

Museum National d'Histoire Naturelle
Institut de Paléontologie Humaine

THESE

Présentée pour l'obtention du

Diplôme de Doctorat

Quatenaire : Géologie, Paléontologie Humaine, Préhistoire
Option : Sédimentologie

par

Abdelfatah SIFEDDINE

La sédimentation en région tropicale humide (Carajas, Amazonie, Brésil): relation avec les modifications de l'environnement climatique au cours des 60 000 dernières années.

Soutenue le **26 Avril 1991**

devant le jury composé de :

Henry de LUMLEY	Président
Michel SERVANT	Examineur
Maxence REVAULT D'ALLONES	Examineur
David SMITH	Examineur
Philippe BERTRAND	Examineur
François FROHLICH	Rapporteur
Colette VERGNAUD-GRAZZINI	Rapporteur

Je dédie ce mémoire à mon père, ma mère, karima, mes frères et soeurs, et à ma famille. Qu'ils soient, par le présent travail, remerciés de leur aide et de leur réconfort.

AVANT PROPOS

Avant de présenter ce travail, il m'est agréable d'exprimer ici, toute ma gratitude envers les personnes qui m'ont aidé à le réaliser.

Monsieur le professeur Henry de Lumley, qui m'a accueilli à l'Institut de Paléontologie Humaine et qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury ainsi que Messieurs Michel Servant, Philippe Bertrand, François Fröhlich, David Smith, Maxence Revault d'Allones et Madame Colette Vergnaud-Grazzini qui ont bien voulu s'intéresser à ce travail et faire partie du jury.

Je tiens à exprimer mon entière reconnaissance à monsieur Michel Servant, Directeur de recherches à l'ORSTOM sans qui ce travail n'aurait pu voir le jour. Son intérêt constant et son enthousiasme envers ce travail m'ont remonté le moral pendant les moments difficiles. Je lui suis très reconnaissant de m'avoir trouvé un financement qui m'a permis de surmonter beaucoup de problèmes et de m'avoir accueilli à Bondy.

Monsieur Philippe Bertrand, Chargé de recherches au C.N.R.S, pour son sympathique accueil au laboratoire de Géologie de la matière organique à l'université d'Orléans. Sa constante disponibilité et sa grande expérience ont en effet été des facteurs impératifs à l'élaboration et à l'aboutissement de ce travail.

Monsieur François Fröhlich, Maître de conférence au Muséum National d'Histoires Naturelles, pour son chaleureux accueil au laboratoire de Géologie du Muséum National D'Histoires Naturelles et pour m'avoir fait profiter de son expérience.

Madame Catherine Pierre, Directeur de recherches au C.N.R.S. pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et de m'avoir initié aux méthodes de géochimie isotopique.

Bruno Turcq, chargé de recherches à l'ORSTOM, avec qui j'ai eu toujours des discussions intéressantes autour d'une tasse de café.

Louis Martin, Directeur de recherches à l'ORSTOM, sa disponibilité et sa gentillesse n'ont pu que faire progresser mes connaissances en paléoclimatologie. Cette collaboration m'était indispensable.

François Soubiès, chargé de recherches à l'ORSTOM, qui a largement participé à ce travail et qui a réalisé avec messieurs Turcq et Martin tous les carottages qui m'ont permis de faire de la paléoclimatologie en milieu tropical.

Monsieur Marc Fournier, Ingénieur d'études à l'ORSTOM, pour sa haute compétence technique et son dynamisme qui forcent l'admiration. Je

lui suis très reconnaissant car il a su dans toutes les circonstances me faire bénéficier de son expérience avec une grande sympathie.

Jean -luc Melice, chargé de recherches à l'ORSTOM, dont l'aide dans l'approche de la méthode de l'analyse spectrale m'a été précieuse.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les brésiliens qui ont contribué à la réalisation de ce travail, ainsi que la compagnie minière installée à Carajas pour son aide précieuse sur le terrain.

Je ne suis pas près d'oublier toute l'équipe de recherches de l'ORSTOM et plus particulièrement celle du laboratoire des formations superficielles.

Tous mes collègues, amis, et techniciens du laboratoire de géologie de la matière organique à Orléans, de l'Institut de Paléontologie Humaine, du laboratoire de Géologie au Museum, Philippe Mourguiart, Marie pierre Ledru pour leurs conseils et leur amitié.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS
SOMMAIRE
LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX
ABSTRACT
RESUMO

	<u>Pages</u>
<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE I: SITE ETUDIE</u>	
A) SITUATION GEOGRAPHIQUE	6
B) CADRE GEOLOGIQUE	6
C) LES GRANDES UNITES GEOMORPHOLOGIQUES	6
D) CLIMAT	10
D.1) PRECIPITATION	10
D.2) LA SAISON SECHE	17
D.3) LES TEMPERATURES	17
E) VEGETATION ACTUELLE	17

CHAPITRE II: MATERIELS D'ETUDE ET DATATIONS

A) MATERIELS D'ETUDE	21
A1) TECHNIQUE DE PRELEVEMENTS	21
A2) LA CAROTTE CSS2	24
A3) LA CAROTTE CSS10	24
A4) ECHANTILLONAGE DE L'ACTUEL	28
A4.1) LA CAROTTE T1	28
A4.2) LA CAROTTE T2	28
A4.3) LA CAROTTE T3	28
B) DATATIONS	28
B.1) CAROTTE CSS2	28
B.2) CAROTTE CSS10	31

CHAPITRE III: APPROCHES METHODOLOGIQUES

I) APPROCHE SEDIMENTOLOGIQUE	33
A) OBSERVATION A LA LOUPE BINOCULAIRE	33
B) TENEUR EN EAU	33
C) DENSITE	33
D) SPECTROMETRIE INFRAROUGE	33
D.1) PRINCIPE	34
D.2) METHODE	34
II) LA GEOCHIMIE MINERALE	37
A) DOSAGE DU FER TOTAL	37
A.1) BUT	37
A.2) METHODOLOGIE	37
B) DOSAGE DU PHOSPHORE TOTAL	37
B.1) BUT	37
B.2) METHODE	39
III) GEOLOGIE DE LA MATIERE ORGANIQUE	39
A) INTRODUCTION	39
B) PETROGRAPHIE DE LA MATIERE ORGANIQUE	41
B.1) INTRODUCTION	41
B.2) CHOIX DU SUJET	41
B.3) LA MESURE DU POUVOIR REFLECTEUR	43
B.3.1) METHODE	43

B.4) PALYNOFACIES	44
B.4.1) INTRODUCTION	44
B.4.2) APPLICATION	44
B.4.3) METHODE	44
B.5) ANALYSE D'IMAGES	45
B.5.1) INTRODUCTION	45
B.5.2) METHODE	45
C) DOSAGE DU CARBONE ORGANIQUE	46
C.1) INTRODUCTION	46
C.2) PYROLYSE ROCK-EVAL	46
C.2.1) METHODOLOGIE	46
C.3) METHODE WALKLEY ET BLACK	48
C.3.1) INTRODUCTION	48
C.3.2) METHODOLOGIE	48
D) DOSAGE DE L'AZOTE TOTAL	48
D.1) BUT	48
D.2) METHODOLOGIE	49
IV) GEOCHIMIE ISOTOPIQUE	49
A) INTRODUCTION	49
B) BUT	49
C) METHODOLOGIE	49
<u>CHAPITRE IV: RESULTATS</u>	
I) OUTIL SEDIMENTOLOGIQUE	51
A) INTRODUCTION	51
B) OBSERVATION A LA LOUPE BINOCULAIRE ET DIFFRACTION AUX R.X.	51
B.1) CAROTTE CSS2	51
B.2) CAROTTE CSS10	51
C) TENEUR EN EAU	51
C.1) CAROTTE CSS2	51
C.2) CAROTTE CSS10	55
D) DISCUSSION	55
E) DENSITE	55
E.1) CAROTTE CSS2	55
E.2) CAROTTE CSS10	57
F) DISCUSSION	57
G) RESULTATS DE L'INFRAROUGE	57

G.1) CAROTTE CSS2	57
G.1.1) NIVEAUX A SIDERITE	57
G.1.2) DEPOTS ORGANIQUES	57
G.2) CAROTTE CSS10	63
G.2.1) NIVEAUX A SIDERITE	63
G.2.2) DEPOTS ORGANIQUES	63
H) DISCUSSION	63
II) GEOCHIMIE MINERALE	63
A) DOSAGE DU FER TOTAL	63
A.1) CAROTTE CSS2	66
A.2) CAROTTE CSS10	66
B) DISCUSSION	66
C) DOSAGE DU PHOSPHORE	66
C.1) CAROTTE CSS2	66
C.2) CAROTTE CSS10	70
D) DISCUSSION	70
III) GEOCHIMIE ORGANIQUE	70
A) DOSAGE DU CARBONE ORGANIQUE	70
A.1) CAROTTE CSS2	70
A.2) CAROTTE CSS10	70
B) DOSAGE DE L'AZOTE TOTAL	74
B.1) CAROTTE CSS2	74
B.2) CAROTTE CSS10	74
C) RAPPORT C/N	74
C.1) LA CAROTTE CSS2	74
C.2) LA CAROTTE CSS10	76
D) DISCUSSION	76
IV) GEOCHIMIE ISOTOPIQUE	76
A) CAROTTE CSS2	76
B) CAROTTE CSS10	76
C) DISCUSSION	76
V) PETROGRAPHIE ORGANIQUE	79
A) RESULTATS	79
A.1) LA CAROTTE CSS2	79
A.2) LA CAROTTE CSS10	81

B) DISCUSSION	83
C) REFLECTOMETRIE	83
C.1) LES NIVEAUX DETRITIQUES A SIDERITE	83
C.1.1) LES NIVEAUX ORGANIQUES	86
C.1.2) LE NIVEAUX ORGANIQUE SOMMITAL	86
C.2.3) DISCUSSION	86
D) PALYNOFACIES	86
D.1) LA CAROTTE CSS2	88
D.1.2) LES NIVEAUX DETRITIQUE A SIDERITE	88
D.1.3) LES NIVEAUX ORGANIQUES	88
D.2) LA CAROTTE CSS10	88
E) DISCUSSION	90
F) L'ANALYSE D'IMAGES	90
F.1) LES NIVEAUX DETRITIQUES A SIDERITE	90
F.2) LES NIVEAUX ORGANIQUES	92
G) DISCUSSION	92

CHAPITRE V: DISCUSSION DES RESULTATS

I) INTERPRETATIONS DES RESULTATS	94
A) ANALYSE STATISTIQUE DE LA CAROTTE CSS2	94
A.1) LES NIVEAUX ORGANIQUES	94
A.2) LES NIVEAUX DETRITIQUES A SIDERITE	97
A.3) LE NIVEAU ORGANIQUE SOMMITAL	97
B) CAROTTE CSS10	98
B.1) LES NIVEAUX DETRITIQUES A SIDERITE	98
B.2) LE NIVEAU ORGANIQUE SOMMITAL	98
II) LA SIDERITE	99
A) INTRODUCTION	99
B) CARACTERISTIQUES DE LA SIDERITE	99
C) FORMATION DE LA SIDERITE	99
C.1) PRODUCTION DE CO ₂	99
C.2) FER FERREUX	100
D) FORMATION DE LA SIDERITE DANS LES DEPOTS DETRITIQUES	100

**CHAPITRE VI: INTERPRETATIONS PALEOCLIMATIQUES ET
COMPARAISON AVEC D'AUTRES REGIONS D'AMERIQUE
DU SUD**

I) INTERPRETATIONS PALEOCLIMATIQUES REGIONALES	105
I.1) PHASES SECHES ET TRANSITION PHASES SECHES PHASES HUMIDES DANS LE PLEISTOCENE SUPERIEUR	105
I.2) PHASES SECHES HOLOCENES	107
I.3) RESULTATS PALYNOLOGIQUES	107
I.4) COMPARAISON AVEC LES RESULTATS PALYNOLOGIQUES.	109
II) RECHERCHE DE PERIODICITE DANS LA CAROTTE CSS2 DE CARAJAS.	110
III) COMPARAISON AVEC D'AUTRES REGIONS D'AMERIQUE DU SUD	112
CONCLUSION	
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I: SITE ETUDIE

Fig I.1: Situation géographique de la région de Carajas, In VAUGHAN-WILLIAMS (1988).	5
Fig I.2.a: Bloc diagramme schématique de la topographie de la région de Carajas.	7
Fig I.2.b: Coupe Nord-Sud de la Serra Sul Carajas	8
Fig I.3: Carte géologique du Brésil	9
Fig I.4: Position des masses d'air et directions des vents dominants en Janvier et Juillet.	11
Fig I.5: Pluviométrie annuelle 1967-1988. Région de la Serra Dos Carajas.	12
Fig I.6: Carte des précipitations moyennes annuelles au Brésil.	13
Fig I.7: Distributions des pluies saisonnières en Amérique du Sud équatoriale.	14
Fig I.8.a: Influence du phénomène El Nino sur la durée de la saison sèche et la moyenne des précipitations en Amazonie.	15
Fig I.8.b: Influence du phénomène El Nino sur la durée de la saison sèche et la moyenne des précipitations à Carajas.	16
Fig I.9: Zonation de la végétation dans la Serra Sul Carajas.	18

CHAPITRE II: MATERIELS D'ETUDE ET DATATIONS

Fig II.1.0: Technique de prélèvements des carottes.	22
Fig II.1: Localisation des lacs dans la Serra Dos Carajas.	23
Fig II.2: Profil Nord-Sud montrant la zonation végétale du lac n°8 d'après M. Ferreira et A.M. Cleef(1989)	25

Fig II.3: Description visuelle de la carotte CSS2, lac n°8 (Serra Sul, Carajas, Brésil)	26
Fig II.4: Profil Nord-Sud montrant la zonation végétale du lac n°12 d'après M. Ferreira et A.M. Cleef(1989)	25
Fig II.5: Description visuelle de la carotte CSS10, lac n°12 (Serra Sul, Carajas, Brésil)	27
Fig II.6: Distribution des ages 14C (ans B.P.) le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	29
Fig II.7: Distribution des ages 14C (ans B.P.) le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	30

CHAPITRE III: APPROCHES METHODOLOGIQUES

Fig III.1: Schéma résumant le mode opératoire de l'analyse spectrale Infra-rouge	35
Fig III.2: Construction de la ligne de base pour le calcul de l'absorbance et de la concentration. Exemple Bande 714 cm ⁻¹ de la calcite, In FRÖHLICH (1981)	36
Fig III.3: Les spectres d'absorption de la Sidérite, Quartz, Kaolinite, Silice amorphe.	38
Fig III.4: L'incorporation annuelle de la matière organique dans les sédiments, In DURAND (1987)	40
Fig III.5: Distribution de la production primaire annuelle du carbone organique total, In HUC (1980).	40
Fig III.6.a: Fractionnement de la matière organique par les méthodes dérivées de la pédologie (d'après, DURAND 1985).	42
Fig III.6.b: Fractionnement de la matière organique par les méthodes de la géochimie pétrolière (d'après Tissot et Welte, 1978).	42
Fig III.7: Résumé du mode opératoire en analyse d'images.	46
Fig III.8: Les différents paramètres analysés par la méthode Rock-Eval, In ESPITALIE (1985).	47

CHAPITRE IV: RESULTATS

Fig IV.1: Variation de la densité et de la teneur en eau le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	54
Fig IV.2:Variation de la densité et de la teneur en eau le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	56

Fig IV.3: Variation des teneurs en quartz, kaolinite, sidérite, spicules d'éponges le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	58
Fig IV.4: Variation des teneurs en quartz, kaolinite, sidérite, spicules d'éponges le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	59
Fig IV.5: Variation des flux de quartz, kaolinite, sidérite le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	60
Fig IV.6: Variation des taux d'accumulation du quartz, kaolinite, sidérite le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	61
Fig IV.7: Variation des teneurs en (Fe ₂ O ₃ , P ₂ O ₅) le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	62
Fig IV.8: Variation des teneurs en (Fe ₂ O ₃ , P ₂ O ₅) le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	64
Fig IV.9: Variation des flux de (Fe ₂ O ₃ , P ₂ O ₅) le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	65
Fig IV.10: Variation des taux d'accumulations (Fe ₂ O ₃ , P ₂ O ₅) le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	67
Fig IV.11: Fractionnement relatif du phosphore de quelques échantillons de la carotte CSS2, lac n°8 (Serra Sul, Carajas, Brésil).	68
Fig IV.12: Comparaison des résultats obtenus par deux méthodes de dosage du carbone organique total (Rock-Eval et W & B) le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	69
Fig IV.13: Variation des teneurs en (C, N) et du rapport C/N le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	71
Fig IV.14: Variation des teneurs en (C, N) et du rapport C/N le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	72
Fig IV.15: Variations des flux du carbone organique et de l'azote le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	73
Fig IV.16: Variation des taux d'accumulations du Carbone organique et de l'azote le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	75
Fig IV.17: Variation du δ (¹³ C/ ¹² C) (PDB) de la matière organique totale le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	77
Fig IV.18: Variation du δ (¹³ C/ ¹² C) (PDB) de la matière organique totale le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	78
Fig IV.19.a: Variation du pouvoir réflecteur le long de la carotte CSS2.	84

Fig IV.19.b: Variation du pouvoir réflecteur le long de la carotte CSS2.	85
Fig IV.20: Palynofaciès de la carotte CSS2.	87
Fig IV.21: Palynofaciès de la carotte CSS10.	89
Fig IV.22: Répartition en classes granulométriques des pourcentages volumiques des débris végétaux de la carotte CSS2	91

CHAPITRE V: DISCUSSION DES RESULTATS

Fig V.1: Projection des échantillons sur le plan des deux facteurs de l'analyse des composantes principales.	95
Fig V.2: Répartition du facteur 1 en fonction de la profondeur. Carotte CSS2.	96
Fig V.3: Variation du rapport Fer total/(C.O.T+C.sidérite) le long de la carotte CSS2.	102
Fig V.4: Variation du rapport Fer résiduel/(C.O.T) le long de la carotte CSS2.	102
Fig V.5: Variation du flux de l'Azote le long de la carotte CSS2	102

CHAPITRE VI: INTERPRETATIONS PALEOCLIMATIQUES ET COMPARAISON AVEC D'AUTRES REGIONS D'AMERIQUE DU SUD.

Fig VI.1: Comparaison entre les flux du quartz, et du carbone organique avec les pourcentages de pollens d'arbres le long de la carotte CSS2.	106
Fig VI.2: Comparaison entre le facteur 1 de la détritité et les pourcentages des taxons de savane (Borreria, Cuphea, Compositae) le long de la carotte CSS2.	108
Fig VI.3: Recherche de périodicité dans les flux de quartz carotte CSS2.	111
Fig VI.4: Comparaison des résultats paléoclimatiques de Carajas avec ceux d'autres régions d'Amérique du Sud.	113

LISTE DES TABLEAUX

Tableau n°II.1: Datations radiocarbone de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	Annexe 2
Tableau n°II.2: Datations radiocarbone de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	Annexe 2
Tableau n°IV.1: Observation de la fraction supérieure à 50µ de la carotte CSS2, lac n°8 (Serra Sul, Carajas, Brésil).	Page 52
Tableau n°IV.2: Observation de la fraction supérieure à 50µ de la carotte CSS10, lac n°8 (Serra Sul, Carajas, Brésil).	Page 53
Tableau n°IV.3: Densité et teneur en eau de la carotte CSS2, lac n°8 (Serra Sul, Carajas, Brésil).	Annexe 2
Tableau n°IV.3: Densité et teneur en eau de la carotte CSS2, lac n°8 (Serra Sul, Carajas, Brésil).	Annexe 2
Tableau n°IV.4: Densité et teneur en eau de la carotte CSS10, lac n°12 (Serra Sul, Carajas, Brésil).	Annexe 2
Tableau n°IV.5: Teneurs en quartz, kaolinite, sidérite, et spicules d'éponges de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	Annexe 2
Tableau n°IV.6: Teneurs en quartz, kaolinite, sidérite, et spicules d'éponges de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	Annexe 2
Tableau n°IV.7: Teneurs en P ₂ O ₅ et Fe ₂ O ₃ de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	Annexe 2
Tableau n°IV.8: Teneurs en P ₂ O ₅ et Fe ₂ O ₃ de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	Annexe 2
Tableau n°IV.9: Teneurs en carbone organique, azote, et rapport C/N de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	Annexe 2
Tableau n°IV.10: Teneurs en carbone organique, azote, et rapport C/N de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil).	Annexe 2
Tableau n°IV.11: Description pétrographique de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	Page 80
Tableau n°IV.12: Description pétrographique de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)	Page 82

ABSTRACT

The site of Carajas (between 5°50' and 6°35' Lat.S, 49°30' and 52° Long.W, 720 m high) present two main interests for the reconstruction of climatic changes during the Quaternary: it is located at a rather high altitude and by then is not submitted to the complex fluvial dynamic of the Amazonian plain; situated in an area of relatively dry climate (1500-2000 mm/yr precipitation) inside the rain forest, it has been probably very sensitive to climate changes.

- Our study concerns two cores drilled in lake or marsh depressions located at the top of a lateritic plateau. The base of one core is radiocarbon dated at 60,000 yrs B.P.

-Quantitative analysis were performed by different means. Infrared Spectroscopy analysis has been particularly privileged as it appeared well adapted to this kind of sediment and able to evaluate detritic fluxes.

Determination and percentage evaluation of the different organic elements have been performed by microscopy and image treatment.

-The registered signals, together with the ¹⁴C chronology, allow the reconstruction of paleoenvironmental changes.

- Three periods of intense erosion of the basin are characterized by high values of detritic fluxes. These periods are dated respectively around 60,000, around 40,000 and between 13,000 and 11,000 yr B.P.

- Each period follows complete drying out of the lake: they characterize the transition between a dry climate and a moist climate. The Holocene is characterized, between 7000 and 4000 yr B.P., by a maximum of organic matter flux due to the presence of micro-charcoals which attest of the occurrence of frequent fires, and by low values of detritic flux which show that erosion was not so strong at that time. These results are bringing out new pieces of informations to interpret palynological data got on one of the cores. They are well related to the recent available data about climatic changes in Tropical America during the late Quaternary.

RESUMO

A região de Carajás (5°50'-6°35' lat. S, 49°30'-52°00' long. W, altitude: 720m) apresenta duas características interessantes para a reconstituição do clima quaternário: situada em posição relativamente alta, ela escapa a complexidade da dinâmica fluvial da Bacia Amazônica; atualmente submetida a um clima relativamente seco (1500-2000 mm/an) para uma zona de floresta densa, nós podemos pensar que ela é muito sensível às mudanças climáticas.

Nosso estudo é baseado sobre dois testemunhos coletados nas depressões lacustres e brejos situados no platô laterítico da Serra Sul de Carajás.

As avaliações cronológicas, baseadas nas datações pelo método do radiocarbono, mostram que a base de um dos testemunhos abrange os 60.000 últimos anos.

A análise dos constituintes do sedimento foi feita por diversas técnicas independentes. A análise por espectrometria infra-vermelha foi particularmente privilegiada, pois era adaptada à natureza do sedimento. Os resultados desta análise serviram de base para avaliação dos fluxos sedimentares e em particular áqueles dos componentes detriticos.

A caracterização e a avaliação em percentage relativa das diferentes frações orgânicas foram feitas por observação no microscópio e subsequente tratamento de imagens.

Os sinais identificados por estas diferentes abordagens metodológicas junto com as avaliações cronológicas são interpretados em termo de paleoambiente.

Tres fases de intensa erosão da bacia versante foram evidenciadas pelos valores máximos dos fluxos detriticos e pela neoformação de carbonato de ferro (Siderite). Elas foram datadas, respectivamente, um pouco depois de 60.000, de 40.000 e entre 13.000 e 11.000 anos B.P. Cada uma destas fases segue um período de seca dos lagos e caracteriza a transição entre um clima seco e um clima úmido. O Holoceno é marcado, entre 7000 e 4000 anos BP, por um fluxo máximo de materia orgânica ligado aos aportes em micro-carvões que tetemunham da ocorrência de incendios, e pelos valores relativamente baixos de fluxos detriticos que demonstram que a erosão permaneceu fraca neste período.

Estes resultados oferecem um novo quadro de interpretação dos dados palinológicos obtidos por um estudo realizado paralelamente. Eles integram-se bem aos conhecimentos recentemente adquiridos sobre as mudanças climáticas da América tropical durante o Quaternário recente.

INTRODUCTION

Le Quaternaire du bassin de l'Amazonie reste encore de nos jours **peu connu**. L'immensité de la forêt dense, les difficultés de pénétration et la faiblesse de l'occupation humaine en sont les causes principales. Cependant, les travaux réalisés ces dernières années laissent penser que le bassin amazonien a subi l'influence des **variations climatiques** qui ont affecté le globe terrestre durant le Quaternaire. Ces études se résument en quelques observations d'ordre écologique (Colinvaux 1979, Vanzolini 1986), géomorphologique (Tricart 1974), pédologique (Soubiès F. 1980, Sanford et al 1985) et palynologique (Van Der Hammen 1974, Absy 1979).

Ces fluctuations se seraient manifestées dans certaines parties par une dégradation du couvert végétal se traduisant par **l'installation de la savane**. Cette dégradation permet de tester la diversité des écosystèmes et le rôle qu'ils jouent dans la compréhension des changements climatiques régionaux et globaux.

D'où l'intérêt des études **écologiques, géomorphologiques et sédimentologiques** pour mieux connaître et caractériser les modifications climatiques pendant le Quaternaire.

Pour obtenir une meilleure reconstitution **paléoclimatique** nous avons besoin de **séries sédimentaires** les plus continues possibles. Pour cela une série de **sondages** de dix mètres de profondeur environ, effectuée au fond de lacs et de marécages, a débuté en 1985 dans la région de la Serra Dos Carajas, au sud de Para, en Amazonie Brésilienne. Ce travail a été réalisé grâce à une collaboration **FRANCO-BRÉSILIENNE (ORSTOM, USP, CNPq)**.

Ces travaux font partie du programme **"GEOCIT"** (GEOdynamique des Climats InterTropicaux) dirigé par Michel Servant. La finalité de ce programme est d'identifier les modifications d'environnements causées par les dernières fluctuations climatiques quaternaires majeures aux basses latitudes continentales.

La situation géographique du site, sa morphologie fermée, font que les pluies locales sont les seules sources d'eaux des lacs de Carajas. Par conséquent, ces lacs sont considérés comme des pluviomètres naturels. D'où l'intérêt du choix de cette région à des fins de reconstructions paléoclimatiques.

Dans le but d'obtenir un **signal paléoclimatique**, plusieurs méthodes analytiques ont été mises en œuvre dans le domaine de la Sédimentologie, de la Géochimie organique et isotopique.

Pour quantifier sous forme de **flux** les éléments détritiques contenus dans les dépôts lacustres de Carajas nous avons commencé par utiliser l'analyse sédimentologique classique. Mais celle-ci s'est avérée non adaptée aux échantillons riches en matières organiques de Carajas.

Afin de remédier à ce type de problèmes nous avons essayé d'appliquer une méthode physique: la **Spectrométrie Infra-rouge** basée sur les vibrations moléculaires.

La **richesse** en matière organique des dépôts lacustres de Carajas nous a encouragé à chercher des marqueurs paléoclimatiques basés sur l'étude de celle-ci. Les méthodes utilisées susceptibles de décrypter ces marqueurs sont:

- la pétrographie de la matière organique,
- les palynofaciès,
- la géochimie isotopique de la matière organique.

Les résultats obtenus seront comparés entre eux en vue de vérifier la validité des méthodes indépendantes utilisées ainsi que celle des marqueurs trouvés.

CHAPITRE I

SITE ETUDIE

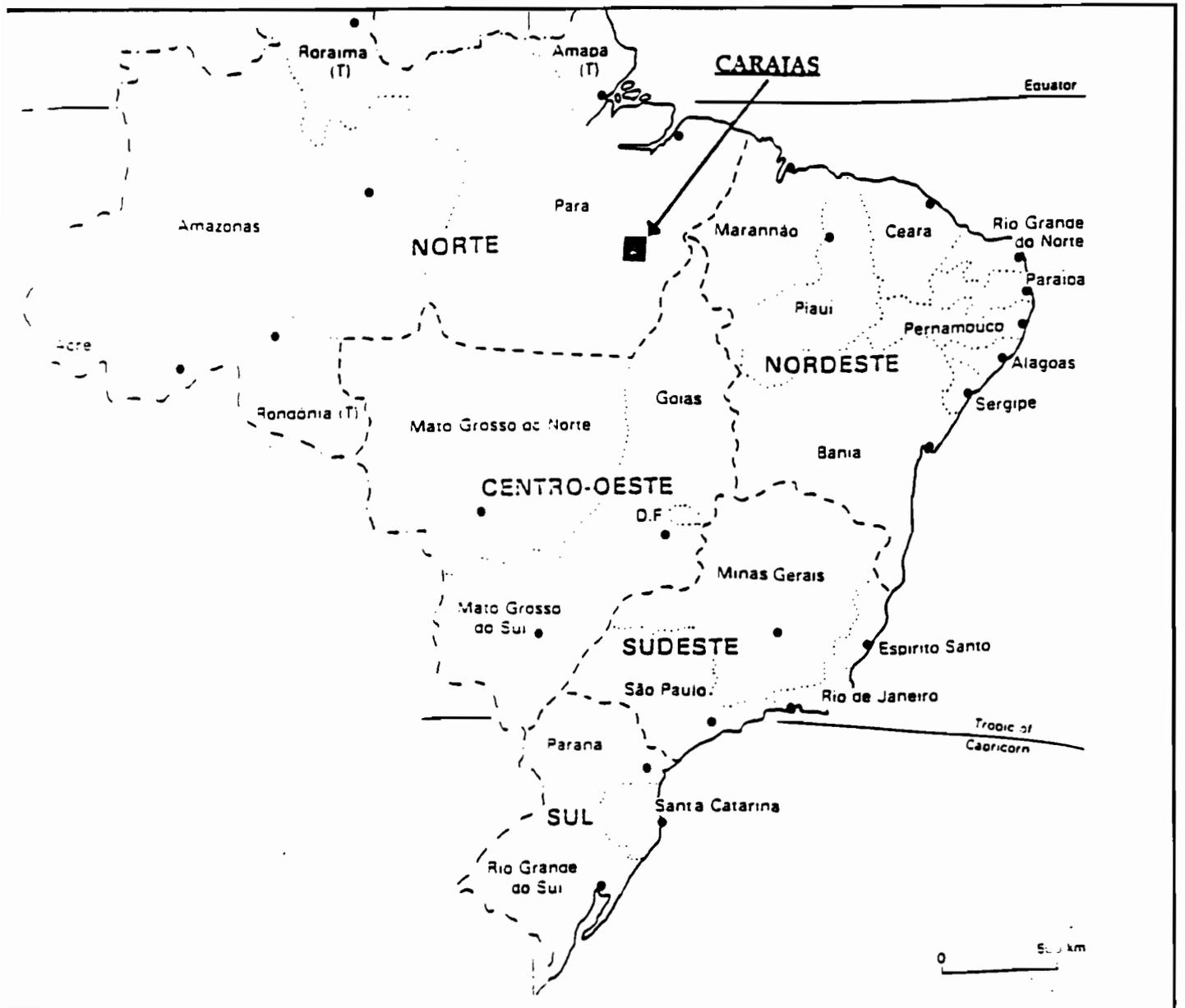


Fig 1.1: Situation géographique de la région de Carajás, In VAUGHAN-WILLIAMS (1988).

A) SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le district ferrifère de la Serra Dos Carajas qui s'étend entre les parallèles 5°50'S et 6°35' S et méridiens 49°30' W et 52°00 W, est situé au sud de l'état de Para, à 550 km au SSW de Belèm (Fig 1.1).

La région de Carajas est une vaste cuvette de plus de 4000 km². De direction générale WNW-ESE, elle est délimitée par un ensemble de reliefs peu élevés, formant au sud, la Serra Sul, et au nord la Serra Norte.

Les Serras Sul et Norte sont les reliefs majeurs de la région, et renferment les énormes réserves de *fer* mondialement connus de nos jours (18 Milliards de T. à 66% de Fe₂O₃...) et autres gîtes importants récemment découverts (Mn,Au,Cu...). Elles sont toutes les deux formées par un ensemble de petits plateaux assez bien individualisés émergeant en pleine forêt amazonienne à environ 700 mètres d'altitudes (Fig 1.2.a et 1.2.b).

B) CADRE GEOLOGIQUE

La Serra dos Carajas est essentiellement constituée de roches du Précambrien, de nature diverse et avec un métamorphisme de type épizonal (Fig 1.3).

Le socle est composé essentiellement de faciès pétrographiques extrêmement hétérogènes comprenant des granites, quartzites, amphibolites, migmatites, diorites, granitoïdes et schistes. Ces roches sont considérées comme l'unité basale du Précambrien. Le Précambrien moyen à supérieure est composé par une série de roches représentées par des itabirites et des termes volcaniques.

C) LES GRANDES UNITES GEOMORPHOLOGIQUES

Les formations de la Serra Dos Carajas montre trois types d'unités géomorphologiques :

a) **La vieille surface structurale**: Elle est marquée par l'alignement de sommets de formes tabulaires qui sont le résultat d'une érosion différentielle.

b) **Les zones basses**: on y note la présence de quelques petites collines de faible altitude. Les vallées délimitent un ensemble de marécages plats et larges. Seul le centre du bassin est caractérisé par un enfoncement du réseau hydrographique avec tendance au surcreusement.

c) **Les zones de transition**: Le contact entre les formes tabulaires et les zones basses, se fait par l'intermédiaire de parois abruptes correspondant à des failles de direction WNW-ESE qui recoupent les Serra Dos Carajas. Les escarpements se raccordent à leur tour au bas-pays par des zones de passage qui descendent jusqu'au centre de la cuvette

Au dépend des formations ferrugineuses "banded-iron formation" se

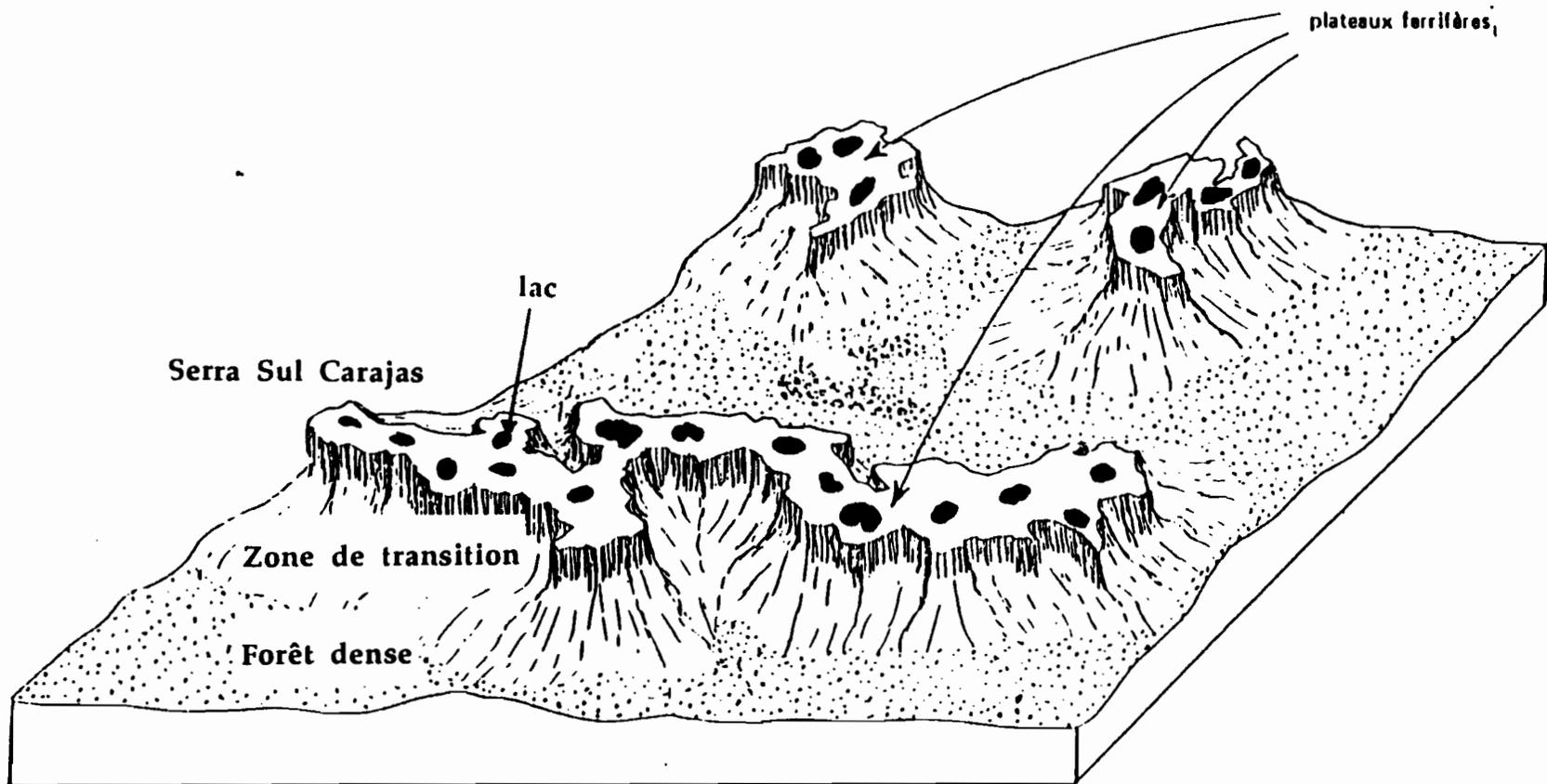
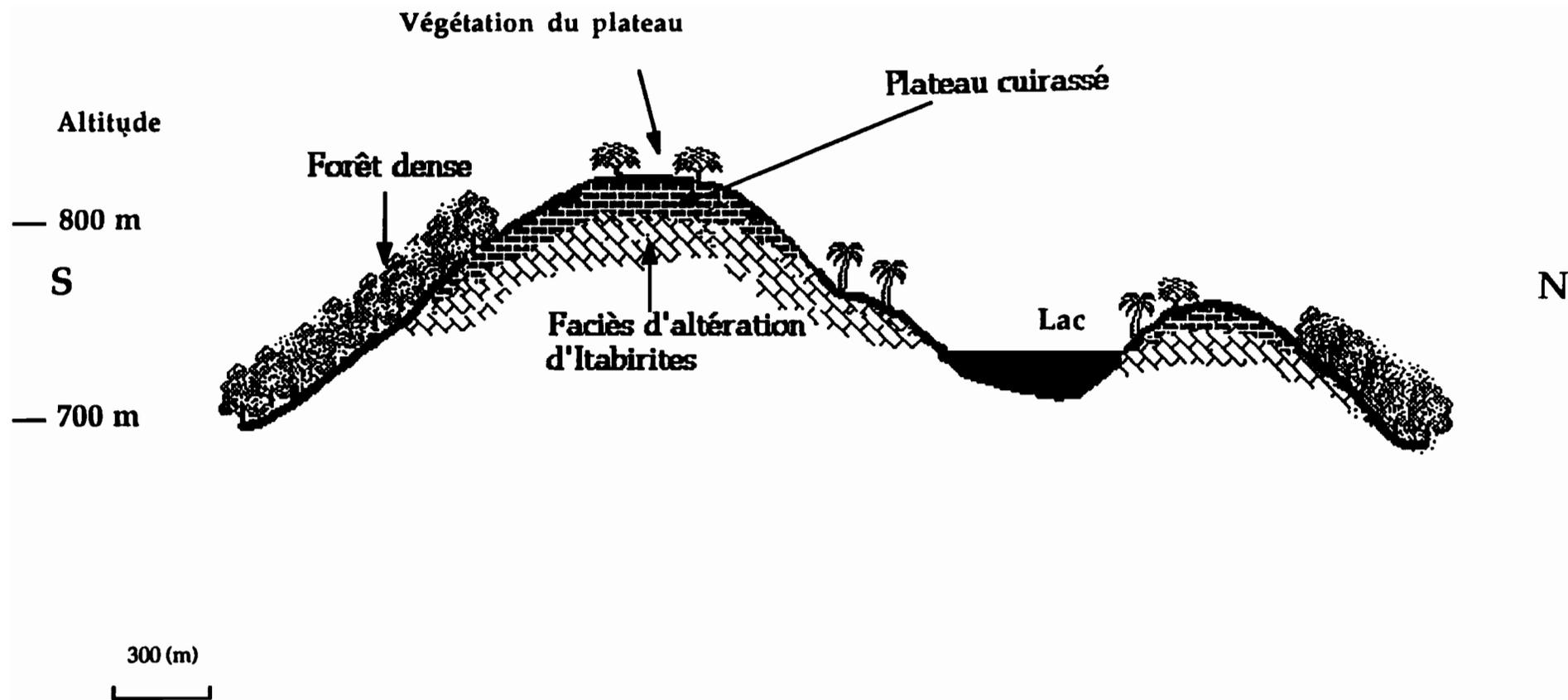


Fig 1.2.a: Bloc diagramme schématique de la topographie de la région de Carajas



**Fig 1.2.b: Coupe Nord-Sud de la Serra Sul Carajas
 (Amazonie, Parà, Brésil) (6°15' S, 50°30' W, 720 (m) alt)**

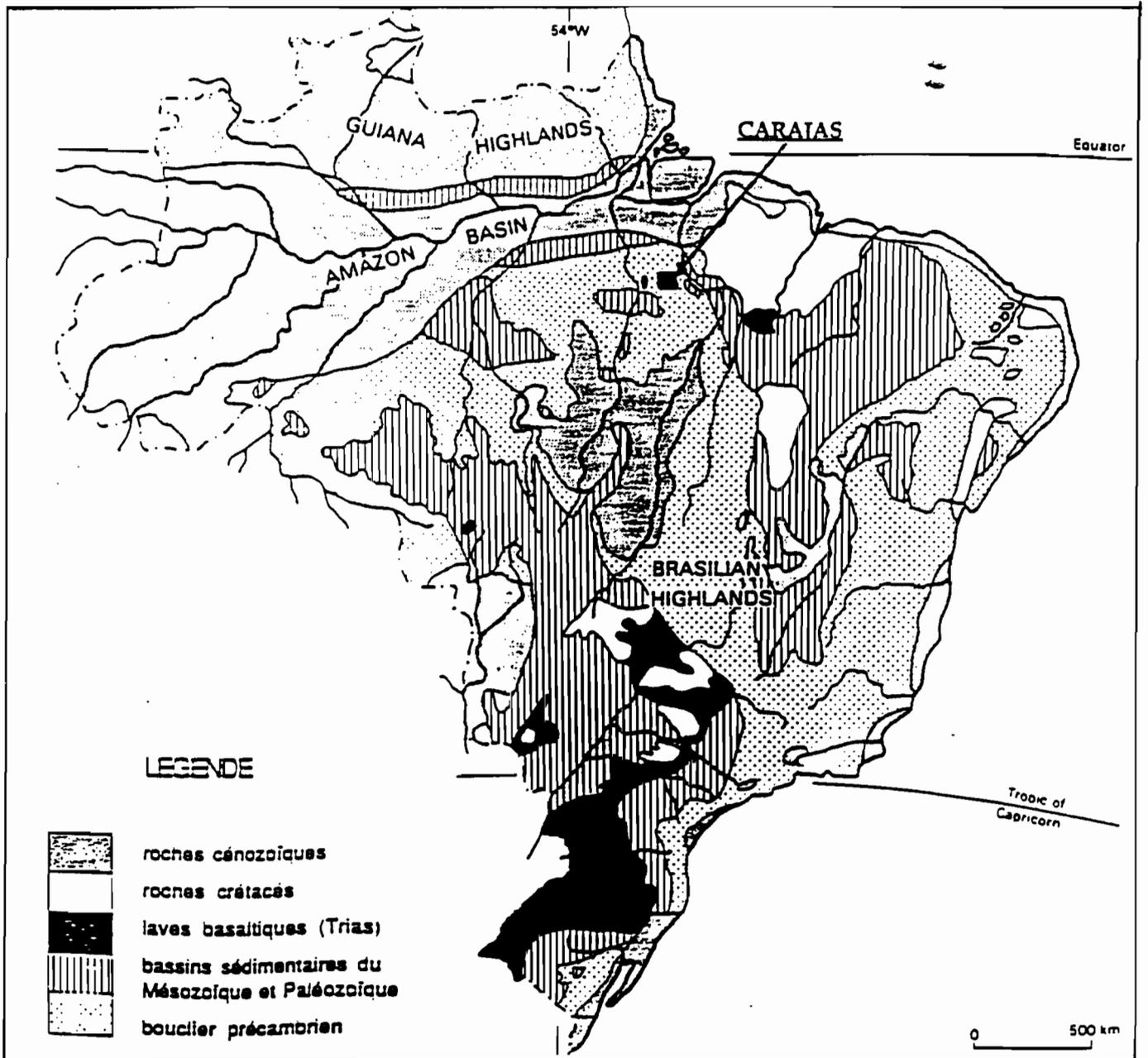


Fig I.3: Carte géologique du Brésil, In VAUGHAN-WILLIAMS (1988).

sont développés des plateaux cuirassés à extensions kilométriques couverts par une végétation steppique parfois arbustive. Sur ces plateaux il existe, un grand nombre de lacs ou marécages (en nombre de 22) de dimensions hectométriques occupant des dépressions semi-fermées, plus au moins interconnectées. Leur physionomie rappelle celle des dolines des paysages karstiques. Leur alimentation en eau est d'origine principalement aux apports pluviaux directs, et au ruissellement. Ces lacs sont peu profonds et se rencontrent à différents stades de comblement par des sédiments fins, riches en matières organiques et restes végétaux.

D) CLIMAT

Les conditions climatiques actuelles qui règnent dans la région de la Serra Dos Carajas sont *très particulières* par rapport à celles que l'on rencontre dans toute *l'Amazonie*. Ceci est dû à sa situation dans *le couloir sec amazonien* (Soubiès 1980) où les précipitations sont moins abondantes (1500-2000 mm/an) que dans les régions adjacentes (2000-3000 mm/an). Globalement, le climat est tropical humide, caractérisé par deux saisons contrastées, l'une humide de novembre à mai à forte précipitations (90% des précipitations annuelles), l'autre sèche de juin à octobre.

Cette particularité climatique de cette région est le résultat des circulations des masses d'air conséquences des situations saisonnières de la Zone de Convergence Inter Tropicale (Fig 1.4) (PAGNEY, 1976, VAUGHAN-WILLIAM, 1988).

D.1) PRECIPITATION

Dans la région de Carajas les précipitations constituent le paramètre climatique fondamental. Les relevés pluviométriques des dernières dizaines d'années empruntés aux stations météorologiques avoisinantes (Molinier communication personnelle, DENAE), indiquent une précipitation moyenne de 2000 mm/an (Fig 1.5).

Le massif Amazonien est divisé en trois ensembles: Amazonie intérieure, Amazonie orientale où se situe la région étudiée, et le Nord-est du Brésil (Fig 1.6).

Pendant l'été austral, une montée lente des masses pluvieuses vers le nord se manifeste entre les mois de décembre et mars-avril, les précipitations les plus fortes s'observent au sud de l'Equateur. Lorsque le mouvement de la remontée de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) s'accélère de mai à août, l'Amazonie intérieure est arrosée et il tombe plus de 200 mm par mois, par contre le nord-est du Brésil, et l'est de l'Amazonie où se trouve le site étudié, sont déficitaires en précipitation avec moins de 100 mm par mois ce qui correspond à la phase sèche à Carajas (Fig 1.7). Pendant cette période de temps, les fortes précipitations sont localisées au nord de l'Equateur. En septembre-octobre, il y a arrêt et inversion de cette évolution. Les fortes pluies se reconstituent au sud de l'Equateur en novembre.

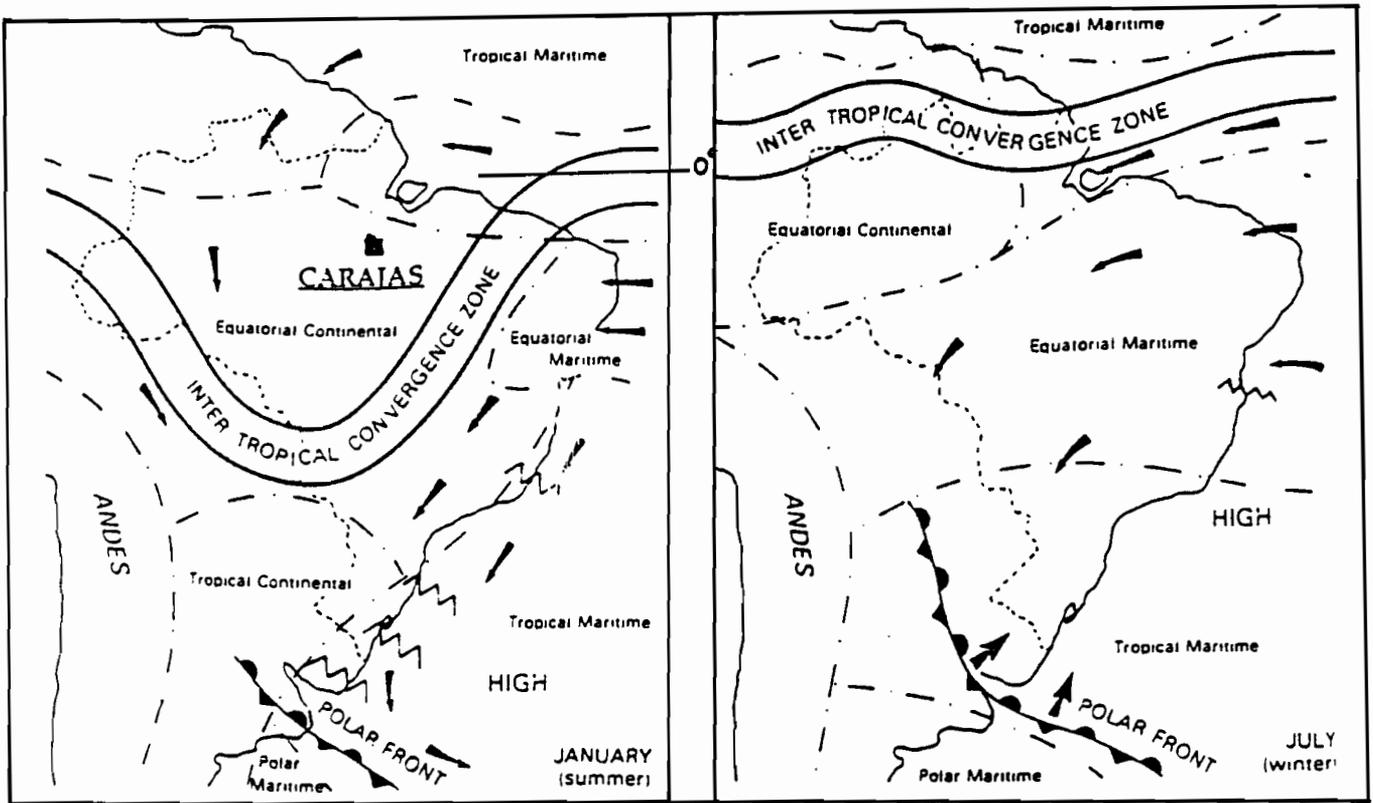
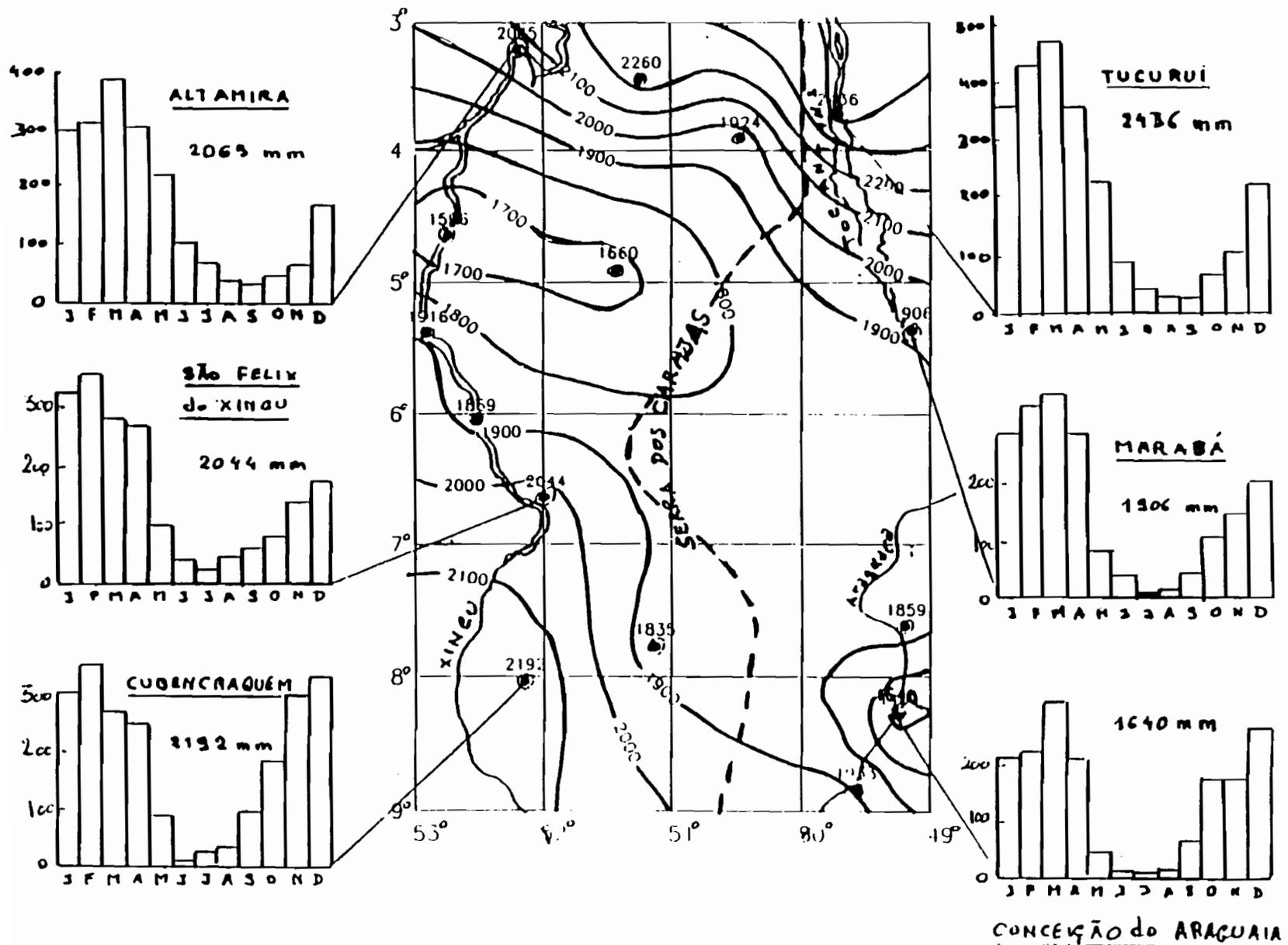


Fig 1.4: Position des masses d'air et directions des vents dominants en Janvier et Juillet, In VAUGHAN-WILLIAMS (1988).

