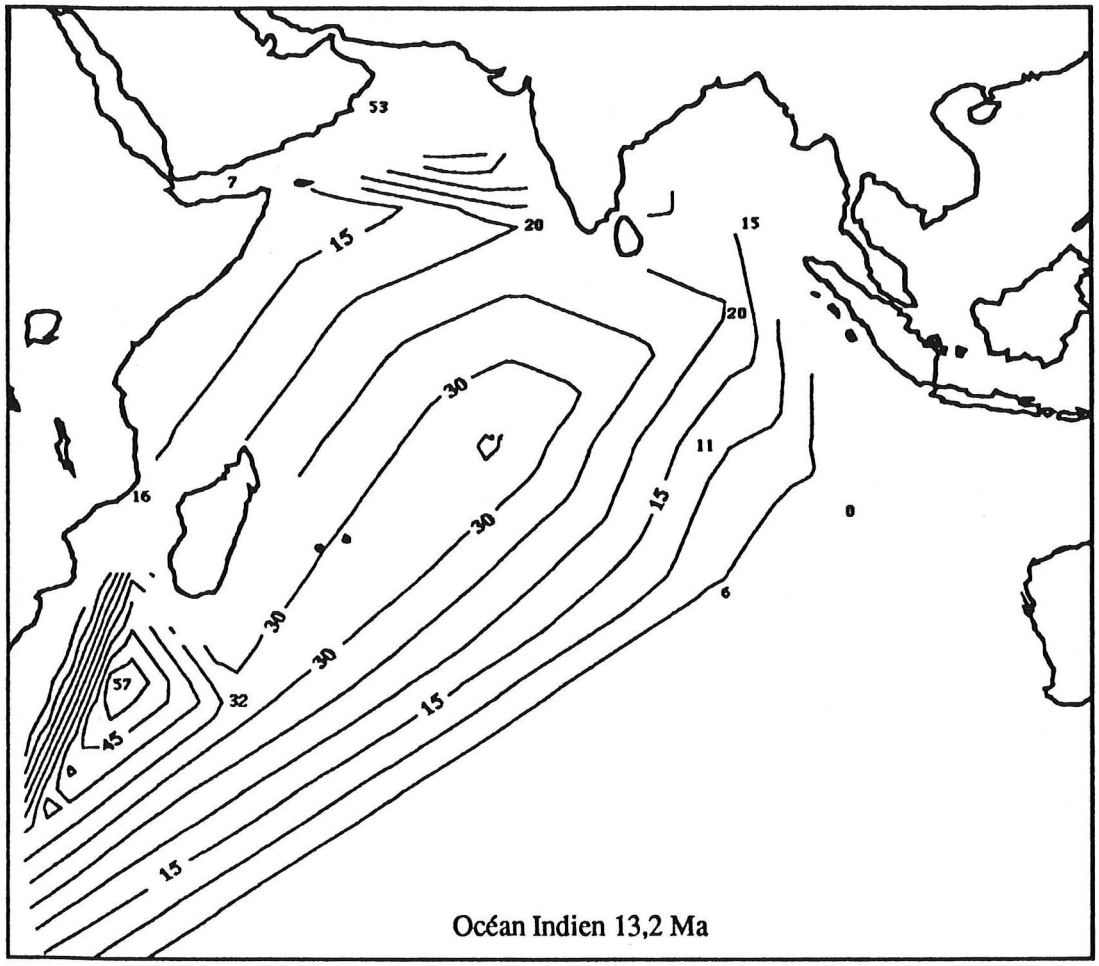
Océan Indien 10,4 Ma



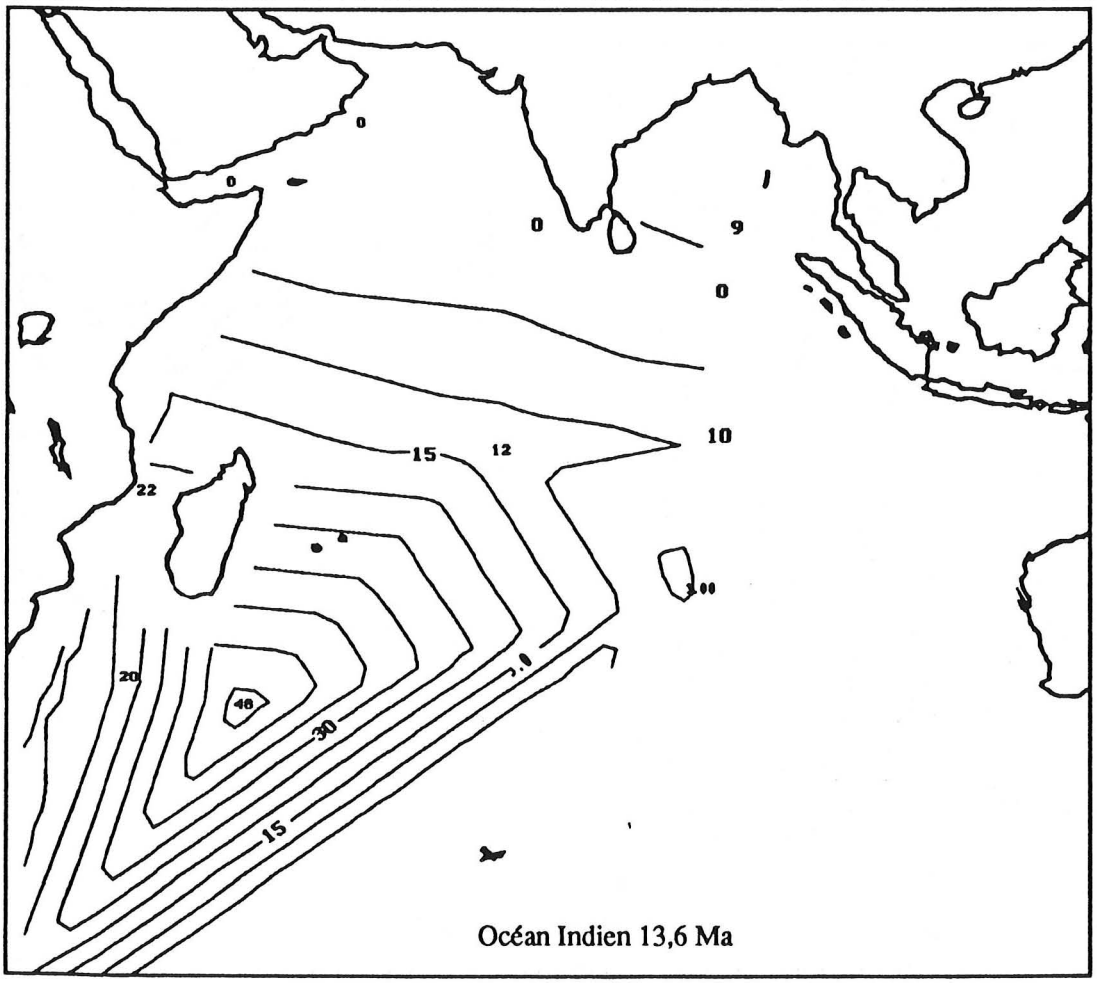
Océan Indien 12 Ma



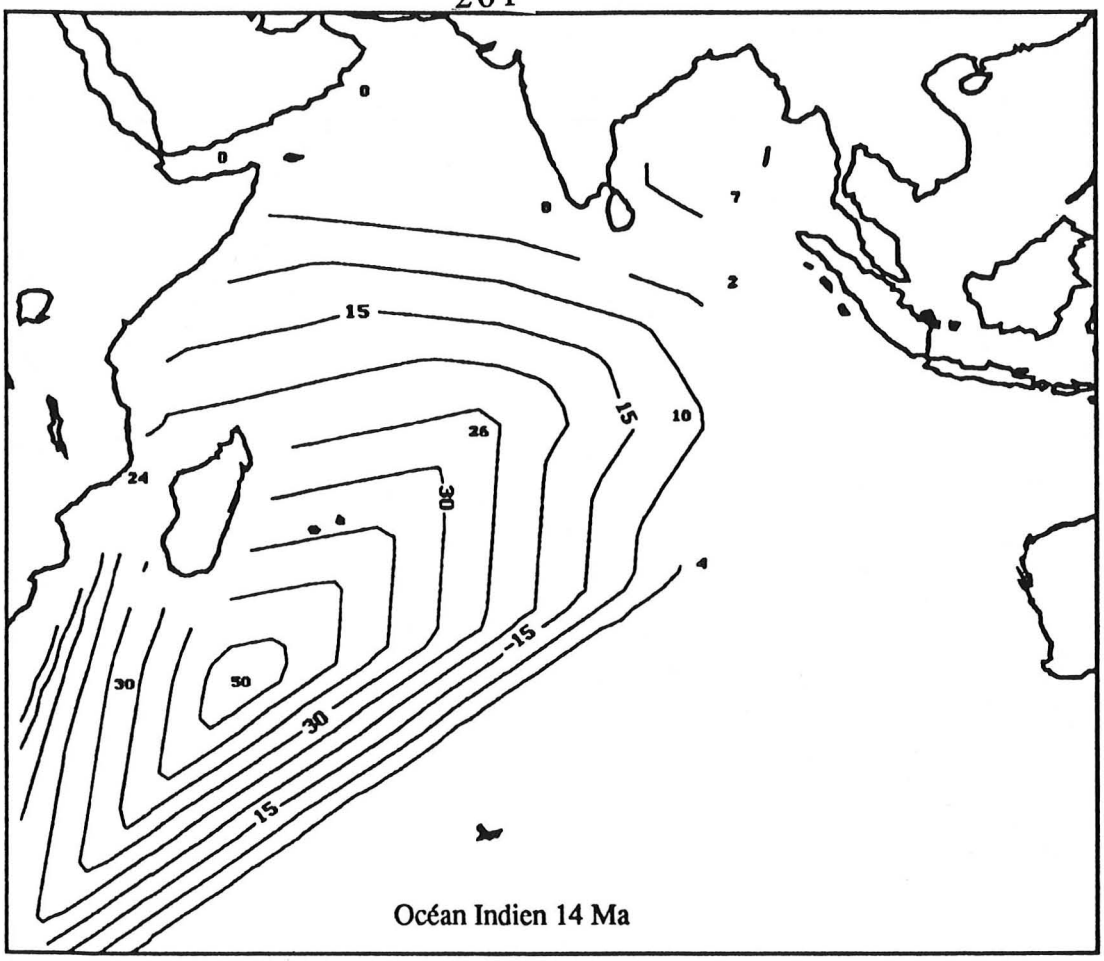
Océan Indien 12,8 Ma



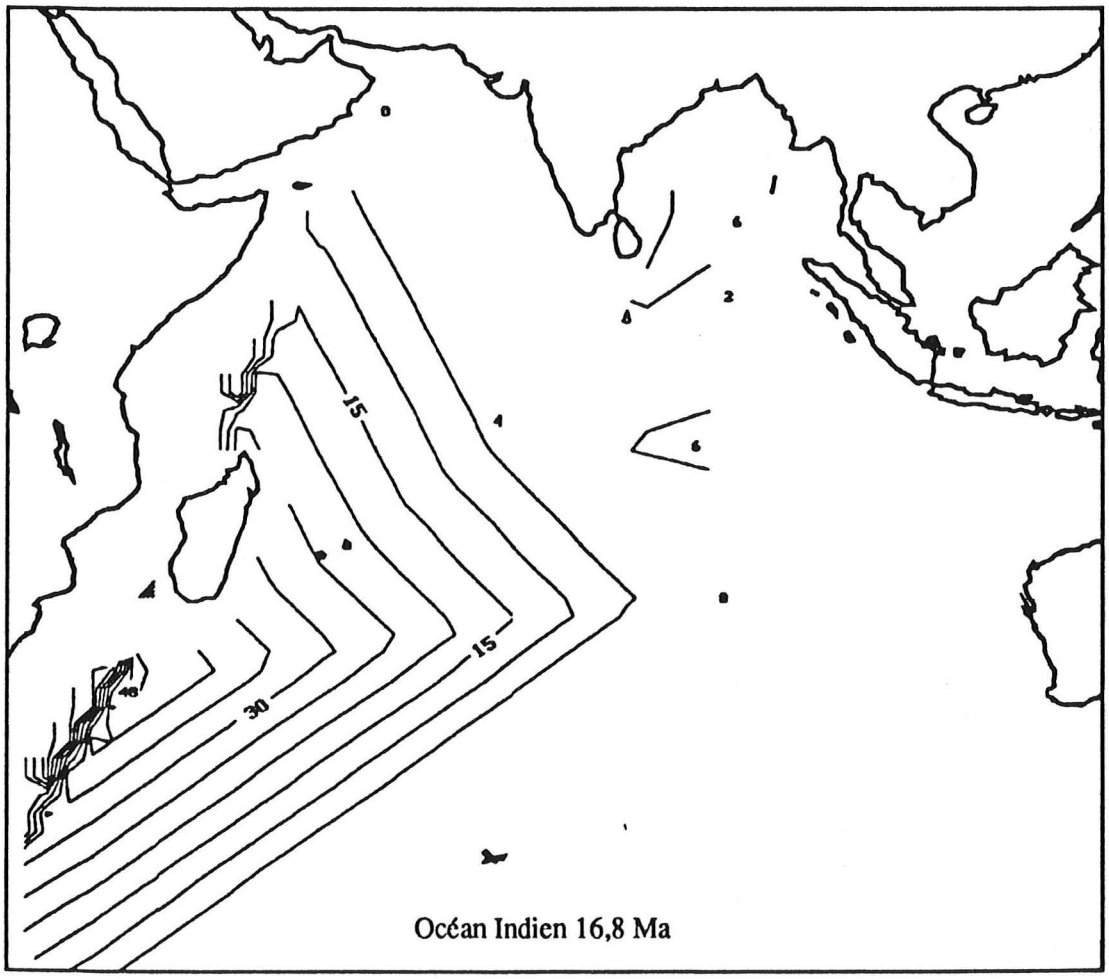
Océan Indien 13,2 Ma



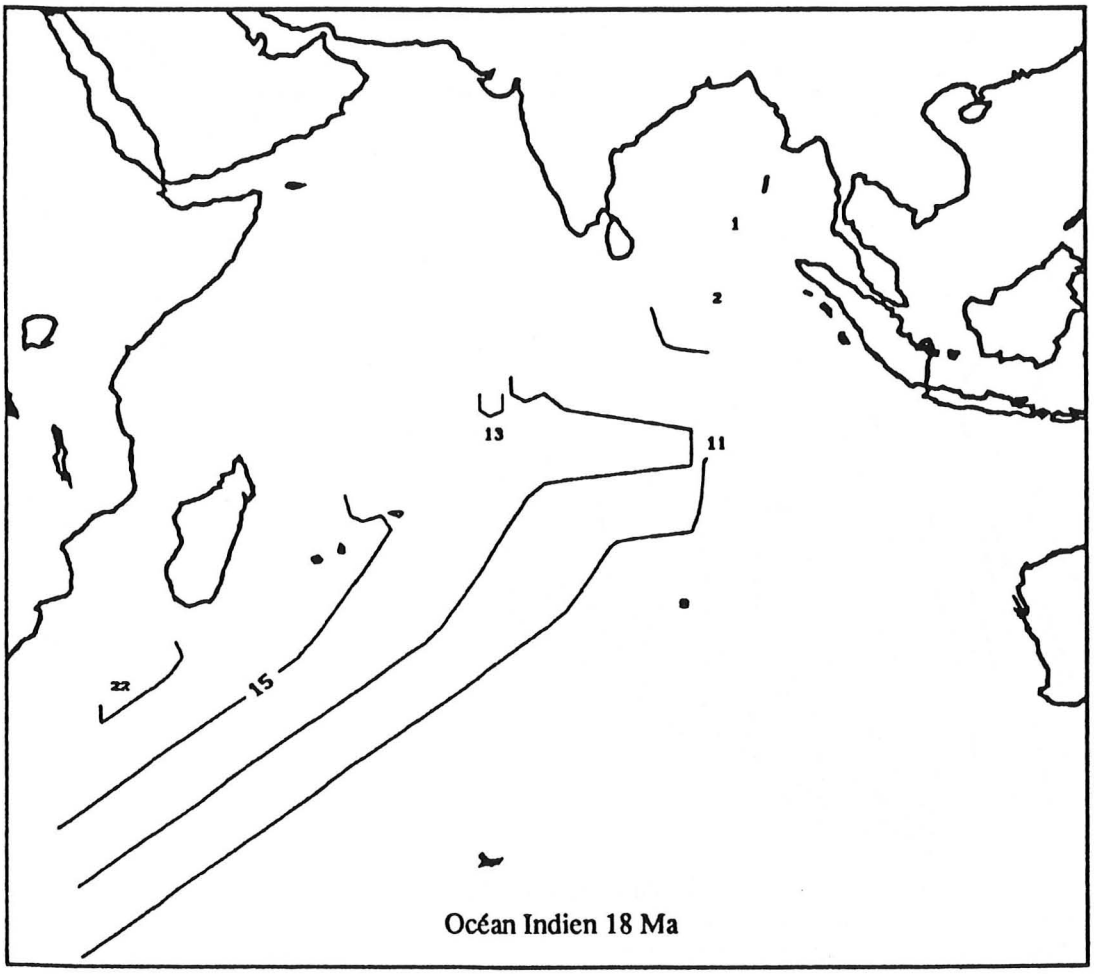
Océan Indien 13,6 Ma



Océan Indien 14 Ma



Océan Indien 16,8 Ma



Océan Indien 18 Ma

ANNEXE D.

Liste des espèces utilisées dans le tracé des courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation.

Les nannofossiles calcaires :

Amaurolithus amplificus
Amaurolithus delicatus
Amaurolithus primus
Amaurolithus tricorniculatus
Calcidiscus macinteyrei
Catinaster calyculus
Catinaster coalithus
Ceratolithus acutus
Ceratolithus rugosus
Discoaster asymmetricus
Discoaster berggrenii
Discoaster bollii
Discoaster brouweri
Discoaster druggii
Discoaster exilis
Discoaster hamatus
Discoaster kugleri
Discoaster neorectus
Discoaster pentaradiatus
Discoaster quinqueramus
Discoaster surculus
Discoaster tamalis
Discoaster triradiatus
Discoaster variabilis
Emiliania huxleyi
Gephyrocapsa aperta
Gephyrocapsa caribbeanica
Gephyrocapsa oceanica
Helicosphaera ampliaperta
Helicosphaera sellii
Pseudoemiliania lacunosa
Reticulofenestra bisecta
Reticulofenestra pseudoumbilica
Sphenolithus abies
Sphenolithus belemnos
Sphenolithus ciperoensis
Sphenolithus heteromorphus
Sphenolithus neoabies
Triquetrorhabdulus carinatus
Triquetrorhabdulus rugosus

Les foraminifères planctoniques :

