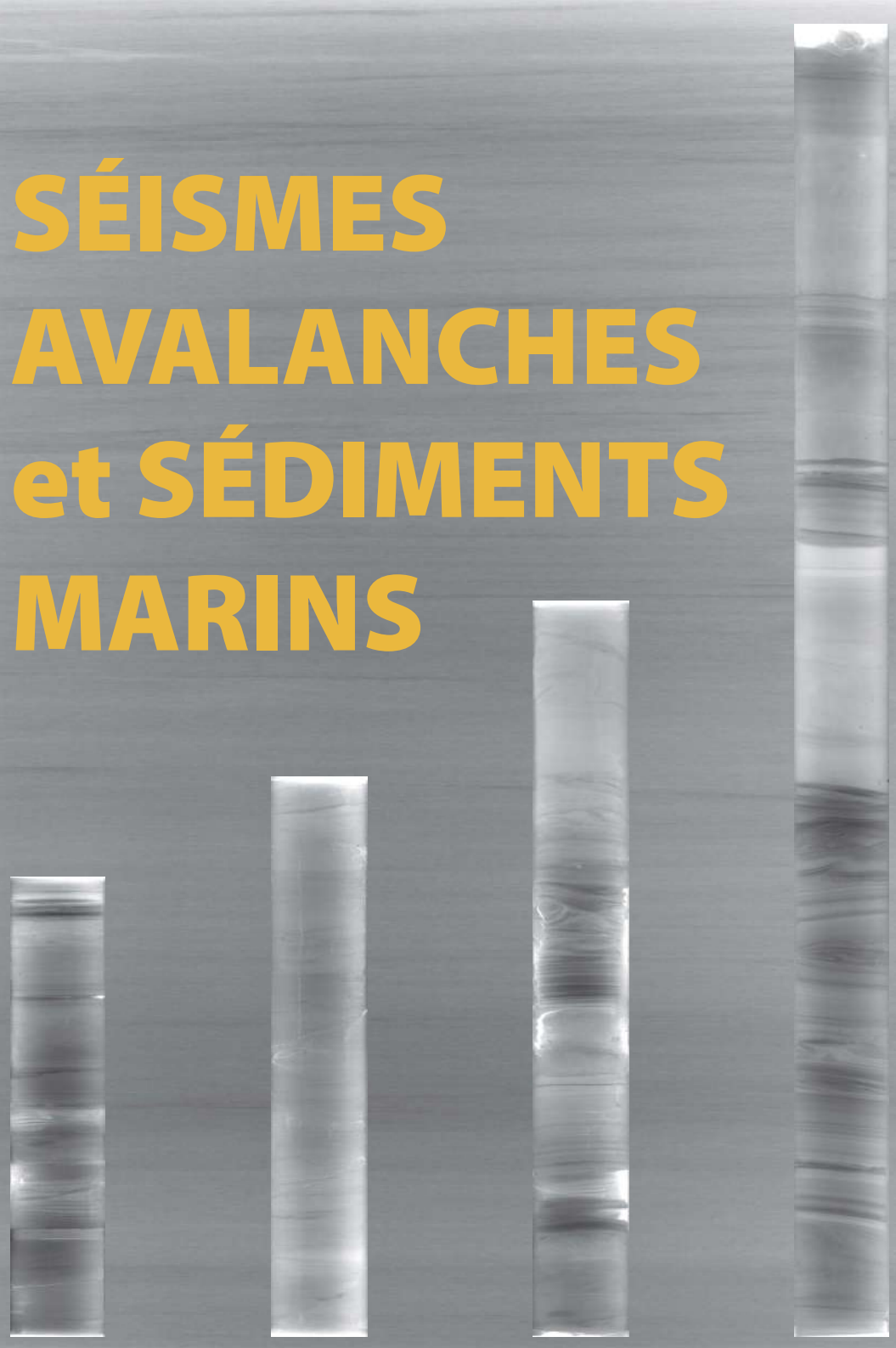
Palais DÉCOUVERTE

SÉISMES AVALANCHES et SÉDIMENTS MARINS



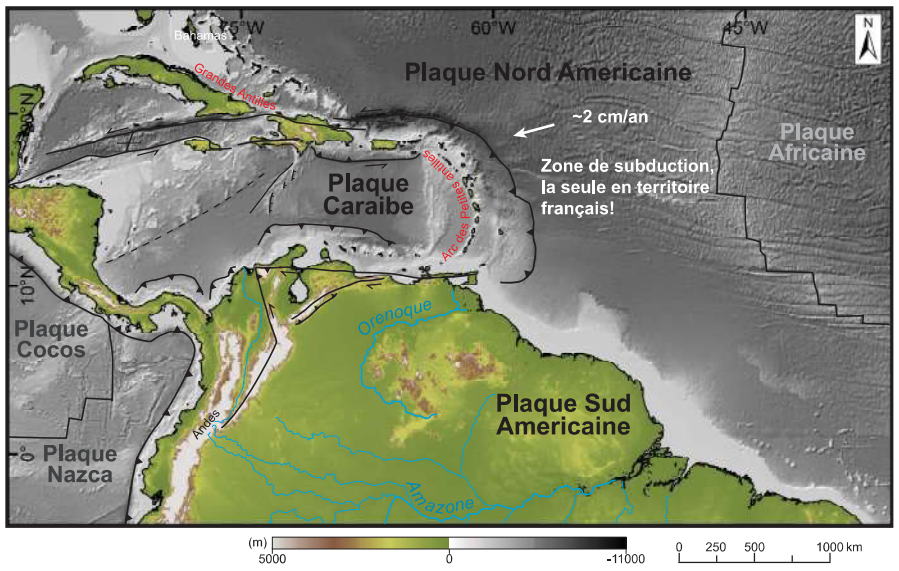
cnrs Ifremer IPGP Université de Paris Muséum National d'Histoire Naturelle Sorbonne Université LOCEAN ISTeP Institut des Sciences de la Terre de Paris UMR 7193-SU-CNRS UN CHERCHEUR, UNE MANIP

SÉISMES, AVALANCHES et SÉDIMENTS MARINS

Aux Petites Antilles, les plaques tectoniques sud- et nord-américaines plongent sous la plaque caraïbe. Cette zone de subduction est le siège de séismes, d'éruptions volcaniques et de tsunamis, parfois extrêmes. En quête d'informations sur ces évènements rares, les chercheurs de la campagne en mer CASEIS étudient des sédiments marins qui ont pu enregistrer environ 100 000 ans d'histoire géologique sur une épaisseur de 30 m.

©L.Johannes / MNHN

En 2016, les chercheurs et le matériel de la campagne CASEIS embarquent sur le *Pourquoi Pas ?*, un navire océanographique de l'Ifremer et de la marine nationale.



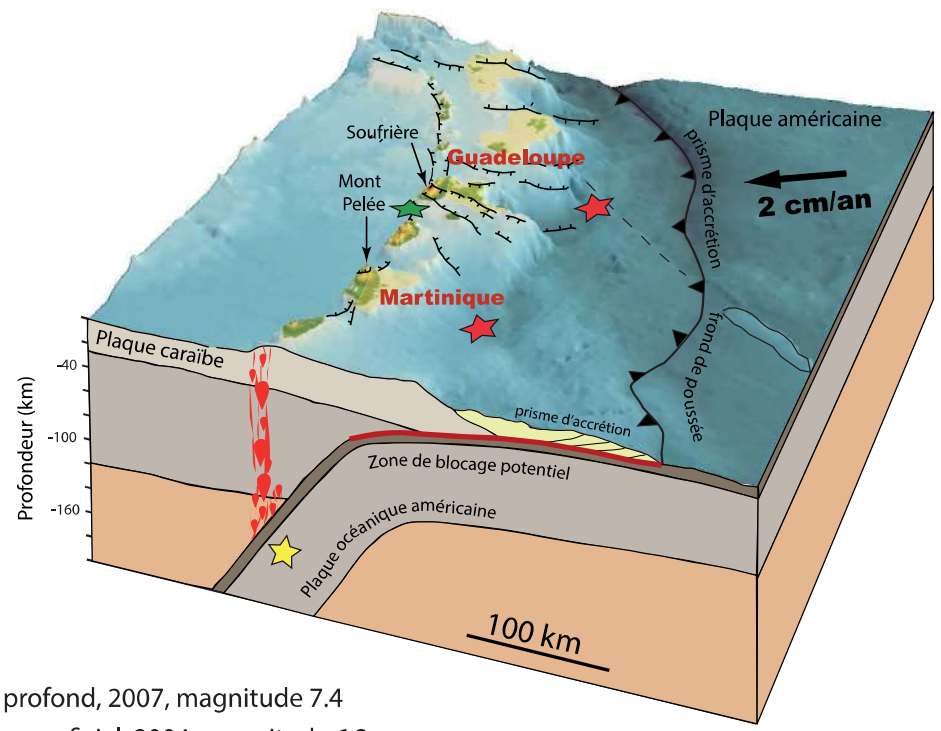
© C.Seibert / IPGP

L'arc des Petites Antilles résulte de la subduction des plaques américaines sous la plaque caraïbe à la vitesse de 2 cm/an.

