

UNIVERSITE DE PARIS-SUD XI ORSAY



RESTITUTION DE LA DYNAMIQUE DE LA MOUSSON INDIENNE A PARTIR D'UNE ETUDE MULTITRACEURS



Réalisé par : Naoufel A. HADDAM

Encadré par : Sophie SEPULCRE

I. Introduction

II. Contexte de l'étude

II.1. La mousson

II.1.1. Système actuel

II.1.2. Variations dans le passé

II.2. La circulation océanique

II.2.1. La circulation océanique de surface

II.2.2. La circulation océanique profonde

II. 3. La sédimentation dans le Golfe du Bengale

III. Matériel et Méthodes

III. 1. Méthodes de prélèvement des carottes

III. 2. Etude des carottes à bord du Marion Dufresne

III.2.1. Manipulation des carottes

III.2.2. Les mesures MSCL (Multi-Sensor Core Logger)

IV. Résultats

IV. 1. Carotte MD12-3411 CQ

IV. 2. Carotte MD12-3412

IV. 3. Carotte MD12-3413 CQ

IV. 4. Carotte MD12-3414

V. Discussion

V. 1. Corrélation entre CASQ et CALYPSO

V. 2. Mise en âge des carottes

V.2.1 Carotte MD12-3412

V.2.2. Carotte MD12-3414

V.3. Variations de la susceptibilité magnétique en fonction de l'âge

V.3.1 Carotte MD12-3412

V.3.2. Carotte MD12-3414

V.4. Variations de la réflectance en fonction de l'âge

V.4.1 Carotte MD12-3412

V.4.2. Carotte MD12-3414

V.5. Comparaison entre MONO4 et MONO7

VI. Conclusion et perspectives

Remerciements :

Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans l'aide inestimable des mes enseignants : Sophie Sepulcre, Stéphanie Duchamp et Christophe Colin.

J'aimerais remercier tout particulièrement Sophie Sepulcre pour l'attention qu'elle m'a portée, son écoute, le temps qu'elle a consacré à mes questions et sa patience face à mes erreurs, ainsi que pour les nombreuses notions que j'ai apprises grâce à elle durant ce fabuleux stage.

Je remercie très chaleureusement l'organisateur de cette mission Franck Bassinot et le responsable de l'université flottante Bruno Malaizé, qui ont fait tout leur possible pour que nous, simples étudiants, puissions participer à cette mission scientifique très enrichissante.

Enfin, j'aimerais remercier mes camarades de classe Ronan et Elsa pour leur gentillesse, ainsi que tous les étudiants qui étaient présents à bord du Marion Dufresne pour l'ambiance à la fois studieuse et bon enfant qu'ils ont su créer.

I. Introduction :

La mousson est un phénomène climatique d'inversion du sens des vents qui touche les zones tropicales en Afrique, Amérique du sud et en Asie. La mousson en apportant des quantités importantes de précipitations dans ces régions, joue un rôle important dans des domaines tels que l'agriculture.

Il est très important d'étudier la mousson car ce phénomène climatique dont les dérèglements sont parfois très coûteux en vie et en biens, rythme la vie d'un tiers de la population mondiale, leur apportant l'eau nécessaire pour vivre.

Dans le contexte actuel et futur de réchauffement climatique, il est nécessaire de mieux comprendre le fonctionnement de la mousson actuelle pour mieux appréhender son évolution. Pour ce faire, l'étude du système de mousson dans le passé et de ses variations à l'état naturel sont donc indispensables. L'étude des archives climatiques telles que les carottes de sédiments marins permet de restituer les variations de la mousson dans le passé.

Le site d'étude de ce travail est la baie du Bengale car c'est une région qui est relativement peu étudiée (e.g., Colin et al., 1998, 1999, 2001, 2006) en comparaison avec la mer d'Arabie. L'intérêt de ce site repose notamment sur l'existence de zones à fort taux de sédimentation, ce qui est idéal pour une étude à haute résolution, mais également des dépôts à faible taux d'accumulation sédimentaire permettant de remonter sur de longues échelles de temps dans le passé. En outre, les sédiments qui s'accumulent en Baie du Bengale proviennent de l'érosion des chaînes de montagnes bordant le Golfe (en particulier la chaîne himalayenne). Or, l'érosion des surfaces continentales et la sédimentation qui en résulte sont intimement liées à la mousson. En effet, les précipitations qu'apporte la mousson érodent et altèrent la chaîne himalayenne, les sédiments issus de l'érosion de la chaîne sont transportés en aval dans la plaine par des fleuves, notamment le Gange et le Brahmapoutre, puis déversés dans la baie du Bengale. Puis ces sédiments sont dispersés par la circulation océanique au travers de la baie du Bengale.

Ainsi la dynamique de sédimentation dans le golfe du Bengale est complexe, de nombreux paramètres (climatiques, atmosphériques, océaniques) sont à prendre en compte avant d'étudier cette zone.

La mission Monsoon Paleovariability (MONOPOL) à bord du bateau scientifique Marion Dufresne, effectuée du 23 Mai au 15 juin 2012, a pour objectif de reconstituer la dynamique de la mousson asiatique à différentes échelles de temps depuis l'Holocène jusqu'aux cycles orbitaux, en étudiant les dépôts sédimentaires de l'éventail sous-marin profond du golfe du Bengale, à travers différentes méthodes :

- Carottages par les procédés types CASQ et CALYPSO.
- Prélèvements d'eau de surface et récolte du plancton.
- Prélèvements d'eau à différentes profondeurs en utilisant une rosette.
- Etude de l'interface sédiment-eau et des eaux interstitielles, grâce au multi-carottage d'interface (système « multi-core »).

Mon travail concerne deux carottes de type CASQ et deux carottes de type CALYPSO récoltées sur deux sites proches.

Ce rapport s'articule en différentes parties. Tout d'abord je présenterai le contexte de l'étude, où sont décrites la mousson, la circulation océanique et enfin la sédimentation dans le golfe du Bengale, qui est tributaire des deux premiers paramètres. Puis, le matériel et les méthodes, où seront présentées les carottes et les méthodes employées à bord du Marion Dufresne, et qui ont permis cette étude. Viendront en suite les résultats, où je décrirai le fruit des différentes mesures effectuées sur la carotte. Puis, je discuterai de ces résultats et j'en proposerai une interprétation. Et enfin la conclusion, dans laquelle je reviendrai sur les points essentiels de ce rapport et proposerai des perspectives à ce travail.

II. Contexte de l'étude

II.1. La mousson

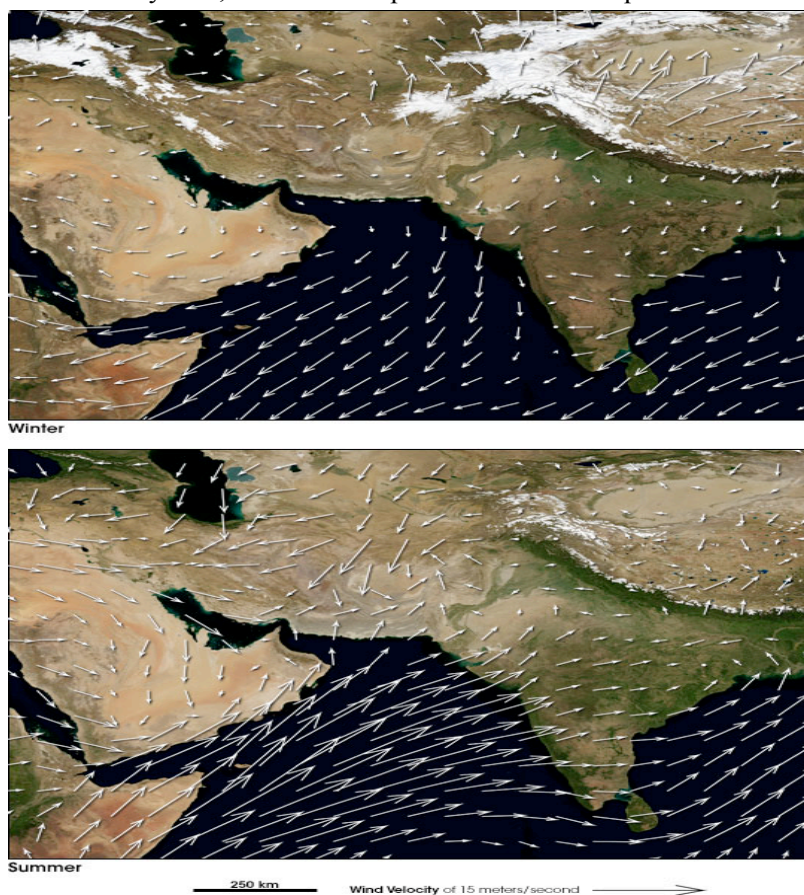
II.1.1. Système actuel

La mousson est un phénomène d'inversion saisonnière du sens des vents dominants (Figure 1). Ceci est dû à la différence d'inertie thermique entre l'océan et le continent : l'océan chauffe deux fois moins vite que le continent et a la possibilité d'évacuer la chaleur via l'évaporation et les échanges avec les couches d'eaux plus profondes et froides (une thermocline de plusieurs dizaines de mètres se crée à la surface des océans, contrairement au continent où la chaleur ne pénètre que de quelques décimètres).

Ainsi, durant l'été sur le continent asiatique, le plateau Tibétain au Nord se réchauffe plus et plus vite que l'océan indien au sud, il se crée alors une cellule de basse pression au dessus du plateau, ce gradient de pression atmosphérique génère des vents de Sud-ouest qui apportent avec eux l'humidité de l'océan ce qui provoque de fortes précipitations sur le continent.

Inversement, en hiver, le continent, se refroidit plus rapidement que l'océan, il en découle une cellule de haute pression au dessus du continent et des vents secs qui soufflent depuis le continent vers l'océan (vents Nord-est) avec de très faibles précipitations.

Le système de mousson d'été est très important dans cette région car il agit directement sur le taux d'érosion de la chaîne himalayenne, et sur le transport des sédiments qui découlent de cette érosion.



(Figure 1 : directions des vents pendant les moussons d'hiver (haut) et d'été (bas), source : NASA)

II.1.2. Variations dans le passé

Dans le passé, la mousson a été contrôlée par différents paramètres :

Paramètres orbitaux et cycles d'insolation

Au début du XXème siècle, l'astronome serbe Milutin Milankovitch suggère que les périodes de glaciations étaient induites par des changements dans les paramètres de l'orbite terrestre contrôlant le taux d'insolation sur la surface de la Terre. Ces paramètres sont :

- La Précession :

La précession est la rotation cyclique de l'axe de la terre qui détermine à quel moment de la rotation de la Terre autour du soleil, quel hémisphère fera face au soleil. Par exemple : si l'hémisphère Nord fait face au soleil durant le périhélie les étés y seront plus chauds (situation de la Terre il y a 11ka).

La précession s'effectue en cycles de 23 ka.

- L'obliquité :

L'obliquité est l'angle entre l'axe de rotation de la terre et le plan de l'écliptique. Cet angle varie entre 22,1° et 24,5° suivant une périodicité de 41ka (la valeur actuelle est de 23,5°).

- L'excentricité :

L'excentricité est la forme de l'orbite terrestre, qui varie dans le temps depuis un cercle ($e=0$) parfait jusqu'à une ellipse ($e=0,06$) suivant des cyclicités à 100 et 400 ka (la valeur actuelle est $e=0,0167$).

La précession et l'obliquité ne modifient pas l'énergie totale reçue par la Terre mais plutôt la distribution latitudinale et saisonnière de l'insolation reçue, notamment aux basses latitudes. Ce taux d'insolation est en étroite relation avec l'intensité de la mousson car il modifie les gradients thermiques entre l'océan et le continent (Colin, 1997).

Les variations de ces paramètres d'insolation induisent des cycles climatiques glaciaires et interglaciaires à l'échelle globale, qui influencent le système de mousson.

- Période Glaciaire :

Le continent Asiatique subit un refroidissement intense en hiver et un réchauffement faible en été, ce qui favorise les vents de Nord Est (mousson d'hiver) (Fontugne et Duplessy, 1985). Ce refroidissement intense est dû à la présence d'une calotte glaciaire plus étendue au pôle Nord, et probablement à la présence d'un glacier aux niveaux du plateau tibétain, dont l'existence n'est pas encore certaine (Colin, 1997).

- Période interglaciaire :

De manière inverse, le retrait plus au Nord de la calotte glaciaire permet un réchauffement plus intense de l'Asie en été accompagné d'hivers moins froids ce qui favorise les vents de Sud Ouest (mousson d'été).

Donc les périodes glaciaires favorisent les moussons de Nord-est (mousson d'hiver), les périodes interglaciaires favorisent la mousson de Sud-ouest, la plus intense dans le système climatique actuel (Fontugne et Duplessy, 1985).

Les circulations atmosphériques et thermo-halines

Les circulations atmosphériques et thermo-halines permettent de transférer la chaleur entre les pôles et les basses latitudes. Elles permettent aussi de diminuer le gradient thermique entre basses et hautes latitudes en transférant de la chaleur depuis l'équateur vers les pôles.

Ce gradient thermique est plus fort lors des périodes glaciaires, car la circulation océanique aux pôles est ralentie, ce qui empêche le rééquilibrage des températures.

Ce processus renforce le gradient thermique inter-hémisphérique et augmente les contrastes de température basses-hautes latitudes.

L'albédo

L'albédo est le rapport entre l'énergie solaire incidente et l'énergie réfléchiée par une surface. L'albédo des surfaces très réfléchissantes est fort, contrairement aux surfaces qui absorbent plus d'énergie telles que le sol et les végétaux.

Les cycles de réchauffement ou de refroidissement sont intensifiés par l'effet rétroactif de l'albédo.

Au pôle, les changements d'albédo liés à la taille de la calotte glaciaire renforcent notamment les glaciations. La forte réflexion des ondes solaires par la calotte glaciaire intensifie la glaciation (l'albédo de la glace est d'environ 60%). Inversement, après le retrait de la calotte durant les périodes interglaciaires, le continent absorbe plus d'énergie solaire et se réchauffe plus.

Les périodes interglaciaires sont caractérisées par une mousson d'été plus forte, ce qui induit des précipitations plus conséquentes, donc un couvert végétal plus étendu et dense. L'albédo des végétaux, qui varie entre 5 et 15%, est plus faible que celui du sol, par conséquent il se crée une rétroaction positive qui intensifie la mousson de Sud-ouest.

II.2. La circulation océanique

II.2.1. La circulation océanique de surface

Elle est soumise à l'influence des vents de la mousson : mousson d'été (vents de sud-ouest) développement d'une gyre anticyclonique et durant la mousson d'hiver (vents de Nord-est) développement d'une gyre cyclonique (Figure 2).

La circulation de surface annuelle moyenne durant l'Holocène est anticyclonique, contrairement au dernier maximum glaciaire où elle était cyclonique (Colin et al., 1999).

Cette différence de circulation est due au changement de direction des vents dominants associés au système de mousson entre l'Holocène et le dernier maximum glaciaire.

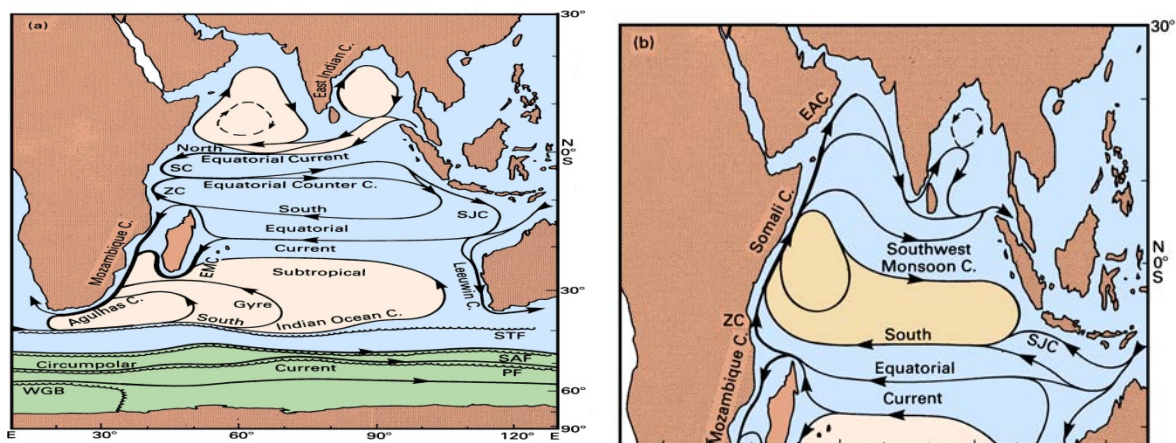


Figure 2 : gauche : circulation de surface durant la fin de la mousson de Nord-est (Mars-Avril)
Et droite : Circulation de surface durant la fin de la mousson de Sud-ouest (Septembre-Octobre)
La circulation en dessous de 20° S reste inchangée (Source : Tomczak et Godfrey, 2003).

II.2.2. La circulation océanique profonde

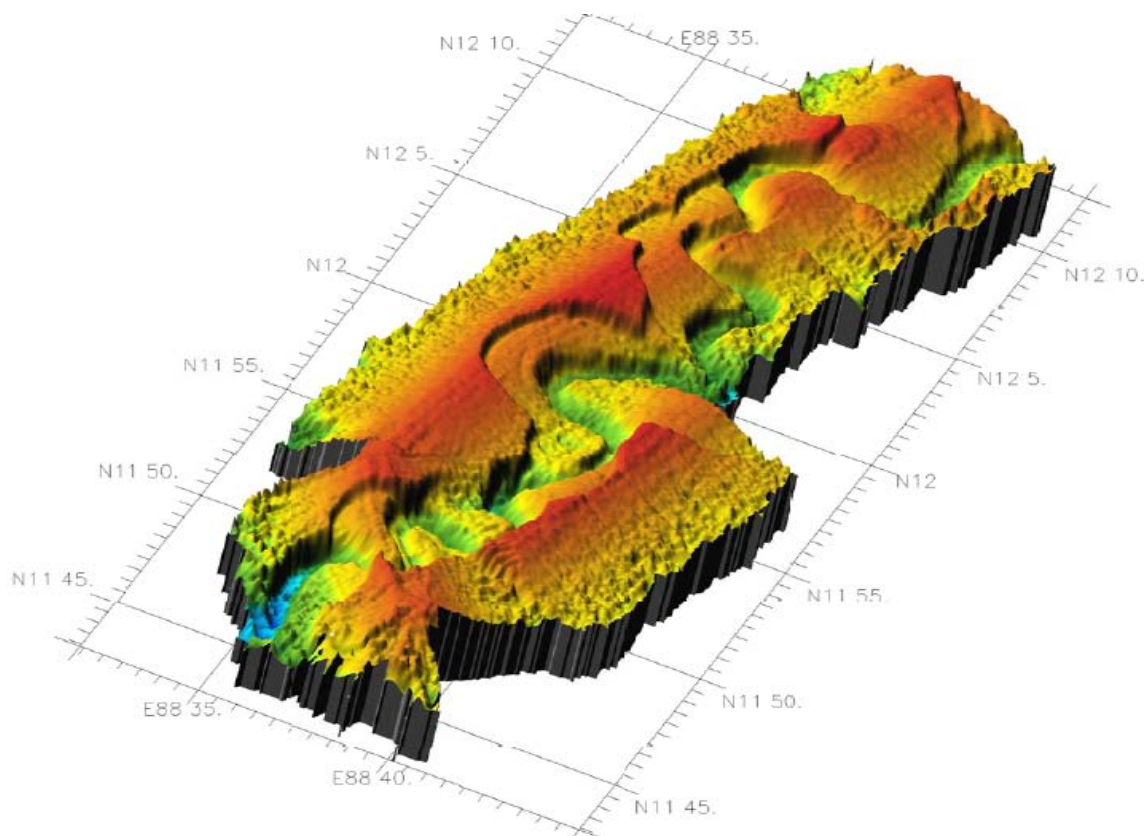
Les courants profonds dans le golfe du Bengale ne sont pas bien définis, ils sont liés aux eaux de fond antarctiques (Antarctic Bottom Water : AABW), et aux courants de turbidité (Colin, 1997).

Néanmoins les faibles taux d'oxygène (0,5 m/l à 600m et 0,2m/l à 200m, Figure 4) suggèrent un faible taux de renouvellement dans la baie (Tomczak et Godfrey, 2003 ; Stramma et al., 2008).

II. 3. La sédimentation dans le Golfe du Bengale

Du point de vue sédimentaire, ce golfe est le réceptacle du produit de l'érosion de la chaîne Himalayenne, qui est drainée par des systèmes fluviaux : le Gange et le Brahmapoutre, qui en se jetant dans la baie du Bengale, déposent des quantités colossales de sédiments qui débordent de la plateforme continentale indienne (où ils forment des lobes deltaïques très progradants : plusieurs dizaines de mètres par an) (Weber et al., 2003) puis sont canalisés par l'unique chenal actuellement actif dans la plateforme océanique, dans lequel les sédiments sont parfois soumis à des courants de turbidité. Cet éventail sous-marin est le plus grand au monde, avec un transport sur 3000 km vers le sud dans l'océan indien (Weber et al., 2003).