--- limites des masses d'air,
 ~~~~~ fronts mineurs,

Fig 1.5 : Pluviométrie annuelle 1967-1988. Région de la Serra Dos Carajas.



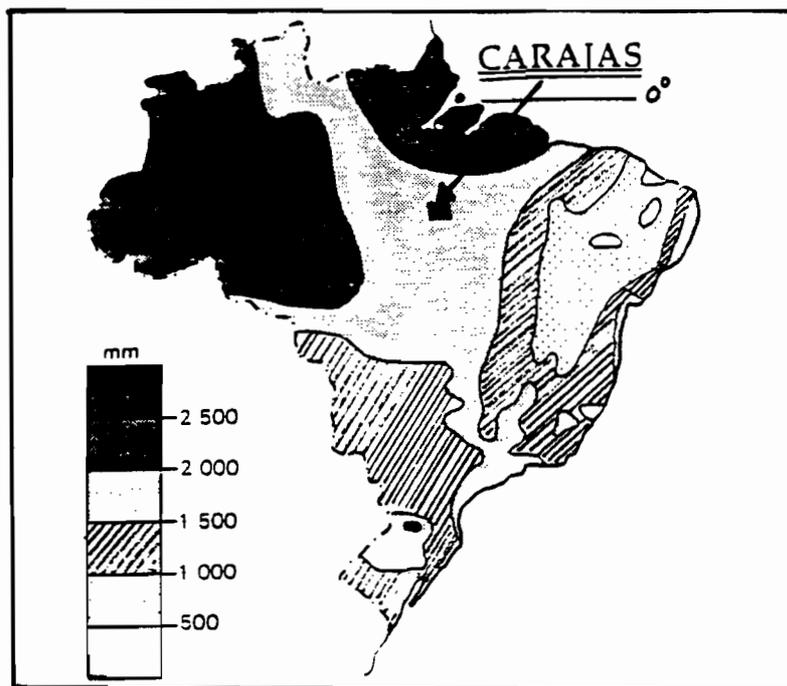


Fig I.6: Carte des précipitations moyennes annuelles au Brésil, In VAUGHAN-WILLIAMS (1988).

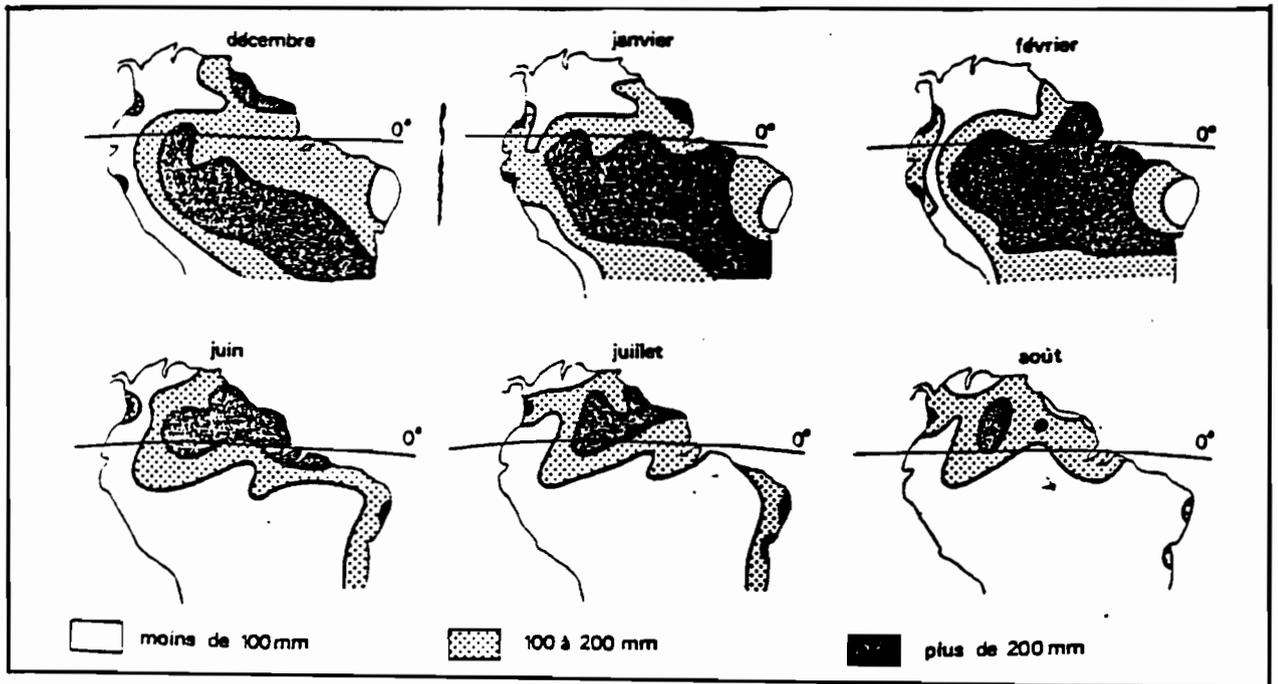
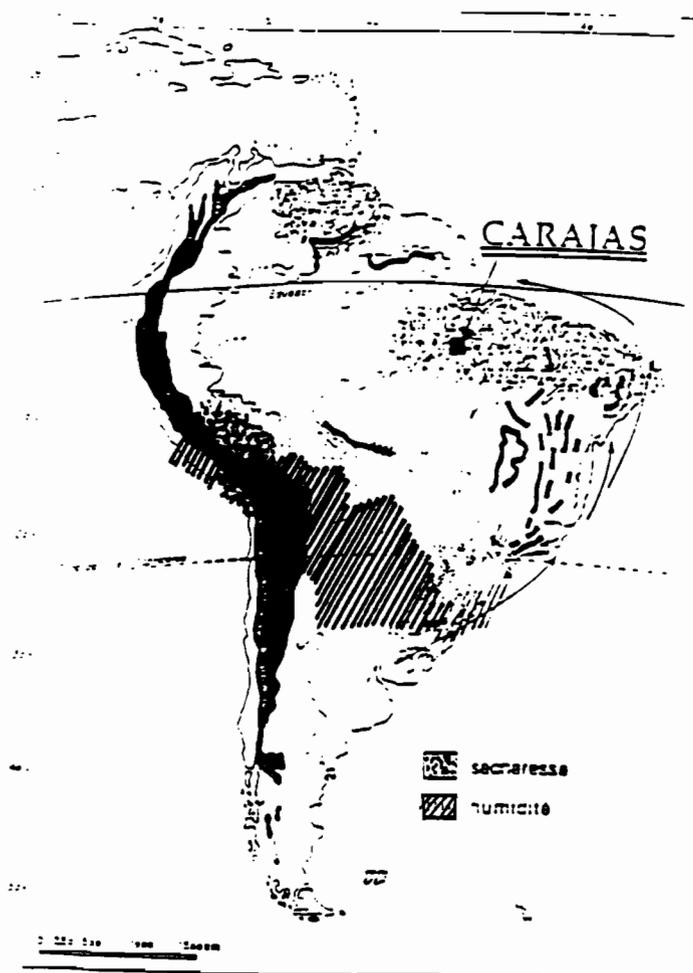


Fig I.7: Distributions des pluies saisonnières en Amérique du sud équatoriale, In PAGNEY (1976).



Anomalies climatiques en Amérique du Sud en 1983 associées à une anomalie thermique du Pacifique oriental "El Nino"

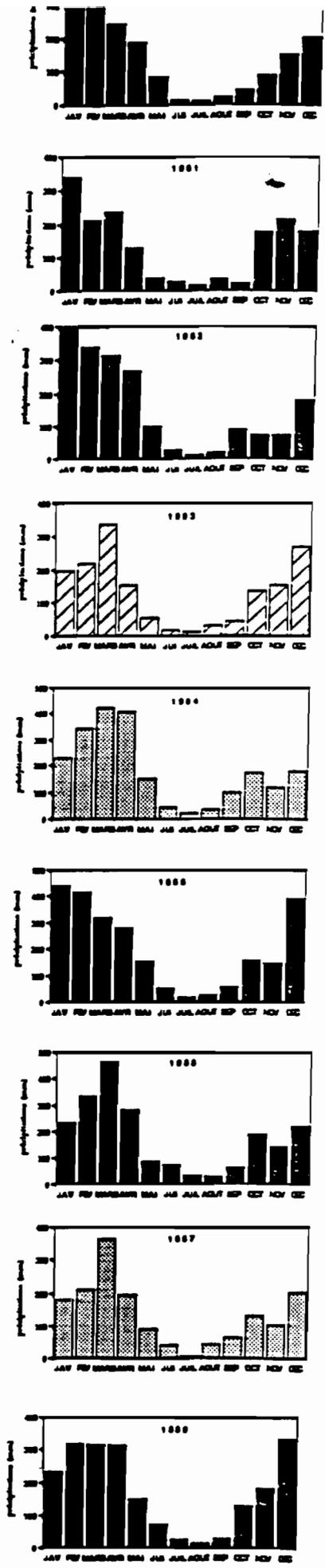


Fig 1.8.a: Influence du phénomène El Nino sur la durée de la saison sèche et la moyenne des précipitations en Amazonie.

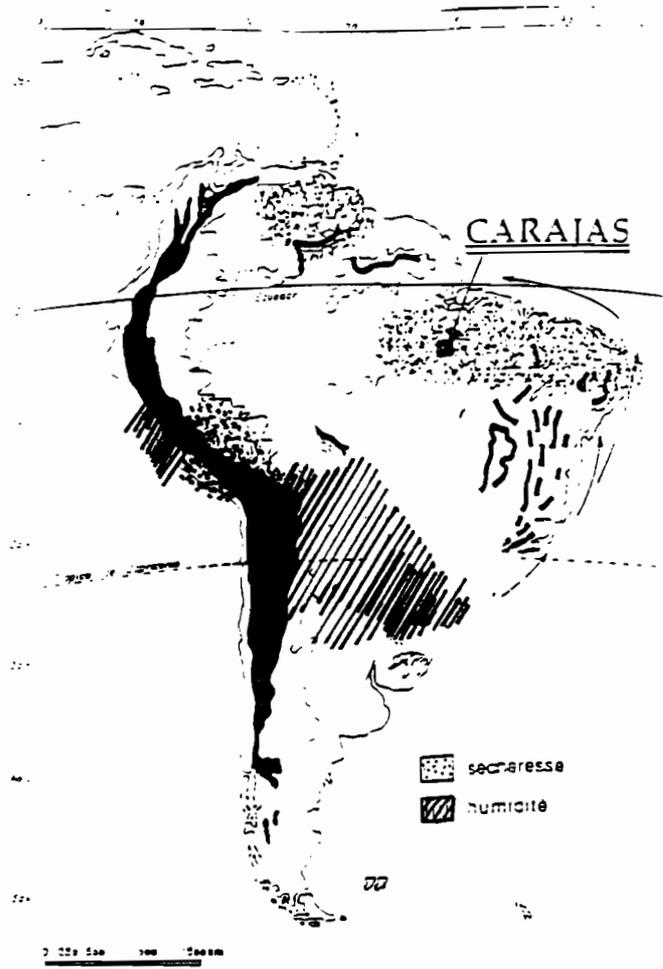
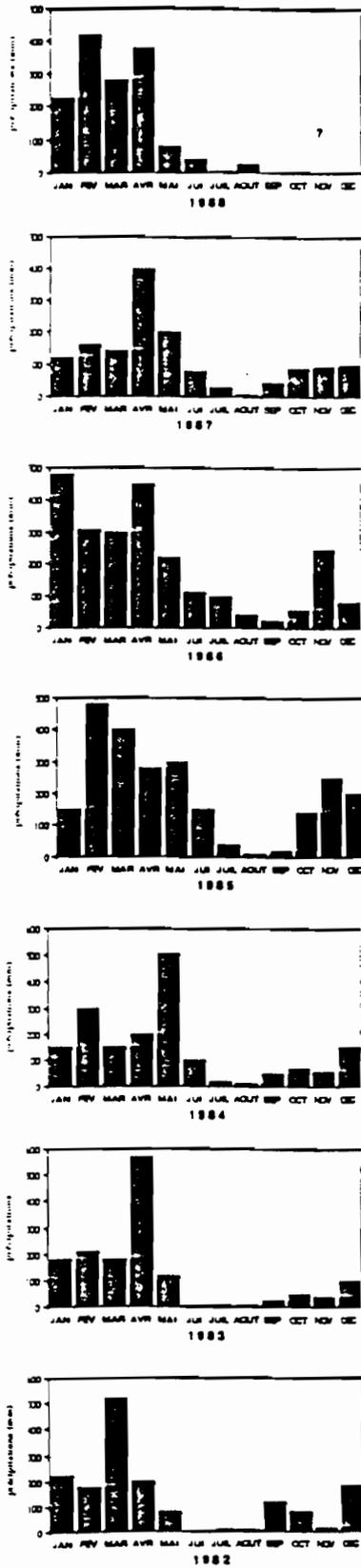


Fig I.3.b: Influence du phénomène El Nino sur la durée de la saison sèche et la moyenne des précipitations à Carajás.

## D.2) LA SAISON SECHE

La saison sèche dans la région de la Serra Dos Carajas a une durée comprise entre **2 et 3 mois**. Le mois le plus sec, août, est défini par des précipitations moyennes mensuelles inférieures à 50 mm. Toutefois, un **renforcement et un prolongement** de la saison sèche peuvent avoir lieu épisodiquement pendant les périodes El Niño. La figure 1.8 en donne l'exemple pour les années 1980-1988.

En 1982-83, il s'est produit un important phénomène **El Niño**, marqué par un **rechauffement** des eaux de l'océan Pacifique au large du Pérou. Cette perturbation a entraîné un **déplacement** vers le Pacifique de la zone de **convection** normalement située sur l'Amazonie, et son remplacement par une zone de **subsidence**. Il s'est manifesté dans la région de Carajas par deux événements;

- une **diminution** des moyennes des précipitations annuelles de 3000 à 1700 mm/an et
- un **prolongement** de durée de la saison sèche de 2 mois à 4 mois (Fig 1.8.a).

Sur le plateau, les conséquences sont plus accentuées et se résument (Fig 1.8.b):

- Par une diminution des moyennes des précipitations qui passent de 2500 mm/an à 1500 mm/an .
- Par un prolongement de la durée de la saison sèche qui passe de 2 à 5 mois.

Pendant l'année qui suit la période El Niño, les **perturbations subsistent**. Elles se manifestent par un prolongement de la diminution des moyennes des précipitations par contre, la saison sèche redevient normale.

L'anomalie de précipitations qui apparaît au début de 1987 peut s'expliquer par l'existence d'un phénomène El Niño qui a avorté avant d'atteindre sa **phase mature**, ce qui explique que la longueur de la saison sèche n'ait pas été affectée.

## D.3) LES TEMPERATURES

La température moyenne maximale est de 26,6°C, la minimale de 20,6°C. Tout le long de l'année, et au cours de la journée, les températures les plus élevées s'observent entre midi et quatorze heures. Juillet et août sont les mois les plus chauds mais on ne peut en fait signaler de grandes variations de la température journalière ou saisonnière car les écarts sont très faibles ( de 0,6°C à 2,1°C).

## E) VEGETATION ACTUELLE

La forêt dense est présente dans l'ensemble de la région de la Serra Dos Carajas, à l'exception des plateaux cuirassés où la végétation est souvent rare. L'étude botanique réalisée lors de la mission de terrain par M.FERREIRA et A.M CLEEF 1989, sur le plateau de Carajas a montré que la végétation présentait une zonation en fonction des reliefs, et variait d'un endroit à l'autre. (Fig 1.9).

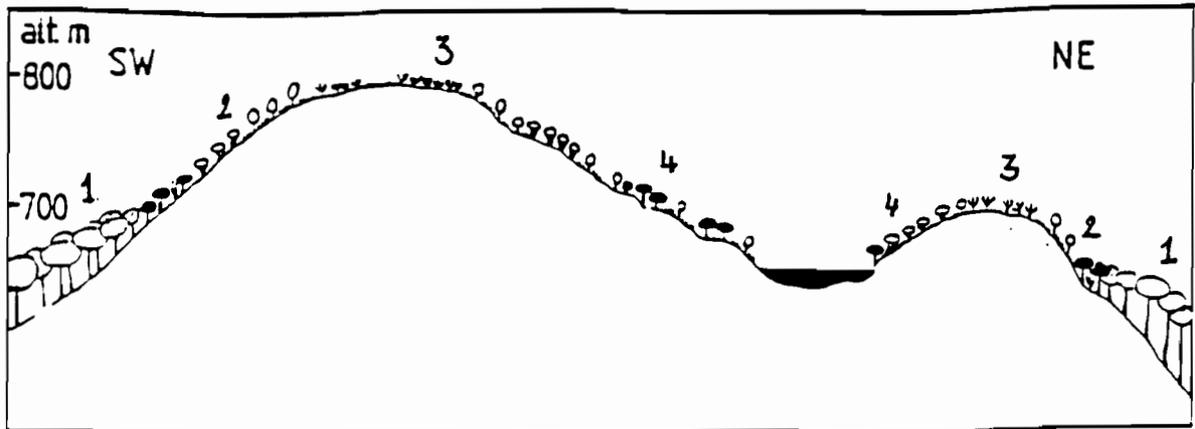


Fig I.9: Zonation de la végétation dans la Serra Sul Carajas.

(Explication dans le texte page 19)

1-Dans les zones de transition, sur les pentes au pied du plateau, au contact de la forêt amazonienne, la proportion des bryophytes est limitée. La végétation qui s'y développe est composée principalement par des essences arborées représentées par: **Melastomataceae, Nyctaginaceae, Euphorbiaceae, Myrtaceae, Aparisthmium.**

2-Sur la partie supérieure des pentes la végétation arborée diminue, et est représentée par: **Callisthene, Mycrophylla, Mimosa sp., Norantea goianensis, Vellozia sp., Gautheira sp., Parkia platycephala, Cyperaceae.**

3-Sur les plateaux cuirassés, la végétation est formée par des essences de savane représentée principalement par: **Ipomomea carajanensis, I. marabensis, Cassythafiliformis, Perama carajanensis.**

4-Dans les zones déprimées du plateau, s'observe une formation arborée composée par : **Pouteria sp., Coumarouna odorata., Pradosia praelta, Cenostigma sp.**

CHAPITRE II

MATERIELS D'ETUDE ET  
DATATIONS

## A) MATERIELS D'ETUDE

Deux carottes, *CSS2 et CSS10*, ainsi que des échantillons du milieu *actuel* font l'objet de cette étude. Les prélèvements ont été réalisés pendant le mois de *septembre* qui correspond à la saison sèche dans cette région.

### A.1) TECHNIQUE DE PRELEVEMENTS

Les carottes ont été prélevées à l'aide d'un petit carottier à vibration, construit à l'observatoire National de Rio de Janeiro par L.Martin (1989). Le premier but de cette technique est d'effectuer, dans des sédiments continentaux secs ou saturés en eau et dans des sédiments subaquatiques, un prélèvement continu non perturbé pouvant atteindre, dans les cas favorables 12 m de longueur.

Avec cette technique, tous les problèmes de prélèvements dans les sédiments saturés en eau, de compactation, de contamination, de raccordement des différents macéraux successivement prélevés, sont éliminés, ce qui n'est pas le cas des autres techniques couramment utilisées. Par ailleurs, tout le matériel nécessaire à la construction de ce type d'appareil se rencontre couramment dans le commerce à un prix relativement peu élevé. Enfin, le transport du matériel peut être effectué à l'aide d'un véhicule léger du type "Break". Sa mise en oeuvre peut être faite par une équipe de deux personnes; une opération complète avec montage et démontage s'effectue en moins d'une heure.

Le principe du carottage consiste à fixer à l'extrémité d'un tube métallique un petit vibreur à béton. Sous l'effet des vibrations, le tube, placé sur le sol en position verticale, s'enfonce dans les sédiments en l'espace de moins d'une minute à quelques minutes. Cet enfoncement peut aussi bien s'effectuer sur une terre ferme que sur l'eau jusqu'à des profondeurs de 10 mètres. Dans ce cas, l'opération est effectuée à partir d'une plate-forme fluctuante, démontable et transportable sur une petite remorque.(Fig II.1.0)

Cette technique a été utilisée dans certains lacs de Carajas. Normalement, il n'est pas possible de retirer à la main le tube ainsi enfoncé dans le sédiment. On utilise donc, pour cette opération, un palan accroché au sommet d'un trépied construit à l'aide de trois tubes d'environ trois mètres de longueur; ce trépied en cas de besoin peut également être monté sur la plate-forme fluctuante.(Fig II.1.0).

En général, on utilise pour le carottage des tubes d'irrigation en aluminium de 6 mètres de longueur, 7,5 centimètres de diamètre et de parois de 1,1 mm d'épaisseur. Dans le cas où un tube de 6 mètres pénètre sans difficulté dans le sédiment, il est possible de raccorder deux éléments de 6 mètres pour obtenir un unique tube de carottage de près de

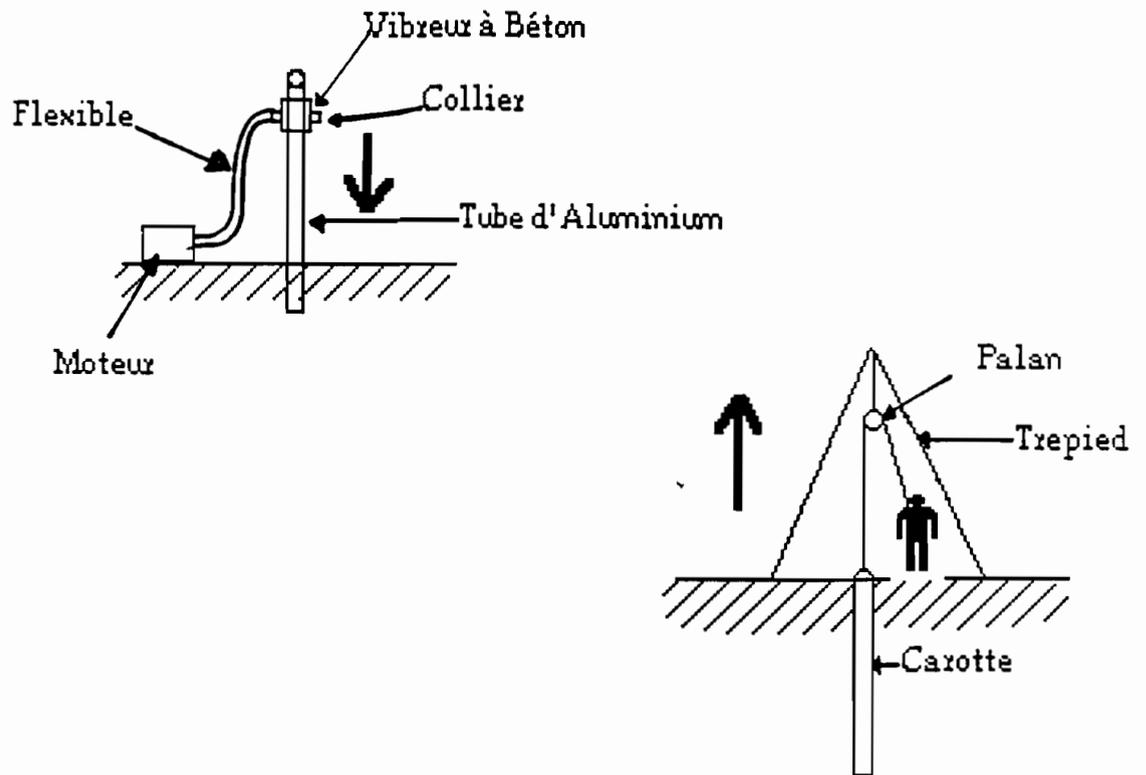
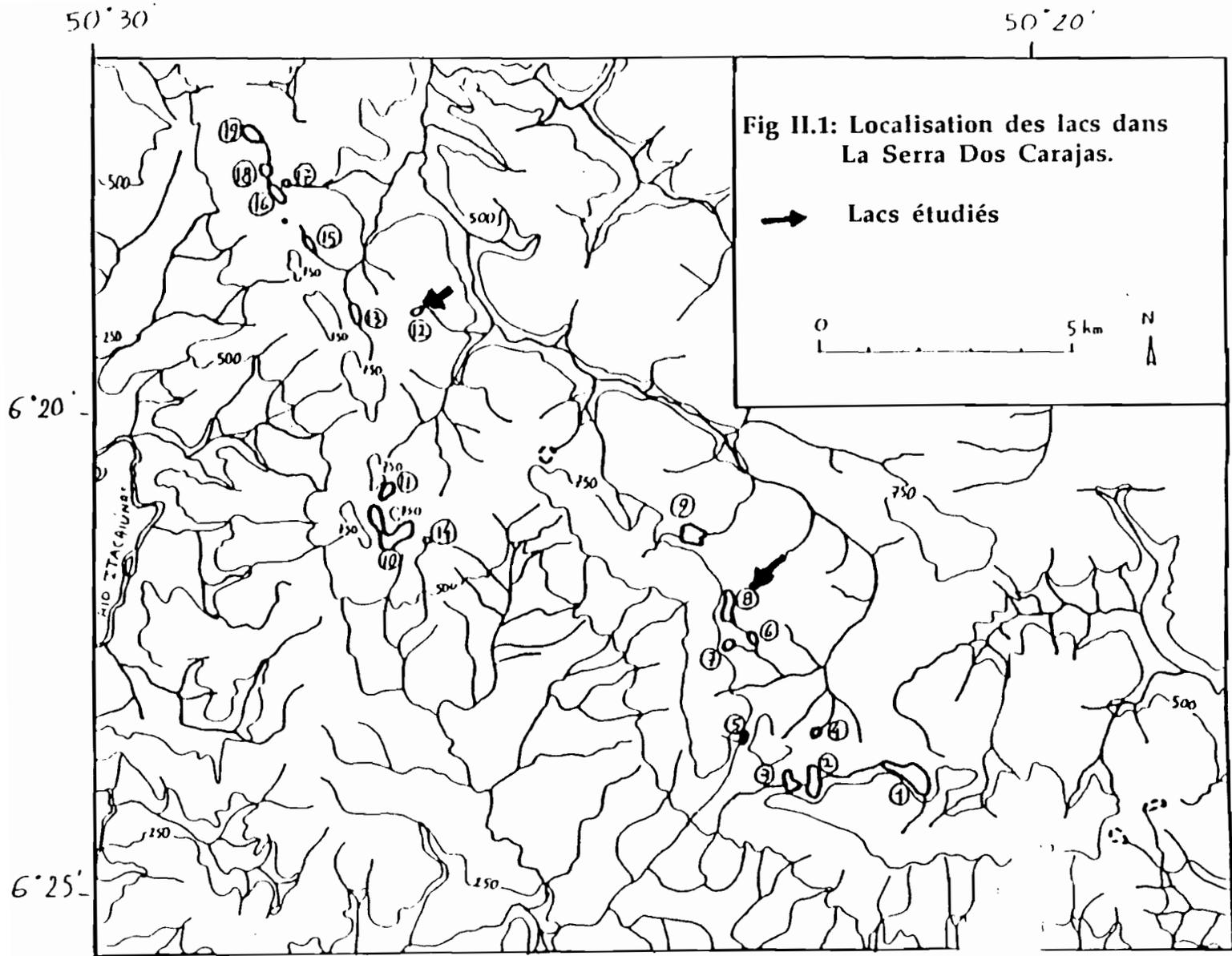


Fig II.1.0: Technique de prélèvements des carottes



11,5 mètres. Une longueur supérieure est difficile à dépasser en raison des difficultés pour mettre en position verticale un tel ensemble.

Elle est techniquement possible mais implique l'utilisation de techniques plus lourdes, souvent incompatibles avec les difficultés d'accès aux zones de carottage. Le tube une fois retiré du sédiment est bouché à ses deux extrémités et tronçonné ou non en fonction des contraintes de transport.

Un des avantages de cette technique est que le tube de carottage sert de tube de transport, ce qui élimine toutes sortes de manipulation du sédiment et évite les possibles perturbations et contaminations. Une fois au laboratoire le tube contenant la carotte est scié latéralement et ouvert à la manière des carottes marines. Les deux moitiés de carottes ainsi obtenues permettent une visualisation parfaite des différentes séquences sédimentaires et des échantillonnages spécifiques très précis.

## A2) LA CAROTTE CSS2

Cette carotte a été prélevée au centre d'une dépression marécageuse n°8, située à 710 mètres d'altitude (Fig II.1), correspondant à un ancien lac, de nos jours comblé par des sédiments fins dont le sommet se situe au niveau d'un exutoire. Une coupe Nord-Sud montre (Fig II.2):

- à l'extérieur on note la présence de graminées
- sur une seule bordure on rencontre une végétation composée principalement par des palmiers (*Mauritia*, *Blechnum*).
- le centre du lac est occupé par une végétation formée principalement par des *Cyperacées*.

La carotte CSS2 traverse les dépôts lacustres sur six cent cinquante centimètres de profondeur. La description visuelle montre l'existence de **huit unités lithologiques**. Les unités " 1, 3, 5, 7" correspondent à une argile-sableuse de couleur brun-jaunâtre, riche en carbonate de fer (*sidérite*,  $Fe_2 CO_3$ ); les autres "2, 4, 6, 8", de couleur gris-noirâtre sont riches en **matière organique**, où abondent, surtout à la partie supérieure de ces unités, des fragments de bois (Fig II.3).

## A3) LA CAROTTE CSS10

Ce sondage de trois cent cinquante cinq centimètres de longueur a été réalisé au centre du lac n°12 (Fig II.1) actuellement occupé par un marécage entouré par des palmiers. La végétation qui occupe ce lac est principalement herbacée (Fig II.4). La description visuelle a mis en évidence **trois unités lithologiques** (Fig II.5):

une unité de base : de couleur brun à gris foncé et de texture argileuse riche en sidérite présentant parfois des niveaux **de sidérite** individualisés sous forme de concrétions.

une unité médiane : argile de couleur brun foncé à beige

une unité sommitale : argile-organique de couleur noire à gris foncé, riche en matière organique présentant à la base entre 80 et 92 cm des **poupées à sidérite**. Dans la partie supérieure abondent des débris végétaux.



Fig II.4: Profil Nord-Sud montrant la zonation végétale du lac n°12.  
d'après M. Ferreira et A.M. Cleef (1989)

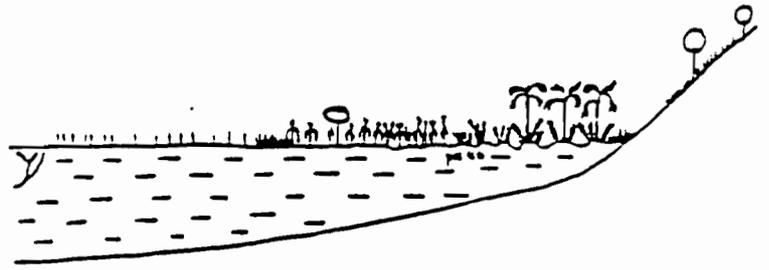


Fig II.2: Profil Nord-Sud montrant la zonation végétale du lac n°8.  
d'après M. Ferreira et A.M. Cleef (1989)

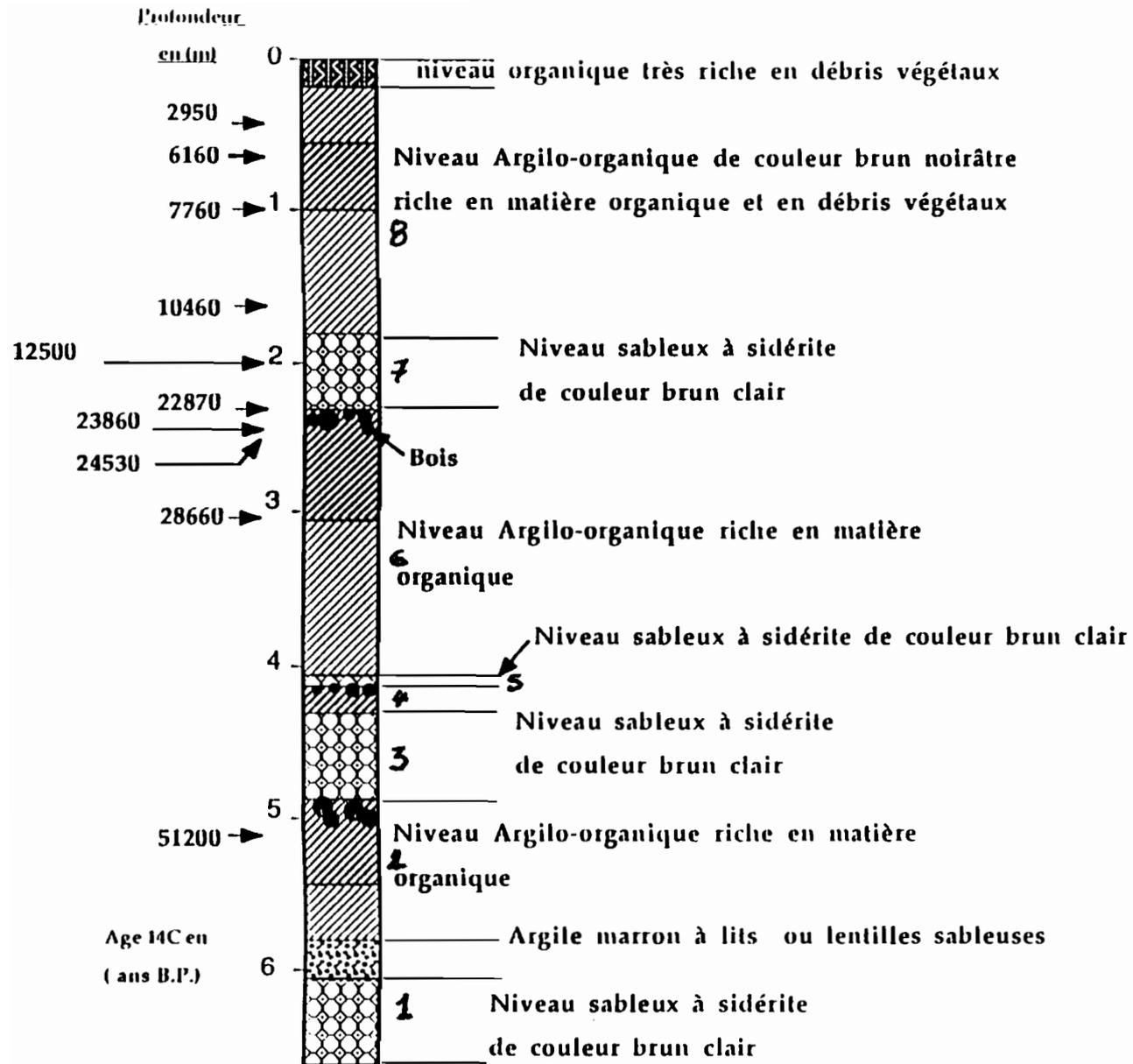


Fig II.3: Description visuelle de la carotte CSS2, lac n°8, ( Serra Sul, Carajas, Brésil)

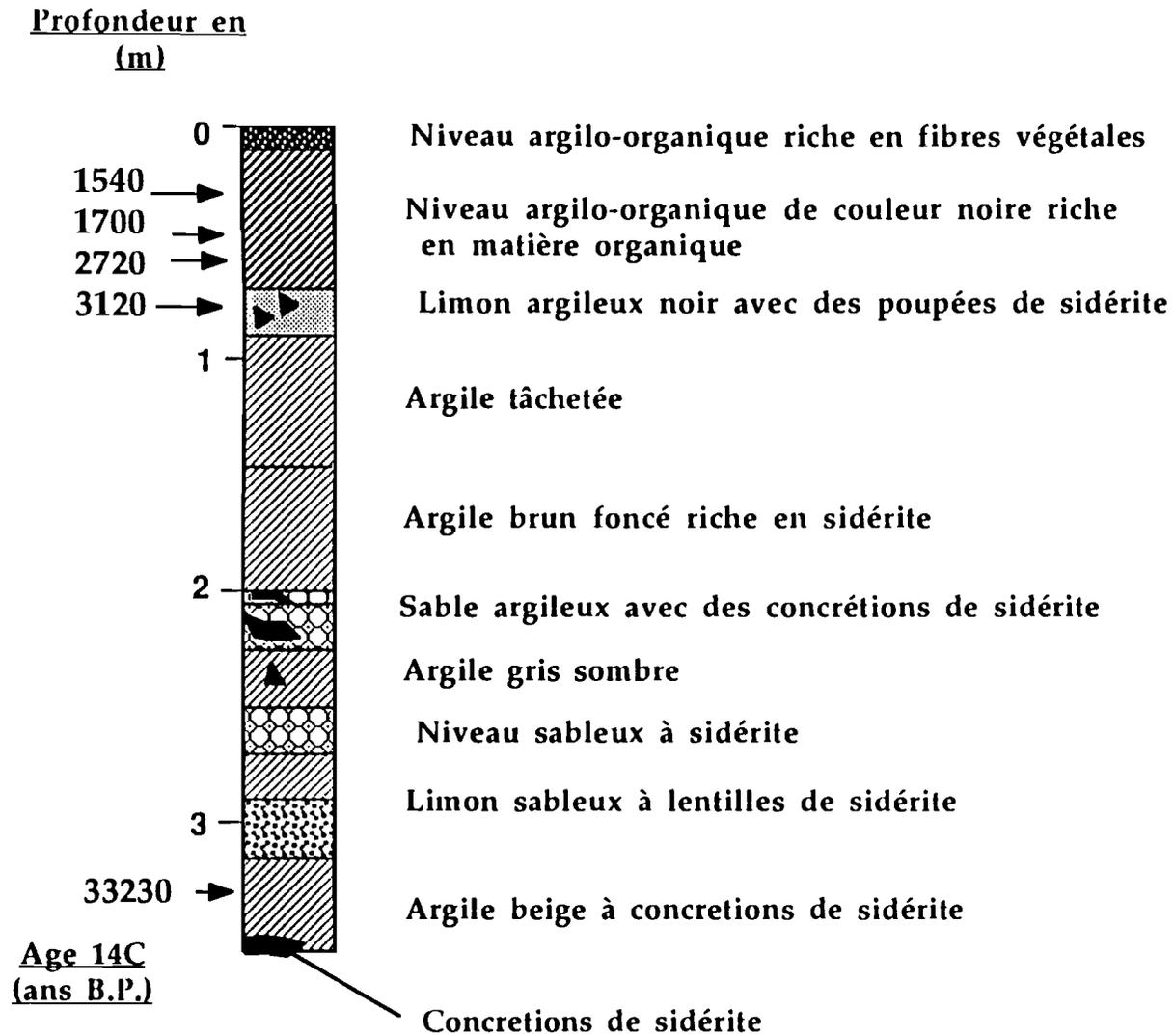


Fig II.5: Description visuelle de la carotte CSS10, lac n°12,  
( Serra Sul, Carajas, Brésil)

#### A4) ECHANTILLONAGE DE L'ACTUEL

Pour mieux comprendre les *variations des paléoenvironnements*, un échantillonnage de l'actuel a été réalisé sur certains lacs. Le nombre d'échantillon est *limité* en raison des *difficultés d'accès* qui nous ont empêché de faire un échantillonnage complémentaire.

##### A4.1) LA CAROTTE T1

Cette petite carotte de 23 cm de longueur a été prélevée au centre du lac n°9 sous **2,30 mètres** d'eau. La végétation est représentée par des macrophytes.

##### A4.2) LA CAROTTE T2

La carotte T2 de 14 cm de longueur a été échantillonnée sous **3,10 mètres** de profondeur au centre du lac n°10, pratiquement *sans végétation*. De plus, dans la partie distale d'un cône de déjection, deux échantillons L9(1) et L9(2) ont été prélevés en bordure du lac, le premier à l'aval de ce cône sous 10 cm d'eau, et le deuxième dans la zone de balancement du niveau du lac.

##### A4.3) LA CAROTTE T3

La carotte T3 de 9 cm de profondeur a été prélevée dans le lac n°20 pratiquement *sec* et entouré par une *végétation de palmiers*.

### B) DATATIONS:

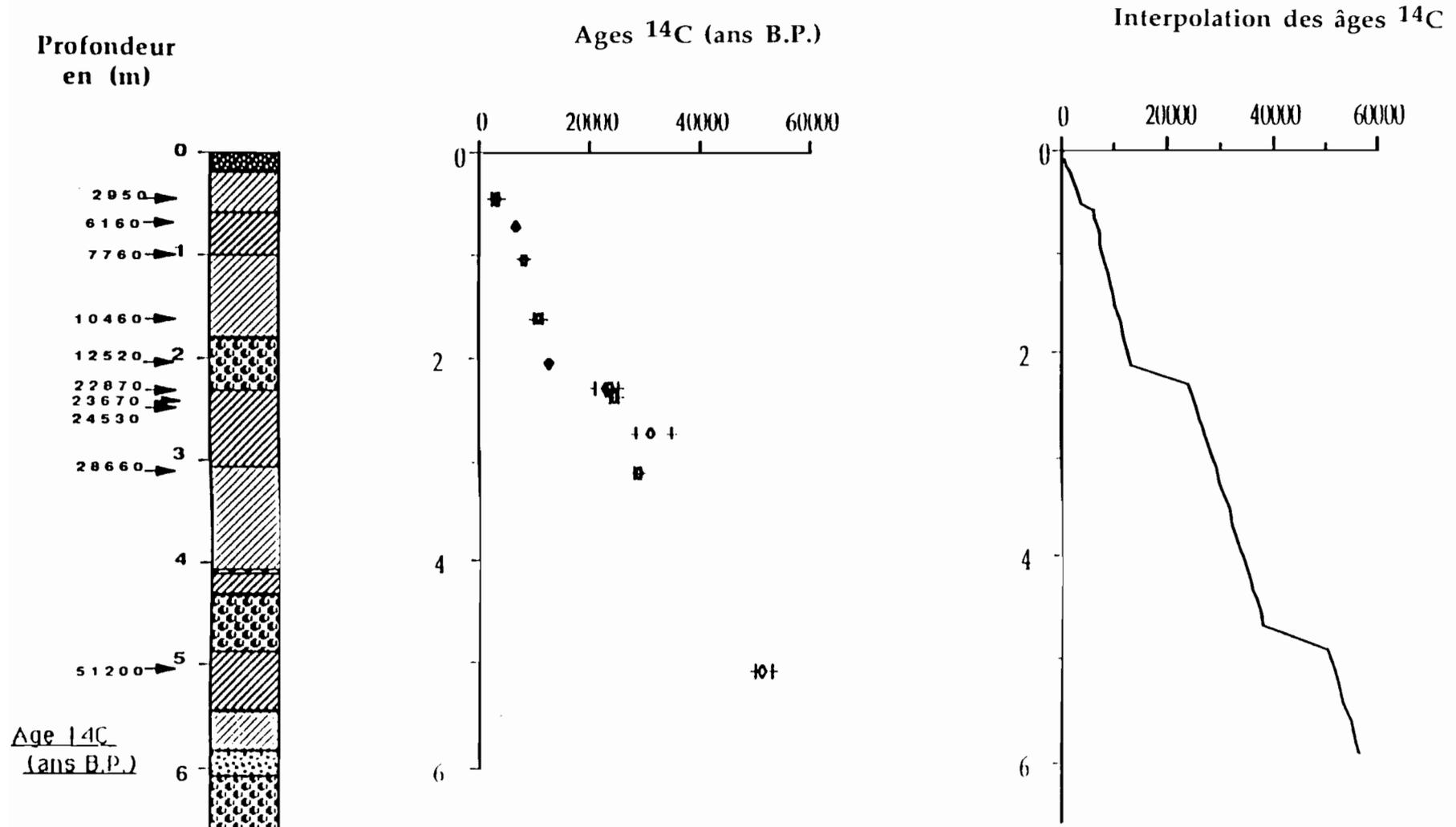
Les datations au  $^{14}\text{C}$  ont été réalisées à l'unité de Géochimie Isotopique du Laboratoire des Formations Superficielles (ORSTOM BONDY) par M.FOURNIER, et à *Groningen (Isotopes Physics Laboratory)*. Elles sont en nombre de seize. Onze appartiennent au sondage CSS2 et cinq au sondage CSS10.(Tableau II.1 et II.2)

Ces datations permettent d'établir des repères chronologiques très *satisfaisants*, entre 40 000 ans B.P environ et l'actuel.

#### B.1) CAROTTE CSS2:

La distribution des ages isotopiques  $^{14}\text{C}$  en fonction de la profondeur le long de la carotte CSS2 *est cohérente* (Fig II.6). *Deux paliers* ont été mis en évidence, l'un situé entre **5000 ans B.P et 3500 ans B.P** dans la série IV et l'autre beaucoup plus marqué entre **22.870 ans B.P et 12 500 ans B.P** à la limite supérieure de la série III.

Fig II.6: Distribution des âges  $^{14}\text{C}$  (ans B.P.) le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil).



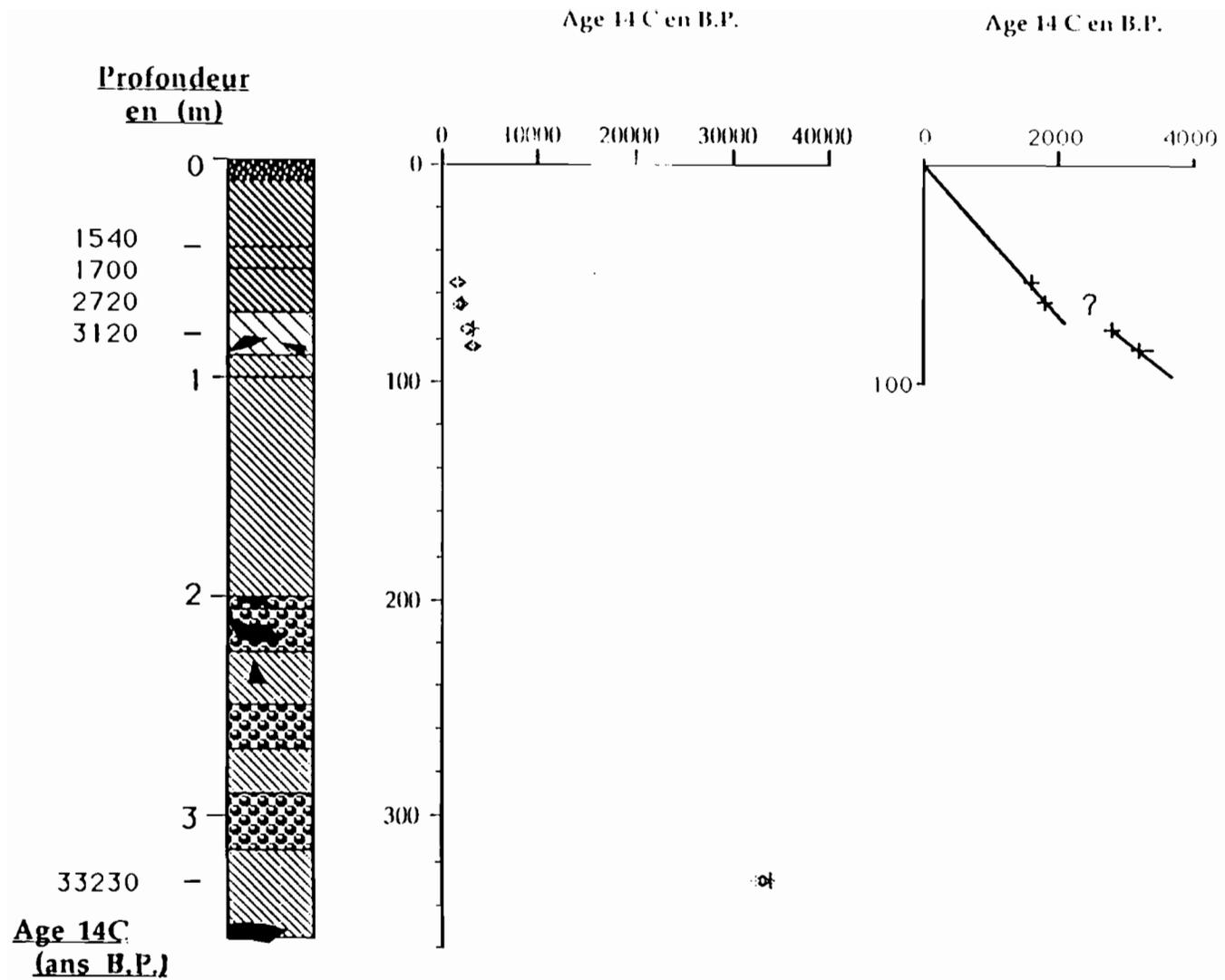


Fig II.7: Distribution des ages  $^{14}\text{C}$  (ans B.P.) le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil).

Ces deux paliers confirment l'existence de deux *lacunes* sédimentaires dues probablement à un assèchement périodique de la dépression pendant les deux intervalles de temps définis dans le paragraphe précédent.

L'unique datation (51 200 ans B.P) localisée dans la partie basale de la carotte CSS2 (510 cm) ne permet pas de dater ni d'identifier précisément les plus anciennes lacunes de sédimentations; une estimation par *extrapolation* permet de situer l'une vers 40 000 ans B.P environ et l'autre vers 60 000 ans B.P.

Dans l'état actuel des chronologies, la distribution des âges le long de la carotte CSS2 met en évidence une vitesse de sédimentation constante qui se prolonge jusqu'au niveau à sidérite. Le maintien d'une vitesse de sédimentation constante peut s'expliquer par une compensation de l'augmentation de la densité dans le niveau à sidérite par la diminution de la teneur en eau dans l'échantillon.

Les flux exprimés ( $\text{g.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$ ) ont été calculés par multiplication du taux d'accumulation ( $\text{g/cm}^3$ ) et du taux de sédimentation moyen dans une séquence sédimentaire. Ce calcul est important car il nous renseigne sur les apports des différents constituants indépendamment les uns des autres.

## B.2) CAROTTE CSS10

Vue les *faibles* quantités de carbone organique dans les faciès à sidérite, les datations  $^{14}\text{C}$  n'ont été réalisées que sur les niveaux organiques riches en carbone. Cinq datations ont été effectuées dont deux au laboratoire de géochronologie de Bondy et trois par Beta Analytics (ETH/AMS Zürich).

La répartition de ces âges en fonction de la profondeur dans les niveaux organiques confirme *la bonne cohérence* de ces datations et permet de localiser *un palier*, moins marqué que ceux de la CSS2 entre **2000 ans B.P et 2600 ans B.P** (Fig II.7), témoignant de la présence d'une *lacune* de sédimentation pendant cet intervalle de temps due sans doute à un assèchement de cette dépression. L'unique datation disponible dans la partie inférieure de la carotte CSS10 (33 230 ans B.P ) ne permet pas de dater d'une façon formelle les épisodes basals de cette carotte.

CHAPITRE III

APPROCHES  
METHODOLOGIQUES

## I) APPROCHE SEDIMENTOLOGIQUE

### A) OBSERVATION A LA LOUPE BINOCULAIRE :

Dans le but de préciser *la description macroscopique* de la carotte et de mieux caractériser les faciès lithologiques, une observation à la loupe binoculaire a été réalisée sur la fraction supérieure à 50 microns.

### B) TENEUR EN EAU

Afin de suivre la variation de l'intensité du *compactage* et de la porosité dans les différentes unités lithologiques des carottes CSS2 et CSS10, la teneur en eau a été mesurée le long des deux profils.

Des cubes de 8 cm<sup>3</sup> sont prélevés dans le sédiment. Ils sont immédiatement pesés et mis à l'étuve à 40°C pendant une semaine, puis repesés. La différence de poids nous donne la teneur en eau exprimée en % du poids humide.

### C) DENSITE

Le but de cette approche est de caractériser le sédiment par sa *densité* le long des deux carottes.

On utilise un pycnomètre d'une capacité de 50 cm<sup>3</sup> environ et on effectue successivement les pesées suivantes

- a- pycnomètre vide,
- b- pycnomètre contenant le sédiment brut (environ 15g),
- c- pycnomètre rempli d'eau,
- d- pycnomètre +sédiment+eau.

On en tire la densité réelle

$$D = (\text{poids de sédiment} / \text{volume de sédiment})$$

$$\text{Poids de terre} = b - a$$

Volume de terre = volume du pycnomètre (c-a) moins volume d'eau ajouté pour compléter le pycnomètre (d-b)

$$(c - a) - (d - b) = (b + c) - (a + d)$$

$$D = (c - a) / (b + c) - (a + d)$$

### D) SPECTROMETRIE INFRAROUGE:

Le but de ce travail est d'utiliser l'analyse spectrale infra-rouge dans le domaine des *reconstitutions paléoenvironnementales*, en *quantifiant* les constituants minéraux pour apprécier les flux des différents constituants et leurs variations le long des profils.

Nous montrerons ici comment cette quantification peut être appréhendée par la spectrométrie infra-rouge.

### D.1) PRINCIPE

La spectrométrie infra-rouge est couramment utilisée dans diverses disciplines. Depuis longtemps, elle est considérée comme un bon instrument d'analyse en chimie organique. Son utilisation en sédimentologie est récente, et pour la **première fois**, elle est appliquée aux minéraux dans l'étude des sédiments quaternaires.

L'analyse spectrale infra-rouge est basée sur ***l'interaction entre la matière et le rayonnement électromagnétique qui la traverse*** (FRÖHLICH, 1981). Rappelons que le faisceau infra-rouge incident excite les molécules et les fait passer à un niveau d'énergie plus élevé; il y a donc absorption par la matière.(Fig III.2)

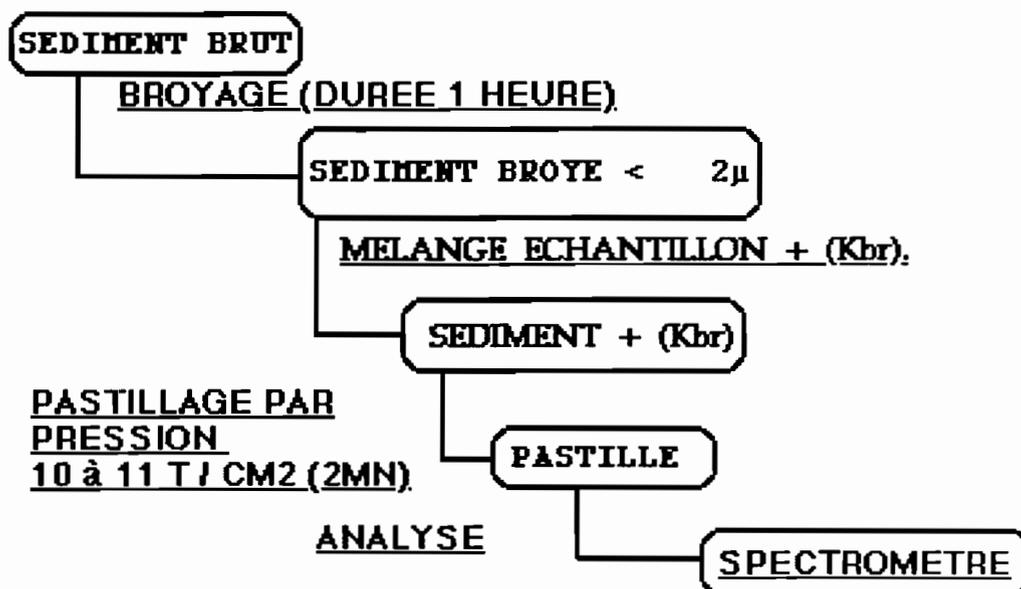
Les absorptions d'énergie par les substances minérales se traduisent sur les spectres par une variation de transmission ( $T = P/P_0$ , T= transmission, P et P0 correspondent respectivement aux puissances radiantes initiale et finale) (FRÖHLICH, 1981).

Donc dans un échantillon analysé, chaque constituant minéral ou organique présente une absorption propre à des longueurs d'ondes bien définies. Ceci nous permet, l'absorption étant une fonction de la concentration (loi de Lambert-beer), d'effectuer la détermination des constituants ainsi qu' une analyse quantitative des différents composants à condition de se placer dans les limites imposés par cette loi. L'unité est la fréquence exprimée en nombre d'ondes par centimètre ( $\text{cm}^{-1}$ ).

### D.2) METHODE

Les échantillons ont été préparés conformément à la procédure mise au point pour les roches sédimentaires (FRÖHLICH, 1981). L'analyse spectrale infra-rouge a été faite à l'aide d'un spectromètre dispersif PYE UNICAM SP 2000. Les échantillons sont broyés jusqu'à un diamètre ***inférieur à 2  $\mu\text{m}$*** , condition nécessaire à l'application de la loi de Lambert-beer (FRÖHLICH, 1981). La durée du broyage dépend de la ***qualité***, de la taille, et de la ***dureté*** du matériel à analyser. Pour les échantillons de Carajas j'ai effectué deux broyages:

- pour homogénéiser le grain des sédiments, un broyage de trente minutes a été réalisé avec un mortier au carbure de tungstène.
- afin de réduire le diamètre des grains jusqu'à deux microns ,le sédiment déjà homogénéisé, est broyé pendant une heure dans une cellule en agathe avec trois billes (d'agate) . L'ensemble est monté sur un vibreur électromagnétique dont on peut régler l'intensité des vibrations.



**Fig III.1 : Schéma résumant le mode opératoire de l'analyse spectrale infra-rouge**

L'analyse est faite sur des pastilles réalisées par pression sous vide de 10 à 11 T/cm<sup>2</sup>, pendant deux minutes, de 300 mg d'un mélange contenant du bromure de potassium et seulement 0,75mg d'échantillon.

Une observation systématique au microscope est effectuée sur frottis pour vérifier que la taille des grains est bien inférieure à 2µm..

Les principaux composants minéraux ont été déterminés et dosés sur leurs bandes d'absorption spécifiques. Le maximum d'absorption de chaque bande est une fonction exponentielle de la concentration (loi de Lambert-beer).

$$P/P_0 = T = e^{-(w.l.c)} \text{ et } A = w.c.l \quad (1)$$

$$(A) = \log (1/T) \quad (2)$$

( T= transmission, A= absorbance c= concentration w=coefficient d'extinction spécifique l =longueur d'onde du trajet optique )

Sur les spectres obtenus à partir des pastilles de Kbr, en raison de l'absorption propre à ce produit, l'absorbance ne peut être calculée directement. On la détermine en établissant une ligne de base ( Fig III.2) qui nous permet d'obtenir la transmission initiale T<sub>0</sub>. Partant de la relation (2) on alors:

$$A = \log (1/T) - \log (1/T_0)$$

$$A = \log (T_0) - \log (T)$$

$$c = \log (T_0/T) / w.l$$

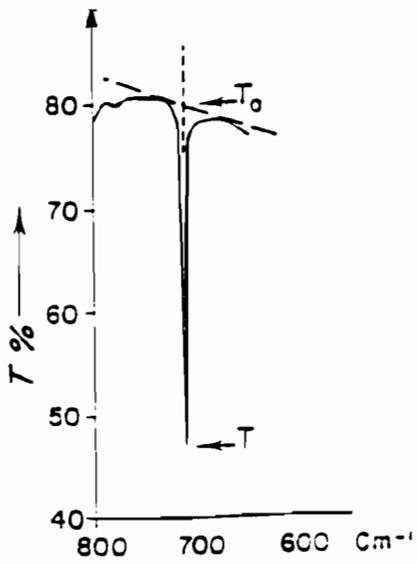


Fig III.2: Construction de la ligne de base pour le calcul de l'absorbance et de la concentration. Exemple Bande  $714\text{ cm}^{-1}$  de la calcite, In FRÖHLICH (1981).

Le calcul des concentrations réalisé à partir de plusieurs bandes d'absorption pour chaque minéral, a souvent nécessité des opérations en séquences, en raison des recouvrements partiels des absorptions de certains constituants (FRÖHLICH, 1981).

La précision des mesures dépend de la *rigueur* de la *standardisation*, de la procédure de préparation et de l'état du matériel. Dans notre cas, cette précision est variable d'un constituant à l'autre; elle est estimée de 2% à 5%.

Les constituants choisis pour cette approche sont: la *sidérite*, le *quartz*, la *kaolinite*, et la *silice amorphe*. Chacun de ces constituants a un spectre propre d'absorption (Fig III.3 a,b,c,d). Les mesures donnent des valeurs de concentration en gramme par gramme du sédiment brut. Ces mesures sont absolues et donc indépendantes des différents constituants.

## II) LA GEOCHIMIE MINERALE

### A) DOSAGE DU FER TOTAL

#### A.1) BUT

L'intérêt de cette mesure réside dans le fait que le fer est issu du bassin versant et qu'il passe dans le lac essentiellement sous forme détritique, et cette analyse a donc pour but de quantifier le fer total le long des carottes afin d'en apprécier les apports détritiques, et de connaître leur influence dans les transformations post-sédimentaires et notamment leur rôle dans la *formation des carbonates de fer (sidérite)*.

#### A.2) METHODOLOGIE

La méthode utilisée est basée sur la spectrophotométrie de flamme à absorption; le mode opératoire est le suivant:

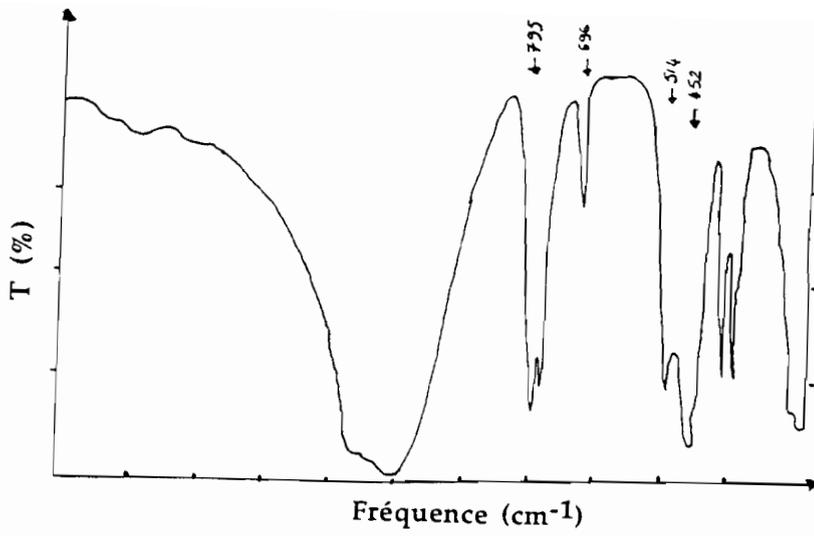
- 1) Attaque ( $\text{HNO}_3$ ) pour oxyder la matière organique
- 2) Attaque perchlorique ( $\text{HClO}_4$ ) concentré pour isoler le fer des autres éléments
- 3) Filtrage dans une fiole de 250 ml avec de l'eau distillée
- 4) Dilution dans 60ml d'eau distillée.

La teneur du fer est déterminée sur l'extrait par la spectrophotométrie de flamme.

### B) DOSAGE DU PHOSPHORE TOTAL

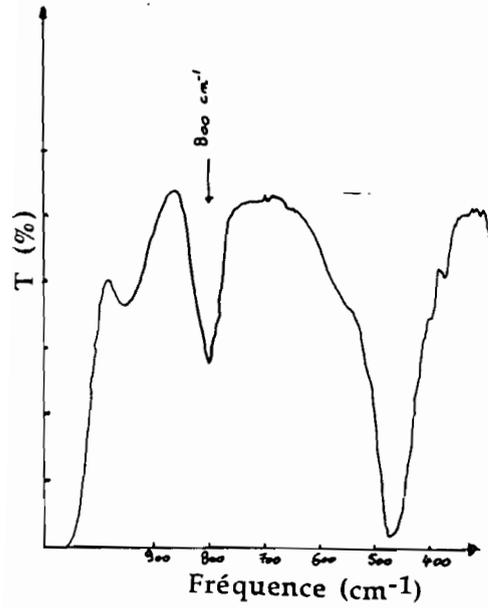
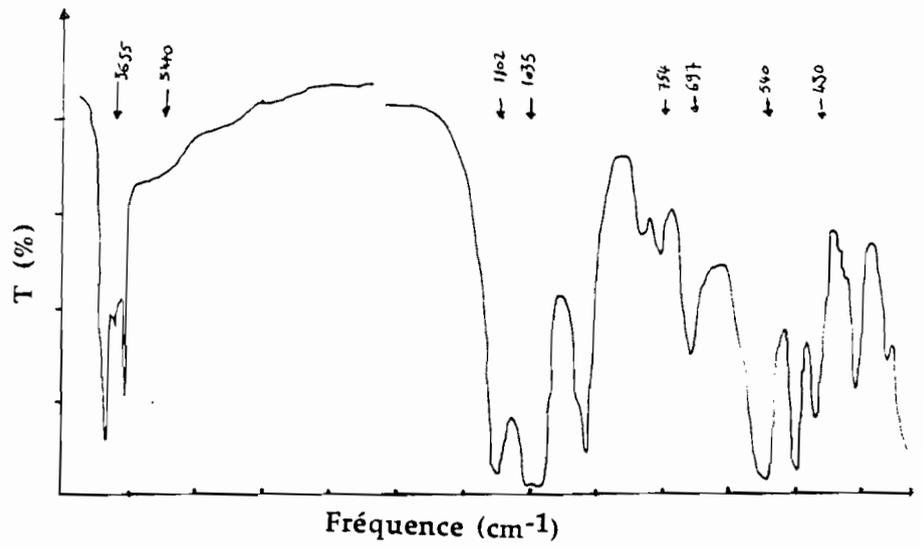
#### B.1) BUT

De la même manière que pour le fer nous avons dosé le phosphore total afin de suivre sa variation le long du sondage pour déterminer sa contribution dans le dépôt et son évolution diagénétique.



b: Quartz

c: Kaolinite



a: Sidérite

d: Silice amorphe

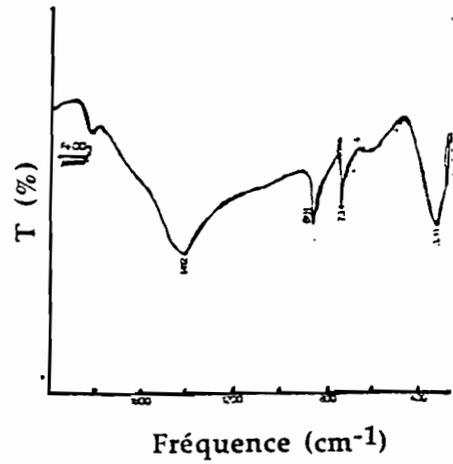


Fig III.3 : Les spectres d'absorption de la Sidérite, Quartz, Kaolinite, Silice amorphe.

## B.2) METHODE

La méthode est celle décrite par MERPHY et RILEY ( 1962), et consiste à faire une colorimétrie du  $P_2O_5$  à froid par réduction du bleu de molybdène en présence d'un catalyseur de réaction (tartrate antimoyl de potassium ).

Différentes formes de phosphore, phosphore lié à l'aluminium (P-Al), phosphore lié au Fer (P-Fe), phosphore lié au calcium (P-Ca), phosphore lié à la matière organique (P-MO), ont été déterminées par la méthode de fractionnement "CHANG et JACKSON" (1957) avec des solutions sélectives

## III) GEOLOGIE DE LA MATIERE ORGANIQUE

### A) INTRODUCTION

Le cycle du carbone organique est à la fois sédimentaire et biologique et peut se résumer dans le schéma de la figure III.4.

La production primaire de la matière organique à l'échelle mondiale est répartie *également* entre le domaine continental et le domaine marin , avec un total estimé entre **3 et  $15.10^{10}$  t** de carbone organique par an (Fig III.5).(HUC, 1980, in Durand, 1980).

Son *incorporation* dans les sédiments est inférieure à 1% de la productivité primaire (HUC, 1980, in Durand, 1980) et sa préservation exige soit des milieux de sédimentation calmes et généralement anoxiques soit des milieux à taux de sédimentation rapide.

La répartition de la production primaire en domaine continental est variable suivant les régions et atteint sa valeur maximale dans **les forêts (65% de la production totale annuelle terrestre)** (Fig III.5).

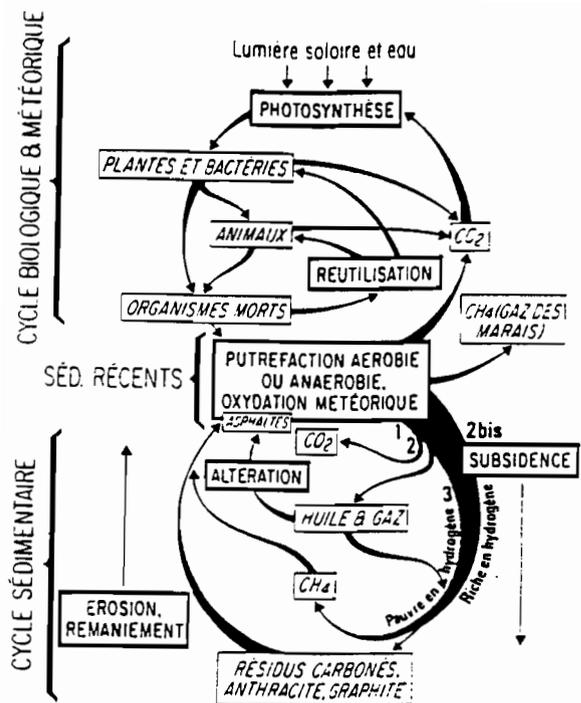
Le cortège organique d'un sédiment peut être défini par deux types de fractionnements. Ces derniers sont basés essentiellement sur des propriétés chimiques.

#### a-) Fractions définies par les méthodes dérivées de la pédologie.

La matière organique des sédiments récents, comporte deux fractions:

-La matière humique, qui désigne les acides fulviques et humiques dont l'extraction se fait dans une solution alcaline aqueuse.

-L'humine c'est la fraction qui subsiste après élimination de la matière humique. Elle représente 80 à100% du contenu organique initial et une partie peut être hydrolysée lors des attaques acides qui visent à détruire la matrice minérale. La fraction subsistante est appelée résidu stable.



NOTA: L'incorporation annuelle de matière organique dans les sédiments est < 1% de la productivité primaire en moyenne

Fig III.4; L'incorporation annuelle de la matière organique dans les sédiments, In DURAND (1987).

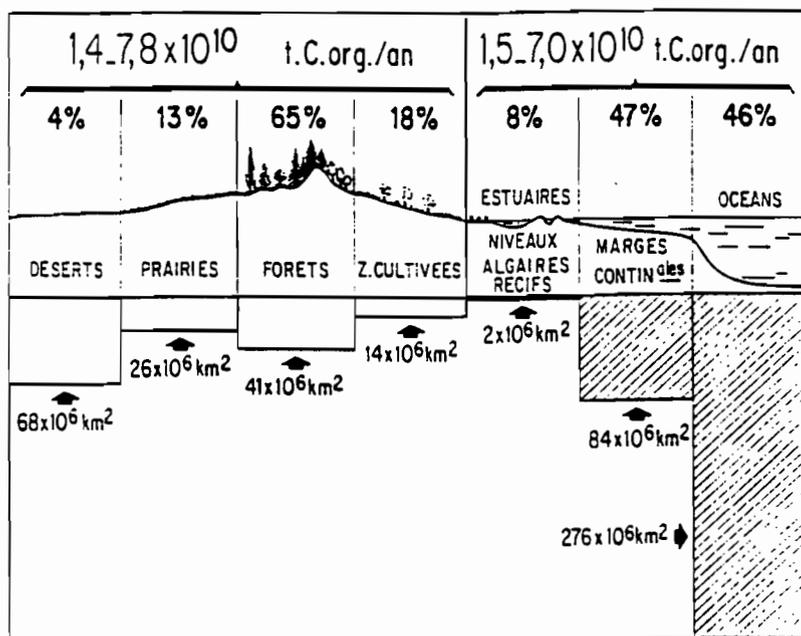


Fig III.5: Distribution de la production primaire annuelle du carbone organique total, In HUC (1980).

Il est à noter que la matière organique des sédiments récents comprend aussi une faible proportion de bitumes, c'est à dire des composants solubles dans les solvants organiques, principalement d'origine lipidique.

#### b-) Fractions définies par les méthodes de la géochimie pétrolière

Après destruction de la matière minérale par les acides chlorhydrique et fluorhydrique, qui vise à éliminer respectivement les carbonates et les silicates. La fraction ainsi récupérée est désignée par la matière organique totale (M.O.T).

Le traitement de la matière organique totale par des solvants organiques tels que le chloroforme (CHL3) ou le dichlorométhane (CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) permet de séparer les bitumes de la fraction insoluble appelée le kérogène.

Les objets issus des deux fractionnements sont schématisés sur la figure III.6.

## B) PETROGRAPHIE DE LA MATIERE ORGANIQUE

### B.1) INTRODUCTION

*La pétrographie organique* consiste en l'étude de l'origine et de l'évolution de la *matière organique*.

Une partie de *l'hétérogénéité* de la matière organique s'exprime à l'échelle *microscopique*, ce qui fait de la microscopie optique un outil essentiel de la pétrographie organique. Elle permet une meilleure visualisation des différences de *microstructures* et de *morphologie* entre les composants organiques d'une roche sédimentaire.

### B.2) CHOIX DU SUJET

Les sédiments lacustres et marécageux contiennent un matériel organique *hétérogène* (algair, bactérien, détritique issus des végétaux supérieurs). Les études géochimiques ont bien du mal à caractériser l'hétérogénéité et la *complexité* de ce contenu organique, et à suivre les transformations qui ont affectées ce matériel au cours de son évolution.

Celles-ci peuvent se résumer en transformations physiques et chimiques, plus *accentuées* que celles enregistrées par la matière minérale, qui confèrent aux fractions organiques une identité nouvelle dépendant directement des paramètres physico-chimiques du milieu.

Ces caractéristiques peuvent donc être utilisées comme des marqueurs *paléo-environnementaux* sous réserve qu'elles puissent être interprétées.

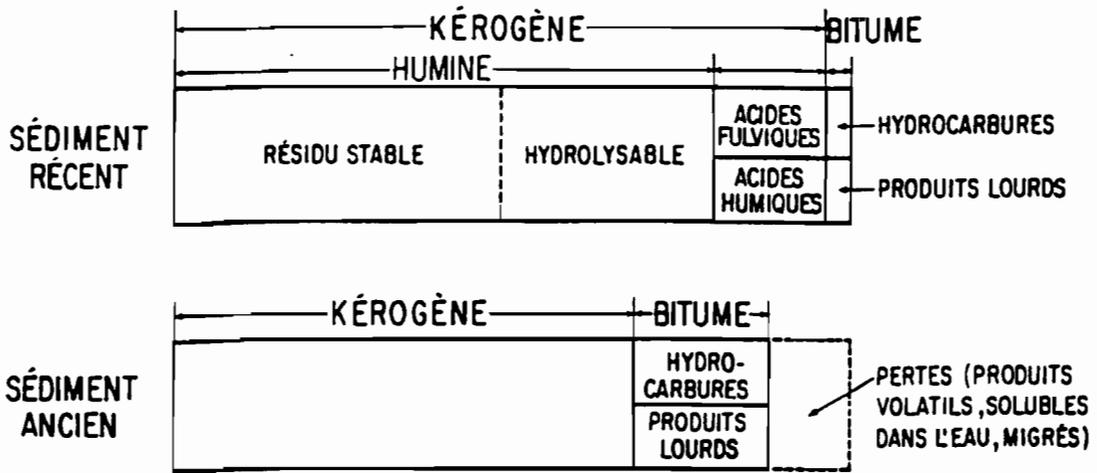