Les séismes des Antilles sont reportés depuis le XVIIème siècle. Deux séismes destructeurs, ceux de 1839 et 1843 ont été les plus dévastateurs.

Ces séismes se déclenchent lors du relâchement des contraintes accumulées pendant des centaines voire des milliers d'années, le long de l'interface de subduction.

Un séisme de magnitude 8 libère 1000 fois plus d'énergie qu'un séisme de magnitude 6.



© N.Feuillet / IPGP

Séisme profond, 2007, magnitude 7.4

Séisme superficiel, 2004, magnitude 6.3

Séismes de 1839 et de 1843, magnitudes estimées respectivement à 8 et 8.5, origine supposée des séismes : interface de subduction

SORBONNE UNIVERSITÉ

Université de Paris

IPGP INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS

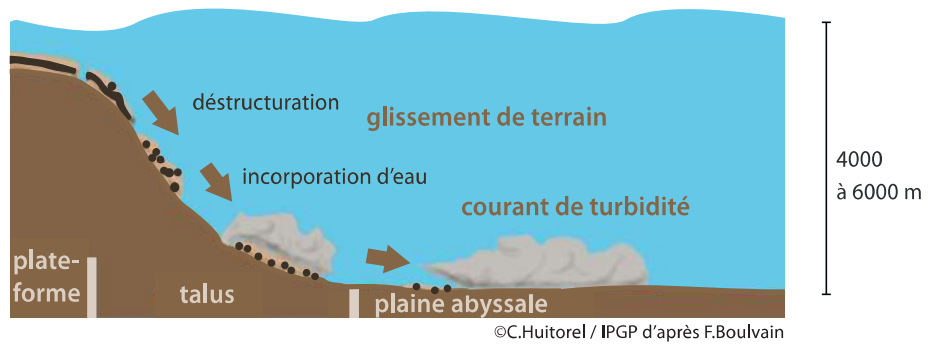
MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

UN CHERCHEUR, UNE MANIP

Les sédiments parlent

Les séismes, les tsunamis ou les éruptions volcaniques extrêmes peuvent provoquer des avalanches sous-marines. Les sédiments, en suspension dans les turbulences de l'eau, sont entraînés par gravité vers des bassins profonds où ils recouvrent des couches sédimentaires plus anciennes. Leurs dépôts s'appellent des «turbidites».

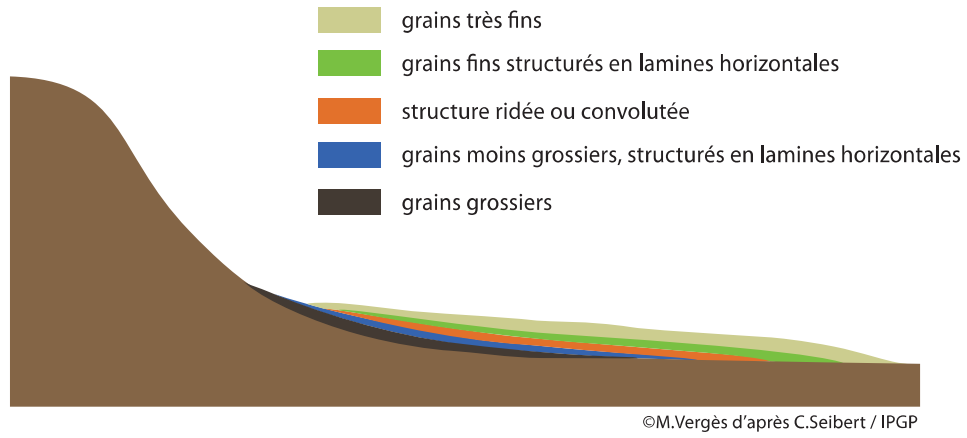
Lors d'un glissement de terrain sous-marin, les sédiments sont mobilisés. Mélangés à l'eau, ils forment un courant de turbidité qui termine sa course sur un fond plat, une plaine abyssale par exemple. Les courants de turbidités les plus forts transportent jusqu'à 200 km^3 de sédiments avec des vitesses pouvant atteindre 100 km/h. Les turbidites qu'ils forment ont une épaisseur comprise entre le centimètre et plusieurs mètres et peuvent s'étaler sur 200 000 km^2.



©C.Huitorel / IPGP d'après F.Boulvain

Un tri dynamique

Le courant de turbidité trie les grains des sédiments selon leur taille et leur densité. Tant que le courant est rapide, seuls les gros grains peuvent se déposer sur le fond marin, les grains plus fins étant transportés plus loin. Lorsque le courant est suffisamment ralenti, les grains fins se déposent en formant des rides (lamines obliques) bientôt recouvertes par des grains encore plus fins.

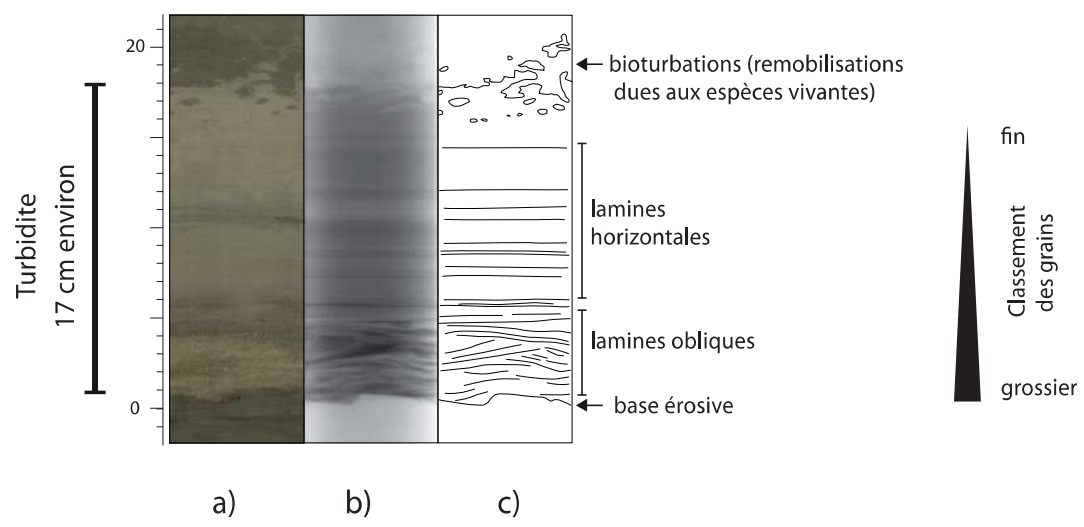


©M.Vergès d'après C.Seibert / IPGP

Faciès de turbidite

Turbidite trouvée dans une des carottes de la campagne CASEIS.

a) photo d'une turbidite
b) radiographie X : nuances de gris du plus sombre (forte densité) au plus clair (faible densité)
c) interprétation schématique