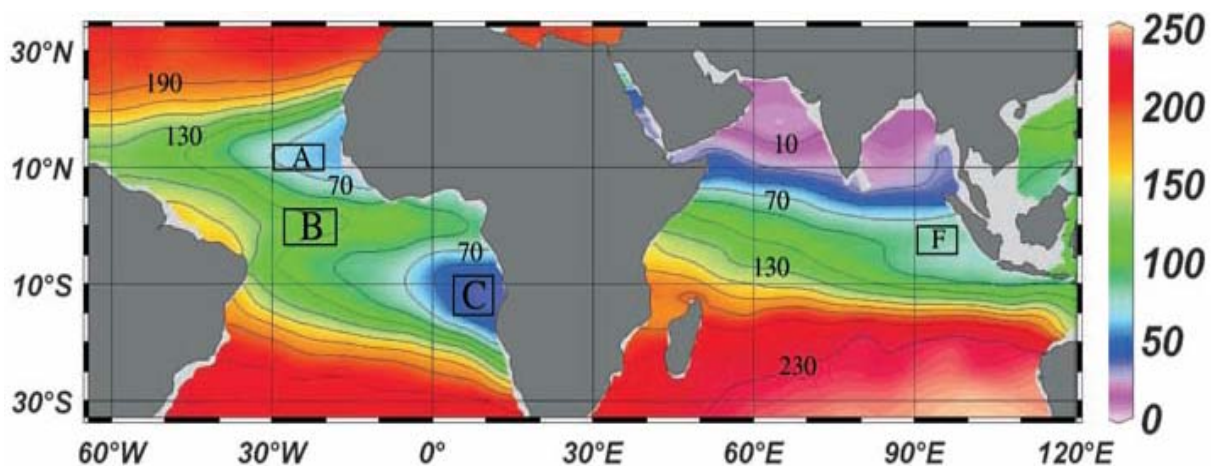
Morphologiquement ce chenal actif est méandrique, larges à certains endroits d'un kilomètre (en prenant en compte la largeur des levées le chenal fait 15km), les levées qui bordent le chenal sont haute de 100m maximum, les reconstitutions par imagerie et les profils topographiques subaquatiques laissent deviner quelques terrasses, et des méandres abandonnés (Figure 3).



(Figure 3 : reconstitution en 3D du chenal actif grâce aux instruments à bord du Marion Dufresne [Voir matériel et méthodes p. 6])

Le taux de sédimentation dans ce chenal est fort, entre 3 et 10 cm/ka (Colin, 1997), et le matériel grossier. Les levées sont composées d'un matériel plus fin qui se dépose par panaches.

La conservation de la matière organique dans le sédiment est favorisée car le golfe du Bengale se trouve dans une OMZ (zone de minimum d'oxygène, Figure 4), le milieu est sub-oxygène car le faible renouvellement des eaux du Golfe n'apporte pas assez d'oxygène pour oxyder la matière organique générée dans les couches superficielles très productives (Stramma et al., 2008).



(Figure 4 : taux d'oxygène dissous dans les océans, à 400m de profondeur, avec en violet les OMZ du golfe du Bengale et de mer d'Arabie. Les concentrations sont données en $\mu\text{mol kg}^{-1}$ [couleurs] [Stramma et al., 2008])

En synthèse, les principaux processus qui contrôlent la sédimentation dans le golfe du Bengale sont la circulation océanique et la mousson. La mousson contrôle la quantité des apports en sédiments, et la circulation océanique agit sur la distribution de ces sédiments.

III. Matériel et Méthodes

Quatre carottes, deux de type CALYPSO et deux de type CASQ, ont été prélevées dans deux sites différents :

- MONO 4 :

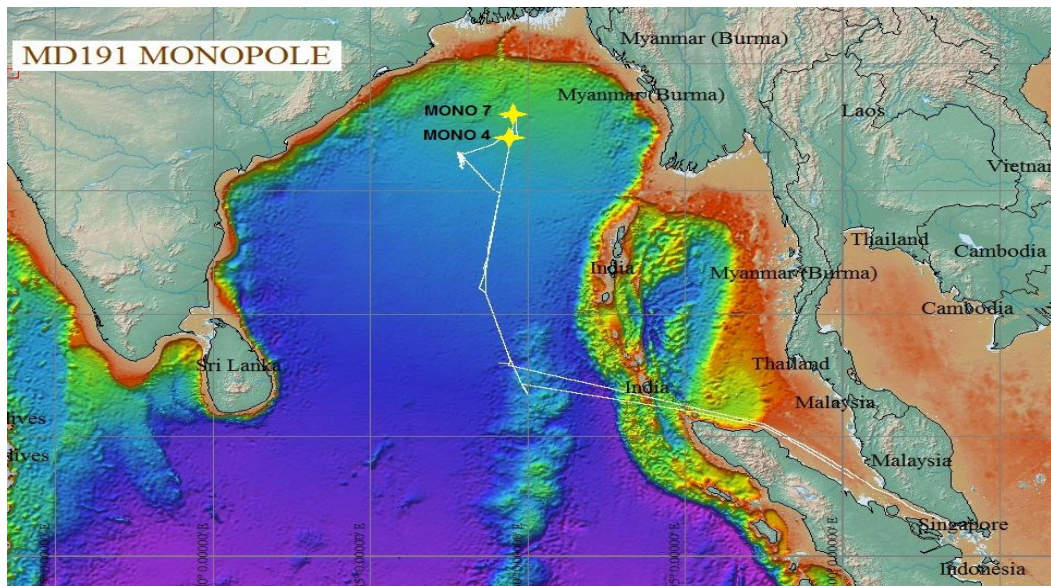
Ce site se trouve dans la partie Nord du golfe du Bengale, à la latitude $17^{\circ}10'94''\text{N}$ et à la longitude $89^{\circ}28'92''\text{E}$, à une profondeur d'eau de 2368m.

Les carottes MD12 34-11 CQ (de type CASQ), et MD12 34-12 (CALYPSO) y ont été prélevées le 31 Mai 2012.

- MONO 7 :

Le site MONO 7 est proche du site MONO 4 à une latitude de $18^{\circ}01'67''\text{N}$ et une longitude de $89^{\circ}42'08''\text{E}$, à une profondeur d'eau de 2150m. Les carottes MD12 34-13 CQ et MD12 34-14 y ont été prélevée le 1^{er} Juin 2012.

Ces deux sites de carottages sont proches l'un de l'autre séparés d'environ 100 km (Figure 5).



(Figure 5 : Emplacement des sites Mono 7 et 4 dans le golfe du Bengale. Le trait blanc représente le trajet du Marion Dufresne au cours de cette mission. Source : Marion Dufresne)

III. 1. Méthodes de prélèvement des carottes

Choix du site

Avant de carotter il faut choisir le site adéquat, en fonction de la résolution temporelle souhaitée et des outils qui seront appliqués.

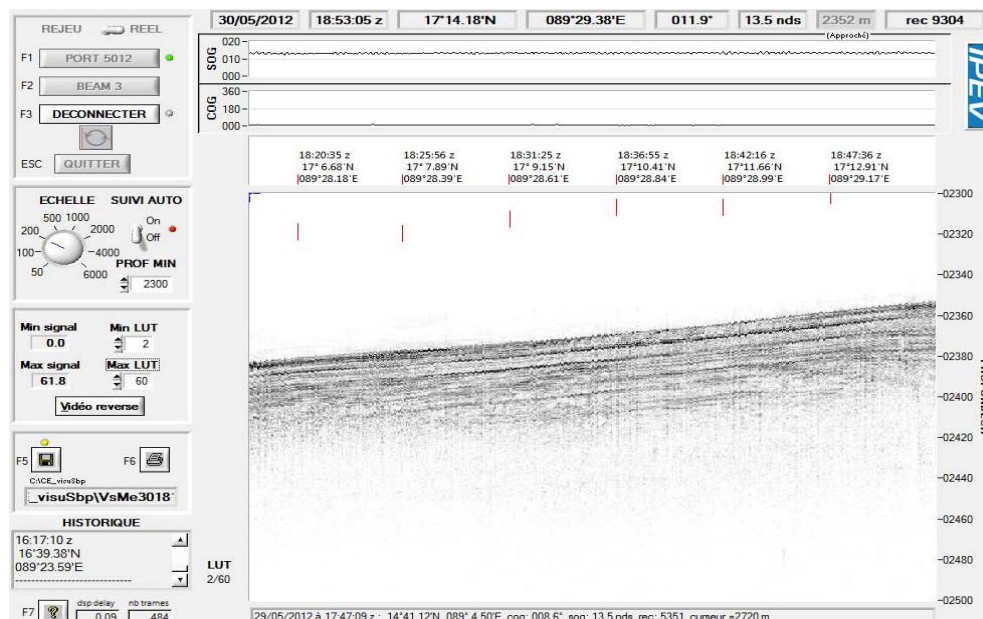
Dans le cadre de cette étude, la zone qui nous intéresse est celle de l'éventail sous marin du golfe du Bengale, où les sédiments meubles permettent le carottage. La pile sédimentaire doit être assez épaisse pour permettre le carottage des sédiments marins.

Ce choix est possible en utilisant l'échosondeur Seafalcon 11 dont est muni le Marion Dufresne. Cet outil fonctionne en deux modes :

1) Grâce à des faisceaux d'ondes acoustiques émises puis réfléchies par le fond océanique on obtient une cartographie de la topographie sous-marine qui permet de choisir précisément à quel endroit du chenal sous marin la carotte sera prélevée.

2) De la même manière, la réflexion des ondes de plus basse fréquence sur les strates du sédiment permet d'établir un profil de sub-surface avec une pénétration pouvant aller jusqu'à 100m dans le sédiment pour une profondeur océanique de 4000m (Figure 6 et Annexe 1).

Ces deux mesures sont effectuées durant la reconnaissance sous-marine (« survey ») effectuée à chaque station.



(Figure 6: Profil de sub-surface durant le « survey » de la station MONO 4)

Modes de carottages

- Le CASQ :

Le CASQ (calypso square-core system) est un système de carottage gravitaire, de forme carrée, et large (25 * 25 cm).

Les carottes obtenues grâce à ce système peuvent atteindre une longueur de 12m, et contiennent une grande quantité de sédiment, qui sont souvent continus et avec un sommet très peu perturbé.



(Figure 7: récupération d'un CASQ)

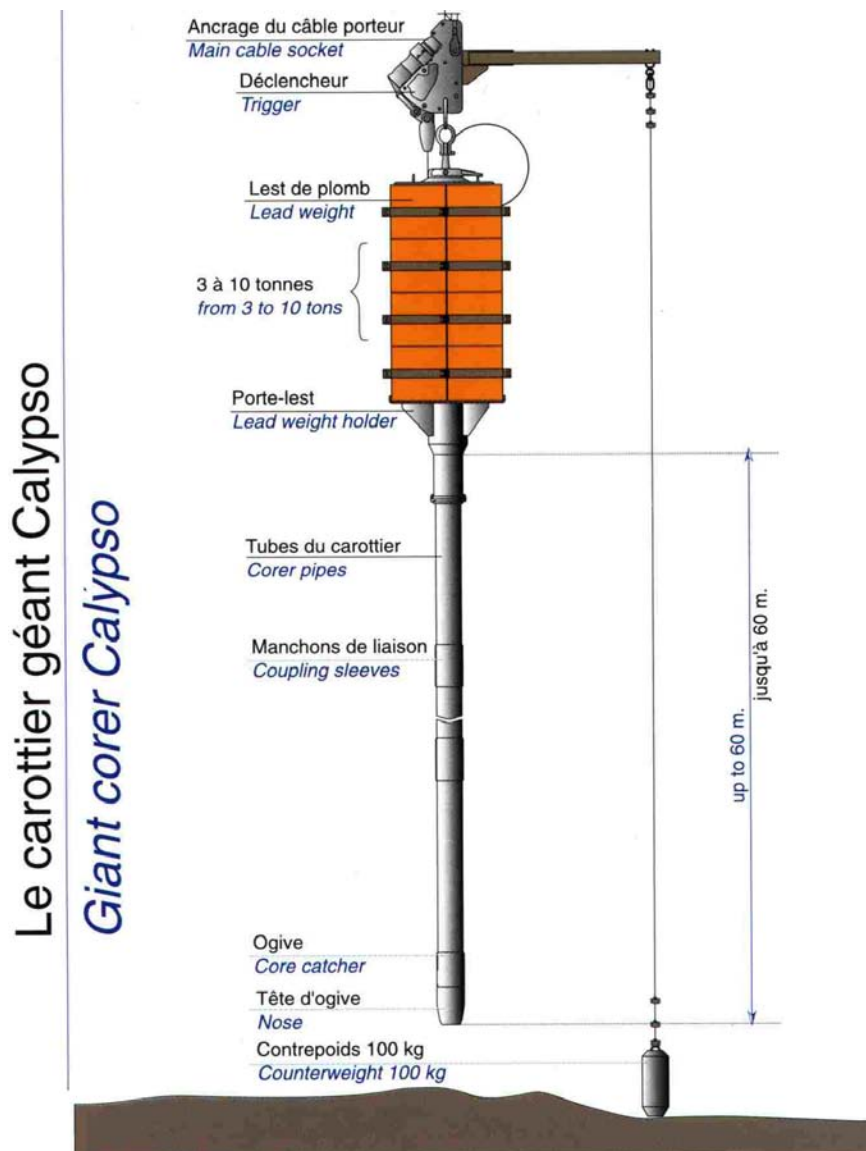
- Le CALYPSO :

Le système CALYPSO est composé de 4 parties :

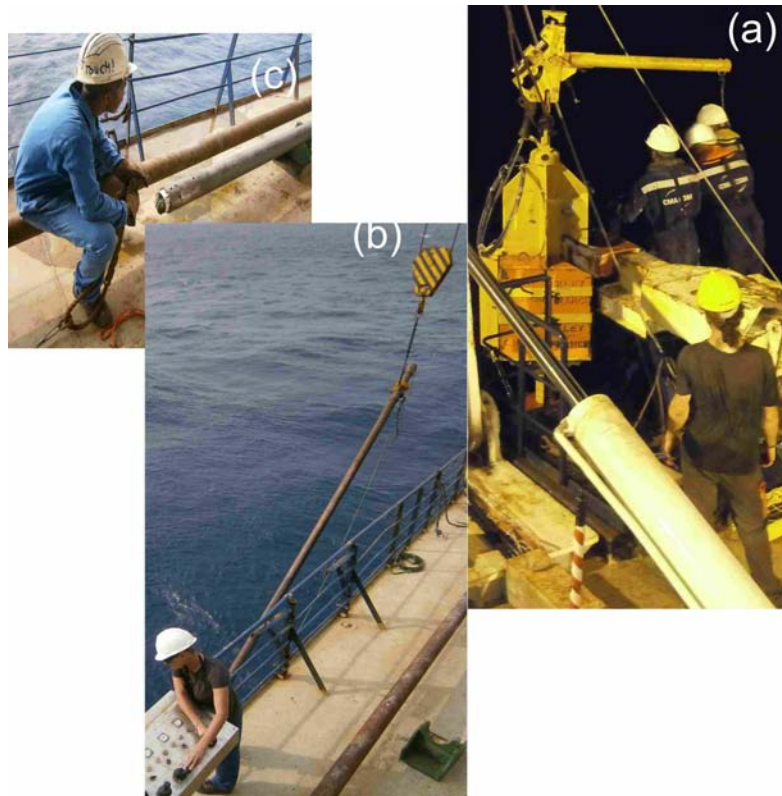
Un déclencheur au sommet, d'un lest de plomb, des tubes du carottier et d'une ogive à la base qui facilite la pénétration dans le sédiment (Figure 8).

Le principe du carottage CALYPSO est de joindre le type de carottage gravitaire au type « seringue » grâce au déclencheur, qui s'active dès que le contrepooids atteint la surface du sédiment. Une fois activé, le piston est maintenu en place tandis que le tube entre dans le sédiment, il se crée un vide dans le tube au moment où il pénètre par gravité dans le sédiment meuble.

Cette technique permet d'éviter, la plupart du temps, les effets de pistonage et de compaction des strates.



(Figure 8: schéma descriptif du carottier Calypso)



(Figure 9: carottage Calypso, (a) préparation du carottier (b) et (c) récupération de la carotte)

En synthèse, ces deux types de carottages sont complémentaires car :

- Les comparaisons entre CASQ et CALYPSO permettent de vérifier et évaluer l'effet du pistonnage dans les carottes CALYPSO.
- Le CASQ est plus large donc les sédiments à l'intérieur sont moins déformés par les bords du carottier lors de sa pénétration dans le sédiment et permettent d'obtenir une interface intacte alors qu'elle est très perturbée par le système CALYPSO.
- Les carottes CALYPSO permettent d'obtenir des carottes plus longues que les CASQ, et couvrent donc de plus grandes échelles de temps.

III. 2. Etude des carottes à bord du Marion Dufresne

III.2.1. Manipulation des carottes

Hors de l'eau, la carotte est découpée en tronçon de 1.5m, puis dans le sens de la longueur en deux parties, une partie « archive » et une partie « travail ».

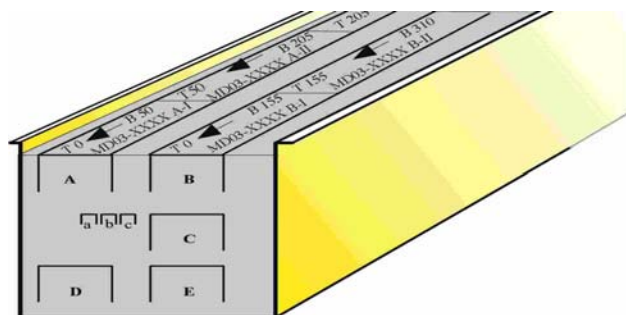
Les parties « archive » sont labellisées puis directement emballées et mises dans un container réfrigéré, avant d'être transférées vers une carothèque au froid où elles seront conservées intactes.

Les parties « travail » sont labellisées puis photographiées et décrites. Des échantillons sont parfois prélevés dans les tronçons les plus intéressants.

Enfin les mesures physiques (décrites ci-dessous) sont effectuées avant qu'elles ne soient emballées et stockées.

Les sédiments du CASQ sont prélevés en utilisant des demi-tubes plastiques en forme de U (D tubes). Chacun de ces D tubes mesure 1.5m, et représente une seule section.

On prélève parfois ces D tubes sur plusieurs couches pour avoir plus d'échantillons (Figure 10).



(Figure 10 : prélèvement de D tubes dans un CASQ sur 3 couches)

La labellisation est importante, car on note où se trouve le sommet, la base, et le matricule de la carotte. Par exemple :

T 150 MD12-3412 II A B 300

‘MD12’ pour la mission du Marion Dufresne 2012, ‘3412’ est le numéro de la carotte pour cette mission, ‘II’ est le numéro de la section, ‘A’ pour la partie archive (et ‘W’ pour la partie travail), ‘T150’ est le sommet de la section qui se trouve à 150cm dans le sédiment, ‘B300’ est la base de la section qui se trouve à 300cm dans le sédiment.

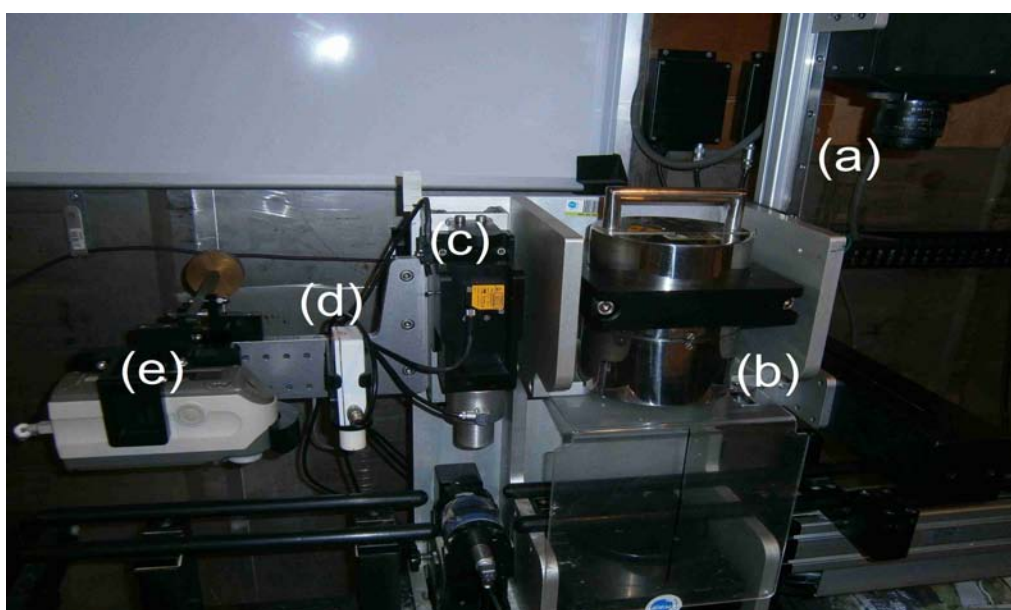
Pour les CASQ on ajoute la notation CQ après le numéro de section pour indiquer que l’échantillon provient d’un CASQ.

III.2.2. Les mesures MSCL (Multi-Sensor Core Logger)

Les mesures physiques sont effectuées directement après la découpe et la description des sections « travail » à bord du Marion Dufresne, au niveau du banc de mesure doté d’un Geotek Multi-Sensor-Core-Logger, muni d’un appareil photo qui numérise la carotte à haute résolution, d’un gamma-ray système, d’un appareil de mesure de la vitesse des ondes P, d’un appareil de mesure de la susceptibilité magnétique et d’un spectrophotomètre.

Les demi-carottes glissent sur un rail pendant que les outils de mesure s’abaissent tout les 2cm pour effectuer la mesure (Figure 11).

Pour que les outils ne soient pas contaminés par les sédiments des demi-carottes, un film plastique fin et transparent recouvre ces dernières.



(Figure 11 : les appareils de mesure du banc MSCL : (a) appareil photo (b) gamma ray système (c) vitesse des ondes P (d) susceptibilité magnétique et (e) spectrophotomètre)

Photo et description

Pour chaque section de carotte 3 photos de 50 cm sont prises automatiquement avec un appareil photo AGFA, dans le banc MSCL, après calibration du blanc et du noir.

Ces 3 photos sont combinées pour former une seule et unique photo par section, sans qu'il n'y ait de perte de résolution. Puis les photos de 15 sections d'une même carotte sont rassemblées dans un tableau avec une baisse de résolution afin d'optimiser la taille du fichier.

Avant d'effectuer la suite des mesures physiques, les sections sont décrites sur la partie « travail ». C'est une description détaillée durant laquelle les faciès sont déterminés, ainsi que les structures qu'elles soient naturelles ou issues des perturbations lors du carottage. Des frottis sont effectués pour observation microscopique, et la couleur des sédiments est régulièrement prise au sein du tronçon avec un Spectrophotomètre Minolta portatif (voir explications du système ci-dessous).