Fig III.6.a: Fractionnement de la matière organique par les méthodes dérivées de la pédologie (d'après Durand, 1985)

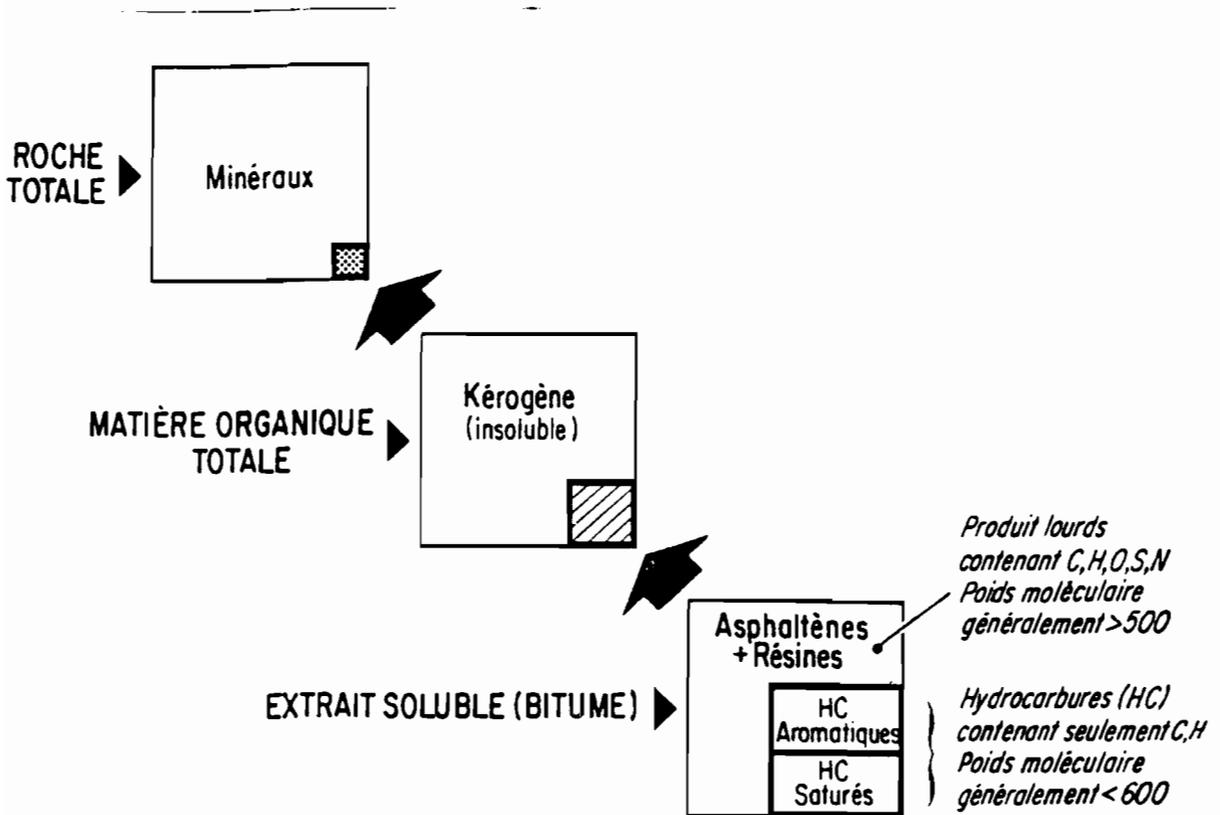


Fig III.6.b: Fractionnement de la matière organique par les méthodes de la géochimie pétrolière (d'après Tissot et Welte, 1978)

Le but de ce travail est d'appliquer la pétrographie organique aux sédiments quaternaires des lacs de Carajas et à la **reconstitution des paléoenvironnements**.

L'ampleur et la diversité des problèmes posées nécessitent des méthodes et des techniques bien adaptées

La pétrographie de la matière organique peut utiliser des sections polies observées:

- **en lumière blanche réfléchi** ,
- **en fluorescence** en utilisant en mode incident la raie 365nm du mercure comme excitation.

Les sections polies peuvent être préparées à partir de la roche brute, de la matière organique totale, du kérogène, ou à partir des concentrés densimétriques..

Dans le cas qui nous intéresse, les sections polies ont été préparées à partir de la matière organique totale.

Pour une meilleure visualisation du matériel organique, une séparation densimétrique par liqueurs denses est obligatoire afin d'éliminer le contenu minéral associé. Néanmoins la séparation n'est pas totale car il existe une fraction organique intimement liée à la matrice minérale qui est éliminée avec celle-ci.

Les observations et les résultats obtenus grâce à ces techniques, doivent être considérés comme une **première application** dans ce domaine de recherches.

### **B.3) LA MESURE DU POUVOIR REFLECTEUR**

#### **B.3.1) METHODE**

Cette mesure est réalisée grâce à un microphotomètre associé au microscope. Elle peut être appliquée sur n'importe quel débris pourvu qu'il présente une surface polie suffisamment grande ( 2 à 4 microns ).

La réflectance d'un objet dépend de l'état de son évolution diagénétique, et peut se résumer d'une façon simplifiée grâce à la relation de Fresnel (Ragot 1977).

$$R = (n' - n)^2 / (n' + n)^2$$

où

- \* R est la réflectance de l'objet étudié
- \* n', n sont les indices respectifs du milieu d'observation et de l'objet étudié.

La mesure du pouvoir réflecteur est effectuée sur les débris végétaux à 546 nm et en immersion d'huile. On a réalisé une centaine de mesures dont les résultats sont présentés sous la forme d'un histogramme.

En pratique, la mesure du pouvoir réflecteur en tant que paramètre de rang conçue initialement pour étudier la diagénèse des charbons, a été appliquée dans cette étude pour essayer de voir si par cette technique on peut caractériser l'hétérogénéité du cortège organique des échantillons des dépôts lacustres de Carajas.

## **B.4) PALYNOFACIES**

### **B.4.1) INTRODUCTION**

Le terme de *palynofaciès* est limité aux constituants organiques du *résidu stable*, c'est à dire la fraction non minéralisée.

Le palynofaciès est la description au microscope photonique par transmission, de l'aspect des constituants organiques d'une roche et l'estimation de leurs proportions relatives. Ces constituants intéressants par le type de groupements qu'ils forment, offrent une vue globale sur l'environnement sédimentaire de leur milieu de dépôt. Le palynofaciès donne aussi une vue globale sur l'état de conservation de la matière organique, ce qui renseigne sur l'histoire des sédiments après leurs dépôts.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à deux types de fractions:

a) Fraction figurée: elle comprend tous les éléments qui laissent apparaître une structure au microscope. Elle est formée de microfossiles, de débris végétaux et animaux. Leurs dimensions, leurs couleurs, sont pris en considération dans notre étude.

b) Matière organique amorphe: Elle est composée principalement par des particules dont la taille est inférieure au micromètre. Sa couleur, son aspect général sont de bon critères pour une étude de palynofaciès.

### **B.4.2) APPLICATION**

Nous allons montrer par l'étude de deux carottes prélevées en Amazonie brésilienne, le rôle de cette approche dans la compréhension des mécanismes de la sédimentation organique. Ce qui nous permettra d'apprécier l'importance des influences diagénétiques que subit le contenu organique de ces sédiments *récents*.

### **B.4.3) METHODE**

L'analyse optique en lumière transmise (COMBAZ A., 1964) est réalisée sur le matériel organique préalablement séparé de son contexte minéral par voie chimique. La méthode de séparation est celle mise au point par DURAND B. et NICAISE G.(1980).

Rappelons qu'après attaque acide des composants minéraux (HCL et HF 40%), séparation densimétrique par une liqueur dense inorganique (ZnBr; d=2,2), et rinçages successifs à l'eau distillé, la fraction la plus résistante récupérée ne présente que 50% environ du matériel original

BELLET J.,1989). Néanmoins, ce kérogène est représentatif du contenu organique amorphe et figuré dans le sédiment.

La fraction récupérée en milieu aqueux est collée à chaud sur une lamelle couvre-objet avec du (cellosize wp 40) dissous dans de l'eau déminéralisée. Après séchage l'ensemble est collé sur la lame porte objet avec une résine ( elvacite 2044) dissoute dans du xylène. Deux lames sont montées. Une **lame totale**, réalisée après élimination de la phase minérale, est obtenue par montage d'un volume constant de **kérogène** en suspension à la micropipette. Elle contient l'ensemble du matériel organique. Une autre lame **résiduelle** est montée après élimination de la pyrite avec de l'acide nitrique. Elle permet une meilleure observation de la morphologie des éléments **figurés**.

Les échantillons traités et analysés ont été choisis en fonction des unités pétrographiques préalablement définies dans les deux carottes CSS2, et CSS10.

## **B.5) ANALYSE D'IMAGES**

### **B.5.1) INTRODUCTION**

L'analyse des images du microscope est une **technique nouvelle** encore peu utilisée dans le domaine de la pétrographie de la matière organique.

Elle permet la **description** et la **quantification** des éléments organiques (**granulométrie, orientation, structure.....**).

Ces paramètres quantifiés ont des liens avec les propriétés physiques et chimiques des composants organiques.

### **B.5.2) METHODE**

**L'informatisation** des images se fait en plusieurs étapes qui sont visualisées et contrôlées sur un écran par l'intermédiaire d'un logiciel de traitement numérique. Nous avons utilisé le logiciel "**VISILOG**"

1-) **Prise et numérisation** de l'image du microscope par l'intermédiaire d'une caméra vidéo.

2-) **Amélioration** par traitement mathématique de cette image.

3-) **Etude** de l'image filtrée.

Cette dernière étape consiste en une analyse statistique des paramètres morphologiques et optiques des particules analysées.

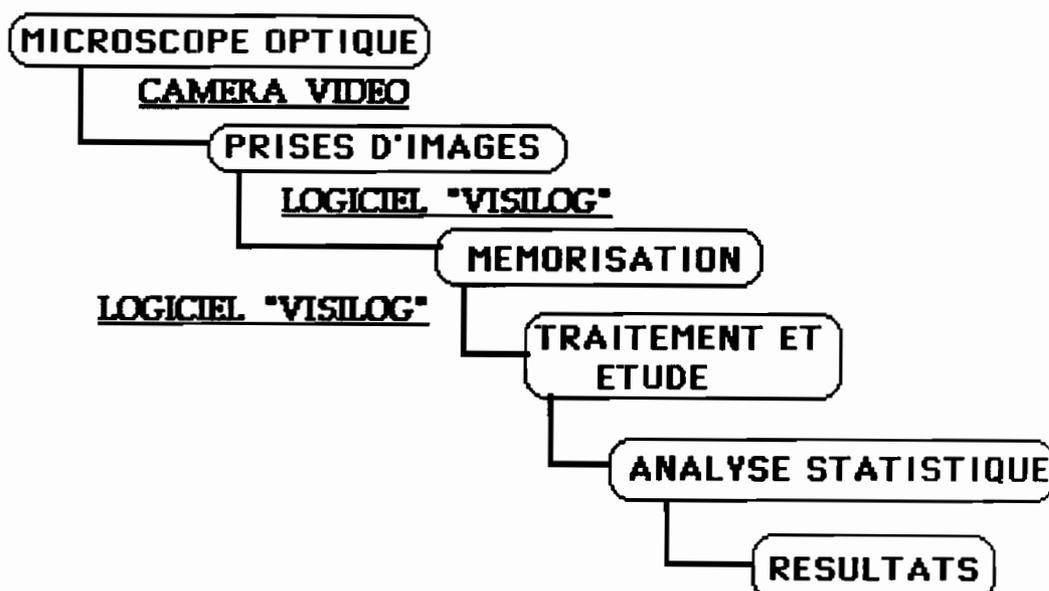


Fig III.7: Résumé du mode opératoire en analyse d'images.

### C) DOSAGE DU CARBONE ORGANIQUE

#### C.1) INTRODUCTION

Dans le but d'apprécier la variation de la teneur en carbone organique dans les carottes CSS2 et CSS10. Deux méthodes ont été utilisées pour sa détermination; les résultats des deux méthodes seront comparés pour apprécier la fiabilité de chacune d'elles.

#### C.2) PYROLYSE ROCK-EVAL

La pyrolyse Rock-Eval est une méthode physico-chimique permettant une étude rapide du contenu organique des sédiments, l'ensemble des données étant acquis au cours d'un cycle d'analyse d'une durée moyenne de 20 minutes par échantillon. Elle peut permettre aussi d'apprécier les transformations sédimentaires et diagénétiques antérieures enregistrées par le sédiment.

##### C.2.1) METHODOLOGIE

La méthode consiste à chauffer, en programmation de température (à raison de 25°C/min jusqu'à 600°C sous atmosphère inerte), 100mg de sédiments broyés en vue de déterminer les paramètres suivants (Fig III.8)(ESPITALIE et AL 1985):

S1: Hydrocarbures libres contenus dans l'échantillon.

S2: composés hydrocarbonés produits et expulsés lors du craquage de la matière organique non extractible de la roche (Kérogène) c'est à dire la quantité d'hydrocarbures qui peuvent être formés au cours d'une évolution ultérieure..

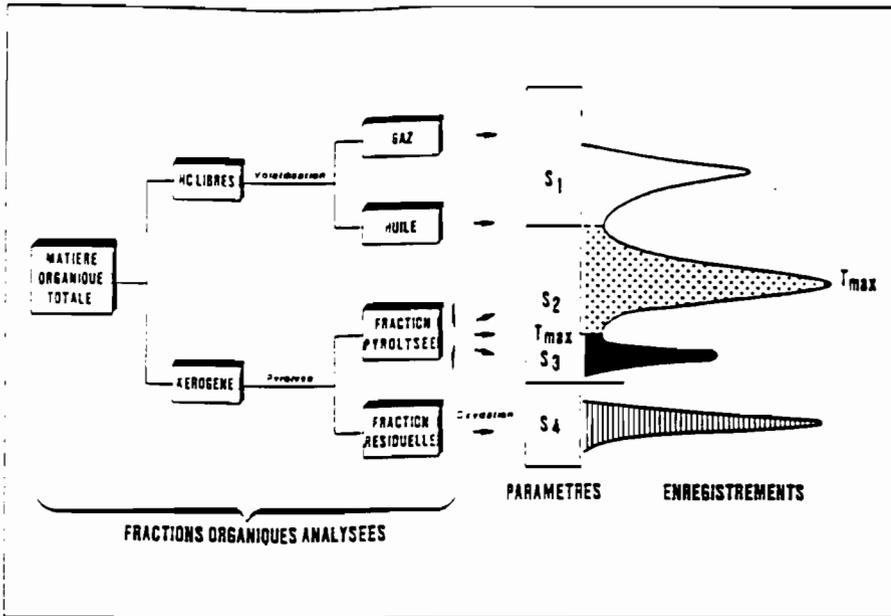


Fig III.8: Les différents paramètres analysés par la méthode Rock-Eval, In ESPITALIE (1985).

S<sub>3</sub>: CO<sub>2</sub> issu du craquage du Kérogène.

S<sub>4</sub>: CO<sub>2</sub> issu de l'oxydation de la matière demeurée dans l'échantillon après pyrolyse ( carbone organique résiduel ).

Le carbone organique total est égal à la somme du carbone organique résiduel et du carbone organique pyrolysé.

L'analyse pyrolyse Rock-Eval permet également de calculer des index qui sont:

IH: index hydrogène égal à  $S_2/COT$

IO: index d'oxygène égal à  $S_3/COT$

Ces paramètres ont une grande importance dans la compréhension des transformations qui ont affectés les roches pétrolifères, par contre leur signification pour la caractérisation des sédiments *récents est encore mal connue*.

## C.2.2) METHODE WALKLEY ET BLACK

### C.2.2.1) INTRODUCTION

Dans cette méthode, l'oxydation a lieu à froid, mais elle est incomplète. La proportion de carbone organique oxydé varie de 60% à 86%. La moyenne étant de 76%, on doit utiliser un facteur de correction est égal à 1,72 (100/76).

Cette méthode malgré son imprécision est utilisée en raison de sa simplicité et de sa rapidité.(1/2 heures pour dix échantillons).

### C.2.2.2) METHODOLOGIE

Le carbone de la matière organique est oxydé par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique. On admet que le bichromate consommé est proportionnel au carbone que l'on veut doser.

L'excès de bichromate inutilisé dans la réaction est dosé par le sel de Mohr.

## D) DOSAGE DE L'AZOTE TOTAL

### D.1) BUT

La quantification de la teneur de l'azote total dans un échantillon est une mesure complémentaire à celle du carbone organique. Elle nous permet d'apprécier la matière organique d'origine *microbienne* et *planctonique* d'un sédiment. De plus le calcul du rapport (C/N) nous renseigne sur le degré d'oxydation du contenu organique.

## D.2) METHODOLOGIE

La méthode est celle décrite par KJELDALL (citée dans Bradstreet, R. B. 1965) basée sur l'oxydation de la matière organique à chaud par l'acide sulfurique concentré.

L'azote transformé en ammoniacque est fixé par l'acide sulfurique à l'état de sulfate d'ammoniacque  $\text{SO}_4 (\text{NH}_4)_2$ .

- Cette transformation nécessite l'emploi de catalyseurs (actuellement le sulfate de cuivre et le sélénium en poudre).
- Il est nécessaire d'élever la température d'ébullition de l'acide sulfurique en ajoutant du sulfate de potassium.

L'ammoniacque formé est distillé par entraînement de vapeur, et dosé par l'acide sulfurique titré.

## IV) GEOCHIMIE ISOTOPIQUE

### A) INTRODUCTION

La composition isotopique de la matière organique d'un échantillon dépend à la fois de la qualité de cette matière, de ces *précurseurs biologiques et notamment du cycle photosynthétique (C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, ou CAM)* qui a produit cette matière ainsi que de son *fractionnement* isotopique dû aux transformations du *kérogène* au cours de son évolution.

### B) BUT

La finalité de cette approche est d'aboutir à une caractérisation de la matière organique sédimentée à partir des valeurs des deltas  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  qui sont fonction du *cycle photosynthétique* de la matière organique et par conséquent du type de *végétation* (graminées, végétaux supérieurs, algues et matériel planctonique).

### C) METHODOLOGIE

On oxyde la matière organique par chauffage dans un four sous oxygène. Les gaz évacués sont successivement piégés, la vapeur d'eau par la neige carbonique (-80°C), le  $\text{CO}_2$  et les autres gaz associés par passage sous azote liquide à (-180°C). Pour obtenir un gaz de  $\text{CO}_2$  pur, le contenu gazeux est purifié dans une ligne contenant du cuivre chauffé à 800°C. Après purification l'échantillon est analysé au spectromètre de masse.

On définit un paramètre noté delta  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  qui exprime le rapport des concentrations  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  d'un échantillon, par rapport à un standard. Le standard utilisé est le PDB (Pee Dee Belemnite) (Craig H. 1957).

CHAPITRE IV

RESULTATS

## **D) OUTIL SEDIMENTOLOGIQUE**

### **A) INTRODUCTION**

L'analyse sédimentologique classique a été faite à partir de l'observation à la loupe binoculaire, et par diffractométrie des rayons X.

Les observations à la loupe binoculaire permettent de décrire le contenu macroscopique du matériel mais, par contre, ne permettent pas la quantification et par conséquent de définir les flux des différents composants.

Parmi les quatre constituants pris en considération et dosés en vue de comparer leur contribution au dépôt on note: le quartz, la kaolinite, la sidérite et les spicules d'éponges.

### **B) OBSERVATION A LA LOUPE BINOCULAIRE ET DIFFRACTION AUX RAYONS X.**

#### **B.1) CAROTTE CSS2:**

Neuf ensembles lithologiques ont été définis par l'observation à la loupe binoculaire des refus de tamis supérieurs à 50 $\mu$ m. Les résultats de cette estimation (TABLEAU IV.1) offrent une bonne corrélation avec la définition visuelle des ensembles lithologiques et montrent que les niveaux à sidérite contiennent du quartz, de la kaolinite, de l'hématite et des microgranules riches en goethite, par opposition aux niveaux organiques dans lesquels ces composants sont présents sous forme de traces ou même absents. L'unité organique de la séquence sommitale se distingue des autres niveaux riches en matière organique par la présence de spicules d'éponges en grande quantité.

#### **B.2) CAROTTE CSS10:**

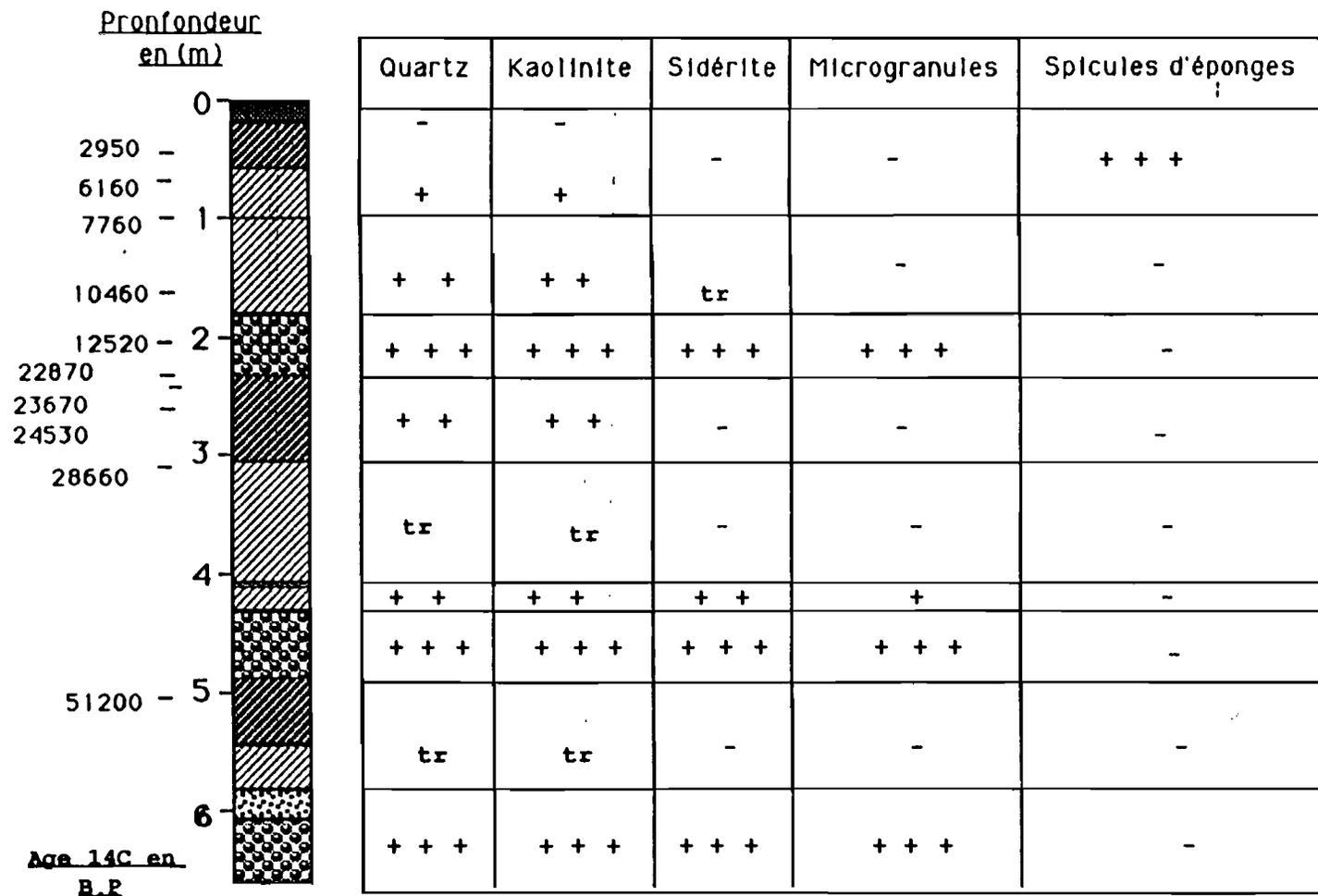
L'observation à la loupe binoculaire de la fraction supérieure à 50  $\mu$ m, révèle l'existence de deux unités lithologiques qui correspondent très bien à la description visuelle des faciès lithologiques (TABLEAU IV.2).

Les couches à sidérite sont marquées par la présence du quartz, de kaolinite, et de microgranules ferrifères; par contre, dans la couche organique sommitale, ces composants commencent à apparaître vers 80 cm et sont caractérisés par une prédominance de quartz. Comme pour la carotte CSS2 ce niveau organique se distingue des autres par la présence de spicules d'éponges (TABLEAU IV.2)

## **C) TENEUR EN EAU**

### **C.1) CAROTTE CSS2**

Les résultats de la teneur en eau sont représentés dans le tableau IV.3 et résument la distribution de cet indice le long de la carotte CSS2.



- = (Absent), tr= (traces), += (présent), \*\*= (moyen),  
\*\*\*= (dominant)

Tableau IV.1: Observation de la fraction supérieure à 50µ de la Carotte CSS2, Lac n°8, (Carajas, Amazonie, Brésil).

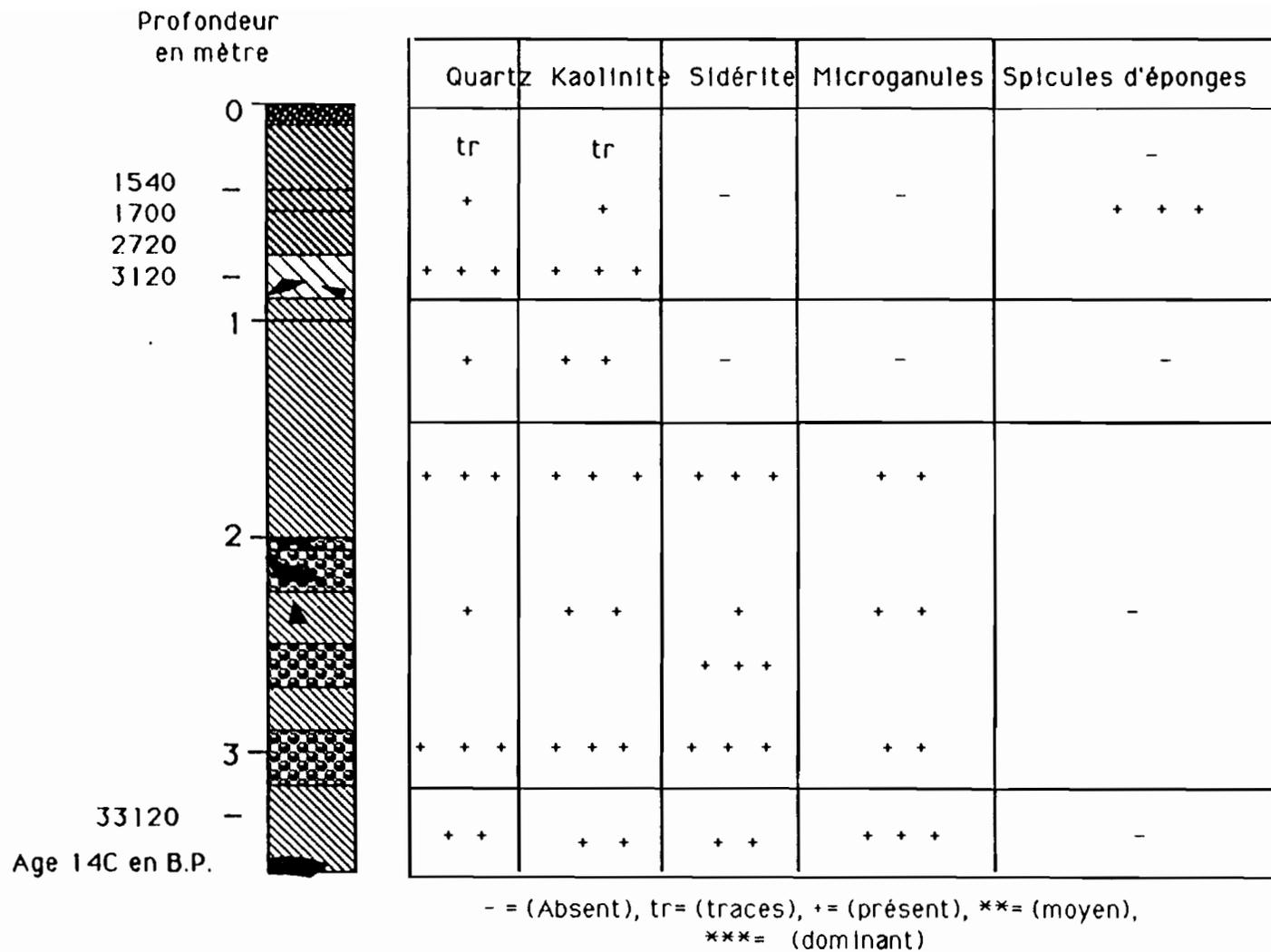
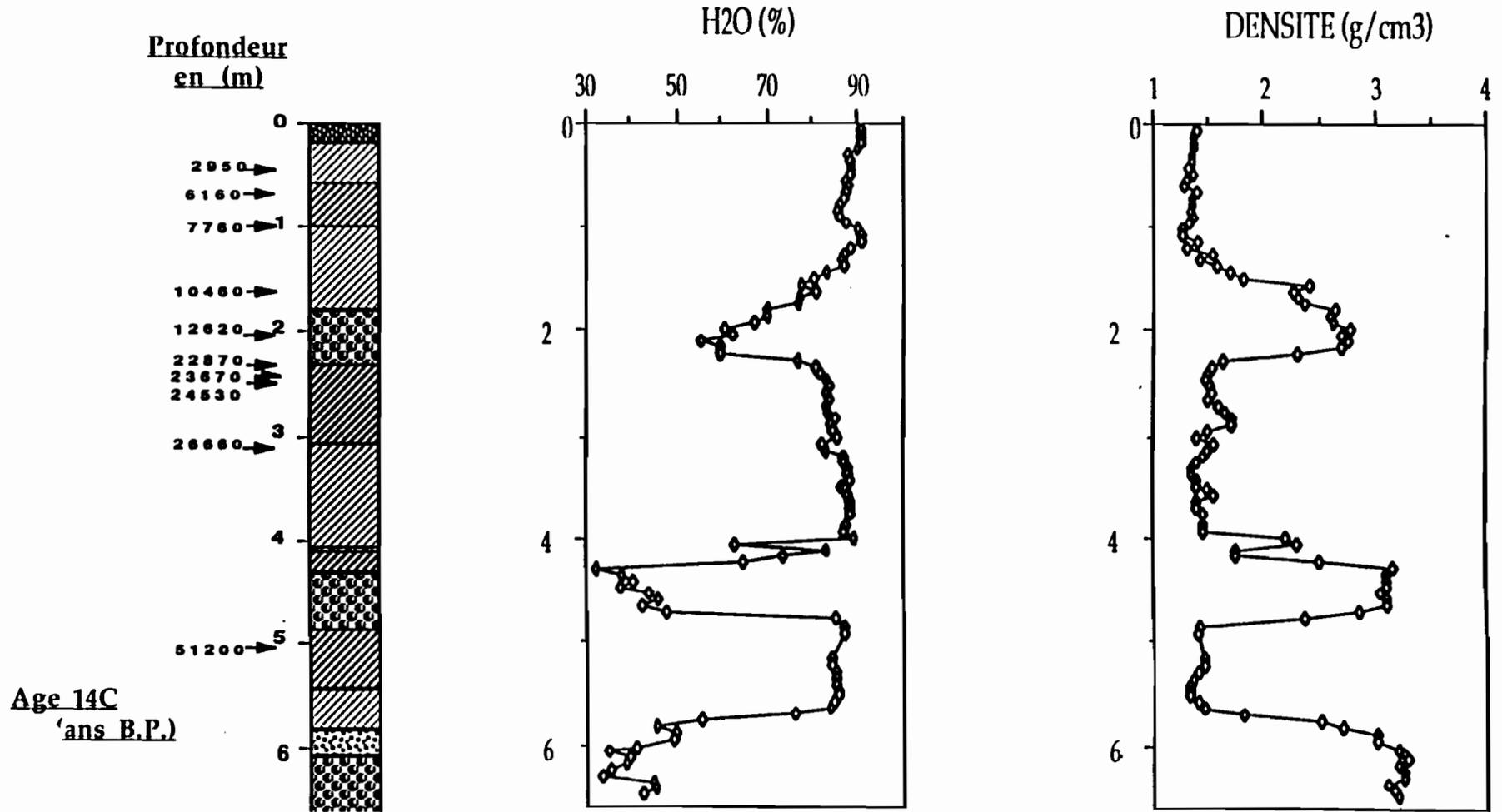


Tableau IV.2: Observation de la fraction supérieure  
à 50 $\mu$  de la carotte CSS10, Lac n°12,  
(Carajas, Amazonie, Brésil)

**Fig IV.1: Variation de la densité et de la teneur en eau le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**



Dans les niveaux à sidérite la teneur en eau présente des valeurs moyennes entre 30 à 45% du sédiment total. Il est à remarquer que dans le niveau à sidérite de la série n°II, les teneurs en eau sont plus élevées (50 à 60% du sédiment brut) que dans les autres niveaux (Fig IV.1)

Au sommet de chaque série les dépôts organiques montrent des valeurs élevées de la teneur en eau (80 à 90% du sédiment brut ) (Fig IV.1).

### **C.2) CAROTTE CSS10**

Le tableau IV.4 rassemble les résultats de la teneur en eau le long de la carotte CSS10.

Ces niveaux sont caractérisés par des teneurs en eau moyennes (30 à 40 % du sédiment total ) (Fig IV.2).

Dans les niveaux organiques les teneurs en eau sont constantes et les valeurs maximales peuvent aller jusqu'à 90 % du sédiment brut. (Fig IV.2).

### **D) DISCUSSION**

La répartition de la teneur en eau le long des deux carottes CSS2 et CSS10 caractérise bien les niveaux lithologiques définis lors de l'observation à la loupe binoculaire et montre que la diminution de la teneur en eau est proportionnelle à la profondeur, c'est à dire au compactage.

### **E) DENSITE**

La détermination de la densité a été réalisée sur les deux carottes CSS2 et CSS10. Les résultats sont portés sur le tableau IV.3.

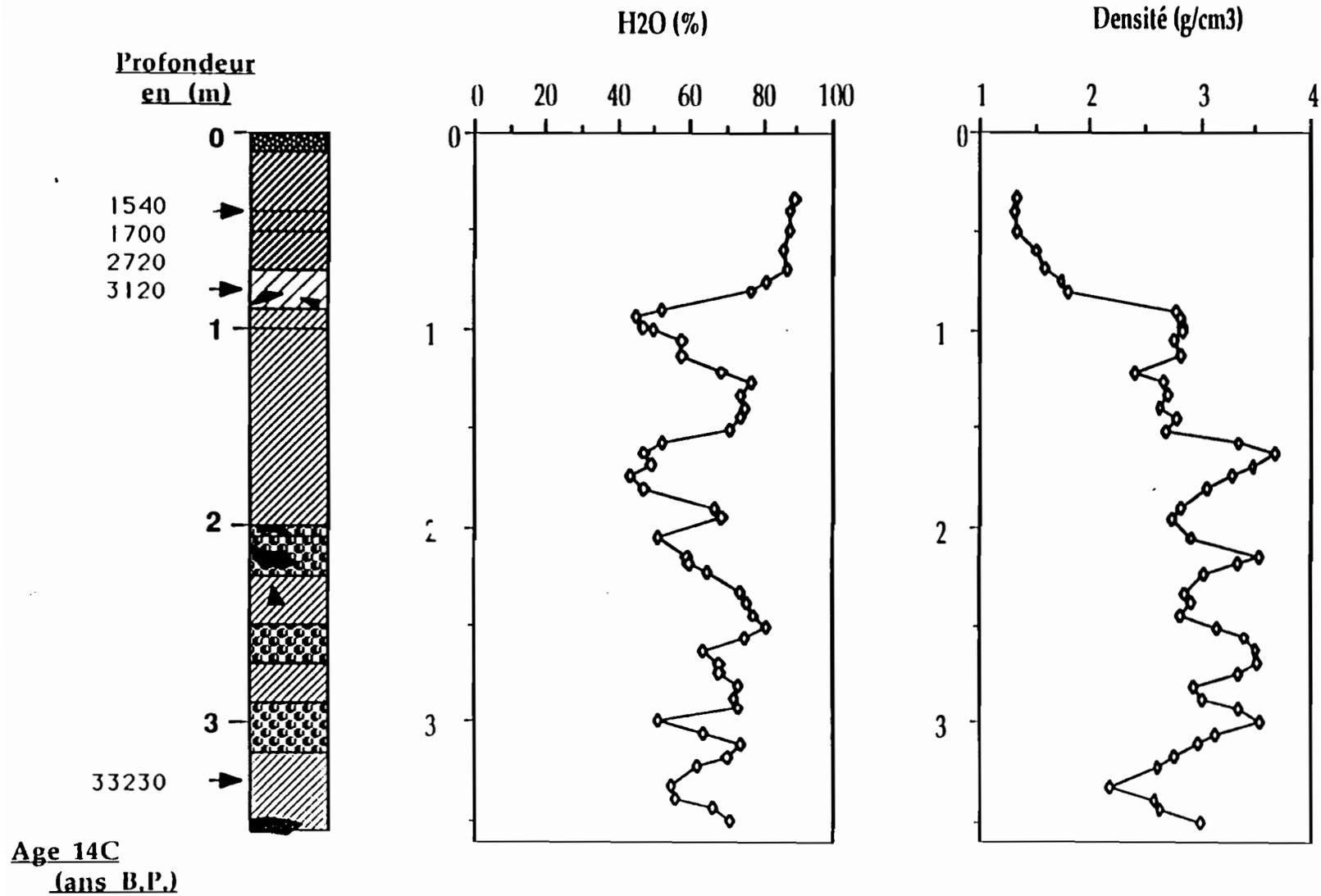
#### **E.1) CAROTTE CSS2**

La figure IV.1 représente la distribution de la densité en fonction de la profondeur. On constate une diminution progressive de la densité au passage d'un niveau à sidérite vers un niveau organique.

Les niveaux à sidérite sont caractérisés par des valeurs de densité élevées (2,5 à 3 g/cm<sup>3</sup>) (Fig IV.1). Il est à remarquer la différence de densité entre les quatre niveaux à sidérite. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les niveaux les plus bas.

Dans les niveaux organiques les densités présentent des valeurs faibles (1 à 1,5 g/cm<sup>3</sup>) (Fig IV.1). On note une légère augmentation de la densité à partir de 310 cm dans le niveau organique de la série n°III.

**Fig IV.2: Variation de la densité et de la teneur en eau le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**



## **E.2) CAROTTE CSS10**

Les mêmes évolutions sont enregistrées dans la carotte CSS10 et montrent que les niveaux à sidérite sont caractérisés par des grandes valeurs de densité qui atteignent 3 à 3,5 g/cm<sup>3</sup> (Fig IV.2).

Dans les niveaux organiques, la densité est faible ( 1 à 1,5 g/cm<sup>3</sup>) et caractérise bien le niveau organique . A partir de 50 cm de profondeur, on assiste à une augmentation de la densité dont la valeur maximale peut aller jusqu'à 2 g/cm<sup>3</sup> (Fig IV.2). Cette augmentation est en relation avec l'apparition à ces niveaux de particules détritiques observées à la loupe binoculaire.

## **F) DISCUSSION**

La répartition de la densité le long des deux carottes CSS2 et CSS10 confirme bien les résultats de la description visuelle. Les grandes valeurs de la densité sont en relation avec l'apparition de particules ou éléments détritiques minéraux, par contre les faibles valeurs témoignent de leur disparition.

## **G) RESULTATS DE L'ANALYSE INFRAROUGE**

### **G.1) CAROTTE CSS2**

Nous montrerons ici comment les variations lithologiques peuvent être appréhendées par la Spectrométrie infra-rouge.

L'ensemble des résultats de l'analyse infra-rouge rassemblé dans le tableau (IV.5), montre que dans chaque série sédimentaire les courbes des quatre constituants déjà cités (Fig IV.3) sont analogues.

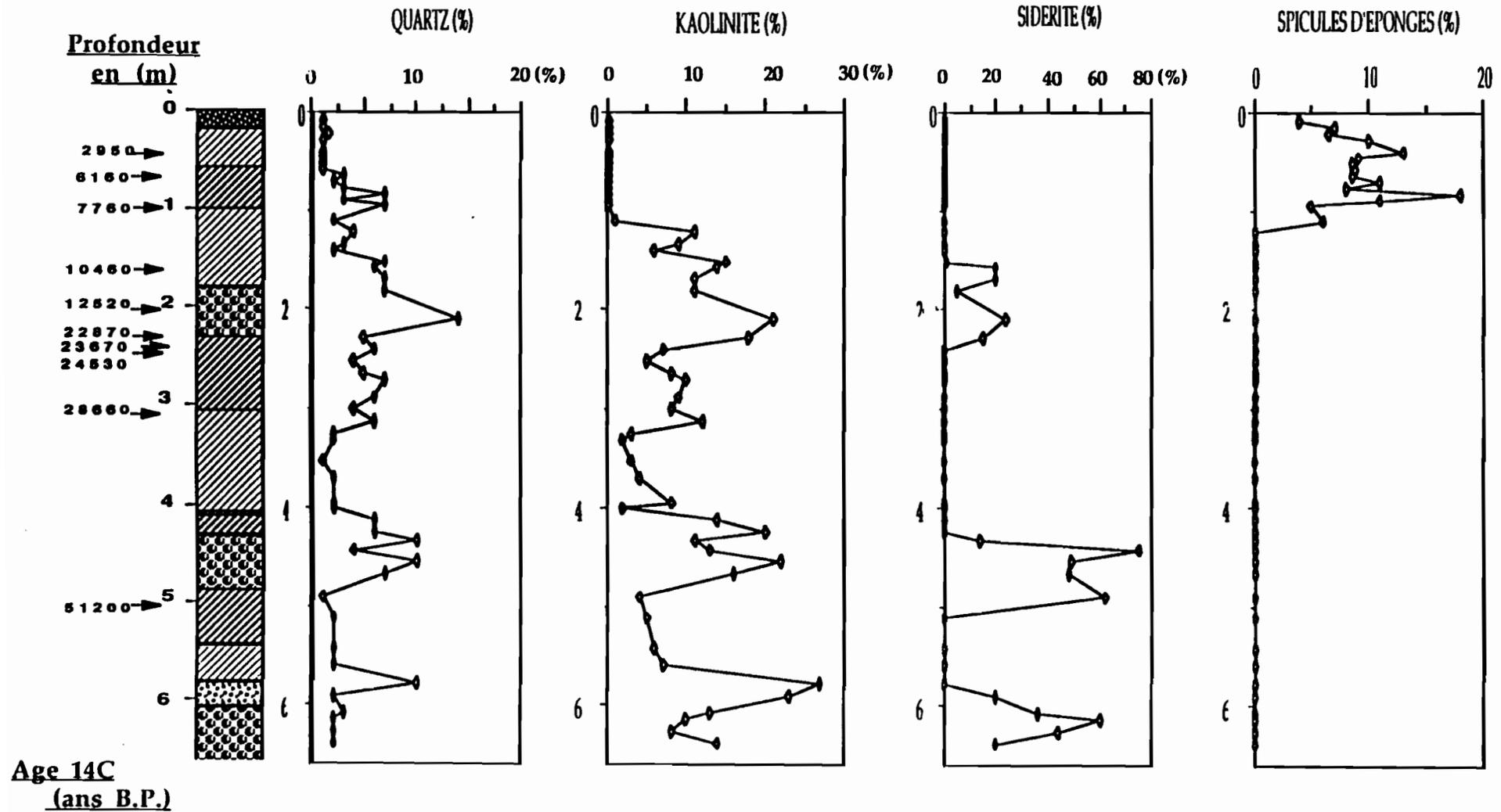
#### **G.1.1) NIVEAUX A SIDERITE:**

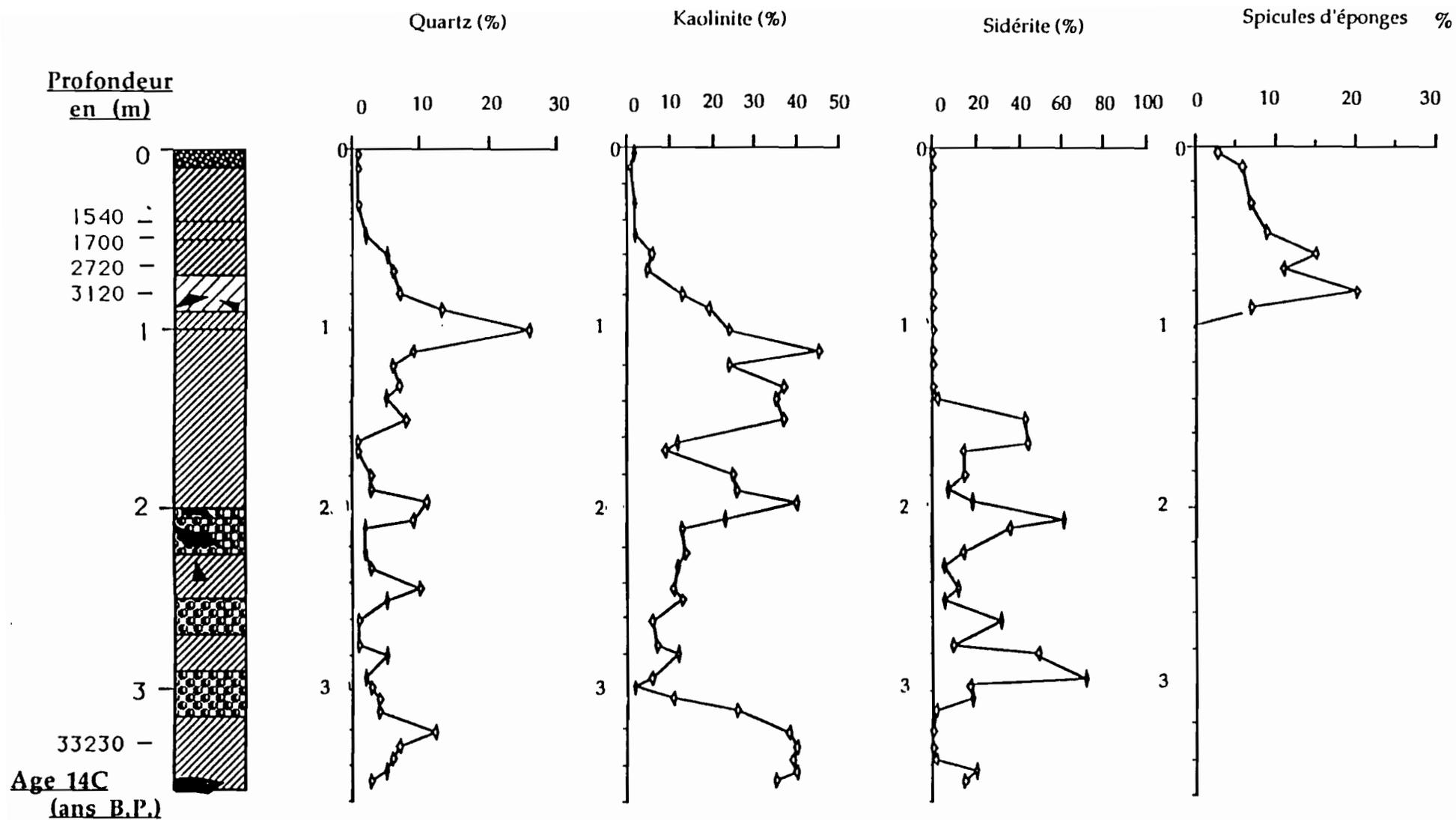
Il est à remarquer l'importance sporadique de la sidérite authigène, dont la teneur peut atteindre 40% du sédiment sec. On remarquera également l'importance, surtout dans ces niveaux, du quartz et de la kaolinite dont les teneurs évoluent parallèlement; les niveaux les plus riches peuvent montrer près de 40% de détritiques ( kaolinite, quartz ). La séquence inférieure se singularise par la faiblesse, pour un niveau détritique, des teneurs en quartz et de leurs variations (Fig IV.3) (Spectre n°1,2,3,5)(Annexe 3)..

#### **G.1.2) DEPOTS ORGANIQUES**

Au sommet de la série, les dépôts organiques montrent une proportion constante, et parfois négligeable des éléments détritiques ( quartz, kaolinite formant de 2 à 3% du sédiment total, séché )(Spectre n°,3,4). Le niveau organique de la série supérieure se distingue des autres niveaux par sa grande richesse en silice amorphe biogène (spicules d'éponges) dont la teneur atteint sa valeur maximale entre 75 et 80 cm de profondeur (18% du sédiment brut) (Fig IV.3) (Spectre n°6)(Annexe 3).

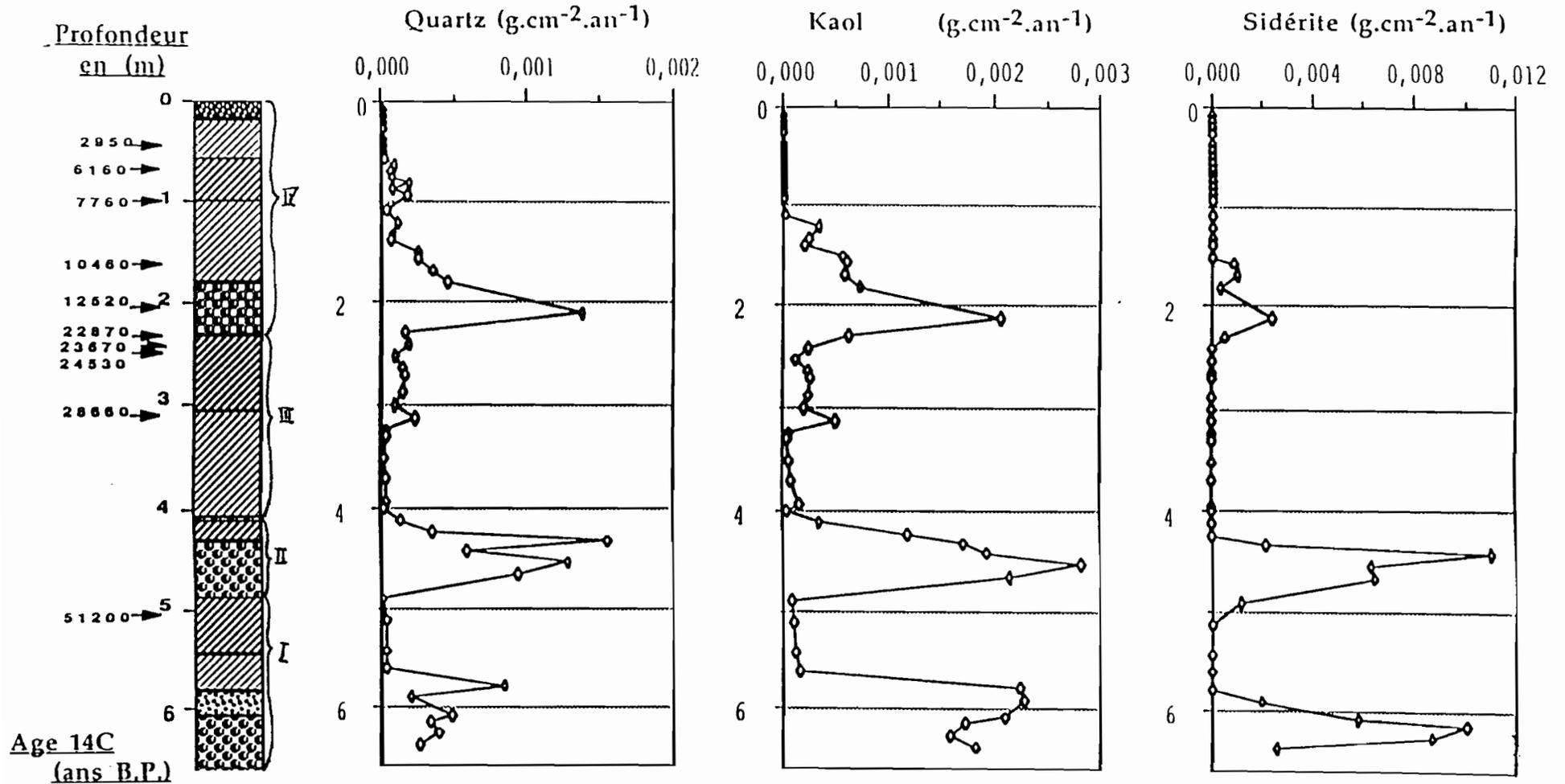
**Fig IV.3: Variation des teneurs en quartz, kaolinite, sidérite, et spicules d'éponges le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**



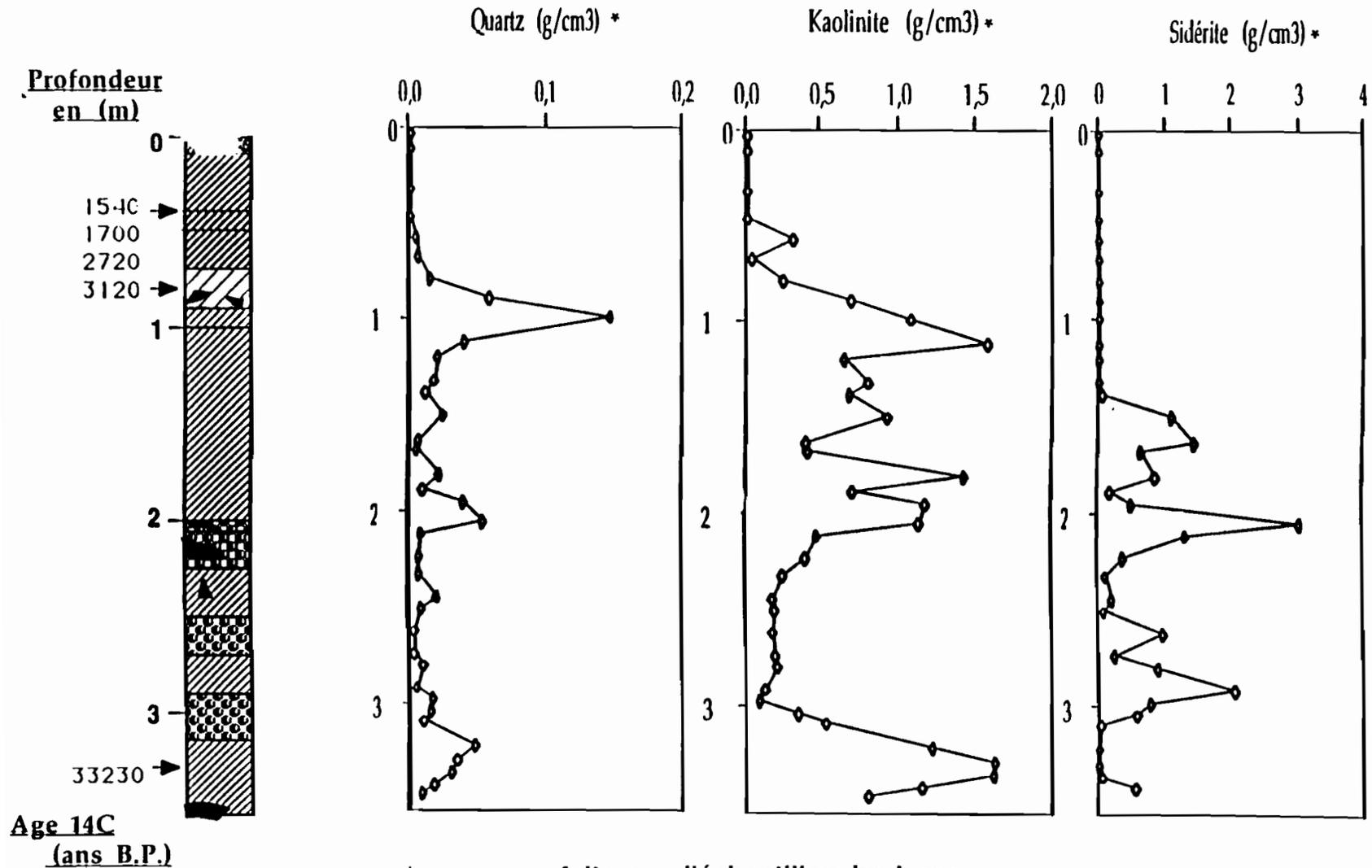


**Fig IV.4: Variation des teneurs en quartz, kaolinite, sidérite, et spicules d'éponges le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**

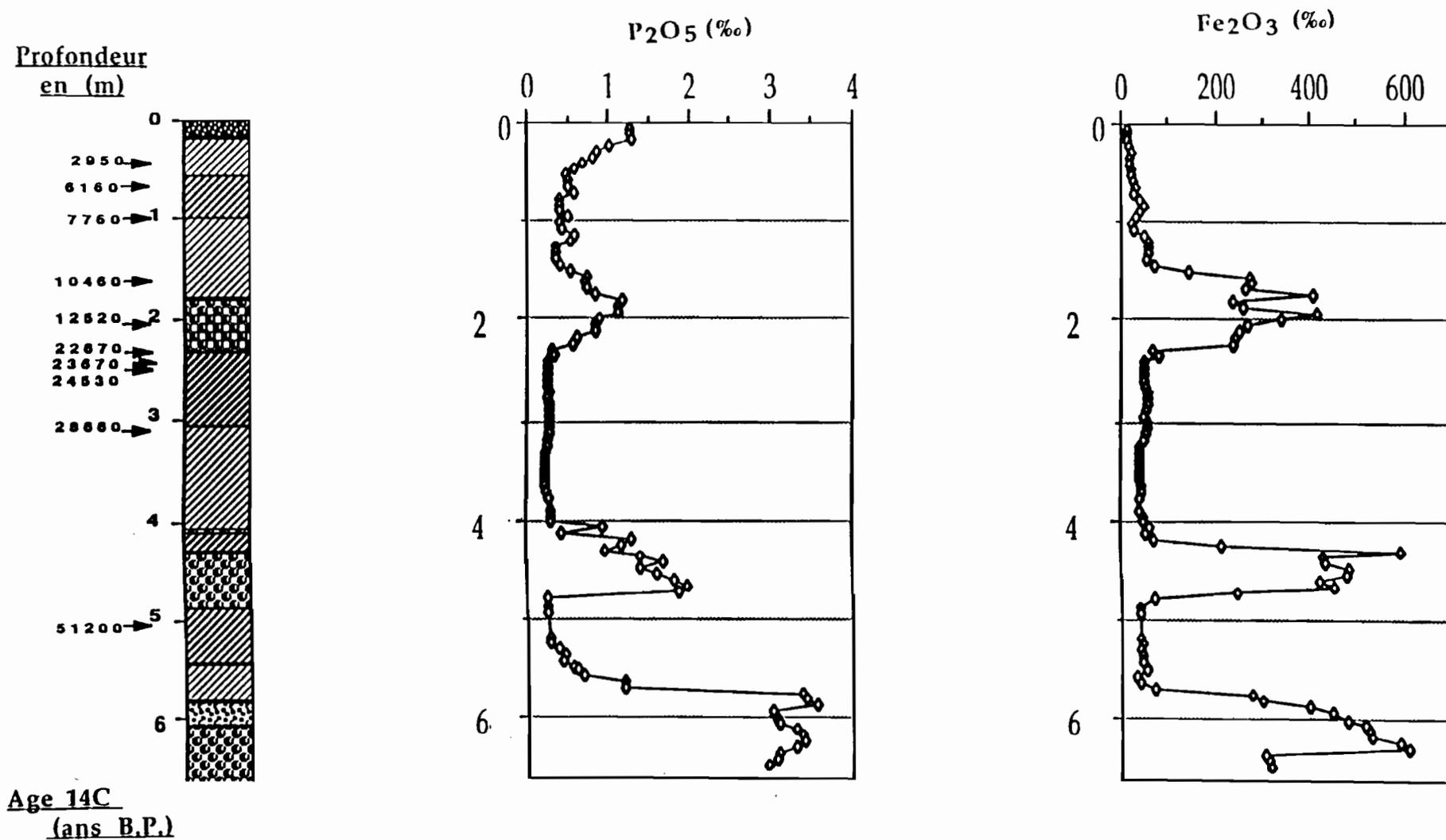
Fig IV.5: Variation des flux de quartz, kaolinite, et sidérite le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)



**Fig IV.6: Variation des taux d'accumulations du quartz, kaolinite, et sidérite le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**



**Fig IV.7: Variation des teneurs en ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**



## **G.2) CAROTTE CSS10**

Les résultats infra-rouge sont portés dans le tableau (IV.6) et montrent:

### **G.2.1) NIVEAUX A SIDERITE**

Les niveaux à sidérite présentent de fortes proportions en kaolinite, et quartz qui forment à certains niveaux 35% du sédiment sec brut. On remarquera aussi, comme dans la carotte CSS2, le parallélisme des évolutions des teneurs en quartz et en kaolinite (Fig IV.4). Les teneurs en sidérite peuvent atteindre 60% du sédiment brut sec dans certains niveaux.

### **G.2.2) DEPOTS ORGANIQUES**

Comme pour les dépôts organiques de la CSS2, les constituants minéraux (quartz, et kaolinite) sont présents en proportions constantes et parfois négligeables, qui peuvent atteindre 3% du sédiment total sec. On remarquera également l'importance dans ce niveau des teneurs en silice biogène qui atteint sa valeur maximale à 75 cm de profondeur (10 à 16% du sédiment total) (Fig IV.4).

## **H) DISCUSSION**

Grâce à la quantification par l'analyse infrarouge et en nous appuyant sur une évaluation précise de la chronologie nous avons pu calculer les flux des composants déjà cités (quartz, kaolinite, sidérite) de la carotte CSS2. Ces flux sont exprimés en  $\text{g.cm}^{-2}.\text{an}^{-1}$  (Fig IV.5).

Pour ce qui concerne la carotte CSS10 nous nous sommes contentés des taux d'accumulation en les exprimant en  $\text{g/cm}^3$ . Des datations en cours par accélérateur sur les couches à sidérites permettant de compléter nos évaluations.

Au stade actuel des recherches, nous aboutissons à deux conclusions:

-) Les dépôts à sidérite comprennent une forte proportion d'apports détritiques issus de l'érosion du bassin versant.

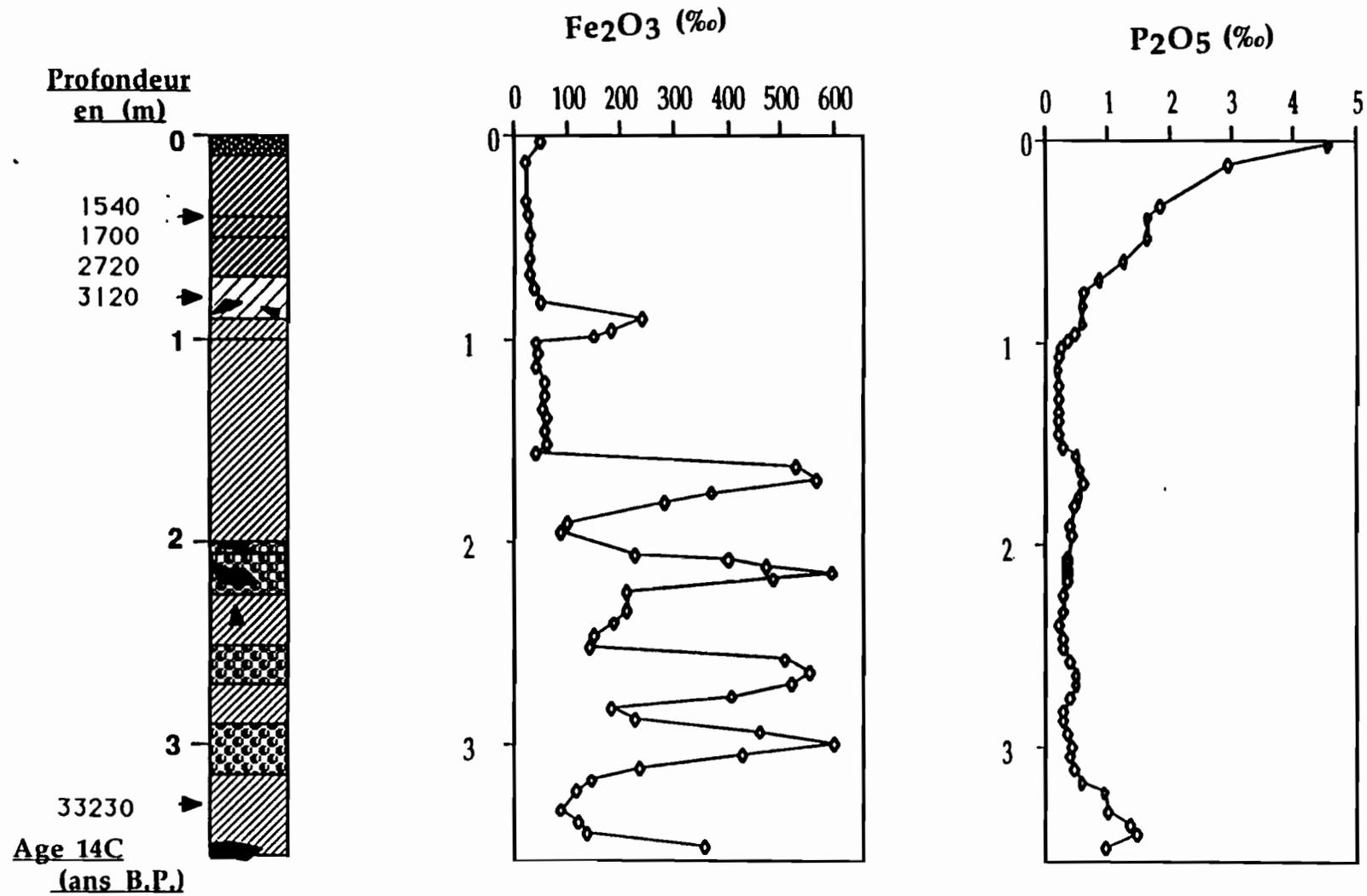
-) Les surfaces de ravinement observées au sommet des unités organiques, et la diminution progressive des teneurs en éléments détritiques entre les faciès à sidérite et les faciès organiques délimitent quatre séquences sédimentaires dans la carotte CSS2 et une seule dans la carotte CSS10.

## **II) GEOCHIMIE**

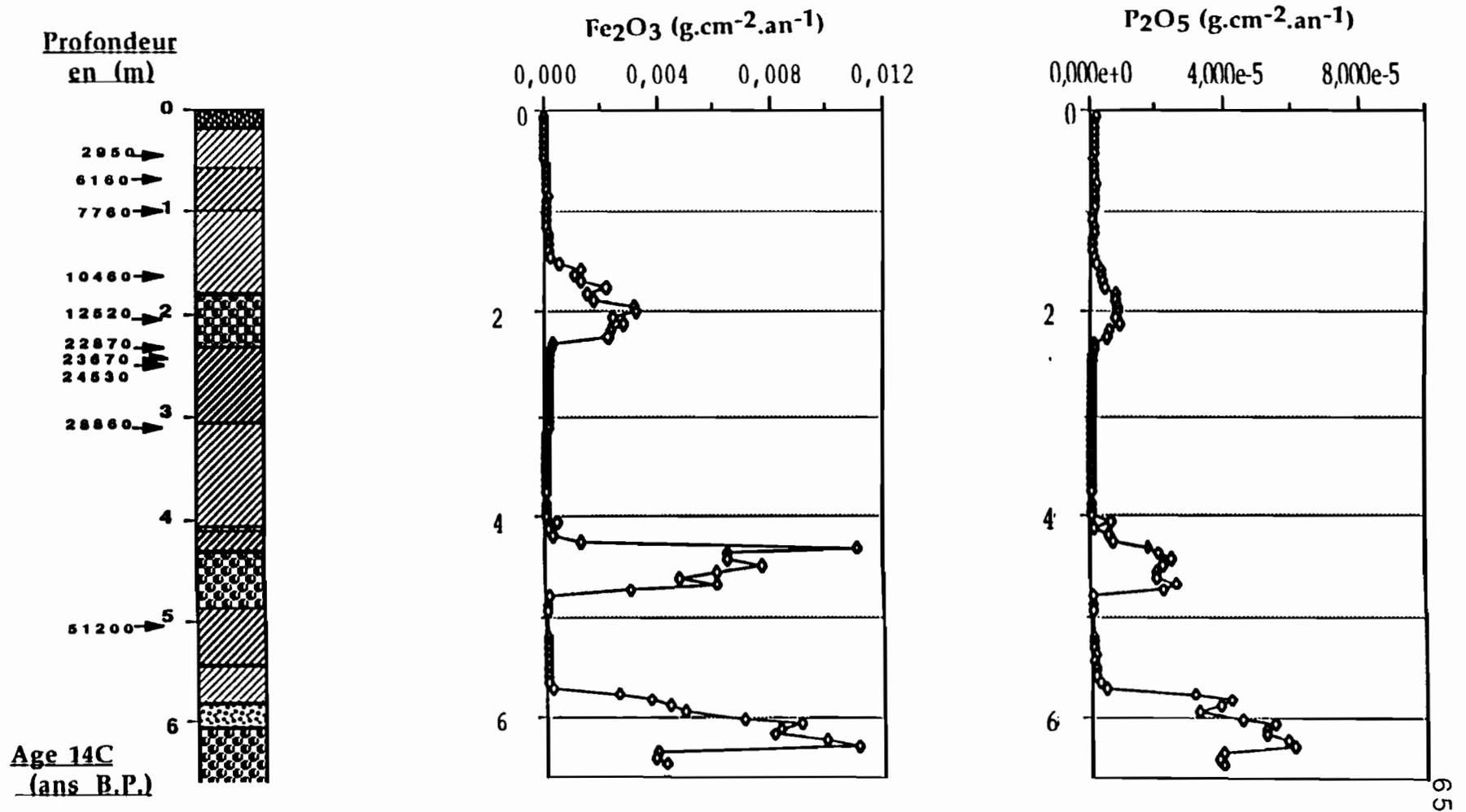
### **A) DOSAGE DU FER TOTAL**

Le dosage du fer total a été réalisé sur les deux carottes CSS2, CSS10; les résultats sont portés dans les tableaux (IV.7, IV.8).

**Fig IV.8: Variation des teneurs en ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**



**Fig IV.9: Variation des flux de ( $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{P}_2\text{O}_5$ ) le long de la carotte C5S2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**



### **A.1) CAROTTE CSS2**

La figure (IV.7) représente la distribution du fer total ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en fonction de la profondeur et montre une augmentation des teneurs en fer au passage d'un niveau organique à un niveau détritique dans lequel ce composant atteint 30 à 40% de l'échantillon sec. Dans chaque séquence les niveaux organiques montrent des quantités négligeables en fer total.

Il est à remarquer que les teneurs en fer total ne sont pas les mêmes dans les trois couches à sidérite et qu'elles diminuent entre le bas et le haut de la carotte CSS2

### **A.2) CAROTTE CSS10**

Les résultats regroupés dans le tableau (IV.8) montrent la variation du fer total dans cette carotte. Le niveau détritique de la CSS10 présente des teneurs élevées en fer total (60 %) (Fig IV.8) L'évolution de ces teneurs le long de la carotte est parallèle aux variations de la teneur en sidérite, exception faite du niveau 100 cm. Les niveaux organiques sont très pauvres en fer total (1 à 2%).

## **B) DISCUSSION**

La variation des flux de fer et les taux d'accumulation calculés respectivement le long des deux carottes CSS2 et CSS10, sont en accord avec les observations visuelles puisque les valeurs des flux et des taux d'accumulations sont maximales dans les niveaux détritiques à sidérite (Fig IV.9 et IV.10).

## **C) DOSAGE DU PHOSPHORE**

Le phosphore a été dosé sur les mêmes échantillons que le fer. Les résultats sont portés dans les tableaux (IV.7, IV.8).

### **C.1) CAROTTE CSS2**

Dans chaque séquence de cette carotte le phosphore atteint son maximum au niveau des faciès détritiques à sidérite où il représente 4%° de l'échantillon total (Fig IV.7). Sa valeur devient minimale ( 1 à 2%°) dans les niveaux organiques. Une augmentation de la teneur de ce composant s'observe au sommet du niveau organique de la dernière séquence probablement en conséquence de l'activité microbienne à ce niveau.

Les résultats de l'étude du fractionnement du phosphore réalisée sur cette carotte sont regroupés dans la figure (IV.11) et montrent que la presque totalité du phosphore est liée à la fraction minérale dans les niveaux détritiques, principalement sous forme de phosphore d'inclusion mais aussi sous d'autres formes ( P-Ca, P-Fe). Dans les niveaux organiques toutes les formes du phosphore sont distribuées équitablement dans les échantillons.

**Fig IV.10: Variation des taux d'accumulations du ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ )  
le long de la carotte CSS10, lac n°12,  
(Serra Sul, Carajas, Brésil)**

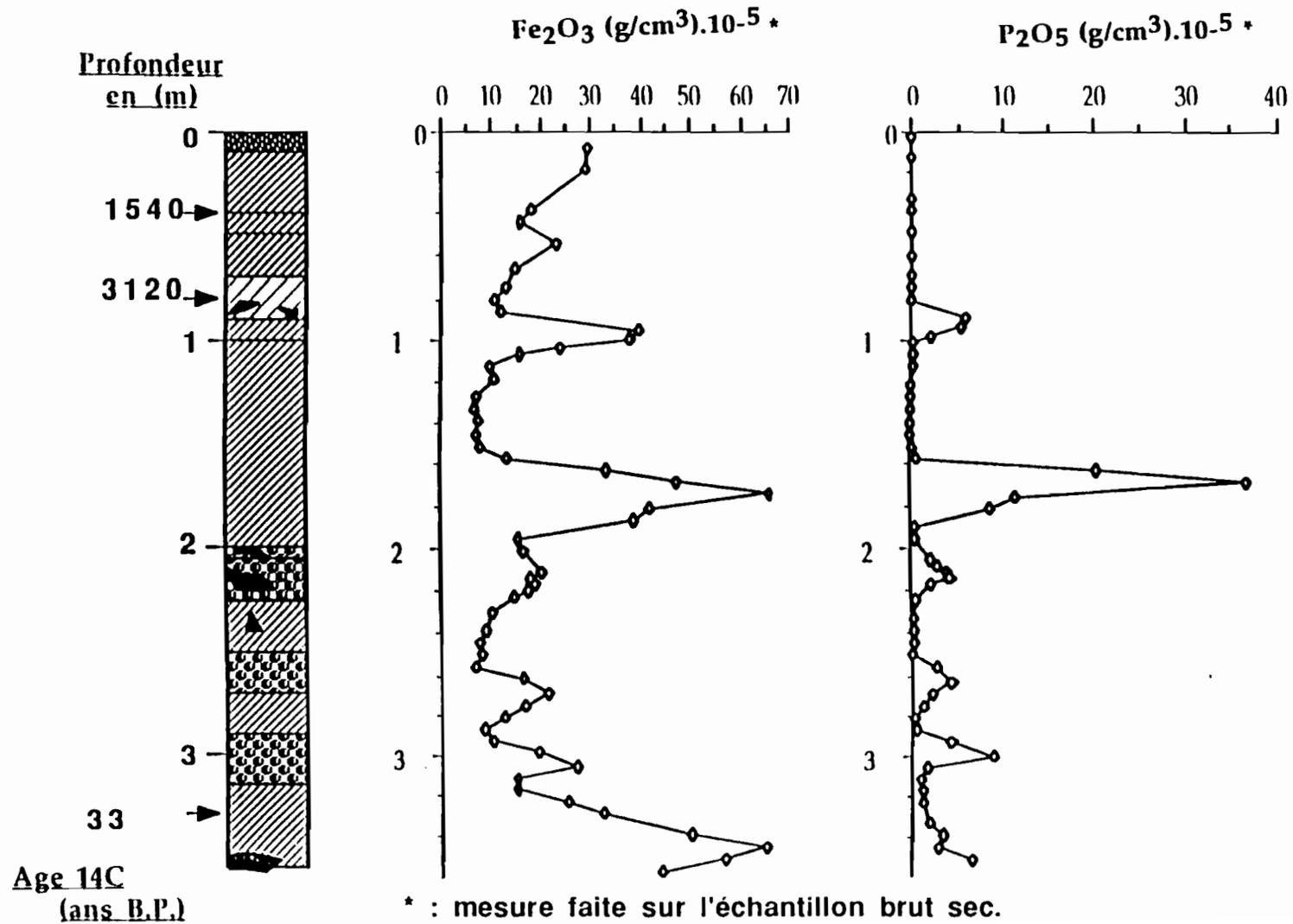
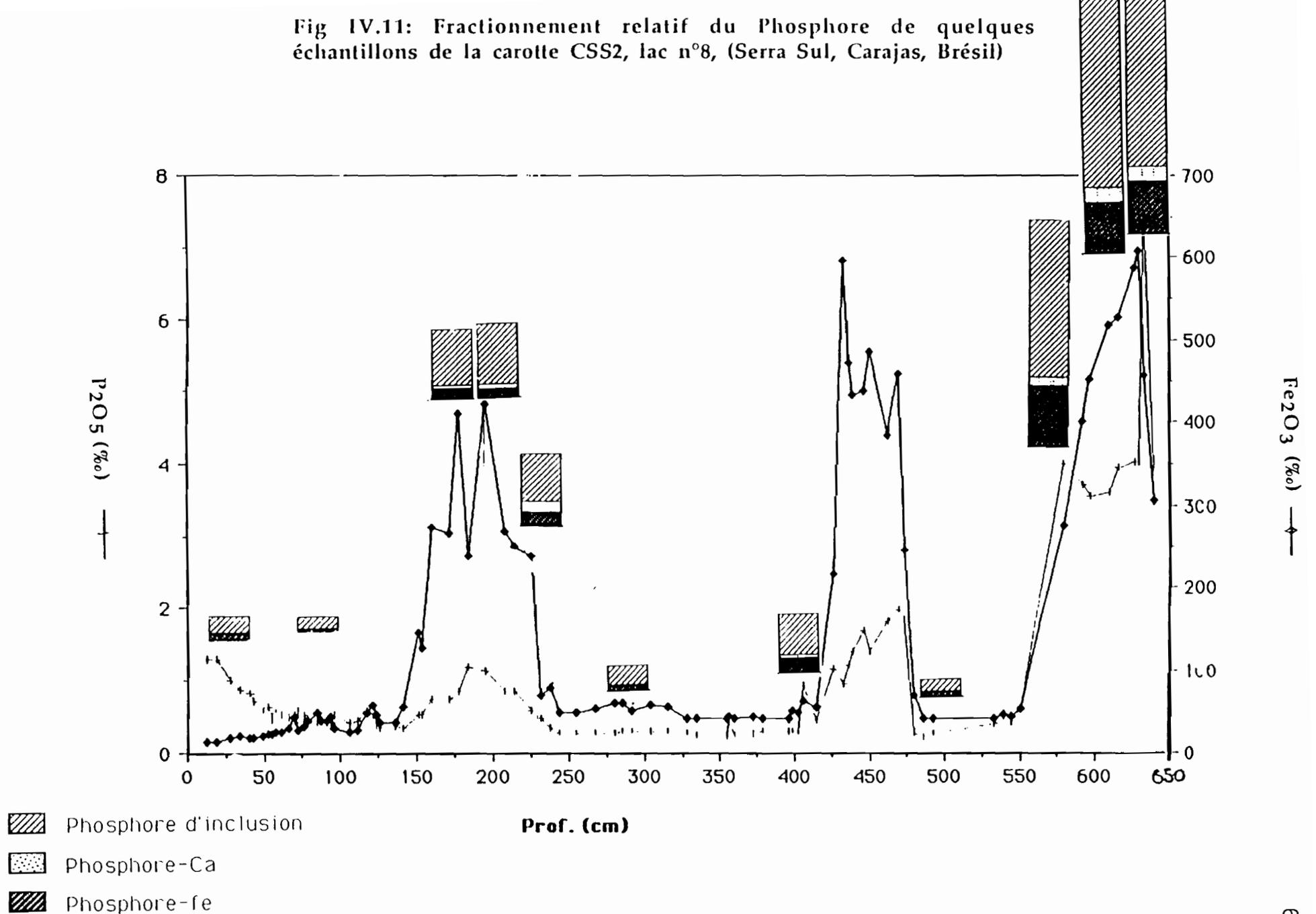
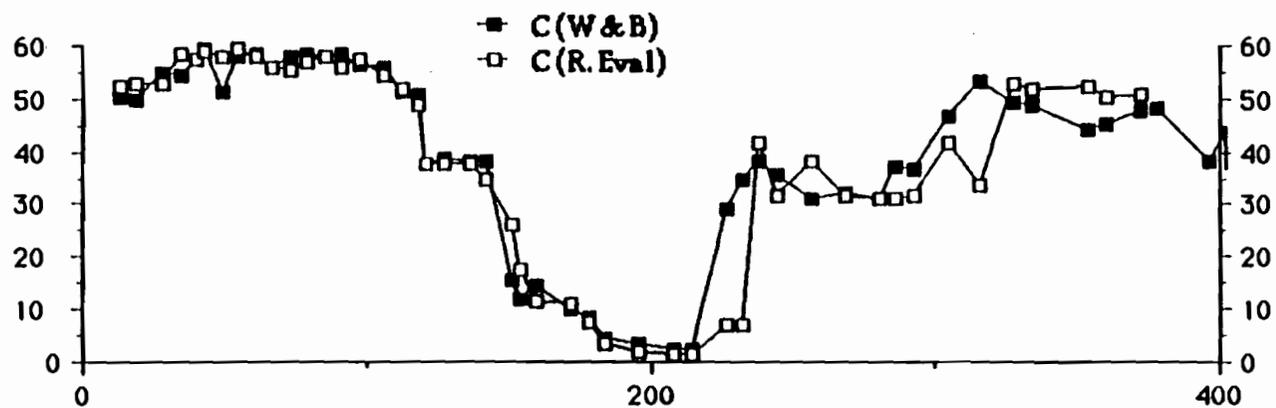


Fig IV.11: Fractionnement relatif du Phosphore de quelques échantillons de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)



C.O.T (%) Walkley et Black



C.O.T (%) Rock-Eval

**Fig IV.12: Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes de dosage du Carbone organique total ( Rock-Eval et W & B) le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**

## C.2) CAROTTE CSS10

Dans cette carotte, le phosphore présente une courbe de même allure que celle du fer (Fig IV.8). Il est à remarquer l'importance sporadique de ce constituant dans les faciès détritiques, dont la teneur peut aller jusqu'à 2% du sédiment sec; on notera également sa variation au sein de ce même niveau parallèlement avec l'apparition ou la disparition de la sidérite. Au sommet de la séquence, le niveau organique montre une proportion négligeable de phosphore total. Dans les derniers centimètres de ce niveau, on assiste à une augmentation de la teneur en phosphore total due probablement à une forte activité microbienne à ces niveaux

## D) DISCUSSION

La distribution des flux de phosphore calculés le long de la carotte CSS2 et les taux d'accumulations dans la carotte CSS10 montrent que les grandes quantités de phosphore sédimentés sont enregistrées dans les niveaux à sidérite, alors que, les faibles valeurs de flux de phosphore concernent les niveaux organiques (Fig IV.9 et 10).

## III) GEOCHIMIE ORGANIQUE

### A) DOSAGE DU CARBONE ORGANIQUE

Les deux carottes CSS2 et CSS10 ont fait l'objet de cette étude. Les résultats obtenus à partir des deux méthodes (Walkley & Black et pyrolyse Rock-Eval). sont similaires, comme cela apparaît sur la figure 12.

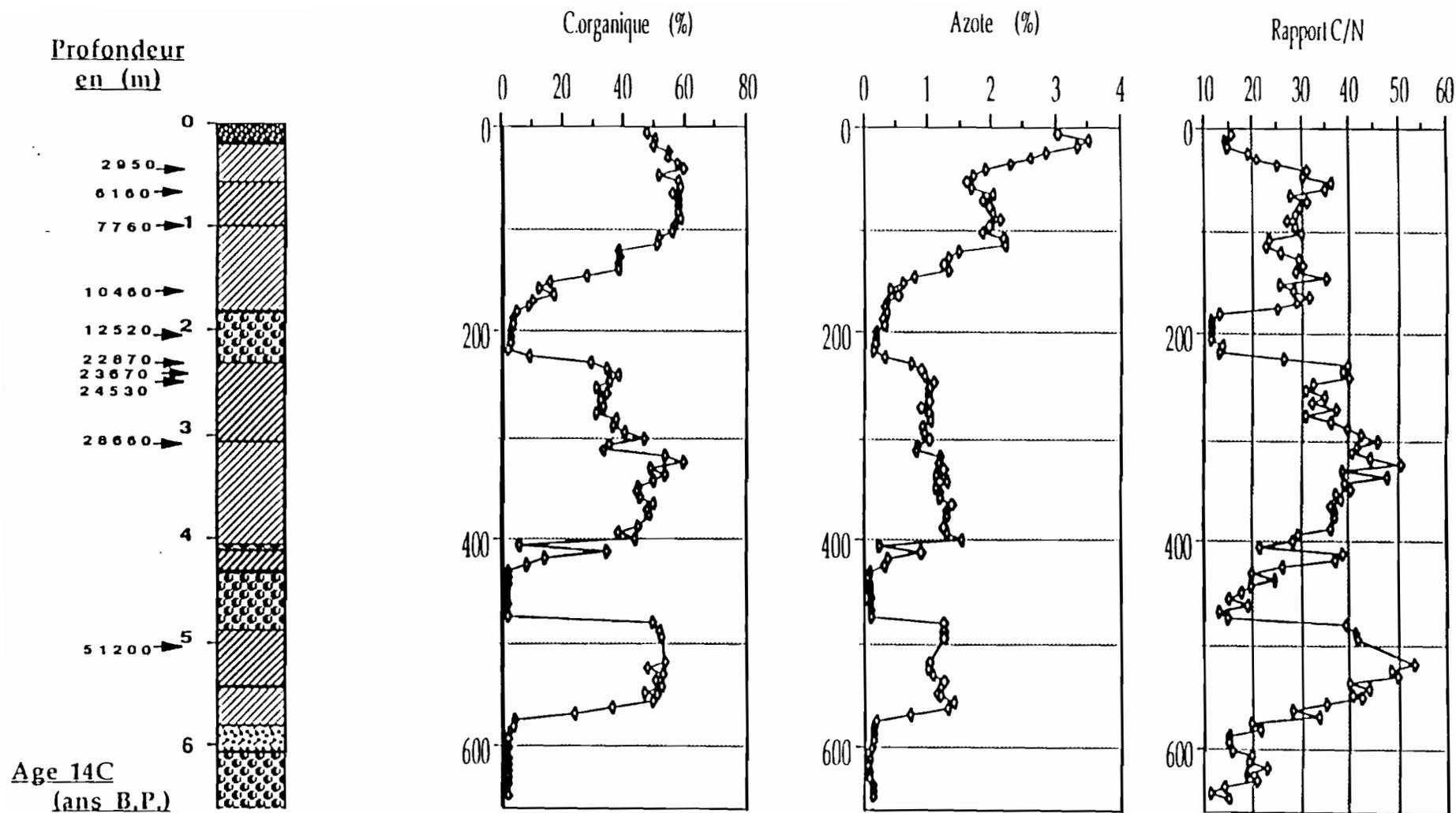
#### A.1) CAROTTE CSS2

Le tableau (IV.9) rassemble les résultats du dosage du carbone de la matière organique de la carotte CSS2. Il montre que pour chaque séquence sédimentaire le carbone organique total varie du niveau organique au niveau détritique. Il est à noter que le carbone organique total (C.O.T) atteint sa valeur maximale dans les niveaux organiques (50 à 60% de l'échantillon sec) (Fig IV.13). Dans le niveau organique de la séquence III entre 310 et 234 cm de profondeur on assiste à une diminution du C.O.T (Fig IV.13). Il est à remarquer l'importance du C.O.T dans le niveau organique supérieur de la séquence IV, dont la teneur atteint sa valeur maximale (60%) à 80 cm de profondeur .