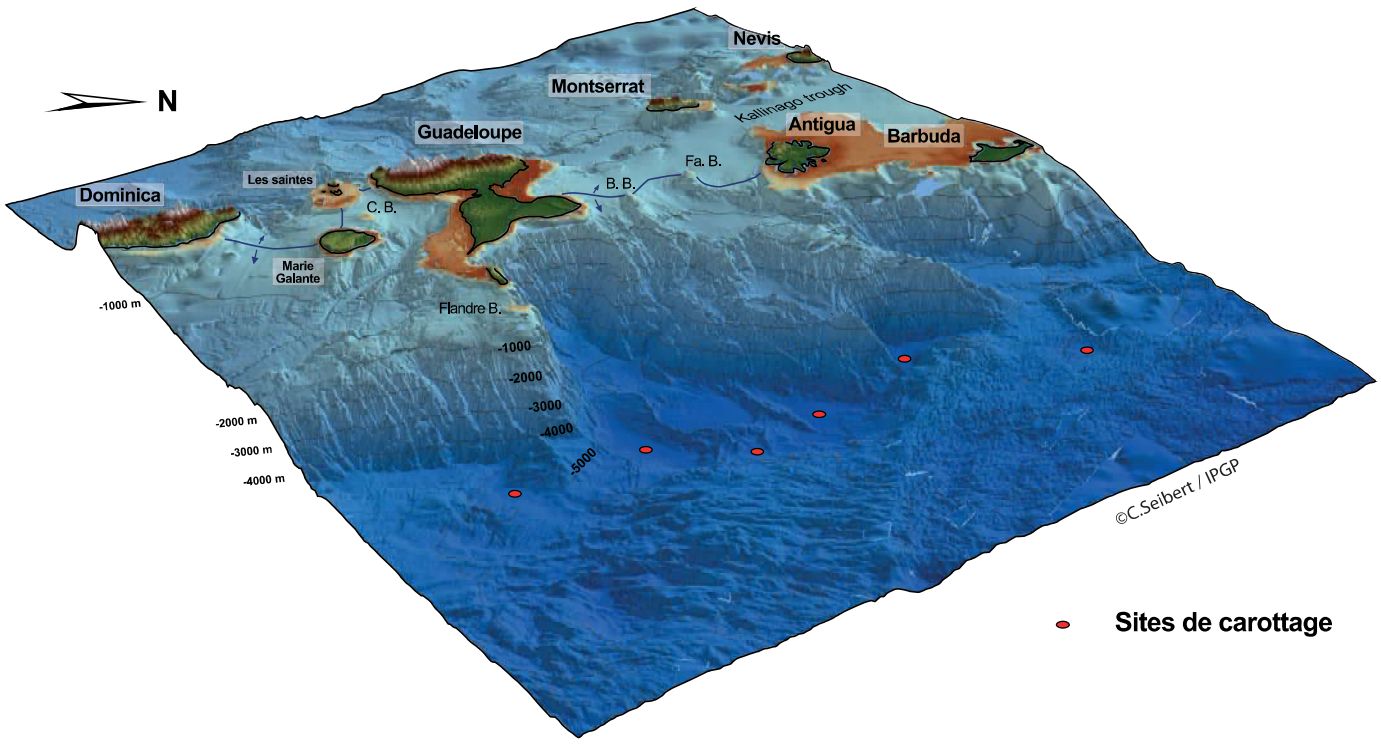
Les séismes extrêmes déclenchent simultanément des courants de turbidités en différents lieux. Des turbidites datées d'une même époque et retrouvées dans des sédiments prélevés à distance les uns des autres indiquent une corrélation entre ces dépôts et un même séisme, parfois extrême.

Sites choisis

Les fonds marins sont difficilement accessibles et les campagnes en mer coûteuse. Comment trouver des sites sédimentaires contenant des turbidites associées aux séismes extrêmes ?

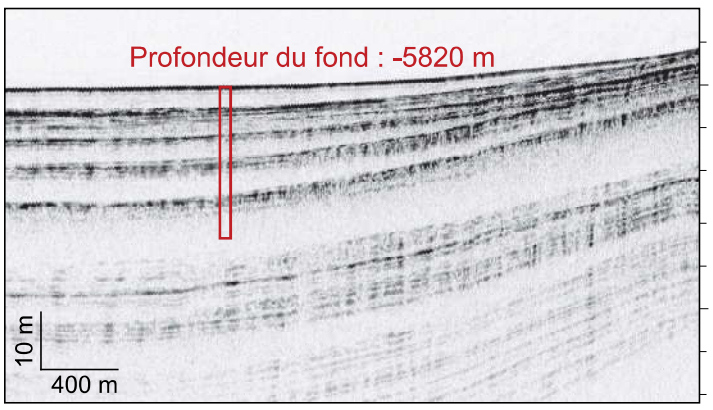
Des sites préservés et isolés

Les bassins sélectionnés pour le prélèvement des carottes sont préservés des cyclones, des tempêtes et des déstabilisations de pentes, phénomènes générateurs de turbidites. Ce sont des bassins profonds et éloignés de la zone de subduction.



On détermine le relief des fonds marins en mesurant la hauteur d'eau entre le bateau sondeur et le fond marin (bathymétrie). Cette première exploration repère les bassins les plus profonds, jusqu'à 6000 mètres environ (ici, les dimensions verticales sont exagérées, la pente la plus forte correspond à un angle de 25°).

Par l'imagerie acoustique CHIRP, on repère les couches sédimentaires de tout un bassin, jusqu'à 50 mètres de profondeur, avec une résolution verticale de l'ordre du mètre. Les niveaux de gris indiquent des couches de natures différentes, caractérisées ultérieurement à partir de l'analyse de la carotte prélevée (en rouge).



©C.Seibert / IPGP

Les ondes acoustiques permettent d'explorer les fonds marins. Plus leurs fréquences sont basses, plus elles pénètrent profondément mais moins leurs images sont précises (faible résolution). C'est l'inverse pour les hautes fréquences.

Carottage

Le carottage consiste à utiliser un tube cylindrique de plusieurs mètres de long pour prélever des sédiments marins. L'analyse des couches sédimentaires récoltées au sein de la carotte permet de retracer l'histoire géologique de la région étudiée.

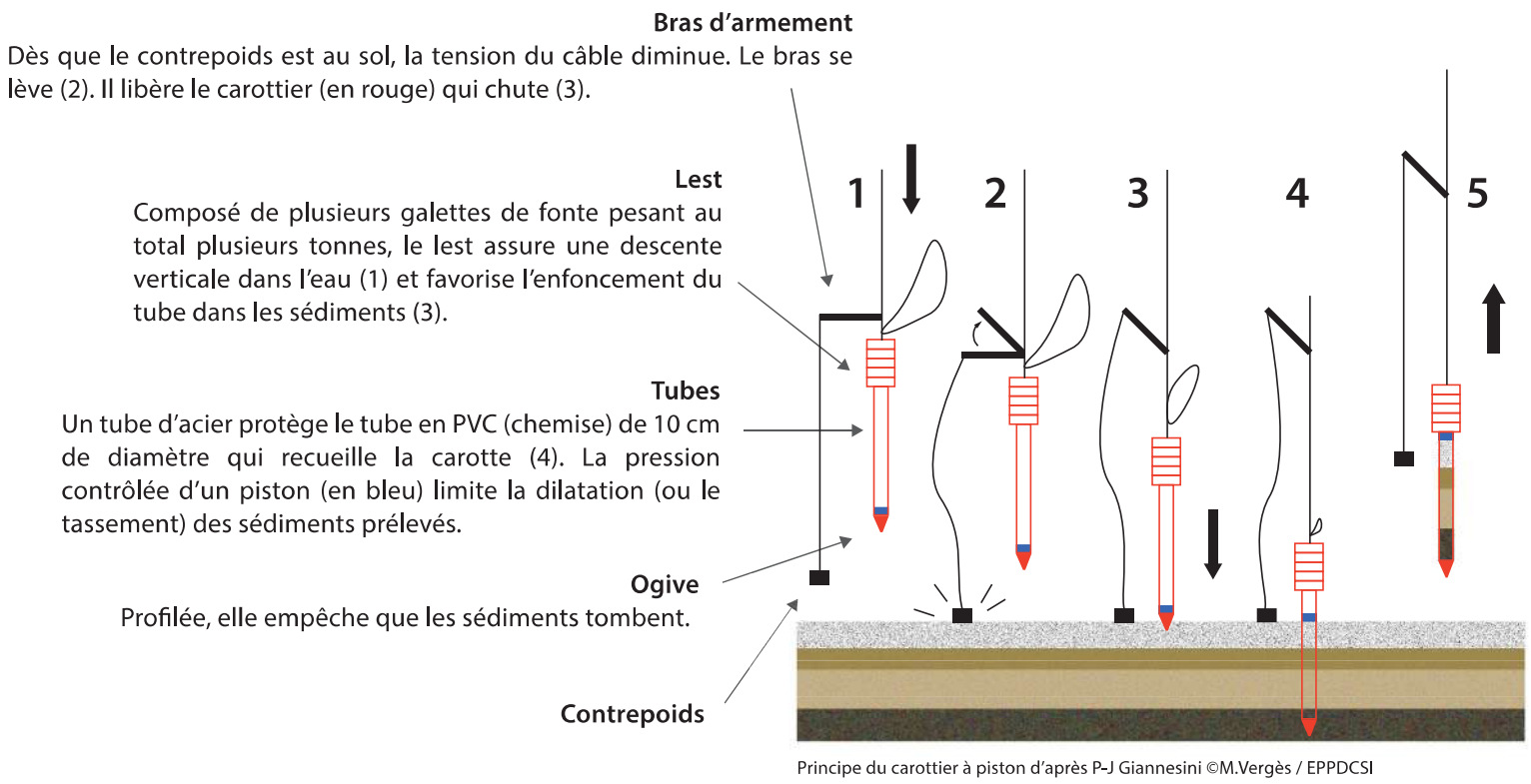
Mise à l'eau du dispositif de carottage, placé à l'horizontal puis positionné perpendiculairement à l'eau.

