



Géosciences de surface (Paléoenvironnement)

Traceurs sédimentaires des variations du niveau marin et de la mousson sud-est asiatique depuis 450 ka en mer de Chine du Sud

Sébastien Boulay^a, Christophe Colin^{a,*}, Alain Trentesaux^b

^a *Laboratoire des interactions et dynamique des environnements de surface, UMR IDES–CNRS 8148, bât. 504, université Paris-Sud, 91405 Orsay cedex, France*

^b *Laboratoire « Processus et bilans des domaines sédimentaires », UMR PBDS–CNRS 8110, Bât. SN5, université Lille-1, 59655 Villeneuve-d'Ascq, France*

Reçu le 29 septembre 2006 ; accepté après révision le 10 mars 2008

Disponible sur Internet le 6 mai 2008

Présenté par Georges Pédro

Résumé

L'analyse minéralogique et sédimentologique de sédiments terrigènes de la marge nord de la mer de Chine du Sud a permis de reconstituer les variations d'intensité de la mousson sud-est asiatique et d'estimer la réactivité du système sédimentaire aux changements climatiques au cours des derniers 450 ka. Un couplage données granulométriques–traitement numérique montre l'existence de trois sous-populations au sein du sédiment, dont les évolutions respectives permettent de déterminer la nature et l'intensité des modes de transport du sédiment. En bas niveau marin, le remaniement de la plate-forme permet le transport, vers le bassin, d'une population grossière (20–40 μm). Les deux autres populations (4–6 μm et 9–13 μm) sont contrôlées par la position de la ligne de rivage (niveau marin) et/ou par la dynamique des fleuves (mousson). Enfin, les apports éoliens sur la marge nord de la mer de Chine du Sud peuvent être considérés comme négligeables devant l'importance des apports fluviaux et des processus de remobilisation *Pour citer cet article : S. Boulay et al., C. R. Geoscience 340 (2008).*

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Sedimentary proxies of the sea-level and Southeast Asian monsoon variations in the South China Sea over the last 450 kyr. In order to reconstruct the past variations of the Southeast Asian monsoon intensity and estimate the sedimentary system reactivity to climatic changes in Southeast Asia over the last 450 kyr, mineralogical and sedimentological analyses have been performed on the terrigenous fraction of the South China Sea sediment. End-member modelling coupled with grain size data discriminates three end-members that determine the nature and intensity of the main sediment transport vectors. Low sea-level stands are characterized by sediment reworking that allows transportation of a coarse end-member (20–40 μm) to the deep-basin. By contrast, the other end-members (4–6 μm ; 9–13 μm) are controlled by the shoreline position (sea level) and/or by changes of the rivers capacity transport (monsoon). Finally, aeolian input to the northern margin of the South China Sea can be considered negligible compared to the massive fluvial input and the reworking of the sediments. *To cite this article: S. Boulay et al., C. R. Geoscience 340 (2008).*

© 2008 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : christophe.colin@u-psud.fr (C. Colin).

Mots clés : Paléoclimat ; Mousson sud-est asiatique ; Mer de Chine du Sud ; Niveau marin ; Minéralogie des argiles ; Granulométrie ; Décomposition linéaire de données

Keywords: Palaeoclimate; Southeast Asian monsoon; South China Sea; Sea-level variations; Clay mineralogy; Grain size; End-member modelling

Abridged English version

Introduction

The Southeast Asian monsoon controls the climate over the South China Sea and Southeast Asia. The winter monsoon is characterized by cold northwest winds and a period of great aridity, while the summer monsoon is marked by southeast winds and intensive precipitation over Southeast Asia [1,33]. Over the geological time scale, changes in the strength of the summer monsoon had an impact on the sedimentary records in the South China Sea (e.g., [3,20,29,34]). This paper reports on a high-resolution study of siliciclastic grain size analyses of ODP sites from the northern margin of the South China Sea, in order to establish the effect of sea level and Southeast Asian monsoon changes on the sedimentation of the northern margin of the South China Sea over the last 450 kyr.

Material and methods

ODP sites 1144, 1145 and 1146 are located in the northern part of the South China Sea, in front of the Pearl River mouth (Fig. 1). Age models were established using high-resolution planktonic and benthic foraminifera $\delta^{18}\text{O}$ records combined with biostratigraphic data [6,7] (Fig. 2). Laser grain size analyses have been performed on the siliciclastic fraction of the hemipelagic sediments from ODP sites 1144 and 1146. An inversed algorithm for end-member modelling of compositional data [24,36] has been applied to these grain size data in order to determine the grain size distribution of the different siliciclastic sub-populations mixed in the sediment and to establish their relative variations through time.

Results and discussion

Terrigenous fluxes and grain size variations

The terrigenous fluxes at ODP site 1144 are about six times higher than those of ODP site 1146 (Fig. 2). For both sites, these fluxes are correlated

with the sea-level variations; each sea-level drop is associated with an increase of the terrigenous fluxes (Fig. 2).

Both sites present similar mean grain size variations. Glacial stages are characterized by coarser siliciclastic particles than interglacial stages (Fig. 2). End-member modelling indicates the presence of three sub-populations with similar grain size distribution in both ODP sites 1144 and 1146: a fine population (4–6 μm), an intermediate population (9–13 μm) and a coarse population (20–40 μm) (Fig. 3). For ODP site 1144, variations of the content of the fine (6 μm) and intermediate (13 μm) end-members are opposed to that of the coarse one and can be correlated with sea-level changes (Fig. 4). Glacial stages sediments are characterized by a high content of the coarse sub-population (40 μm). For ODP site 1146, the proportions of the fine (4 μm) and intermediate (9 μm) end-members are not correlated with the glacial/interglacial oscillations (Fig. 4).

The high contents of the coarse sub-population (20–40 μm) during glacial stages are related to sea-level variations. The large South China Sea shelf (on average 250 km wide) strongly controls the sediment transfer from the continent to the deep sea. During sea-level drops, the shore-line and the river mouth were closer to the basin, the swell-induced reworking also increased. Thus, the coarse-grain population (20–40 μm) settled on the shelf during high sea-level stands can be reworked and transported seaward.