Le Gamma ray

Un faisceau de rayons gamma d'un diamètre de 5mm est émis (à partir de la désintégration d'une source de Césium 137 avec une énergie de 0,662 Mev, logée dans un cylindre de plomb de 150mm) perpendiculairement aux demi carottes.

Les photons passent à travers la carotte et sont détectés de l'autre côté.

Le gamma-ray, en prenant en compte l'épaisseur de la demi-carotte, nous donne des informations sur la densité du matériel traversé grâce à l'équation :

$$\rho = (1/\mu*d) * \ln (I0/I)$$

Où :

ρ = densité du sédiment

d = épaisseur du sédiment

μ = coefficient d'atténuation

I0 = intensité de la source gamma

I = intensité mesuré à travers l'échantillon.

La porosité peut être obtenue à partir de la densité en supposant que:

- Le sédiment soit complètement saturé
- la densité de grains soit connue (mineral grain density : MGD = 2,75)
- la densité du fluide soit connue (water density : WD = 1,026)

A partir de là, la porosité est obtenue grâce à l'équation :

$$FP \text{ (fractional porosity)} = (MGD-\rho)/(MGD-WD)$$

La vitesse des ondes P

Des ondes sismiques compressives (P) sont générées et envoyées à travers le sédiment, le temps de parcours en leur sein est mesuré avec une précision de 1,5 m/s. Quelques gouttes d'eau sont répandues sur la surface du film protecteur de la demi-carotte afin d'améliorer le contact acoustique entre le sédiment et l'émetteur d'ondes P.

Comme pour le gamma ray, l'épaisseur du sédiment est prise en compte et est mesurée automatiquement, car les changements fréquents de l'épaisseur du sédiment dans les demi-tronçons peuvent biaiser les résultats du gamma ray et de la vitesse. De plus, la température du sédiment est prise, car elle affecte le calcul de la vitesse.

La vitesse des ondes P est donnée par l'équation :

$$V = H / TT$$

Où H est l'épaisseur du sédiment et TT est le temps de parcours de l'onde dans le sédiment.

La densité et la vitesse sont des indicateurs qui varient en fonction de la granulométrie (et donc de la porosité) des sédiments et des fluides qui remplissent les pores, ils augmentent conjointement avec l'augmentation de la taille des grains : plus les grains sont gros plus il y a de contacts entre eux, l'air et l'eau dans les pores freinent les ondes P et font baisser la densité. Il existe des exceptions : l'opale a une faible densité et une forte vitesse, le carbone biogène a une forte densité et une faible vitesse (Weber et al., 2003).

La susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique est mesurée automatiquement à l'aide d'un instrument type Bartington.

La susceptibilité est sensible au diamagnétisme, qui est une propriété naturelle des matériaux (généralement négligeable), au paramagnétisme, pour lequel il existe une orientation magnétique à l'échelle de l'atome ou de la molécule, et au ferro/ferri/antiferro magnétisme, où une organisation magnétique existe sur une longue distance à l'échelle atomique (plus d'un millier d'atomes). Les oxydes métalliques peuvent présenter ce genre de propriété magnétique.

L'appareil de mesure est très sensible aux métaux, et aux variations de températures, aussi, pour ne pas fausser les mesures il est préférable de ne pas mettre des objets métalliques à proximité de l'appareil. La susceptibilité magnétique augmente avec la granulométrie (à l'instar de la densité et de la vitesse).

La spectrophotométrie

Le spectrophotomètre Minolta envoie, après calibration du blanc et du noir, un flash lumineux à la surface du sédiment, tout les 2 cm (pour une étude à haute résolution). Un capteur analyse l'onde réfléchi : c'est la réflectance totale. Il analyse aussi les ondes absorbées par le sédiment, dans les différentes longueurs d'ondes : bleu, rouge et vert.

Le spectrophotomètre calcul automatiquement 5 paramètres :

L* (réflectance totale), a* (ratio red/green), b* (ratio yellow/blue), C* (ratio chroma/saturation) et h (Hue-angle).

La réflectance total L* diminue dans les sédiments sombres terrigènes et augmente dans les niveaux riches en carbonates (Vidal et al., 1998).

Les données de réflectance sont utiles pour la reconstitution des changements dans la sédimentation, en particulier pour caractériser les apports carbonatés (de couleur claire) versus terrigènes (de couleur sombre). Les courbes de réflectance ainsi obtenues donnent dans le meilleur des cas une première idée chronologique au sein de la carotte, dès son ouverture à bord du bateau, avant toute autre datation. C'est un moyen rapide et non invasif pour établir une première stratigraphie et aussi estimer la composition sédimentaire d'une carotte en carbonates, carbone organique, concentration en opale, qui sont des informations essentielles pour les recherches paléo-océanographiques.

IV. Résultats

Dans ce rapport seront utilisés les descriptions de carottes et les résultats des mesures du banc MSCL qui montrent le plus d'informations en terme de paléoclimatologie. Il s'agit des courbes de spectrophotométrie et de susceptibilité magnétique. Les autres résultats sont présentés en annexe de ce mémoire (Annexe 2).

IV. 1. Carotte MD12-3411 CQ

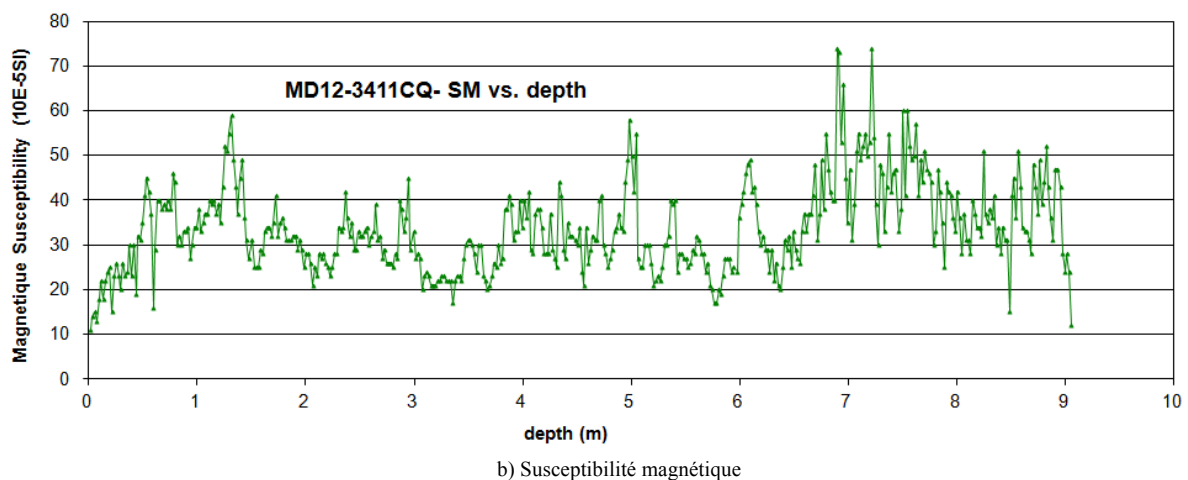
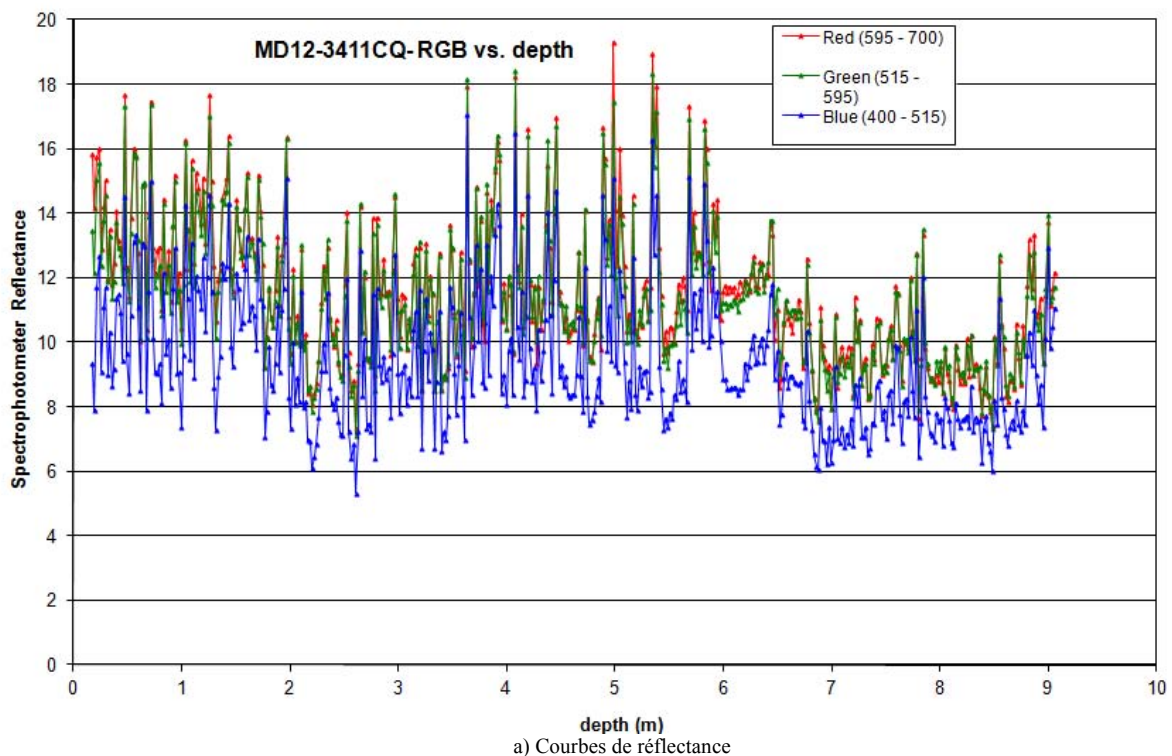
- Description de la carotte (voir Annexe 3A) :

Cette carotte contient 9,2 m de sédiment.

A l'exception des 20 premiers centimètres où se trouvent des argiles brunes d'interface eau sédiment (interface redox), le sédiment est composé principalement d'argiles de couleur vert/gris olive foncée avec de nombreuses couches silteuses et sableuses, centimétriques. Les couches sableuses sont plus abondantes et silteuses à la base. A une profondeur de 5m dans le sédiment, se trouve une couche granodécroissante de 20cm composée de cendres volcaniques.

Des bioturbations sont observées de 20 à 60cm, de 200 à 240 cm, puis sont présentes partout de 320cm jusqu'à la base de la carotte, avec des zones où les bioturbations sont très abondantes de 540 à 600cm et de 640 à 700cm.

Des microfossiles sont présents depuis le sommet jusqu'à une profondeur de 80cm dans des poches sableuses, de 740 à 780cm, et à 840cm.



(Figures 12 a et b: résultats obtenus sur la carotte MD12-3411CQ en fonction de la profondeur)

- Courbes de spectrophotométrie :

Les valeurs des courbes de réflectance du rouge, bleu et vert, en fonction de la profondeur (en mètres) montrent des variations comprises entre 5 (à 2,5m) et 19% (à 5m) (Figure 12a). Les pics maximums et minimums sont très nombreux, respectivement au dessus de 16% et en dessous de 8%. Les variations sont très rapides en particulier dans les 6 premiers mètres. Une cyclicité semble apparaître entre 0 et 2,5m, 2,5 et 7 puis entre 7 et 9m.

- Courbes de susceptibilité magnétique :

Cette courbe de susceptibilité magnétique en fonction de la profondeur montre des valeurs allant de $10 \cdot 10^{-5}$ SI à $75 \cdot 10^{-5}$ SI (Figure 12b). De nombreux pics sont visibles, notamment à 1,5, 5, 7 et 7,3m pour des valeurs respectives de 59, 59, 75 et $75 \cdot 10^{-5}$ SI pour les maxima. Les pics les plus faibles ont des valeurs comprises entre 10 et $20 \cdot 10^{-5}$ SI, de 0 à 50 cm, à 3,4m, à 5,8m, à 8,5m et à 9,1m.

On peut deviner trois cycles, le premier entre 0 et 3m, le second entre 6 et 3m et le dernier de 6 à 9m. Ce dernier cycle semble différent des deux premiers avec des amplitudes plus fortes.

IV. 2. Carotte MD12-3412

- Description de la carotte (voir Annexe 3B) :

Cette carotte mesure 32,2m, avec un vide d'un mètre entre 14 et 15m.

Le sédiment est principalement constitué d'argiles de couleur olive verte à gris foncé, avec quelques niveaux laminaires silteux, millimétriques à centimétriques. Ces lamines sont courbes à cause du pistonnage. Une couche de cendres volcaniques de 10cm est observée à 7m de profondeur. De nombreuses concrétions de pyrite sont présentes, ainsi que des granules (petits galets de boue).

Les bioturbations sont modérées, présentes principalement entre 6 et 7m, 8,2 et 9m, 11 et 13m, à 16,2m et à 31,8m.

La microfaune est peu présente, avec quelques fossiles à 20cm, entre 1 et 1.4m et entre 30 et 31m.

- Courbes de spectrophotométrie :

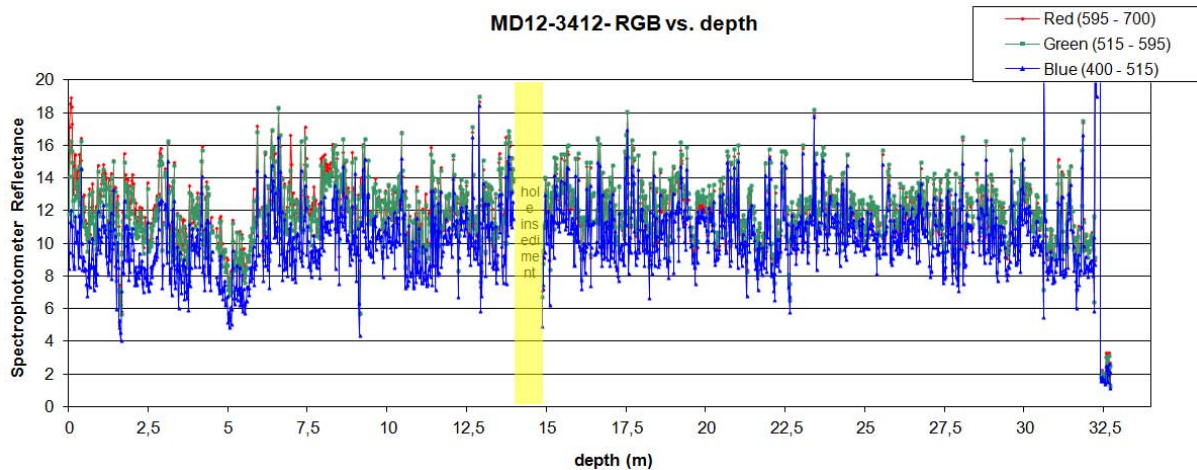
Les courbes de réflectance du rouge, du vert et du bleu montrent des valeurs très variables comprises entre 4 et 18% (Figure 13a). On observe des variations rapides, la majorité de ces pics ont des valeurs très variables entre 6 et 16%. La moyenne de cette courbe est autour de 11% tout au long de la carotte, excepté entre 4 et 6m où elle est légèrement plus faible (autour de 6).

La courbe ne montre aucune valeur entre 14 et 15m car il y a un vide dans la carotte.

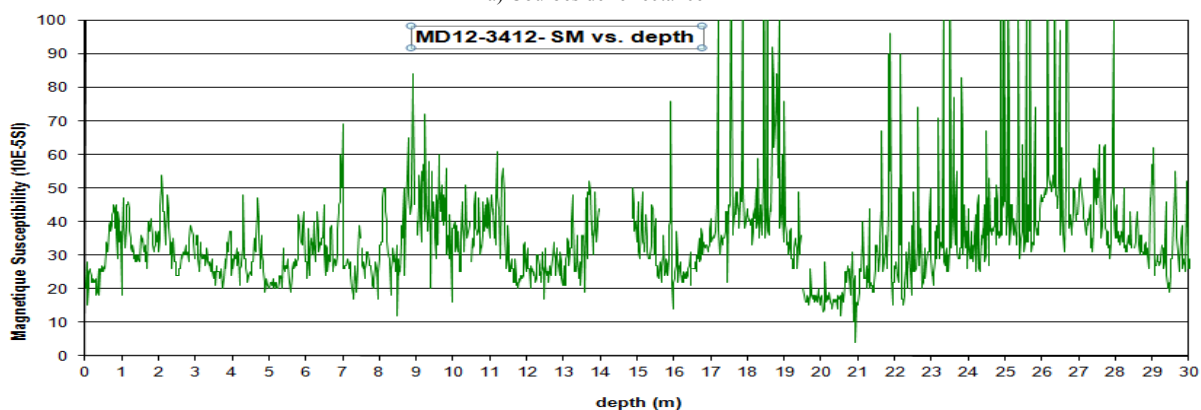
- Courbes de susceptibilité magnétique :

Les valeurs de la courbe de susceptibilité magnétique de cette carotte varient entre 5 et $100 \cdot 10^{-5}$ SI, avec des valeurs qui oscillent autour d'une moyenne située entre 20 et $50 \cdot 10^{-5}$ SI (Figure 13b). Des pics de forte amplitude ($100 \cdot 10^{-5}$ SI) sont observés à partir de 17m et un pic de faible valeur ($10 \cdot 10^{-5}$ SI) est observé à 21m.

Quelques cycles sont visibles dans cette courbe.



a) Courbes de réflectance



b) Susceptibilité magnétique

(Figures 13 a et b: résultats obtenus sur la carotte MD12-3412 en fonction de la profondeur [l'échelle des ordonnées est volontairement arrêtée à $100 \cdot 10^{-5}$ SI pour plus de clarté])

IV. 3. Carotte MD12-3413 CQ

- Description de la carotte (voir Annexe 3C) :

La carotte contient 9.4m de sédiments.

Le sédiment est composé majoritairement d'argiles de couleur olive verte à grise foncée (à l'exception des 10 premiers centimètres, composés d'argiles jaunes d'interface redox), les niveaux silteux laminaires sont quasiment inexistantes.

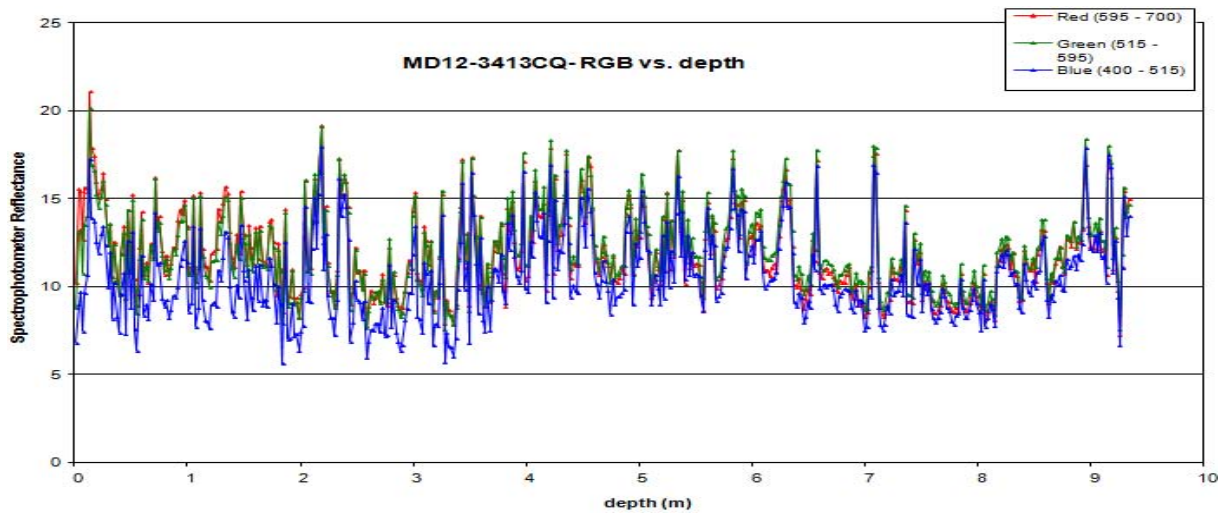
A 4,5m se trouve un niveau de cendres volcaniques de 8cm bioturbé. Ces bioturbations dans les cendres contiennent de la silice biogénique. Des bioturbations sont également observées de 1,8 à 7,4m (associées à des granules) et de 8,4 à 8,8m. Elles sont légèrement plus concentrées à la base.

Les microfossiles ne sont pas observés, excepté à 1m.

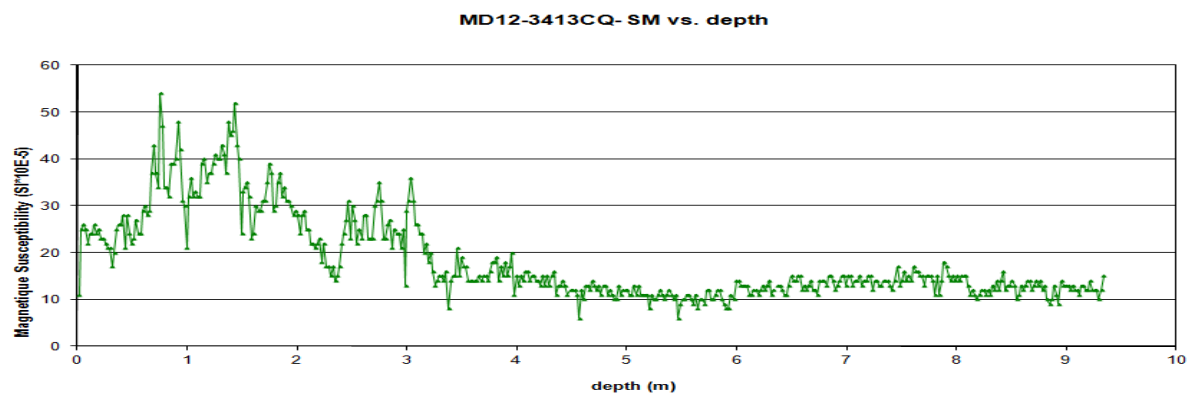
- Courbes de spectrophotométrie :

Les courbes de réflectance du rouge, du vert et du bleu indiquent des valeurs qui vont de 5,5 à 21% (Figure 14a). De nombreux pics sont visibles tout au long de cette courbe, de valeur supérieure à 15%. La moyenne des courbes se situe entre 10 et 15%, cette moyenne diminue entre 2,5 et 3,5m, et entre 6 et 8,5m.