A la base de chaque séquence les dépôts détritiques riches en sidérite montrent des proportions faibles de C.O.T (2 à 8% du sédiment brut sec) (Fig IV.13).

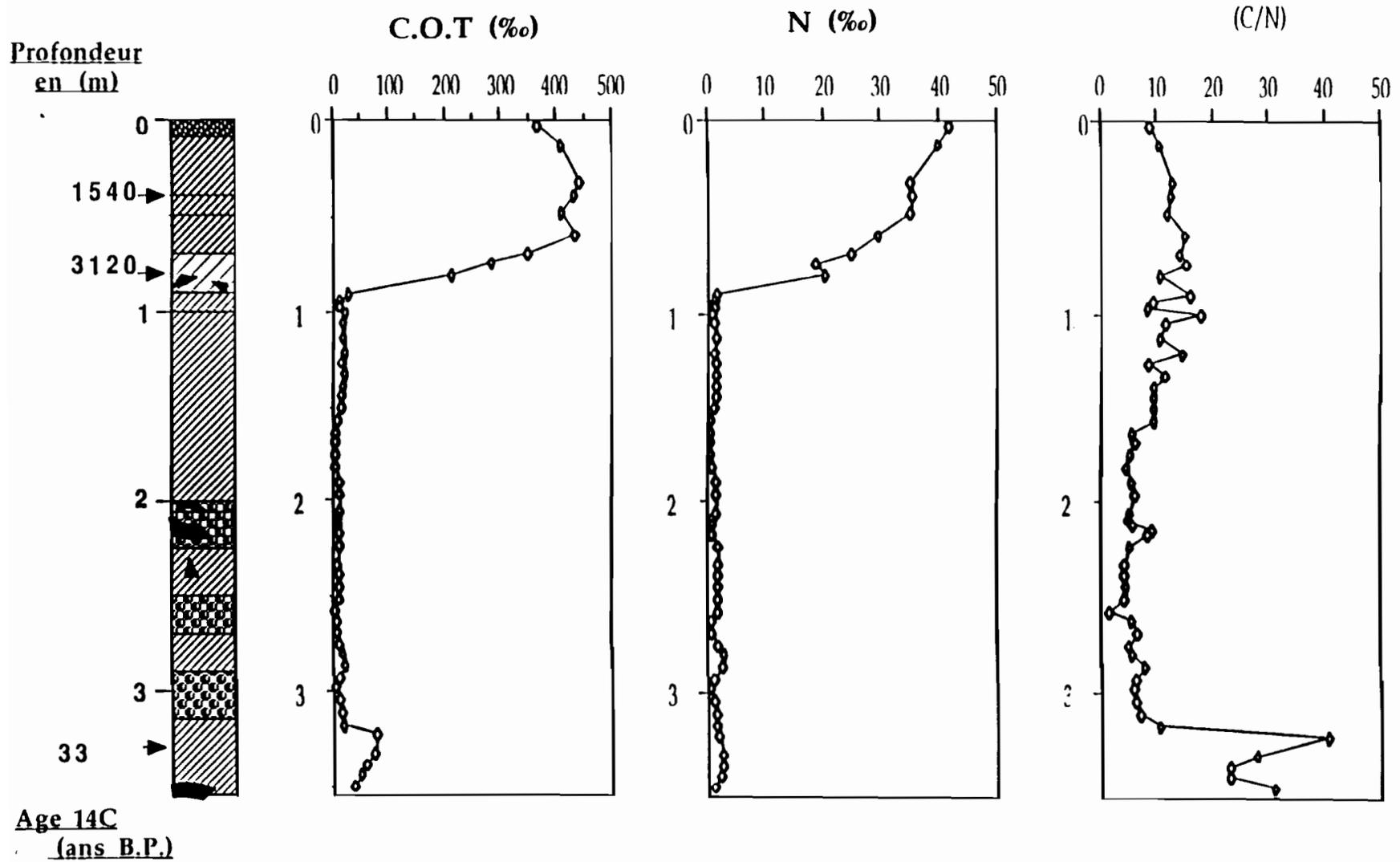
#### A.2) CAROTTE CSS10

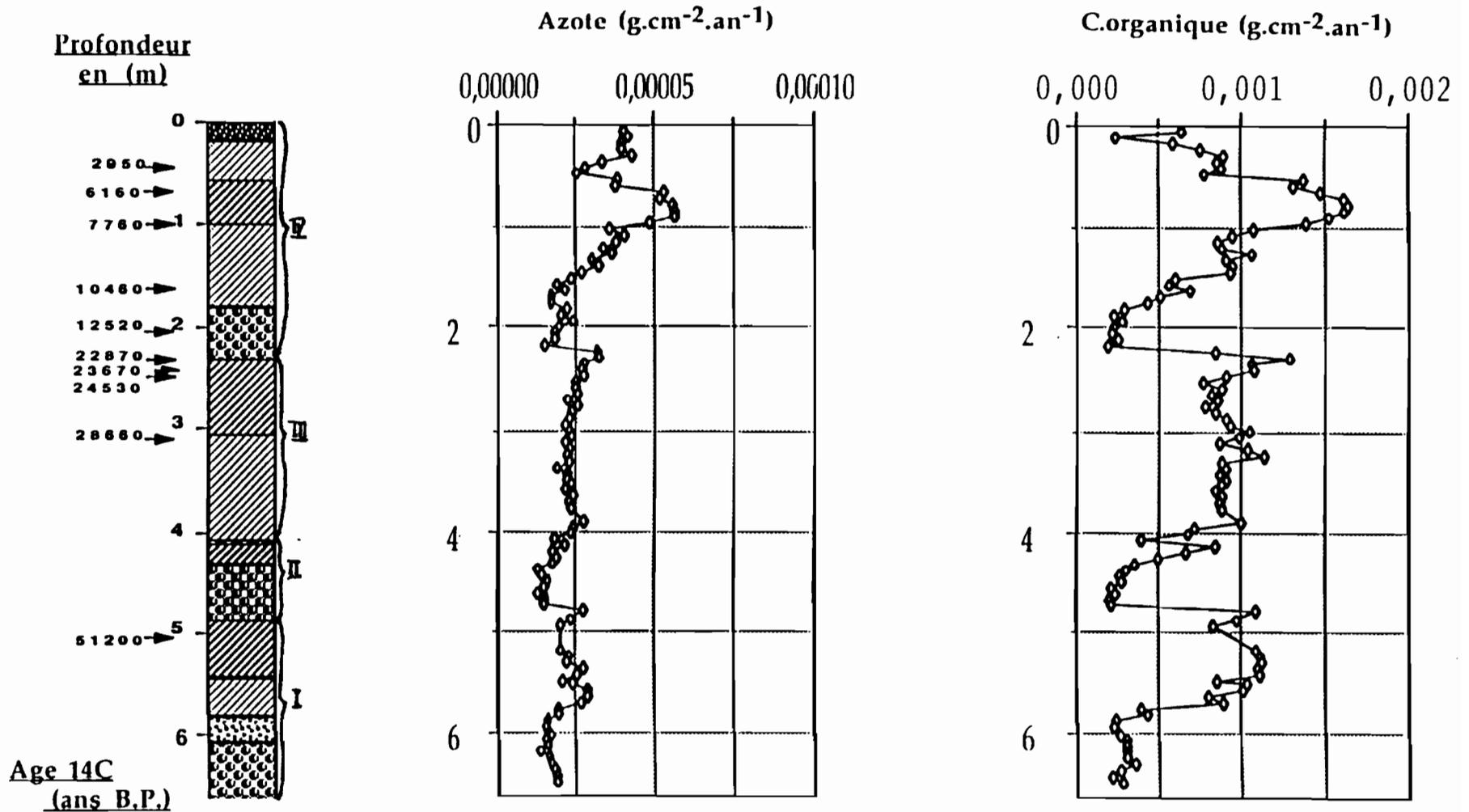
La teneur du carbone organique dans cette carotte varie de la même façon que dans la carotte CSS2 (TABLEAU IV.10). On note comme pour la CSS2 une diminution progressive des teneurs en C.O.T à la transition entre



**Fig IV.13: Variation des teneurs en ( C, N ) et du rapport C/N le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**

**Fig IV.14: Variation des teneurs en ( C, N ) et du rapport C/N  
le long de la carotte CSS10, lac n°12,  
(Serra Sul, Carajas, Brésil)**





**Fig IV.15: Variation des flux du Carbone organique et de l'Azote le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**

le niveau organique (40 à 50% ) (Fig IV.14) et les niveaux détritiques à sidérite (1% du sédiment total sec). Vers 75cm de profondeur dans le niveau organique sommital, le C.O.T atteint son optimum (60%)

## **B) DOSAGE DE L'AZOTE TOTAL**

Le dosage de l'azote a été réalisé sur les mêmes échantillons que ceux qui ont servi à doser le carbone organique total.

Les résultats de ce dosage sont portés dans le tableau (IV.9) et montrent des courbes analogues à celles du carbone organique total.

### **B.1) CAROTTE CSS2**

La variation de l'azote en fonction de la profondeur suit généralement celle du carbone organique (Fig IV.13). Il est à noter que dans chaque séquence sédimentaire, la teneur en azote diminue progressivement à la transition entre le niveau organique et le niveau détritique à sidérite. La teneur en azote atteint sa valeur maximale dans les niveaux riches en matière organique (3 à 4% du sédiment sec) par opposition au niveau à sidérite où elle diminue jusqu'à des valeurs minimales ( 0,1% du sédiment sec ). Il est également important de noter que dans le niveau organique sommital et plus précisément entre 75 et 80 cm de profondeur la teneur en azote diminue (1 à 1,5%). Au delà, elle augmente jusqu'à atteindre des valeurs de 3 à 3,5 % de l'échantillon brut (Fig IV.13).

### **B.2) CAROTTE CSS10**

Dans cette carotte, la teneur en azote est variable selon l'unité lithologique où on se situe (TABLEAU IV.10). Dans les niveaux organiques, la concentration de l'azote est maximale ( 3 à 4% du sédiment sec ); par contre dans les niveaux détritiques à sidérite elle est extrêmement basse (0,01% de l'échantillon brut) (Fig IV.14).

## **C) RAPPORT C/N**

Les résultats du rapport C/N de la carotte CSS2 et de la CSS10 sont regroupés respectivement dans les tableaux (IV.9, IV.10) et montrent pour chacune des carottes des variations en fonction des faciès lithologiques.

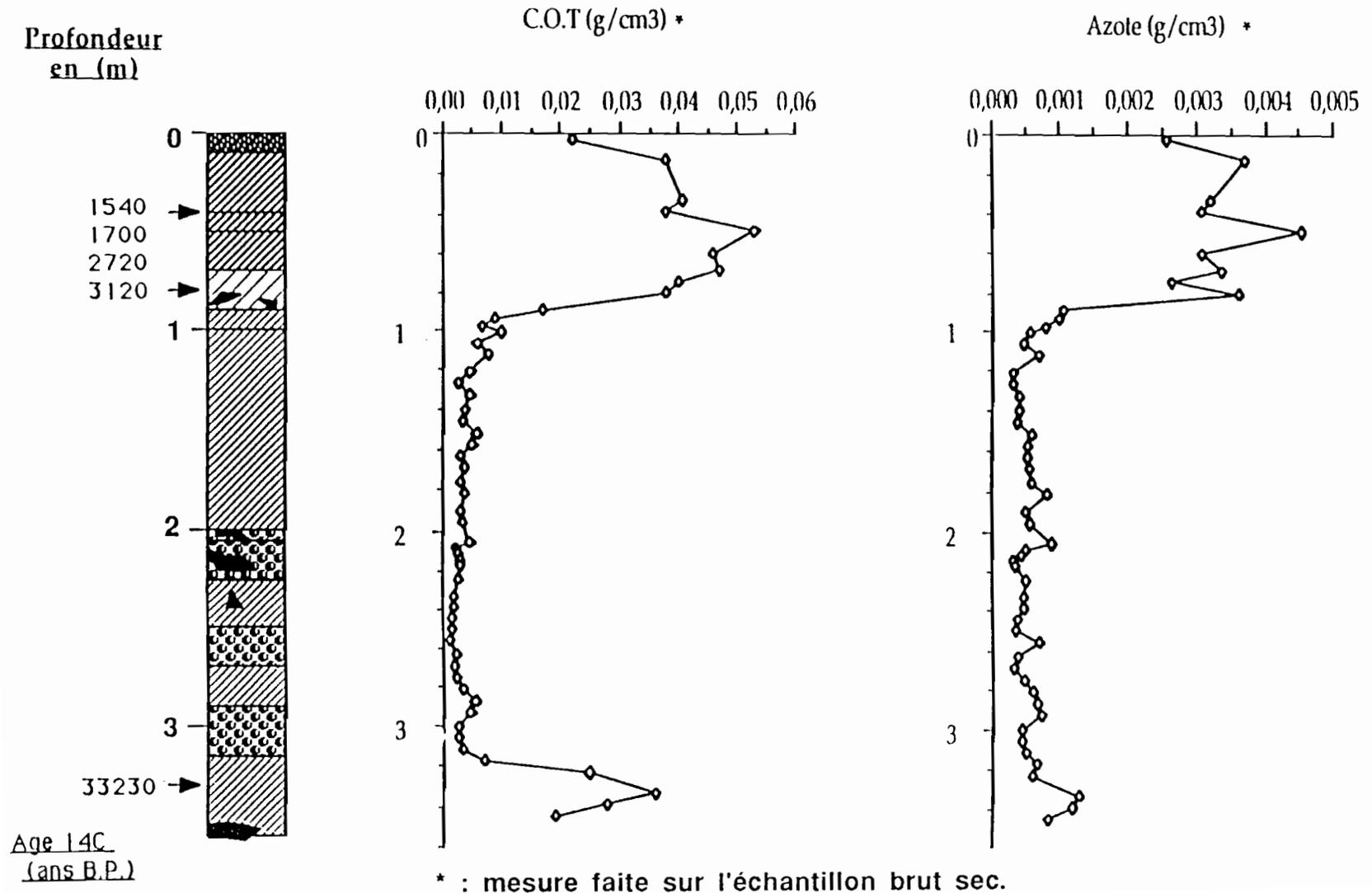
### **C.1) LA CAROTTE CSS2**

La distribution des valeurs du rapport C/N en fonction de la profondeur montre que:

Dans les niveaux détritiques, le rapport C/N enregistre des valeurs très basses ,( entre 10 et 11 ) dans le niveau détritique supérieur et entre 10 et 20 pour les niveaux détritiques moyen et inférieur (Fig IV.13).

Les valeurs du rapport C/N dans les niveaux organiques varient entre 20 et 40. Dans les deux niveaux organiques des séquences sédimentaires I et III le rapport C/N atteint sa valeur maximale de 50. Il est à remarquer

**Fig IV.16: Variation des taux d'accumulations du Carbone organique et de l'Azote le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**



que dans le niveau organique sommital les valeurs du rapport C/N sont moyennes ( 25 et 35 ) (Fig IV.13).

### **C.2) LA CAROTTE CSS10**

Les résultats du rapport C/N de la carotte CSS10 présentent les mêmes variations que celles enregistrées le long de la CSS2 mais avec des amplitudes différentes. Les basses valeurs du rapport sont enregistrées dans les niveaux détritiques à sidérite ( entre 5 et 7) par opposition au niveau organique où le rapport C/N atteint des valeurs plus élevées, dépassant la valeur 10 (Fig IV.14). Il est à noter que le maximum (40) du rapport est atteint dans le niveau argilo-organique basal, à 310 cm de profondeur.

### **D) DISCUSSION**

Les courbes des flux et des taux d'accumulation du carbone organique et de l'azote montrent (Fig IV.15, 16) les mêmes variations que celles enregistrées par les pourcentages (Fig IV.13). On remarquera que les flux augmentent de manière progressive entre les faciès détritiques à sidérite et les faciès organiques situés au-dessus. Ces variations, évoluant à l'inverse de celles mis en évidence par les minéraux détritiques ( quartz, kaolinite), se répètent à quatre reprises dans la carotte CSS2 et une fois dans la carotte CSS10. Elles définissent ainsi quatre séquences sédimentaires dans la carotte CSS2 et une dans la carotte CSS10.

## **IV) GEOCHIMIE ISOTOPIQUE**

Quarante deux échantillons de matières organiques totales ont été analysés en fonction des faciès lithologiques décrits visuellement. Vingt deux échantillons appartiennent au sondage CSS2 et les autres à la carotte CSS10.

### **A) CAROTTE CSS2**

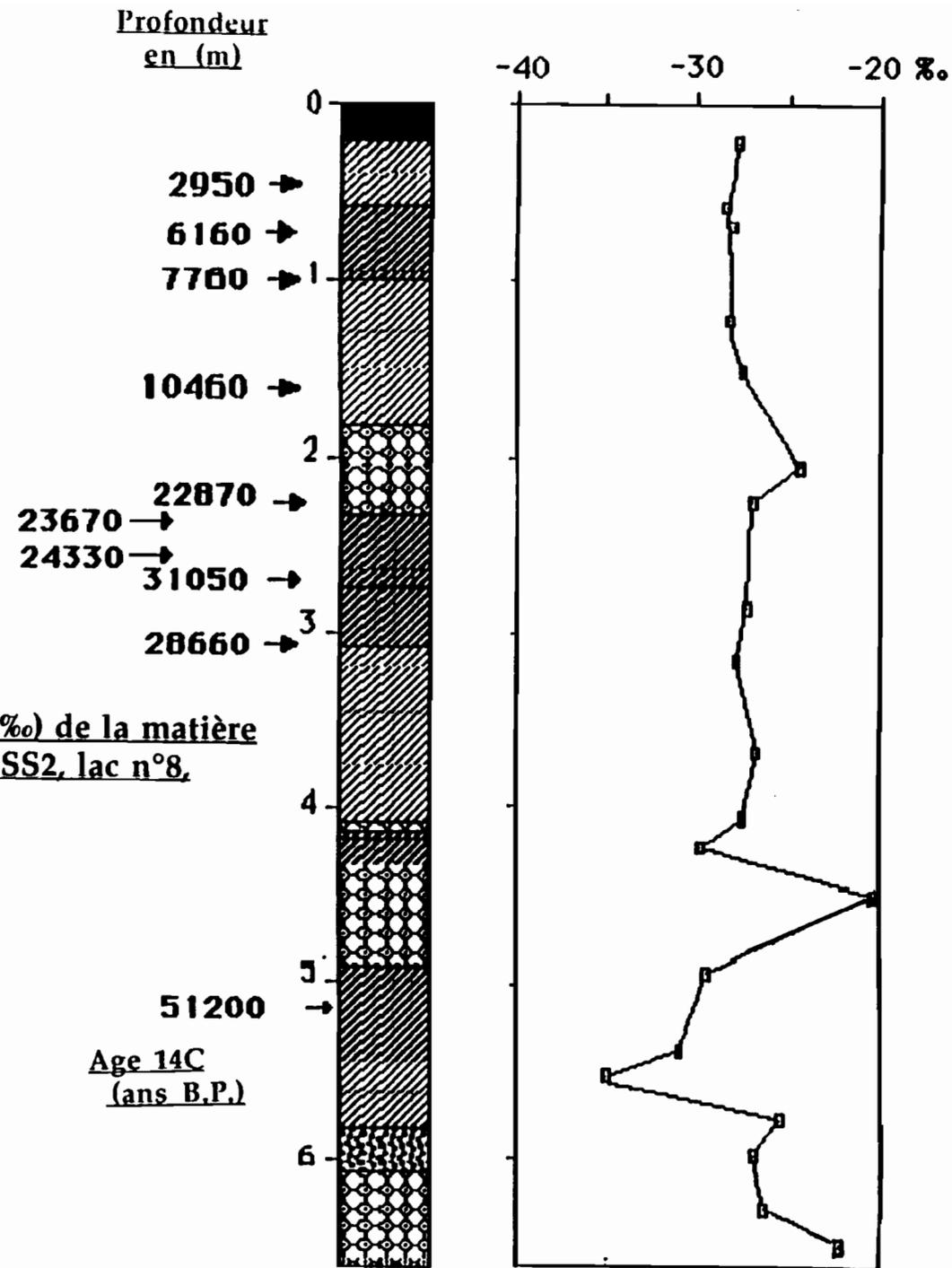
La distribution des valeurs des isotopes stables en fonction de la profondeur (Fig IV.17) montre que dans les valeurs du rapport  $\delta(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})$  varie entre -28 et -30 ‰ (PDB) dans les couches organiques. Les valeurs augmentent dans les niveaux détritiques à sidérite -20 et -25 ‰ (PDB) Il est à noter que les deux niveaux à sidérites des deux premières séquences enregistrent des valeurs plus positives que celles du niveau supérieur(-20 à -23 ‰ (PDB)).

### **B) CAROTTE CSS10**

Dans cette carotte nous avons enregistré les mêmes variations que pour la carotte CSS2 (Fig IV.18). Dans les niveaux organiques les valeurs du rapport ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) varient entre -27 et -31 ‰ (PDB) par contre dans les niveaux détritiques à sidérite elles oscillent entre -21 et -24 ‰ (PDB) (Fig IV.18).

### **C) DISCUSSION**

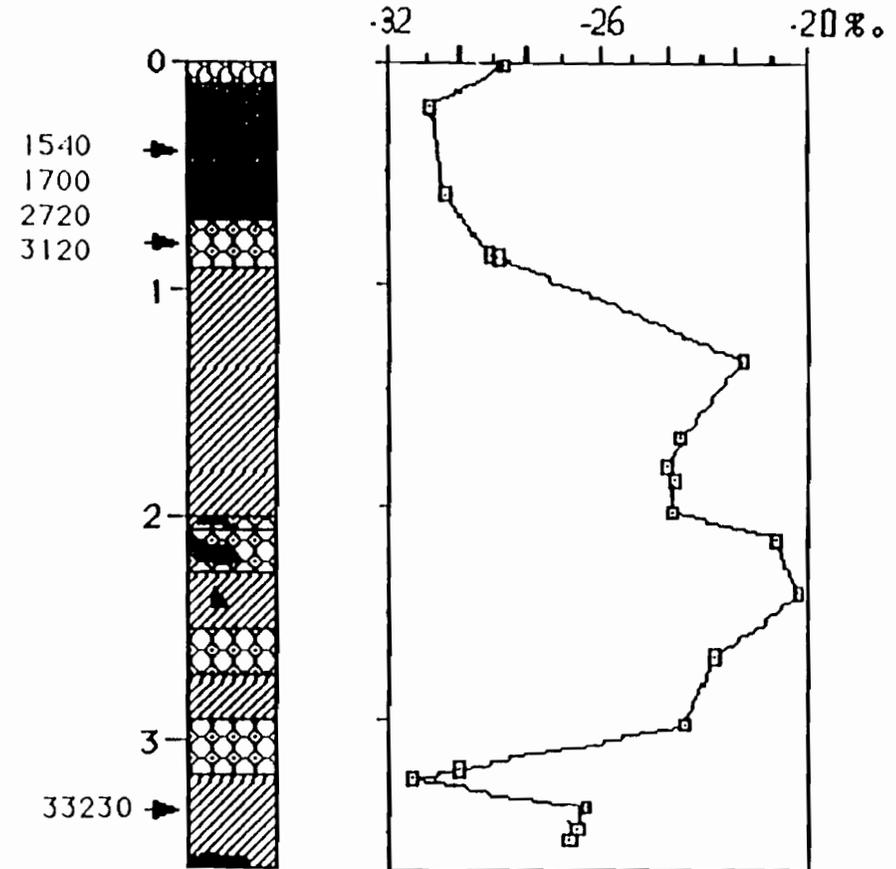
Les analyses isotopiques montrent que les valeurs du rapport  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  de la matière organique totale varient peu le long des deux



**Fig IV.17: Variation du  $\delta(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})$  (PDB en‰) de la matière organique totale le long de la carotte CSS2, lac n°8, (Serra Sul, Carajas, Brésil)**

Profondeur  
en (m)

$\delta(13c/12c)$  (PDB)



Age 14C  
(ans B.P.)

Fig IV.18: Variation du  $\delta(13C/12C)$  (PDB en‰) de la matière organique totale le long de la carotte CSS10, lac n°12, (Serra Sul, Carajas, Brésil)

carottes et d'un niveau à l'autre. Ceci est probablement lié à la diversité du stock organique des sédiments étudiés regroupant des mélanges de matières organiques d'origine différente et ayant subi des transformations biologiques. La conséquence en est un signal isotopique moyen tout au long des deux sondages.

## V) PETROGRAPHIE ORGANIQUE

Cinquante huit échantillons ont été traités et observés au microscope optique; trente deux font partie de la carotte CSS2, le reste appartient au sondage CSS10.

### A) RESULTATS

#### A.1) LA CAROTTE CSS2:

De point de vue de la pétrographie organique, la carotte CSS2 est subdivisée en dix unités qui sont de haut en bas: (Tableau IV.11).

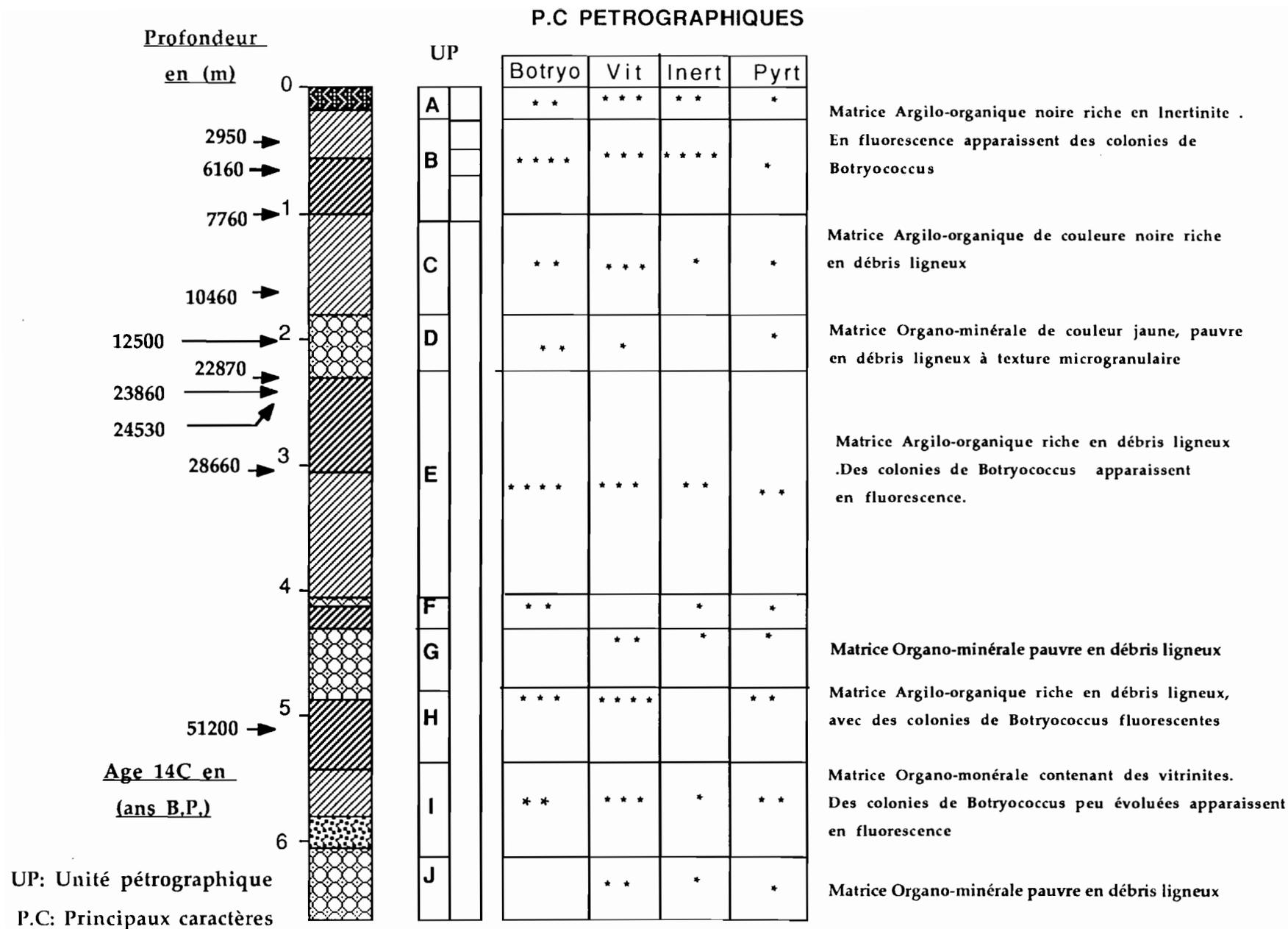
**A (8-10 cm):** Cette unité sommitale, à matrice argilo-organique, contient des débris ligneux généralement constitués par des vitrinites (Photo IV.1) de granulométrie moyenne et à faible pouvoir réflecteur. La minéralisation qui accompagne ce contenu organique est présente sous forme sulfurée. Des colonies de *Botryococcus* sont observées en fluorescence.

**B (10-100 cm):** Caractérisée par une matrice argilo-organique, de texture granulaire et de couleur noire, riche en matériel organique détritique représenté par des vitrinites à faible pouvoir réflecteur et des inertinites. La particularité de cette unité pétrographique entre 75 et 80 cm est sa grande richesse en débris ligneux brûlés (Photo IV.2) à parois amincies rarement cassantes présentant un fort pouvoir réflecteur et qui sont définis comme des pyrofusinites. En fluorescence on note la présence des colonies de *Botryococcus*.

**C (100-176 cm):** La matrice argilo organique, de couleur noire, à structure enchevêtrée, est riche en débris ligneux (Vitrinite) ( Dans cette unité on note l'apparition des débris oxydés avec une granulométrie comprise entre 10 et 20 microns. La minéralisation est sous forme de pyrite isolée. En fluorescence, de belles colonies de *Botryococcus* apparaissent.

**D (176-230 cm):** La matrice organo-minérale de couleur jaune, s'organise en petits amas contenant des structures globulaires riches en minéralisation (Sidérite); cette matrice contient par endroits des débris ligneux présentant différents pouvoirs réflecteurs. En fluorescence, on distingue des colonies de *Botryococcus* de petite taille avec différentes couleurs qui correspondent probablement à une altération de ces colonies (Photo IV.3)

**E (230-307 cm):** La matrice de cette unité est argilo-organique riche en débris ligneux (Vitrinite, Inertinite), à structures cellulaires visibles et non perturbées. La granulométrie est fine mais par endroits on note la présence de particules grossières qui conservent très bien leurs structures cellulaires. La minéralisation est sous forme de



**Tableau IV.11: Description pétrographique de la carotte CSS2, Lac n°8 ( Serra Sul, Carajas, Brésil)**

pyrite, framboïdale, rarement isolée. En fluorescence, il apparaît des colonies de *Botryococcus* (Photo IV.4).

**F (410-424 cm):** La matrice de cette unité est organo-minérale microgranulaire contenant des débris ligneux qui sont constitués dans la majorité des cas par des vitrinites parfois vacuolaires. La minéralisation de cette unité est surtout carbonatée. Des colonies de *Botryococcus* apparaissent en fluorescence.

**G (424-480 cm):** La matrice organo-minérale de cette unité est caractérisée par la rareté des débris ligneux et par la disparition des colonies de *Botryococcus* en fluorescence. Ces deux particularités la distinguent des unités pétrographiques décrites précédemment.

**H (480-549 cm):** La matrice de cette unité est argilo-organique de couleur noire parsemée de taches jaunâtres ou rougeâtres correspondant aux minéralisations qui accompagnent cette matière organique. Celle-ci comprend d'une part un matériel détritique constitué de vitrinite à structures bien conservées et rarement minéralisées avec peu de débris oxydés, d'autre part un matériel planctonique représenté principalement par des colonies de *Botryococcus* qui apparaissent en fluorescence.

**I (549-602 cm):** La matrice organo-minérale est de couleur jaunâtre microgranulaire, riche en débris ligneux qui sont généralement des vitrinites à tailles et formes variées, rarement conservées. La minéralisation, similaire à la précédente, est carbonatée avec parfois quelques framboïdes de pyrite. La matrice n'est pas fluorescente.

**J (602-650 cm):** La matrice organo-minérale de couleur jaune microgranulaire contient peu de débris ligneux qui se présentent dans la majorité des cas sous forme de vitrinites à granulométrie variée. Parmi ces derniers on note parfois des débris minéralisés et à structures conservées voire vacuolaires. La minéralisation qui accompagne ce contenu organique est surtout carbonatée, rarement sulfurée. La fluorescence est nulle.

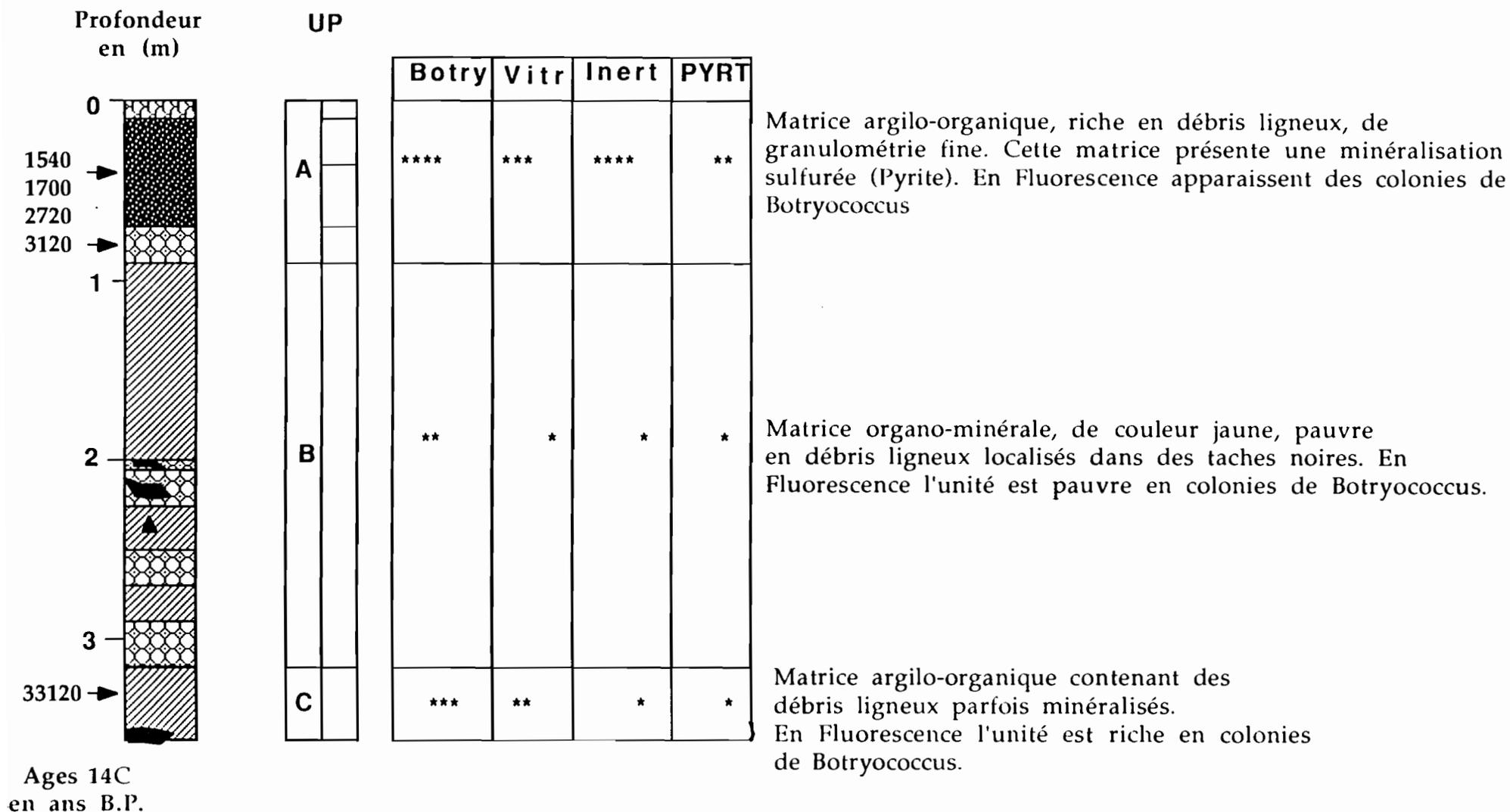
## **A.2) LA CAROTTE CSS10:**

L'analyse pétrographique de cette carotte révèle la présence de trois grandes unités qui seront décrites de haut en bas (Tableau IV.12).

**A (0-90 cm):** La matrice argilo-organique de cette unité de couleur noire, présente une forte teneur en débris ligneux à granulométrie fine. La minéralisation qui accompagne ce contenu organique est sous deux formes, l'une carbonatée et l'autre sulfurée (pyrite). La différence par rapport aux autres unités, est l'existence d'un niveau (75-77 cm) riche en pyrofusinites. En fluorescence, apparaissent des colonies de *botryococcus*. La subdivision de cette unité pétrographique en sous unités dépend de la variation de la teneur en matériel ligneux et planctonique dans chaque sous unité (Photo IV.5) (Photo IV.6).

**B (90-315 cm):** La matrice de cette unité est organo-minérale, de couleur jaune, pauvre en débris ligneux localisés par endroits dans des taches noires. Dans cette unité la minéralisation est carbonatée sous forme de sidérite, et sulfurée sous forme de pyrite qui s'organise en framboïde,

## PRINCIPAUX CARACTERES PETROGRAPHIQUES



**Tableau IV.12: Description pétrographique de la carotte CSS10, Lac n°12 ( Serra Sul, Carajas, Brésil)**

ou isolée. En fluorescence l'unité se montre pauvre en colonies de Botryococcus (Photo IV.7) (Photo IV.8).

**C (315-335 cm):** L'unité a une matrice argilo-organique caractérisée par l'augmentation de la teneur en débris ligneux présentant parfois des minéralisations dans leurs structures cellulaires. En fluorescence l'unité est riche en colonies de Botryococcus

## **B) DISCUSSION**

Les résultats de cette analyse pétrographique offrent une bonne corrélation avec la description visuelle des unités lithologiques respectives des deux carottes CSS2, CSS10.

Les niveaux organiques, riches en vitrinites à structures cellulaires dans la majorité des cas bien conservées, et pauvres en débris ligneux oxydés, correspondent à des conditions de milieu favorables à la bonne conservation du matériel organique, comme l'atteste la bonne qualité du matériel planctonique. Quant aux niveaux à faciès détritiques jaune, la diminution des teneurs de vitrinites et l'augmentation de celles des débris ligneux oxydés indiquent l'installation de nouvelles conditions qui contribuent à l'altération du contenu organique comme l'atteste la mauvaise conservation des colonies des Botryococcus.

L'hétérogénéité des niveaux organiques localisés respectivement dans l'unité sommitale (B) de la carotte CSS2 et dans l'unité (A) de la carotte CSS10, est dûe à la présence, dans ces niveaux caractérisés par la présence de débris ligneux très bien conservés à faibles pouvoirs réflecteurs, de débris ligneux oxydés présentant, des pouvoirs réflecteurs élevés, avec parfois des parois amincies (pyrofusinites) à granulométrie très fine, dont l'origine serait probablement liée à des feux (SCOTT A.C., 1989)

## **C) REFLECTOMETRIE**

Les échantillons ont été étudiés en fonction des unités pétrographiques déjà définies. Vingt échantillons de la carotte CSS2 ont fait l'objet de cette étude et montrent que le pouvoir réflecteur mesuré sur les débris ligneux est variable selon les niveaux de chaque séquence sédimentaire. Les barres noires et les barres blanches de l'histogramme représentent respectivement les niveaux organiques et les niveaux à sidérite (Fig.IV.19).

### **C.1) LES NIVEAUX DETRITIQUES A SIDERITE:**

Les résultats sont regroupés dans des histogrammes (Fig IV.19.a et b) qui montrent l'hétérogénéité du matériel organique ligneux détritique. En effet la répartition du pouvoir réflecteur en fonction de l'effectif met en évidence au moins deux populations dont le pouvoir réflecteur est différent (Fig IV.19):

- une qui présente un pouvoir réflecteur oscillant entre 1 et 2% .
- l'autre présentant un pouvoir réflecteur très bas: 0,2%.

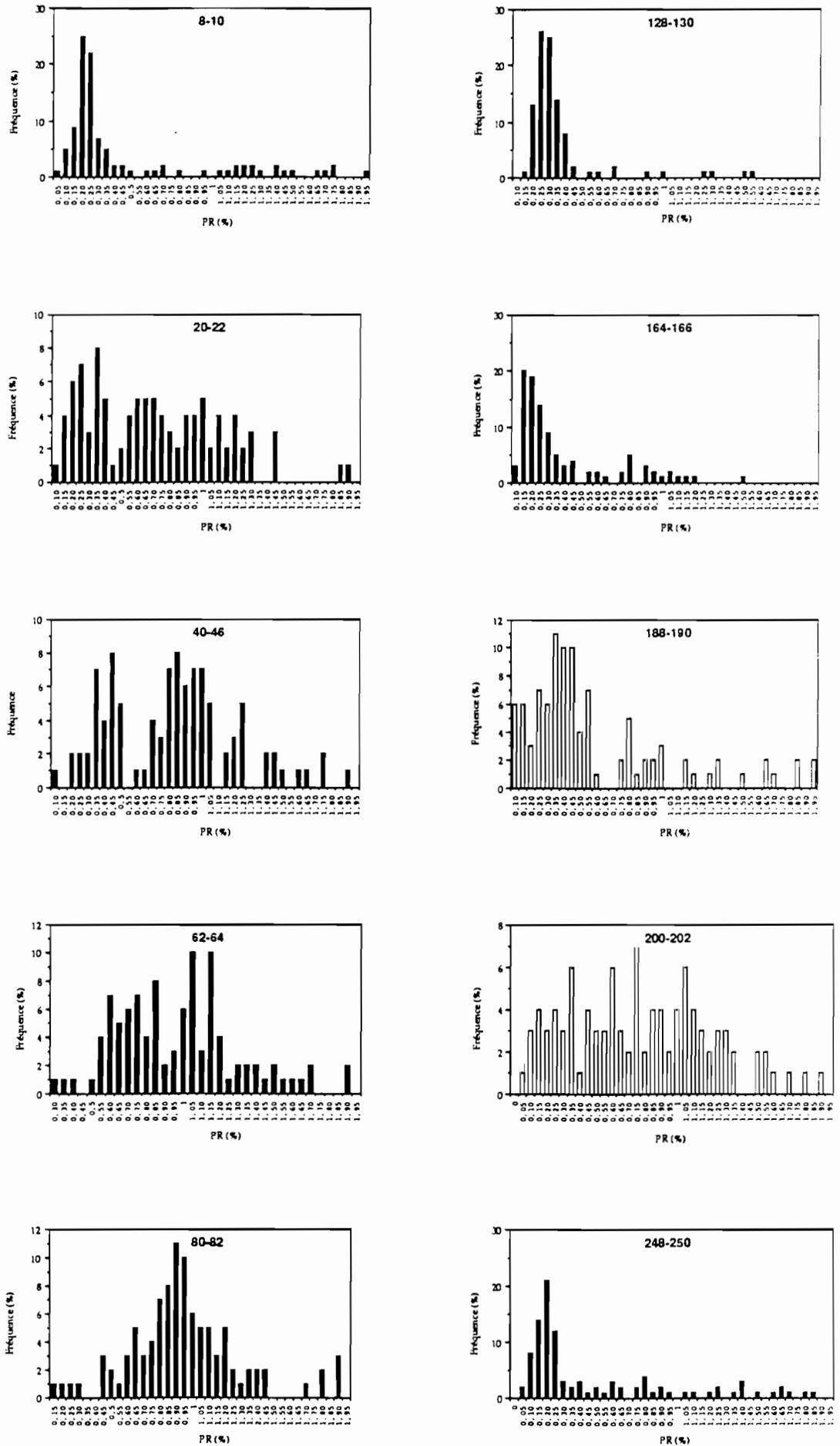


Fig IV.19.a: Variation du pouvoir réflecteur le long de la carotte CSS2.

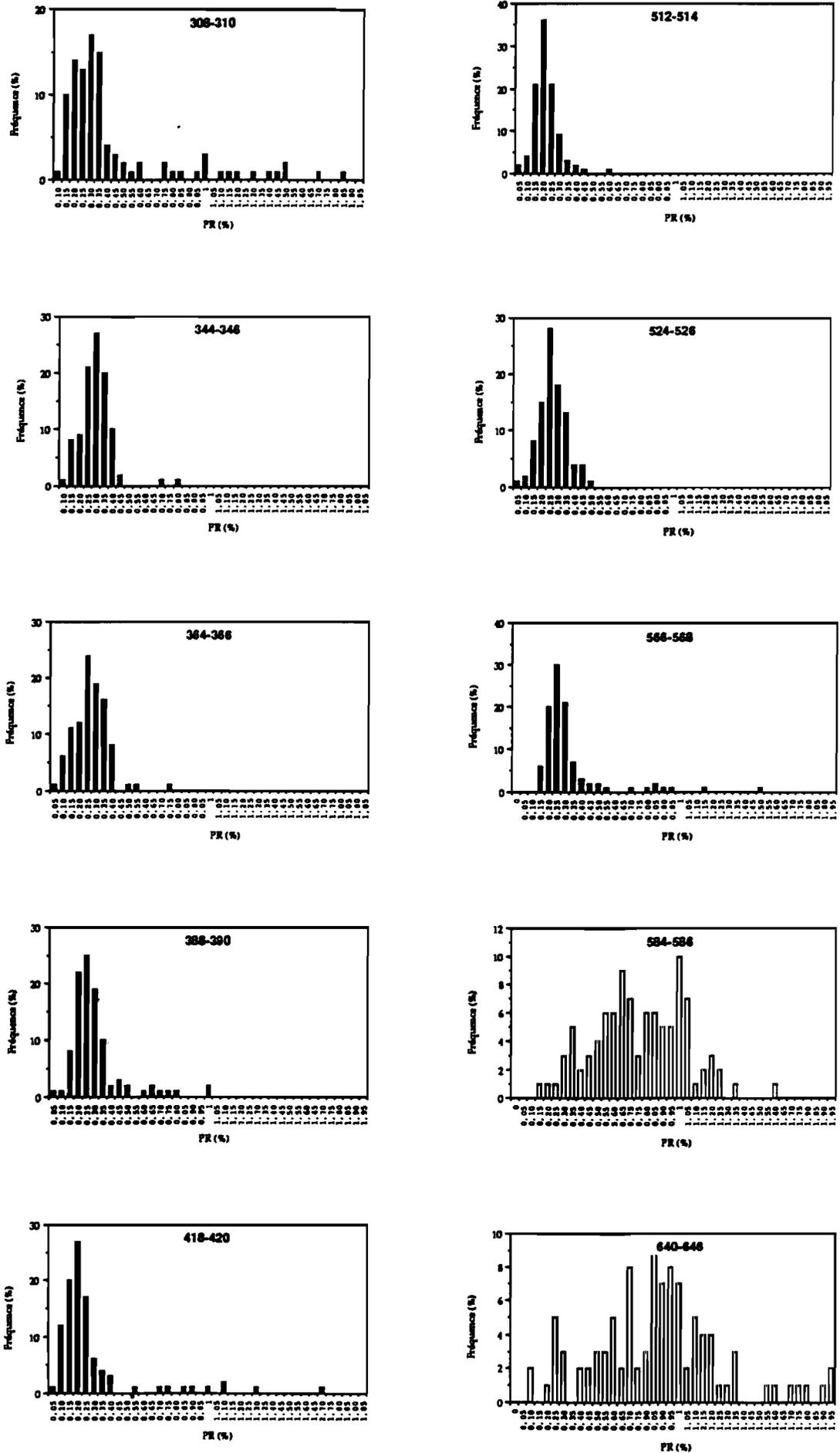


Fig IV.19.b: Variation du pouvoir réflecteur le long de la carotte CSS2.

### **C.1.1) LES NIVEAUX ORGANIQUES**

Les résultats sont rassemblés dans les histogrammes (Fig 19.a et 19.b) qui montrent que dans ces niveaux, la distribution du pouvoir réflecteur en fonction des classes d'effectif indique l'existence d'une seule population de pouvoir réflecteur entre 0,3 et 0,4% .

### **C.1.2) LE NIVEAU ORGANIQUE SOMMITAL**

Dans le niveau organique de la séquence sommitale et à partir de 80 cm de profondeur vers le haut, la répartition de la variation du pouvoir réflecteur en fonction des débris végétaux analysés met en évidence une population de débris dont le mode est de 1% (Fig IV.19.a) et une autre présentant des pouvoirs réflecteurs bas compris entre 0,2 et 0,5 d'intensité. Cette hétérogénéité du matériel organique détritique persiste jusqu'à 40 cm de profondeur (Fig IV.19) au delà de ce niveau le pouvoir réflecteur des débris organique devient bas entre (0,1 et 0,5) et caractérise une population unimodale (Fig IV.19).

### **C.2.3) DISCUSSION**

La mesure du pouvoir réflecteur normalement conçue pour étudier la houillification, nous a permis d'identifier les différents niveaux, et de mettre en évidence un niveau à micro-charbons entre 40 et 80 cm.

Dans les niveaux organiques, le pouvoir réflecteur mesuré sur des débris ligneux est faible et confirme leur bon état de conservation. Par contre dans les niveaux à sidérite où la matière organique est oxydée, la mesure met en évidence trois populations de débris ligneux à différents pouvoirs réflecteur (fort, moyen, et faible). Ceci confirme l'hétérogénéité de la matière organique ligneuse dans ces niveaux.

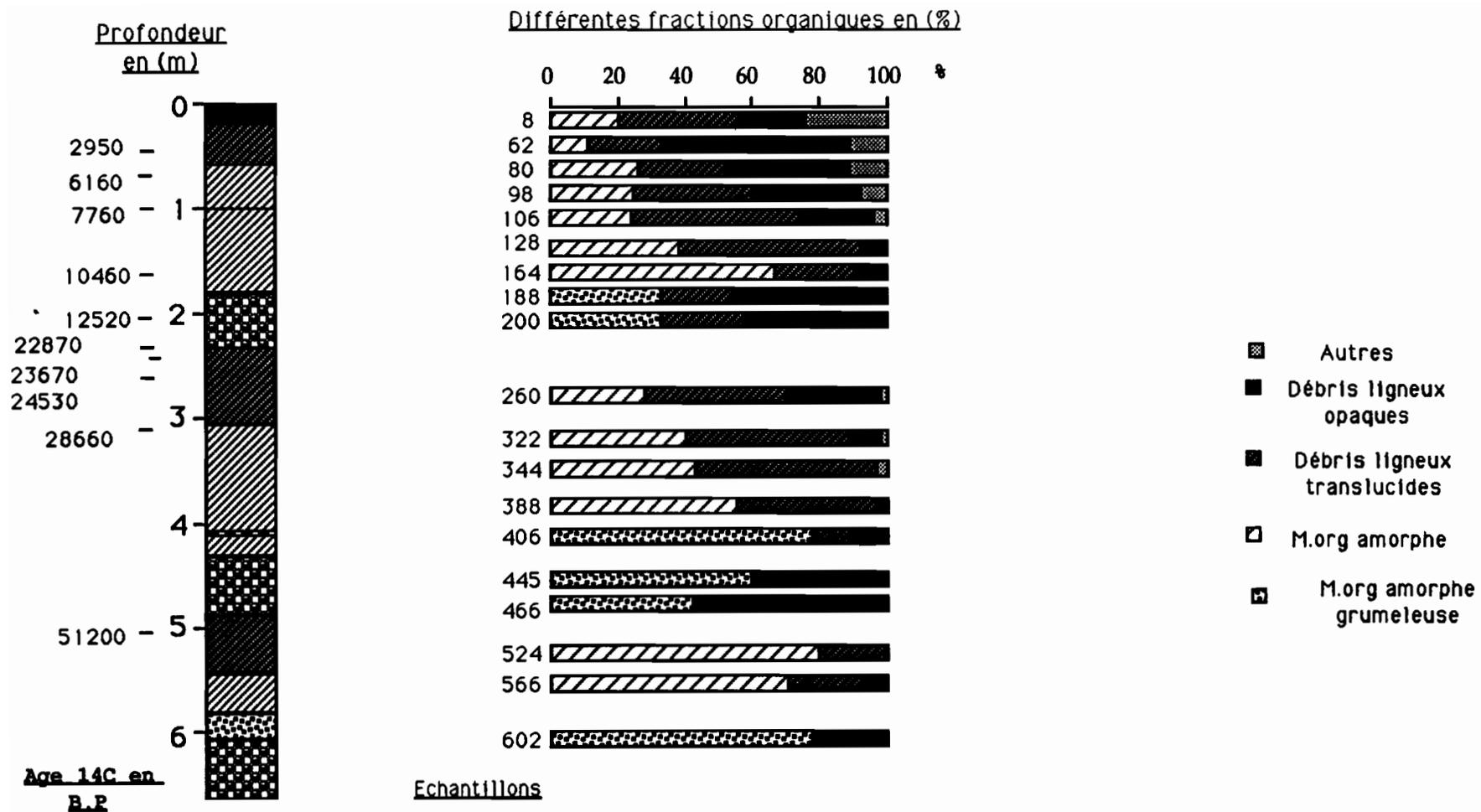
De plus, la caractérisation du niveau organique sommital à pyrofusinites par cette mesure vient renforcer les résultats des autres analyses.

### **D) PALYNOFACIES**

Les échantillons traités et analysés ont été choisis en fonction des unités pétrographiques préalablement définies dans les deux carottes respectives CSS2, CSS10.

Pour cette analyse nous avons suivi le long de ce sondage la variation de trois types d'éléments figurés afin d'apprécier leurs contributions au dépôt. Ces trois types sont:

- les débris opaques
- les débris translucides
- la matière organique amorphe



**Fig IV.20: PALYNOFACIES DE LA CAROTTE CSS2, LAC N°8 (CARAJAS, PARA, BRESIL)**

### **D.1) LA CAROTTE CSS2:**

Les résultats des proportions relatives des différents débris déjà définis, dessinent des histogrammes (Fig IV.20).

#### **D.1.2) LES NIVEAUX DETRITIQUE A SIDERITE:**

Ces niveaux sont caractérisés par l'abondance des débris opaques à parois amincies à granulométrie très fine, généralement inférieur à  $20\mu$  (Photo IV.9 et 10) ( 30 à 40% du matériel organique ) (Fig IV.20). Il est à noter également l'importance de la matière organique amorphe qui se présente sous forme d'amas globuleux à structure grumeleuse (Photo IV.7) et dont la teneur atteint sa valeur maximale ( 60 à 80% ) (Fig IV.20). Cette matière amorphe est composée de petites particules rondes qui peuvent vraisemblablement correspondre à des spores de bactérie (Kaiser P. communication orale). Le dernier niveau à sidérite se distingue des autres par la présence de débris translucides à structure cellulaire conservée de grande taille (  $60\mu$  ) dont la teneur peut constituer 15% du matériel organique figuré (Fig IV.20 ).

#### **D.1.3) LES NIVEAUX ORGANIQUES**

La particularité de ces niveaux est leur grande richesse en débris ligneux translucides à structure parfois bien conservée à granulométrie grossière (  $60$  à  $100\mu$  ) (Photo IV.11 et 12) dont la teneur peut former 60% du matériel organique (Fig IV.20). Dans ces faciès, la matière organique amorphe ne dépasse jamais 20 % du contenu organique (Fig IV.20). A partir de 80 jusqu'à 40 cm de profondeur, dans le niveau organique de la séquence sommitale, on note la réapparition de débris opaques très fins dont le diamètre est inférieur à  $20\mu$ , qui représentent 30 à 50% du matériel organique total (Fig IV.20) (Photo IV.13,14, et 15).

### **D.2) LA CAROTTE CSS10**

Dans cette carotte on note les mêmes évolutions que celles détectées dans le sondage CSS2.

La distribution de ces éléments figurés dans les deux unités de la séquence sédimentaire déjà définie donne des courbes qui sont analogues à celles de la CSS2.

Dans les niveaux détritiques à sidérite, la diversité du contenu organique est représentée par la présence des débris opaques fins (  $20$  à  $30\mu$  ), dont la teneur peut aller jusqu'à 50% (Fig IV.21); la présence de cette matière organique amorphe grumeleuse caractérise toujours les niveaux à sidérite avec des proportions allant de 20 à 30 % du matériel organique; on assiste parfois dans ces niveaux à l'apparition des débris translucides à granulométrie plus grossière que celle des autres constituants avec des proportions allant de 7 à 10% du contenu organique (Fig IV.21).

Comme dans la CSS2, le niveau organique sommital est caractérisé par la dominance des débris translucides ( 30 à 40% ) (Fig IV.21 ), avec une granulométrie grossière et des structures cellulaires parfois bien

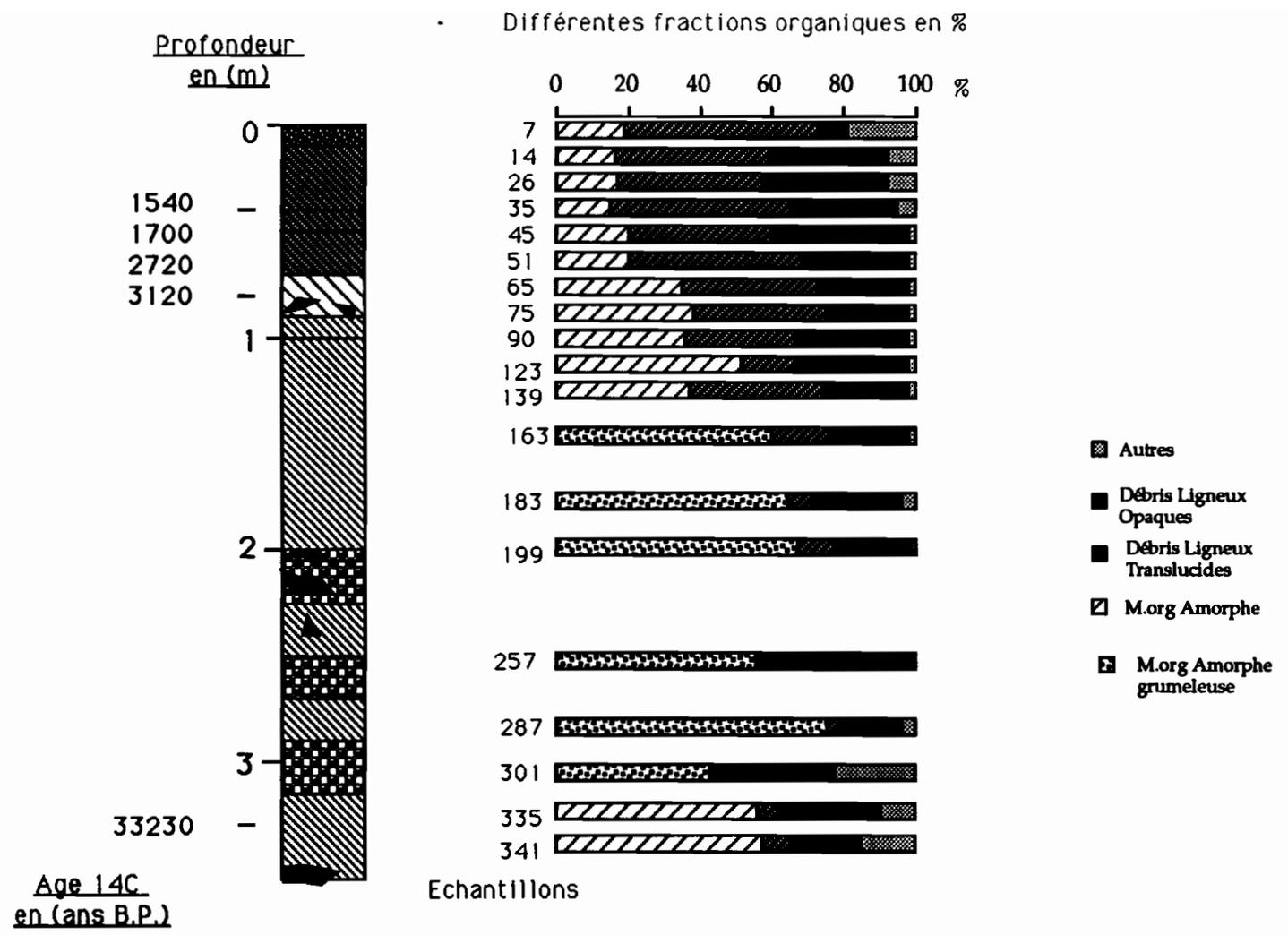


Fig IV.21: PALYNOFACIES DE LA CAROTTE CSS10, LAC N°12 (CARAJAS, PARA, BRESIL)

conservées ( 50 à 100 $\mu$  ); la matière organique amorphe présente des proportions moyennes de 10 à 15% du stock organique. Comme le niveau organique supérieur de la CSS2 on note la réapparition des débris opaques fins à parois amincies et parfois cassantes, avec des proportions non négligeables constituant jusqu'à 20% du contenu organique.

### E)DISCUSSION

En général, le niveau détritique à sidérite est caractérisé par une association de matériel organique figuré se composant de:

- débris opaques à parois amincies présentant une granulométrie très fine (20 à 30  $\mu$  ) avec des teneurs importantes ( 40 à 50 % ).

- d'amas globuleux, parfois isolés à structure grumeleuse formée par des éléments circulaires qui correspondent vraisemblablement à des colonies de bactérie impliquées dans le cycle du fer (Kaiser P. communication orale).

Par contre, les niveaux organiques présentent une diversité du matériel organique formé essentiellement par des débris végétaux translucides à granulométrie grossière ( 50 à 100  $\mu$  ) avec des structures cellulaires bien conservées et d'une matière organique amorphe dûe aux transformations qui ont pu affecter le contenu organique.

"L'amorphisation" de certains débris traduit le degré de transformation dans ces niveaux qui atteint parfois 10 à 20% de la matière organique figurée. Il est important de noter que l'amorphisation augmente avec la profondeur dans les deux sondages étudiés.

### F)L'ANALYSE D'IMAGES

Le caractère pris en compte dans cette étude est la superficie du débris ligneux observé dans la préparation du palynofaciès .

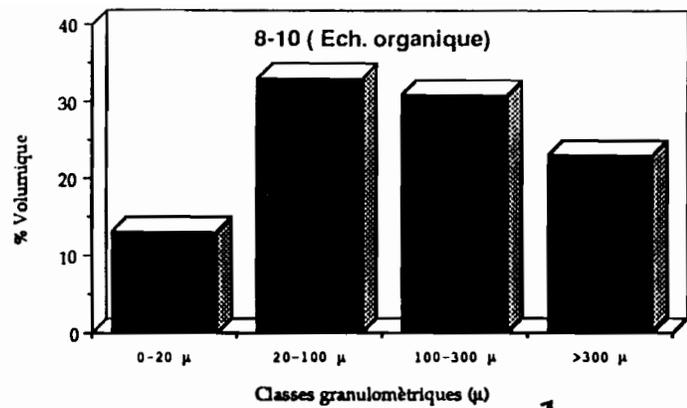
Les résultats de cette analyse sont regroupés sous forme d'histogrammes dans la figure (IV.22). Ils montrent la répartition de la variation des superficies des grains en fonction des niveaux de chaque séquence sédimentaire. Seule la carotte CSS2 a fait l'objet de cette étude.

#### F.1) LES NIVEAUX DETRITIQUES A SIDERITE

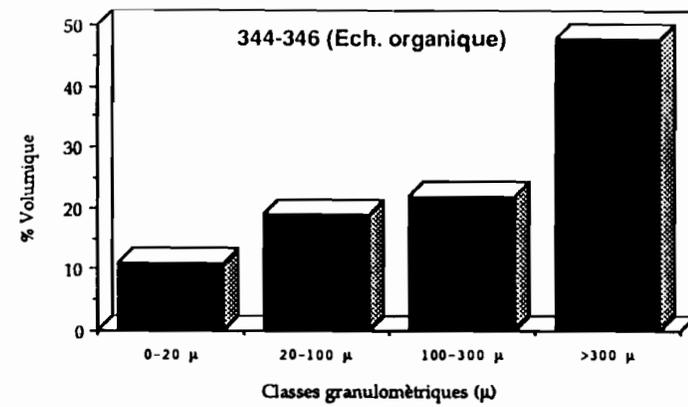
La distribution de la superficie des grains dans ces niveaux met en évidence deux populations présentant deux granulométries différentes:

- une, de granulométrie fine (10 à 20 $\mu$ ) ( histogrammes 3 et 5 , Fig IV.22 ), attribuée sans aucun doute aux débris opaques, caractéristique du niveau à sidérite.

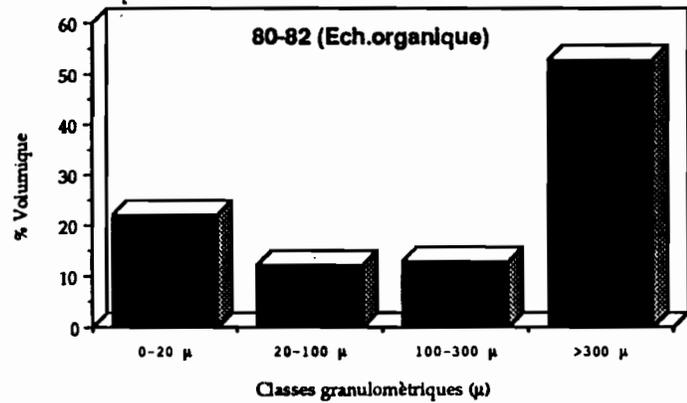
- l'autre (20-300 )(histogrammes 3 et 5 ,Fig IV.22 ) correspond à la matière organique amorphe constituée vraisemblablement par des spores de bactéries que l'on pense impliquées dans le cycle du fer, qui accompagne les débris opaques caractérisant aussi le contenu organique des niveaux à sidérite.



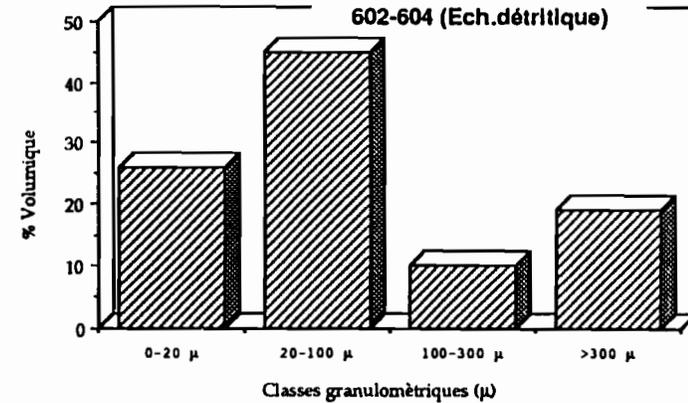
1



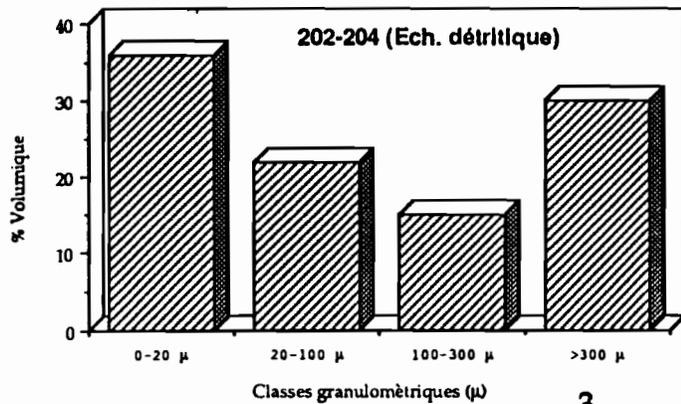
4



2



5



3

Fig IV.22: Repartition en classes granulométriques des pourcentages volumiques des débris végétaux de la carotte CSS2.

## **E.2) LES NIVEAUX ORGANIQUES**

La distribution de la superficie dans ces niveaux est homogène et met en évidence l'existence d'une seule population de granulométrie grossière (60 à 300 $\mu$ )(histogrammes 1, 2, et 4 , Fig IV.22 ) correspondant aux débris translucides, ainsi qu'à la matière organique amorphe accompagnant ces débris. Cette répartition change dans le niveau organique sommital et précisément entre 80 et 40 cm de profondeur puisque à ce niveau apparaît une population de débris de granulométrie fine (10 à 20 $\mu$ )(histogramme 2, Fig IV.22 ), attribuée vraisemblablement aux débris opaques. La répartition redevient homogène au niveau de la surface puisque on y distingue seulement une fraction de grande granulométrie (histogramme 1, Fig IV.22 ).

## **G) DISCUSSION**

Avec cette approche, nous avons pu caractériser chaque niveau des séquences sédimentaires par la diversité des surfaces des grains organiques contenus dans les palynofaciès. Les niveaux détritiques sont caractérisés par la présence de deux types de grains, de granulométrie très fine et grossière, correspondant respectivement aux débris opaques et aux amas de matière organique amorphe. Dans les niveaux organiques où la répartition de la granulométrie est la même d'un échantillon à l'autre il existe une seule population de débris de grosse granulométrie (60 à 300 $\mu$ ), attribuée aux débris ligneux translucides. Dans les deux niveaux organiques sommitaux apparaît une nouvelle population de débris opaques hétérogènes de faible granulométrie (10 à 20 $\mu$ ).

## CHAPITRE V

### DISCUSSION DES RESULTATS

## **D) INTERPRETATIONS DES RESULTATS**

L'étude sédimentologique, organique et géochimique des deux carottes CSS2 et CSS10 ainsi que de quelques échantillons actuels permet d'avancer certaines hypothèses sur l'origine des matériaux, d'orienter l'interprétation dynamique de leur mise en place, et de comprendre les transformations qui ont pu affecter les différentes fractions minérales et organiques.

### **A) ANALYSE STATISTIQUE DE LA CAROTTE CSS2**

Pour étudier la corrélation entre les différents paramètres mesurés ainsi que pour comparer les divers échantillons, nous avons utilisé l'analyse statistique en composantes principales. Celle-ci permet de représenter dans un espace les paramètres dont la proximité traduit la corrélation point à point. Dans ce même espace factoriel peuvent être également représentés les échantillons dont la proximité exprime alors leurs ressemblances. Nous montrons que les résultats de cette analyse en fonction de ses deux premiers facteurs représentent 82% de la variance totale des données.

L'analyse statistique en composantes principales des flux sédimentaires (quartz, kaolinite), organiques (carbone organique total) et géochimiques de la carotte CSS2 (Fig V.1) permet de définir trois types de faciès dont l'un est détritique et les deux autres organiques. Ces faciès se succèdent à quatre reprises dans la carotte. Ils définissent quatre séquences sédimentaires débutant par un niveau détritique à sidérite surmonté par un niveau organique. Elle permet de définir grâce à ces données un facteur de détritité qui est l'axe 1 (représentant 68% de la variance) (Fig V.2)

### **A.1) LES NIVEAUX ORGANIQUES**

Dans les niveaux organiques de cette carotte, le carbone organique total et l'azote présentent des valeurs de flux importantes. Cette richesse en carbone organique est expliquée par la présence d'une matière organique figurée représentée principalement par des débris organiques ligneux translucides à structures cellulaires bien conservées (Caratini, et al 1983) (Combaz, 1980) par la bonne conservation du matériel planctonique composée de colonies de *Botryococcus* non altérées.

Le rapport C/N dans ces niveaux témoigne de cette bonne conservation du matériel organique. L'opposition que nous observons entre les flux de carbone, d'azote et les flux des minéraux détritiques (Fig V.1) permet d'affirmer que le taux d'érosion du bassin versant étaient presque nuls pendant la mise en place de ces dépôts organiques.

L'augmentation des flux des minéraux détritiques dans le dépôt organique de la séquence sédimentaire III et l'apparition des débris opaques témoignent d'un changement des conditions de dépôt à la faveur d'une dégradation de la végétation sur le plateau favorisant le transport des minéraux détritiques. Le début d'oxydation du matériel organique est