Catapsydrax dissimilis
Catapsydrax stainforthi
Dentoglobigerina altispira
Globigerina angulisuturalis
Globigerina nepenthes
Globigerinatella insueta
Globigerinoides bisphericus
Globigerinoides conglobatus
Globigerinoides diminutus
Globigerinoides fistulosus
Globigerinoides mitra
Globigerinoides obliqus extremus
Globigerinoides quadrilobatus immaturus
Globigerinoides sicanus
Globoquadrina dehiscens
Globoquadrina globularis
Globorotalia acrostoma
Globorotalia archaeomenardii
Globorotalia conomiozea
Globorotalia fohsi lobata
Globorotalia fohsi praefohsi
Globorotalia fohsi robusta
Globorotalia inflata
Globorotalia kugleri
Globorotalia lenguaensis
Globorotalia margaritae
Globorotalia mayeri
Globorotalia menardii
Globorotalia mendacis
Globorotalia merotumida
Globorotalia miocenica
Globorotalia miozea
Globorotalia peripheroacuta
Globorotalia peripheroronda
Globorotalia plesiotumida
Globorotalia praescitula
Globorotalia siakensis
Globorotalia tosaensis
Globorotalia truncatulinoides
Globorotalia tumida
Globorotalia zealandica
Globorotalia zealandica incognita
Neogloboquadrina acostaensis
Neogloboquadrina humerosa
Orbulina suturalis
Pulleniatina primalis
Sphaeroidinella dehiscens
Sphaeroidinellopsis seminulina

Les radiolaires :

Acrobothrys tritubus
Artophormis gracilis
Calocycletta costata
Calocycletta serrata
Calocycletta virginis
Cyclampterium leptetrum
Cyclampterium pegetrum
Cyrtocapsella cornuta
Cyrtocapsella tetrapera
Diartus hughesi
Diartus pettersoni

Didymocyrtis laticonus
Didymocyrtis prismatica
Didymocyrtis tubaria
Didymocyrtis violina
Dorcadospyris alata
Dorcadospyris ateuchus
Dorcadospyris dentata
Dorcadospyris forcipata
Dorcadospyris papilio
Liriospyris stauropora
Lithopera neotera
Lychnocanoma elongata
Stichocorys delmontensis
Stichocorys wolfii
Theocyrtis annosa

Les diatomées :

Actinocyclus moronensis
Actinocyclus radionovae
Anaulus californicus
Asterolampra acutiloba
Borogovia veniamini
Cestodiscus peplum
Coscinodiscus lewisianus
Coscinodiscus oligocenicus
Coscinodiscus temperei delicata
Coscinodiscus tuberculatus
Coscinodiscus yabei
Craspedodiscus coscinodiscus
Craspedodiscus elegans
Denticulopsis nicobarica
Denticulopsis punctata hustedtii
Hemidiscus cuneiformis
Nitzschia jousae
Nitzschia malinterpretaria
Nitzschia miocenica
Nitzschia porteri
Rossiella paleacea
Thalassiosira buckryi
Thalassiosira burckliana
Thalassiosira convexa aspinosa
Thalassiosira fraga
Thalassiosira miocenica
Thalassiosira oestrupii
Thalassiosira praeconvexa
Thalassiosira primalabiata

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Les trois niveaux de l'élaboration d'une base de données ---------- 7

Figure 2 - Descriptif associé à la valeur "*Planorotalites pseudomenardii* " ---------- 8

Figure 3 - Les trois cycles de la démarche de MERISE ---------- 10

Figure 4 - Schéma des principales étapes de la méthode MERISE ---------- 10

Figure 5 - Exemple de base de données hiérarchique en systématique ---------- 11

Figure 6 - Visualisation de la base de données "MINERAL" ---------- 13

Figure 7 - Approche descendante de développement pour les SGBDR de première génération ---------- 16

Figure 8 - Approche ascendante de développement pour les SGBDR de deuxième génération ---------- 16

Figure 9 - Exemple d'une forme obtenue avec le module VIFRED de INGRES ---------- 18

Figure 10 - Estimation des ventes de DON dans le monde (en milliers d'unités) ---------- 24

Figure 11 - Principe de fonctionnement du DON ---------- 25

Figure 12 - Comparaison entre divers types de supports de stockages ---------- 26

Figure 13 - Structure du premier volume de la base de données du D.S.D.P. sur DON ---------- 27

Figure 14 - Structure du répertoire SITES ---------- 28

Figure 15 - Structure du deuxième volume de la base de données du D.S.D.P. sur DON ---------- 28

Figure 16 - Menu principal pour les extractions des données du volume I ---------- 29

Figure 17 - Sélection d'une aire géographique où s'effectuera l'extraction ---------- 30

Figure 18 - Données disponibles pour chaque forage de la sélection ---------- 30

Figure 19 - Sélection d'un forage ---------- 30

Figure 20 - Sélection d'un type de données ---------- 31

Figure 21 - Sélection d'un groupe fossile ---------- 31

Figure 22 - Sélection de l'option "COPY" permettant de copier les données extraites dans un fichier --- 32

Figure 23 - Choix du nom du fichier de copie ---------- 32

Figure 24 - Menu principal pour les extractions du volume II ---------- 32

Figure 25 - Architecture de la station de travail ---------- 34

Figure 26 - Structure de la base de données sur station SUN ---------- 37

Figure 27 - Structure de l'application PALEODATA ---------- 39

Figure 28 - Le menu principal de l'application PALEODATA ---------- 38

Figure 29 - Sélection de la relation DIA avant d'effectuer une requête ---------- 40

Figure 30 - Recherche des données concernant les diatomées du site 333 ---------- 40

Figure 31 - Le menu des extractions ---------- 41

Figure 32 - Visualisation des données sur le leg 12 ---------- 42

Figure 33 - Visualisation des données sur le site 482 ---------- 42

Figure 34 - Visualisation de la position de tous les sites du D.S.D.P. sur une projection cartographique (cylindrique équidistante) ---------- 43

Figure 35 - Visualisation des sites du D.S.D.P. de l'océan Indien ---------- 43

Figure 36 - Recherche de la correspondance entre un code fossile et un nom d'espèce fossile ---------- 44

Figure 37 - Menu des applications ---------- 44

Figure 38 - Choix d'un groupe fossile ---------- 45

Figure 39 - Menu des applications pour le groupe des diatomées ---------- 45

Figure 40 - Recherche des FAD et des LAD de *Denticulopsis lauta* ---------- 46

Figure 41 - Calcul de l'extension verticale de *Coscinodiscus excavatus* dans les sites du D.S.D.P. ---- 47

Figure 42 - "Occurrence" de *Coscinodiscus excavatus* dans les sites du D.S.D.P. ---------- 47

Figure 43 - "Corrélation" des sites du D.S.D.P. basée sur la présence de *Coscinodiscus excavatus* ---- 48

Figure 44 - Abondance de *Coscinodiscus excavatus* dans les sites du D.S.D.P. ---------- 49

Figure 45 - Menu des applications sur plusieurs groupes simultanément ---------- 50

Figure 46 - Sélection de deux événements biostratigraphiques (le FAD de *Pseudoemiliana lacunosa* et le LAD de *Emiliana huxleyi*) ---------- 51

Figure 47 - Tracé des courbes d'isoépaisseurs dans l'océan Indien (correspondant à "l'épaisseur" de la zone NN11 définie entre le FAD et le LAD de *Discoaster quinqueramus* ---------- 52

Figure 48 - Tracé des courbes d'isoépaisseurs dans l'océan Pacifique (correspondant à "l'épaisseur" de la zone NN6 définie entre le FAD de *Discoaster kugleri* et le LAD de *Sphenolithus heteromorphus*) ---------- 53

Figure 49 - Tracé des courbes d'isoépaisseurs dans l'océan Atlantique (correspondant à "l'épaisseur" de la zone NN14 définie entre le FAD de *Discoaster asymmetricus* et le LAD de *Amaurolithus tricorniculatus*) ---------- 54

Figure 50 - Calcul des incertitudes sur les profondeurs des FAD et des LAD ---------- 57

Figure 51 - Signification des courbes des taux et des vitesses d'accumulation ---------- 58

Figure 52 - Liste des forages étudiés ---------- 59

Figure 53 - Situation géographique des forages étudiés ---------- 60

Figure 54 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 149 (Atlantique nord) ---------- 61

Figure 55 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 354 (Atlantique nord). La courbe décompactée est incomplète en raison des mesures de porosités discontinues pour ce site ---------- 62

Figure 56 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 519 (Atlantique sud) ---------- 62

Figure 57 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 214 (océan Indien) ---------- 63

Figure 58 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 65 (Pacifique nord) ---------- 63

Figure 59 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 166 (Pacifique nord) ---------- 64

Figure 60 - Courbes des taux et des vitesses d'accumulation et courbe des taux d'accumulation décompactée pour le site 173 (Pacifique nord) ---------- 64

Figure 61 - Evolution de ∂ en fonction du temps (∂ est égal au nombre de hiatus - le nombre de maximums divisé par le nombre total de sites étudiés) ---------- 66

Figure 62 - Evolution de ß en fonction du temps (ß est égal au nombre de hiatus détectés par tranche d'âge divisé par le nombre total de sites étudiés) ---------- 66

Figure 63 - Répartition géographique des hiatus entre 2 et 2,8 Ma (hiatus n°1). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 2 et 2,8 Ma ----- 67

Figure 64 - Répartition géographique des hiatus entre 4,8 et 5,2 Ma (hiatus n°2). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 4,8 et 5,2 Ma ---------- 67

Figure 65 - Répartition géographique des hiatus entre 6,8 et 7,6 Ma (hiatus n°3). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 6,8 et 7,6 Ma ---------- 67

Figure 66 - Répartition géographique des hiatus entre 10,4 et 10,8 Ma (hiatus n°4). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 10,4 et 10,8 Ma ---------- 68