Contribution of the aeolian input

In previous studies, siliciclastic grain size variations in the South China Sea sediments have been interpreted as a balance between Pearl River fine sediments input (clays) and aeolian coarse sediments input (silts) [28,29,34]. However, the terrigenous fluxes and the end-member modelling presented here do not confirm a massive aeolian supply (Fig. 4). A comparison between the terrigenous fluxes of both ODP sites and the aeolian fluxes for the present and last glacial times indicates that the aeolian contribution is less than 11% of the total sediment. In addition, the intermediate sub-population (9–13 μm), which

presents a grain size similar to that of the aeolian material, does not show any changes consistent with the Chinese loess records that vary with the glacial/interglacial oscillations.

Influence of the monsoon on sediment transportation

For ODP sites 1145 and 1146, the variations of the smectite/(illite + chlorite) ratio have been used as a proxy for past summer monsoon intensity changes [3,20] (Fig. 5). When the summer monsoon is enhanced, the weathering of the volcanic Taiwan–Luzon arc (Fig. 1) produces huge amounts of smectite that are transported to the northern shelf of the South China Sea by the dominant oceanic currents circulation associated with summer monsoon intensification [3,20]. By contrast, ODP site 1144 is characterized by a lower smectite/(illite + chlorite) ratio, not correlated with those of the two other sites (Fig. 5). This is interpreted as strong illite and kaolinite inputs from the Asian continent and reworking of the continental shelf sediments (in agreement with the grain size results).

In order to avoid the influence of the coarse end-member, induced by the reworking of the continental shelf, the ratio between the relative contribution of the fine (4–6 μm) and intermediate (9–13 μm) sub-populations has been calculated (Fig. 5). Enhanced summer monsoons (high smectite/(illite + chlorite) ratio) are correlated with decreases of the grain size ratio. Intensification of the summer monsoon rainfall can induce an increase of the physical weathering over the Pearl River drainage area. This can feed the deep basin with coarser sediment (silt) and induce a decrease of the ratio between the relative contribution of the fine (4–6 μm) and intermediate (9–13 μm) sub-populations.

Conclusion

Grain size analyses coupled with end-member modelling allow us to establish a sediment transport pattern from the Asian continent to the deep basin of the South China Sea. The end-member modelling discriminates three sub-populations characterized by their own transport dynamics. The coarse end-member (20–40 μm) is mainly controlled by sea-level variations and reworking of sediments from the continental shelf during low sea-level stands. The fine (4–6 μm) and intermediate (9–13 μm) sub-populations depend mainly on the Pearl River input and on the variations of the intensity of the Southeast Asian monsoon rainfall. The

end-member modelling data, combined with the terrigenous fluxes, indicates a minor aeolian input into the South China Sea.

1. Introduction

Le domaine sud-est asiatique est sous l'influence de la mousson d'Asie du Sud-Est, qui se caractérise par un renversement saisonnier des vents et une modification du régime des précipitations. En été, le continent se réchauffe plus que l'océan. Cela induit une cellule de basses pressions sur le continent, qui est le moteur du transport, vers l'ouest, des masses d'air de l'océan Pacifique, occasionnant ainsi d'abondantes précipitations sur l'Asie du Sud-Est. En hiver, le phénomène s'inverse. Le continent asiatique devient plus froid que l'océan, créant de hautes pressions sur la Sibérie, qui engendrent des vents froids et secs, circulant du nord-ouest vers l'océan Pacifique [33].

Au cours du Quaternaire, les variations relatives d'intensité des moussons d'été et d'hiver ont eu des répercussions (1) sur les conditions d'hydrolyse affectant l'Asie du Sud-Est, (2) sur l'érosion mécanique, par le ruissellement, des bassins versants d'alimentation, (3) sur la dynamique du transport de matériel éolien depuis les déserts asiatiques et (4) sur les courants de surface en mer de Chine du Sud. Toutes ces modifications ont un impact sur la sédimentation en mer de Chine du Sud, en contrôlant, en particulier, les sources du matériel terrigène et les vecteurs de transport du sédiment.

De nombreuses études portant sur les variations de l'intensité de la mousson est-asiatique ont été entreprises dans les lèss des plateaux de Chine centrale (par exemple, [1,37]), dans les sédiments de l'océan Pacifique (par exemple, [26,27]) et, plus récemment, en mer de Chine du Sud [2,18,29]. Elles indiquent un renforcement (affaiblissement) de l'intensité de la mousson d'hiver au cours des stades isotopiques glaciaires (interglaciaires), mettant ainsi en avant une connexion entre les changements climatiques des hautes latitudes et l'intensité de la mousson d'hiver sud-est asiatique. Toutefois, des études récentes, basées sur les sédiments du Nord de la mer de Chine du Sud, ont mis en évidence le fait que la mousson d'été sud-est asiatique ne répondait pas seulement au forçage hautes latitudes (mousson d'hiver), mais qu'elle était au contraire principalement contrôlée par l'insolation reçue par la Terre aux basses latitudes, impliquant une forte contribution de la précession de l'orbite terrestre [3,34]. Une telle variabilité a également été démontrée pour la mousson d'été indienne [8,10,11].

L'objectif de ce travail est d'estimer la réactivité du système sédimentaire face aux changements passés du climat ayant affecté l'Asie du Sud-Est au cours des derniers 450 ka, à partir de l'étude détaillée de forages marins profonds ODP (*Ocean Drilling Program*) prélevés sur la marge nord de la mer de Chine du Sud, au large de la rivière des Perles (Fig. 1). Une étude granulométrique couplée à une synthèse des résultats minéralogiques de la fraction argileuse des sédiments de cette zone [3,5,20,28] permet d'estimer l'impact des variations de l'intensité de la mousson sud-est asiatique et du niveau marin sur la sédimentation du Nord de la mer de Chine du Sud. Les résultats granulométriques ont été traités par des algorithmes mathématiques établis par Weltje [36]. Cette approche permet de définir statistiquement le nombre de populations granulométriques variant au sein d'un mélange et d'en calculer les évolutions relatives au cours du temps. Cette technique, déjà utilisée en mer d'Arabie et en Atlantique, a permis de discriminer et de quantifier la contribution des sédiments provenant de différents vecteurs de transport : délestage par les icebergs, courant de turbidité, apports éoliens, apports fluviaux et vannage

par les courants de fond [23–25]. Dans les sédiments de la mer de Chine du Sud, nous cherchons : (1) à identifier les principaux vecteurs de transport du sédiment depuis le continent jusqu'au bassin profond ; (2) à savoir si la sédimentation de cette marge océanique, caractérisée par une large plate-forme continentale, est le siège d'apports éoliens importants associés à la dynamique des vents de la mousson d'hiver, comme cela a été avancé par quelques études récentes [28,29,35] ; (3) à définir, à partir des variations granulométriques observées, quelle est la part attribuable au remaniement des sédiments de la plate-forme continentale et celle liée aux variations passées du régime hydraulique de la rivière des Perles, associées à la mousson sud-est asiatique.