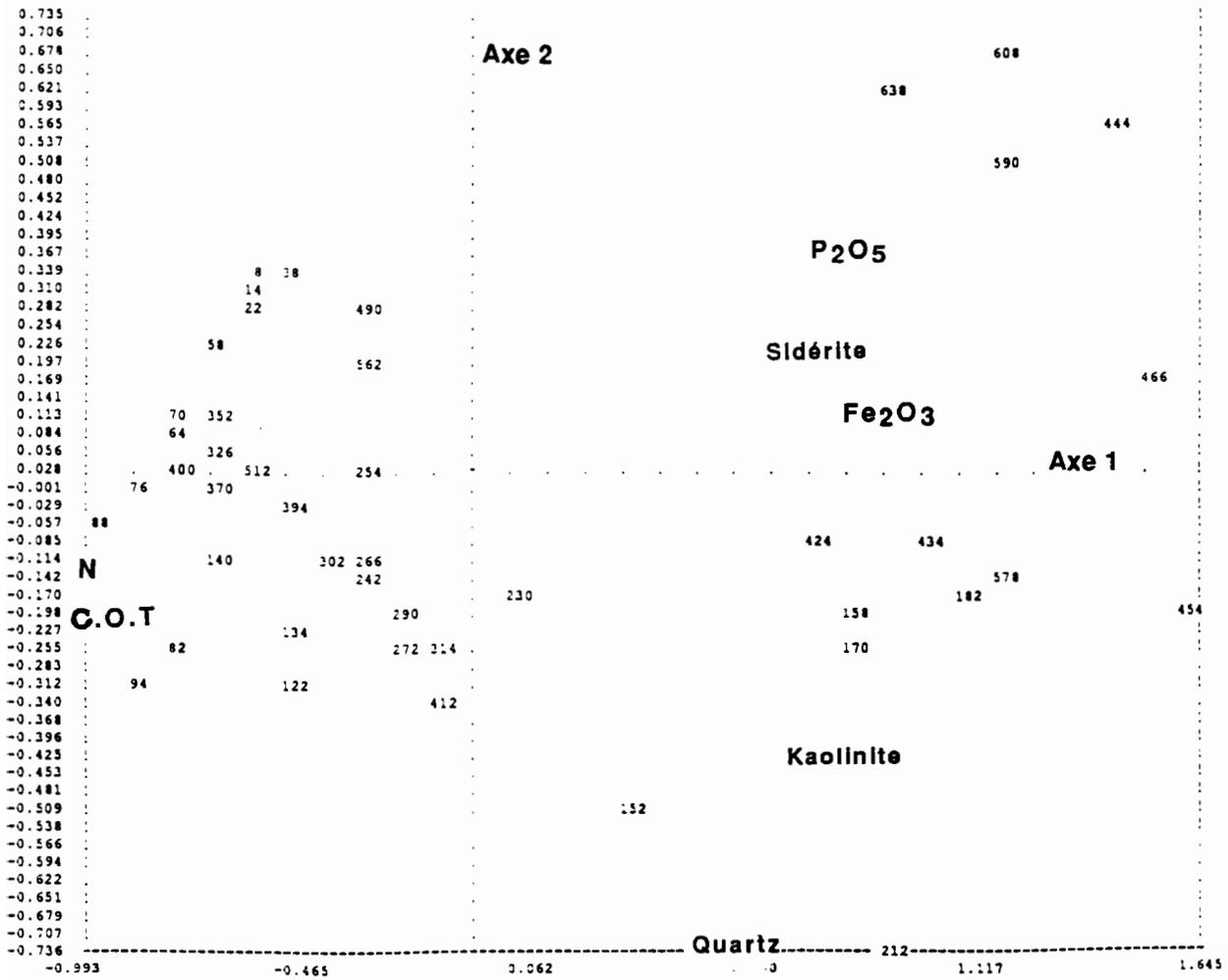


Fig V.1: Projection des échantillons sur le plan des deux facteurs de l'analyse des composantes principales.

Axe vertical: Facteur 2 de l'analyse (14% de la variance)  
 Axe horizontal: Facteur 1 de l'analyse (68% de la variance)

N: Azote  
 C.O.T: C.organique total

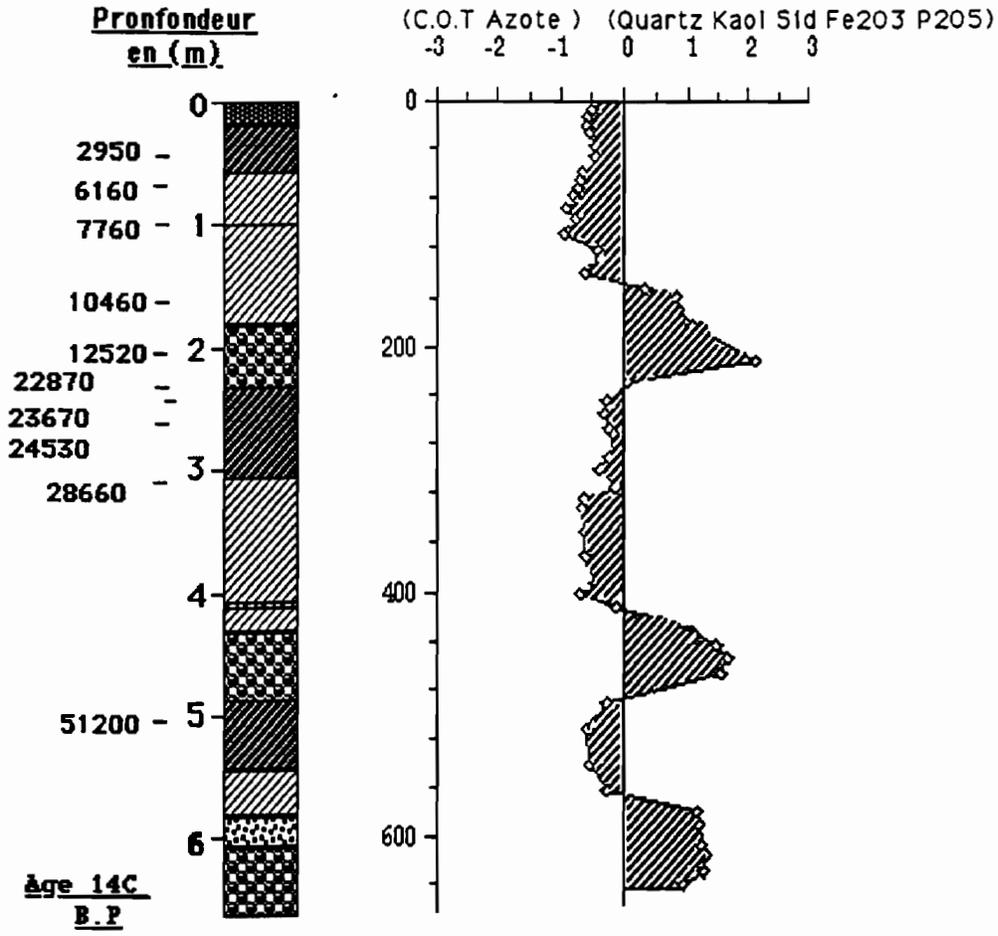


Fig V.2: Répartition du facteur 1 en fonction de la profondeur. Carotte CSS2.

marqué par la diminution du rapport C/N dans ce niveau. La présence de bois, abondant dans la partie supérieure de ce dépôt organique, suggère l'implantation d'une végétation arborée rendue possible par l'assèchement

de la dépression. La répartition des ages radiocarbone en fonction de la profondeur et la base érosive de la partie supérieure à ce niveau mettent en évidence un hiatus qui correspond à un arrêt de sédimentation pendant le maximum de la phase sèche.

#### **A.2) LES NIVEAUX DETRITIQUES A SIDERITE:**

Comme la carotte CSS2 a été prélevée au centre du lac n°8, la grande quantité de quartz et de kaolinite traduit un important taux d'érosion du bassin versant qui a libéré des fragments de particules véhiculés jusqu'au centre de la dépression. Cette remise en eau est attestée:

- par l'augmentation des flux du quartz et de la kaolinite
- par l'augmentation à ces mêmes niveaux des flux de fer et du phosphore dont l'origine détritique est attestée par la corrélation entre les courbes de ces flux et celles des flux du quartz et de la kaolinite (Fig V.1). Il est à noter l'importance sporadique de la sidérite néoformée traduisant peut-être un phénomène biologique ou physico-chimique dans ces niveaux.

- par le type de matière organique, qui accompagne la matière minérale, composée principalement par des débris opaques correspondant à une matière organique ligneuse oxydée (Combaz, 1980, Caratini, 1983) présentant des grands pouvoirs réflecteurs en lumière réfléchie. Cette oxydation affecte aussi le matériel planctonique représenté dans la majorité des cas par des *Botryococcus* qui s'organisent dans ces niveaux en petites colonies.

Cette oxydation du matériel organique qui se traduit par une chute du flux du carbone organique total et de l'azote et par un rapport C/N très bas, est dûe à une oxygénation du milieu lors de l'arrivée de l'eau dans la dépression. Pour les deux niveaux inférieurs, les colonies de *Botryococcus* inexistantes témoignent d'une oxydation poussée sous une tranche d'eau fluctuante.

#### **A.3) LE NIVEAU ORGANIQUE SOMMITAL**

Dans le niveau organique sommital on note la présence de spicules d'éponges entre 8 et 100 cm, qui culminent vers 80 cm. Les teneurs en silice amorphe (18% du sédiment brut) à 80 cm peuvent sans ambiguïté être rapportées aux spicules d'éponges observées au microscope. Il s'agit d'une seule espèce d'éponge (*Corvomeyenia Thum*) développées lors des remises en eau de la dépression (Volker Ribeiro C., communication orale). Ce niveau renferme des fragments de charbon de bois à pouvoirs réflecteurs élevés et de granulométrie fine. Cela laisse penser que ces débris charbonneux ont été produits par des incendies de forêts (Scott, 1989) et incorporés dans ce niveau par un transport éolien. Le pic du flux du carbone organique à ce niveau souligne un apport en charbons.

## **B) CAROTTE CSS10**

Suite au manque de datations dans la carotte CSS10, nous n'avons pas pu calculer les flux des différents composants minéraux et organiques le long de la carotte et nous nous sommes contentés de travailler avec les taux d'accumulation en (g/cm<sup>3</sup>). Les courbes de la distribution des taux d'accumulation du quartz, de la kaolinite, de la sidérite, du fer, du phosphore, du carbone organique total et de l'azote le long de la carotte CSS10 mettent en évidence trois unités lithologiques superposées constituant une séquence sédimentaire.

### **B.1) LES NIVEAUX DETRITIQUES A SIDERITE**

Dans ces niveaux, les taux d'accumulation du quartz et de la kaolinite sont très importants et traduisent une érosion intense du bassin versant peu protégé par une couverture végétale ce qui favorise le transport des minéraux détritiques et des microgranules riches en fer.

L'oxygénation du milieu par l'abaissement de la tranche d'eau dans le lac favorise l'oxydation du matériel organique. La fraction organique oxydée de ces niveaux est composée principalement par des débris opaques à granulométrie fine qui peuvent aussi provenir du plateau par oxydation des végétaux.

Elle se traduit aussi par une diminution des taux d'accumulation du carbone organique et de l'azote et un rapport de C/N très bas. Cette oxydation affecte aussi le matériel planctonique composé principalement de colonies de *Botryococcus* mal développées et altérées par suite de l'abaissement du niveau d'eau.

### **B.2) LE NIVEAU ORGANIQUE SOMMITAL**

Dans ce niveau, les grandes valeurs des taux d'accumulation du carbone organique et de l'azote sont liées à l'apport des débris translucides et la bonne conservation du matériel organique. Les moyennes valeurs du rapport C/N sont expliquées par la forte productivité de l'azote par les micro-organismes représentés par des colonies de *Botryococcus* bien définies et peu évoluées et par une forte activité algaire.

Vers 80 cm de profondeur, le taux d'accumulation du quartz, de la kaolinite et du fer augmente suite à la dégradation de la végétation sur le plateau induisant l'érosion du bassin versant. L'abondance du fer ainsi que l'oxydation de la matière organique sous une faible tranche d'eau contribuent à la formation de poupées de sidérite dans les pores où régner des conditions réductrices favorables. Vers 75 cm de profondeur, on note la présence d'un pic de silice amorphe qui est attribué sans aucun doute aux spicules d'éponges observées au microscope.

Comme pour la CSS2, la présence de spicules dans ce niveau peut probablement correspondre à des conditions du milieu caractérisées par une succession d'assèchements et de remises en eau de la dépression. Entre 75 et 45 cm de profondeur on note l'augmentation du taux d'accumulation du carbone organique qui s'explique par la présence à ces profondeurs de charbon de bois présentant de grands pouvoirs réflecteurs. Les grandes

valeurs du pouvoir réflecteur et la petite taille des charbons suggèrent que ceux-ci sont produits par des incendies et sédimentés par transport éolien.

Il est à rappeler que les différences des quantités de quartz et de kaolinite entre les deux carottes CSS2 et CSS10 sont dûes principalement à des différences géomorphologiques des bassins versants et des lacs où ont été prélevées ces carottes. Mais malgré tout les mêmes phénomènes paléohydrologiques qui ont pu affecter la région, sont enregistrés dans les dépôts de chaque lac même si leurs ampleurs sont différentes. Pour effectuer des corrélations entre les deux carottes il est nécessaire de travailler avec la même donnée. Ce qui rend difficile, par manque de datations, la comparaison des résultats des deux carottes.

## **II) LA SIDERITE**

### **A) INTRODUCTION**

Pendant longtemps, il était admis que la sidérite d'origine sédimentaire se formait essentiellement dans les fonds marins où règnent des conditions réductrices favorables à la formation des carbonates de fer. Mais, actuellement les prospections en milieu terrestre prouvent que la sidérite se forme souvent en milieu continental: lacustre ( CARAJAS Brésil SOUBIES et al 1989, BAROMBI MBO Cameroun GIRESE 1987), fluviale (JAVA Indonésie SIEFERMANN 1988), deltaïque ( île de Marajo, Brésil. TANCREDI et al, 1976).

En raison de la particularité du site on peut penser que la formation de la sidérite a une relation avec la matière organique et les changements d'environnement.

Dans le but de vérifier l'hypothèse climatique de la formation de la sidérite nous avons diversifié nos études sur les carbonates de fer afin de mieux comprendre les mécanismes de leur formation.

### **B) CARACTERISTIQUES DE LA SIDERITE**

La sidérite est un carbonate de fer (  $\text{FeCO}_3$ ) contenant ( FeO 62,01%,  $\text{CO}_2$  37,99%) qui cristallise dans le système rhomboédrique, de couleur jaune, grise ou brun foncé, opaques en frottis, présentant des clivages (1011). Les cassures sont conchoïdales et parfois inégales. Les gisements de la sidérite sont variés: hydrothermaux, métamorphiques, et sédimentaires.

### **C) FORMATION DE LA SIDERITE**

Pour former de la sidérite, il faut produire du  $\text{CO}_2$ , avoir une source de  $\text{Fe}^{2+}$  et un milieu "neutre" (BERNER 1971) favorable à la précipitation des carbonates de fer

#### **C.1) PRODUCTION DE $\text{CO}_2$**

Les sédiments nouvellement formés montrent une zonation verticale . Sous l'eau, l'oxygène contenu dans les sédiments riches en matière

organique est rapidement éliminé par les organismes vivants en aérobiose (activité respiratoire).

La zone d'activité respiratoire est définie par le seuil de pénétration de l'oxygène dans le sédiment. L'extension verticale de cette zone est contrôlée par la diffusion des eaux interstitielles et par l'activité des organismes fouisseurs. Lorsque tout l'oxygène est consommé dans les sédiments, la matière organique est alors dégradée par les bactéries méthanogènes.

Une particule organique qui arrive dans le lac qui migrerait de la surface vers le fond rencontrerait successivement la zone d'activité de respiration puis la zone de méthanogénèse. Ainsi la production de CO<sub>2</sub> dans les milieux continentaux peut se faire par deux voies (CURTIS 1987) :

1-voie d'oxygénation dans la zone de respiration permettant l'oxydation de la matière organique par oxygénation et libération de CO<sub>2</sub> dans le milieu.

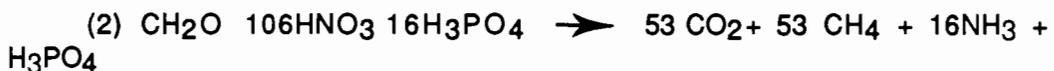
2- voie de fermentation par décarboxylation permettant la réduction de la matière organique et libération du CO<sub>2</sub> dans le milieu

Dans les deux cas la production de CO<sub>2</sub> est accompagnée par la libération dans le milieu de:

HNO<sub>3</sub> qui peut être réduit à l'état de N<sub>2</sub> avec production d'énergie.

H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> qui peut être piégé par la matière minérale.

Il est important de noter que l'oxydation de la matière organique dans la zone de respiration produit plus de CO<sub>2</sub> que dans la zone de fermentation (CURTIS 1987).



### C.2) FER FERREUX

Sur le plateau de Carajas la majorité du fer est sous forme oxydée Fe<sup>3+</sup> et pour que la sidérite précipite, la présence du fer sous forme réduite est obligatoire. Cette transformation du fer ferrique en fer ferreux peut être physico-chimique ou biologique. Dans le dernier cas, des bactéries permettent la réduction Fe<sup>3+</sup> en Fe<sup>2+</sup> selon MUNCH et OTTOW (1983).

### D) FORMATION DE LA SIDERITE DANS LES DEPOTS DETRITIQUES

Les données sédimentologiques, organiques, et géochimiques nous ont permis d'avancer quelques hypothèses quant à la formation des carbonates de fer et orientent l'interprétation de la dynamique de la diagénèse ainsi que des phases intermédiaires qui aboutissent à la formation de la sidérite.

La remise en eau des lacs du plateau de Carajas postérieure aux grands épisodes de sécheresse provoque une oxygénation du milieu et une décomposition de la matière organique sous une faible tranche d'eau. Cette oxydation de la matière organique dans la zone de respiration est attestée par:

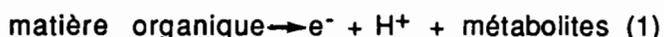
-les faibles valeurs des flux du carbone organique et le rapport C/N bas.

-le type des éléments figurés représentés; dans la majorité des cas, il s'agit de débris très fins opaques en lumière transmise. L'opacité de ces débris traduit ici une composition lignocellulosique à structure relativement condensée par oxygénation.

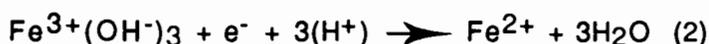
L'activité organique et la minéralisation de la matière organique dans ces dépôts font augmenter la concentration du CO<sub>2</sub> dans le milieu ainsi que celle des ions bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). L'enrichissement en CO<sub>2</sub> et en bicarbonates est accompagné par un abaissement du pH provoqué par la libération dans le milieu de protons (H<sup>+</sup>) (MOTOMURA 1962) (MUNCH, et OTTOW 1983) (CURTIS 1987). Cette acidification inhibe la formation de la sidérite (BERNER 1971). Lors de la remise en eau, on assiste à une érosion du bassin versant des lacs du plateau de Carajas favorisant le transport des minéraux détritiques, quartz et kaolinite et de microgranules ferrifères de taille moyenne à grossière qui jouent un rôle important dans la formation de la sidérite puisque le fer ferrique présent dans les goethites et hématites neutralise le pH du milieu en acceptant les protons.(MUNCH. et OTTOW 1983).

Cette réduction du fer ferrique en ferreux est catalysée selon (MUNCH et OTTOW 1983) par action bactérienne permettant la formation du fer ferreux par transfert des protons libres.

La réduction des oxydes de fer est une réaction enzymatique des bactéries qui nécessite un contact direct "oxydes-bactéries" en vue du transfert de l'hydrogène métabolique originaire de la matière organique donatrice, sur les oxydes ferriques accepteurs (MUNCH et OTTOW 1983).



Les électrons et protons ainsi libérés peuvent réagir avec les hydroxydes de fer<sup>3+</sup> selon:



Le choix de réduction des oxydes ferriques amorphes par rapport aux cristallisés (MUNCH et OTTOW 1983), s'accompagne de la nécessité d'avoir une granulométrie fine de ces oxydes; c'est pourquoi dans les dépôts de sidérite de Carajas on note un certain déphasage entre le transport du fer et la formation de la sidérite ceci est attestée par la bonne corrélation entre la kaolinite et la sidérite (Fig V.1). Une fois que le fer ferreux est formé par réduction du fer ferrique le milieu devient plus basique et permet l'association du fer et du HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et précipitation de la sidérite par

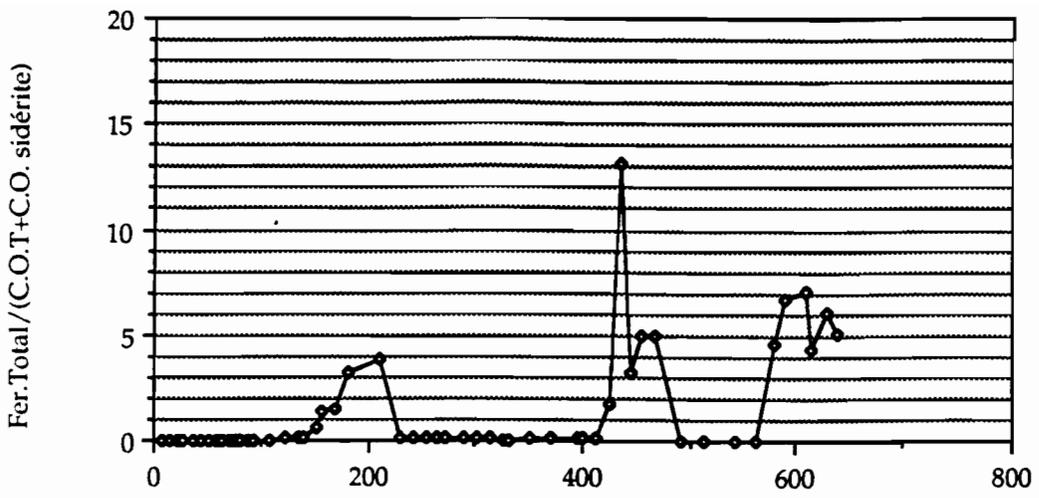


Fig V.3: Variation du rapport Fer Total./(C.O.T+C.Sidérite) le long de la carotte CSS2.

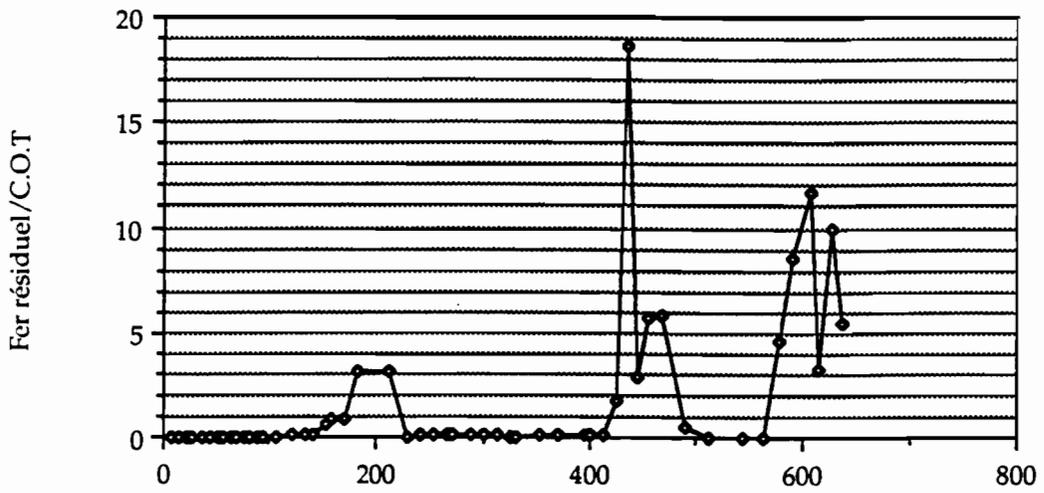


Fig V.4: Variation du rapport Fer résiduel./C.O.T le long de la carotte CSS2.

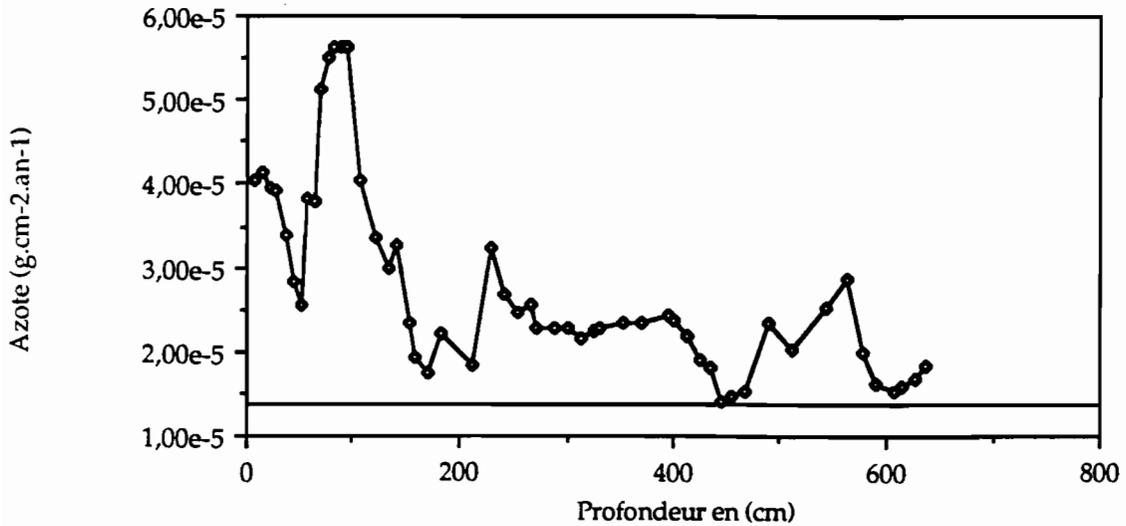


Fig V.5: Variation du flux de l'Azote le long de la carotte CSS2.

saturation du CO<sub>2</sub> sous la zone d'activité respiratoire entre le sédiment et la tranche d'eau (BERNER 1971).

Dans les niveaux à sidérite, on constate que le rapport entre le fer total et le carbone organique plus celui de la sidérite est toujours supérieur à 1 (Fig V.3). On peut donc supposer que la sidérite ne peut se former dans les dépôts de Carajas que si ce rapport (Fer Total/ C.O.T+C.Sidérite) dépasse une limite qui est la valeur 1.

Mais lorsque l'on regarde le rapport du fer résiduel (non sidéritique) sur le carbone organique total on constate toujours un excès de fer résiduel dans les niveaux à sidérite (Fig V.4). On en déduit qu'il y a d'autres facteurs limitant qui régissent la formation de la sidérite.

Les sels nutritifs et notamment l'azote et le phosphore pourraient être des facteurs limitants de l'activité bactérienne. D'après la courbe des flux de l'azote en fonction de la profondeur (Fig V.5), il semblerait que celui-ci soit bien un facteur limitant de la formation de la sidérite. Mais d'autres facteurs doivent aussi être pris en considération comme la taille et la cristallinité du fer.

L'hydrolyse des produits carbonés présentant des liaisons secondaires avec le phosphore CH<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> provoque une cassure des liens entre les deux éléments CH<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et libère du phosphore dans le milieu (CURTIS 1987). Ce phosphore présent sous forme libre est piégé par la matière minérale en cours de formation c'est à dire par la sidérite (Phosphosidérite ?). Ceci est suggéré par les résultats obtenus lors du fractionnement du phosphore qui prouvent qu'une forte proportion de ce composant est liée à la matière minérale.

En raison des faibles quantités de ce minéral "Phosphosidérite" sa détection par les méthodes minéralogiques est difficile. Les valeurs des flux du phosphore dans les niveaux à sidérite ne sont pas dûs uniquement à l'origine organique de cet élément. En effet une partie du phosphore se trouve complexée avec les minéraux ferrifères (CAMPOS, 1980) des microgranules qui proviennent de la dégradation du plateau par les pluies érosives qui les transportent jusqu'au centre des lacs.

En conclusion, nous pensons que:

-la formation de la sidérite est contrôlée principalement par l'afflux du fer ferrique dans le milieu.

-la réduction du fer est une action enzymatique des bactéries

-l'azote est un facteur dont le déficit défavorise la précipitation de la sidérite.

-la taille et la cristallinité du fer sont des facteurs qui contrôlent la formation de la sidérite.

CHAPITRE VI

INTERPRETATIONS  
PALEOCLIMATIQUES ET  
COMPARAISON AVEC  
D'AUTRES REGIONS  
D'AMERIQUE DU SUD

## **D) INTERPRETATIONS PALEOCLIMATIQUES REGIONALES**

Par manque de datations  $^{14}\text{C}$  dans la carotte CSS10, l'interprétation paléoclimatique sera basée sur les seuls résultats de la carotte CSS2.

Les onze datations obtenues au  $^{14}\text{C}$  nous ont permis de tracer des diagrammes des pourcentages de pollens, des flux du quartz, et du carbone organique en fonction du temps ( $^{14}\text{C}$ ). (Fig VI.1).

Les âges de chaque échantillon ont été extrapolés à partir des onze datations ( $^{14}\text{C}$ ).

### **L.1) PHASES SECHES ET TRANSITION PHASES SECHES PHASES HUMIDES DANS LE PLEISTOCENE SUPERIEUR.**

Les résultats sédimentologiques, et les datations  $^{14}\text{C}$  nous permettent de mettre en évidence des périodes de sécheresse dont le maximum s'est manifesté par un arrêt de sédimentation dans le lac. Les deux plus anciens sont antérieures à 60 000 ans et 40 000 ans B.P., le troisième, encadré par deux âges  $^{14}\text{C}$  se situe entre 22 000 ans B.P. et 13 000 ans B.P. Ces arrêts de sédimentation sont liés à un assèchement de la dépression, mais on peut se demander si une éventuelle érosion lors de l'assèchement, n'aurait pas contribué à renforcer la lacune. (Fig VI.1):

Dans le cas d'une érosion éolienne, la déflation favoriserait la concentration des éléments grossiers par élimination des plus fins. Or on ne rencontre aucune trace de ce processus. La morphologie du lac n°8 où a été prélevée la carotte CSS2 et notamment la situation actuelle de l'exutoire sont défavorables à une érosion hydrique. Donc l'absence de dépôt pendant ces épisodes correspond à des lacunes de sédimentation et non à des lacunes d'érosion (Fig VI.1).

Il est important de noter que l'époque sèche datée entre 22 000 ans et 13 000 ans B.P., s'est amorcée vers 28 000 ans B.P. puisque à partir de cette date on note une augmentation des flux détritiques. La présence de fragments de bois au sommet des dépôts organiques de chaque séquence sédimentaire, juste avant les hiatus, témoigne de l'implantation d'une végétation arborée dans le fond asséché du lac.

Les âges  $^{14}\text{C}$  et les flux du quartz, et du carbone organique, nous permettent de mettre en évidence quatre épisodes paléohydrologiques datés respectivement d'environ 60 000 et 40 000 ans, et entre 13 000 et 11.000 ans B.P. et entre 7000 et 4000 ans B.P. Le dernier présente des particularités paléohydrologiques qui le distinguent des trois autres (Fig VI.1).

Les trois épisodes les plus anciens sont caractérisés par l'augmentation des flux de quartz, de kaolinite, et du fer, traduisant une forte érosion du plateau cuirassé de Carajas. Cela peut s'expliquer par des précipitations orageuses, et un intense ruissellement sur un bassin versant probablement encore pauvre en végétation et mal protégé. Le ruissellement

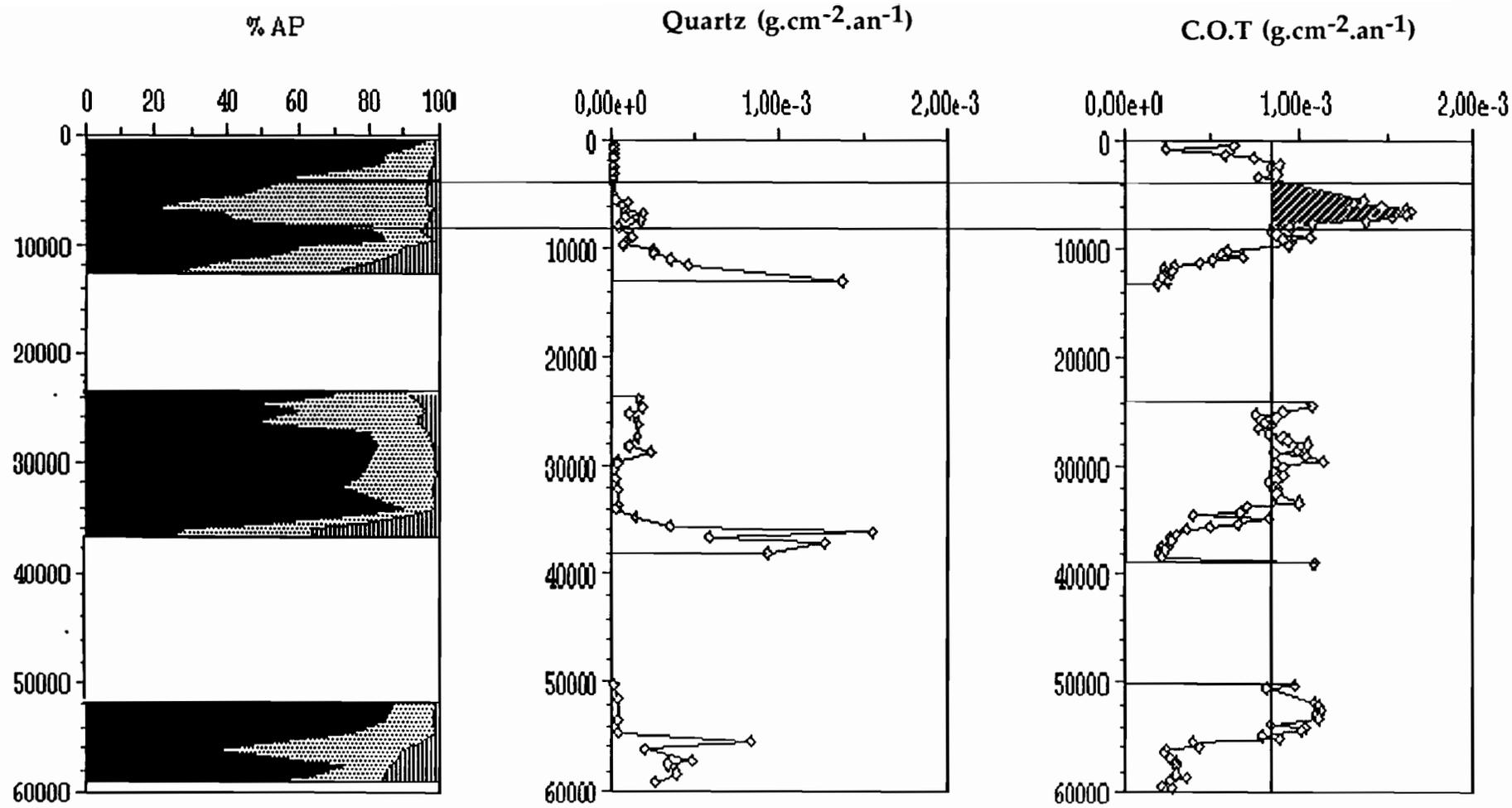


Fig VI.1: Comparaison entre les flux du quartz, et du carbone organique avec les pourcentages de pollens d'arbres le long de la carotte CSS2.

a permis la remise en eau de la dépression mais la tranche d'eau est restée faible ainsi que l'atteste la présence d'une végétation limitée aux bordures des lacs (Isoètes).

Les remises en eau périodiques du lac pendant les phases d'apport par ruissellement, induisent une oxydation de la matière organique qui est attestée par les faibles valeurs du rapport C/N et par la qualité de la matière organique sédimentée. Ceci favorise la production du CO<sub>2</sub> et l'acidification du milieu de sédimentation. L'afflux en grandes quantités de fer ferrique pendant les phases érosives du plateau est essentiel à la néoformation de la sidérite; la transformation du fer ferrique en fer ferreux a lieu par action bactérienne, ce qui entraîne une augmentation du pH et permet la précipitation des carbonates. La diminution des apports détritiques et l'absence de sidérite pendant les périodes situées entre les épisodes érosifs s'expliquent par une chute de l'intensité de l'érosion sur le plateau cuirassé de Carajas.

### **I.2) PHASES SECHES HOLOCENES**

Les faibles flux détritiques, enregistrés dans les dépôts organiques mis en place entre 7000 ans B.P et 4000 ans B.P., suggèrent une faible intensité d'érosion. L'apparition d'une seule espèce d'éponge (*Corvomeyenia Thumi*) (Volkmer Ribeiro, communication orale) montre que pendant cette période le lac était bas mais sans toutefois être sec en permanence, sinon les éponges n'auraient pu se développer. Ceci semble indiquer l'existence d'une succession d'assèchements et de remises en eau du lac en relation avec des événements climatiques. Cette hypothèse est renforcée par l'important flux du carbone organique, dû à la présence de micros charbons. Ceux ci impliquent de fréquents incendies et donc probablement des conditions climatiques sèches.

### **I.3) RESULTATS PALYNOLOGIQUES**

Les études palynologiques effectuées sur la carotte CSS2 ont montré qu'au cours des 60 000 dernières années, il s'est produit quatre périodes d'ouvertures de la forêt, toutes marquées par une importante diminution des pollens arborés (Fig VI.1). Les études palynologiques ne donnent pas d'informations pour les périodes les plus sèches marquées par un assèchement du lac et donc l'absence de dépôts. Pour les périodes pleistocènes de remise en eau, par exemple entre 13000 et 10000 ans B.P. environ, elles impliquent que la végétation arborée est encore faiblement représentée mais qu'elle tend à se développer de manière progressive (augmentation modérée des pollens d'arbres).

A l'Holocène et pendant le développement maximum de la végétation arborée, les particularités de la phase sèche 7000 -4000 ans B.P. déjà soulignées par la sédimentologie sont confirmées par la palynologie. En effet, elle est marquée par une quasi absence des taxons de savane (*Borreria*, *Cuphea*, *Compositae*), alors que ces taxons étaient bien développés au Pleistocène, à la transition entre la phase sèche et la phase humide.

$$y = 7,6132 + 9,4243x \quad R = 0,84$$

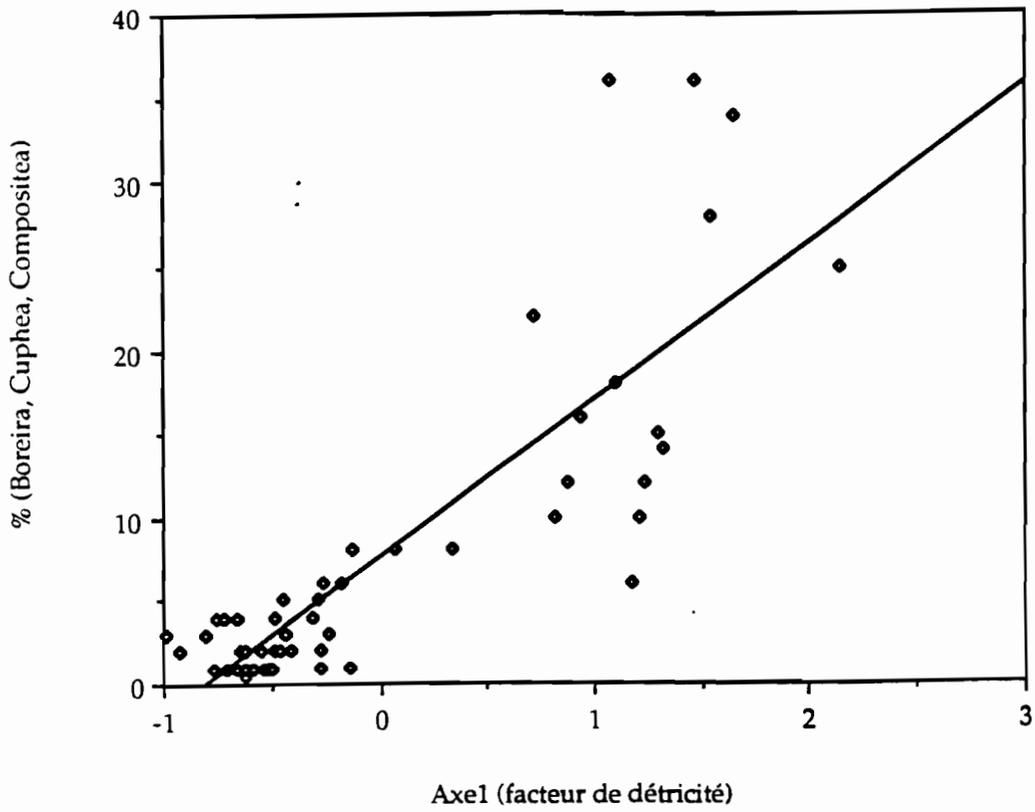


Fig VI.2: Comparaison entre le facteur 1 de la détricité et les pourcentages des taxons de savane ( Borreria, Cuphea, Compositae ).

#### I.4) COMPARAISON AVEC LES RESULTATS PALYNOLOGIQUES.

L'analyse statistique en composantes principales a mis en évidence une bonne corrélation ( $R=0,84$ ) entre la détritité et les pourcentages des taxons de savane (Fig VI.2). On peut envisager deux hypothèses:

-soit ces taxons proviendraient du plateau et d'une savane qui aurait remplacé la forêt dans les zones basses autour du plateau;

-soit ces taxons proviendraient uniquement du plateau.

Dans le premier cas, il faut imaginer l'existence de fortes ascendances atmosphériques capables de transporter ces pollens lourds des zones en contre bas jusqu'aux dépressions du plateau. Dans le deuxième cas, ces forts pourcentages s'expliquent par un transport par ruissellement. Dans cette hypothèse, si on admet que ces pourcentages sont approximativement proportionnels à la végétation qui les a fourni, on peut conclure que les variations que l'on note le long de la carotte pourraient s'expliquer par des modifications du couvert végétal; dans le cas contraire, ces variations s'expliqueraient par fluctuations d'apports en pollens en fonction de plus au moins grandes concentrations des pluies et du ruissellement, sans que cela implique forcément des modifications de l'état de végétation sur le plateau.. Cependant seule une étude botanique très détaillée de la végétation du plateau et la dispersion des pollens permettront de préciser ces hypothèses.

La période d'ouverture de la forêt la plus récente datée entre 7000 ans B.P et 4000 ans B.P se différencie des autres par une quasi absence des taxons de savane. Cela pourrait s'expliquer dans le cadre de notre précédente hypothèse par un ruissellement trop faible sur le plateau. Parallèlement, les flux détritiques, très faibles pendant cette période, contrairement à ce qui s'est passé pendant les épisodes antérieurs, indiquent que le bassin versant n'a pas subi une forte érosion. Ce qui laisse penser que la sécheresse n'a pas été aussi importante que pendant les autres périodes érosives.

Les phases de réinstallation de la forêt débutent par une phase de végétation pionnière qui, par sa brièveté, est faiblement représentée dans les spectres polliniques. Or, contrairement aux autres périodes, la reprise de la forêt entre 6000 ans et 4000 ans B.P., est marquée par l'abondance anormale des pollens de *Piper* (pionnier)(Absy et al 1991). Il semble donc que la végétation typique de la forêt n'a pas remplacé la végétation pionnière durant 2000 ans B.P. On peut donc penser que la phase post-pionnière a été régulièrement interrompue.

En résumé la phase Holocène d'ouverture des paysages végétaux dans la région de Carajas est caractérisée par un ruissellement modéré sur le plateau, la présence d'une tranche d'eau peu profonde dans la dépression, des apports en micros charbons indicateurs de paléoincendies et un pourcentage élevé d'éléments d'une végétation pionnière (*Piper*) lorsque la forêt est plus en plus ouverte. Toutes ces caractéristiques peuvent s'interpréter par un climat assez sec pour favoriser l'ouverture de la forêt mais en même temps assez humide pour le maintien d'une végétation pionnière. L'hypothèse la plus probable est que le climat a été affecté d'une forte variabilité.

## II) RECHERCHE DE PERIODICITES DANS LA CAROTTE CSS2 DE CARAJAS.

Afin de détecter d'éventuelles périodes dans les données de la carotte CSS2 de Carajas nous avons effectué une analyse spectrale de la série chronologique des flux de Quartz s'étendant sur une période de temps allant de 60.000 ans B.P. à l'actuel.

La méthode d'analyse spectrale utilisée est ici celle du maximum d'entropie (Burg, 1972). Celle-ci a été choisie plutôt que celles basées sur les transformés de Fourier car elle convient mieux à l'analyse de notre série chronologique qui comporte des périodes où les flux sont nuls (60.000, 40.000, entre 22.000 et 13.000 ans B.P.).

Les résultats de l'analyse sont présentés par le spectre de la figure n°3. On repère principalement une périodicité de 22.7 K.ans. Cette périodicité pourrait être liée à la théorie astronomique des paléoclimats de Milankovitch.(voir par exemple Berger, 1988). Cette théorie démontre que les variations climatiques du Quaternaire sont liées aux variations de l'insolation au sommet de l'atmosphère dépendant des paramètres astronomiques de la position de la Terre influencée par les autres planètes du système solaire. Les fréquences astronomiques correspondantes sont de 100 K.ans (eccentricité), 41 K.ans (obliquité) ainsi que de 23 et 19 K.ans (précession des équinoxes). La fraction de l'insolation au sommet de l'atmosphère "expliquée" par l'eccentricité est faible par rapport à celles dues à l'obliquité et à la précession. Depuis 1976, l'analyse spectrale d'enregistrements climatiques des derniers 800 K.ans montre de façon évidente qu'une fraction substantielle de la variation climatique est liée aux changements d'insolation accompagnant les perturbations de l'orbite terrestre (voir par exemple Imbrie et Imbrie, 1981; Berger, 1987). La période de quasi 23 K.ans détectée dans le spectre des données de Carajas pourrait être liée à la précession des équinoxes. Deux pics de période de 10.4 K.ans et de 7.1 K.ans sont également détectés par l'analyse spectrale. Ces deux fréquences de variabilité climatique en dehors du forçage orbital direct peuvent être expliquées par la réponse non linéaire du système climatique aux variations de l'insolation disponible au sommet de l'atmosphère.