Les variations enregistrées par ces courbes sont très rapides, aucune cyclicité n'est observée.



a) Courbes de réflectance



b) Susceptibilité magnétique

(Figures 14 a et b: résultats obtenus sur la carotte MD12-3413CQ en fonction de la profondeur)

- Courbes de susceptibilité magnétique :

La courbe de susceptibilité magnétique montre des variations de valeurs comprises entre 5 et $55 \cdot 10^{-5}$ SI, avec de fortes amplitudes entre 0 et 3,2m où se regroupent les 3 pics maximaux avec des valeurs de 55, 49 et $51 \cdot 10^{-5}$ SI (Figure 14b).

Au-delà de 3,2m la variabilité du signal diminue, avec une courbe moyenne oscillant autour de $13 \cdot 10^{-5}$ SI, et un pic minimal de $5 \cdot 10^{-5}$ SI à 4,5m.

Aucune cyclicité n'est visible dans cette courbe.

IV. 4. Carotte MD12 34-14

- Description de la carotte (voir Annexe 3D) :

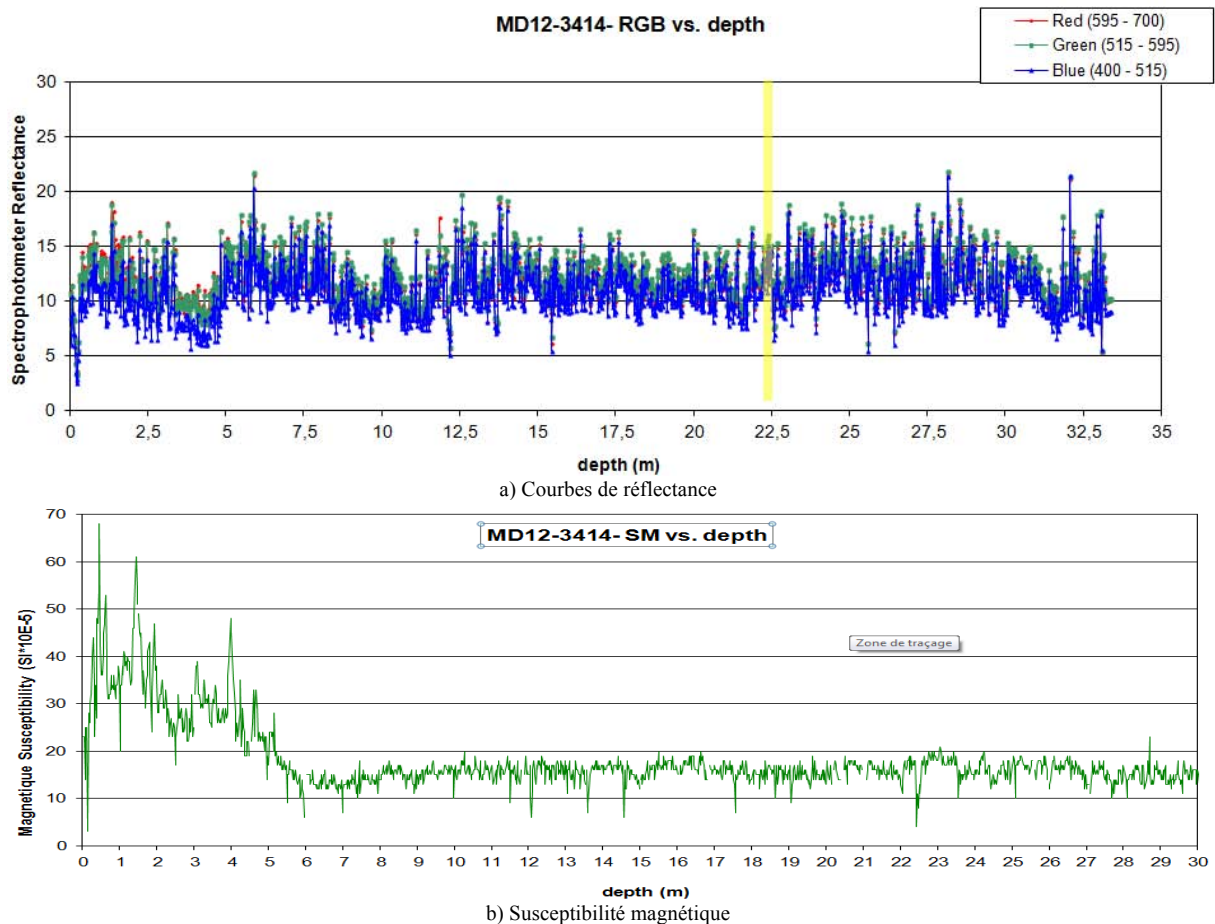
Cette carotte mesure 33,4m.

Le sédiment est majoritairement constitué d'argiles de couleur olive verte à grise foncée, avec très peu de niveau silteux laminaires. Ces rares niveaux laminaires montrent néanmoins que la carotte a été pistonnée. A 5,9m se trouve un niveau de cendres volcaniques centimétrique. Des granules sont

répartis sur presque toute la longueur de la carotte, excepté entre 9 et 15,9m. Quelques concrétions de pyrite et des traces de bioturbation sont réparties entre 16,6 et 28,8m et sont associées à ces granules.

Les microfossiles sont très rares, sauf à 30cm, 1,2m et 1,9m. Ils sont absents du reste de la carotte.

La carotte contenait du gaz dont la dépressurisation a formé une structure verticale dans la carotte visible entre 12 et 15m.



(Figures 15 a et b: résultats obtenus sur la carotte MD12-3414 en fonction de la profondeur)

- Courbes de spectrophotométrie :

Les courbes de réflectance du rouge, du vert et du bleu indiquent des valeurs allant de 2,5 à 22% (Figure 15a). Certains pics ont des valeurs minimales et maximales respectivement de 5 et 18%. Il y a notamment 3 pics de valeur supérieure à 20% à 5,5, 27,5 et 32m et un pic de valeur inférieure à 5% à 0,5m.

La moyenne des courbes se situe autour de 12% tout au long de l'enregistrement, excepté entre 3 et 5m où la moyenne est de 7%, et entre 8 et 12m où la moyenne est de 9%.

On devine difficilement 2 cycles entre 0,5 et 3m et entre 5 et 8m.

- Courbes de susceptibilité magnétique :

La courbe de susceptibilité magnétique indique des valeurs qui vont de 3 à $69 \cdot 10^{-5}$ SI (Figure 15b).

Entre 0 à 6m, des pics de forte amplitude dépassant les $40 \cdot 10^{-5}$ SI sont observés, avec le pic le plus fort à 50cm (dont la valeur est de $69 \cdot 10^{-5}$ SI). Au-delà de 6m, la variabilité de la courbe diminue, avec des valeurs le plus souvent comprises entre 10 et $20 \cdot 10^{-5}$ SI.

Aucune cyclicité n'est visible dans cette courbe.

V. Discussion

Les courbes de susceptibilité magnétique et de spectrophotométrie montrent des résultats variables entre les 2 sites MONO 4 et 7. Néanmoins, les cyclicités sont plus nettes dans les courbes de susceptibilité magnétique, qui sont moins bruitées que les courbes de spectrophotométrie. Aussi, la discussion de ce mémoire portera surtout sur l'interprétation des courbes de susceptibilité magnétique.

Après avoir établi une comparaison entre les carottes type CASQ et CALYPSO pour chacun des sites, je proposerai une chronologie des carottes MD12-3412 et MD12-3414. En appliquant cette chronologie aux courbes de spectrophotométrie, je proposerai une première interprétation des courbes de réflectance pour ces deux carottes. Enfin, je terminerai sur une synthèse des données obtenues sur les deux sites MONO4 et 7.

V. 1. Corrélation entre CASQ et CALYPSO

Les sédiments du centre d'une carotte de type CASQ sont moins sensibles aux perturbations liées au carottage en comparaison avec les sédiments d'une carotte de type CALYPSO, car les CASQ sont plus larges et moins longs.

Les carottes de type CALYPSO sont souvent sujettes au pistonnage qui est une perturbation liée au système de carottage par piston et qui provoque l'étirement du sédiment au sein de la carotte. Il est important de vérifier s'il y a pistonnage ou non car cette perturbation fausse le calcul du taux de sédimentation.

Pour vérifier qu'une carotte type CALYPSO a été pistonnée on effectue une corrélation entre les résultats obtenus sur les carottes de types CASQ et CALYPSO d'un même site. Seuls les premiers mètres des carottes type CALYPSO peuvent être comparés aux carottes type CASQ qui sont moins longues.

Dans cette étude, les courbes de susceptibilité magnétique ont été choisies car elles montrent des pics plus facilement corrélables que ceux des courbes de réflectance.

- MONO4 :

La corrélation pic à pic entre les courbes de susceptibilité magnétique des carottes MD12 34-11 CQ et MD12 34-12 a été effectuée en corrélant 7 pics, présents à 0,5, 1,5, 3, 4, 5, 6 et 7m de profondeur dans la carotte MD12 34-11 CQ, et à 1, 2, 5, 6, 7, 8 et 9m dans la carotte MD12 34-12.

Ces 7 pics ont été choisis car ils sont facilement reconnaissables dans les 2 courbes.

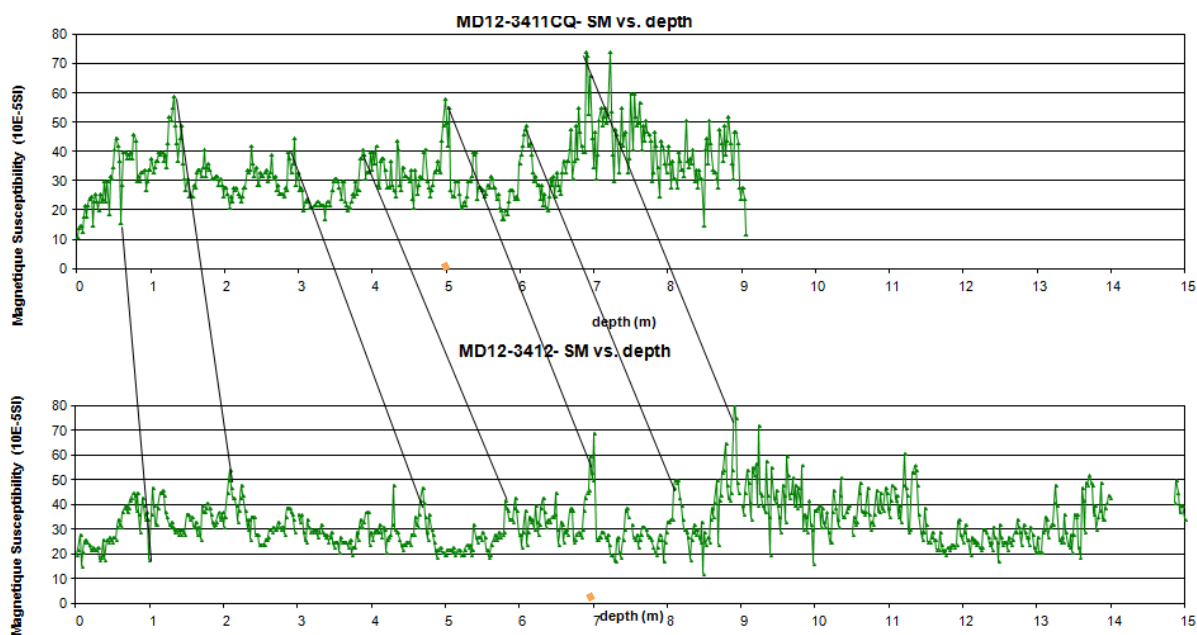
Le niveau de cendres volcaniques (voir description et annexe 3) a été décrit et interprété comme provenant d'une éruption majeure du volcan Toba il y a 75Ka (Weber et al., 2003) ou 74Ka (Colin, 1997), Il marque la limite entre les stades 4 et 5.

Ce niveau est visible dans les courbes de susceptibilité en formant un pic de forte valeur (60 à 70.10⁻⁵ SI).

Il est présent dans toutes les carottes. Il s'agit d'un niveau repère retrouvé dans l'ensemble des sédiments de la Baie du Bengale.

La corrélation montre un léger décalage des pics vers le sommet de la carotte, ce décalage est de moins de 50cm (Figure 16). Plus profondément, le décalage des pics entre CASQ et CALYPSO est plus important (décalage de 2m à 7m de profondeur).

Ce décalage reste relativement faible, ce qui permet d'affirmer que cette CALYPSO n'est pas très pistonnée.



(Figure 16 : corrélation entre les courbes de susceptibilité magnétique des carottes MD12 34-11CQ et MD12 34-12. Le trait orange indique un niveau de cendres volcaniques correspondant à une éruption majeure du volcan Toba)

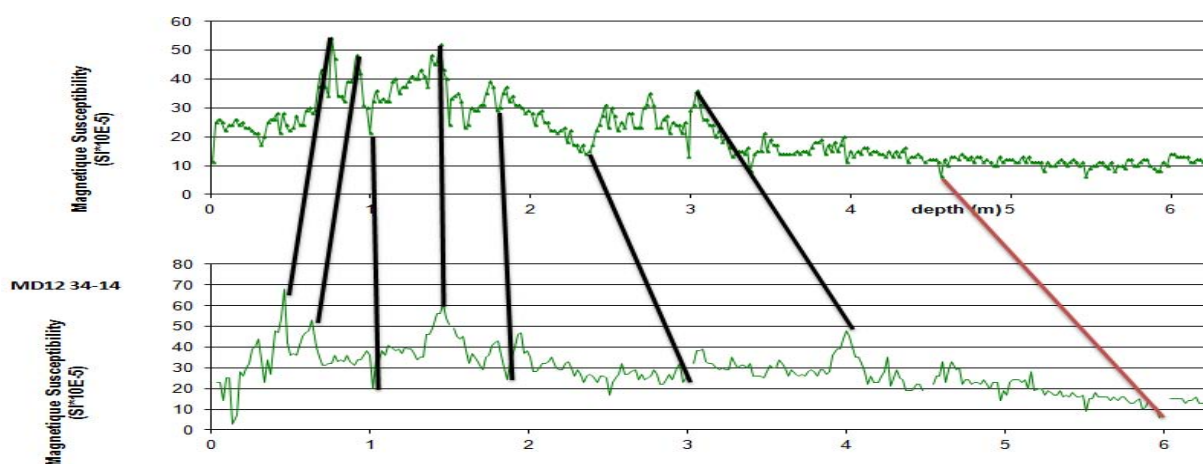
- MONO7 :

Cette corrélation a été effectuée en choisissant 7 pics reconnaissables dans les 2 courbes, et à l'aide des cendres du Toba.

Ces pics sont présents à une profondeur de 0,8, 0,9, 1, 1,5, 1,8, 2,4, 3 et 4,5m dans la carotte MD12 34-13 et à 0,5, 0,6, 1, 1,5, 2, 3, 4 et 6m de profondeur dans la carotte MD12 34-14.

Dans ces deux courbes les cendres ne forment pas de pic bien représentatif, la corrélation s'est donc faite en fonction de la profondeur de ces cendres dans chacune des carottes (voir descriptions et Annexe 3).

A partir de cette corrélation pic à pic (Figure 17) on observe que le pistonnage augmente avec la profondeur mais reste léger (1m d'étirement à 3m, et 1.5m au niveau des cendres).



(Figure 17 : corrélation entre les courbes de susceptibilité magnétique des carottes MD12 34-13CQ [en haut] et MD12 34-14 [en bas]. Le trait rouge correspond à la corrélation des cendres du Toba)

En conclusion, on peut affirmer grâce à ces corrélations que les carottes type CALYPSO des sites MONO 4 (MD12-3412) et 7 (MD12-3414) sont faiblement pistonnées, surtout si le léger tassement que peuvent parfois subir les sédiments d'un CASQ est pris en considération. Dans la suite de la

discussion, seules les carottes type CALYPSO seront considérées car elles sont plus longues que les carottes type CASQ et couvrent donc de plus grandes échelles de temps.

V. 2. Mise en âge des courbes

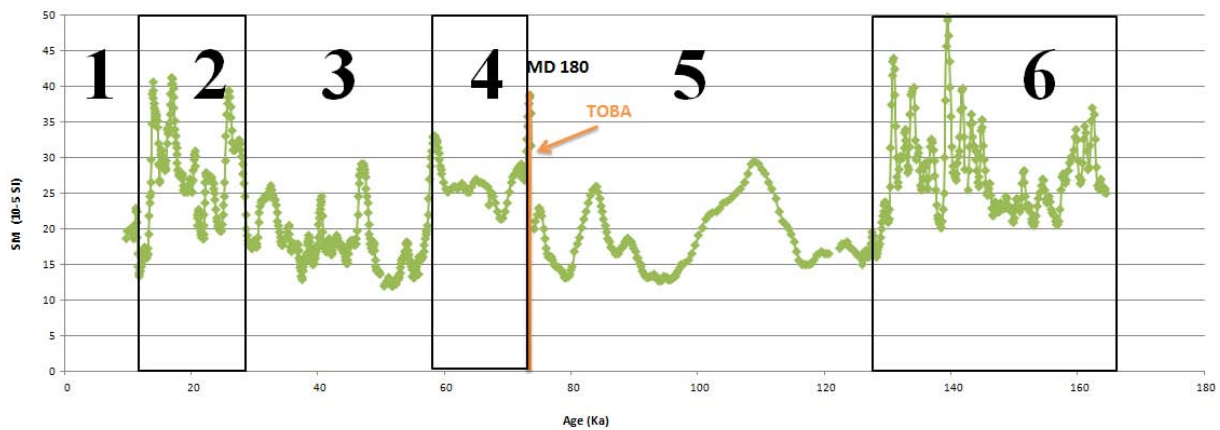
La mise en âge des carottes est la première étape de toute étude sur les sédiments marins, car la chronologie des enregistrements est indispensable pour l'interprétation des signaux paléoclimatiques. Il est possible de mettre en âge les courbes obtenues sur une carotte en les corrélant avec des courbes déjà bien datées ou avec une courbe standard (il s'agit donc de stratigraphie relative).

Dans cette étude, les courbes de susceptibilité des carottes MD12-3412 et MD12-3414 ont été choisies pour apporter une chronologie aux enregistrements et deux courbes de référence ont été utilisées (voir détails ci-dessous).

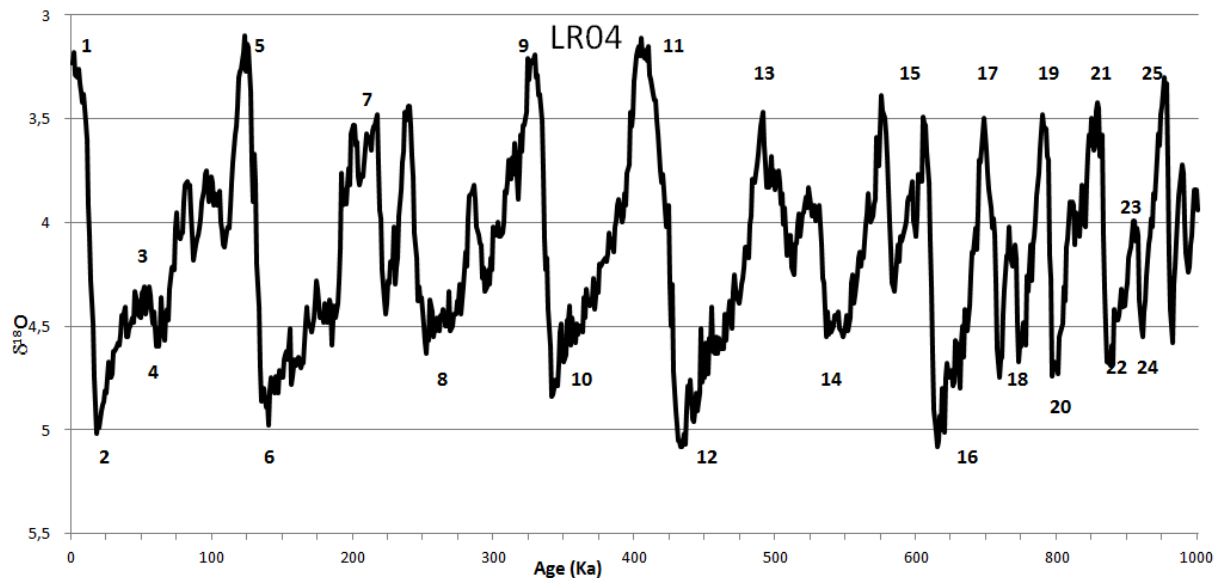
V.2.2. MD12-3412

La courbe de susceptibilité magnétique de la carotte MD12-3412 a pu être corrélée avec celle de la carotte MD77-180 (Colin, 1997) jusqu'à une profondeur de 11m (Figure 18).

Afin de prolonger la chronologie de 11m jusqu'à 20m, la corrélation a été effectuée en utilisant la courbe de $\delta^{18}\text{O}$ de référence LR04 (Figure 19, Lisiecki et Raymo, 2005).