Figure 67 - Répartition géographique des hiatus entre 12 et 12,4 Ma (hiatus n°5). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 12 et 12,4 Ma ---------- 68

Figure 68 - Répartition géographique des hiatus entre 13,2 et 13,6 Ma (hiatus n°6). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 13,2 et 13,6 Ma ---------- 68

Figure 69 - Répartition géographique des hiatus entre 17,6 et 19,2 Ma (hiatus n°7). Les étoiles représentent des hiatus ponctuels, les ronds noirs figurent les hiatus permanents entre 17,6 et 19,2 Ma ---------- 69

Figure 70 - Répartition temporelle des hiatus mondialement reconnus durant le Néogène par Barron et Keller en 1983 et en 1987 et dans cette étude (l'échelle temporelle est identique dans les trois cas) ---------- 70

Figure 71 - Les événements sédimentaires néogènes détectés dans l'océan mondial (le diagramme en bâtons de gauche représente l'histogramme des fréquences des minimums et des maximums en fonction de l'âge; la courbe de droite est la courbe des fréquences cumulées

des maximums et des minimums calculée à partir du diagramme de distribution des fréquences des maximums et des minimums) ---------- 72

Figure 72 - Carte de répartition des courants océaniques superficiels ou profonds dans le Pacifique est ---------- 75

Figure 73 - Localisation des sites 158, 173, 470 et 572 D du D.S.D.P. ---------- 77

Figure 74 - Abondance des diatomées caractéristiques d'upwellings (*Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima*) et valeurs de l'indice P (abondance de *Coccolithus pelagicus* - abondance de *Reticulofenestra pseudoumbilica*) en fonction de la profondeur (et de l'âge) dans le site 158 du D.S.D.P. ---------- 78

Figure 75 - Abondance des diatomées caractéristiques d'upwellings (*Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima*) et de diverses diatomées caractéristiques d'eaux froides (*Coscinodiscus marginatus*, *Denticulopsis praedimorpha*, *Denticulopsis hyalina*, *Denticulopsis lauta*, *Denticulopsis hudstedtii* et *Rhizosolenia barboi*) en fonction de la profondeur (et de l'âge) dans le site 470 du D.S.D.P. ---------- 78

Figure 76 - Abondance des diatomées caractéristiques d'upwellings (*Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima*), des diatomées caractéristiques d'eaux froides (*Coscinodiscus marginatus*) et valeurs de l'indice P (abondance de *Coccolithus pelagicus* - abondance de *Reticulofenestra pseudoumbilica*) en fonction de la profondeur (et de l'âge) dans le site 572 D du D.S.D.P. ---------- 79

Figure 77 - Abondance des diatomées caractéristiques d'upwellings (*Thalassionema nitzschioides* et *Thalassiothrix longissima*), de diverses diatomées d'eaux froides (*Cosinodiscus marginatus*, *Rhizosolenia barboi*, *Rhizosolenia praebarboi* et *Thalassiosira antiqua*) et valeurs de l'indice P (abondance de *Coccolithus pelagicus* - abondance de *Reticulofenestra pseudoumbilica*) en fonction de la profondeur (et de l'âge) dans le site 173 du D.S.D.P. ---------- 79

Figure 78 - Etablissement des régimes d'upwellings tropical et équatorial au Mio-Pliocène dans le Pacifique équatorial central et oriental ---------- 81

Figure 79 - Courbe synthétisant les événements chauds (Cpe 1 à Cpe 10) et les événements froids (Fpe 1 à Fpe 10) durant le Néogène dans le Pacifique oriental ---------- 83

Figure 80 - Comparaison des événements chauds et des événements froids détectés dans cette étude avec la courbe des paléotempératures relatives établie par Barron et Keller en 1983 entre 15 et 5 Ma ---------- 84

Figure 81 - Courbe synthétisant les événements chauds et les événements froids détectés dans le Pacifique ouest, le Pacifique est, l'Atlantique nord et l'océan Indien ---------- 88

Figure 82 - Comparaison entre la courbe des maximums et des minimums de sédimentation, celle des événements chauds et des événements froids (définies dans cette étude) et celle des fluctuations du niveau marin (définie par Haq et ses collaborateurs en 1987) pour le Néogène ---------- 92

Figure 83 - Diagramme synthétisant l'évolution des vitesses instantanées d'accumulation dans les sites étudiés dans l'océan Atlantique durant le Néogène. L'axe des abscisses est l'axe temporel. Sur l'axe des ordonnées sont portés les sites du D.S.D.P. classés par latitudes décroissantes. Le troisième axe illustre les vitesses instantanées d'accumulation (par site et par âge) exprimées en mètres par Ma ---------- 96

Figure 84 - Diagramme synthétisant l'évolution des vitesses instantanées d'accumulation dans les sites étudiés dans l'océan Pacifique durant le Néogène. L'axe des abscisses est l'axe temporel. Sur l'axe des ordonnées sont portés les sites du D.S.D.P. classés par latitudes

décroissantes. Le troisième axe illustre les vitesses instantanées d'accumulation (par site et par âge) exprimées en mètres par Ma ---------- 98

Figure 85 - Diagramme synthétisant l'évolution des vitesses instantanées d'accumulation dans les sites étudiés dans l'océan Indien durant le Néogène. L'axe des abscisses est l'axe temporel. Sur l'axe des ordonnées sont portés les sites du D.S.D.P. classés par latitudes décroissantes. Le troisième axe illustre les vitesses instantanées d'accumulation (par site et par âge) exprimées en mètres par Ma ---------- 100

Figure 86 - Projection plane des domaines d'existence spatio-temporels (T est l'axe temporel et E l'axe spatial) de 8 espèces (numérotées de 1 à 8). Les pointillés verticaux représentent la trace des profils stratigraphiques discontinus P1 à P4 qui traversent ces domaines d'existence et enregistrent partiellement les domaines d'existences de chaque espèce. Les traits verticaux épais représentent les existences observées des espèces dans les profils P1, P2, P3 et P4 ---------- 102

Figure 87 - Les deux cas dans lesquelles on peut déduire une coexistence entre deux espèces x et y (coexistence virtuelle). Dans le cas a l'extension de l'espèce x dans un profil local est discontinue. Dans le cas b, on observe des superpositions stratigraphiques inversées des espèces x et y dans deux profils distincts ---------- 102

Figure 88 - Graphe biostratigraphique traduisant les relations de coexistences et de superpositions entre les 15 espèces d'alvéolines de Yougoslavie ---------- 103

Figure 89 - Matrice associée au graphe biostratigraphique de la figure 88 ---------- 103

Figure 90 - Principales configurations interdites présentes dans un graphe biostratigraphique, avec leur signification et leur élimination. Les numéros dans les cercles représentent les espèces, les traits les relations de coexistence, les arètes les relations de superposition et les ellipses les domaines d'existence des espèces. L'axe T représente les âges ---------- 105

Figure 91 - Liste des espèces et des arcs impliqués dans les cycles C3 et Cn du graphe biostratigraphique des alvéolines de Yougoslavie ---------- 106

Figure 92 - Matrice (associations unitaires, espèces) indiquant la composition spécifique des sept associations unitaires déduites du graphe biostratigraphique transformé des alvéolines de Yougoslavie ---------- 108

Figure 93 - Séquences d'associations unitaires détectées dans chaque profil et matrice synthétisant les relations de superpositions entre ces associations unitaires pour les alvéolines de Yougoslavie ---------- 108

Figure 94 - Construction du graphe montrant les relations stratigraphiques entre les associations unitaires et réduction de ce graphe orienté en un chemin unique d'associations unitaires pour les alvéolines de Yougoslavie ---------- 109

Figure 95 - Tableau d'extension 2 calculé à partir des données biostratigraphiques des alvéolines de Yougoslavie ---------- 111

Figure 96 - Matrice de reproductibilité (associations unitaires, sections) permettant de visualiser l'extension géographique des associations unitaires pour les alvéolines de Yougoslavie ---------- 112

Figure 97 - Séquence de huit associations unitaires strictement identifiées (niveaux 1, 2, 4 et 6) ou non (niveaux 3, 5 et 7). Les trois cas possibles dans lesquels des niveaux ne sont pas assignés à une seule association unitaires sont illustrés dans cette figure ---------- 112

Figure 98 - Tableau de corrélation finale pour les alvéolines de Yougoslavie ---------- 113

Figure 99 - Réunion d'associations unitaires : trois situations types (A.U. : associations unitaires, P :

profils, Z : zones). Les cercles grisés indiquent les associations unitaires identifiées dans les profils. Les traits noirs traduisent les réunions d'associations unitaires strictement identifiées ---------- 114

Figure 100 - Corrélation entre les 11 profils de Yougoslavie. Les traits noirs visualisent les limites des biochronozones. Trois zones reproductibles sont définies : la zone 1 établie par la réunion des associations unitaires 1 et 2, la zone 2 correspondant à l'association unitaire 3 et la zone trois définie par la réunion des associations unitaires 4 et 5 ---------- 115

Figure 101 - Exemple de fichier codé d'entrée pour le programme de Guex et Davaud. Il s'agit du codage des données sur les alvéolines de Yougoslavie (l'espèce 3 est ôtée du niveau 4 dans la première section ---------- 117

Figure 102 - Localisation des sites 155, 84, 158, 500, 572 D, 573 B et 71 du D.S.D.P..---------- 118

Figure 103 - Contenu spécifique des 17 associations unitaires définies dans le Pacifique est---------- 120

Figure 104 - Matrice de reproductibilité donnant l'extension géographique des 17 associations unitaires détectées dans le Pacifique est---------- 121