Le système climatique peut en effet être modélisé comme un oscillateur non-linéaire (Le Treut et Ghil, 1983; Ghil 1985). Plus précisément, ces deux auteurs ont développé un modèle climatique gouverné par trois équations non linéaires couplées entre-elles et décrivant:

1. L'évolution de la température globale du système océan-atmosphère en fonction des variations du bilan radiatif.
2. L'évolution des calottes glaciaires en fonction des variations du bilan des précipitations et de la déformation du socle sous-jacent.
3. La réponse visco-élastique de la croûte terrestre et de son manteau supérieur en fonction de la charge en glace.

Ces différentes variables sont susceptibles de décrire avec une bonne approximation le système climatique à l'échelle de temps qui nous

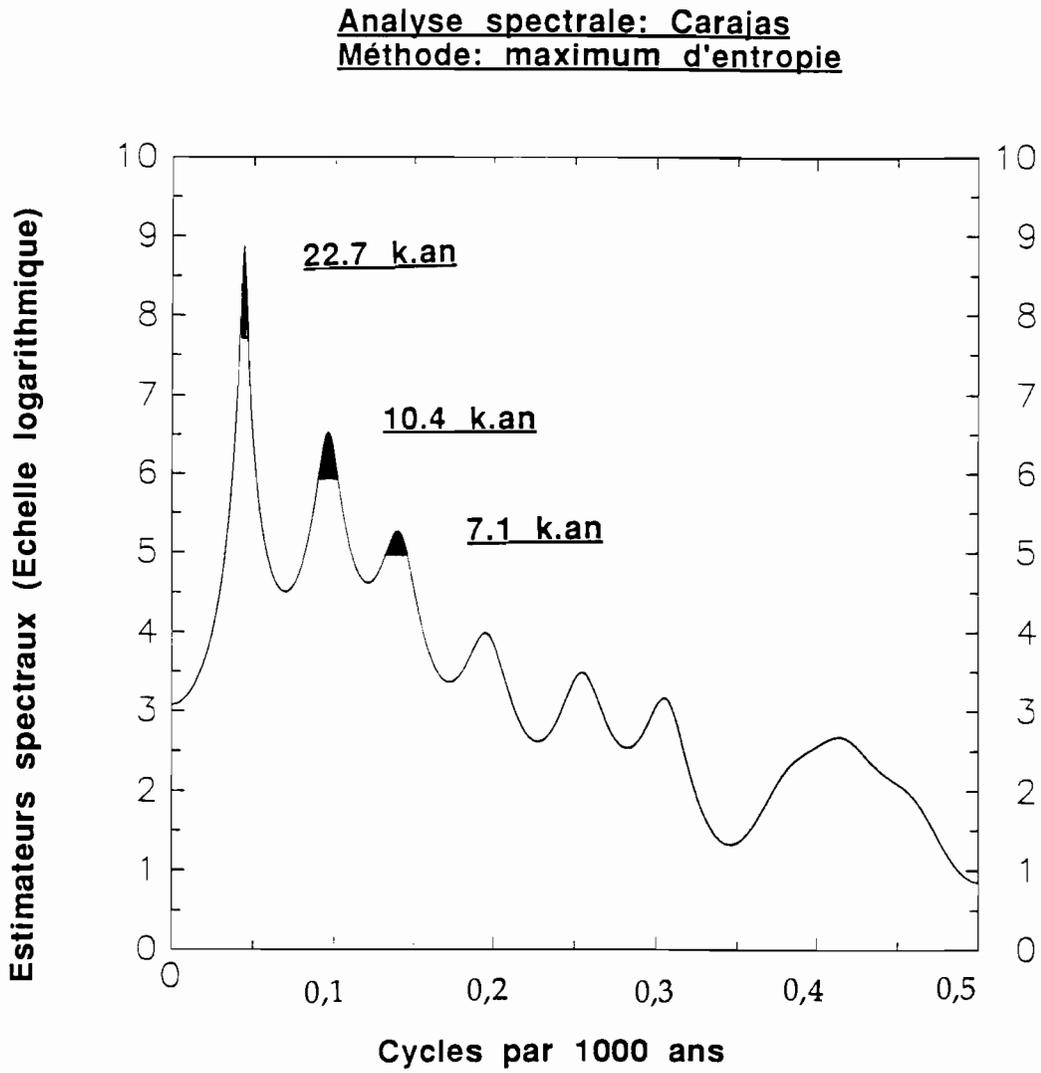


Fig VI.3: Recherche de périodicité dans les flux de quartz carotte CSS2, lac n°8 (Serra Sul, Carajas, Brésil)

intéresse. En effet, ce modèle simule correctement les interactions entre la réponse négative de la température globale à l'augmentation du volume de glace via le feedback glace-albédo et la réponse positive du volume de glace à l'augmentation de température via le feedback précipitation-température.

Lorsqu'un tel modèle est forcé par l'insolation variant elle-même en fonction des changements des paramètres astronomiques, il entre en résonance à cause de ses propriétés d'oscillateur non-linéaire et produit comme output:

1. Des oscillations de fréquence correspondant aux fréquences de forçage  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  (respectivement égales à  $1/19$ ,  $1/23$  et  $1/41 \text{K.ans}^{-1}$ )

2. A cause des interactions non-linéaires, des oscillations de fréquence correspondant à des combinaisons linéaires des fréquences de forçage.

Plus précisément, l'analyse spectrale du volume total de glace simulé par le modèle lorsqu'il est forcé par les trois fréquences d'input  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$ , produit un spectre dominé par des pics à  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  ainsi qu'à:

$$\begin{aligned} f_1 - f_2 &= 1/19 - 1/23 = 1/109.25 \quad \text{K.ans}^{-1} \\ f_1 + f_2 &= 1/19 + 1/23 = 1/10.40 \quad \text{K.ans}^{-1} \\ f_1 + 2f_2 &= 1/19 + 2/23 = 1/7.16 \quad \text{K.ans}^{-1}. \end{aligned}$$

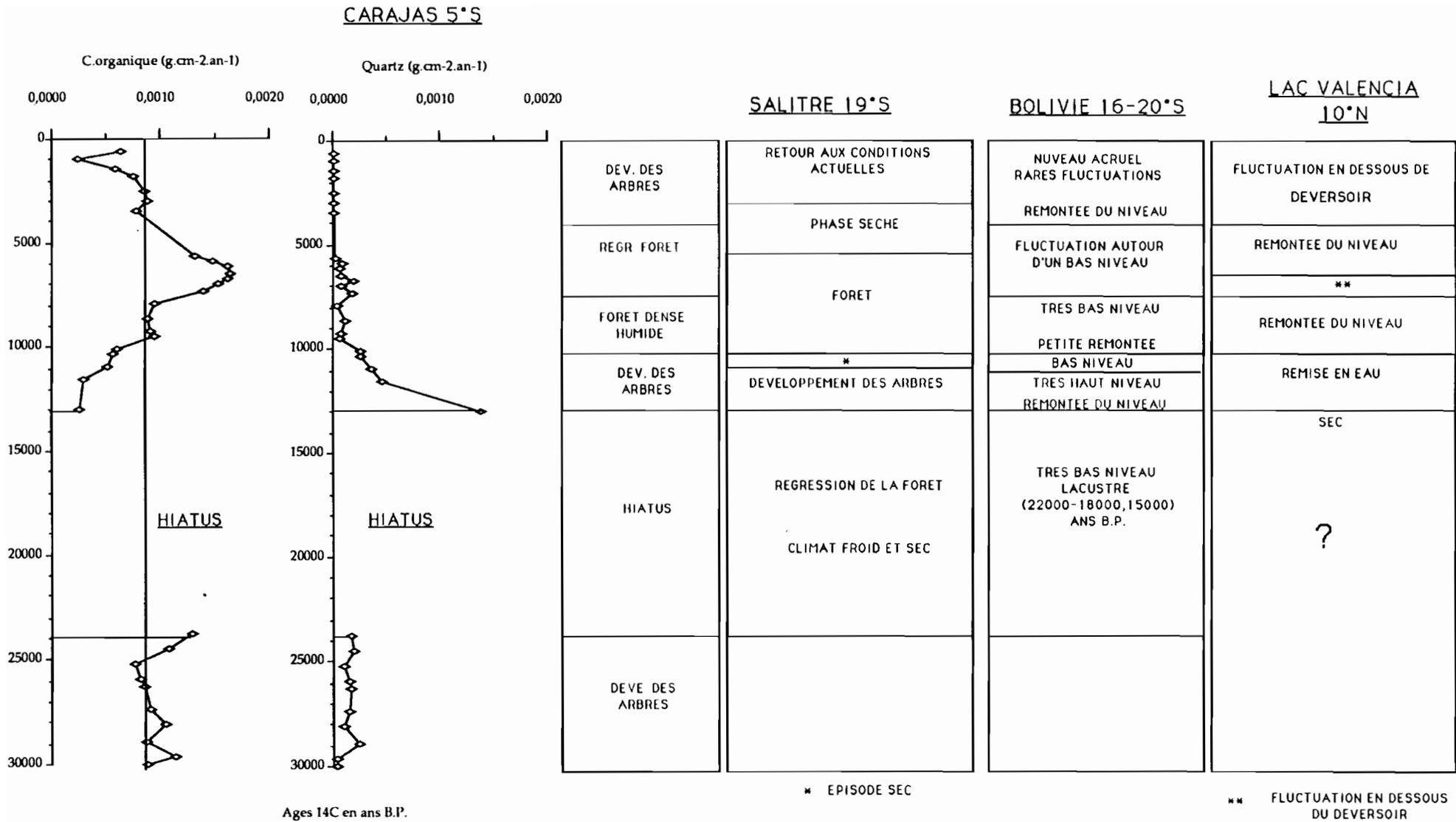
Ces deux dernières fréquences sont justement celles détectées par l'analyse spectrale des données de Carajas.

Ces oscillations à 10.4 et 7.1 K.ans ont été également trouvées par l'analyse spectrale d'enregistrements marins (Pestiaux et al., 1988; Berger et al., 1991) et d'enregistrements de glaces (Yiou et al., 1989). Ces résultats confirment notre hypothèse de forçage astronomique dans les données de Carajas. Un signal de précession accompagné d'oscillations à quasi 10.4 K.ans a également été détecté récemment dans un enregistrement continental en Colombie (Hooghiemstra et Mélice, 1991) proche du site de Carajas.

Il nous reste à faire remarquer (voir par exemple Imbrie et Imbrie, 1980) que l'oscillation de grande amplitude de quasi 100 K.ans détectée dans la plupart des enregistrements géologiques, n'est pas liée à l'excentricité (dont l'"amplitude" de l'insolation au sommet de l'atmosphère est beaucoup trop faible que pour être capable de provoquer un tel output) mais bien à la réponse non-linéaire du système climatique. Ceci est par exemple illustré, comme décrit plus haut, par le modèle de Le treut et Ghil, qui génère une oscillation de grande amplitude de période de 109.25 K.ans générée elle-même par les deux composantes de la précession.

### III) COMPARAISON AVEC D'AUTRES REGIONS D'AMERIQUE DU SUD

Les événements climatiques que nous avons pu mettre en évidence à partir d'analyses sédimentologiques, géochimiques et organiques ont été comparés avec des résultats obtenus dans d'autres régions d'Amérique du sud, afin de vérifier la validité des marqueurs paléoclimatiques que nous avons utilisés (Fig VI.4).



**Fig VI.4: Comparaison des résultats paléoclimatiques de Carajas avec ceux d'autres régions d'Amérique du Sud.**

Aucun autre site d'Amérique du Sud couvrant les 60000 dernières années comme celui de Carajas, les comparaisons qui seront faites prendront en considération uniquement les 30000 dernières années.

L'épisode sec, daté entre 22000 et 13000 ans B.P. qui s'est exprimé sous la forme d'un hiatus à Carajas, a été identifié dans d'autres régions d'Amérique du Sud avec des amplitudes variables. A Salitre (Brésil central 19°S), les informations obtenues par une étude palynologique (LEDRU 1991), montrent que cette période a été caractérisée par une régression de la forêt. Par ailleurs, le climat pendant cet épisode a été défini comme froid et sec. En Bolivie, le lac Titicaca se situe à un très bas niveau qui est postérieur à 22000 et antérieur à 14000 ans B.P. (Servant, 1978).

La phase 13000-10000 ans B.P. est marquée à Carajas par de grands flux détritiques qui traduisent une intense érosion du plateau et qui impliquent l'existence de fortes précipitations. Parallèlement, on note une augmentation des pourcentages des pollens arborés. Partout on constate une élévation généralisée des nappes d'eau, qui est particulièrement bien marquée dans le lac Titicaca, où on note une remontée du niveau lacustre débutant vers 13000 ans B.P., et atteignant son maximum entre 11000 et 12000 ans B.P. Vers 10500 ans B.P., on note un début d'abaissement du niveau lacustre. A Salitre, cet épisode correspond à un développement de la forêt avec cependant un court épisode sec vers 10500 ans B.P. Au Venezuela, les études minéralogiques et palynologiques et celles des diatomées, effectuées par (Bradbury et al, 1981, Leyden, 1986) montrent que le lac Valencia qui était sec, commence à être mis en eau vers 13000 ans B.P.

La phase 10000-8000 ans B.P. est marquée à Carajas par la diminution des flux détritiques qui traduisent une diminution de l'érosion du plateau, en conséquence du développement d'un couvert végétal suffisant pour empêcher son érosion. Parallèlement l'augmentation des flux de carbone organique traduisent l'existence d'une tranche d'eau importante dans la dépression. Ceci est confirmé par le plein développement de la forêt dense humide qui autour du plateau, atteint son développement optimum vers 9500 ans B.P. (Absy et al 1991). Vers cette époque, les lacs de l'Altiplano Bolivien, après une petite remontée du niveau, entament une phase de décrue, dont le maximum se situe vers 7500 ans B.P. (Wirrmann et de Oliveira Almeida 1987, Wirrmann et al 1991) Le lac Valencia atteint le niveau de son exutoire. A Salitre, après le bref épisode sec et froid de 10500 ans B.P., on note une reconstitution rapide du couvert arboré.

Entre 7000 et 4000 ans B.P. s'installent de nouvelles conditions climatiques. A Carajas, elles sont caractérisées par une succession de périodes sèches. Dans de nombreuses régions d'Amérique du Sud, ces phases sèches sont marquées par de nombreux incendies, attestés par la présence de charbons de bois dans les sols (Soubiès 1980) et par de fortes et brèves périodes de ravinement des versants (Servant et al 1989). Les reconstructions paléobathymétriques (Mourguiart 1991) effectuées sur le lac Titicaca montrent que le plan d'eau a oscillé autour d'un niveau moyen très inférieur au niveau actuel (-50m). Après une phase de fluctuations en dessous du niveau du déversoir entre 7000 et 6000 ans B.P., le niveau du lac Valencia remonte jusqu'à 3000 ans B.P. A Salitre, on enregistre une

phase sèche, qui apparaît toutefois avec un certain déphasage par rapport à Carajas.

Après 4000 ans B.P., à Carajas les flux détritiques diminuent ce qui témoigne d'une faible intensité d'érosion du plateau. Parallèlement les flux du carbone organique redeviennent normaux. Ceci est accompagné par un développement de la forêt autour du plateau. A Salitre, on enregistre un retour à des conditions plus humides. En Bolivie, le lac Titicaca après être remonté rapidement entre 4000-3600 et 3000 ans B.P., a oscillé autour d'un niveau légèrement inférieur à l'actuel. La remontée du lac témoigne du passage à un climat proche du climat actuel. Les oscillations postérieures à 3000 ans B.P. indiquent l'existence de courtes périodes sèches. Celles-ci ont toutefois été en nombre nettement inférieur à celles qui se sont produites avant 4000 ans B.P. Le lac Valencia fluctue en dessous de son déversoir, et sa salinité augmente. Après 1000 ans B.P. on note l'existence des fentes de dessiccation dans les dépôts.

Bien qu'il soit téméraire d'essayer d'établir un modèle des variations climatiques pour l'Amérique du Sud à partir des résultats paléoclimatiques provenant seulement de quelques sites, nous pouvons toutefois faire quelques observations.

L'élévation généralisée des nappes d'eau dans les différents points d'Amérique du Sud vers 13000 ans B.P. est un phénomène qui a été signalé dans de nombreuses régions tropicales et subtropicales (Servant et al 1980) chronologiquement proche d'une forte déglaciation vers 15000-14000 ans B.P. (Broecker W.S. 1989). Cette élévation traduit une réponse des basses latitudes continentales à un changement global. Tandis que les lacs ont une réponse très rapide la végétation n'atteindra son maximum de développement que vers 9500 ans B.P. soit avec un déphasage de près de 3000 ans B.P.

Le début de l'Holocène apparaît humide dans ce continent.

La phase 9500 ans B.P. est caractérisée par un développement des forêts tropicales. Ce développement mis en évidence en Amérique du Sud a été aussi signalé en Afrique (Maley 1987)

En ce qui concerne l'ensemble du continent Sud-Américain nous constatons un changement climatique important vers le milieu de l'Holocène. Ce changement a été daté, en tenant compte des incertitudes, entre 7000 et 4000 ans B.P. Il se traduit par une succession de phases sèches. Cette phase climatique en Amérique du Sud s'oppose à l'évolution paléoclimatique de la même période en Afrique Occidentale puisque vers 6000 ans B.P. on note une augmentation des niveaux des lacs (Servant et al, 1980).

Pour établir une conclusion générale sur les changements climatiques globaux comme ceci a été fait dans l'hémisphère Nord, il faut approfondir d'avantage certains points, néanmoins l'existence de certaines hypothèses concernant ces variations vont nous aider dans notre travail.

CONCLUSION  
GENERALE

Cette étude avait pour premier but de mettre en évidence des méthodes de travail susceptibles de définir des marqueurs minéraux et organiques des paléoenvironnements. Les méthodes utilisées ont été la spectrométrie infrarouge, la pétrographie de la matière organique, les palynofaciès, la géochimie organique et isotopique et la géochimie minérale.

L'analyse sédimentologique classique ne permet pas d'aboutir à une quantification absolue du matériel détritique d'autant plus qu'elle n'est pas adaptée à ce type d'échantillons riches en matière organique à cause de la formation d'artéfacts lors des traitements acides. L'avantage de la spectrométrie infrarouge est de travailler sur l'échantillon brut. Elle est basée sur les vibrations intermoléculaire caractérisant chaque minéral par un spectre d'absorption propre proportionnel à la concentration et de plus elle nécessite une faible quantité d'échantillon pour l'analyse. Cette méthode physique nous a permis de quantifier et de calculer sous forme de flux les éléments détritiques (quartz, kaolinite) ainsi que les minéraux néoformés (la sidérite). Les spicules d'éponges ont pu elles aussi être quantifiées par cette méthode.

La signature minéralogique des événements climatiques récents, à l'aide de cette analyse quantitative globale, paraît très lisible. Ainsi les niveaux à sidérite riches en quartz et en kaolinite caractérisent une phase de forte érosion sur le plateau de Carajas par opposition aux niveaux organiques où les flux détritiques chûtent à des valeurs minimales.

Le dosage du fer total et l'observation de la matière organique en palynofaciès montrent que la formation de la sidérite dans ces niveaux traduit des conditions hydriques du milieu de sédimentation bien définies en relation avec l'environnement. Ainsi, une érosion intense du plateau de Carajas favorise un transport en grande quantité de fer ferrique qui tamponne le milieu rendu acide par la libération des protons ( $H^+$ ) lors de l'oxydation de la matière organique pendant le début de la remise en eau. Cette augmentation du pH se fait par transfert sur le fer ferrique d'électrons par l'intermédiaire d'une action bactérienne.

Une meilleure approche de la connaissance de la composition de la matière organique implique des analyses plus détaillées qui intéressent différentes fractions, solubles et insolubles. En raison de la grande richesse des échantillons des dépôts lacustres de Carajas en matière organique, notre effort a porté sur l'étude des composants de l'humine en lumière réfléchie en section polie et en lumière transmise en lame palynofaciès. Ces méthodes présentent un complément efficace des études géochimiques organiques.

L'étude pétrographique des sédiments des deux carottes CSS2, et CSS10 révèle toute l'efficacité de cette méthode pour la reconstitution des paléoenvironnements. Il apparaît ainsi que les quantités des différents constituants organiques microscopiques varient le long des deux carottes d'une façon tout à fait cohérente avec les données palynologiques obtenues

sur les mêmes échantillons. L'assèchement du lac est caractérisé par la dominance des débris végétaux opaques oxydés accompagnés par un matériel algaire dégradé alors que les phases d'extension de la végétation sont marquées par une dominance des débris végétaux très bien conservés et un matériel algaire représenté par des colonies de *Botryococcus* non altérées. De plus, l'analyse d'images faite à partir des lames palynofaciès et les mesures du pouvoir réflecteur des débris végétaux, nous ont permis, par quantification des débris végétaux d'identifier un niveau riche en charbons de bois de petite taille originaire d'incendies. Pour une meilleure quantification de la matière organique figurée, l'analyse d'images est la seule méthode susceptible de résoudre ce type de problèmes.

Pour l'ensemble de ces raisons, la pétrographie de la matière organique apparaît comme une méthode fondamentale plus complète pour aborder l'étude des sédiments quaternaires.

La diagnose obtenue par la pétrographie de la matière organique et par les palynofaciès vient renforcer les informations fournies par le dosage du carbone organique total et de l'azote. En effet, dans les niveaux à sidérite, riches en détritiques où la matière organique est le plus souvent représentée par les débris opaques et par un matériel algaire dégradé, les flux du carbone organique et de l'azote sont faibles. Par contre, dans les niveaux riches en matières organiques très bien conservées composées principalement par des débris végétaux translucides et un matériel algaire non dégradé, les flux sont élevés. Les valeurs maximales du flux de carbone marquent très bien le niveau organique riche en charbons de bois.

Les résultats de la géochimie isotopique obtenus sur la matière organique totale ne paraissent pas bien adaptés pour décrypter un signal paléoenvironnemental pour les raisons suivantes:

- la diversité du stock organique, lié à la morphologie du site et son environnement, mis en évidence par l'étude microscopique de la matière organique.

- les transformations biologiques qui affectent le contenu organique.

Ces deux points, liés à l'histoire complexe du stock du carbone organique, font que le signal isotopique varie peu tout au long des carottes. Pour remédier à ce type de problèmes, une réflexion sur le fractionnement de la matière organique doit être à ce niveau envisagée, en travaillant sur un type de matière organique bien défini, afin d'aboutir à un signal isotopique crédible.

Les informations obtenues à la suite des études sédimentologiques, et sur la matière organique, associées aux datations au  $^{14}\text{C}$  ont permis d'identifier, pour la première fois dans les régions tropicales humides, les épisodes paléoclimatiques du Pléistocène supérieur et de l'Holocène.

Trois épisodes d'intenses érosions, s'étant produits respectivement après 60 000, 40 000 ans B.P, et entre 13 000 et 11 000 ans B.P. sont mis en évidence à Carajas. Ces épisodes sont marqués par l'augmentation des flux détritiques (quartz kaolinite) et par la néoformation des

carbonates de fer (sidérite) dans les dépôts lacustres mis en place pendant ces époques. Ces époques d'intense érosion marquent un changement brusque entre un climat, probablement aride, et un climat à précipitations orageuses.

Le dernier maximum glaciaire daté entre 20000 et 15000 ans B.P. et les deux épisodes froids antérieurs du Pleistocène supérieur sont marqués par un arrêt de sédimentation (hiatus) entre 22 000 et 13 000 ans B.P. et vers 40 000 et 60 000 ans B.P.

Le début de l'Holocène est marqué par une diminution de l'érosion sur le plateau de Carajas et par l'augmentation des flux de la matière organique sédimentée pendant des phases climatiques humides couvrant la période entre 10 000 et 8000.

La période de 7000 à 4000 ans B.P est marquée à Carajas par l'apparition de conditions climatiques en moyenne sèches, ceci s'est traduit dans le spectre pollinique par une diminution des taxons arborés. Cependant les flux détritiques, très faibles, au contraire de ce qui s'est produit lors des périodes antérieures d'ouverture de la forêt, indiquent que le plateau a continué à posséder une couverture végétale suffisante pour empêcher son érosion. La grande abondance de spicules d'éponges pendant cette même époque indique que le plan d'eau était très bas mais pas totalement sec ce qui laisse supposer qu'il s'est produit une succession d'assèchements et de remises en eau. Parallèlement l'abondance des micro-charbons de bois, indique qu'il s'est produit une succession d'incendies témoignant de conditions sèches. On peut donc penser que la période 7000-4000, qui en moyenne, apparaît comme sèche est en réalité constitué par une alternance de périodes sèches et humides. Cette phase climatique, mise en évidence à Carajas, identifiée dans d'autres régions d'Amérique du Sud, s'oppose à l'évolution paléoclimatique de la même période en Afrique Occidentale puisqu'à 6000 ans B.P. on note une augmentation des niveaux des lacs (Servant et al,1980).

## BIBLIOGRAPHIE

Absy M.L., (1979): *A palynological study of Holocene sediments in the Amazon basin*. Ph D. Thèse Univ. d'Amsterdam, p 86.

Absy M. L., Cleef A., Fournier M., Martin L., Servant M., Sifeddine A., Silva M. F., Soubiès F., Suguio K., Turcq B., Van Der Hammen Th., (1991): Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le sud-est de l'Amazonie au cours des 60.000 dernières années. Première comparaison avec d'autres régions tropicales. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t.312, Série II, pp. 673-678.

Absy M. L., Van Der Hammen T., Soubiès F., Suguio K., Martin L., Fournier M., Turcq B., (1989): Data on the history of vegetation and climate in Carajas, Eastern Amazonia. *International Symposium on Global Changes In South America during the Quaternary*, Sao Paulo, Spec. Pub. n°1, pp. 129-131.

Bellet J., (1989): Le sondage Misedor palynofaciès et analyse élémentaire de la matière organique. *In : le sondage MISEDOR*, Ed Technip, Paris.

Berger A., (1987): Pleistocene climatic variability at astronomical frequencies. *In Global change*, H.Faure and N. Rutter (Eds) International Quaternary Association, Ottawa, Ont.

Berger A., (1988): Milankovitch theory and climate. *Review of Geophysics*, 26, 4, pp 624-657.

Berger A., (1989): Pleistocene climatic variability at astronomical frequencies. *Quaternary International*, 2, pp. 1-14..

Berger A., Mélice J.L., and Hinnov L., (1991): A strategy for frequency spectra of Quaternary climate records, *Climate Dynamics*, in press.

Berner R. A., (1971): Diagenesis of Iron Minerals. In *Principles of Chemical Sedimentology*. Mc graw-Hill, New York, N. Y., pp.193-209.

Berner R. A., (1971): Diagenetic Redox reactions in the system C-N-S-H-O. *In Principles of Chemical Sedimentology*. Mc graw-Hill, New York, N. Y., pp.115-137.

Bertrand P., (1986): *Pétrologie organique et hydrocarbures*. Thèse de Doctorat ès sciences, Univ d'Orléans, 133 p.

Bertrand P., Pittion J. L., Bernaud C., (1986): Fluorescence of sedimentary organic matter in relation to its chemical composition, *Org. Geochem*, Vol. 10, pp. 641-647.

Bradbury J.P., Leyden B., Salgado-Labouriau M.L., Lewis W. M.Jr., Schubert C., Benford M.W., Frey D.G., Whitehed D.R., Weibezahn F.H., (1981): Late Quaternary environmental history of lake Valencia, Venezuela, *Science*, vol.214,pp.1299-1305.

- Bradstreet R. B., (1965): The Kjeldahl method for organic nitrogen. *In Academic Press*. New-York and London. 239p.
- Broecker W. S., Denton G. H., (1989): The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 33, pp. 2465-2501.
- Broecker W. S., Klas M., Clark E., Trumbore S., Bonani G., Wölfli W., Ivy S., (1990): Accelerator mass spectrometric radiocarbon measurements on foraminifera shells from deep-sea cores, *Radiocarbon*, Vol. 2, pp. 119-133.
- Bromfield S.M., (1954): Reduction of ferric compounds by soil bacteria, *Journal of General microbiology*, Vol 11, N°3, pp .1-6.
- Burg J.P., (1972): The relationship between maximum entropy spectra and maximum like hood spectra, *Geophysics*, 37, pp 375-376.
- Campos E. N., (1980): *Etude de l'altération en pays tropical humide d'une formation précambrienne à Itabirites et roches volcaniques Serra Dos Carajas, Amazonie, Brésil*, Thèse de doctorat ès sciences, Institut de géologie, Strasbourg, 281p.
- Caratini C., Bellet J., Tissot C., (1983): Les palynofaciès: représentation graphique, intérêt de leur étude pour les reconstitutions paléogéographiques. Géochimie organique des sédiments marins, *In D'ORGON à MISEDOR*. Ed C.N.R.S., Paris, pp. 327-352.
- Cerling T.E., Quade J., Wang Y., Bowman J.R (1989): Carbon isotopes in soils and palaeosols as ecology and palaeoecology indicators, *Nature*, Vol 341, pp. 138-139.
- Chang S. C., Jackson M. L., (1957): Fractionation of soil phosphorus, *Soil. Sc*, 34, pp. 134-144.
- Chester R., Elderfield H., (1968): The determination of opal in siliceous deep-sea sediments, *Geochimica Cosmochimica Acta*, Vol. 32, pp 1128-1140.
- Colinvaux P., (1979): The ice -age Amazon, *Nature*, 278: 399-400.
- Combaz A., (1964): Les palynofaciès, *Revue de Micropaléontologie*,7, pp. 205-218.
- Combaz A., (1980): Les kérogènes vus au microscope, *In Kerogen*, Ed Technip, Paris, pp. 55-112.
- Combaz A., Bellet J., Poulain D., Caratini C., Tissot C., (1977): Etude microscopique de la matière organique de sédiments quaternaires de mer de Norvège, *In Géochimie organique des sédiments marins profonds, Orgon I, mer de Norvège*, Ed. CNRS, Paris, pp. 139-175.

Coreira M., Maury R., Arai F., (1974): Mesure par leur pouvoir réflecteur des températures de carbonisation des bois fossilisés dans les formations volcaniques, *Bull. Centre Rech. Pau-SNPA*, Vol 8, n°2, pp 527-536.

Craig H., (1957): Isotopic standards for carbon and oxygen and correlation factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 12, pp. 113-149.

Curtis Ch., (1987): Données récentes sur les réactions entre matières organiques et substances minérales dans les sédiments et sur leurs conséquences minéralogiques, *Mém. Soc. géol. France*, N. S., n°151, pp 127-141.

Curtis C. D., Coleman M. L., (1985): Controls on the precipitation of early diagenetic calcite, dolomite, and siderite concretions in complex depositional sequences, *In Roles of organic matter in sediments diagenesis*, Gautier Ed., Soc. Econ. Paleontol. Mineral, Spec. Publ., 38, pp.23-44.

Deines P., (1989): The isotopic composition of reduced organic carbon, *In Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Ed Fritz, P. Fontes, J. Ch. Vol.1. The Terrestrial Environment, A. Elsevier, Amsterdam, pp.329-393.

Didyk B. M., Simoneit B. R. T., Brassel S. C., Eglinton G., (1978): Organic geochemical indicators of palaeoenvironmental conditions of sedimentation, *Nature*, Vol. 272, pp.216-222.

Durand B., (1980): Sedimentary organic matter and kerogen. definition and quantitative importance of kerogen, *In Kerogen*, Ed. Technip, Paris, pp. 13-34.

Durand B. M., (1987): Du kérogène au pétrole et au charbon: les voies et les mécanismes des transformations des matières organiques sédimentaires au cours de l'enfouissement, *Mém. Soc. géol. France*, N.S, n°151, pp. 77-95.

Durand B., Nicaise G., (1980): Procedures for kerogen isolation, *In Kerogen*, Ed. Technip, Paris, pp. 35-53.

Elenga H., Riollot G., Buchet G., (1991): Changements climatiques et action anthropique sur le littoral congolais au cours de l'Holocène moyen et récent d'après l'étude de macro et microrestes végétaux, *In Bull. Soc. géol. France*, sous presse.

Espitalié J., Deroo G., Marquis F., (1986): La pyrolyse Rock-Eval et ses applications " Applications", *Rev. IFP*, Vol. 40, n°1. Ed Technip, Paris, pp. 73-89.

Espitalié J., Deroo G., Marquis F., (1986): La pyrolyse Rock-Eval et ses applications " Interprétations des paramètres", *Rev. IFP*, Vol. 40, n°6. Ed Technip, Paris, pp. 755-784..

Espitalié J., Deroo G., Marquis F., (1986): La pyrolyse Rock-Eval et ses applications " La méthode et les appareils", *Rev. IFP*, Vol. 40, n°5. Ed Technip, Paris, pp. 563-579.

Ferreira Fernandes da Silva M., Cleef A.M., (1989): Plant communities of the Serra Do Carajas (Parà, Brasil), *In International symposium on global changes In south america during the quaternary*, Sao Paulo. Spec. Pub. n°1, pp. 269-274.

Flehmg W., Kurze R., (1973): Die quantitative infrarotspektroskopie phasenanalyse von mineralmengen, *In N. Jb. Miner. Abh.*, Vol. 119, n°1, pp.101-112.

Fröhlich F., (1981): Les silicates dans l'environnement pélagique de l'océan indien au cénozoïque, *Mémoires du Muséum National d'Histoire Naturelle*, Série C, Sciences de la Terre, t. XLVI, 206p.

Fröhlich F., (1989): Deep biogenic silica: new structural and analytical data from infrared analysis geological implications, *Terra Nova*, Vol. 1, pp. 267-273.

Fröhlich F., Servant-Vildary S., (1989): Evaluation of diatom content by counting and infrared analysis in Quaternary fluvio-lacustrine deposits from Bolivia, *Diatom Research*, Vol. 4 (2), pp. 241-248.

Ghil M., (1985): Theoretical climate dynamics: an introduction, *in Turbulence and Predictability in Geophysical fluid Dynamics and Climate Dynamics*, M. Ghil, R. Benzi and G. Parisi (eds.), North-Holland, Amsterdam, New-York, pp 347-402.

Gibbs A. K., Wirth K. R., Hirata W.K., Olszewski JR. W. J., (1986): Age and composition of the grao Parà group volcanics, Serra Dos Carajas, *In Revista Brasileira de Geociencias*, 16(2), pp. 201-211.

Giresse P., (1987): Les dépôts quaternaires du lac Barombi Mbo (Ouest Cameroun). Lithostratigraphie, rythmes sédimentaires et minéralogie, *Géodynamique*, 2(2), pp. 132-133.

Guiot J., Pons A., Beaulieu J.L., and Reille M., (1989): A 140,000- year continental climate reconstruction from two European pollen records, *Nature*, vol.338. p 309-314.

Hooghiemstra H., Mélice J.L., (1991): Frequency spectra and paleoclimatic variability of the high-resolution 30-150kyr Funza I pollen record, Eastern Cordillera, Colombia, *Quaternary Sciences Reviews*, in press.