2. Matériel et méthodes

Trois sites ODP ont été prélevés au cours du Leg 184 sur la marge nord de la mer de Chine du Sud (Fig. 1). Les sites 1144, 1145 et 1146 sont localisés sur le talus d'une large plate-forme continentale, à une distance actuelle d'environ 450 km de l'embouchure de la rivière

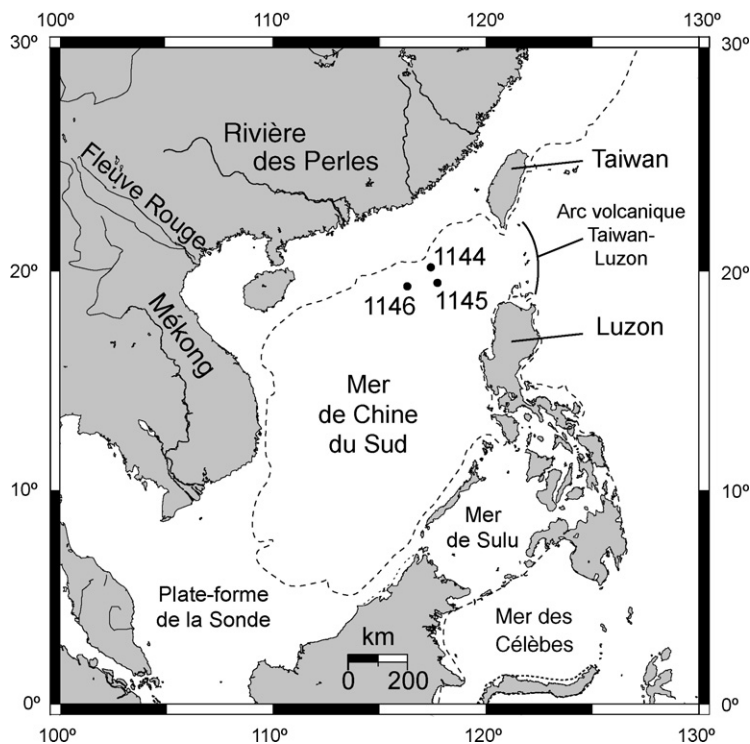


Fig. 1. Localisation des sites ODP 1144 (20°03.18'N, 117°25.14'E ; prof. 2037 m), 1145 (19°35.04'N, 117°37.86'E ; prof. 3175 m) et 1146 (19°27.40'N, 116°16.37'E ; prof. 2092 m), au large de la rivière des Perles. Les pointillés marquent la position de la ligne de rivage à -120 m.
Fig. 1. Localisation of ODP sites 1144 (20°03.18'N, 117°25.14'E; depth 2037 m), 1145 (19°35.04'N, 117°37.86'E; depth 3175 m) and 1146 (19°27.40'N, 116°16.37'E; depth 2092 m), in front of the Pearl River mouth. The dotted line marks the shoreline position for a sea-level drop of -120 m.

des Perles (Fig. 1). Le choix a été principalement motivé par leurs taux de sédimentation importants et leurs positions géographiques, permettant la réalisation d'un transect depuis la rivière des Perles jusqu'au bassin.

Le site 1144 (20°03.18'N, 117°25.14'E ; prof. 2037 m) est localisé sur une partie de la plate-forme à forte pente, dans une zone d'accumulation importante, et enregistre une sédimentation hémipélagique d'argiles à silts quartzeux et de nanfossiles. Les taux de carbonates sont faibles au cours du Pléistocène et varient entre 10 et 20 % en poids [31]. Le site 1145 est localisé à la base du talus continental (19°35.04'N, 117°37.86'E; prof. 3175 m). C'est le site le plus profond et les sédiments sont principalement argileux. Ils

contiennent de faibles teneurs en silice biogène (<10 %), et ses taux de carbonates avoisinent, en moyenne, 10 %, comme pour le site 1144 [31]. Quant au site 1146, prélevé à mi-pente d'un talus continental à plus faible pente (19°27.40'N, 116°16.37'E ; prof. 2092 m), il enregistre une sédimentation principalement composée d'argiles à nanfossiles. Les taux de carbonates sont plus importants que ceux des autres sites avec des taux moyens de ~20 % [31].

Les modèles d'âge ont été établis à partir de données biostratigraphiques et de l'enregistrement haute résolution du $\delta^{18}\text{O}$ de foraminifères planctoniques et benthiques (Fig. 2a). Le site 1144 [6] présente quatre hiatus sédimentaires longs de 21, 55, 17 et 28 ka,