(Figure 18 : Courbe de susceptibilité magnétique en fonction de l'âge [en ka], de la carotte MD180. En orange est représenté le pic des cendres du Toba à 74ka. Les chiffres pairs et impairs indiquent respectivement les stades glaciaires et interglaciaires)



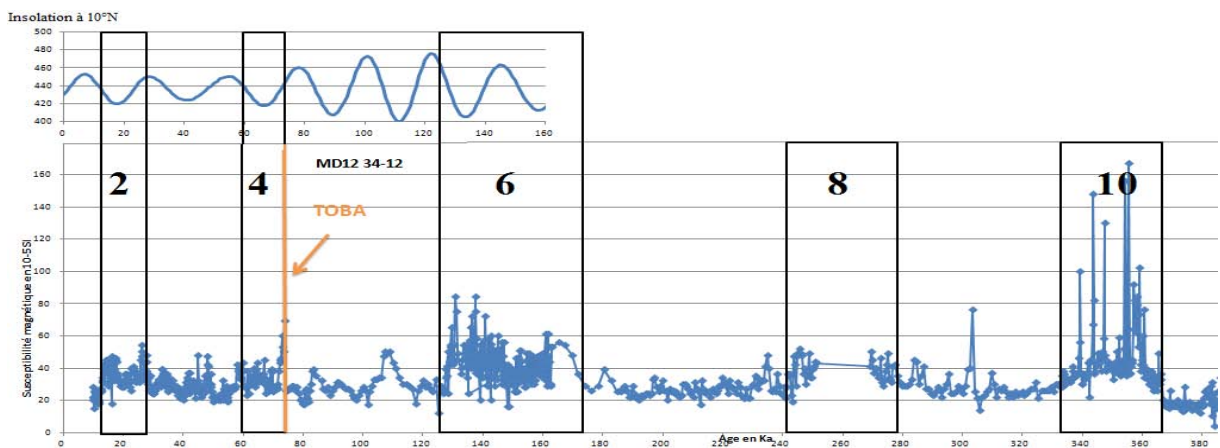
(Figure 19 : courbe LR04 de $\delta^{18}O$ en fonction de l'âge en ka, avec les stades glaciaires et interglaciaires)

Afin d'effectuer les corrélations entre la courbe de susceptibilité magnétique de la carotte MD12-3412 et les courbes de référence, le logiciel Analyséries (Paillard et al., 1996) a été utilisé. Il faut pour ce faire, indiquer au logiciel quelle est la courbe de référence et quelle est la courbe à corrélérer, puis il faut choisir sur les deux courbes les pics à corrélérer.

La courbe de susceptibilité magnétique de la carotte MD12 34-12 à été corrélée via Analyséries avec la courbe de susceptibilité magnétique de la carotte MD77-180 jusqu'à 11,3m (ce qui correspond à 160ka dans la courbe de référence, c'est-à-dire dans la courbe de susceptibilité magnétique de la carotte MD 180). Puis de 11,3m à 19,3m elle à été corrélée avec la courbe LR04 jusqu'à 19,3m soit environ 365ka. Il n'est pas possible d'aller au-delà de 19,3m car la courbe de susceptibilité magnétique devient trop bruitée pour continuer la corrélation avec la courbe LR04.

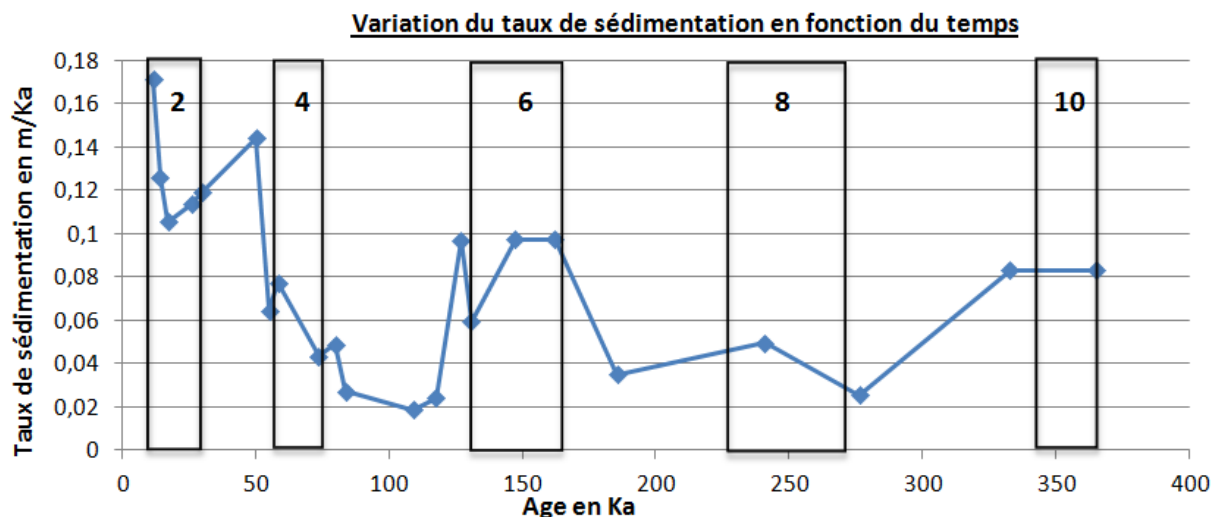
Pour la première partie, 17 pics reconnaissables ont été choisis tout au long des 11,3 premiers mètres. Puis dans la deuxième partie, de 11,3 à 19,3m 6 pics ont été corrélé entre MD12 34-12 et LR04 (Voir annexe 4A).

Ainsi la carotte MD12-3412 couvre une durée de plus de 365ka, ce qui correspond au stade interglaciaire 11 à 19,5m de profondeur dans la carotte. La biostratigraphie indique que la base de la carotte MD12-3414 est plus jeune que 450ka car aucun individu de l'espèce de coccolithophoridé *Pseudoemiliana lacunosa*, qui s'est éteint il y a 450ka, n'a été trouvé dans les sédiments (Beaufort, communication personnelle).



(Figure 20 : Courbe de susceptibilité magnétique [en 10^{-5} SI] de la carotte MD12 34-12 en fonction de l'âge, mise en âge avec le logiciel Analyséries)

Au cours de la corrélation on observe que le taux de sédimentation calculé par Analyséries est variable, de 2 à 17 cm/ka au cours de ces 365ka. On observe à partir de la courbe de taux sédimentation en fonction du temps que ce taux est très variable. Ces variations évoluent indépendamment des cycles glaciaires interglaciaires (voir figure 21).



(Figure 21 : Variation du taux de sédimentation dans la carotte MD1234-12 calculé avec le logiciel Analyséries)

V.2.2. MD12-3414

Pour cette carotte la corrélation n'est possible que jusqu'à 6m (où se trouve le niveau de cendres), car à partir de 5m de profondeur la variabilité du signal disparaît ce qui empêche d'établir des corrélations de pics avec les courbes de référence (Figure 15b).

Ainsi, seule la courbe de la carotte MD180 a été utilisée pour effectuer cette corrélation jusqu'à 6m de profondeur ce qui correspond à environ 74Ka dans la courbe de susceptibilité magnétique de la carotte MD180, permettant de remonter jusqu'au stade 4.

4 pics ont été choisis pour effectuer cette corrélation (à 0,1, 1,4, 4 et 6m dans la carotte MD12-3414. Voir annexe 4B), néanmoins il y eu un doute concernant le 3^{ème} pic à 4m de profondeur dans la courbe de susceptibilité magnétique de la carotte MD12 34-12.

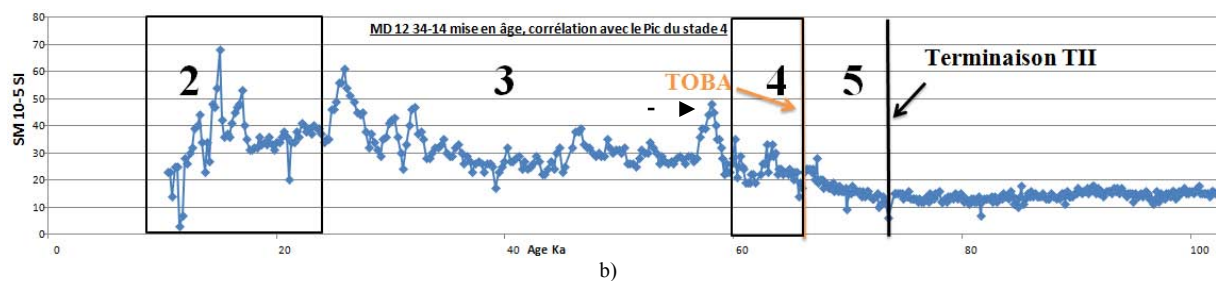
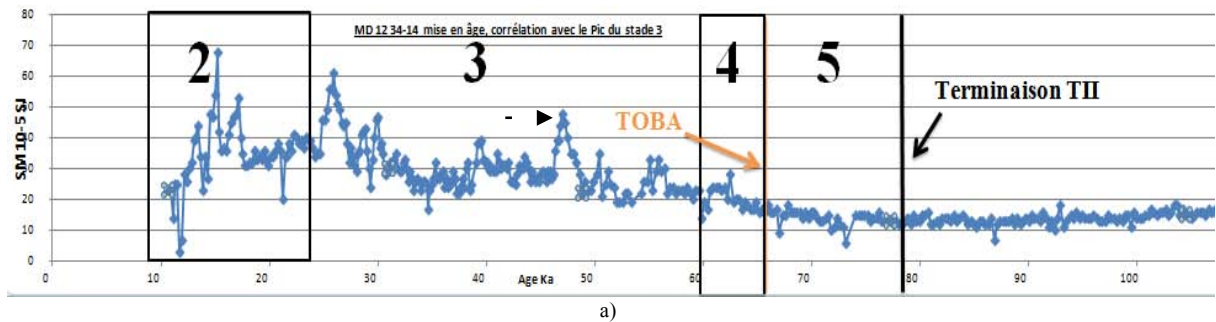
Ainsi, deux calages ont été effectués :

- Le premier en corrélant ce pic avec un pic similaire dans le stade 3 de la courbe MD180 à 47ka (voir la figure 22a).
- Le second en corrélant ce pic avec un autre pic similaire dans le début du stade 4 de la courbe MD180 à 58ka (voir la figure 22b).

On observe avec ce test que les deux corrélations ont un impact sur la position du pic (voir la flèche noire des figures 22 à et b).

Sur ces deux courbes de susceptibilité magnétique de la carotte MD12 34-14 seul le cycle du stade 2 est bien visible. Néanmoins, la description sédimentologique indique la position du niveau de cendres du Toba à 6m (voir description, et Annexe 3)

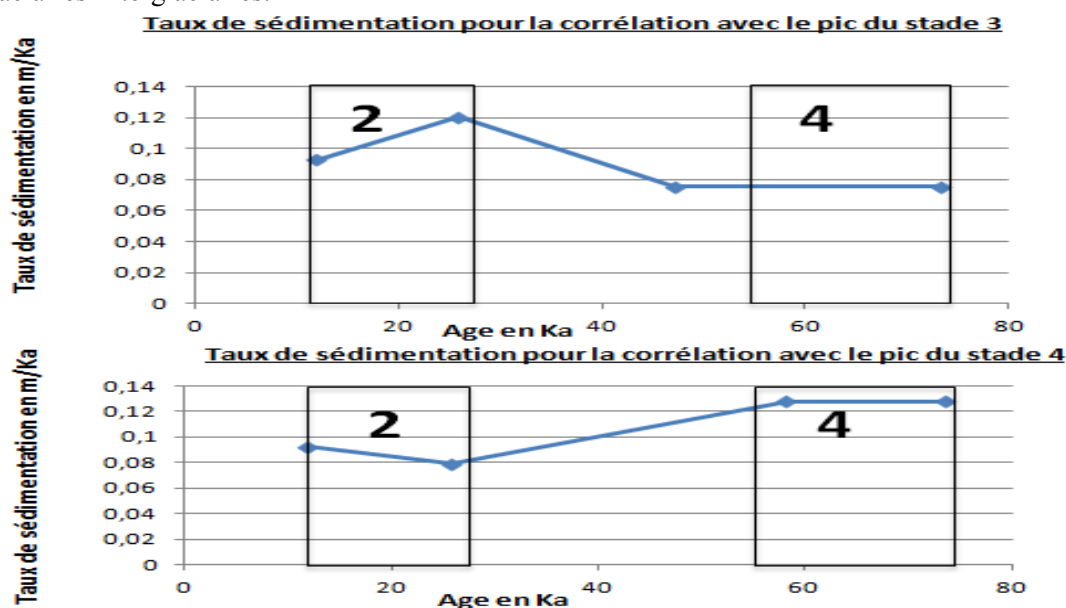
De plus la disparition de l'espèce de foraminifère *Globigerinoides ruber* pink (qui disparaît pendant la Terminaison II) a été observée entre 6,9 et 5 m de profondeur dans la carotte MD12-3414 (De Garidel-Thoron, communication personnelle). Ceci suggère que la limite TII entre les stades 5 et 6 se trouve aux alentours de 7m de profondeur. Ces informations supplémentaires permettent donc de contraindre le stade 5 indépendamment du signal de susceptibilité magnétique.



(Figure 22 a et b : courbes de susceptibilité magnétique de la carotte MD12 34-14 avec les stades isotopiques qu'elle couvre. Les flèches noires indiquent la position du pic calé suivant deux manières différentes)

Le taux de sédimentation calculé par le logiciel varie de 8 à 13 cm/ka sur les 74ka des deux différentes corrélations. Néanmoins les courbes sont différentes en fonction du pic corrélé, dans la courbe corrélée avec le pic du stade 3, le taux de sédimentation est fort, de 10 à 40Ka, avec un pic de 12cm/Ka à 25Ka. De 45 à 75Ka le taux de sédimentation reste stable à environ 8cm/Ka. On observe l'inverse dans la courbe corrélée avec le pic du stade 4, où le taux de sédimentation est minimal de 10 à 25Ka (8cm/Ka à 25Ka), puis augmente pour atteindre 13cm/ka de 60 à 75Ka.

Ces variations du taux de sédimentation, pour les deux courbes, ne sont pas corrélables avec les cycles glaciaires-interglaciaires.



(Figure 23 : Taux de sédimentation pour les deux différentes corrélations dans la carotte MD12 34-14)

En résumé, la carotte MD12 34-14 n'a pu être corrélée que jusqu'à une profondeur de 6m avec le logiciel Analyséries. Les observations faunistiques ont permis d'atteindre la terminaison TII à 7m de profondeur, qui marque la transition entre les stades 5 et 6 à 120Ka.

A l'aide des chronologies ainsi établies, il est désormais possible d'interpréter les courbes obtenues sur les carottes en terme de variations paléoclimatiques et notamment selon la variabilité glaciaire-interglaciaire.

V.3. Variations de la susceptibilité magnétique en fonction de l'âge

V.3.1. Carotte MD12-3412

La mise en âge des courbes permet d'affirmer que les cycles observables dans les courbes de susceptibilité magnétique sont des cycles glaciaires/interglaciaires.

On voit à partir de cette courbe (figure 20) que les stades 2, 4, 6, 8 et 10 montrent des pics de susceptibilité magnétique plus forts (plus de $160 \cdot 10^{-5}$ SI pour le stade 10 et de 40 à $60 \cdot 10^{-5}$ SI pour le stade 2). Ces résultats sont en accord avec de précédents travaux dans la Baie du Bengale. En effet, les maximums de susceptibilité, dans le golfe du Bengale, sont corrélés à une température plus froide au Groenland et à une obliquité minimale (Weber et al. 2003), correspondant donc à des périodes glaciaires (stades isotopiques pairs).

Les grains magnétiques présents dans les sédiments du golfe du Bengale sont en majorité des titanomagnétites et de la magnétite (Colin, 1997). Cette minéralogie ne change pas au cours des alternances glaciaires/interglaciaires, seule la taille des grains change (Colin, 1997). Cette variation de la granulométrie est liée aux différents régimes climatiques, avec des grains plus gros en période glaciaire ce qui explique les susceptibilités plus fortes durant ces stades, visible sur les courbes des deux carottes.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette variation, les plus probables sont (Colin, 1997) :

- Une variation entre deux sources de sédiments magnétiques avec deux granulométries différentes.
- Une variation de l'érosion physique. Les périodes glaciaires sont accompagnées par une diminution du couvert végétal qui provoque une augmentation de l'érosion physique des hautes montagnes himalayennes. Cette augmentation de l'érosion mécanique apporte des particules de plus grosse taille dans l'océan indien (par l'intermédiaire du Gange et du Brahmapoutre).

Les courbes de susceptibilité magnétique est donc un outil efficace qui permet de retracer les variations glaciaires-interglaciaires par l'intermédiaire des variations granulométriques des minéraux magnétiques.

V.3.2. Carotte MD12-3414

L'enregistrement de susceptibilité magnétique de cette carotte (figure 22), qui ne couvre qu'une période limitée de temps (voir mise en âge), montre des pics de susceptibilité moins bien corrélables avec les stades glaciaires (encadrés en noir dans la figure 22).

De plus à partir de 5,5m de profondeur la variabilité du signal de susceptibilité disparaît, ce qui empêche d'interpréter le signal au-delà.

Ceci s'explique par le fait que cette carotte contenait du gaz (voir la description paragraphe IV.4. et Annexe 3D) ce qui indique que des quantités assez importantes de matière organique sont présentes et

en cours de dégradation à l'intérieur du sédiment. Cette dégradation libère du CO₂ dans l'eau interstitielle qui rend le milieu acide, provoquant la dissolution des minéraux magnétiques et donc la disparition du signal de susceptibilité.

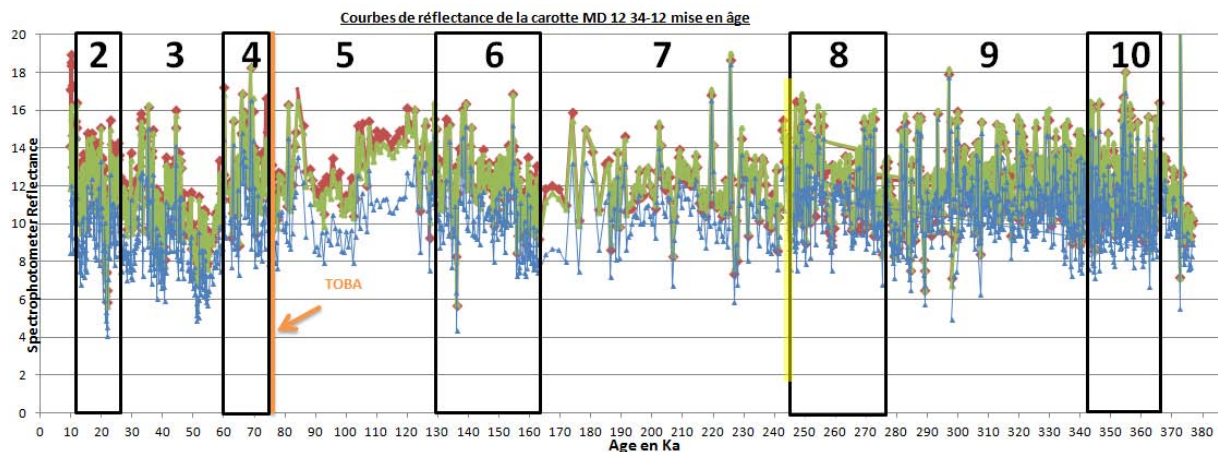
A l'instar de du signal de susceptibilité de la carotte MD12 34-12, on observe une augmentation de la susceptibilité magnétique durant les périodes glaciaires liée à une augmentation de la granulométrie des minéraux magnétiques.

V.4. Variations des courbes de réflectance en fonction de l'âge

Les courbes de réflectance dans les longueurs d'onde du rouge, bleu et vert varient en fonction de la lithologie et de la couleur du sédiment. Ces données peuvent être notamment interprétées en termes de changement de la lithologie du sédiment, notamment des apports carbonatés, de couleur claire, par rapport aux apports terrigènes, de couleur foncée. Les variations de la couleur peuvent également associées au taux de matière organique ou encore à la teneur en silice biogène (Vidal et al., 1998)

Les sédiments des carottes étudiées dans ce mémoire sont semblables du point de vue de la lithologie. Il s'agit essentiellement d'argiles de couleur verte à grise foncée (voir les photographies dans l'annexe 3), ce qui se traduit par des pics dans les longueurs d'onde du vert et du rouge plus forts que ceux de la longueur d'onde du bleu (voir les figures 12a, 13a, 14a et 15a). Les changements observés dans les courbes de réflectance sont discutés en fonction de l'âge pour chacune des deux carottes qui ont été datées.

V.4.1 Carotte MD12-3412

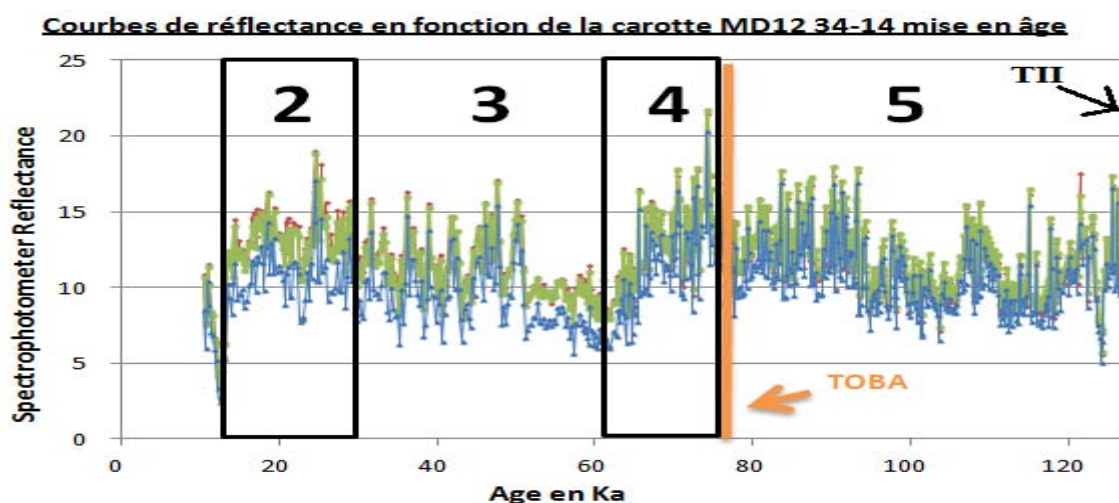


(Figure 24 : courbes de réflectance de la carotte MD12-3412 mise en âge)

Une fois mise en âge et en ajoutant les stades isotopiques sur cette courbe, on observe que le signal est difficilement corrélé avec les cycles glaciaires-interglaciaires. Il semble donc que la lithologie des sédiments de cette carotte n'a pas varié de manière significative au cours du temps, ce qui implique des apports terrigènes constants au niveau du site d'étude. Par ailleurs, ces apports sont majoritaires par rapport aux autres types de constituants, notamment par rapport aux carbonates.