Figure 105 - Tableau de corrélation final fourni par la méthode des associations unitaires appliquée à sept sites dans le Pacifique est ---------- 122

Figure 106 - Datation des limites des zones dans le Pacifique est ---------- 123

Figure 107 - Localisation des sites 94, 538 A, 153, 31, 603, 106 B, 149, 30 et 354 du D.S.D.P. ---- 126

Figure 108 - Contenu spécifique des 14 associations unitaires définies dans l'Atlantique ouest--------- 128

Figure 109 - Matrice de reproductibilité donnant l'extension géographique des 14 associations unitaires définies dans l'Atlantique ouest ---------- 127

Figure 110 - Tableau de corrélation final fourni par la méthode des associations unitaires appliquée à neuf sites dans l'Atlantique ouest---------- 130

Figure 111 - Datation des limites des zones détectées dans l'Atlantique ouest ---------- 132

Annexe A - Tracés des courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulation

Sites 391 A - 396 - 407 - 558 ---------- 142

Sites 563 - 603 - 608 - 610---------- 143

Sites 106 B - 116 - 139 - 149 ---------- 144

Sites 153 - 30 - 31 - 354---------- 145

Site 94---------- 146

Sites 357 - 360 - 362 - 364---------- 147

Sites 513 A - 519 - 525 A---------- 148

Sites 296 - 436 - 438 A - 443 ---------- 149

Sites 171 - 173 - 200 - 292---------- 150

Sites 155 - 158 - 166 - 167---------- 151

Sites 448 - 459 B - 470 - 500 ---------- 152

Sites 55 - 65 - 71 - 83 A ---------- 153

Sites 572 D - 573 B - 574 A - 577 ---------- 154

Sites 581 - 84 ---------- 155

Sites 205 - 206 - 208 - 288 ---------- 156

Sites 289 - 317 B - 587 - 590 B ---------- 157

Sites 592 - 80 A ---------- 158

Sites 219 - 223 - 231 - 235 ---------- 159

Sites 238 - 242 - 250 A - 251 A ---------- 160

Sites 212 - 214 - 216 - 217 ---------- 161

Sites 253 - 265 ---------- 162

Annexe B - Histogrammes des fréquences des maximums et des minimums détectés dans les courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulations

Histogramme des fréquences des maximums et des minimums pour l'Atlantique sud et l'Atlantique nord ---------- 164

Histogramme des fréquences des maximums et des minimums pour le Pacifique sud et le Pacifique nord ---------- 165

Histogramme des fréquences des maximums et des minimums pour l'océan Indien ---------- 166

Annexe C - Cartes de contourages

Atlantique à 0,4 Ma et à 2 Ma ---------- 168

Atlantique à 2,4 Ma et à 2,8 Ma ---------- 169

Atlantique à 3,2 Ma et à 4,8 Ma ---------- 170

Atlantique à 5,6 Ma et à 6,8 Ma ---------- 171

Atlantique à 7,2 Ma et à 8 Ma ---------- 172

Atlantique à 8,8 Ma et à 9,6 Ma ---------- 173

Atlantique à 10 Ma et à 10,4 Ma ---------- 174

Atlantique à 12 Ma et à 12,8 Ma ---------- 175

Atlantique à 13,2 Ma et à 13,6 Ma ---------- 176

Atlantique à 14 Ma et à 16,8 Ma ---------- 177

Atlantique à 17,6 Ma et à 18 Ma ---------- 178

Atlantique à 22,4 Ma ---------- 179
Pacifique à 0,4 Ma et à 2 Ma ---------- 180
Pacifique à 2,4 Ma et à 2,8 Ma ---------- 181
Pacifique à 3,2 Ma et à 4,8 Ma ---------- 182
Pacifique à 5,6 Ma et à 6,8 Ma ---------- 183
Pacifique à 7,2 Ma et à 8 Ma ---------- 184
Pacifique à 8,8 Ma et à 9,6 Ma ---------- 185
Pacifique à 10 Ma et à 10,4 Ma ---------- 186
Pacifique à 12 Ma et à 12,8 Ma ---------- 187
Pacifique à 13,2 Ma et à 14 Ma ---------- 188
Pacifique à 16,8 Ma et à 17,6 Ma ---------- 189
Pacifique à 18 Ma et à 18,8 Ma ---------- 190
Pacifique à 22,4 Ma ---------- 191
Océan Indien à 0,4 Ma et à 2 Ma ---------- 192
Océan Indien à 2,4 Ma et à 2,8 Ma ---------- 193
Océan Indien à 3,2 Ma et à 4,8 Ma ---------- 194
Océan Indien à 5,6 Ma et à 6,8 Ma ---------- 195
Océan Indien à 7,2 Ma et à 8 Ma ---------- 196
Océan Indien à 8,8 Ma et à 9,6 Ma ---------- 197
Océan Indien à 10 Ma et à 10,4 Ma ---------- 198
Océan Indien à 12 Ma et à 12,8 Ma ---------- 199
Océan Indien à 13,2 Ma et à 13,6 Ma ---------- 200
Océan Indien à 14 Ma et à 16,8 Ma ---------- 201
Océan Indien à 18 Ma ---------- 202

TABLE DES MATIERES

Sommaire ---------- 1

Introduction ---------- 3

PREMIERE PARTIE ---------- 5

Chapitre 1 - Le concept de bases de données ---------- 6

I - Informatisation et bases de données ---------- 6

II - Les problèmes de l'élaboration d'une base de données ---------- 7
A - Le modèle conceptuel ---------- 8
B - Les modèles organisationnel et opérationnel ---------- 9
C - L'élaboration d'une base de données par la méthode MERISE ---------- 9

III - Les principaux modèles logiques de bases de données ---------- 11
A - Le modèle hiérarchique de base ---------- 11
B - Le modèle en réseau ---------- 12
C - Les bases de données relationnelles ---------- 12
1 - Représentation des données sous forme de tableaux ---------- 12
2 - La manipulation des données dans le modèle relationnel ---------- 13
a - La mise à jour des données ---------- 13
b - La recherche des données ---------- 14

IV - Les principaux modèles physiques de données ---------- 14
A - La méthode d'accès séquentiel simple ---------- 14
B - La méthode d'accès séquentiel indexé ---------- 14

V - Cas des systèmes de gestions de bases de données ---------- 15
A - Remarques sur les modèles hiérarchiques et en réseau ---------- 15
B - Les systèmes de gestion de bases de données relationnelles (SGBDR) ---------- 15
1 - SGBDR de première génération ---------- 15
2 - SGBDR de deuxième génération ---------- 16
3 - Un exemple de SGBDR. : INGRES version 5.0 ---------- 17
a - Présentation - Les modules de INGRES ---------- 17
b - Notions de langages de requêtes - SQL ---------- 19
c - Elaboration d'une application avec INGRES (ABF) ---------- 20

Chapitre 2 - La base de données du D.S.D.P. ---------- 23

I - La base de données du D.S.D.P. ---------- 23
A - Historique des forages en mer du D.S.D.P. ---------- 23
B - La base de données du D.S.D.P. sur CD-ROM - Structure des données ---------- 23
1 - Notions de disques optiques numériques ---------- 24
a - Les différentes technologies ---------- 24
b - Avantages et inconvénients des DON ---------- 25
2 - Les disques du D.S.D.P. ---------- 26
a - Généralités ---------- 26
b - Contenu des DON du D.S.D.P. ---------- 26
- le premier disque ---------- 26
- le deuxième disque ---------- 28
c - La sélection et l'extraction des données sur CD-ROM ---------- 28
- Les extractions des données du volume I ---------- 29

- Les extractions des données du volume II---------- 32
II - La base de données sur station de travail Sun---------- 33
A - Présentation de la station de travail ---------- 33
1 - La station de travail Sun-3/50 ---------- 33
2 - Les périphériques---------- 34
3 - Connexion d'un terminal - Transferts du CD-ROM vers la station---------- 34
4 - Les logiciels ---------- 35
B - Structure de la base de données du D.S.D.P. sur station Sun ---------- 35

III - L'application PALEODATA ---------- 36
A - Structure de l'application---------- 36
B - Lancement de l'application - Le menu principal---------- 38
C - Les extractions ---------- 38
1 - Les extractions brutes ---------- 40
2 - Les extractions élaborées ---------- 41
a - Extractions par numéro de legs---------- 41
b - Extractions par numéro de sites---------- 41
c - Extractions par pointage sur une carte---------- 42
d - Extraction de la documentation---------- 44
D - Les applications---------- 44
1 - Les applications groupe par groupe ---------- 45
a - Le choix d'un groupe fossile---------- 45
b - Le choix de l'application---------- 46
- Recherche des FAD et des LAD d'une espèce ---------- 46
- Calcul de l'extension verticale d'une espèce ---------- 46
- Occurrence d'une espèce dans les forages du D.S.D.P.---------- 47
- Corrélation des sites par la présence d'une espèce ---------- 48
- Abondance d'une espèce dans les forages du D.S.D.P.---------- 48
- Biochronologie quantitative ---------- 49
2 - Les applications sur plusieurs groupes fossiles---------- 50
a - Occurrence d'une espèce dans les forages du D.S.D.P. ---------- 50
b - Recherche des FAD et des LAD d'une espèce ---------- 50
c - Calcul des épaisseurs entre 2 événements biostratigraphiques (tracé de cartes d'isoépaisseurs)---------- 51
d - Biochronologie quantitative en choisissant les espèces dans un tableau et les forages sur une carte---------- 52
e - Biochronologie quantitative en choisissant les espèces et les sites dans un tableau---------- 53