©C.Seibert / IPGP

©E.Moreno / MNHN

Technique de carottage

Le carottier Calypso prélève une carotte de sédiments en exploitant la gravité, à la différence du forage. Sous l'effet d'un lest, un tube s'enfonce dans le fond marin avant d'être arraché à l'aide d'un piston analogue à celui d'une seringue. Les carottiers sont dotés de nombreux instruments de mesure qui évaluent notamment la qualité des réglages, la profondeur de pénétration atteinte et indiquent si le sédiment est dilaté ou comprimé lors du carottage.



Principe du carottier à piston d'après P-J Giannesini ©M.Vergès / EPPDCSI

La longueur du carottier, la hauteur de chute et la masse du lest sont déterminées d'après le sondage du fond marin (imagerie CHIRP).

Préparer les carottes

©CASEIS©J.Patton

Une fois à bord, le tube d'acier est placé en position horizontale. La chemise en PVC qui renferme la carotte est extraite puis mesurée avant d'être divisée en tronçons de 1,5 mètre afin de faciliter son stockage. Les tronçons sont soigneusement refermés.

©CASEIS©J.Patton

©CASEIS©J.Patton

Chaque tronçon est numéroté selon un protocole précis : le n°1 est situé au sommet de la carotte. Le haut et le bas des tronçons, les profondeurs de leurs extrémités, et le nom de la carotte sont également précisés.

Secrets de carotte

Les demi-tronçons de « travail » sont analysés centimètre par centimètre et des échantillons sont prélevés afin de déterminer les propriétés physiques et chimiques des sédiments. La comparaison des carottes permet de localiser les turbidites associées aux séismes extrêmes.

À l'œil nu

Photographies juxtaposées des tronçons d'une carotte de sédiments (longueur de 19 mètres).

Géophysique

Structures invisibles révélées

Des structures laminaires obliques ou convolutées sont révélées par les rayons X, plus ou moins absorbés selon la densité des sédiments (structures denses en noir).

Taille des grains (granulométrie)

La lumière laser renvoyée par les particules de sédiments en suspension dans un liquide permet d'en déterminer la taille. La proportion de grains d'une taille donnée est indiquée par un code couleur (proportion croissante du bleu au rouge). La courbe de granulométrie est corrélée à la courbe des positions des turbidites.

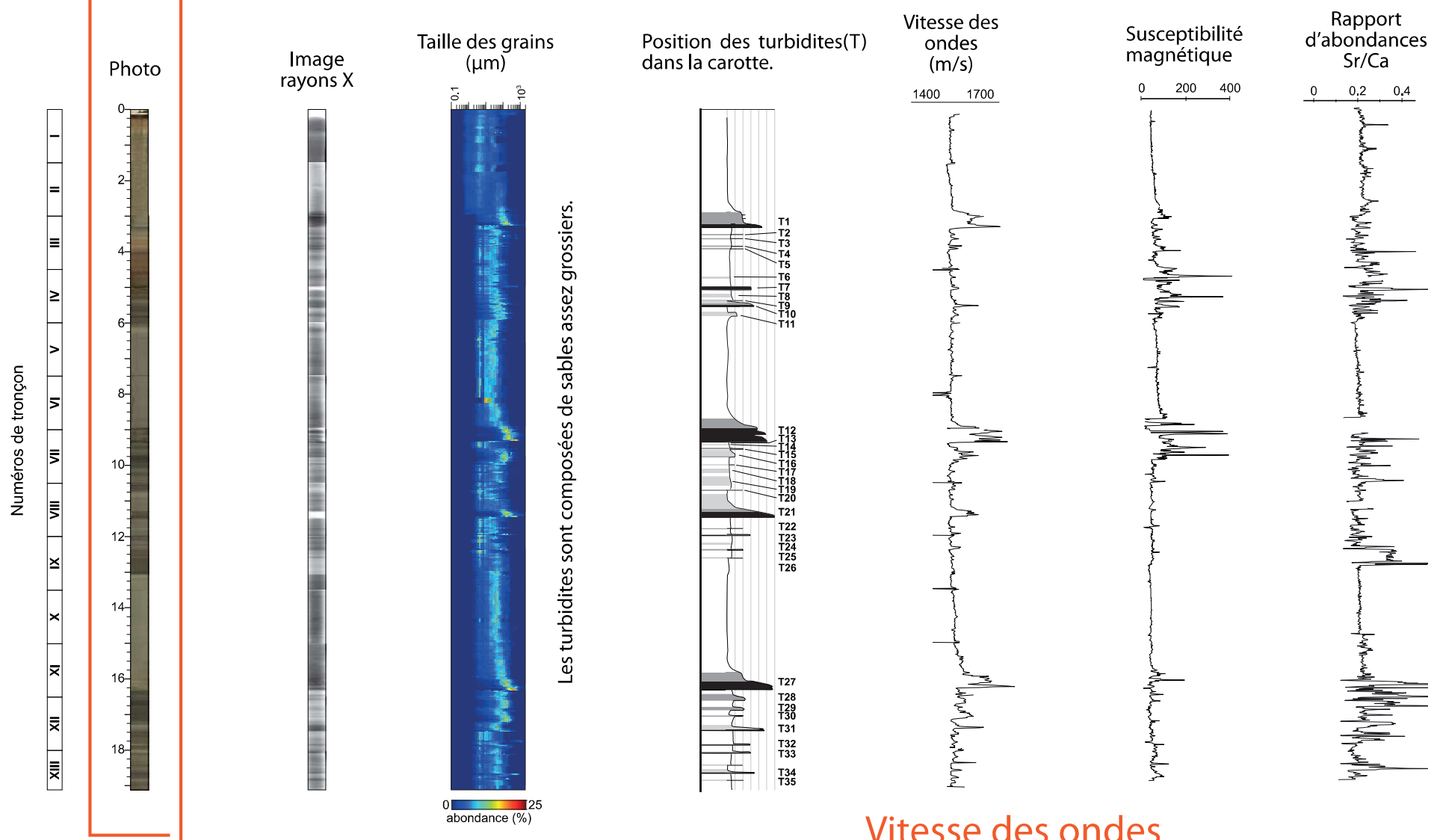
Géochimie

Éléments chimiques

Les rayons X révèlent la composition chimique des sédiments. En effet, les atomes les absorbent puis les réémettent à une longueur d'onde différente, caractéristique de leur nature chimique (fluorescence X).

Rapports d'abondances

Les rapports d'abondance entre éléments chimiques renseignent sur la nature et l'origine des sédiments (volcanique, calcaire, terrigène,...). Ils sont utilisés pour caractériser les dépôts et comparer les carottes entre elles.



Vitesse des ondes

La courbe de vitesse des ondes de pression (ondes P) permet entre autres de préciser les épaisseurs réelles des couches imagées lors des sondages acoustiques CHIRP.

Propriétés magnétiques

La courbe de susceptibilité magnétique traduit la capacité des sédiments à s'aimanter dans un champ magnétique. Des valeurs élevées peuvent témoigner de la présence de cendres volcaniques et de turbidites.

Protocole d'analyse

Mesures sur tronçons entiers

Les tronçons passent sur un banc de mesures qui évalue dans tout le volume : la densité, la susceptibilité magnétique et la vitesse des ondes de pression (ondes P).

Ouverture de la carotte

Chaque tronçon de carotte est découpé en deux demi-cylindres. Une demi-section « archive » sert de référence, et une demi-section « travail » est échantillonnée.

Après le découpage du tube en PVC, la carotte de sédiments est découpée en deux avec un fil à couper le beurre.