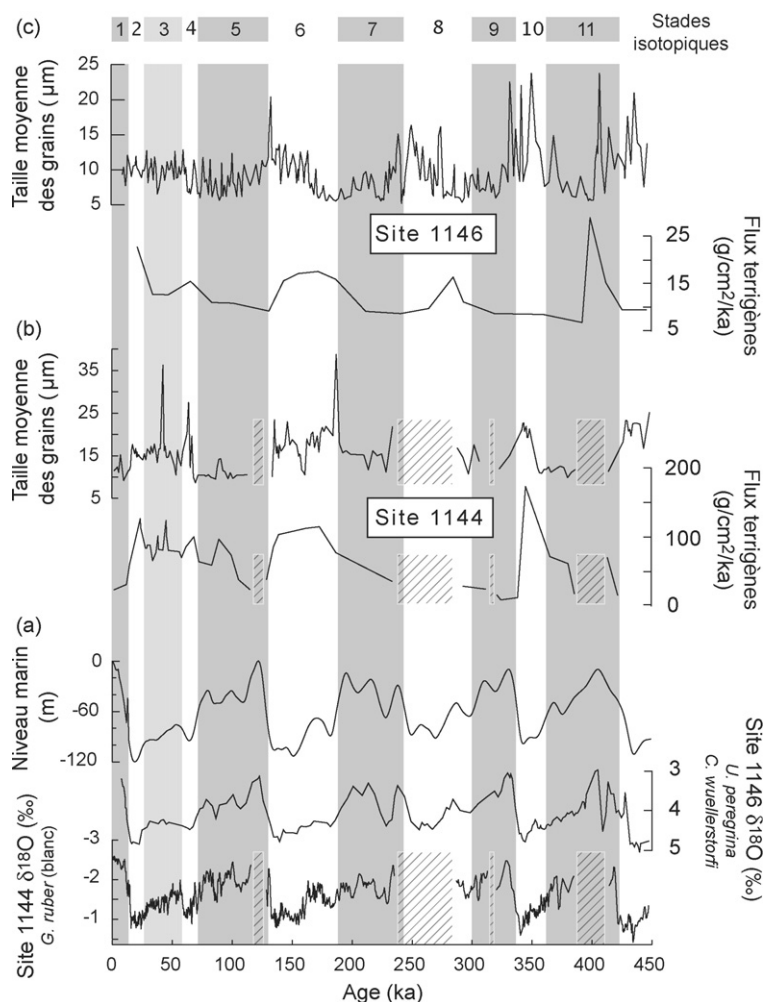


Fig. 2. (a) Variations du $\delta^{18}\text{O}$ des sites ODP 1146 (*U. peregrina*, *C. wuellerstorfi*) [7] et 1144 (*G. ruber*, blanc) [6], ainsi que les variations du niveau marin associées [17] ; (b) variations des tailles de grain moyen et des flux terrigènes du site 1144 au cours des derniers 450 ka ; (c) idem (b), mais pour le site 1146. Les hachures marquent les hiatus sédimentaires.

Fig. 2. (a) Isotopic stratigraphy and $\delta^{18}\text{O}$ variations for ODP site 1146 (*U. peregrina*, *C. wuellerstorfi*) [7] and ODP site 1144 (*G. ruber*, white) [6] as well as the related sea-level variations; (b) mean grain size and terrigenous fluxes variations over the last 450 kyr; (c) same as (b) for Site 1146. Dashed parts mark the sedimentary hiatus.

respectivement, au cours des événements isotopiques 5.5, 7.5–8.4, 9.1 et 11.3 (Fig. 2a), ainsi qu'un taux de sédimentation moyen important, de l'ordre de 60 cm/ka au cours des derniers 450 ka. Les sites 1145 [21] et 1146 [7] fournissent des enregistrements sédimentaires continus pour les derniers 450 ka, avec un taux de sédimentation moyen de l'ordre de 17 cm/ka.

Les analyses granulométriques ont été pratiquées sur la fraction décarbonatée (sites 1144 et 1146) et désopalisée (site 1146) du sédiment, au moyen d'un granulomètre laser Malvern Mastersizer X (laboratoire PBDS, université de Lille I) et d'un Coulter LS-130 (laboratoire IDES, université de Paris XI, Orsay). La décarbonatation des sédiments a été réalisée par une attaque à l'HCl (2N), et la suppression de l'opale par une attaque sélective au carbonate de sodium pendant 5 h, à 80 °C. Une étude comparative des données d'échantillons désopalisés du site 1144 (Chen, com. pers.) et non désopalisés (cette étude) indique que les deux approches donnent des résultats cohérents, avec des variations aux tendances similaires et des différences de moyennes granulométriques ne dépassant pas 3,5 µm entre les deux séries. Ceci implique que la présence de silice biogène a un effet négligeable sur les tendances granulométriques des sédiments des sites étudiés. De plus, différentes observations microscopiques (optiques et MEB) confirment une présence faible de sédiment biogénique siliceux.

À l'ensemble des distributions granulométriques des échantillons de chacun des deux sites, nous avons appliqué une méthode de décomposition numérique des données granulométriques, élaborée par Weltje [36]. Les algorithmes mathématiques utilisés permettent, à partir d'une séquence temporelle de distributions granulométriques, d'établir le nombre de populations granulométriques à l'origine de la variabilité de la taille des grains observée et leurs distributions granulométriques (Fig. 3). Dans un deuxième temps, le calcul des facteurs de mélange de ces populations permet d'en visualiser l'évolution relative au cours du temps [23–25] (Fig. 4).

L'analyse minéralogique a été effectuée sur trois préparations pour chaque échantillon, essais naturel, glycolé et chauffé [15]. Les échantillons du site 1144 ont été analysés au laboratoire IDES (université de Paris XI, Orsay), sur un appareil Philips Model 1730 à anticathode de cuivre. Les échantillons des sites 1146 et 1145 ont, eux, été analysés au laboratoire PBDS (université de Lille-1) sur un diffractomètre MEB Philips PW 1710 à anticathode de cuivre et monochromateur de nickel. L'examen des trois diffractogrammes ainsi obtenus permet de déterminer la composition minéralogique des assemblages argileux.

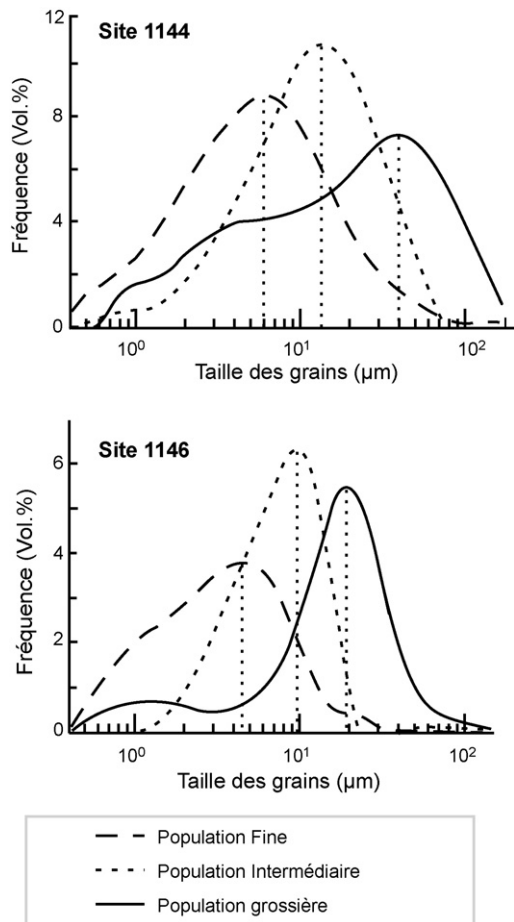


Fig. 3. Distributions granulométriques des trois sous-populations (end-members) identifiées au sein du mélange des données granulométriques des sites ODP 1144 et 1146 sur les derniers 450 ka. Les valeurs de modes sont 6, 13 et 40 µm pour le site 1144 et 4,5, 9,5 et 20 pour le site 1146.