DEUXIEME PARTIE---------- 55

Chapitre 3 : La sédimentation marine néogène : implications paléocéanographiques et paléoclimatiques ---------- 56

I - Introduction ---------- 56

II - La sédimentation marine néogène - Ses caractéristiques---------- 56
A - Recherche des taux et des vitesses d'accumulation---------- 56
1 - Méthode d'étude---------- 56
a - L'élimination des points "anormaux" ---------- 58
b - Le tracé des courbes de taux et de vitesse d'accumulation par la méthode de l'ajustement cubique (Cubic spline)---------- 58
2 - Analyse des taux et des vitesses d'accumulation---------- 58
B - Résultats ---------- 59
1 - La décompaction des sédiments---------- 60
2 - Etude des courbes de taux et de vitesses instantanées d'accumulation---------- 65
a - Recherche des hiatus à l'échelle mondiale---------- 65
- Répartition spatio-temporelle des hiatus néogènes---------- 65

- Comparaison avec les études précédentes ---------- 70
b - Etude de la répartition spatio-temporelle des reprises et des ralentissements de la sédimentation ---------- 71
III - La sédimentation marine néogène - Ses significations ---------- 75
A - Etude paléocéanographique et paléoclimatologique dans le Pacifique nord est équatorial à partir de la base de données du D.S.D.P. ---------- 75
1 - Généralités ---------- 75
2 - Approches paléocéanographiques et paléoclimatologiques ---------- 76
a - Recherche des variations d'abondance d'espèces caractéristiques ---------- 76
b - Constatations ---------- 80
- Le site 173 ---------- 80
- Le site 470 ---------- 81
- les sites 572 D et 158 ---------- 81
c - Synthèse paléoclimatologique ---------- 82
B - Etude paléoclimatologique dans le Pacifique ouest ---------- 85
C - Etude paléoclimatologique dans l'Atlantique nord ---------- 86
D - Etude paléoclimatologique dans l'océan indien ---------- 87
E - Synthèse mondiale ---------- 88
IV - Conclusion ---------- 91
A -Intégration des résultats dans un schéma eustatique global ---------- 91
B - Synthèse des cartes d'isopaques ---------- 93
1 - L'océan Atlantique ---------- 94
2 - L'océan Pacifique ---------- 97
3 - L'océan Indien ---------- 97

Chapitre 4 : Application de la méthode des associations unitaires à un problème biochronologique concret - Etude des hiatus dans la région de Panama ---------- 101

I - La méthode des associations unitaires ---------- 101
A - Introduction à la théorie des graphes ---------- 101
B - Construction du graphe biostratigraphique ---------- 103
C - Détection et élimination des configurations interdites ---------- 104
1 - Les différents types de configurations interdites ---------- 104
2 - L'élimination des configurations interdites par le programme DV 86 ---------- 104
a - Cas des cycles C3 et Cn ---------- 104
b - Cas des cycles S3, S4, Z4, Z'4 et Z"4 ---------- 107
D - La détermination des associations unitaires et de leur succession ---------- 107
E - La détection des remaniements ---------- 110
F - Détermination des biochronozones ---------- 111
1 - Indications sur la reproductibilité des associations unitaires ---------- 111
2 - Le tableau de corrélation finale ---------- 112
E - Remarques sur la méthode des associations unitaires ---------- 115

II - Application de la méthode des associations unitaires à la base de données du D.S.D.P. ---------- 116
A - Implantation du programme de Guex sur la station de travail Sun-3/50 ---------- 116
B - Extraction et codage des données de la base de données du D.S.D.P. ---------- 116
1 - Codage des données ---------- 116
2 - Extraction des données de la base de données du D.S.D.P. ---------- 116
III - Biochronologie quantitative dans la région de Panama ---------- 118
A - Exemple dans le Pacifique est ---------- 118
1 - Le choix des sites ---------- 118
2 - Le choix des espèces ---------- 118
3 - Résultats ---------- 119
a - Définition des associations unitaires et des zones ---------- 119
b - Datation des associations unitaires et des zones ---------- 124
B - Exemple dans l'Atlantique ouest ---------- 125
1 - Le choix des sites ---------- 125
2 - Le choix des espèces ---------- 126
3 - Résultats ---------- 126
a - Définition des associations unitaires et des zones ---------- 126
b - Datation des associations unitaires et des zones ---------- 127

C - Conclusion ---------- 129

Conclusion---------- 135

Annexe A - Courbes des taux et des vitesses instantanées d'accumulations pour les sites étudiés---- 141

Annexe B - Histogrammes des fréquences des maximums et des minimums de sédimentation------- 163

Annexe C - Cartes de contourages dans l'Atlantique, le Pacifique et l'océan Indien ---------- 167

Annexe D - Liste des espèces utilisées dans le tracé des courbes des taux et des vitesses d'accumulation ---------- 203

Liste des figures---------- 207

Références bibliographiques---------- 219

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arthur M., Srivastava S., Aksu A., Baldauf J., Bohrmann G., Bush W., Cedeberg T., Clement B., Cremer M., Dadey K., Vernal A. de, Firth J., Hall F., Head M., Hiscott R., Jarrard R., Kaminski M., Lazarus D., Monjanel A.L. *et al.* (1986) - Résultats préliminaires de la campagne de forages du N.O. Joïdes Resolution dans la Baie de Baffin et la Mer du Labrador (programme international ODP, Leg 105). *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 303, ser. II, 5, pp. 385-390.

Baldauf J.G. (1985) - A high resolution late Miocene-Pliocene diatom biostratigraphy for the eastern equatorial Pacific. *In* : Mayer L., Theyer F. *et al.*, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 85, pp. 457-476.

Barron J.A. (1980) - Lower Miocene to Quaternary diatom biostratigraphy of DSDP Leg 57, off northeastern Japan. *In* : Scientific Party, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 56, 57 (2), pp. 641-685.

Barron J.A. (1981) - Late Cenozoic diatom biostratigraphy of the middle-latitude eastern North Pacific, Deep Sea Drilling Project Leg 63. *In* : Yeats R., Haq B.U. *et al.*, nitial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 63, pp. 507-538.

Barron J.A. et Keller G. (1982) - Widespread Miocene deep-sea hiatuses : coicidence with periods of global cooling. *Geology*, 10, pp. 577-581.

Barron J.A. et Keller G. (1983) - Paleotemperature oscillations in the Middle and Late Miocene of the northeastern Pacific. *Micropaleontology*, vol. 29, n° 2, pp. 150-180, pls. 1-3.

Barron J.A. (1984) - Diatum paleoceanography and paleoclimatology of the central and eastern equatorial Pacific between 18 and 6.2 Ma. *In* : Bader R.G. *et al.*, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 4, pp. 659-673.

Barron J.A., Keller G. et Dunn D.A. (1985) - A multiple microfossil biochronology for the Miocene. *In* : Kenneth J.P. (Eds.), The Miocene Ocean : Paleoceanography and Biogeography. *Mem. Geol. Soc. Am.*, 163, pp. 21-36.

Benson W.E., Gerard R.D. ans Hay W.W. (1969) - Summary and conclusions. *In* : Mayer L., Theyer F. *et al.*, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 85, pp. 935-945.

Berger W.H. (1974) - Deep-Sea sedimentation. *In* : Burke A & Drake C.L. (Eds.), The geology of continental margins, New York (Springer-Verlag), pp. 213-241.

Berggren W.A., Kent D.V. et Flynn J.J. (1984) - Paleogene geochronology and chronostratigraphy. *In* : N.J. Snelling (Eds.), Geochronology and the geological record : *Geological Society of London*, Special Paper, pp. 141-195.

Berggren W.A., Kent D.V. et Van Couvering J.A. (1985) - Neogene geochronology and chronostratigraphy. *In* : Snelling N.J. (Eds.), The chronology of the geological record, *London Geol. Soc.Mem.*, 10, pp.211-260.

Bolli H.M., Saunders J.B. et Perch-Nielsen K. (1985) - Plankton stratigraphy. *Cambridge University Press.*

Bourne S. (1985) - Le systeme Unix. *InterEditions*, 398 p..

Berggren W.A. et Hollister C.D. (1974) - Paleoceanography, paleobiogeography and the history of circulation in the Atlantic Ocean. *In* : Studies in paleoceanography : *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 20*, pp. 126-186.

Brunet M.F. (1981) - Etude quantitative de la subsidence du Bassin de Paris. *Thèse 3ème cycle*, Paris 6, 161 p..

Bukry D. (1973) - Coccolith and silicoflagellate stratigraphy, Deep Sea Drilling Project Leg 18, eastern North Pacific. *In* : Kulm L.D., Von Huene R. *et al.*, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office ,vol. 18, pp. 539-557.

Burckle L.H. (1978) - Diatom biostratigraphy of Unit 2 (Tripoli) of the neostratotype Messinian. *Riv. Italiana Pal.*, vol. 84, pp. 1037-1050.

Codd E.F. (1970) - A relational model of large shared data banks. *CACM*, 23, 6 juin 1970, pp. 377-387.

Davaud E. (1979) - Automatisation des corrélations biochronologiques : un exemple d'application de l'informatique à la résolution d'un problème naturaliste complexe. *Publication spéciale*, Genève, pp. 1-48.

Davaud E. et Guex J. (1978) - Traitement analytique manuel et algorithmique de problèmes complexes de corrélations biochronologiques. *Eclog. geol. Helv.*, 73, 3, pp. 581-610.

Dax P. (1988) - Langage C. *Eyrolles*, 173 p.

Elmstrom K.M. et Kenneth J.P (1985) - Late Neogene paleoceanographic evolution of site 590 : southwest Pacific. *In* : Kenneth J.P., Von der Boch C.C. *et al.*, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 90, pp. 1361-1381.