Huc A. Y., (1980): Origin and formation of organic matter in recent sediments and its relation to kerogen, *In Kerogen*, Ed. Technip, Paris, pp. 445-473.

Imbrie J., Imbrie J. Z., (1980): Modeling the climate reponse to orbital variations, *Science*, 207, 29, pp 943-953.

Irwin H., Curtis C., Coleman M., (1977): Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments, *Nature*,

Vol 269, pp 209-213.

Joussel J., Lorius C., Petit J. R., Genthon C., Barkov N. I., Kotlyakov V., M. Petrov V. M., (1987): Vostok ice core: a continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years), *Nature*, Vol 329, n° pp 403-418.

Ledru M. P., (1991): *Etude de la pluie pollinique actuelle des forêts du Brésil central : climat, végétation, application à l'étude de l'évolution paléoclimatique des 30.000 dernières années*, Thèse de doctorat, Muséum National d'Histoires Naturelle, 193p.

Leyden B.W., (1985): Late Quaternary aridity and Holocene moisture fluctuations in the lake Valencia basin, Venezuela, *Ecology*, 66(4), pp.1279-1295

Le Treut H., Ghil M., (1983): Orbital forcing, climatic interactions and glaciation cycles, *J. Geophys. Res.*, 88, pp 5167-5190.

Loganathan P., Sutton P. M., (1987): Phosphorus fractions and availability in soils formed on different geological deposits in the Niger delta area of Nigeria, *Soil Science*, Vol.143, N°1, pp 16-25.

Lorente M. A., (1986): Palynology and palynofaciès of the upper Tertiary in *Venezuela*, Thèse Univ. d'Amsterdam, Gebrüder Borntraeger, Berlin, 217p.

Maley J., (1987): Fragmentation de la forêt dense humide africaine et extension des biotopes montagnards au Quaternaire récent: nouvelles données polliniques et chronologiques. Implications paléoclimatiques et biogéographiques, *Paleoecology of Africa*, Vol. 18, pp. 307-334.

Malmer N., Holm E., (1984): Variation in the C/N-quotient of peat in relation to decomposition rate and age determination with 210 Pb, *Oikos*, Vol. 43, pp. 171-182.

Martin L., Flexor J.M., (1989): Vibro-Testemunhador leve: Construção, utilização e possibilidades, *2<sup>ème</sup> Congresso da associação brasileira de estudos do Quaternário*, n°1, pp 1-2.

Motomura S., (1961): Effect of organic matters on the formation of ferrous iron in soils, *Soil Science and Plant Nutrition*, Vol. 8, No. 1, 196. pp.20-29.

Mourguiart Ph., (1987): *Les ostracodes lacustres de l'Altiplano bolivien. Le polymorphisme, son intérêt dans les reconstitutions paléohydrologiques et paléoclimatiques de l'Holocène*, Thèse de 3ème cycle, Université de Bordeaux I, 263p.

Munch J.C, Ottow J.C.G., (1983): Réduction bactérienne des oxydes ferriques amorphes et cristallisés, *Bull A.F.E.S*, n°3-4. p. 205-215.

Nriagu J. O., Dell C. I., (1974): Diagenetic formation of iron phosphates in recent lake sediments, *American Mineralogist*, Vol. 59, pp. 934-946.

Oudin J. L., (1987): Diagenèse de la matière organique dans le bassin de la Mahakam, *Mém. Soc. géol. France*, N. S., n°151, pp. 107-114.

Pagney P., (1976): *Les climats de la Terre*, Masson Paris, 150p.

Paul E. A., Clark F. E., (1989): Microbial transformation of metals, *In Soil Microbiology and Biochemistry*, Academic Press, Inc. San Diego, California pp.252-258

Paul E. A., Clark F. E., (1989): Phosphorus transformations in Soil, *In Soil Microbiology and Biochemistry*, Academic Press, Inc. San Diego, California pp. 223-232.

Pelet R., (1980): Evolution géochimique de la matière organique, *In Kerogen*, Ed Technip, Paris, pp. 475-499.

Pelet R., Deroo G., (1983): Vers une sédimentologie de la matière organique, *Bull. Soc. géol. France*, (7), t.XXV, n°4, pp. 483-493.

Pestiaux P., van der Merse I., Berger A., Duplessy J. C., (1988): Paleoclimatic variability at frequencies ranging from 1 cycle per 10000 years to 1 cycle per 1000 years: evidence for nonlinear behaviour of the climate system, *Climatic Change*, 12 pp 9-37.

Petit J. R., Mounier L., Jousel J., Korotkevich Y. S., Kotlyakov V. I., Lorius C., (1990): Paleoclimatological and chronological implications of the Vostok core dust record, *Nature*, Vol.343, n°4, pp 56-58.

Pierre C., (1989): Sedimentation and diagenesis in restricted marine basins, *In Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Ed Fritz, P. Fontes, J. Ch. Vol.3 The Marine Environment, A. Elsevier, Amsterdam, pp. 257-315.

Pierre C., Fontes J. C., (1979): Oxygène 18, Carbone 13, Deutérium et Soufre: marqueurs géochimiques de la diagenèse et du paléomilieu évaporitiques du Messinien de la Méditerranée, *Bull. Mus. Natn. Hist. Nat.*, Paris, 4 sér., 1, section C, n°1, pp. 3-18.

Pradier B., Martinez L., Bertrand P., Pittion J. L., (1987): Etude de la diagenèse organique dans le bassin de la Mahakam (Indonésie) par les méthodes microfluométriques, *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 304, Série II, n°18, pp. 1145-1148.

Ragot J.P., (1977): *Contribution à l'étude de l'évolution des substances carbonées dans les formations géologiques*, Thèse de Doctorat ès Sciences,

Université de Toulouse, 150p.

Robert P., (1979): Classification des matières organiques en fluorescence: application aux roches-mères pétrolières, *Bull. Centre Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 3, 1, 223-263.

Sanford R. L., Saldarriaga J., Clark K. E., Uhl C., Herrera R., (1985): Amazon rain-forest fires, *Science*, 227, pp. 650-652.

Scott A.C., (1989): Observations on the nature and origin of fusain, *International Journal of Coal Geology*, 12, pp 443-475

Servant M., Fontes J.C., (1978): Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes Boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques, *Cah. O.R.S.T.O.M.*, sér. Géol., vol.X, n°1, pp.9-24.

Servant M., Servant-Vildary S., (1980): L'environnement quaternaire du bassin du Tchad, *The Sahara and the Niel*, Williams M. A. J., et Faure H., Ed Balkema, Rotterdam, pp. 133-162.

Servant M., Fontes J.C., Argollo J. et Saliège J.F., (1981): Variations du régime et de la nature des précipitations au cours des 15 derniers millénaires dans les Andes de Bolivie, *C. R. Acad. Sc. Paris*, t.292, Série II, p.1209-1212.

Servant M., Fontes J.C., Rieu M. et Saliège J.F., (1981): Phases climatiques arides holocènes dans le sud ouest de l'amazone (Bolivie), *C. R. Acad. Sc. Paris*, t.292, Série II, p.1295-1297.

Servant M., Fournier M., Soubiès F., Suguio K., et Turcq B., (1989): Sécheresse holocène au Brésil (18-20° latitude Sud). Implications paléométéorologiques, *C. R. Acad. Sc. Paris*, t.309, Série II, p. 153-156.

Servant M., Soubiès F., Suguio K., Turcq B., et Fournier M., (1989): Alluvial fans in southeastern Brazil as an evidence for early Holocene dry climate period in *International symposium on global changes in South America during the Quaternary*, Sao Paulo. Spec. Pub. n°1, p.75-77.

Siffermann G., (1988): Le système des grandes tourbières équatoriales, *Ann. Geogr.*, 544, pp. 642-666.

Soubiès F., (1980): Existence d'une phase sèche en Amazonie brésilienne datée par la présence de charbons de bois (6000-3000 ans B.P.), *In Cahier ORSTOM, Sér. Géol.*, XI(1), pp. 133-148.

Soubiès F., Suguio K., Martin L., Leprun J.C., Servant M., Turcq B., Fournier M., Delaune M. and Sifeddine A., (1989): The quaternary lacustrine deposits of the Serra dos Carajas (state of Para, Brazil): ages and other preliminary results, *In International symposium on global changes in South America during the quaternary*, Sao Paulo. Spec. Pub. n°1, pp. 125-128.

Stach E., (1982): *Coal Petrology*. Ed Gebrüder Borntraeger, Berlin, 518p.

Takai Y, Kamura T., (1966): the mechanism of reduction in waterlogged paddy soil, *Folia Microbiologica*, Vol II pp 304-313

Tangredi A., Siffermann G., Besnus Y., Fusil G., Delibrias G., (1976): Présence et formation de niveaux à sidérite dans les sédiments récents du delta amazonien, *Bull. Groupe Franç. Argiles*, t. XXVII, pp. 13-29.

Tolbert G. E., Tremaine J. W., Melcher G. C., Gomes C. B., (1971): The recently discovered Serra Dos Carajas Iron Deposits, Northern Brazil, *Bulletin of the Society of Economic Geologists*, Vol. 66, n°7, pp 985-994.

Tricart J., (1974): Existence de périodes sèches au Quaternaire en Amazonie et dans les régions voisines, *Rev. Géomorph. Dy*, t.XXIII, pp. 145-158.

Trichet J., Disnar J. R., Bonnamy S., Gauthier B., Nakashima S., Oberlin A., Perruchot A., Rouzaud J. N., (1987): Le comportement mutuel de la matière organique et des métaux: implications géochimiques et métallogéniques, *Mém. Soc. géol. France*, N.S. n°151, pp 143-162

Van Der Hammen Th., (1974): The Pleistocene changes of vegetation and climate in tropical South America, *Journ. of Biog.*, 1, pp. 3-26.

Vanzolini P. E., (1986): Paleoclimas e especiação em animais da América do Sul tropical, *ABEQUA*, Sao Paulo, Publ. Avulsa n°1, 35p.

Vaughan-Williams P., (1988): *Brasil. A concise thematic geography*, ed. Unwin Hyman Limited.166p.

Vizier J.F., (1978): Etude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Etude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar, *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, Vol. XVI, n°1, 1978: pp. 23-41

Warry N. D., Kramer J. R., (1976): Some factors affecting the synthesis of cryptocrystalline strengite from an amorphous phosphate complex, *Canadian Mineralogist*, Vol. 14, pp. 40-46.

Wirmann D., and De Oliveira Almeida L.F., (1987): Low Holocene level (7700 to 3650 years B.P. ages) lake Titicaca (Bolivia), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 59, pp. 315-323.

Wirmann D., Ybert J.P., and Mourguiart Ph., (1991): A 20000 record paleohydrological record from lake Titicaca, in *Lake Titicaca, Synthesis of the Limnological knowledge*, Dejoux C., and Iltis A. (eds), Kluwer, in press.

Wirth K.R ,Gibbs A. K., Olszewski JR. W. J., (1986): U-Pb Ages of zircons from the grao Parà group and Serra Dos Carajas Granite, Parà, Brazil, *Revista Brasileira de Geociencias*, 16(2), pp. 195-200.

Yiou P., Genthon C., Jouzel J., Ghil M., Le treut H., Barnola J. M., Lorius C., Korotkevitch Y. N., (1989): High-frequency paleovariability in climate and in

CO<sub>2</sub> levels from Vostok ice-core records, in *Interaction of the Global Carbon and Climate Systems*, R. Keir (ed.), EPRI report.

ANNEXE 1  
PHOTOS

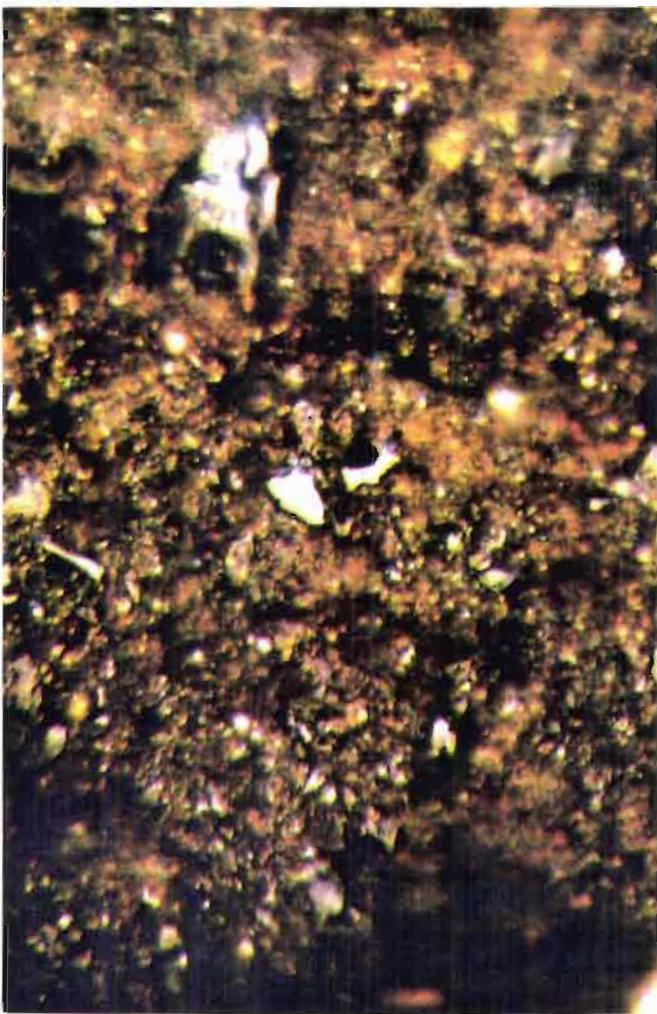
## PLANCHE I CSS2

**Photo 1.** Unité organique sommitale A. (G x 50).(Section polie sous immersion d'huile, lumière réfléchie) Brun jaunâtre= Matrice organo-minérale. Gris: Vitrinite.

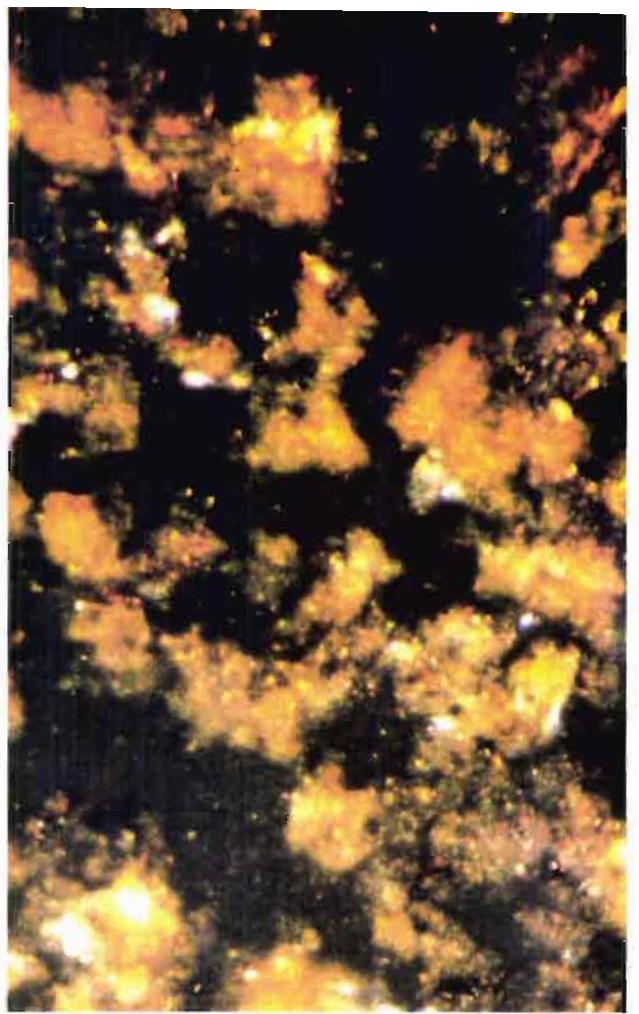
**Photo 2.** Unité organique B. (G x 50). (Section polie sous immersion d'huile, lumière réfléchie). Débris brillants= pyrofusinites (débris brûlés).

**Photo 3** Unité D. (G x 50). (Section polie sous immersion d'huile, lumière réfléchie). Jaune= matrice minérale pauvre en débris ligneux

**Photo 4.** Unité E. (G. x 50) (Section polie sous immersion d'huile, lumière fluorescente). Jaune= Botryococcus.



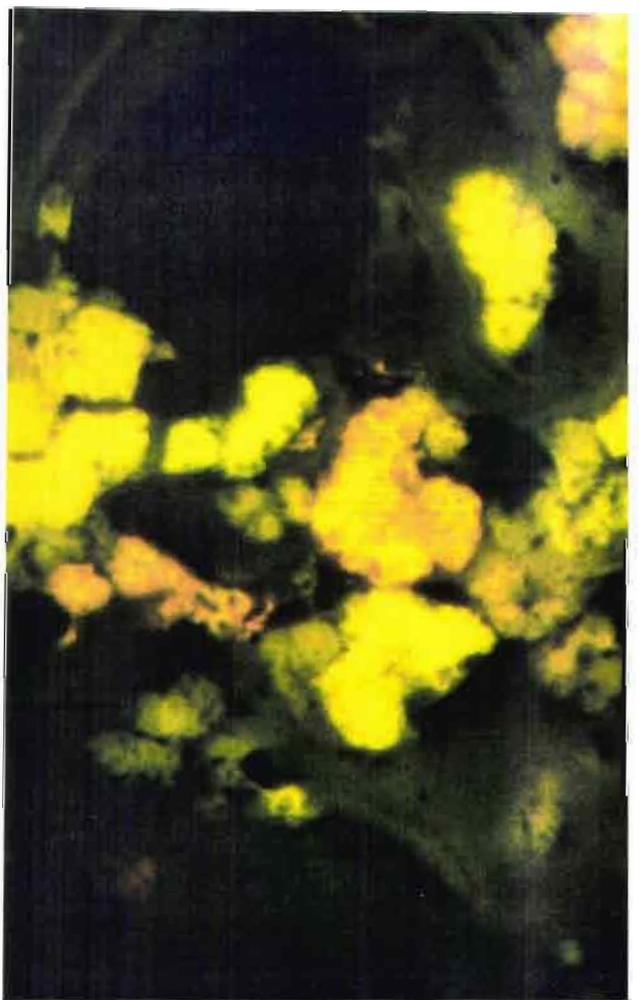
1



3

2

4



## PLANCHE II

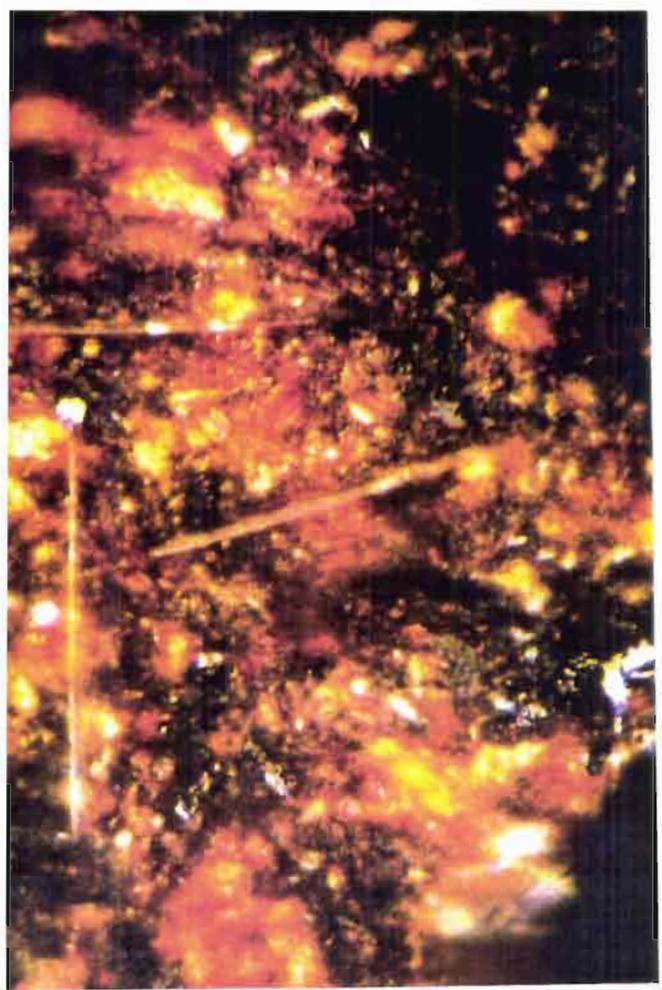
### CSS10

**Photo 5.** Unité A. (G. x 50) (Section polie sous immersion d'huile, lumière réfléchie). Jaune= matrice organo-minérale. Forme d'aiguille=.Spicule d'éponges.

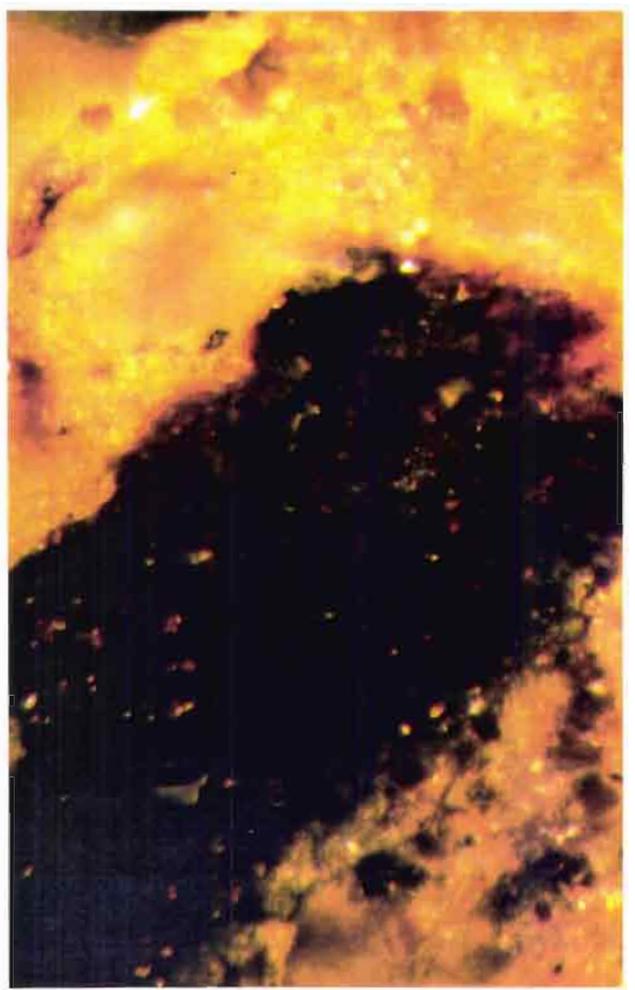
**Photo 6.** Unité organique A. (G x 50). (Section polie sous immersion d'huile, lumière réfléchie). Débris brillants= pyrofusinites (débris brûlés).

**Photo 7.** Unité B. (G. x 50) (Section polie sous immersion d'huile, lumière réfléchie). Jaune= matrice minérale avec une tache noire où se concentrent des petits débris ligneux.

**Photo 8.** Unité E. (G. x 50) (Section polie sous immersion d'huile, lumière fluorescente). Jaune= Botryococcus.



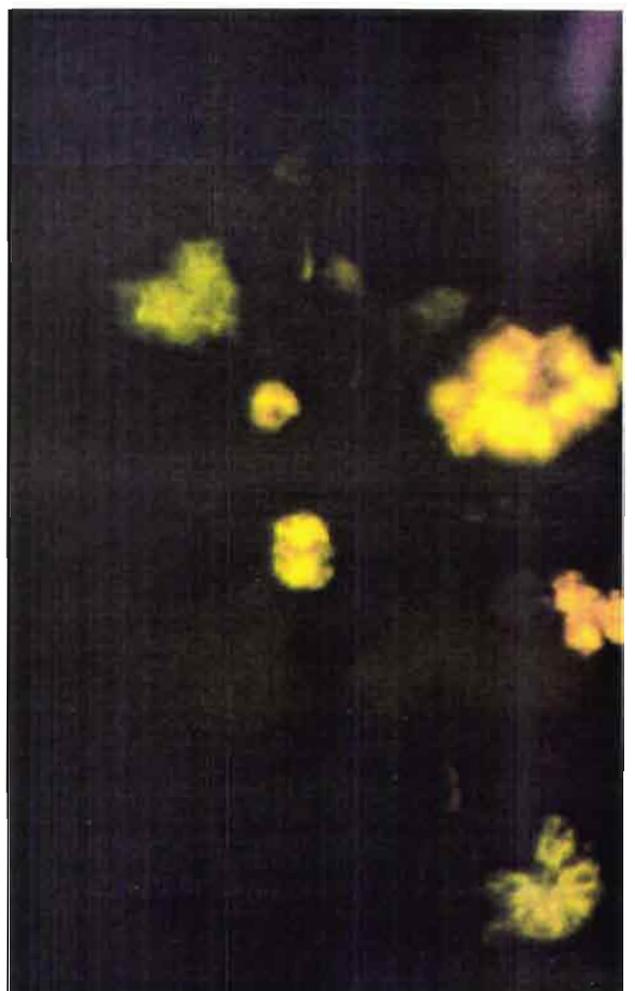
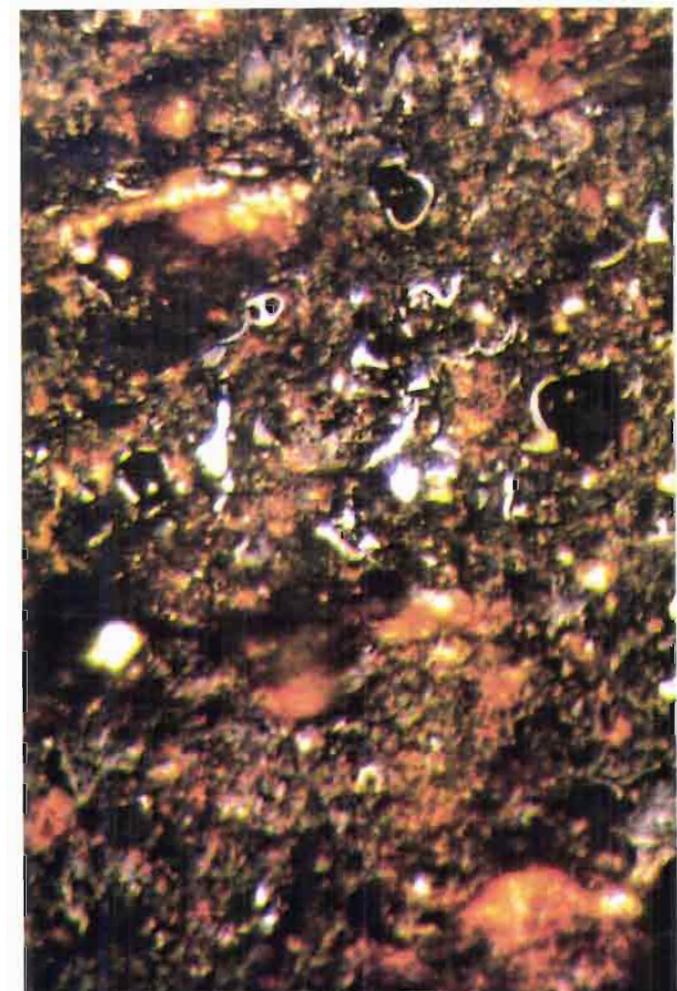
5



7

6

8



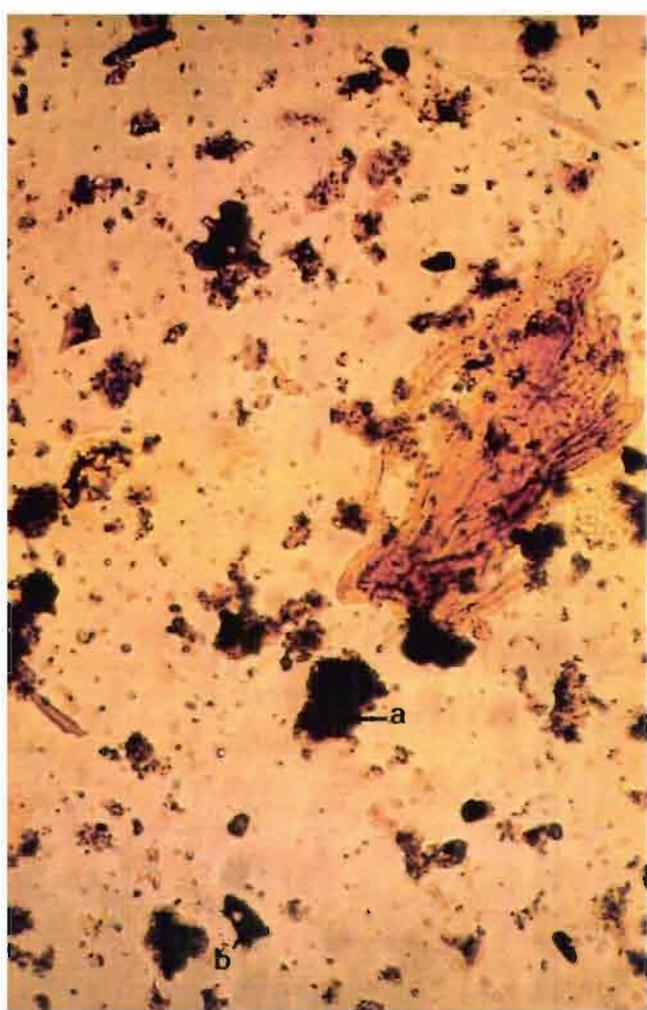
### PLANCHE III CSS2

**Photo 9.** Palynofaciès du niveau supérieur à sidérite (G x 25). (Lumière transmise). a: matière organique amorphe grumeleuse. b: débris ligneux opaque.

**Photo 10.** Palynofaciès du niveau à sidérite inférieure (G x 25). (Lumière transmise). a: matière organique amorphe grumeleuse. b: débris ligneux opaque.

**Photo 11.** Palynofaciès du niveau organique de la séquence III (G x 50). (Lumière transmise). a: matière organique amorphe. b: débris ligneux translucide.

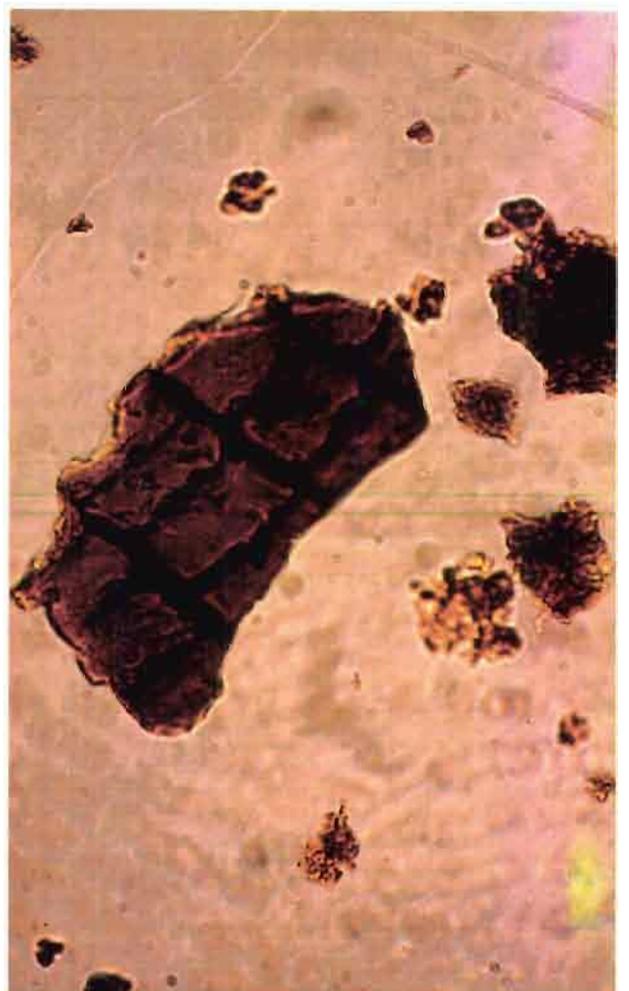
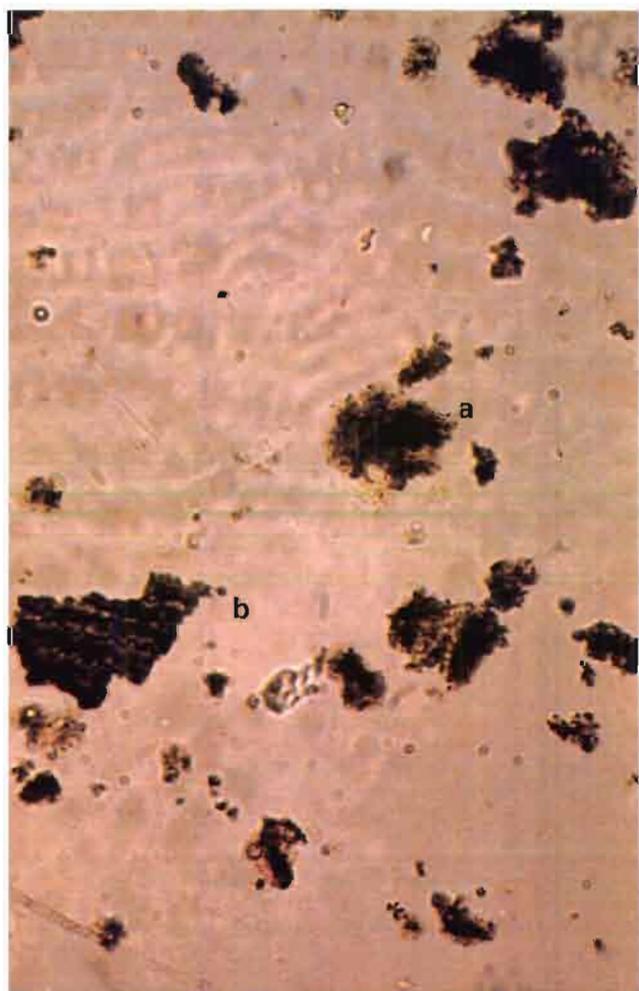
**Photo 12.** Débris ligneux translucide à structure cellulaire bien conservée



9 11



10 12



## PLANCHE IV CSS2

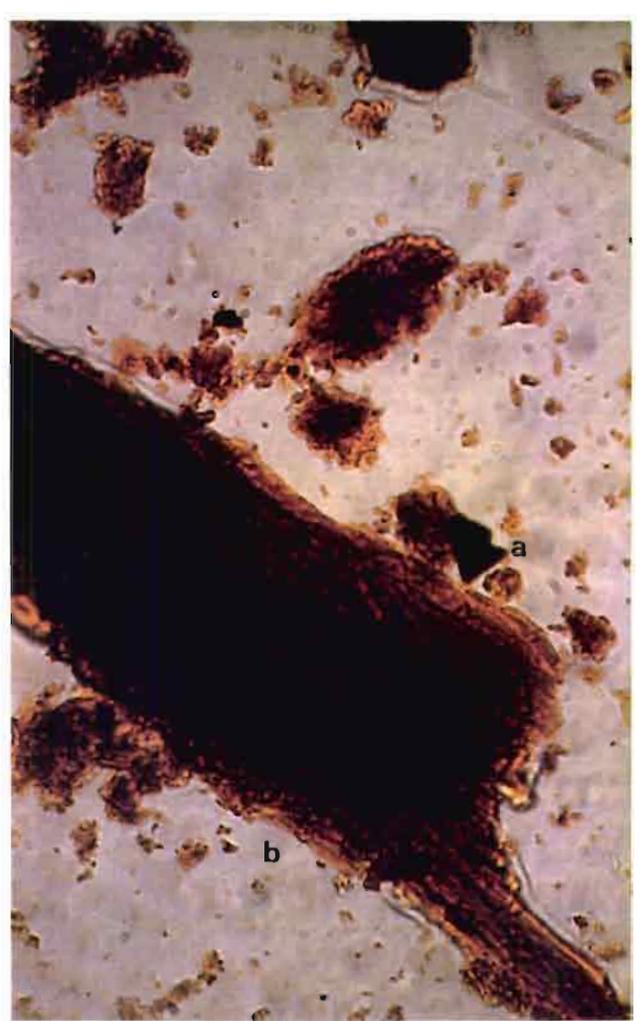
**Photo 13.** Palynofaciès du niveau organique sommital de la séquence IV (G x 25). (Lumière transmise). a: débris ligneux opaque. b: débris ligneux translucide.

**Photo 14.** Palynofaciès du niveau organique sommital de la séquence IV (G x 25). (Lumière transmise). a: débris ligneux opaque. b: débris ligneux translucide.

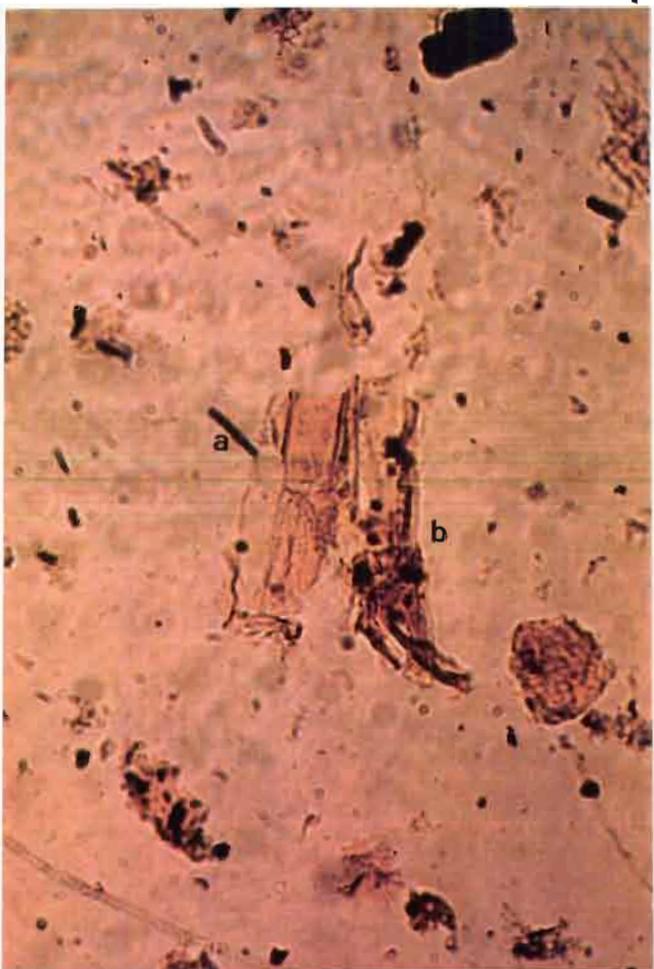
**Photo 15.** Palynofaciès du niveau organique sommital de la séquence IV (G x 50). (Lumière transmise). a: débris ligneux opaque. b: débris ligneux translucide.



13 15



14



ANNEXE 2  
TABLEAUX

Tableau n° II.1

| DATATION N°     | Profondeur (cm) | Age an B.P | Incertitude(+) | Incertitude(-) | Matériel | Méthode |
|-----------------|-----------------|------------|----------------|----------------|----------|---------|
| Bondy 210       | 40-47           | 2950       | 470            | -440           | C.org    | L.S     |
| Beta 32466      | 69-73           | 6160       | 80             | -80            | C.org    | P.C     |
| Bondy 209       | 100-107         | 7760       | 590            | -550           | C.org    | L.S     |
| Bondy 208       | 158-164         | 10460      | 850            | -770           | C.org    | L.S     |
| Beta 32212      | 205-206         | 12520      | 130            | -130           | C.org    | A.M.S   |
| Bondy 213       | 225-236         | 22870      | 2540           | -1930          | Bols     | L.S     |
| Beta 32467      | 230-233         | 23670      | 300            | -300           | Bols     | P.C     |
| Beta 32468      | 233-243         | 24530      | 620            | -620           | Bols     | P.C     |
| Bondy 442       | 269-277         | 31050      | 4000           | -2670          | Bols     | L.S     |
| Beta 32213      | 309-314         | 28660      | 450            | -450           | Bols     | P.C     |
| Groningen 16693 | 503-510         | 51200      | 1700           | -1400          | Bols     | P.C     |

P.C: Compteur proportionnel

L.S: Scintillation liquide

A. M.S: Spectrométrie de masses par accélérateur

**Tableau n°II.2**

| <b>Datation n°</b> | <b>Profondeur (cm)</b> | <b>Age an B.P</b> | <b>Incert (+)</b> | <b>Incert (-)</b> | <b>Matérièl</b> | <b>Méthode</b> |
|--------------------|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------------|
| <b>Beta 32214</b>  | <b>54-55</b>           | <b>1540</b>       | <b>80</b>         | <b>-80</b>        | <b>C.org</b>    | <b>L.S</b>     |
| <b>Bondy 607</b>   | <b>63-65</b>           | <b>1700</b>       | <b>350</b>        | <b>-340</b>       | <b>C.org</b>    | <b>L.S</b>     |
| <b>Bondy 606</b>   | <b>75-77</b>           | <b>2720</b>       | <b>340</b>        | <b>-330</b>       | <b>C.org</b>    | <b>L.S</b>     |
| <b>Beta 32215</b>  | <b>83-85</b>           | <b>3120</b>       | <b>60</b>         | <b>-60</b>        | <b>C.org</b>    | <b>L.S</b>     |
| <b>Beta 32471</b>  | <b>327-329</b>         | <b>33230</b>      | <b>680</b>        | <b>-680</b>       | <b>C.org</b>    | <b>L.S</b>     |

**P.C: Compteur proportionnel**

**L.S: Scintillation liquide**

**A. M.S: Spectrométrie de masses par accélérateur**

**Tableau IV.3**

| Profondeur(cm) | Densité(g/cm3) | H2O(%) | Profondeur(cm) | Densité(g/cm3) | H2O(%) |
|----------------|----------------|--------|----------------|----------------|--------|
| 7              | 1.40           | 91.04  | 319            | 1.45           | 87.01  |
| 13             | 1.37           | 91.16  | 325            | 1.40           | 87.14  |
| 19             | 1.36           | 91.07  | 331            | 1.35           | 87.96  |
| 25             | 1.37           | 90.34  | 337            | 1.35           | 88.10  |
| 31             | 1.35           | 87.85  | 343            | 1.40           | 88.29  |
| 37             | 1.34           | 88.57  | 349            | 1.40           | 86.67  |
| 43             | 1.30           | 88.69  | 354            | 1.50           | 87.33  |
| 49             | 1.37           | 88.47  | 360            | 1.55           | 88.14  |
| 55             | 1.29           | 87.53  | 366            | 1.40           | 88.54  |
| 61             | 1.26           | 87.76  | 372            | 1.40           | 88.39  |
| 67             | 1.40           | 87.40  | 378            | 1.45           | 88.39  |
| 73             | 1.35           | 87.02  | 390            | 1.45           | 87.33  |
| 79             | 1.34           | 86.18  | 396            | 1.45           | 87.28  |
| 85             | 1.33           | 85.59  | 402            | 2.20           | 89.26  |
| 91             | 1.36           | 86.36  | 408            | 2.30           | 63.13  |
| 97             | 1.30           | 87.47  | 414            | 1.75           | 82.87  |
| 103            | 1.25           | 90.03  | 420            | 1.75           | 73.57  |
| 109            | 1.25           | 90.93  | 426            | 2.50           | 65.33  |
| 115            | 1.40           | 91.24  | 432            | 3.15           | 32.43  |
| 121            | 1.28           | 88.60  | 438            | 3.10           | 38.14  |
| 127            | 1.53           | 87     | 444            | 3.10           | 40.78  |
| 133            | 1.42           | 86.63  | 450            | 3.10           | 37.62  |
| 139            | 1.57           | 87.11  | 456            | 3.05           | 43.80  |
| 145            | 1.68           | 82.93  | 462            | 3.10           | 45.97  |
| 151            | 1.80           | 80.33  | 468            | 3.10           | 42.55  |
| 157            | 2.40           | 77.55  | 474            | 2.85           | 47.98  |
| 163            | 2.26           | 80.92  | 480            | 2.35           | 85.20  |
| 169            | 2.30           | 77.35  | 489            | 1.42           | 87.00  |
| 175            | 2.35           | 76.75  | 495            | 1.40           | 87.18  |
| 181            | 2.65           | 70.33  | 517            | 1.45           | 84.61  |
| 187            | 2.58           | 70.13  | 523            | 1.45           | 84.18  |
| 193            | 2.62           | 67.62  | 529            | 1.40           | 85.50  |
| 199            | 2.77           | 60.85  | 535            | 1.35           | 85.34  |
| 205            | 2.70           | 62.44  | 541            | 1.30           | 85.23  |
| 211            | 2.76           | 55.36  | 547            | 1.30           | 85.59  |
| 217            | 2.70           | 59.69  | 553            | 1.30           | 85.63  |
| 223            | 2.30           | 60.08  | 559            | 1.40           | 85.01  |
| 229            | 1.63           | 76.97  | 565            | 1.45           | 83.77  |
| 235            | 1.53           | 80.81  | 571            | 1.80           | 76.11  |
| 241            | 1.50           | 81.94  | 577            | 2.50           | 55.54  |
| 247            | 1.47           | 83.12  | 583            | 2.70           | 45.78  |
| 253            | 1.52           | 83.84  | 589            | 3.00           | 49.51  |
| 259            | 1.53           | 83.13  | 595            | 3.00           | 49.35  |
| 265            | 1.50           | 83.84  | 601,5          | 3.20           | 41.15  |
| 271            | 1.60           | 82.88  | 607            | 3.25           | 35.06  |
| 277            | 1.65           | 83.59  | 613            | 3.30           | 39.79  |
| 283            | 1.70           | 85.19  | 619            | 3.20           | 38.73  |
| 289            | 1.70           | 84.29  | 625            | 3.25           | 35.19  |
| 295            | 1.50           | 84.97  | 630            | 3.25           | 33.40  |
| 301            | 1.40           | 85.61  | 637            | 3.10           | 44.75  |
| 307            | 1.55           | 82.25  | 643            | 3.15           | 45.34  |
| 313            | 1.50           | 83.17  | 649            | 3.20           | 42.70  |

**LA CAROTTE CSS2 LAC N°8 (SERRA SUL, CARAJAS, BRESIL)**

**Tableau IV.4**

| <b>Profondeur (cm)</b> | <b>Densité (g/cm3)</b> | <b>H2O (%)</b> |
|------------------------|------------------------|----------------|
| 33                     | 1,32                   | 89             |
| 39                     | 1,3                    | 88             |
| 49                     | 1,32                   | 88             |
| 60                     | 1,49                   | 86             |
| 69                     | 1,57                   | 87             |
| 75                     | 1,72                   | 81             |
| 81                     | 1,8                    | 77             |
| 90                     | 2,77                   | 52             |
| 94                     | 2,81                   | 45             |
| 98                     | 2,84                   | 47             |
| 101                    | 2,84                   | 50             |
| 106                    | 2,76                   | 58             |
| 113                    | 2,82                   | 58             |
| 121                    | 2,39                   | 69             |
| 127                    | 2,66                   | 77             |
| 133                    | 2,7                    | 74             |
| 139                    | 2,62                   | 75             |
| 145                    | 2,78                   | 74             |
| 151                    | 2,69                   | 71             |
| 157                    | 3,33                   | 52             |
| 163                    | 3,67                   | 47             |
| 169                    | 3,47                   | 49             |
| 175                    | 3,27                   | 43             |
| 181                    | 3,05                   | 47             |
| 190                    | 2,82                   | 67             |
| 196                    | 2,73                   | 69             |
| 206                    | 2,92                   | 51             |
| 215                    | 3,54                   | 59             |
| 218                    | 3,33                   | 60             |
| 224                    | 3,02                   | 65             |
| 233                    | 2,85                   | 74             |
| 239                    | 2,91                   | 76             |
| 245                    | 2,81                   | 78             |
| 251                    | 3,14                   | 81             |
| 257                    | 3,38                   | 75             |
| 263                    | 3,5                    | 64             |
| 269                    | 3,52                   | 68             |
| 275                    | 3,33                   | 68             |
| 281                    | 2,93                   | 73             |
| 287                    | 3,01                   | 72             |
| 293                    | 3,33                   | 73             |
| 299                    | 3,54                   | 51             |
| 305                    | 3,12                   | 64             |
| 311                    | 2,96                   | 74             |
| 317                    | 2,76                   | 70             |
| 323                    | 2,6                    | 62             |
| 332                    | 2,17                   | 55             |
| 338                    | 2,57                   | 56             |
| 344                    | 2,63                   | 66             |
| 350                    | 2,99                   | 71             |

**LA CAROTTE CSS10 LAC N°12 (SERRA SUL, CARAJAS, BRESIL)**

**Tableau IV.5**

| <b>Profondeur (cm)</b> | <b>Quartz (%)</b> | <b>Kaolinite (%)</b> | <b>Sidérite (%)</b> | <b>Spicules d'éponges (%)</b> |
|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------|
| 8                      | 0                 | 0                    | 0                   | 4                             |
| 14                     | 0                 | 0                    | 0                   | 7                             |
| 22                     | 0                 | 0                    | 0                   | 6,5                           |
| 26                     | 0                 | 0                    | 0                   | 10                            |
| 38                     | 0                 | 0                    | 0                   | 13                            |
| 44                     | 1,5               | 0                    | 0                   | 9                             |
| 52                     | 1                 | 0                    | 0                   | 8,5                           |
| 58                     | 1                 | 0                    | 0                   | 8,75                          |
| 64                     | 3                 | 0                    | 0                   | 8,5                           |
| 70                     | 2                 | 0                    | 0                   | 11                            |
| 76                     | 3                 | 0                    | 0                   | 8                             |
| 82                     | 7                 | 0                    | 0                   | 18                            |
| 88                     | 3                 | 0                    | 0                   | 11                            |
| 94                     | 7                 | 0                    | 0                   | 5                             |
| 107                    | 2                 | 1                    | 0                   | 6                             |
| 122                    | 4                 | 11                   | 0                   | 0                             |
| 134                    | 3                 | 9                    | 0                   | 0                             |
| 140                    | 2                 | 6                    | 0                   | 0                             |
| 152                    | 7                 | 15                   | 1                   | 0                             |
| 158                    | 6                 | 14                   | 20                  | 0                             |
| 170                    | 7                 | 11                   | 20                  | 0                             |
| 182                    | 7                 | 11                   | 5                   | 0                             |
| 212                    | 14                | 21                   | 24                  | 0                             |
| 230                    | 5                 | 18                   | 15                  | 0                             |
| 242                    | 6                 | 7                    | 0                   | 0                             |
| 254                    | 4                 | 5                    | 0                   | 0                             |
| 266                    | 5                 | 8                    | 0                   | 0                             |
| 272                    | 7                 | 10                   | 0                   | 0                             |
| 290                    | 6                 | 9                    | 0                   | 0                             |
| 302                    | 4                 | 8                    | 0                   | 0                             |
| 314                    | 6                 | 12                   | 0                   | 0                             |