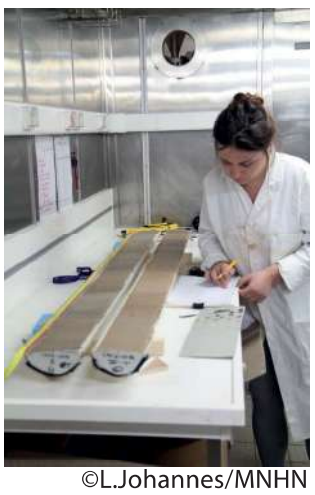
©L.Johannes / MNHN

Demi-tronçon Travail

Demi-tronçon Archive

Description

L'épaisseur des couches, les figures sédimentaires, les couleurs et les structures particulières sont décrites minutieusement.



©L.Johannes/MNHN

Mesures non destructives

©L.Johannes/MNHN

Photographies, susceptibilité magnétique en différents points, vitesse des ondes P.

Échantillonnage

L'observation d'échantillons prélevés sur la carotte permet une première identification de l'origine et de la composition des sédiments. Ici, observation à la loupe binoculaire.

Grains d'origine volcanique, remaniés par des actions mécaniques.

©C.Beck/MNHN

Stockage

Les tronçons de carotte sont conservés à 4°C à bord du bateau, puis entreposés dans les chambres froides du Museum national d'histoire naturelle à 8°C avec un taux d'hygrométrie compris entre 70 et 80% afin d'éviter que les sédiments ne sèchent.

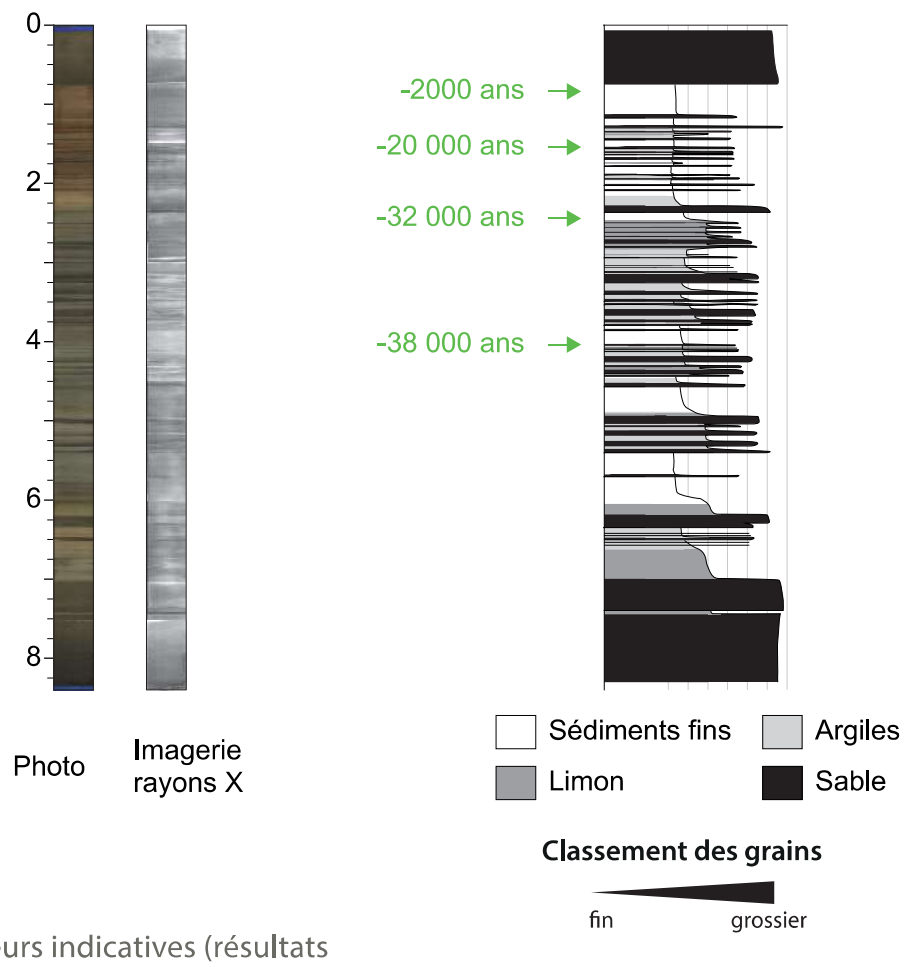
Datations

Les datations reposent sur plusieurs « horloges » complémentaires. Elles sont réalisées dans des couches contenant des fossiles d'organismes vivants, tels que les microplanctons. Ces couches de sédiments « biogéniques » se sont lentement accumulées, contrairement aux turbidites qui sont des dépôts quasiment instantanés à l'échelle des temps géologiques.

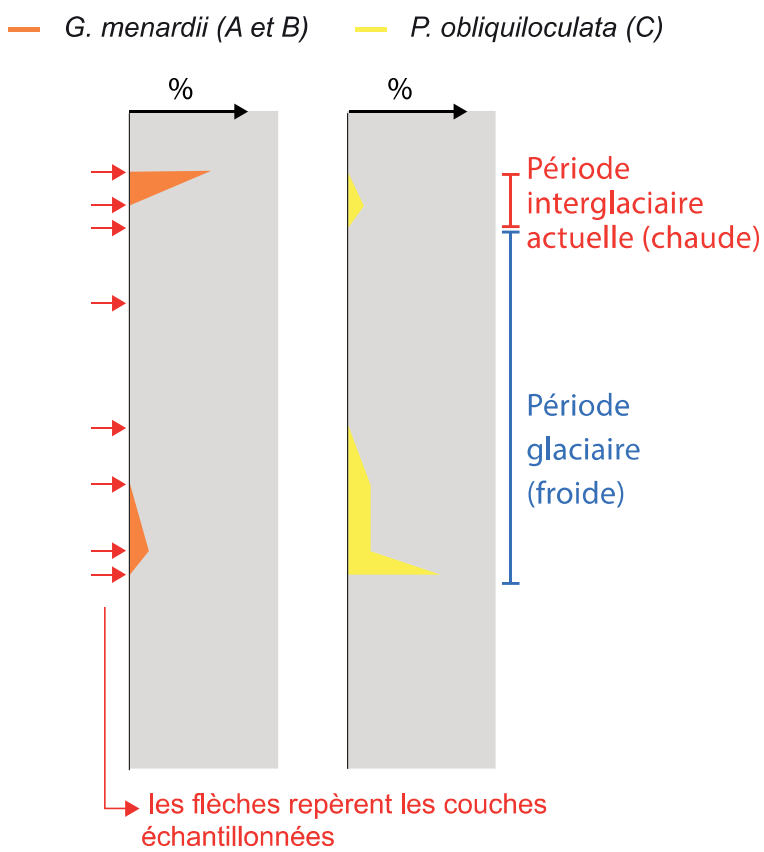
Les organismes vivants sont sensibles aux changements environnementaux (température, salinité, acidité, apports de nutriments...). Certaines espèces sont moins présentes pendant les périodes glaciaires. Leur abondance, mesurée par comptage, permet la datation relative des couches.

Foraminifères planctoniques vus au MEB (microscopie électronique à balayage)©DR

A : *Globorotalia menardii menardii*, B : *Globorotalia tumida flexuosa*, C : *Pulleniatina obliquiloculata*, D : *Globorotalia tumida tumida*.



* valeurs indicatives (résultats en cours de publication)



L'espèce *Globorotalia tumida tumida* ayant disparu il y a 70000 ans environ, son absence dans les comptages indique que la carotte est plus récente.

Le carbone 14 est naturellement présent dans les organismes vivants, y compris dans les squelettes calcaires des foraminifères. Dès qu'ils meurent, la quantité de carbone 14 (radioactif) diminue au cours du temps. Après 50 000 ans environ, les quantités sont trop faibles pour obtenir une datation fiable.

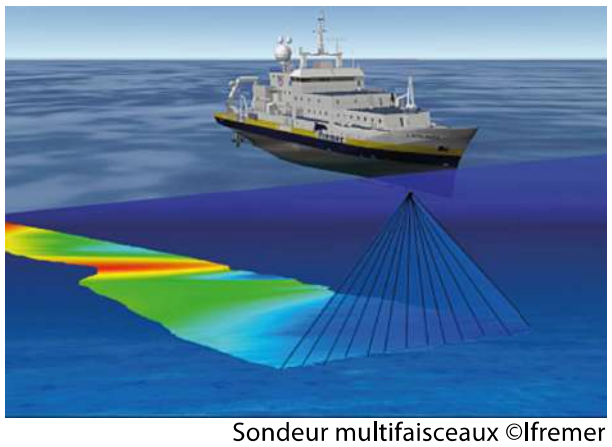
De nombreuses turbidites associées à des séismes extrêmes ont été trouvées dans les carottes prélevées au cours de la campagne CASEIS. Les deux plus récentes datent de 2500 ans au large de la Guadeloupe et 10 000 ans au large de la Martinique. D'autres études sont en cours afin de préciser la récurrence de tels évènements.