Emiliani C. (1955a) - Pleistocene temperatures. *J. Geol.*, 63, pp. 538-578.

Emiliani C. (1955b) -Pleistocene temperature variations in the Mediterranean. *Quaternaria*, 2, pp. 87-98.

Emiliani C. (1966) - Paleotemperature analysis of Caribbean cores P 6304-8 and 6304-9 and a generalized temperature curve for the past 425,000 years. *J. Geol.*, 74, pp. 109-126.

Emiliani C. et Epstein S. (1953) - Temperature variations in the lower Pleistocene of Southern California. *J. Geol.*, 61, pp. 171-181.

Emiliani C., Gartner S. et Lidz B. (1972) - Neogene sedimentation on the Blake Plateau and the emergence of the central american isthmus. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, Amsterdam, 11, pp. 1-10.

Guex J. (1977) - Une nouvelle méthode d'analyse biochronologique : note préliminaire. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, 73, 351, pp. 309-322.

Guex J. (1978) - Influence du confinement géographique des espèces fossiles sur l'élaboration d'échelles biochronologiques et sur les corrélations. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, 74, 354, pp. 115-124.

Guex J. (1979) - Terminologie et méthodes de la biostratigraphie moderne : commentaires critiques et propositions. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, 74, 354, pp. 169-216.

Guex J. (1980) - Calcul, caractérisation et identification des associations unitaires en biochronologie. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, 75, 358, pp. 111-126.

Guex J (1981) - Associations virtuelles et discontinuités dans la distribution des espèces fossiles. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, 75, 359, pp. 179-197.

Guex J. (1982) - Remarques sur l'origine de la dispersion biochronologique du nannoplancton calcaire paléogène de Californie et sur la détection des remaniements. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, 76, 362, pp. 197-205.

Guex J.(1984) - Recherche des associations unitaires : une nouvelle technique d'optimisation. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, 77, 366, pp. 169-172.

Guex J. (1987) - Corrélations biochronologiques et associations unitaires. *Presses Polytechniques Romandes* , 244 pp..

Guex J. et Davaud E. (1982) - Recherche automatique des associations unitaires en biochronologie. *Bull. Soc. Vaud. Sci. Nat.*, 76, 361, pp. 53-69.

Guex J. et Davaud E. (1984) - Unitary associations method : use of graph theory and computer algorithm. *Computer and Geoscience*, 10, 1, pp. 69-96.

Hailwood E.A. (1989) - The role of magnetostratigraphy in the development of geological time scale. *Paleoceanography*, vol. 4, n° 1, pp. 1-18.

Haq B.U. (1980) - Biogeographic history of Miocene calcareous nannoplankton of the Atlantic Ocean. *Micropaleontology*, vol. 26, n° 4, pp. 414-443.

Haq B.U., Hardenbol J. et Vail P.R. (1987) - Chronology of fluctuating Sea levels since the triassic. *Sciences*, 235, pp. 1156-1167.

Hodell A. et Kennett J.P. (1985) - Miocene paleoceanography of the South Atlantic Ocean at 22, 16 and 8 Ma. *In* : Kennett J.P. (Eds.), The Miocene Ocean, *Mem. Geol. Soc. Am.*, 163, pp. 317-337.

Houghton S.D. (1989) - Late Neogene calcareous nannofossil biostratigraphy and paleoceanography of ODP Hole 677 A, Panama Basin. *In* : Becker K., Sakai H. *et al. - Proc. ODP, Sci. Results*, 111 : College Station, TX (Ocean Drilling Program), pp. 277-285.

Ingle J.C. (1973) - Neogene foraminifera from the northeastern Pacific Ocean, Leg 18, Deep Sea Drilling Project. *In* : Kulm L.D., Von Huene R. *et al.*, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 18, pp. 517-567.

Johnson D.A. (1972) - Ocean-floor erosion in the equatorial Pacific. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 83, pp. 3121-3144.

Jousé A.P., Kozlova O.G. et Muhina V.V. (1971) - Distribution of diatoms in the surface layer of sediment from the Pacific Ocean. *In* : Funnel B.M. and Riedel W.R. (Eds.), The Micropaleontology of the ocean, London, *Cambridge University Press*, pp. 263-269.

Kanaya T. et Koizumi I. (1966) - Interpretations of diatoms thanatocoenoses from the North Pacific applied to a study of Core V20-130, Tohoku Univ., *Sci. Rept./ser. 2 (geol.)*, vol. 37, n° 2, pp.89-130.

Keigwin L.D. Jr (1978) - Pliocene closing of the Isthmus of Panama, based on biostratigraphic evidence from nearby Pacific Ocean and Caribbean Sea cores. *Geology*, vol. 6, pp. 630-634.

Keigwin L.D. Jr (1979) - Late Cenozoic stable isotope stratigraphy and paleoceanography of DSDP sites from the east equatorial and central North Pacific Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 45, pp. 361-382.

Keller G. (1978) - Late Neogene planktonic foraminiferal biostratigraphy end paleoceanography of the northeastern Pacific : Evidence from DSDP Sites 173 and 310 at the North Pacific Front. *Jour. Foram. Res.*, vol. 8, n° 4, pp. 332-349.

Keller G. (1980) - Middle to Late Miocene planktonic foraminiferal datum levels and paleoceanography of the North and southeastern Pacific Ocean. *Marine Micropaleontology*, vol. 5, pp.249-281.

Keller G. (1981) - Miocene biochronology and paleoceanography of the North Pacific : Integration of quantitative planktonic foraminiferal studies, microplankton biostratigraphy and oxygen isotope data. *Marine Micropaleontology*, vol. 6, pp. 535-551.

Keller G. et Barron J.A. (1983) - Paleoceanographic implications of Miocene deep-sea hiatuses. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 94, pp. 560-613.

Keller G. et Barron J.A. (1987) - Paleodepth distribution of Néogène deep-sea hiatuses, *Paleoceanography*, vol. 2, n° 6, pp. 697-713.

Kenneth J.P. et Von der Boch C.C. (1985) - Southwest Pacific Cenozoic paleoceanography. *In* : Kenneth J.P., Von der Boch C.C. *et al.*, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 90, pp. 1361-1381.

Koizumi I. (1973) - The Late Cenozoic diatoms of sites 183-193, Leg 19, Deep Sea Drilling Project. *In* : Creager J.S., Scholl D.W. *et al.*, Initial Reports of Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 19, pp. 805-855.

Lohmann G.P. et Carlson J.J. (1981) - Oceanographic significance of Pacific late Miocene calcareous nannoplankton. *Marine Micropaleontology*, vol. 6, pp. 553-579.

Loutit T.S., Kenneth J.P. et Savin S.M. (1983) - Miocene equatorial and southwest Pacific paleoceanography from stable isotope evidence. *Marine Micropaleontology*, vol. 8 (1983/84), pp. 215-233.

Loutit T.S., Pisias N.G. et Kenneth J.P. (1983) - Pacific Miocene carbon isotope stratigraphy using benthic foraminifera. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 66, pp. 48-62.

Mann U. et Müller G. (1977) - Composition of sediments of the Japan trench transect, Legs 56 and 57, Deep Sea Drilling Project. *In* : Scientific Party, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 56, 57 (2), pp. 939-977.

Martini E. (1971) - Standart Tertiary and Quaternary calcareous nannoplankton zonation. *In* : Farinacci A. (Eds.), Proc. II Planktonic Conf., Roma, 1970, 2, pp. 739-785.

Matheron J.P. (1988) - Comprendre MERISE. *Eyrolles*, 222 pp.

McIntyre A. et Bé A.W.H. (1967) - Modern Coccolithophoridae of the Atlantic Ocean. I. Placoliths and cyrtoliths. *Deep Sea Res.*, vol. 14, pp. 591-597.

Miranda S.M. et Busta J.M. (1986) - L'ART DES BASES DE DONNEES - 2 - Les bases de données relationnelles. *Eyrolles*.

Miranda S.M.et Busta J.M. (1988) - L'ART DES BASES DE DONNEES - 1 - Introduction aux bases de données. *Eyrolles*, 227 p..

Monjanel A.L. (1987) - Les Diatomées oligocènes à holocènes de l'Atlantique nord et de la Méditerranée occidentale : biostratigraphie et paléocéanographie. *Thèse de Doctorat de l'Université de Bretagne Occidentale*, Brest, n^{elle} sér. n° 38, 320 p..

Moore T.C., Andel Van J.H., Sancetta C. et Pisias N.G. (1978) - Cenozoic hiatuses in pelagic sediments. *Micropaleontology*, vol. 24, n° 2, pp.113-138.

Moore T.C., Pisias N.G. et Keigwin C.D. J^{r} (1981) - Ocean basin and depth variability of oxygen isotopes in Cenozoic benthic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, vol. 6, pp. 465-481.

Pasleau S. (1988) - SQL Langage et SGBD relationnels. *Editests*, 285 p..

Politis M. (1986) - Pour comprendre l'informatique. *INSEP éditions*, 458 p..

Poore R.Z. (1981) - Late Miocene biogeography and paleoclimatology of the central North Atlantic. *Marine Micropaleontology*, vol. 6, pp.599-616.

Pujos A. (1987) -Mise en place de la circulation au Pacifique central équatorial et des assemblages des nannofossiles calcaires au Néogène. II - Influence de l'émersion de l'isthme de Panama, entre 7 et 2 Ma. *Bull. soc. géol. France*, (8), t. III, n° 4, pp. 731-736.