Fig. 3. Grain size distribution of the identified three sub-populations (end-members) calculated for ODP sites 1144 and 1146 over the last 450 kyr. Modal values are 6, 13 and 40 µm (ODP site 1144) and 4.5, 9.5 and 20 (ODP site 1146).

Une mesure semi-quantitative (marge d'erreur 5 %), par mesure de surfaces des pics, a été effectuée grâce au logiciel MacDiff [22].

3. Résultats et discussion

La marge nord de la mer de Chine du Sud est alimentée principalement par la rivière des Perles, dont la charge solide actuelle est estimée à $\sim 100 \times 10^6$ t/an [38]. Elle est formée d'une large plate-forme continentale de 250 km de large en moyenne, peu profonde, ce qui implique d'importants changements de la paléogéographie au cours des variations du niveau

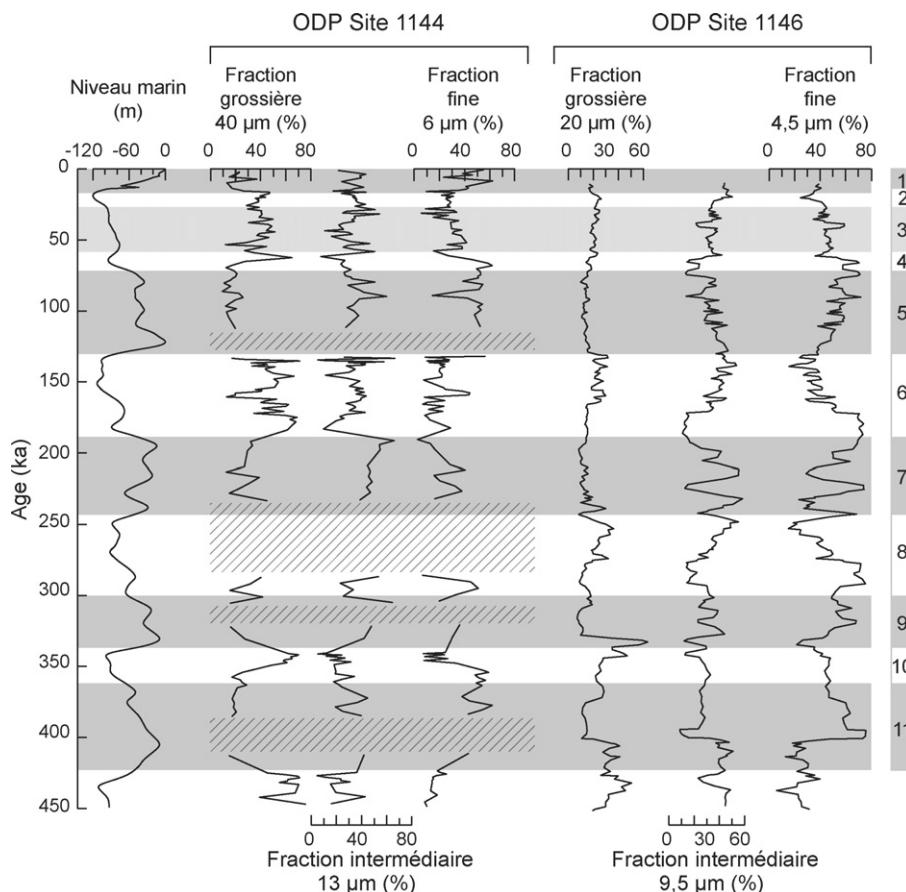


Fig. 4. Variations des proportions relatives des trois sous-populations calculées pour les sites ODP 1144 et 1146 au cours des derniers 450 ka. Les variations du niveau marin y sont reportées pour comparaison [17]. Les hachures marquent les hiatus sédimentaires.

Fig. 4. Relative variations of the three calculated sub-populations for ODP sites 1144 and 1146 over the last 450 kyr compared to the sea-level variations [17]. Dashed parts mark the sedimentary hiatus.

marin [30,32]. Les relations existant entre changements du climat et érosion physique du Sud-Est asiatique sont encore relativement mal comprises. Certaines études suggèrent un lien étroit entre l'intensité des précipitations de mousson et les taux d'érosion pour la période holocène (par exemple, [13]) ; d'autres associent les changements de taux de sédimentation aux variations relatives du niveau de la mer qui, lors des périodes de bas niveau marin, permettent une remobilisation des sédiments de la plate-forme et/ou une reprise de l'érosion par les fleuves [9,16,29,32].

3.1. Flux terrigènes et variations granulométriques de la fraction silicoclastique

Le calcul de flux terrigènes permet de s'affranchir de la dilution par la fraction biogène ainsi que des effets de la compaction. Établis à partir des modèles d'âge des sites 1144 et 1146 [6,7], et après correction de la

contribution liée à la sédimentation carbonatée, les flux terrigènes du site 1144 sont, en moyenne, six fois supérieurs à ceux du site 1146 (respectivement de 9 à 173 g/cm²/ka et de 4,5 à 27 g/cm²/ka), mais sont pourtant, dans les deux cas, corrélés aux variations du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques, associables pour partie aux changements du volume des glaces. Chaque baisse du niveau marin (fortes valeurs de $\delta^{18}\text{O}$) est marquée par une augmentation des flux terrigènes (Fig. 2b et c).

La moyenne des tailles de grains de la fraction silicoclastique varie de façon similaire entre 6,8 et 38,8 μm pour le site 1144 et entre 4,1 et 23,8 μm pour le site 1146 (Fig. 2b et c). Les sédiments glaciaires se caractérisent par une granulométrie systématiquement plus grossière que celle des sédiments interglaciaires (Fig. 2).

Les algorithmes mathématiques [36] appliqués aux distributions granulométriques des sites 1144 et 1146

montrent que le mélange de trois sous-populations de tailles de grains au sein du sédiment permet d'expliquer plus de 90 % de la variance. Les distributions de ces trois populations sont voisines pour les deux sites et présentent, pour les derniers 450 ka, des modes à 6, 13 et 40 μm pour le site 1144 et 4, 9 et 20 μm pour le site 1146 (Fig. 3).