| 326                    | 2                 | 3                    | 0                   | 0                             |
| 332                    | 1,5               | 2                    | 0                   | 0                             |
| 352                    | 1                 | 3                    | 0                   | 0                             |
| 370                    | 1,5               | 4                    | 0                   | 0                             |
| 394                    | 2                 | 8                    | 0                   | 0                             |
| 400                    | 1,5               | 2                    | 0                   | 0                             |
| 412                    | 6                 | 14                   | 0                   | 0                             |
| 424                    | 6                 | 20                   | 0                   | 0                             |
| 434                    | 10                | 11                   | 14                  | 0                             |
| 444                    | 4                 | 13                   | 75                  | 0                             |
| 454                    | 10                | 22                   | 49                  | 0                             |
| 466                    | 7                 | 16                   | 48                  | 0                             |
| 490                    | 1                 | 4                    | 62                  | 0                             |
| 512                    | 1,5               | 5                    | 0                   | 0                             |
| 542                    | 2,5               | 6                    | 0                   | 0                             |
| 562                    | 1,5               | 7                    | 0                   | 0                             |
| 578                    | 9,5               | 27                   | 0                   | 0                             |
| 590                    | 2                 | 23                   | 19,5                | 0                             |
| 608                    | 2,8               | 13                   | 36                  | 0                             |
| 614                    | 1,5               | 10                   | 60                  | 0                             |
| 628                    | 1,5               | 8,5                  | 44                  | 0                             |
| 638                    | 2                 | 14                   | 20                  | 0                             |

**LA CAROTTE CSS2 LAC N 8 (SERRA SUL, CARAJAS, BRESIL)**

**Tableau n°IV.6**

| <b>Profondeur (cm)</b> | <b>Quartz (%)</b> | <b>Kaolinite (%)</b> | <b>Sidérite (%)</b> | <b>Spicules (%)</b> |
|------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| 3                      | 1                 | 2                    | 0                   | 3                   |
| 12                     | 1                 | 1                    | 0                   | 6                   |
| 32                     | 1                 | 2                    | 0                   | 7                   |
| 48                     | 2                 | 2                    | 0                   | 8                   |
| 59                     | 5                 | 6                    | 0                   | 15                  |
| 68                     | 6                 | 5                    | 0                   | 10                  |
| 80                     | 7                 | 13                   | 0                   | 20                  |
| 89                     | 13                | 19                   | 0                   | 6                   |
| 100                    | 26                | 24                   | 0                   | 0                   |
| 112                    | 9                 | 45                   | 0                   | 0                   |
| 120                    | 6                 | 24                   | 0                   | 0                   |
| 132                    | 7                 | 37                   | 0                   | 0                   |
| 138                    | 5                 | 35                   | 2                   | 0                   |
| 150                    | 8                 | 37                   | 43                  | 0                   |
| 162                    | 1                 | 12                   | 44                  | 0                   |
| 168                    | 1                 | 9                    | 14                  | 0                   |
| 180                    | 3                 | 25                   | 15                  | 0                   |
| 189                    | 3                 | 26                   | 7                   | 0                   |
| 195                    | 11                | 40                   | 18                  | 0                   |
| 205                    | 9                 | 23                   | 61                  | 0                   |
| 211                    | 2                 | 13                   | 36                  | 0                   |
| 223                    | 2                 | 14                   | 14                  | 0                   |
| 232                    | 3                 | 12                   | 5                   | 0                   |
| 244                    | 10                | 11                   | 12                  | 0                   |
| 250                    | 5                 | 13                   | 5                   | 0                   |
| 262                    | 1                 | 6                    | 31                  | 0                   |
| 274                    | 1                 | 7                    | 9                   | 0                   |
| 280                    | 5                 | 12                   | 49                  | 0                   |
| 292                    | 2                 | 6                    | 95                  | 0                   |
| 298                    | 3                 | 2                    | 17                  | 0                   |
| 304                    | 4                 | 11                   | 18                  | 0                   |
| 310                    | 4                 | 26                   | 1                   | 0                   |
| 322                    | 12                | 38                   | 0                   | 0                   |
| 331                    | 7                 | 40                   | 0                   | 0                   |
| 337                    | 6                 | 39                   | 1                   | 0                   |
| 343                    | 5                 | 40                   | 20                  | 0                   |
| 349                    | 3                 | 35                   | 15                  | 0                   |

**CAROTTE CSS10 LAC N°12 (SERRA SUL, CARAJAS, BRESIL)**

**Tableau IV.7**

| Profondeur (cm) | P2O5 (%.) | Fe2O3 (%.) | Profondeur (cm) | P2O5 (%.) | Fe2O3 (%.) |
|-----------------|-----------|------------|-----------------|-----------|------------|
| 7               | 1,28      | 12,84      | 319             | 0,26      | 50         |
| 13              | 1,27      | 12,83      | 325             | 0,25      | 42         |
| 19              | 1,3       | 14,95      | 331             | 0,23      | 41         |
| 25              | 1,01      | 18,93      | 337             | 0,23      | 40,8       |
| 31              | 0,87      | 21,35      | 343             | 0,24      | 40,6       |
| 37              | 0,82      | 18,54      | 349             | 0,23      | 40,5       |
| 43              | 0,7       | 17,99      | 354             | 0,23      | 40,5       |
| 49              | 0,59      | 20,66      | 360             | 0,23      | 42         |
| 55              | 0,48      | 23,85      | 366             | 0,24      | 42,5       |
| 61              | 0,52      | 25,55      | 372             | 0,25      | 43,5       |
| 67              | 0,5       | 30,05      | 378             | 0,29      | 40,5       |
| 73              | 0,59      | 28,35      | 390             | 0,3       | 42         |
| 79              | 0,42      | 39,65      | 396             | 0,3       | 51,2       |
| 85              | 0,41      | 48,4       | 402             | 0,3       | 47,8       |
| 91              | 0,42      | 40,05      | 408             | 0,95      | 62         |
| 97              | 0,52      | 30,75      | 414             | 0,44      | 55         |
| 103             | 0,42      | 24,45      | 420             | 1,29      | 70         |
| 109             | 0,44      | 28,1       | 426             | 1,17      | 215,25     |
| 115             | 0,58      | 49,1       | 432             | 0,96      | 595        |
| 121             | 0,53      | 58         | 438             | 1,39      | 432,5      |
| 127             | 0,35      | 58,2       | 444             | 1,68      | 437,5      |
| 133             | 0,36      | 59         | 450             | 1,4       | 485        |
| 139             | 0,35      | 54,5       | 456             | 1,6       | 480        |
| 145             | 0,4       | 70         | 462             | 1,82      | 425        |
| 151             | 0,53      | 143        | 468             | 1,97      | 457        |
| 157             | 0,75      | 274        | 474             | 1,85      | 244,25     |
| 163             | 0,72      | 276        | 480             | 0,26      | 70         |
| 169             | 0,73      | 265        | 489             | 0,25      | 40,5       |
| 175             | 0,84      | 410        | 495             | 0,26      | 41         |
| 181             | 1,18      | 238        | 517             | 0,29      | 42         |
| 187             | 1,13      | 260        | 523             | 0,29      | 42,5       |
| 193             | 1,12      | 420        | 529             | 0,39      | 42,1       |
| 199             | 0,9       | 340        | 535             | 0,45      | 45,45      |
| 205             | 0,84      | 267        | 541             | 0,43      | 43,2       |
| 211             | 0,83      | 251        | 547             | 0,57      | 53,5       |
| 217             | 0,6       | 240        | 553             | 0,6       | 53         |
| 223             | 0,57      | 238        | 559             | 0,7       | 30         |
| 229             | 0,3       | 68,75      | 565             | 1,2       | 40         |
| 235             | 0,34      | 79         | 571             | 1,2       | 70         |
| 241             | 0,26      | 48,5       | 577             | 3,4       | 275        |
| 247             | 0,25      | 49         | 583             | 3,45      | 300        |
| 253             | 0,26      | 49,5       | 589             | 3,57      | 400        |
| 259             | 0,25      | 50         | 595             | 3,02      | 450        |
| 265             | 0,25      | 52         | 601,5           | 3,09      | 480        |
| 271             | 0,27      | 58         | 607             | 3,1       | 517        |
| 277             | 0,26      | 59,5       | 613             | 3,32      | 527        |
| 283             | 0,28      | 59,5       | 619             | 3,4       | 530        |
| 289             | 0,28      | 51,5       | 625             | 3,42      | 587        |
| 295             | 0,27      | 51         | 630             | 3,32      | 607        |
| 301             | 0,28      | 56,5       | 637             | 3,1       | 305        |
| 307             | 0,28      | 56         | 643             | 3,08      | 310        |
| 313             | 0,29      | 55         | 649             | 2,99      | 315        |

**LA CAROTTE CSS2 LAC N°8 (SERRA SUL, CARAJAS, BRESIL)**

**TABLEAU IV.8**

| <b>Profondeur (cm)</b> | <b>P2O5 (%)</b> | <b>Fe2O3 (%)</b> |
|------------------------|-----------------|------------------|
| 3                      | 4,55            | 48,95            |
| 13                     | 2,93            | 21,35            |
| 33                     | 1,82            | 23               |
| 39                     | 1,63            | 24,63            |
| 49                     | 1,63            | 29,7             |
| 60                     | 1,23            | 28,05            |
| 69                     | 0,83            | 29,08            |
| 75                     | 0,63            | 36,73            |
| 81                     | 0,58            | 52,6             |
| 90                     | 0,6             | 239,13           |
| 94                     | 0,45            | 180,63           |
| 98                     | 0,35            | 154              |
| 101                    | 0,25            | 44,08            |
| 106                    | 0,23            | 47,68            |
| 113                    | 0,2             | 44,08            |
| 121                    | 0,23            | 60,08            |
| 127                    | 0,24            | 57,85            |
| 133                    | 0,24            | 54,33            |
| 139                    | 0,23            | 61,63            |
| 145                    | 0,24            | 60,078           |
| 151                    | 0,28            | 61,85            |
| 157                    | 0,48            | 41,85            |
| 163                    | 0,55            | 526              |
| 169                    | 0,63            | 565,38           |
| 175                    | 0,53            | 372,25           |
| 181                    | 0,45            | 284              |
| 190                    | 0,39            | 101,13           |
| 196                    | 0,41            | 88,15            |
| 206                    | 0,35            | 227,5            |
| 209                    | 0,36            | 402              |
| 212                    | 0,36            | 473,25           |
| 215                    | 0,35            | 594,63           |
| 218                    | 0,35            | 483,88           |
| 224                    | 0,3             | 210              |
| 233                    | 0,28            | 209,25           |
| 239                    | 0,23            | 184,75           |
| 245                    | 0,3             | 150              |
| 251                    | 0,28            | 144,45           |
| 257                    | 0,4             | 507,38           |
| 263                    | 0,5             | 552,63           |
| 269                    | 0,5             | 519,75           |
| 275                    | 0,4             | 403,5            |
| 281                    | 0,3             | 183,45           |
| 287                    | 0,3             | 230              |
| 293                    | 0,35            | 461              |
| 299                    | 0,43            | 599              |
| 305                    | 0,4             | 424,5            |
| 311                    | 0,45            | 236,5            |
| 317                    | 0,6             | 147,5            |
| 323                    | 0,95            | 116,68           |
| 332                    | 1               | 88,43            |
| 338                    | 1,36            | 123,9            |
| 344                    | 1,46            | 140,88           |
| 350                    | 0,98            | 359,13           |

**LA CAROTTE CSS10, LAC N°12, (SERRA SUL, CARAJAS, BRESIL)**

**Tableau IV.9**

| Prof (cm) | C.O.T (%) | N (%) | C/N      | Prof (cm) | C.O.T (%) | N (%) | C/N      |
|-----------|-----------|-------|----------|-----------|-----------|-------|----------|
| 7         | 48        | 3,038 | 15,79987 | 319       | 53,56     | 1,204 | 44,48505 |
| 13        | 50,27     | 3,514 | 14,30563 | 325       | 59,66     | 1,176 | 50,73129 |
| 19        | 49,89     | 3,346 | 14,91034 | 331       | 48,89     | 1,26  | 38,80159 |
| 25        | 55,07     | 2,856 | 19,28221 | 337       | 53,58     | 1,12  | 47,83929 |
| 31        | 54,61     | 2,604 | 20,97158 | 343       | 50,08     | 1,288 | 38,88199 |
| 37        | 57,71     | 2,296 | 25,13502 | 349       | 44,96     | 1,12  | 40,14286 |
| 43        | 59,41     | 1,904 | 31,20273 | 354       | 44,44     | 1,19  | 37,34454 |
| 49        | 51,67     | 1,708 | 30,25176 | 360       | 45,48     | 1,19  | 38,21849 |
| 55        | 58,2      | 1,61  | 36,14907 | 366       | 49,76     | 1,372 | 36,26822 |
| 61        | 58,41     | 1,68  | 34,76786 | 372       | 47,93     | 1,288 | 37,21273 |
| 67        | 56,21     | 2,016 | 27,88194 | 378       | 48,36     | 1,302 | 37,14286 |
| 73        | 57,96     | 1,848 | 31,36364 | 390       | 45,07     | 1,246 | 36,17175 |
| 79        | 58,31     | 1,96  | 29,75    | 396       | 38,16     | 1,302 | 29,30876 |
| 85        | 57,78     | 2,005 | 28,81796 | 402       | 44        | 1,54  | 28,57143 |
| 91        | 58,41     | 2,142 | 27,26891 | 408       | 5,74      | 0,267 | 21,49813 |
| 97        | 56,39     | 1,96  | 28,77041 | 414       | 34,7      | 0,896 | 38,72768 |
| 103       | 56,21     | 1,862 | 30,18797 | 420       | 14,49     | 0,392 | 36,96429 |
| 109       | 51,24     | 2,198 | 23,3121  | 426       | 8,4       | 0,319 | 26,31579 |
| 115       | 50,75     | 2,226 | 22,79874 | 432       | 1,92      | 0,097 | 19,87578 |
| 121       | 38,05     | 1,47  | 25,88435 | 438       | 2,06      | 0,084 | 24,52381 |
| 127       | 38,93     | 1,33  | 29,27068 | 444       | 1,84      | 0,094 | 19,6162  |
| 133       | 38,32     | 1,26  | 30,4127  | 450       | 1,78      | 0,101 | 17,65873 |
| 139       | 38,19     | 1,33  | 28,71429 | 456       | 1,74      | 0,116 | 14,97418 |
| 145       | 28,12     | 0,798 | 35,2381  | 462       | 2,14      | 0,113 | 18,87125 |
| 151       | 15,78     | 0,616 | 25,61688 | 468       | 1,52      | 0,115 | 13,24042 |
| 157       | 12,02     | 0,42  | 28,61905 | 474       | 1,82      | 0,123 | 14,77273 |
| 163       | 17,37     | 0,546 | 31,81319 | 480       | 49,55     | 1,26  | 39,3254  |
| 169       | 10,19     | 0,35  | 29,11429 | 489       | 52,03     | 1,26  | 41,29365 |
| 175       | 8,51      | 0,336 | 25,32738 | 495       | 52,38     | 1,26  | 41,57143 |
| 181       | 4,62      | 0,351 | 13,16239 | 517       | 53,61     | 1,008 | 53,18452 |
| 187       | 3,47      | 0,311 | 11,16474 | 523       | 48,12     | 0,994 | 48,41046 |
| 193       | 3,76      | 0,32  | 11,73533 | 529       | 52,88     | 1,064 | 49,69925 |
| 199       | 2,39      | 0,213 | 11,2312  | 535       | 50,2      | 1,26  | 39,84127 |
| 205       | 2,4       | 0,211 | 11,35289 | 541       | 52,27     | 1,19  | 43,92437 |
| 211       | 2,31      | 0,168 | 13,75    | 547       | 46,67     | 1,148 | 40,65331 |
| 217       | 2,07      | 0,157 | 13,20153 | 553       | 51,09     | 1,204 | 42,43355 |
| 223       | 8,92      | 0,337 | 26,43746 | 559       | 49,41     | 1,4   | 35,29286 |
| 229       | 29,49     | 0,742 | 39,74394 | 565       | 36,4      | 1,288 | 28,26087 |
| 235       | 34,78     | 0,896 | 38,81696 | 571       | 24,07     | 0,714 | 33,71148 |
| 241       | 38,13     | 0,952 | 40,05252 | 577       | 4,2       | 0,214 | 19,60784 |
| 247       | 35,57     | 1,092 | 32,57326 | 583       | 3,53      | 0,164 | 21,55067 |
| 253       | 31,29     | 1,008 | 31,04167 | 589       | 2,25      | 0,148 | 15,16173 |
| 259       | 34,68     | 0,994 | 34,88934 | 595       | 2,18      | 0,144 | 15,11789 |
| 265       | 32,44     | 1,008 | 32,18254 | 601,5     | 1,85      | 0,118 | 15,73129 |
| 271       | 33,59     | 0,896 | 37,48884 | 607       | 1,73      | 0,087 | 19,93088 |
| 277       | 31,23     | 1,008 | 30,98214 | 613       | 1,95      | 0,101 | 19,34524 |
| 283       | 37,53     | 1,036 | 36,22587 | 619       | 2,01      | 0,087 | 23,15668 |
| 289       | 36,58     | 0,924 | 39,58874 | 625       | 1,82      | 0,098 | 18,57143 |
| 295       | 40,39     | 0,952 | 42,42647 | 630       | 1,92      | 0,092 | 20,77922 |
| 301       | 46,9      | 1,022 | 45,89041 | 637       | 2,08      | 0,146 | 14,28571 |
| 307       | 34,94     | 0,84  | 41,59524 | 643       | 1,77      | 0,157 | 11,28827 |
| 313       | 33,5      | 0,826 | 40,5569  | 649       | 2,12      | 0,141 | 14,99293 |

**LA CAROTTE CSS2 LAC N°8 (SERRA SUL, CARAJAS, BRESIL)**

**TABLEAU IV.10**

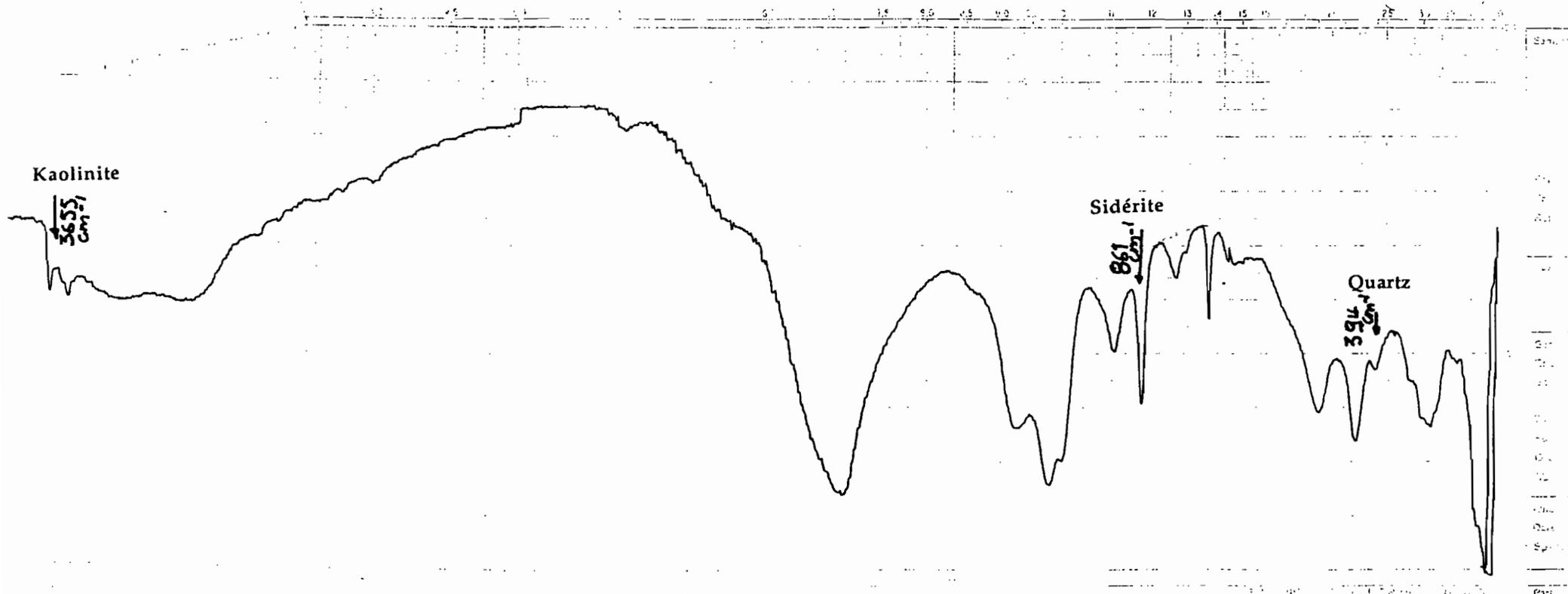
| <b>Profondeur (cm)</b> | <b>C.O.T.(%)</b> | <b>N (%)</b> | <b>C/N</b> |
|------------------------|------------------|--------------|------------|
| 3                      | 367              | 41,504       | 8,843      |
| 13                     | 410              | 39,672       | 10,335     |
| 33                     | 442              | 34,858       | 12,68      |
| 39                     | 431              | 34,956       | 12,33      |
| 49                     | 409              | 34,622       | 11,813     |
| 60                     | 435              | 29,24        | 14,877     |
| 69                     | 348              | 24,787       | 14,04      |
| 75                     | 283              | 18,453       | 15,336     |
| 81                     | 212              | 20,093       | 10,551     |
| 90                     | 26               | 1,638        | 15,873     |
| 94                     | 11               | 1,224        | 8,987      |
| 98                     | 10,1             | 1,229        | 8,218      |
| 101                    | 18,3             | 1,034        | 17,698     |
| 106                    | 16,2             | 1,417        | 11,433     |
| 113                    | 17               | 1,621        | 10,487     |
| 121                    | 19,2             | 1,327        | 14,469     |
| 127                    | 14               | 1,636        | 8,557      |
| 133                    | 18,1             | 1,589        | 11,391     |
| 139                    | 16,2             | 1,728        | 9,375      |
| 145                    | 14               | 1,488        | 9,409      |
| 151                    | 13,8             | 1,453        | 9,498      |
| 157                    | 7,6              | 0,807        | 9,418      |
| 163                    | 3,6              | 0,634        | 5,678      |
| 169                    | 3,6              | 0,573        | 6,283      |
| 175                    | 4,2              | 0,805        | 5,217      |
| 181                    | 4,5              | 0,995        | 4,523      |
| 192                    | 8,3              | 1,478        | 5,616      |
| 196                    | 9,5              | 1,553        | 6,117      |
| 206                    | 8,4              | 1,638        | 5,128      |
| 209                    | 5,3              | 1,086        | 4,88       |
| 212                    | 5,3              | 0,92         | 5,761      |
| 215                    | 6,4              | 0,697        | 9,182      |
| 218                    | 8,3              | 0,972        | 8,539      |
| 224                    | 9,1              | 1,805        | 5,042      |
| 233                    | 8,1              | 1,883        | 4,302      |
| 239                    | 8,4              | 1,977        | 4,249      |
| 245                    | 8,4              | 1,874        | 4,482      |
| 251                    | 8,2              | 2            | 4,1        |
| 257                    | 3,3              | 1,86         | 1,774      |
| 263                    | 5,3              | 0,942        | 5,626      |
| 269                    | 6,7              | 1,058        | 6,333      |
| 275                    | 8,7              | 1,816        | 4,791      |
| 281                    | 14,9             | 2,764        | 5,391      |
| 287                    | 19,3             | 2,472        | 7,807      |
| 293                    | 8,9              | 1,452        | 6,129      |
| 299                    | 4,5              | 0,775        | 5,806      |
| 305                    | 8,3              | 1,366        | 6,076      |
| 311                    | 11,5             | 1,692        | 6,797      |
| 317                    | 17,5             | 1,694        | 10,331     |
| 323                    | 76,3             | 1,873        | 40,737     |
| 332                    | 73,2             | 2,628        | 27,854     |
| 338                    | 59,3             | 2,555        | 23,209     |
| 344                    | 50,3             | 2,168        | 23,201     |
| 350                    | 35,7             | 1,145        | 31,179     |

**CAROTTE CSS10, LAC N°12 (SERRA SUL, CARAJAS, BRESIL)**

ANNEXE 3  
SPECTRES INFRAROUGE

CSS2

Echantillon 614-616 (cm) (1)



Kaolinite

Sidérite

Quartz

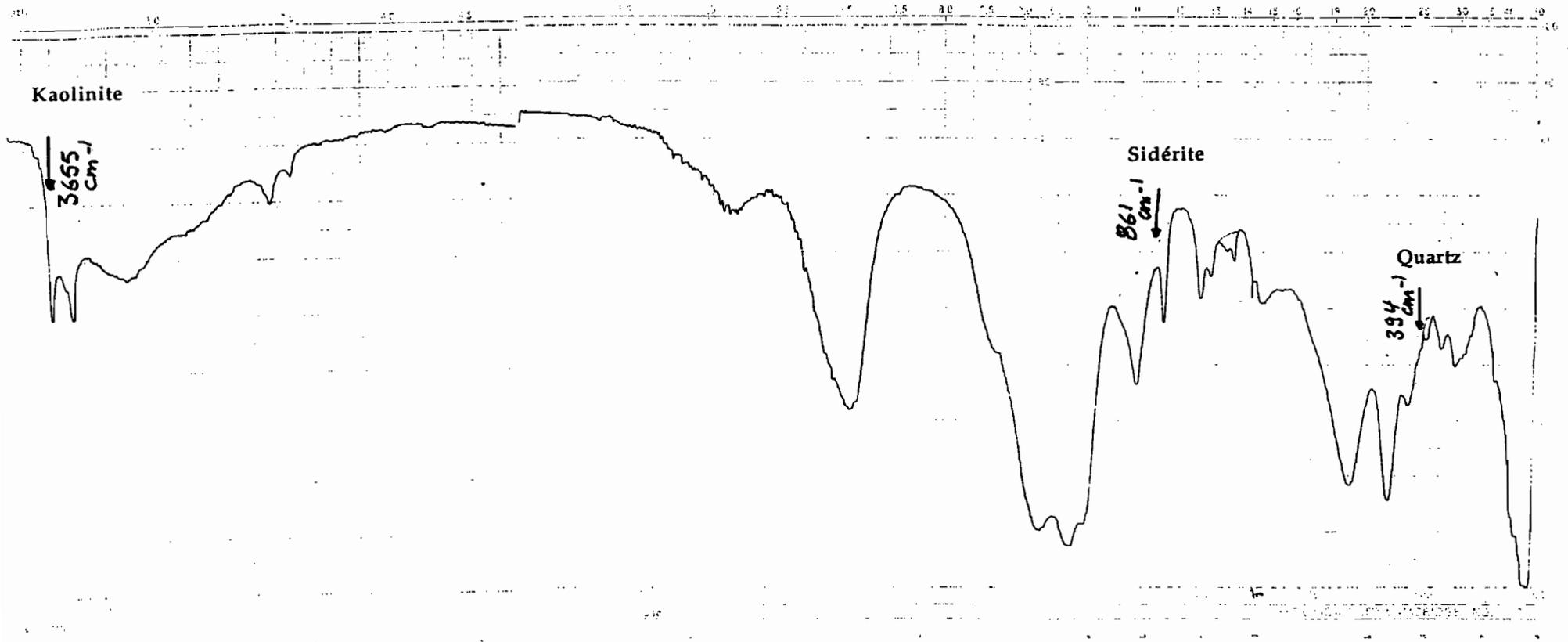
3655  
cm⁻¹

861  
cm⁻¹

394  
cm⁻¹

CSS2

Echantillon 424-426 (cm) (2)



Kaolinite

3655  
cm⁻¹

Sidérite

861  
cm⁻¹

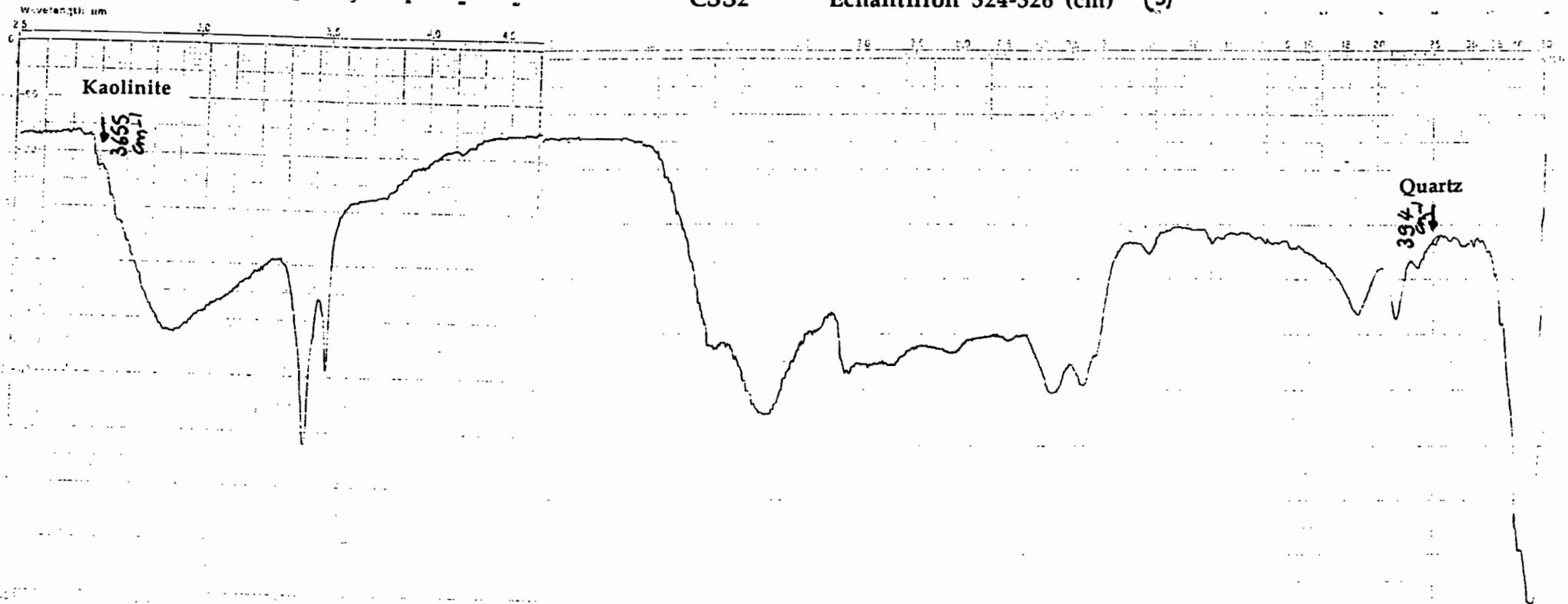
Quartz

394  
cm⁻¹

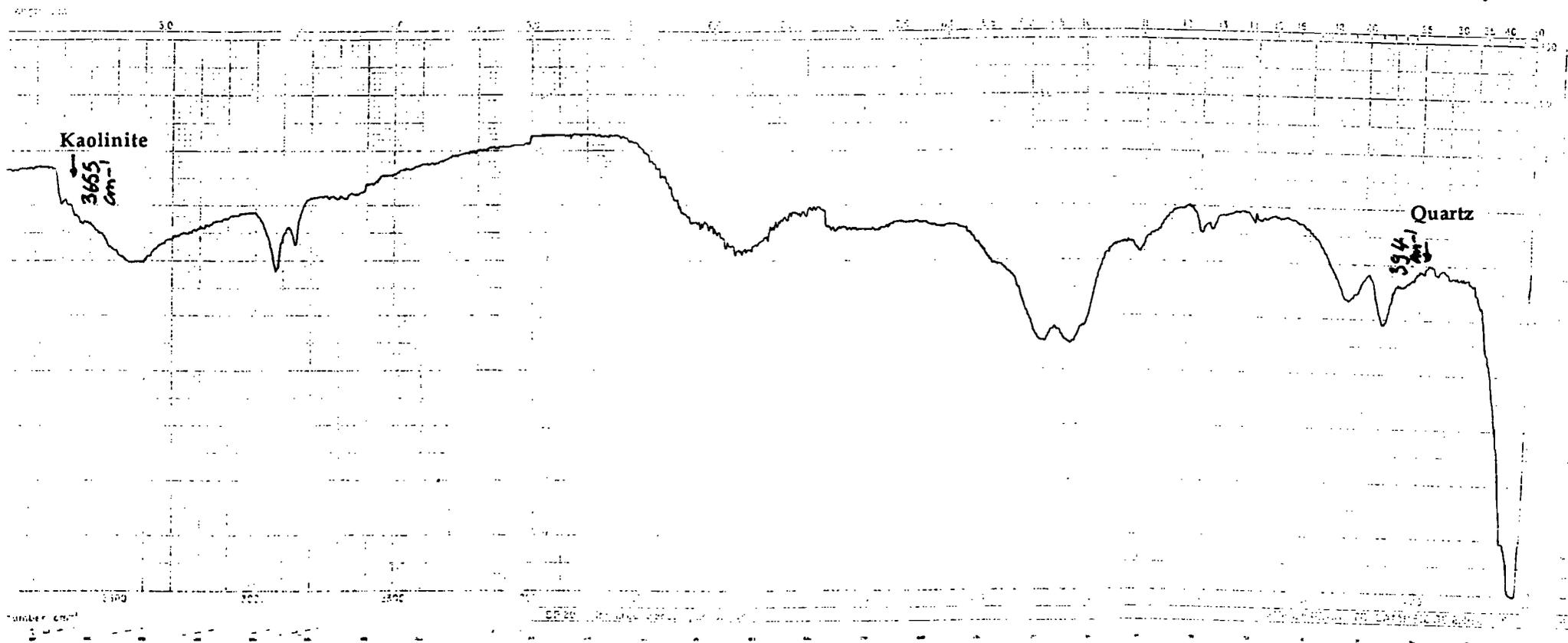
1000

CSS2

Echantillon 324-326 (cm) (3)



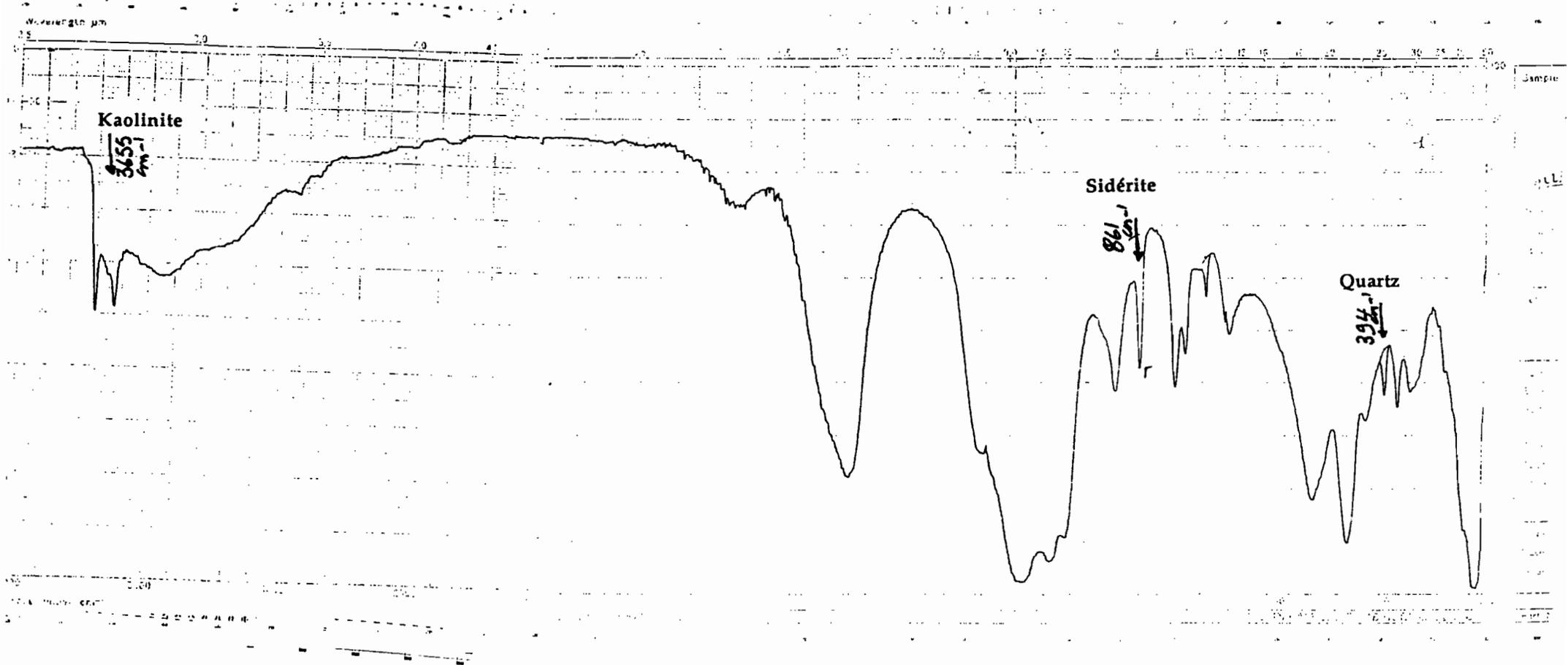
CSS2 Echantillon 254-256 (cm) (4)



Sample  
CSS2  
254/2

CSS2

Echantillon 212-214 (cm) (5)



Kaolinite

3655  
cm<sup>-1</sup>

Sidérite

861  
cm<sup>-1</sup>

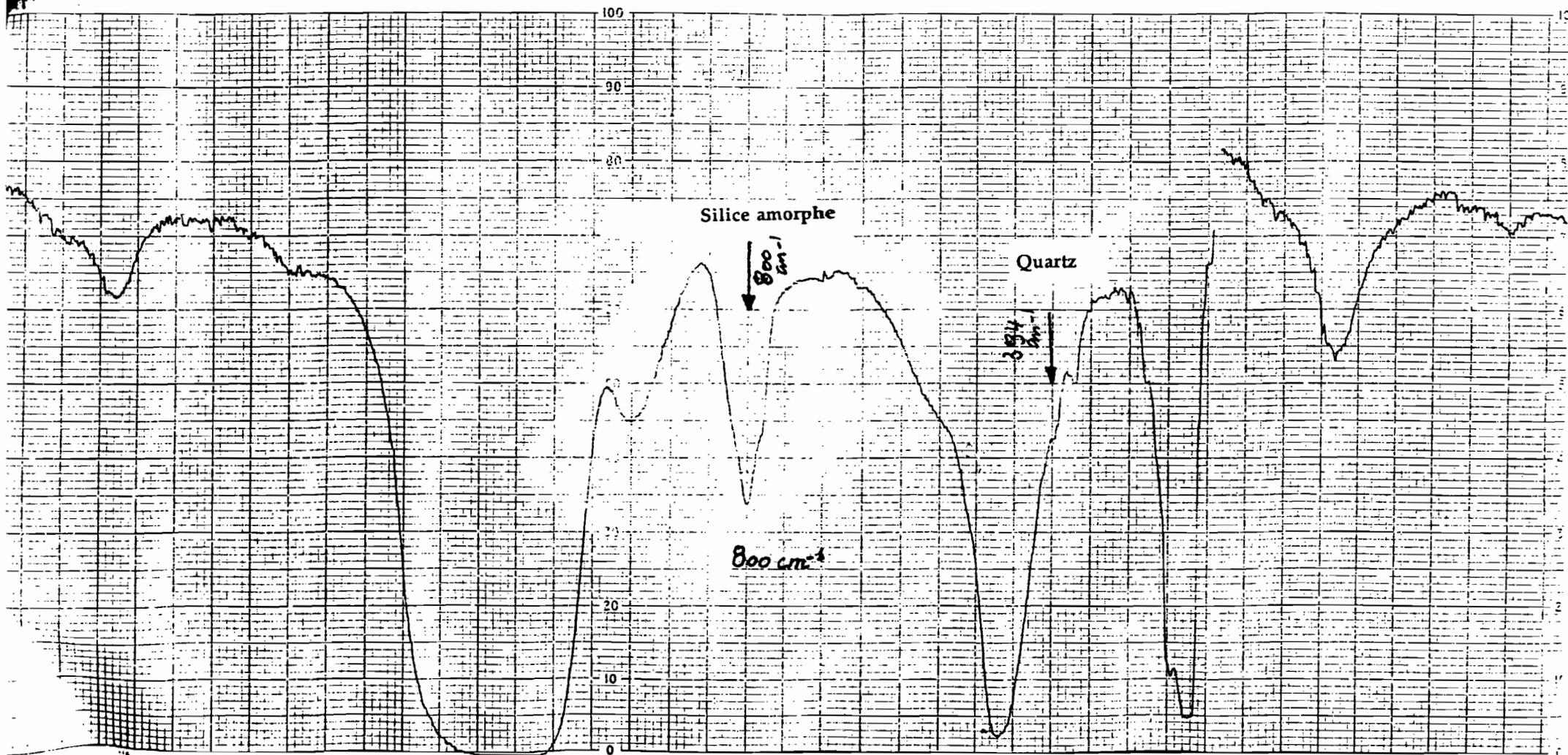
Quartz

394  
cm<sup>-1</sup>

CSS2

Echantillon 80-82 (cm)

(6)



**Mots clés:** Brésil, Amazonie, Radiocarbone, Spectrométrie Infrarouge, Pétrographie organique, Flux sédimentaires, Charbons, Paléoclimat, Paléoenvironnement, Pléistocène Supérieur, Holocène

La région de Carajas (5°50'-6°35' Lat. S, 49°30'-52°00' Long.W 720 m Alt) présente un double intérêt pour la reconstitution de l'environnement climatique du Quaternaire: située en position relativement haute elle échappe à la complexité de la dynamique fluviale des plaines amazoniennes; actuellement soumise à un climat relativement sec (1500-2000 mm/an) pour une zone à forêt dense humide, on peut penser qu'elle a été très sensible aux changements du climat.

Notre étude porte sur deux carottes prélevées dans des dépressions lacustres ou marécageuses situées au sommet d'un plateau cuirassé.

Les évaluations chronologiques basées sur des datations radiocarbones, montrent que la base de l'une des carottes recouvre les 60000 dernières années.

Le dosage des constituants est effectué par diverses techniques indépendantes. L'analyse spectrométrie infrarouge a été particulièrement privilégiée, car elle est bien adaptée à la nature du sédiment. Les résultats de cette analyse ont été à la base d'une évaluation de flux sédimentaires et en particulier ceux des constituants détritiques.

La caractérisation et l'évaluation en pourcentage relatif des différentes fractions organiques ont été réalisées par l'observation au microscope et le traitement d'images.

Les signaux identifiés par ces différentes approches méthodologiques et nos évaluations chronologiques sont interprétés en terme de paléoenvironnement.

Trois phases d'intenses érosion sur le bassin versant sont décelées par des valeurs maximales des flux détritiques et par la néoformation de carbonate de fer (Sidérite). Elles sont datées respectivement un peu après 60000, 40000, et entre 13000 et 11000 ans B.P. Chacune de ces phases succède à une période d'assèchement du lac: elles caractérisent la transition entre un climat sec et un climat humide.

L'Holocène est marqué, entre 7000 ans et 4000 ans B.P. par un flux maximum de matière organique lié à des apports en micro-charbons qui témoignent de fréquents incendies, et par des valeurs relativement faibles du flux détritique qui montrent que l'érosion n'a été que faiblement renforcée.

Ces résultats offrent un nouveau cadre à l'interprétation des données palynologiques obtenues par une étude réalisée parallèlement. Ils s'intègrent bien dans les connaissances récemment acquises sur les changements climatiques de l'Amérique tropicale au cours du Quaternaire récent.