Raffi I. et Rio D. (1981) - *Coccolithus pelagicus* (Wallich) : a paleotemperature indicator in the late Pliocene Mediterranean deep sea record. *In* : Wezel F.C. (Eds.), *Sedimentary Basins of Mediterranean Margins*. CNR Italian Project of Oceanography, Tecnoprint, Bologna, pp. 187-190.

Reinsch C.H.(1967) - Smoothing by Spline Functions. *Numerische Mathematik*, vol. 10, pp. 177-183.

Roberts P.G., Montadert L. et Searle R.C. (1979) - The western Rockall Plateau : stratigraphy and structural evolution. *In* : Montadert L., Roberts D.G. *et al.*, Initial Reports of Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 48, pp. 1061-1088.

Roubault M. (1982) - Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant. *Ed.Lamarre-Poinat*, 382 p..

Ruddiman W.F. et McIntyre A. (1976) - Northeast Atlantic paleoclimatic changes over the past 600 000 years. *Mem. Geol. Soc. Am.*, vol. 145, pp. 111-146.

Ruddiman W., Sarnthein M. *et al.* (1989) - *Proc. ODP, Sci. Results,* 108 : College Station, TX (Ocean Drilling Program).

Sancetta C.A. (1983) - Biostratigraphic and paleoceanographic events in the eastern equatorial Pacific : Results of DSDP Leg 69. *In* : Cann J., Langseth M.G. *et al.*, Initial Reports of Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 69.

Savin S.M., Douglas R.G. et Stehli F.G. (1975) - Tertiary marine paleotemperatures. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 86, pp. 1499-1510, 14 figs..

Savin S.M., Douglas R.G., Keller G., Killingley J.S., Shaughnessy L., Sommer M.A., Vincent E. and Woodruff F. (1981) - Miocene benthic foraminiferal isotope records : a synthesis. *Marine Micropaleontology,* vol. 6, pp. 423-450.

Savin S.M., Abel L., Barrera E., Hodell G., Kennett J.P., Killingley J., Murphy M. et Vincent E. (1985) - The evolution of Miocene surface and near-surface marine temperatures : oxygen isotopic evidence. *In* : Kennett J.P. (Eds.), The Miocene Ocean, *Mem. Geol. Soc. Am.*, 163, pp. 49-82.

Schaaf A. (1984) - Les Radiolaires du Crétacé inférieur et moyen : biologie, systématique, biochronologie et paléoenvironnement. *Thèse de l'Université Louis Pasteur*, Strasbourg, 272 p..

Shackelton N.J. et Opdyke N.D. (1977) - Oxygen isotope and paleomagnetic evidence for early Northern hemispher glaciation. *Nature*, 270, pp. 216-219.

Shackelton N.J. et Vincent E. (1978) - Oxygen and carbon isotope studies in recent foraminifera from the southwest Indian Ocean. *Marine Micropaleontology*, vol. 3, pp. 1-13.

Shackelton N.J. et Cita M.B. (1979) - Oxygen and carbon isotope stratigraphy of benthic foraminifers at site 397 : detailed history of climatic changes during the late Neogene. *In* : Von Ras V., Ryan W.B.F. *et al.*,.Initial Reports of Deep Sea

Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 47, pp. 433-445.

Shor A.N. et Poore R.Z. (1979) - Bottom currents and ice-rafting in the North-Atlantic : interpretation of Neogene depositional environments of Leg 49 cores. *In* : Luyendyk B.P., Cann J.R. *et al.*,.Initial Reports of Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 49, pp. 859-872.

Sclater J.C., Hellinger S. et Tapscott C. (1977) - The paleobathymetry of the Atlantic Ocean from the Jurassic to the present. *J. Geol.*, 85, 5, pp. 509-552.

Stabel B. (1989) - Initial diatom record of sites 657 and 658 : on the history of upwelling and continental aridity. *In* : Ruddiman W., Sarnthein M. *et al.*, Proc. ODP, Sci. Results, 108 : College Station, TX (Ocean Drilling Program), pp. 149-156.

Stam B., Gradstein F.M., Lloyd P. et Gillis D. (1987) - Algorithms for porosity and subsidence history. *Computers & Geosciences*, vol. 13, n° 4, pp. 317-349.

Vail P.R., Mitchum R.M. et Thompson S. (1977) - Seismic stratigraphy and global of sealevel. Part 3 and 4. *AAPG Mem*, 26, pp. 63-97.

Vail P.R. et Hardenbol J. (1979) - Sea level changes during the tertiary. *Oceanus*, vol. 22, n° 3, pp. 71-80.

Van Andel T.H., Heath G.R. et Moore T.C. Jr. (1975) - Cenozoic history and paleoceanography of the central equatorial Pacific Ocean. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 143, 134 p..

Van Der Zwaan G.J. et Gudjonsson L. (1986) - Middle Miocene-Pliocene stable istope stratigraphy and paleoceanography of the Mediterranean. *Marine Micropaleontology*, vol. 10, pp.71-91.

Vergnaud-Grazzini C. (1978) - Miocene and Pliocene oxygen and carbon isotopic changes at DSDP Sites 372, 374 and 375 : Implications for pre-Messinian history of the Mediterranean. *In* : Hsü K.,Montadert L. *et al.*, Initial Reports of Deep Sea Drilling Project, Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, vol. 42 (1), pp. 829-836.

Vergnaud-Grazzini C. (1983) - Reconstruction of Mediterranean late Cenozoic hydrography by means of carbon isotopes analysis. *In* : Meulenkamp J.E. (Eds.), Reconstruction of marine paleoenvironments. *Utrecht. Micropal. Bull.*, 30.

Vergnaud-Grazzini C. (1985) - Mediterranean late Cenozoic stable isotope record : stratigraphic and paleoclimatologic implications. *In* : Stanley D.J. (Eds.), Geological evolution of the Mediterranean basin, New York (Springer-Verlag), pp. 413-451.

Vogt R.R. (1972) - The Faroe-Greenland-Iceland ridge and the western boundary undercurrent. *Nature*, 239, pp. 79-81.

Watkins N.D. et Kenneth J.P. (1972). Antarctic bottom water : Major change in velocity during the late Cenozoic between Australia, New Zealand and Antarctica since the Late Cretaceous. *Marine Geology*, vol.. 24, pp. 1-23.

Weyl P.K. (1968) - The role of the oceans in climatic change : a theory of the ice ages. *In* : Causes of climatic change (INQUA, 7th Congr. Proc., 5), Meteorol. Monogr., Boston, 8, pp. 37-62.

Woodruff F., Savin S.M. et Douglas R.G. (1981) - Miocene stable isotope record : A detailed deep Pacific Ocean study and its paleoclimatic implications. *Science*, vol. 212, pp. 665-668.

Wyrtki K. (1966) - Oceanography of the eastern equatorial Pacific Ocean. *In* : Barnes H. (Eds.), Oceanography and Marine Biology, Ann. Rev. : London (George Allen and Unwin Ltd.), vol. 4, pp.33-68.

RESUME

Les données du Deep Sea Drilling Project stockées sur deux disques optiques numériques ont permis la réalisation d'une base de données relationnelle réduite aux données paléontologiques de la base de données initiale. L'élaboration de programmes d'extractions en a rendu possible l'exploitation. La mise en œuvre de ces programmes a permis de montrer l'existence de grandes tendances sédimentaires dans l'océan mondial au cours du Néogène et d'en chercher les causes possibles. Sept grandes périodes dominées par des hiatus (ou lacunes de sédimentation) de grande ampleur ont ainsi pu être définies pour le Néogène. Nous avons en outre pu mettre en évidence l'existence de 13 périodes dominées alternativement par des tendances sédimentaires opposées (ralentissements ou, au contraire, accroissements des vitesses instantanées d'accumulation). De plus, une recherche paléoclimatologique basée sur l'étude de l'abondance relative de certaines epèces caractéristiques parmi les nannofossiles calcaires a révélé 11 tendances climatiques chaudes et 10 tendances climatiques froides prédominantes durant le Néogène. Il ressort de cette étude que six des sept hiatus et la plupart des minimums d'accumulation coïncident avec des événements climatiques froids (et le plus souvent avec des périodes de bas niveau marin) alors que les périodes de forte sédimentation correspondent très souvent à des événements climatiques chauds (ainsi qu'à des périodes de haut niveau eustatique). La méthode des associations unitaires appliquée à la base de données du Deep Sea Drilling Project aboutit rapidement à la création de subdivisions biochronologiques qui permettent de corréler entre-eux, le plus souvent avec une grande finesse, les sites du D.S.D.P.. La précision de ces subdivisions biochronologiques peut égaler celle des chartes biostratigraphiques traditionnelles.

ABSTRACT

Deep Sea Drilling Project data which are stored on two compact disks provided the realization of a relational data base. It is restricted to the paleontological data and extraction programs provided its exploitation. Some important sedimentary trends in the oceans have been shown up for the Neogene. Seven large scale hiatuses were detected for the Neogene. Furthermore, 13 periods alternately dominated by opposed sedimentary trends (slackenings or, on the contrary, accelerations of the accumulation rates) have been shown up. Moreover, a paleoclimatic study based on the abundance of selected calcareous nannofossil species revealed 11 warm climatic trends and 10 cold climatic trends for the Neogene. Six among the seven hiatuses described in this study and most of the periods of low accumulation rates are correlative with cold climatic events (also, more often than not, with periods of low marine level). Whereas periods of substantial sedimentation often coincide with warm climatic trends (and high eustatic level). The method based on unitary associations applied to the Deep Sea Drilling Project data base results in the creation of precise biochronologic divisions. So, the D.S.D.P. holes are easily correlated. The precision of these biochronologic divisions may be as accurate as divisions obtained by classical biostratigraphic charts.