La mise en âge de la carotte MD12-3412 nous permet donc de déterminer que la variabilité glaciaire-interglaciaire n'est pas inscrite dans les changements de la lithologie, et implique que de plus amples travaux doivent être menés pour comprendre les variations de la mousson à partir des sédiments de cette carotte.

V.4.2. Carotte MD12-3414



Les courbes de réflectance de la carotte MD12-3414 en fonction de l'âge ne montrent pas de cyclicité en relation avec la variabilité glaciaire-interglaciaire. De même que pour les sédiments de la carotte MD12-3412, ces sédiments présentent une lithologie assez constante au cours du temps, en relation avec des apports terrigènes abondants quel que soit la période considérée. En revanche, les cycles observés, même s'ils ne correspondent pas à des cycles glaciaires-interglaciaires, témoignent de variations subtiles de la composition du sédiment. En particulier, ces variations pourraient notamment refléter des variations de la teneur en matière organique, très abondante dans ces sédiments. Néanmoins de plus amples investigations sont nécessaires afin d'aller plus loin dans la compréhension de ces variations de la réflectance en fonction de l'âge.

V.5. Synthèse : comparaison entre les sites MONO 4 et MONO 7

Les enregistrements des sites MONO 4 et MONO 7, une fois mis en âge, permettent d'effectuer quelques comparaisons, ce qui ne peut être fait tant que les résultats sont donnés en fonction de la profondeur.

En terme de couverture temporelle, les enregistrements de susceptibilité magnétique sur la carotte CALYPSO MD12-3412 du site MONO 4 révèle que les sédiments de cette carotte atteignent avec certitude les 365ka et ne dépassent pas les 450ka. Les cycles glaciaires et interglaciaires y ont été définis jusqu'au début du stade 11.

En ce qui concerne la carotte CALYPSO MD12-3414 du site MONO 7, il a été impossible de donner une chronologie au-delà de 5,5m de profondeur ce qui ne permet pas d'aller au-delà du stade 5.

Les variations du taux de sédimentation sont du même ordre pour les deux sites et varient indépendamment des cycles glaciaires-interglaciaires, ce qui est cohérent au vu de la proximité géographique des deux sites étudiés.

Les carottes étudiées dans ce mémoire contiennent des sédiments homogènes et de couleur sombre (voir descriptions et l'annexe 3), il en résulte des courbes de réflectance difficilement exploitables avec des cyclicités difficiles à observer. Néanmoins, ces sédiments montrent que les apports terrigènes ont toujours été dominants au niveau des deux sites d'étude, avec une faible contribution des autres types de constituants (apports carbonatés notamment). Ces résultats impliquent que les apports terrigènes, qui sont associés à l'effet de la mousson sur l'érosion des systèmes montagneux autour du Golfe du Bengale, ont toujours été abondants. Cette interprétation de la réflectance peut être mise en relation avec les données issues de la susceptibilité. En effet, les sédiments montrent une variation de la granulométrie des grains magnétiques en fonction des cycles glaciaires-interglaciaires, mais pas nécessairement de la nature de ces grains. Ainsi, ces changements ne peuvent s'observer dans la couleur des sédiments mais la granulométrie montre que des variations à l'échelle glaciaire-interglaciaire se sont néanmoins produites.

La carotte MD12-3414 présente une forte proportion de matière organique à l'intérieur du sédiment, ce qui la distingue de la carotte MD12-3412. Cette différence peut être due à la différence de localisation des deux carottes, mais leur proximité géographique exclut cette hypothèse. Il est plus vraisemblable que cette différence de composition soit à mettre en relation avec la différence de profondeur d'eau ; en effet, la carotte MD12-3412 est à plus grande profondeur d'eau que la carotte MD12-3414 qui peut être située dans la zone à minimum d'oxygène, ce qui expliquerait alors la bonne préservation de la matière organique. Ainsi, cette carotte permet de montrer que la zone à minimum d'oxygène a toujours existé à la profondeur d'eau de la carotte MD12-3414.

Les données obtenues à partir des analyses directement pratiquées sur le navire Marion Dufresne nous permettent donc d'obtenir une première idée de la chronologie des carottes étudiées, et de proposer des hypothèses sur les variations granulométriques et lithologiques associées aux changements du système de mousson et de la circulation océanique profonde. Néanmoins, ces travaux sont une étude préliminaire de ces carottes, à approfondir avec de nouvelles analyses en laboratoire.

VI. Conclusions et perspectives

Ce travail a eu pour but d'exploiter les données acquises à bord du navire Marion Dufresne sur des carottes de sédiments marins prélevées dans le Golfe du Bengale lors de la mission MONOPOL dont le but était de collecter des archives permettant de restituer la variabilité de la mousson à différentes échelles de temps. Les principaux résultats obtenus sont :

- La comparaison entre les carottes type CASQ et CALYPSO des deux sites MONO 4 et 7 étudiés dans ce travail montre un faible effet du pistonage sur les carottes type CALYPSO, ce qui permet d'étudier ces carottes en s'affranchissant de ce problème qui peut biaiser les taux de sédimentation calculés.
- La corrélation entre les courbes de susceptibilité magnétique des carottes MD12-3412 et MD12-3414 avec des courbes de référence (MD180 pour la susceptibilité magnétique, et LR04 pour le $\delta^{18}O$) nous permet d'établir une chronologie fiable de la carotte MD12-3412 jusqu'à 365ka, couvrant presque l'ensemble du sédiment. En revanche, la chronologie de la carotte MD12-3414 ne peut se faire avec ces outils que jusqu'à 140ka environ.
- L'interprétation des courbes de réflectance en fonction de l'âge montre que dans les deux cas, les sédiments sont dominés par les apports terrigènes, sans changement notable à l'échelle des cycles glaciaires-interglaciaires. En revanche, les variations de susceptibilité magnétique témoignent de changement de taille de grains qui peuvent traduire la variation du régime de mousson à cette échelle de temps.
- La teneur en matière organique de la carotte MD12-3414 semble indiquer la présence d'une zone à minimum d'oxygène à la profondeur d'eau de la carotte, qui aurait persisté dans le passé.

Afin d'aller plus loin dans l'étude de ces sédiments, différents types d'analyses peuvent être proposées et notamment :

- Confirmer la chronologie proposée à l'aide du $\delta^{18}O$ sur les coquilles des foraminifères.
- Retracer les sources des sédiments à partir d'études de géochimie isotopique (isotopes du Strontium ou du Néodyme).

Références bibliographiques

Colin C., J. Bertau, L. Turpin, C. Kissel, Dynamique de l'érosion dans le bassin versant de l'Irrawaddy au cours des deux derniers cycles climatiques (280–0 ka), *Comptes-Rendus de l'Académie de Sciences*, 332, 483–489, 2001.

Colin C., L. Turpin, J. Bertaux, A. Desprairies, C. Kissel, Erosional history of the Himalayan and Burman ranges during the last two glacial–interglacial cycles, *Comptes-Rendus de l'Académie de Sciences*, 171, 647–660, 1999.

Colin C., L. Turpin, D. Blamart, N. Frank, and C. Kissel, S. Duchamp, Evolution of weathering patterns in the Indo-Burman Ranges over the last 280 kyr: Effects of sediment provenance on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios tracer, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, 3, 2006.

Colin C., C. Kissel, D. Blamart, L. Turpin, Magnetic properties of sediments in the Bay of Bengal and the Andaman Sea: impact of rapid North Atlantic Ocean climatic events on the strength of the Indian monsoon, *Comptes-Rendus de l'Académie de Sciences*, 160, 623–635, 1998.

Colin C., Reconstitution du régime de l'érosion des chaînes himalayennes et birmanes au cours des deux derniers cycles climatiques (300 derniers ka.). Thèse de doctorat, Université Paris XI Orsay, 272 pp., 1997.

M. R. Fontugne, J. C. Duplessy, Variations of the monsoon regime during the upper quaternary : evidence from carbon isotopic record of organic matter in north indian ocean sediment cores, *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 56, 69-88, 1986.

Laskar, J., P. Robutel, F. Joutel, M. Gastineau, A. C. M. Correia, and B. Levrard, A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth, *Astronomy & Astrophysics*, 428, 261-285, 2004.

Stramma L., Gregory C. Johnson, Janet Sprintall, Volker Mohrholz, Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans, *Science* 320, 655, 2008.

Paillard D., L. Labeyrie, and P. Yiou, Macintosh program performs time-series analysis, *EOS. Trans. AGU*, 77, 379, 1996.

Tomczak, M. and J. S. Godfrey, *Regional Oceanography: An Introduction*, Second Edition, 390 pp., 2003.

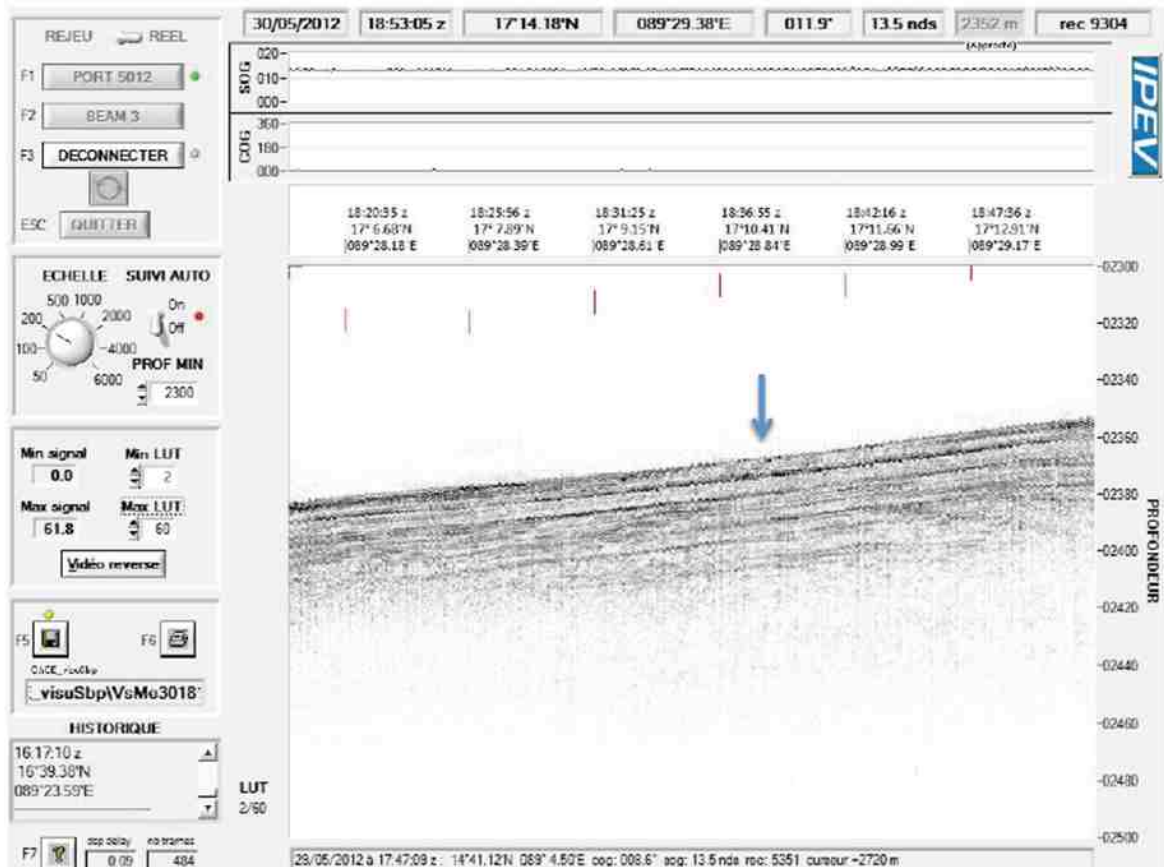
Vidal L., V. Brüchert, and Shipboard Scientific Party, Regional and stratigraphic patterns in color reflectance of sediments from leg 1751, *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, 175, 569, 1998.

Weber M.E., M. Wiedicke-Hombach, H.R. Kudrass, H. Erlenkeuser, Bengal Fan sediment transport activity and response to climate forcing inferred from sediment physical properties, *Sedimentary Geology* 155, 361–381, 2003.

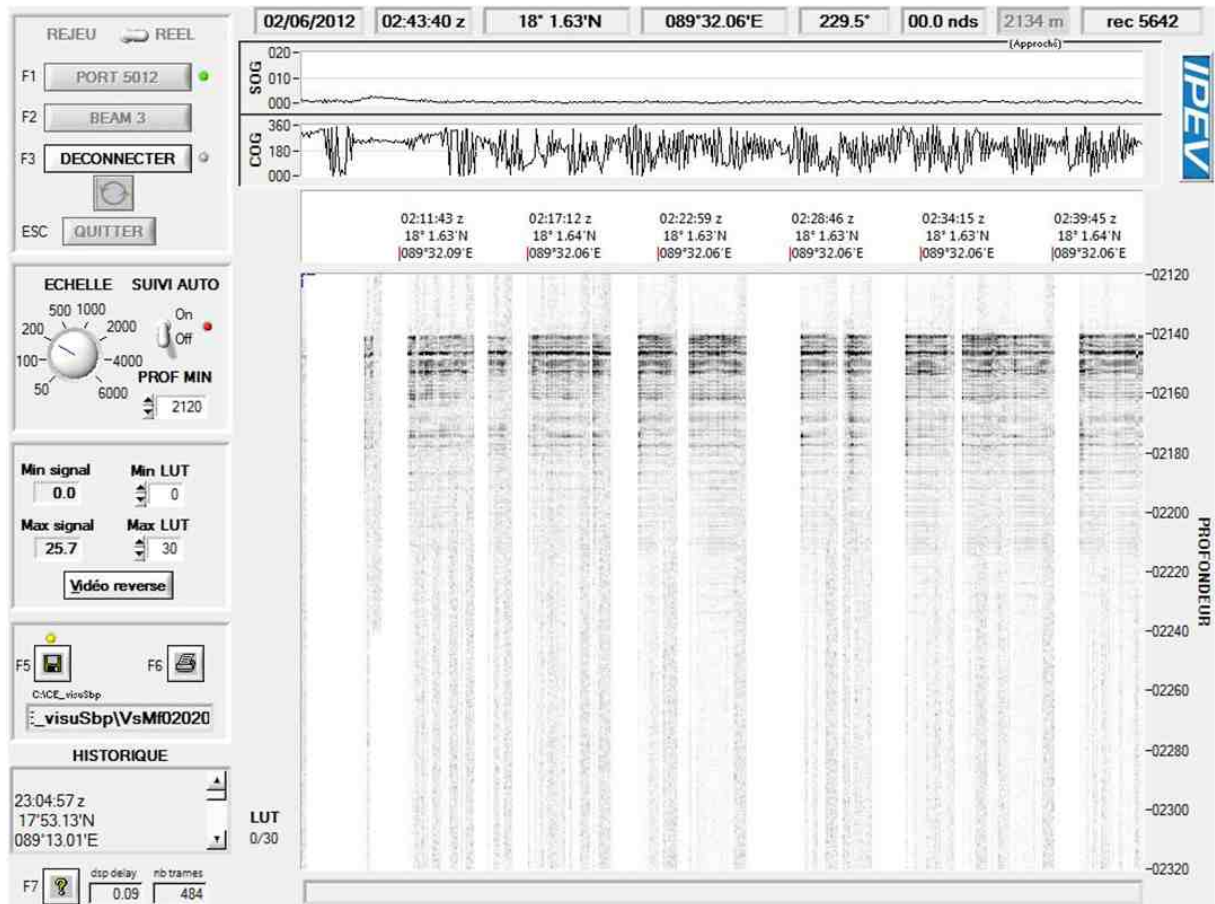
Annexe 1 : Survey des deux sites

A) Survey du site MONO 4 :

Figure: 3.5 kHz profile across station MONO 4, while doing the Survey.

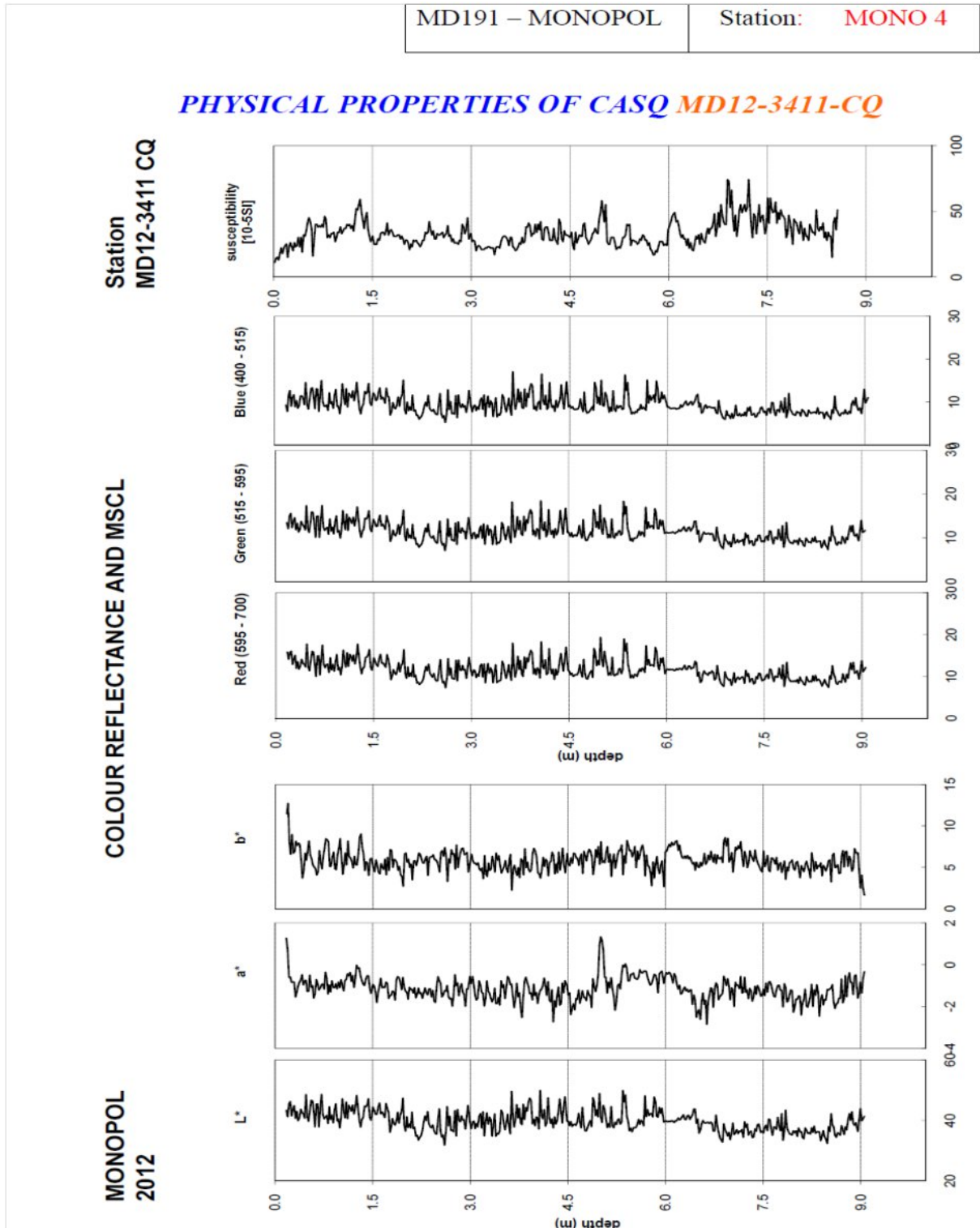


B) Survey du site MONO 7 :



Annexe 2 : Données physiques pour chaque carotte

A) Propriétés physiques de la carotte MD12- 34-11CQ :