La Fig. 4 présente l'évolution des trois populations granulométriques au cours des derniers 450 ka pour les sites 1144 et 1146. Alors que les valeurs de la moyenne granulométrique et des flux terrigènes varient avec les oscillations du niveau marin (Fig. 2), les proportions des trois sous-populations identifiées présentent des évolutions différentes, non attribuables systématiquement aux alternances glaciaire/interglaciaire. Pour le site 1144, les variations de proportions relatives des populations fine et intermédiaire sont globalement similaires et varient de manière inverse par rapport à celles de la population grossière (Fig. 4). Ces variations se corrèlent aux alternances glaciaires/interglaciaires. Les stades interglaciaires sont caractérisés par de fortes teneurs en particules fines, alors que les stades glaciaires sont marqués par de plus fortes proportions en particules grossières (sous-population 20–40 μm) pouvant atteindre 70 %. Pour le site 1146, les variations de la population intermédiaire sont différentes de celles de la population fine, sans véritable lien avec les alternances glaciaire/interglaciaire. Les variations de la population grossière au cours des deux derniers stades glaciaires sont plus faibles que celles du site 1144 (Fig. 4).

Les variations granulométriques des sédiments de la marge nord de la mer de Chine du Sud ont, jusqu'à présent, été interprétées comme étant liées à des changements de sources sédimentaires, entre des apports fluviaux et éoliens [28,29,34]. Ces conclusions [29], reprises ensuite par différents auteurs, étaient basées sur un index empirique [19] établi pour les sédiments déposés aux basses latitudes dans l'Atlantique nord. En transposant cet index en mer de Chine du Sud, les périodes glaciaires ont été associées à une très forte contribution d'apports éoliens grossiers, et les périodes interglaciaires à une augmentation de la proportion d'argile provenant de la rivière de Perles, en liaison avec une intensification des précipitations de mousson [29].

Une telle contribution éolienne n'est confirmée, ni par nos résultats granulométriques, ni par les valeurs de flux terrigènes calculées pour les deux sites 1144 et 1146. Des prélèvements d'aérosols actuels montrent que le matériel éolien présente une taille granulométrique comprise entre 8–15 μm près des côtes est du

Japon et 1–10 μm dans le Pacifique nord (par exemple, [27]). D'après ces résultats, et en prenant en considération la distance séparant les zones sources des apports éoliens et les sites 1144 et 1146, seule la population granulométrique intermédiaire (9–13 μm) pourrait correspondre à de tels apports éoliens. La variabilité de la proportion de cette population n'augmente pas systématiquement au cours des périodes glaciaires (Fig. 4), comme cela a été mis en évidence durant les périodes de renforcement de la mousson d'hiver, à la fois dans les sections de loess [1,37] et dans les sédiments Pacifiques (par exemple, [26]). Par ailleurs, les flux éoliens actuels de l'océan Pacifique varient entre 1 et 10 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{ka}$ et sont estimés entre 50 et 1000 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{ka}$ pour la dernière période glaciaire [12,14]. En considérant les flux terrigènes calculés pour les sites 1144 et 1146, la contribution éolienne ne devrait pas excéder 0,8 à 1,5 % de la fraction détritique du site 1144 et 5,5 à 11 % de la fraction détritique du site 1146. De plus, au débouché d'un des plus grands fleuves d'Asie, il paraît peut concevable que la rivière des Perles ne dépose que des sédiments fins. La contribution éolienne est donc négligeable et ne peut expliquer à elle seule la variabilité de la proportion de la population intermédiaire ; un autre phénomène doit être considéré.

Les augmentations du flux terrigène et de la proportion de la sous-population grossière (20–40 μm) dans les sédiments glaciaires des sites 1144 et 1146 suggèrent une influence des variations du niveau marin lors des alternances glaciaire/interglaciaire. Lors des phases de transgression et de régression, différents phénomènes peuvent, en effet, entraîner la remise en suspension et le transport vers le bassin d'une grande quantité de sédiment grossier. La plate-forme piège les sédiments les plus grossiers en période de haut niveau marin, mais, au cours des périodes de bas niveau marin, ces sédiments sont facilement remobilisés par le vannage lié à la houle. La migration de la ligne de rivage et de l'embouchure de la rivière des Perles vers une position plus proche des sites 1144 et 1146 (environ 250 km) entraîne également un déplacement de la zone de dépôt des sédiments les plus grossiers de la plate-forme. Cette migration peut être aussi associée à une dynamique du milieu marin plus importante, capable de transporter les grosses particules sédimentaires vers le bassin.

Par ailleurs, le site 1144 est localisé plus au nord que le site 1146, dans une zone où la pente de la plate-forme est plus importante et où les courants de contour tels que ceux induits par l'entrée du courant Kuroshio en mer de Chine du Sud sont plus forts. Tout cela participe à favoriser les apports terrigènes vers ce site, qu'ils

viennent du remaniement de la plate-forme ou des principales sources de sédiments de la zone, c'est-à-dire de la rivière des Perles. Cela pourrait expliquer les flux terrigènes plus importants, ainsi que les tailles de grains systématiquement plus grandes pour ce site que pour le site 1146.

3.2. Impact des variations de la mousson sur le transport des sédiments

Afin de s'affranchir des variations relatives de la population grossière, attribuables aux variations du niveau marin, et de déterminer l'évolution intrinsèque des deux autres sous-populations, nous avons calculé le rapport de la proportion des populations fine et intermédiaire. Nous avons également estimé la vitesse (m/ka) de montée et de baisse du niveau marin à partir de la courbe composite de $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques [17], afin d'évaluer l'impact des variations

du niveau marin sur la granulométrie. Les périodes de fortes montées du niveau marin (périodes de piégeage du sédiment sur la plate-forme) sont représentées positivement, alors que les baisses du niveau marin (périodes d'érosion de la plate-forme) sont représentées négativement (Fig. 5a).