Bathymétrie

Imagerie des profondeurs

La bathymétrie désigne aussi bien la science qui s'intéresse aux reliefs et aux profondeurs des fonds marins que la carte des relevés topographiques obtenus en mesurant les hauteurs d'eau.

Le navire avance. Les ondes ultrasonores (fréquence 24 kHz) émises par son sonar se dirigent vers le fond marin qui les renvoie vers le haut. Connaissant la vitesse de propagation des ondes dans la colonne d'eau, on calcule la profondeur à partir de l'intervalle de temps entre l'émission et la réception de l'onde. Les sondes « multifaisceaux » émettent jusqu'à 880 faisceaux d'ondes simultanément. Elles permettent d'imager des fonds marins sur des largeurs d'autant plus grandes que ces derniers sont profonds (20 kilomètres de large pour un fond à 5000 mètres).



Sondeur multifaisceaux ©Ifremer

Les mesures bathymétriques prennent en compte les variations de la vitesse de propagation de l'onde avec la profondeur, la salinité et la température de l'eau. Les hauteurs d'eau sont corrigées des variations de profondeur dues aux marées et des mouvements du navire, mesurés par le système GPS.

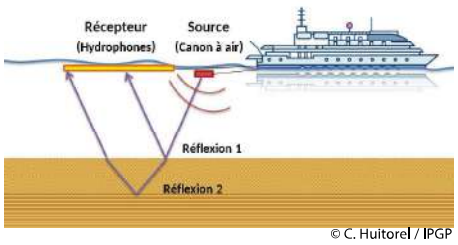
Réflexion sismique

Imagerie du sous-sol des fonds océaniques

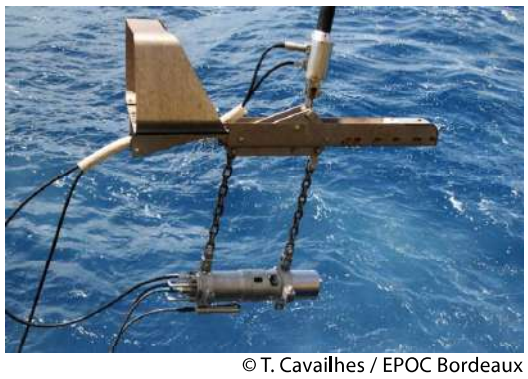
La technique de réflexion sismique (ou *seismic reflection)* fournit des images des premiers kilomètres du sous-sol marin. Elle contribue à la sélection des sites éloignés de la zone de subduction.

Un canon à air émet des ondes acoustiques de basse fréquence variant de quelques dizaines à quelques milliers de hertz selon que l'on souhaite privilégier la pénétration de l'onde ou la résolution des images.

À l'interface des différentes couches du fond marin, l'onde est en partie réfléchie vers la surface de l'eau et en partie transmise dans la couche inférieure. Les ondes renvoyées successivement sont détectées par des capteurs (hydrophones) positionnés le long d'une « flûte » (ici en jaune).

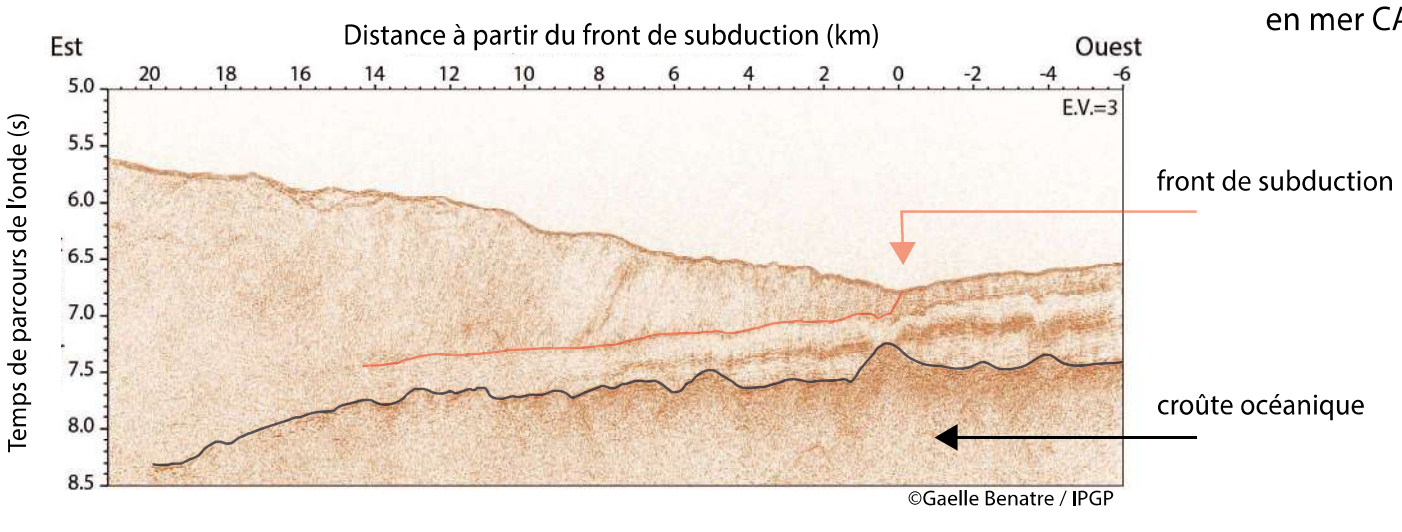


© C. Huitorel / IPGP



© T. Cavailhes / EPOC Bordeaux

Canon à air (ci-dessus) et flûte (ci-dessous) de 700 m dotée de 48 capteurs, utilisés lors de la campagne en mer CASEIS.



©Gaelle Benatre / IPGP

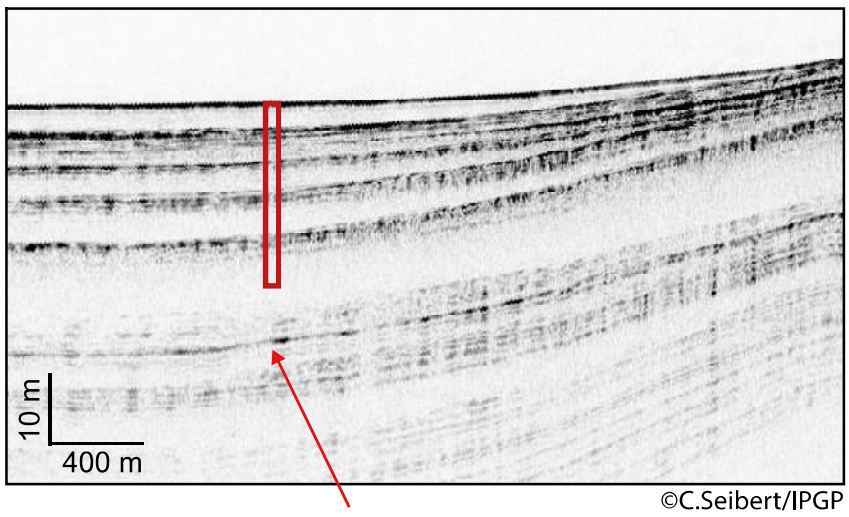
© L.Johannes / MNHN

Imagerie sismique CHIRP

Imagerie précise des couches sédimentaires

L'imagerie CHIRP (*Compressed High-Intensity Radiated Pulse*) est une variante de l'imagerie *seismic reflection*. Les sons utilisés pour sonder les fonds marins sont intenses et de courte durée (impulsions). Leur fréquence de base augmente sur toute la durée de l'émission. Cette modulation en fréquence permet d'obtenir des images des fonds marins plus fines, avec des détails de l'ordre du mètre.

Imagerie CHIRP d'un bassin sédimentaire : le bassin s'est rempli couche par couche. L'hétérogénéité des couches est repérée par des lignes plus ou moins sombres. Ce type d'imagerie permet de préciser le lieu du carottage mais la nature exacte des couches reste inconnue jusqu'à l'analyse des sédiments prélevés. Parfois une couche épaisse de sédiments spongieux, ou trop grossiers, fait plier le carottier.



©C.Seibert/IPGP

Localisation et dimension de la carotte prélevée.