B) Propriétés physiques de la carotte MD12-34-12

MD191 – MONOPOL

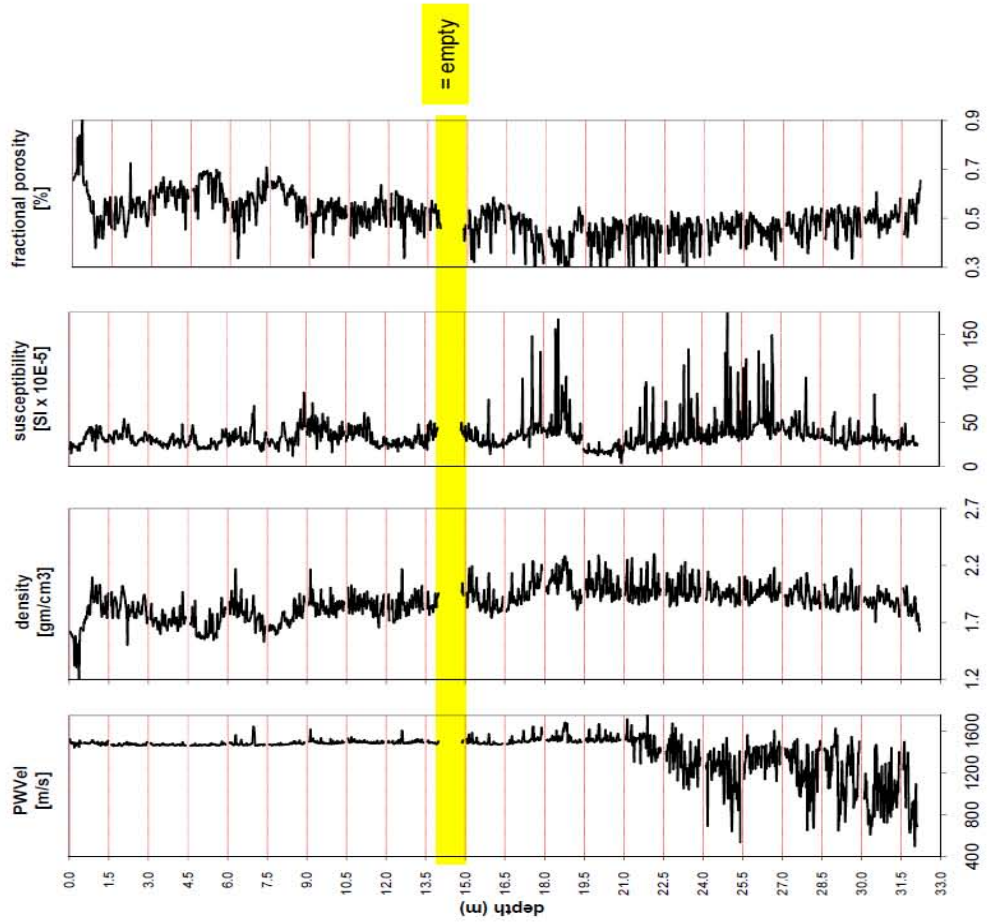
Station: **MONO 4**

PHYSICAL PROPERTIES OF CALYPSO MD12-3412

Station
MD12-3412

Multi-sensor core logger

MONOPOL
2012

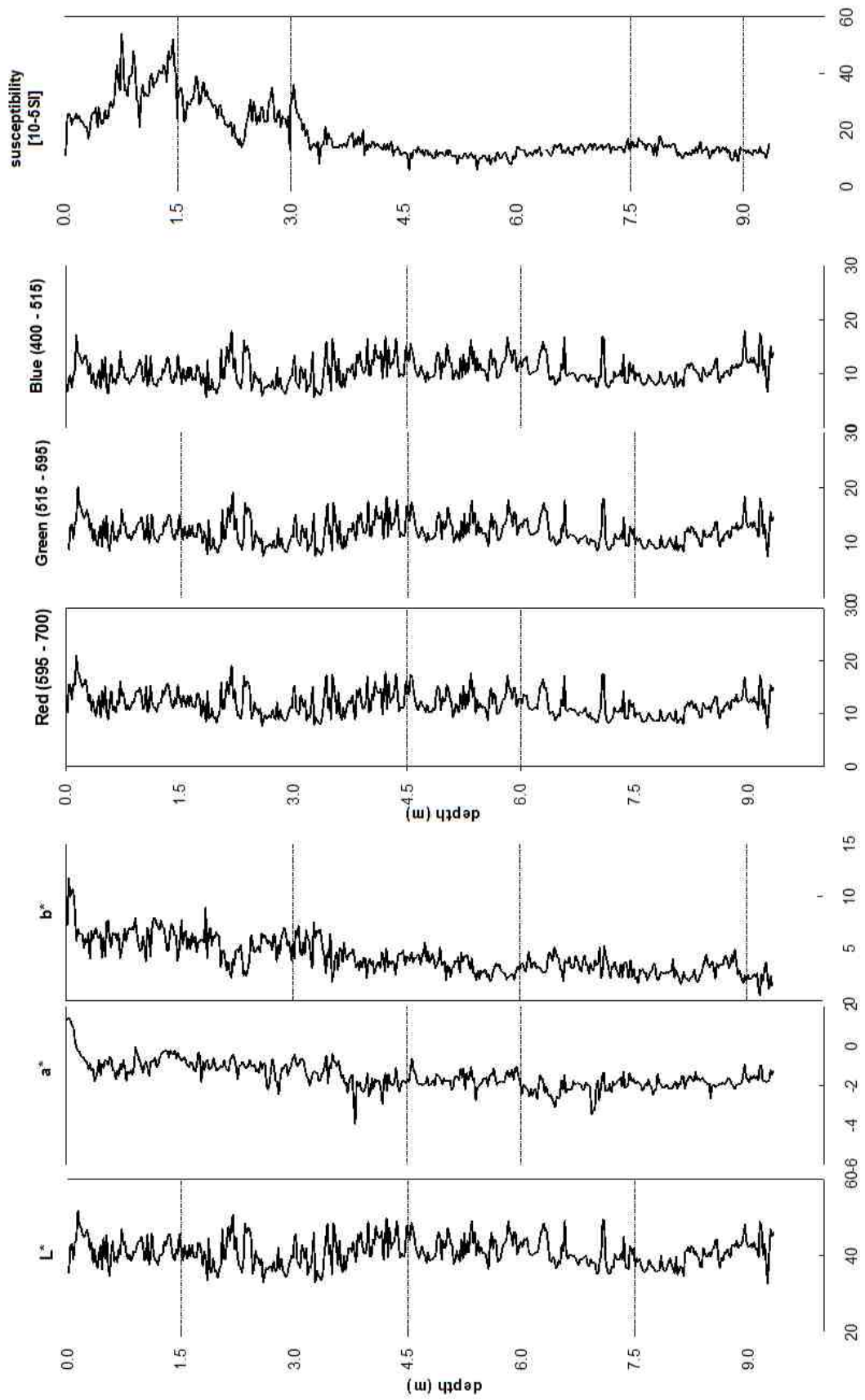


C) Propriétés physiques de la carotte MD12- 34-13CQ :

Station
MD12-3413 CQ

COLOUR REFLECTANCE AND MSCL

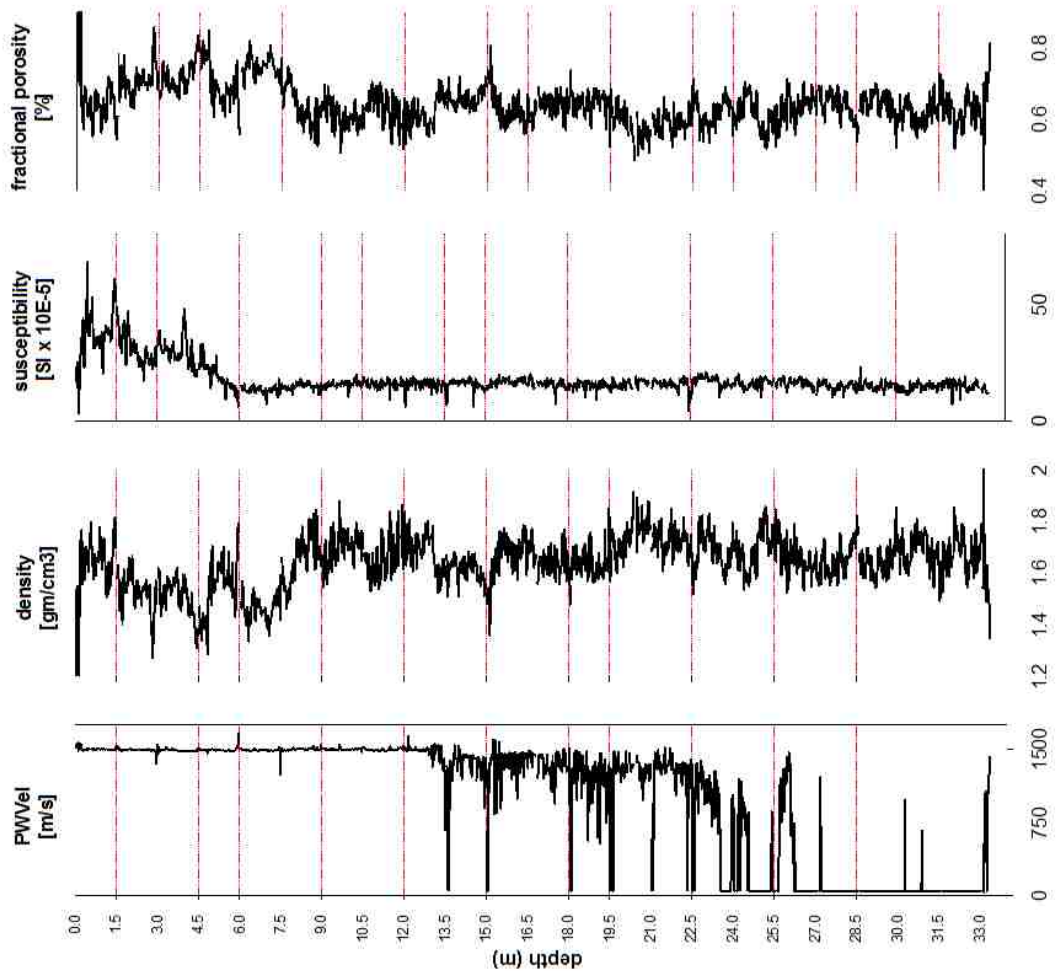
MONOPOL
2012



D) Propriétés physiques de la carotte MD12-34-14 :

Station
MD12-3414

Multi-sensor core logger



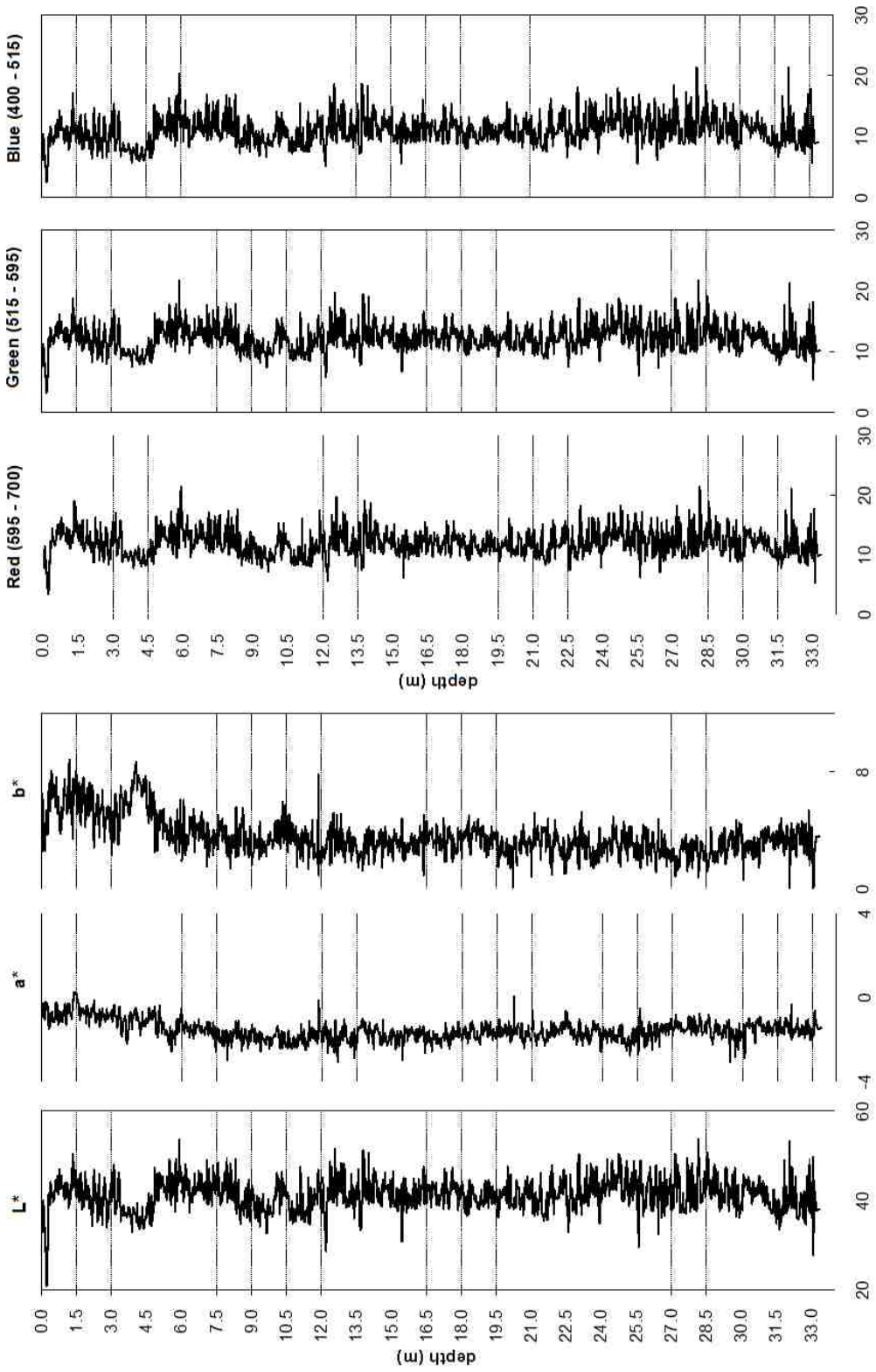
MONOPOL
2012

**MONOPOL
2012**

COLOUR REFLECTANCE

**Station
MD12-3414**

Spectrophotometer



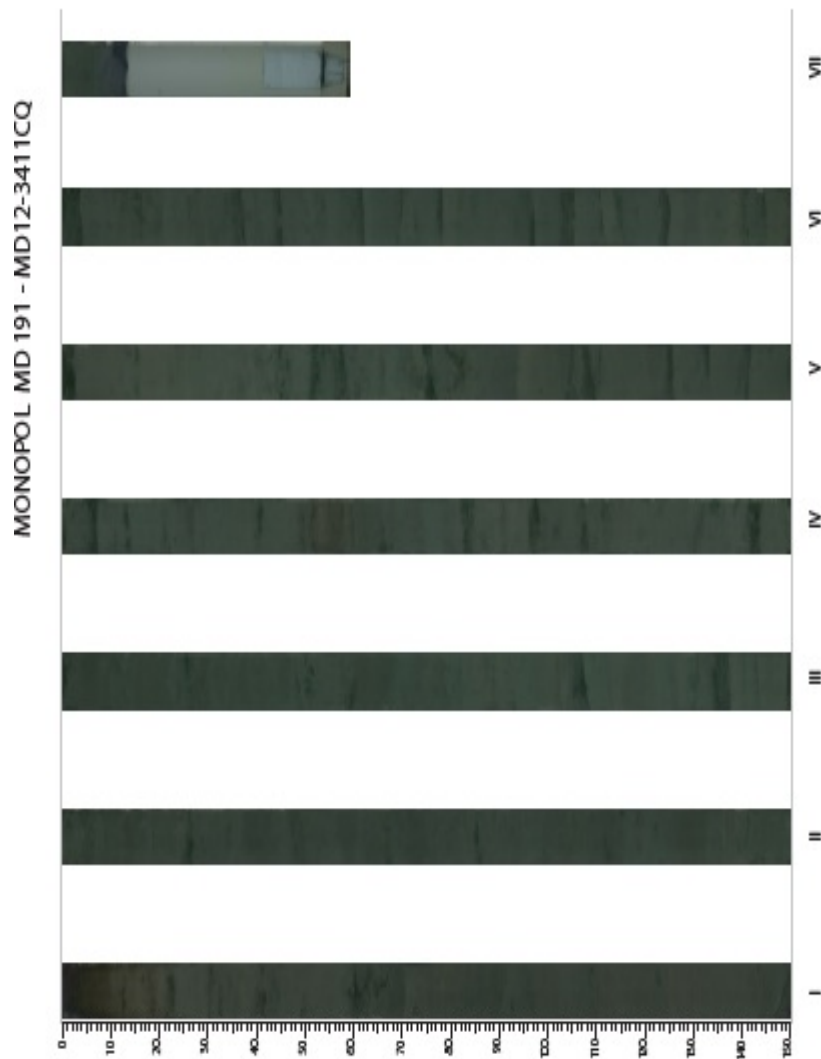
Annexe 3 : descriptions sédimentologiques

A) MD12-34-11CQ :

- Photographie de la carotte :

| | |
|-----------------|------------------------|
| MD191 – MONOPOL | Station: MONO 4 |
|-----------------|------------------------|

PICTURES OF CASQ MD12-3411-CQ

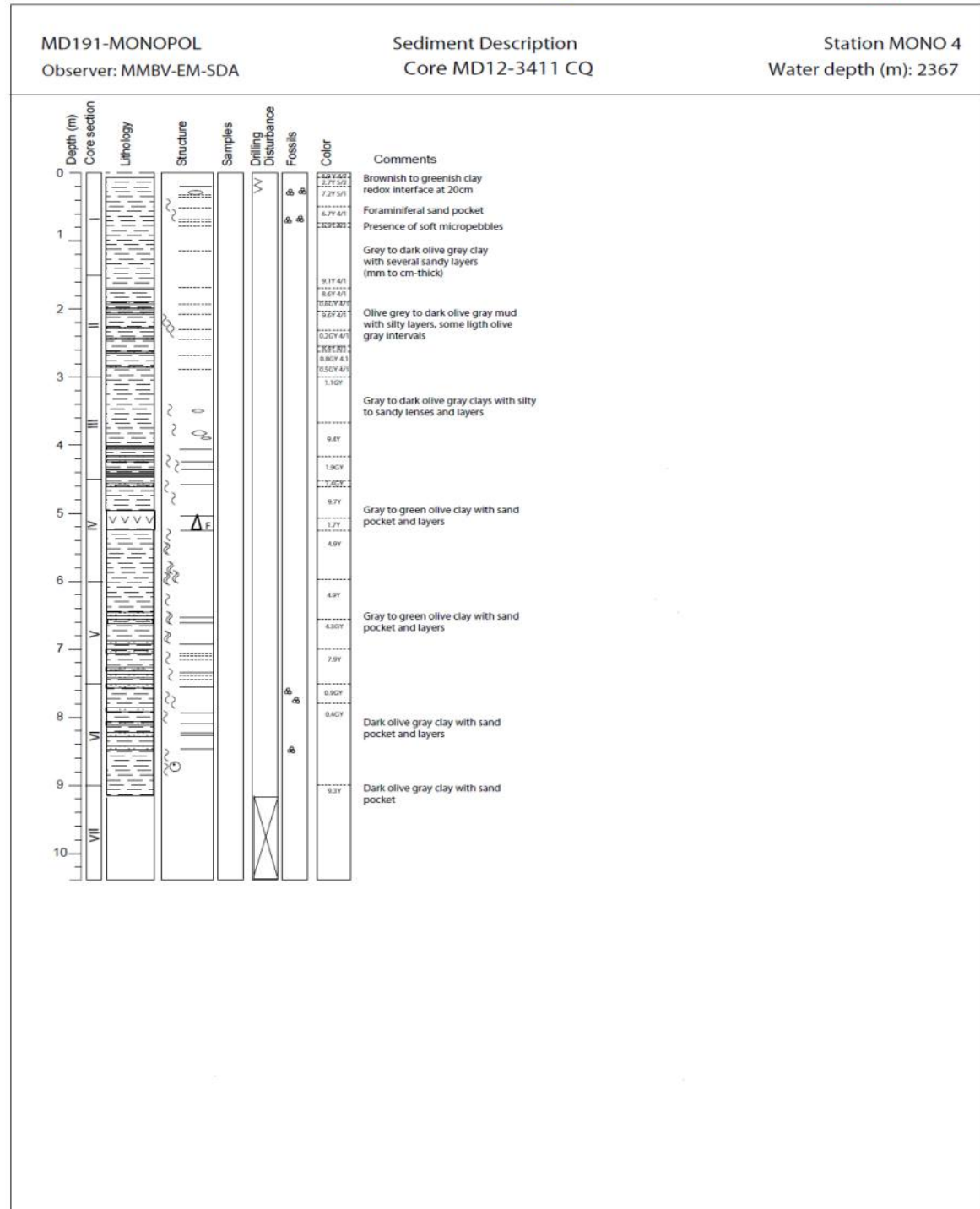


- Log:

MD191 – MONOPOL

Station: **MONO 4**

SEDIMENTOLOGY OF CASQ CORE MD12-3411-CQ



B) MD12-34-12 :

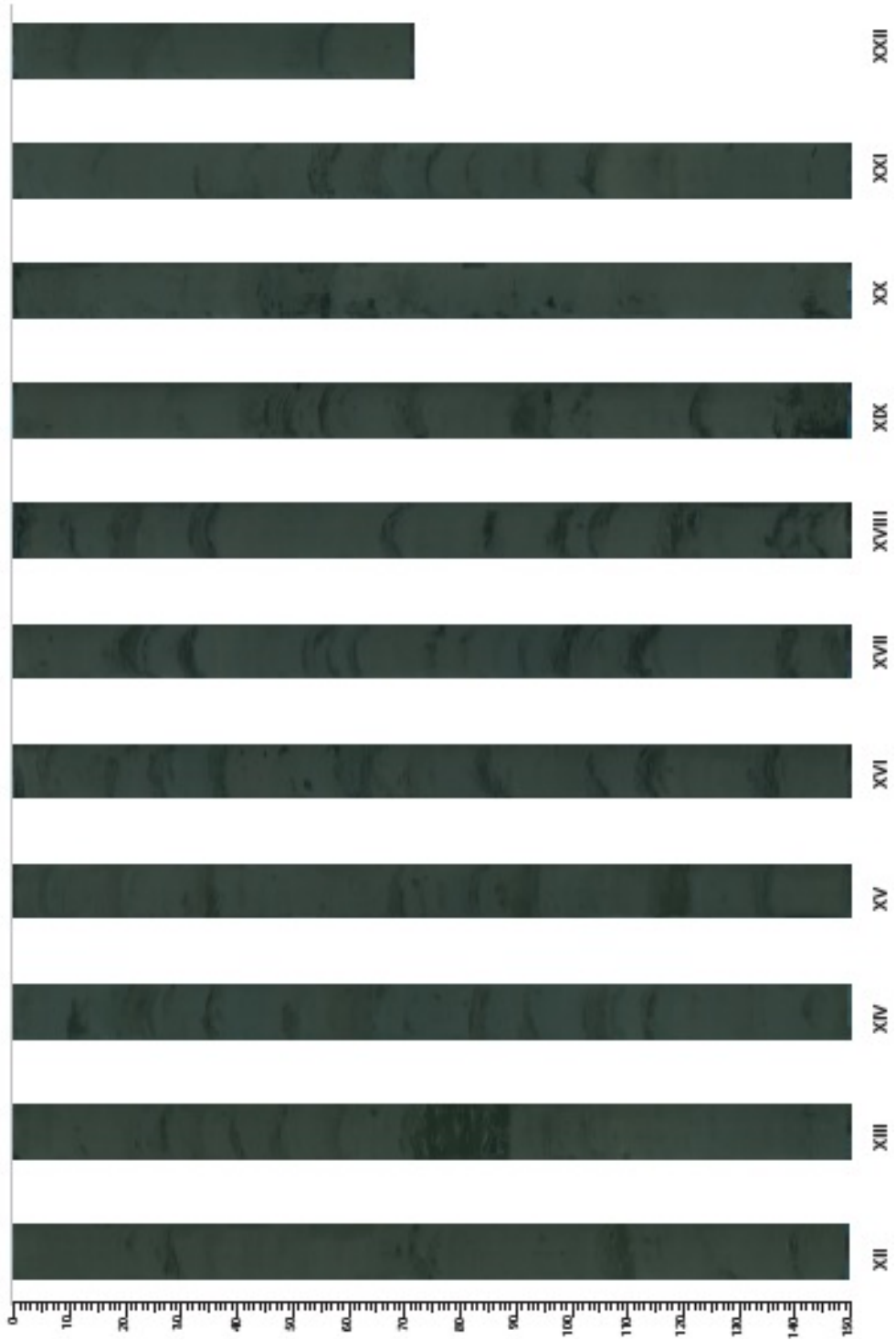
- Photographie de la carotte:

| | |
|-----------------|------------------------|
| MD191 – MONOPOL | Station: MONO 4 |
|-----------------|------------------------|