L'évolution du rapport fine/intermédiaire, sur une échelle logarithmique (Fig. 5b), ne se corrèle pas avec les alternances glaciaire/interglaciaire de façon aussi nette que les variations de la proportion de la population grossière, impliquant que ce rapport est indépendant des variations du niveau marin (Fig. 5). On peut toutefois noter une tendance générale à l'augmentation entre les périodes interglaciaires et le début de la période glaciaire suivante, c'est-à-dire une augmentation des apports en particules fines au cours des interglaciaires. La fin du stade glaciaire présente une chute importante des valeurs du rapport. Dans le détail, les variations rapides de granulométrie sont plus présentes lors des

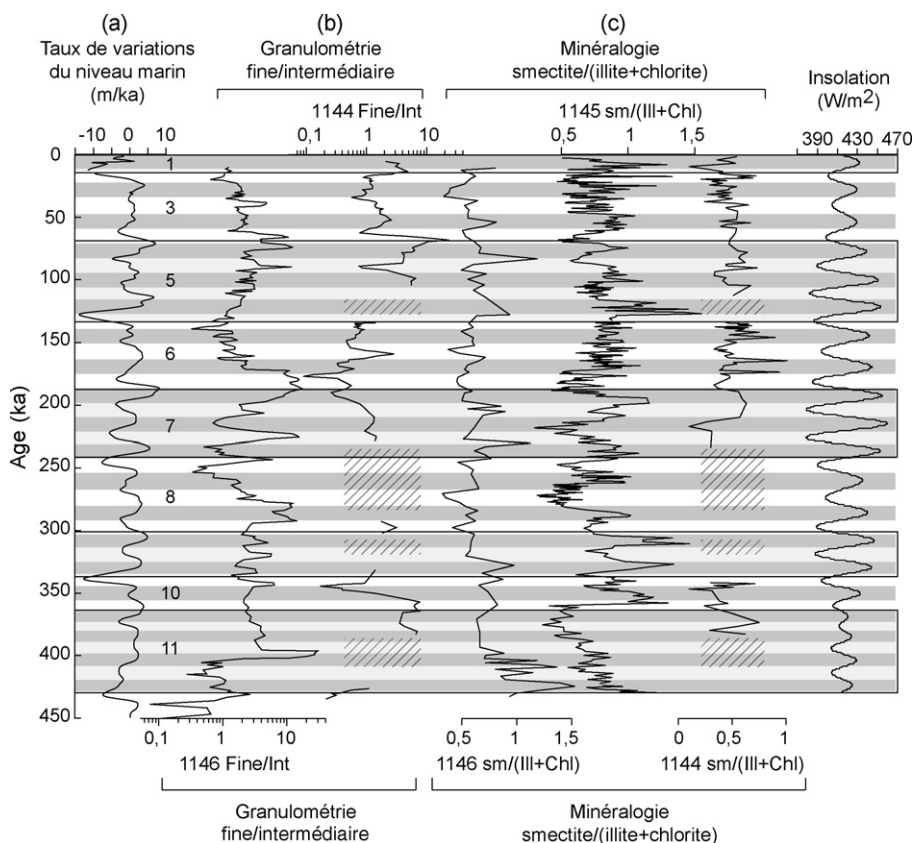


Fig. 5. (a) Taux de variations du niveau marin (m/ka) (d'après [17]) ; (b) rapports des populations granulométriques fine/intermédiaire des sites 1144 et 1146 ; (c) rapport minéralogique smectite/(illite + chlorite) des sites 1144 [5], 1145 [3] et 1146 [20]. Les hachures marquent les hiatus sédimentaires ; les pointillés, les stades isotopiques et bandes grisées, les maxima d'insolation d'été reçue par la Terre aux basses latitudes.

Fig. 5 (a) Sea-level variation rate (m/kyr) (from [17]); increasing sea level is positive; (b) grain size ratio of the fine and intermediate sub-populations for ODP sites 1144 and 1146; (c) mineralogical ratio smectite/(illite + chlorite) of ODP sites 1144 [5], 1145 [3] and 1146 [20]. Dashed parts mark the sedimentary hiatus, the dotted lines, the isotopic stages and the gray strips, the maxima of insolation.

stades interglaciaires. Les pics surviennent dans l'ensemble au moment des maxima ou minima d'inondation (vitesse de variation du niveau marin nulle), mais il est impossible d'associer statistiquement une granulométrie particulière à ces périodes. Au cours du stade 9, par exemple, les hauts niveaux et bas niveaux marins sont tous caractérisés par une augmentation de la contribution fine ; au contraire, au cours du stade 5, ils sont associés à des diminutions du rapport fine/intermédiaire.

Les rapports smectite/(illite + chlorite) mesurés sur la fraction argileuse des sédiments des sites 1144, 1145 et 1146 [3,5,20] ont été reportés sur la Fig. 5c. Ce rapport minéralogique reflète un changement de source du matériel sédimentaire au sein de la fraction argileuse entre un pôle correspondant à la rivière des Perles, riche en illite, et un pôle correspondant au démantèlement de l'arc volcanique de Taiwan–Luzon, riche en smectite [3,20]. Il a été démontré, pour les sites 1145 et 1146, que ce rapport minéralogique variait étroitement en fonction des variations de l'intensité de la mousson d'été, elles-mêmes contrôlées par l'insolation reçue par la Terre aux basses latitudes durant l'été (Fig. 5c). Les périodes de fortes précipitations de la mousson d'été et les courants océaniques dominants associés à cette mousson sont favorables à la production de smectite sur l'arc de Taiwan–Luzon et à son transport vers la marge nord de la mer de Chine du Sud. Ce rapport minéralogique peut être considéré comme un bon traceur de l'intensité de la mousson d'été est-asiatique [3].

Les variations du rapport smectite/(illite + chlorite) du site 1144 sont plus faibles que celles des deux autres sites 1145 et 1146 (Fig. 5c), impliquant de relativement plus forts apports en illite et chlorite. De plus, la nette cyclicité à 23 ka, visible sur les sites 1145 et 1146, n'est pas observable pour le site 1144, ne permettant pas de déterminer un lien entre les enregistrements sédimentaires de la minéralogie de ce site et de l'intensité de la mousson d'été sud-est asiatique. Pour ce site, la smectite provenant de l'arc de Taiwan–Luzon semble fortement diluée par les apports terrigènes riches en illite, chlorite et kaolinite [3] provenant de la partie nord de la plate-forme. Ceci est en accord avec les forts flux terrigènes et les proportions de la population grossière (20–40 μm) caractérisant le site 1144.

D'une manière générale, l'évolution du rapport des proportions des populations fine et intermédiaire, (Fig. 5b), est inversement corrélée à celle du rapport minéralogique smectite/(illite + chlorite) (Fig. 5c). Les périodes de fortes augmentations du rapport smectite/(illite + chlorite) associables à une augmentation de l'intensité de la mousson d'été sont

synchrones des périodes de diminution du rapport granulométrique.