Le carottier boîte

Carottier prêt à plonger

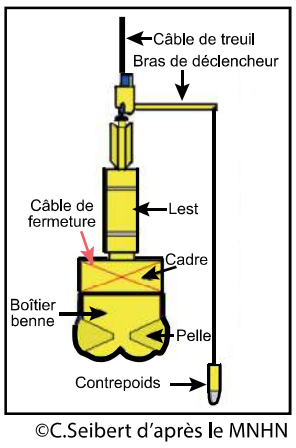
Box Core ©Descamps

Le carottier « boîte » prélève un cube de sédiments au fond de la mer. À bord du bateau, les scientifiques en extraient délicatement de petites carottes délicatement de petites carottes. Elles renferment les archives sédimentaires les plus récentes.

3 carottages faits main

©C.Seibert / IPGP

Schéma du carottier



©C.Seibert d'après le MNHN

Carottier sur le navire

©C.Seibert / IPGP

Boîte de sédiments, siphonage de l'eau

©C.Seibert / IPGP

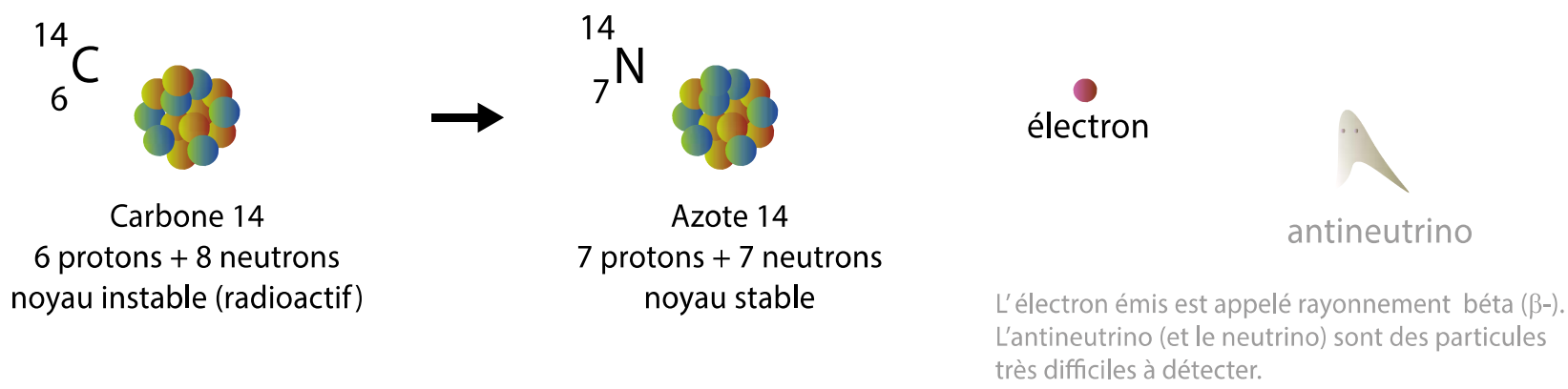
Cube de sédiments (50 cm de côté environ) prélevé par le carottier boîte.

©C.Seibert IPGP

Radioactivité du carbone 14

L'atome de carbone 14 est radioactif. Son noyau instable se transforme spontanément en un noyau stable d'azote 14.

Désintégration d'un noyau de carbone 14



Statistiquement, 50% du carbone 14 se désintègre au cours d'une période de 5730 ans. Il est cependant produit en permanence dans la haute atmosphère, suite à des interactions entre l'azote de l'air et une « pluie » de particules venue du cosmos (rayonnement cosmique). Plus la production de carbone 14 est importante, plus les organismes vivants peuvent en assimiler.

On compte environ 1 atome de carbone 14 pour mille milliards (10^{12}) d'atomes de carbone 12, la plus abondante des variétés (ou isotopes) de carbone.

Une faible proportion du dioxyde de carbone de l'air et de l'eau contient des atomes de carbone 14.

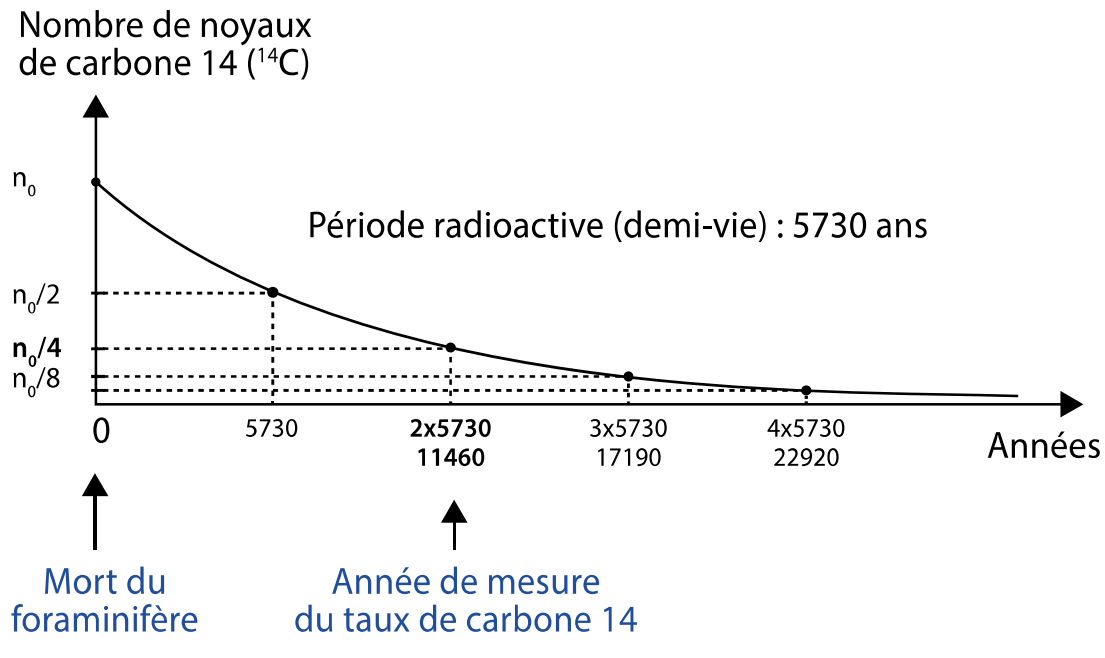
Datation au carbone 14

Les foraminifères sont des organismes unicellulaires vivant dans l'eau. Tout au long de leur vie, ils construisent une coquille calcaire à partir de minéraux contenant du carbone issu de leur environnement. Dès qu'ils meurent, la quantité de carbone 14 diminue au cours du temps alors que celle du carbone 12 non radioactif reste stable. Ce « chronomètre » radioactif permet de dater des échantillons jusqu'à 50 000 ans environ.

Un échantillon de sédiments marins dont le taux de ^{14}C est quatre fois plus faible que le taux ^{14}C dans l'eau a un « âge carbone 14 » d'environ 11460 ans.

Connaissant l'âge carbone 14, il est possible de déduire l'âge réel de l'échantillon en tenant compte des variations du taux de ^{14}C dans l'air au cours des temps et du délai d'incorporation dans l'eau de mer du dioxyde de carbone atmosphérique.

Courbe de décroissance radioactive du carbone 14



Taux de ^{14}C = nombre de noyaux de carbone 14 / nombre de noyaux de carbone 12.

Les équipes

La campagne en mer CASEIS s'est déroulée au large des Antilles, du 29 mai au 5 juillet 2016 à bord du *Pourquoi Pas ?*, un navire océanographique de l'Ifremer et de la marine nationale. Elle a impliqué plusieurs équipes de scientifiques de l'IPGP, du MNHN, de Sorbonne Université et du CNRS.

Institut de physique du globe de Paris

L'IPGP est un organisme de recherche en géosciences de renommée mondiale, associé au CNRS et établissement-composante d'Université de Paris, qui regroupe plus de 500 personnes. Il couvre toutes les **disciplines des sciences de la terre et des planètes via l'observation, l'expérimentation et la modélisation, à toutes les échelles de temps et d'espace.** L'IPGP a aussi la charge de services labellisés en volcanologie, sismologie, magnétisme, gravimétrie et érosion. Notamment, **les observatoires permanents de l'IPGP surveillent les 4 volcans actifs français d'outre-mer en Guadeloupe, en Martinique, à la Réunion et à Mayotte (REVOSIMA).** Le département de la formation et des études doctorales de l'IPGP offre à ses étudiants des formations en géosciences qui associent observation, analyse quantitative et modélisation.