PICTURES OF CALYPSO MD12-3412



MONOPOL MD 191 - MD12-3412 - SECTIONS XII TO XXII

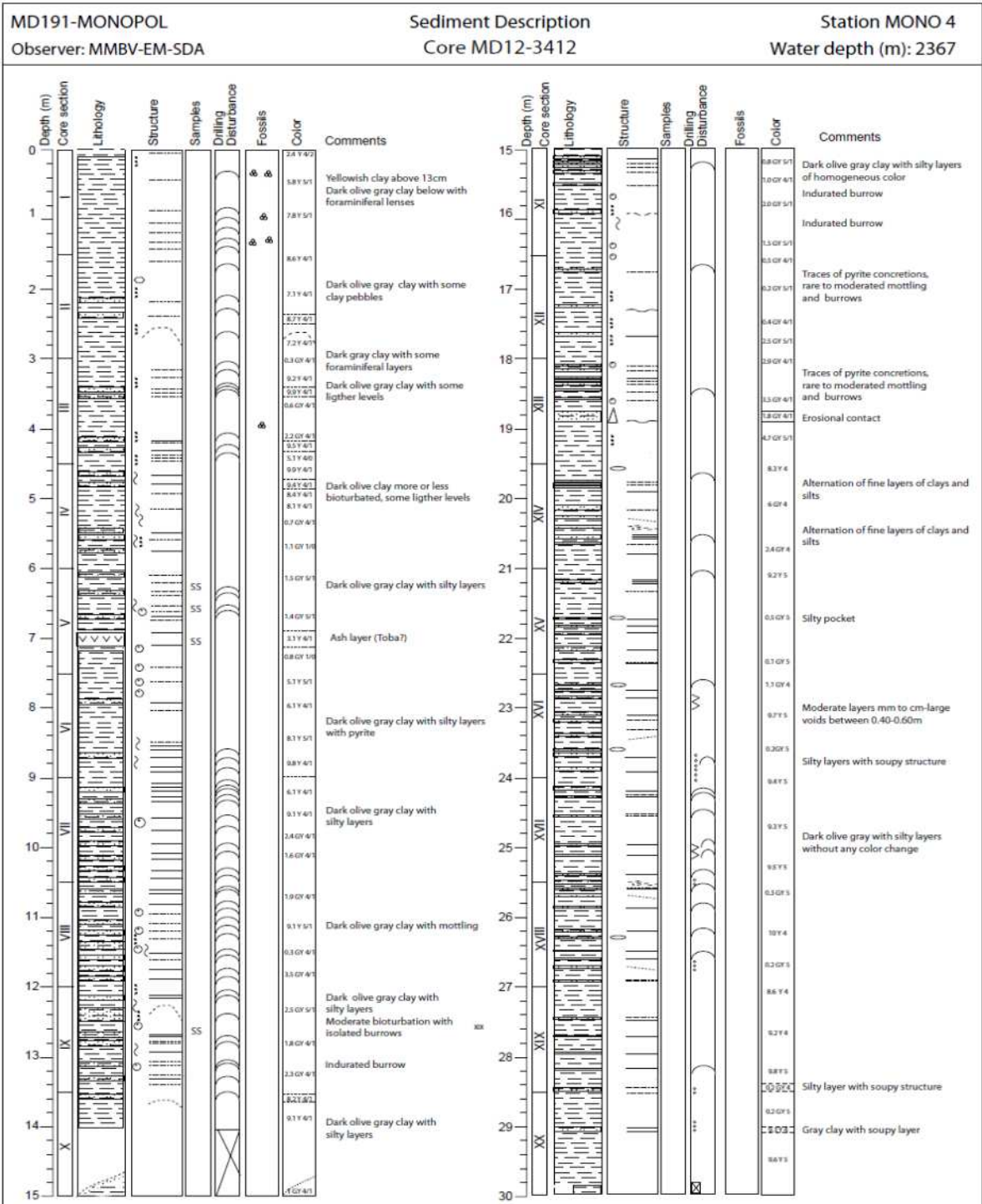


- Log :

MD191 – MONOPOL

Station: **MONO 4**

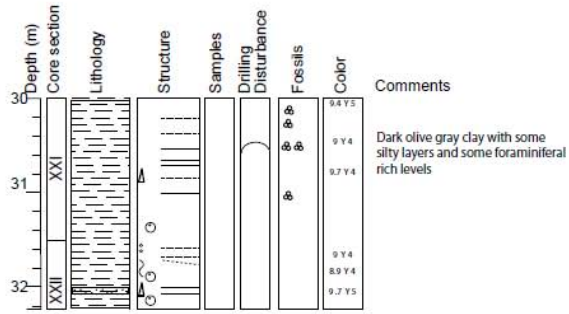
SEDIMENTOLOGY OF CALYPSO MD12-3412



MD191-MONOPOL
Observer: MMBV-EM-SDA

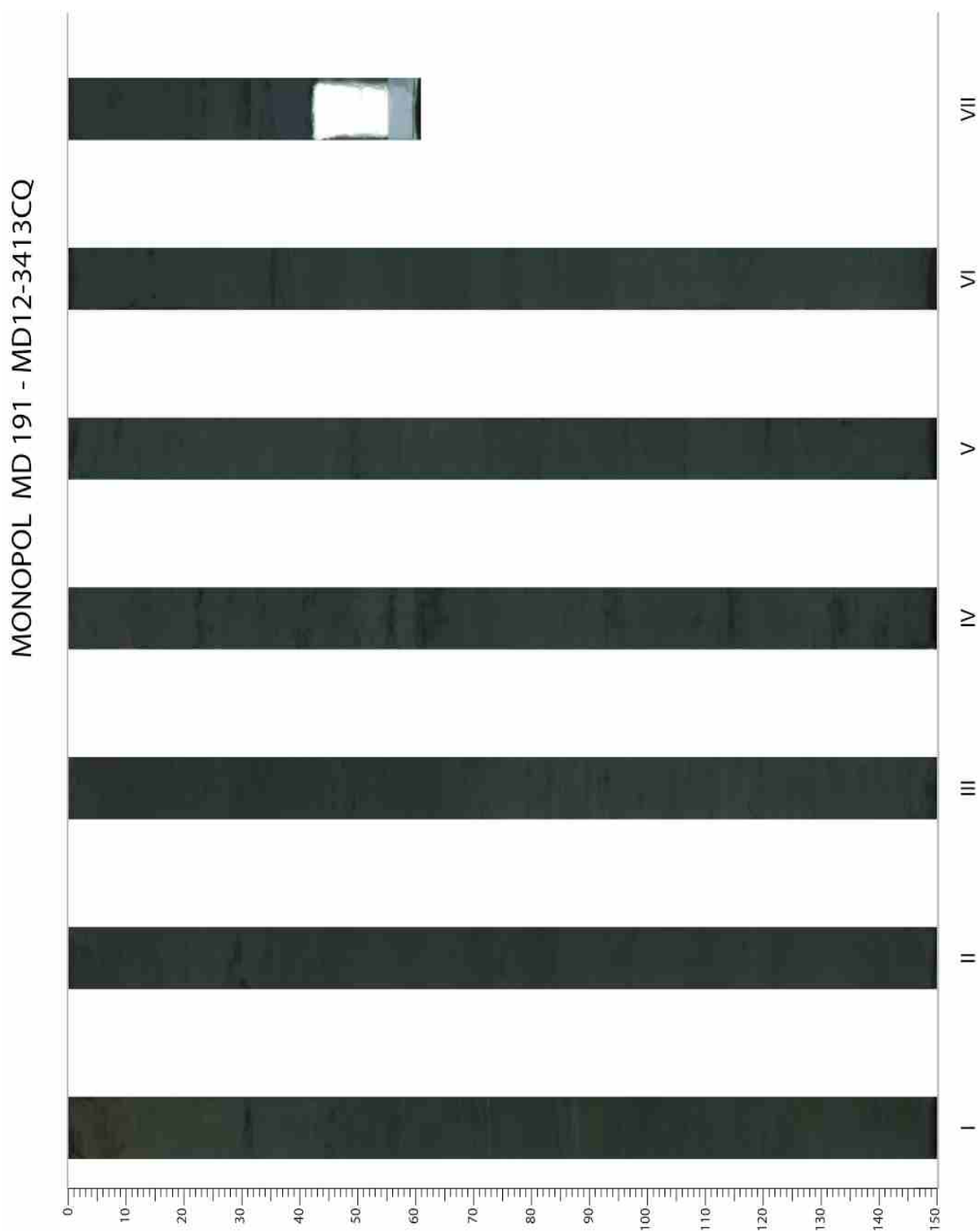
Sediment Description
Core MD12-3412

Station MONO 4
Water depth (m): 2367



C) MD12-34-13CQ :

- Photographie de la carotte:



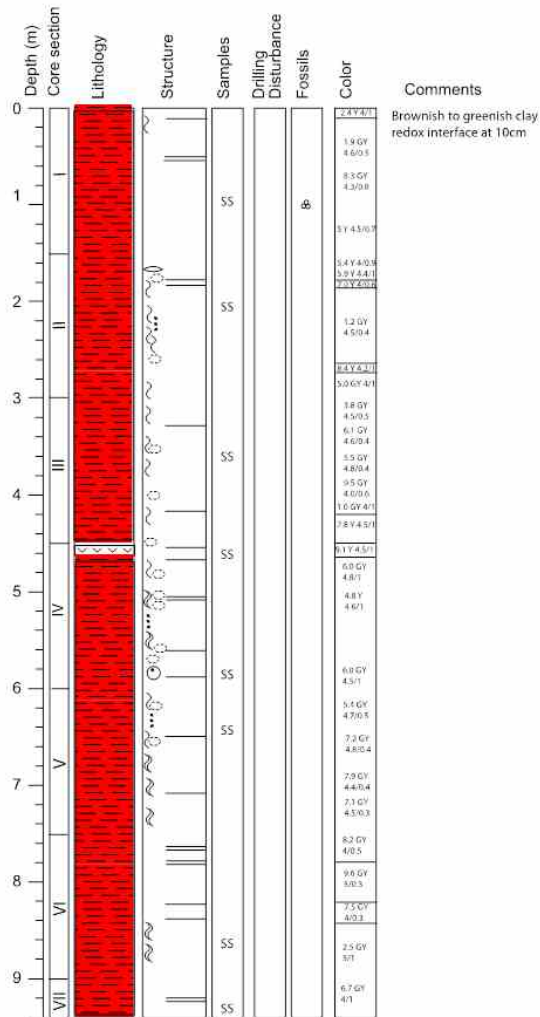
- Log :

MD191-MONOPOL

Observer: MMBV-EM-SDA

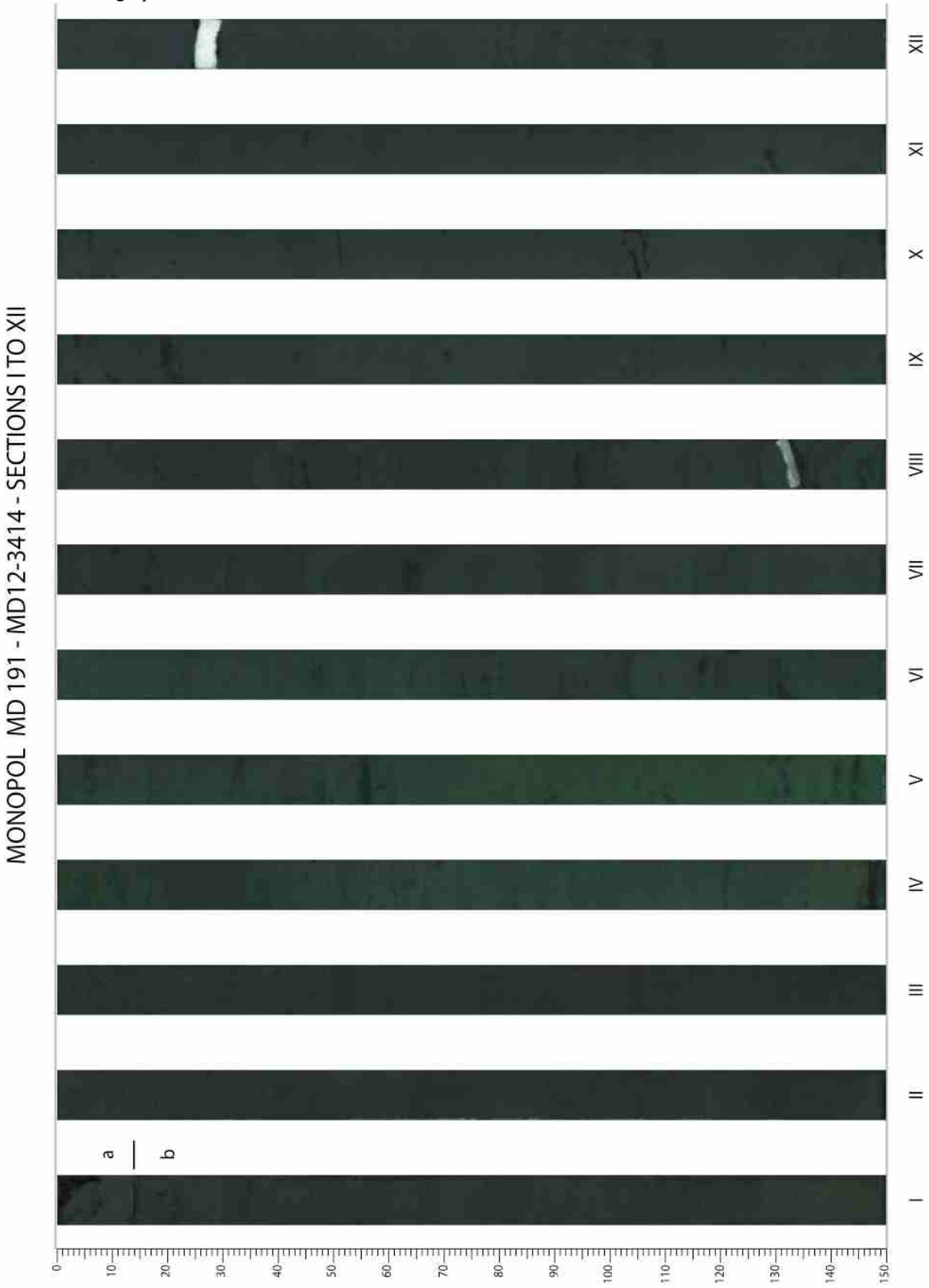
Sediment Description
Core MD12-3413 CQ

Station MONO 7
Water depth (m): 2140

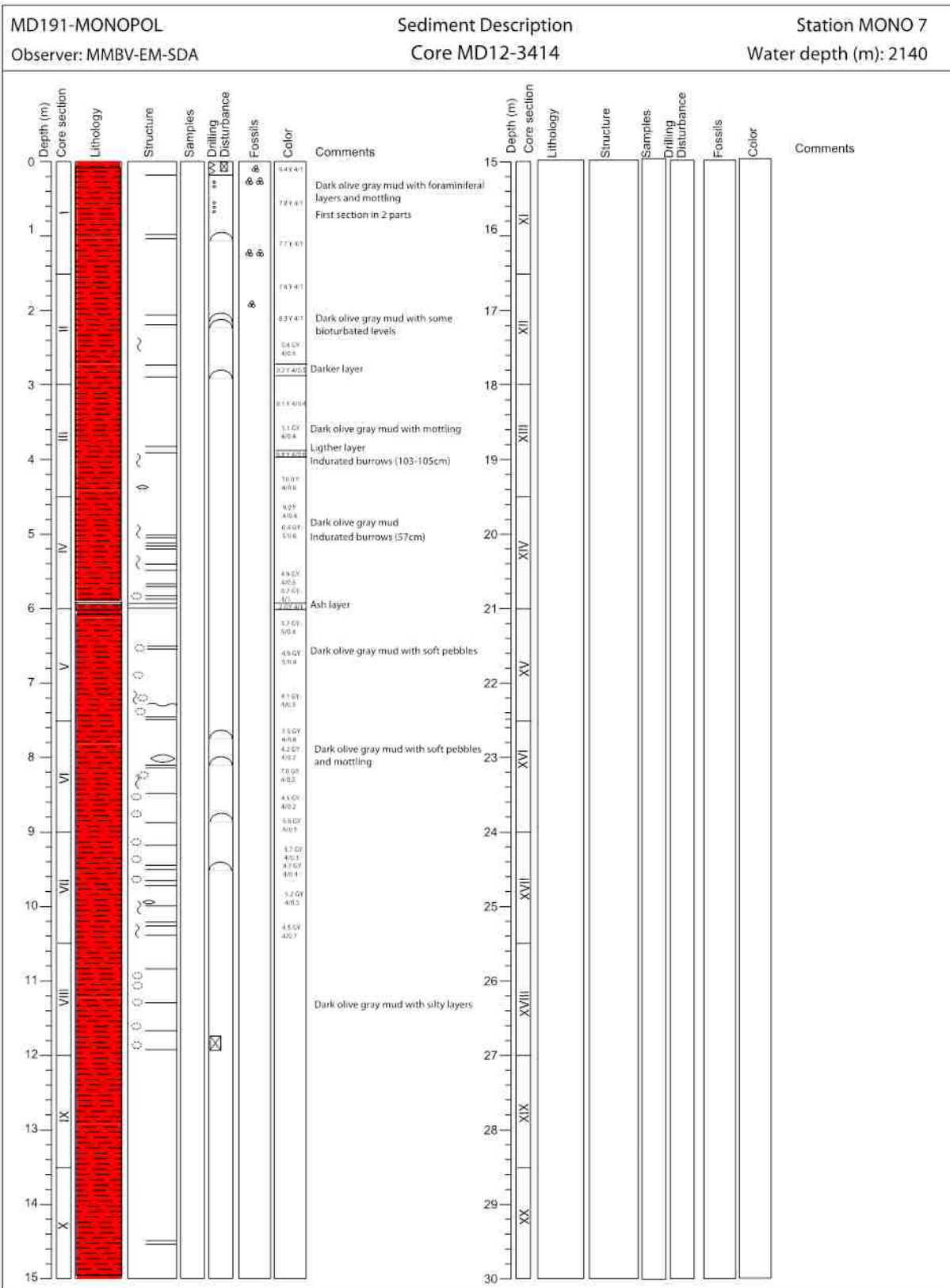


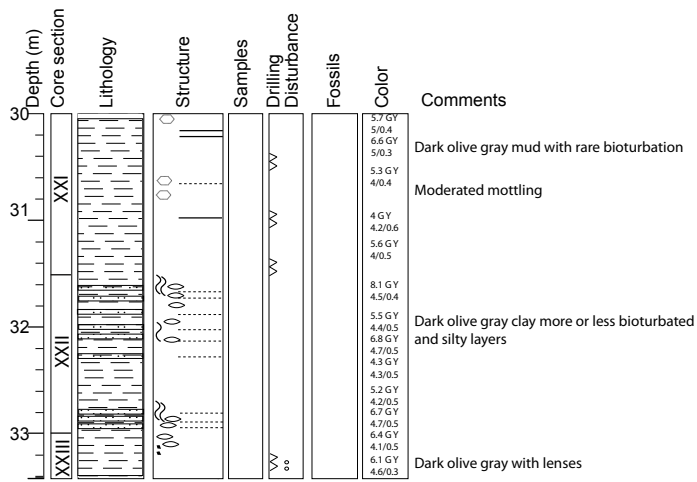
D) MD12-34-14 :

- Photographie de la carotte:



- Log :





Annexe 4 : Donnée des corrélations pic à pic via Analyséries

A) MD12 34-12 :

| Depth(SM 3412) | Age(SM MD180) |
|----------------|---------------|
| 0,348644931 | 11,7389687 |
| 0,740329845 | 14,0264344 |
| 1,132233923 | 17,1337019 |
| 2,070211573 | 26,0303402 |
| 2,498890555 | 29,8076085 |
| 4,901783752 | 50,0121474 |
| 5,606606955 | 54,9055989 |
| 5,819958921 | 58,2201718 |
| 7,001518535 | 73,5243895 |
| 7,270577933 | 79,7369762 |
| 7,460792843 | 83,6371495 |
| 8,15119793 | 109,178762 |
| 8,305084414 | 117,554564 |
| 8,529581474 | 126,866625 |
| 8,91409852 | 130,831292 |
| 9,886400623 | 147,293341 |
| 11,33252965 | 162,170829 |

| Depth(SM 3412) | Age(d18O) |
|----------------|------------|
| 8,66775756 | 134,824182 |
| 11,3249922 | 162,997008 |
| 11,5304955 | 185,466987 |
| 13,4673884 | 240,891788 |
| 15,2295474 | 276,517256 |
| 16,6647285 | 332,766424 |
| 19,3464498 | 364,984636 |

B) MD12 34-14 :

- Corrélation avec le pic du stade 3 (en gras)

| Depth(3414 SM) | Age(SM MD180) |
|-------------------|------------------|
| 0,15597588 | 11,9467758 |
| 1,4456565 | 25,8426916 |
| 4,00493438 | 47,091016 |
| 5,98094349 | 73,3461013 |

- Corrélation avec le pic du stade 4 (en gras)

| Depth(3414 SM) | Age(SM MD180) |
|-------------------|-------------------|
| 0,1575654 | 11,8111585 |
| 1,44671673 | 25,8056257 |
| 4,00810797 | 58,1892266 |
| 5,9711661 | 73,5584362 |