Laboratoire d'océanographie et du climat - expérimentation et approches numériques

Le LOCEAN, laboratoire du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) et du CNRS, conduit des **études sur les processus physiques et biogéochimiques de l'océan et leur rôle dans le climat en interaction avec les écosystèmes marins**. Ses équipes, largement reconnues au niveau international, abordent une large gamme d'échelles de temps et d'espace pour une meilleure **compréhension de la dynamique et des variations de l'océan au sein du système climatique ainsi que son évolution présente, passée et future.** Elles contribuent aussi au développement de méthodes d'analyses, de modélisation et d'observation, ainsi qu'à l'**observation systématique de l'océan, *in situ* ou depuis l'espace.**

Le MNHM exerce sa vocation à travers cinq missions, relayées par des disciplines et des métiers variés, qui lui permettent de traiter un sujet dans toutes ses dimensions : **la recherche fondamentale et appliquée ; l'expertise ; la valorisation, l'enrichissement, la conservation et la mise à disposition des collections et des données issues du patrimoine naturel et culturel ; la formation dont l'enseignement ; l'action éducative et la diffusion de la culture scientifique et technique à l'intention de tous les publics.**

Institut des Sciences de la Terre de Paris

L'ISTeP est une Unité Mixte de Recherche (UMR 7193), rassemblant plus de 150 personnes, sous la double tutelle de Sorbonne Université et du CNRS. L'ISTeP a pour principales **thématiques de recherche la rhéologie de la croûte et de la lithosphère, la dynamique des bassins sédimentaires, des chaînes de montagnes et des marges continentales, les bio-minéralisations comme traceurs des environnements actuels et fossiles, marins et terrestres et la dynamique planétaire vue par la pétro-géochimie**. Une partie de l'activité concerne également les propriétés physico-chimiques des matériaux naturels (minéraux, magmas) ainsi que les aléas naturels (sismiques, gravitaires et volcaniques). Les recherches s'appuient sur une **approche allant du terrain à la modélisation numérique thermomécanique en passant par les analyses** utilisant des outils variés.

Autres partenaires

Geo AZUR
TERRE - OCÉAN - ESPACE

LSCE

ISTerre

OSU
Oregon State
UNIVERSITY

UQAR
Université du Québec
à Rimouski

PROJET FINANCÉ PAR L'ANR
ANR
PROJECT FUNDED BY THE ANR

Au cœur des carottes

Demi-tronçons de carottes à taille réelle
Photographie à gauche, radiographie (rayons X) à droite

n°1

0cm
10cm
20cm
30cm
40cm
50cm
60cm
70cm
80cm
90cm
100cm
110cm
120cm
130cm
140cm
150cm

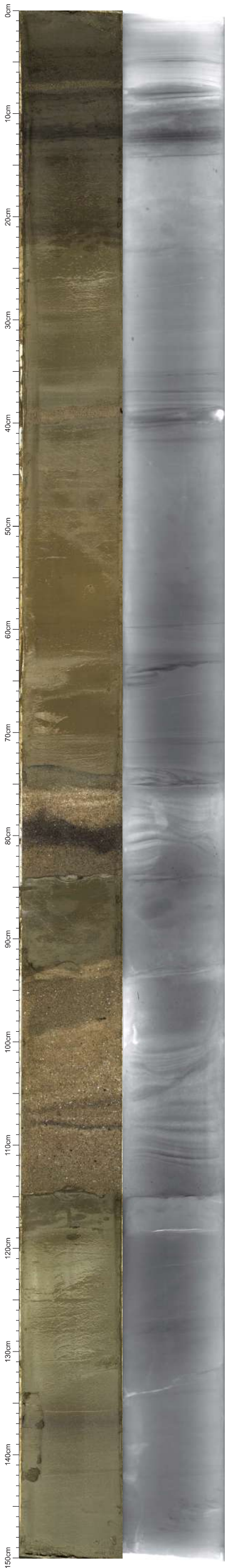
n°7

0cm
10cm
20cm
30cm
40cm
50cm
60cm
70cm
80cm
90cm
100cm
110cm
120cm
130cm
140cm
150cm

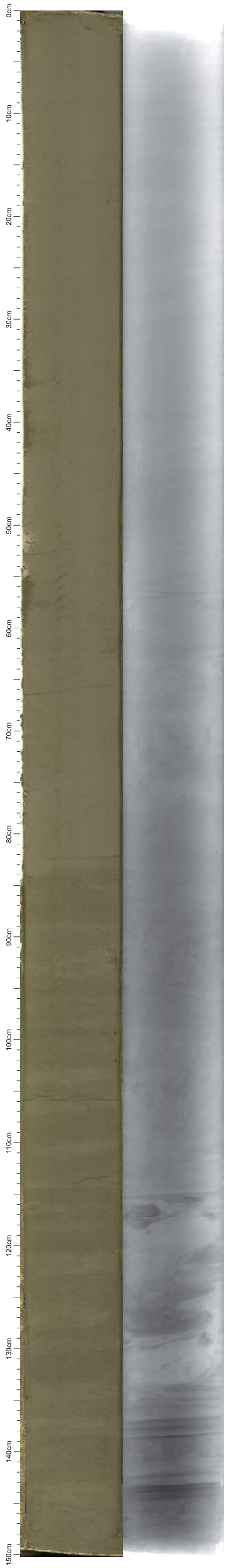
n°4

0cm
10cm
20cm
30cm
40cm
50cm
60cm
70cm
80cm
90cm
100cm
110cm
120cm
130cm
140cm
150cm

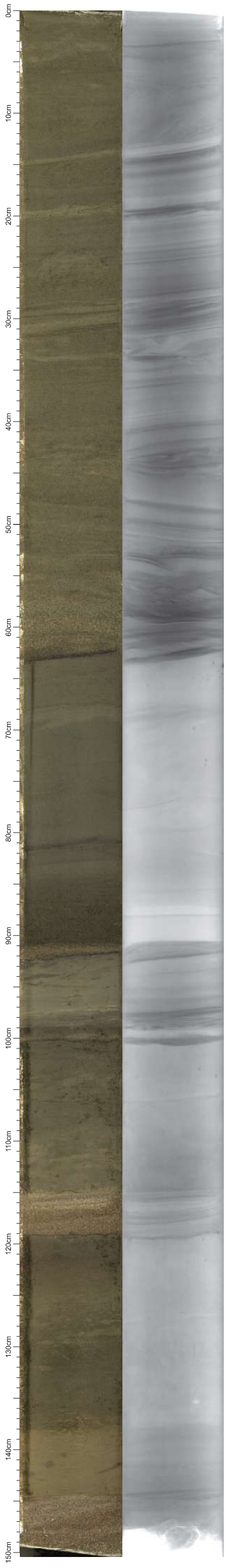
n°11


0cm
10cm
20cm
30cm
40cm
50cm
60cm
70cm
80cm
90cm
100cm
110cm
120cm
130cm
140cm
150cm

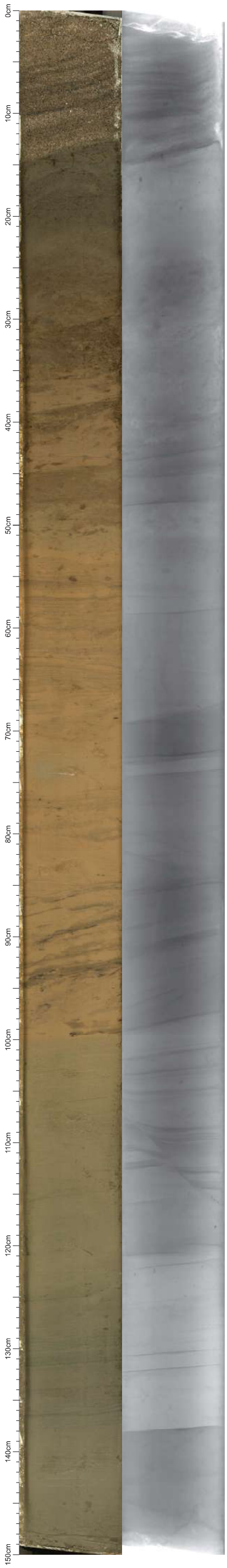
n°14


0cm
10cm
20cm
30cm
40cm
50cm
60cm
70cm
80cm
90cm
100cm
110cm
120cm
130cm
140cm
150cm

n°15


0cm
10cm
20cm
30cm
40cm
50cm
60cm
70cm
80cm
90cm
100cm
110cm
120cm
130cm
140cm
150cm

n°16


0cm
10cm
20cm
30cm
40cm
50cm
60cm
70cm
80cm
90cm
100cm
110cm
120cm
130cm
140cm
150cm