La variabilité du rapport granulométrique semble donc être influencée par les variations de l'intensité de la mousson d'été sud-est asiatique. De la même façon qu'il a été montré, au cours de la transition mi-Pléistocène, que le rapport population fine/intermédiaire était le reflet d'actions combinées des variations de la mousson et des déplacements de l'embouchure des fleuves [4], l'utilisation de la décomposition linéaire de données met en évidence le rôle prépondérant de la mousson sur le transport et le dépôt des sédiments en mer de Chine du Sud au cours des derniers 450 ka. Les périodes d'intensification de la mousson d'été impliquant une augmentation du débit des fleuves se traduiraient par un transport de matériel sédimentaire plus grossier (population intermédiaire), en liaison avec une efficacité accrue de l'érosion mécanique des sols de la plaine du bassin versant de la rivière des Perles et du transport des sédiments de la charge de fond.

4. Conclusions

Les analyses granulométriques et minéralogiques des sédiments terrigènes des sites ODP 1144, 1145 et 1146 ont permis de mieux comprendre la réponse du système sédimentaire aux variations du niveau marin et des précipitations de la mousson sud-est asiatique au cours des 450 derniers milliers d'années.

Alors que les mesures granulométriques (moyenne de taille des grains) ne permettaient de voir des relations qu'entre taille de grain et oscillations glaciaire/interglaciaire, le traitement numérique par décomposition linéaire des données a mis en évidence l'existence de trois sous-populations sédimentaires mélangées au sein des sédiments de la marge nord de la mer de Chine du Sud, ayant une dynamique de transport propre. Les variations de la population grossière (20–40 μm) résultent principalement d'un remaniement des sédiments de la plate-forme continentale, ainsi que des migrations de l'embouchure de la rivière des Perles lors des périodes de bas niveau marin. Le rapport des deux autres populations granulométriques (sous-populations intermédiaire à 9–13 μm et fine à 4–6 μm) permet de s'affranchir des processus de remaniement des sédiments de la plate-forme continentale. Les variations de ce rapport semblent liées à des changements du régime de la mousson sud-est asiatique, qui influencent l'érosion du continent et la capacité de transport par les fleuves. Les périodes de fortes précipitations de la mousson est-asiatique correspondent à des débits plus

forts des fleuves, pouvant être responsables du transport plus important de matériel silteux (charge de fond) et de la diminution du rapport granulométrique de la proportion des sous-populations fine et intermédiaire.

Enfin, il a été possible de montrer que la contribution éolienne dans la sédimentation de la marge nord de la mer de Chine du Sud est négligeable. La granulométrie des sédiments de cette marge ne peut pas être utilisée pour tracer la dynamique des apports éoliens induit par la mousson d'hiver est-asiatique, comme cela a été supposé dans diverses études sur les sédiments de la mer de Chine du Sud.

Remerciements

Nous remercions vivement les deux rapporteurs anonymes pour leurs suggestions qui ont contribué à améliorer la qualité du manuscrit. Nous remercions également Philippe Pradel et Philippe Recourt pour leur assistance technique. Tous les échantillons de cette étude ont été collectés par ODP, supporté financièrement par l'U.S. National Science Foundation (NSF) et les pays membres des Joint Oceanographic Institutions (JOI). Cette étude a bénéficié des supports financiers d'un projet franco-chinois géré par l'AFCRST (PRA 04-02) et d'un programme français OCEANS.

Références

- [1] Z. An, T. Liu, Y. Lu, S.C. Porter, G. Kukla, X. Wu, Y. Hua, The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China, *Quat. Int.* 7/8 (1990) 91–95.
- [2] L. Beaufort, T. de Garidel-Thoron, B.K. Linsley, D. Oppo, N. Buchet, Biomass burning and oceanic primary production estimates in the Sulu Sea area over the last 380 kyr and the East Asian monsoon dynamics, *Mar. Geol.* 201 (2003) 53–65.
- [3] S. Boulay, C. Colin, A. Trentesaux, N. Frank, Z. Liu, Sediment sources and East Asian monsoon intensity over the last 450 ky. Mineralogical and geochemical investigations on South China Sea sediments, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 228 (3–4) (2005) 260–277.
- [4] S. Boulay, C. Colin, A. Trentesaux, S. Clain, Z. Liu, C. Lauer-Leredde, Sedimentary responses to the Pleistocene climatic variations recorded in the South China Sea, *Quat. Res.* 68 (2007) 162–172.
- [5] S. Boulay, C. Colin, A. Trentesaux, F. Pluquet, J. Bertaux, D. Blamart, C. Buehring, P. Wang, Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP site 1144), in: W.L. Prell, P. Wang, P. Blum, D.K. Rea, S.C. Clemens (Eds.), *Proc. ODP Sci. Res. Vol. 184* (2003), [online] version PDF disponible à l'adresse: http://www-odp.tamu.edu/publications/184_sr/volume/chapters/211.pdf.
- [6] C. Buehring, M. Sarnthein, H. Erlenkeuser, Toward a high-resolution stable isotope stratigraphy of the last 1.1 m.y.: Site 1144, South China Sea, in: W.L. Prell, P. Wang, P. Blum, D.K. Rea, S.C. Clemens (Eds.), *Proc. ODP Sci. Res. Vol. 184* (2004), [online] version PDF disponible à l'adresse: http://www-odp.tamu.edu/publications/184_sr/volume/chapters/205.pdf.
- [7] S. Clemens, W. Prell, Data report: oxygen and carbon isotopes from Site 1146, northern South China Sea, in: W.L. Prell, P. Wang, P. Blum, D.K. Rea, S.C. Clemens (Eds.), *Proc. ODP Sci. Res. Vol. 184* (2003), [online] version PDF disponible à l'adresse: http://www-odp.tamu.edu/publications/184_sr/volume/chapters/214.pdf.
- [8] S.C. Clemens, W.L. Prell, D. Murray, G. Shimmield, G. Weedon, Forcing Mechanisms of the Indian Ocean Monsoon, *Nature* 353 (1991) 720–725.
- [9] P. Clift, J.I. Lee, M.K. Clark, J. Blusztajn, Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening; a record from the South China Sea, *Mar. Geol.* 184 (2002) 207–226.
- [10] C. Colin, 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, *Earth Planet. Sci. Lett.* 160 (1998) 623–635.
- [11] C. Colin, L. Turpin, J. Bertaux, A. Desprairies, C. Kissel, Erosional history of the Himalayan and Burman ranges during the last two glacial–interglacial cycles, *Earth Planet. Sci. Lett.* 171 (1999) 647–660.
- [12] R. Duce, P. Liss, J. Merrill, E. Atlas, P. Buat-Ménard, B. Hicks, J. Miller, J. Prospero, R. Arimoto, T. Church, W. Ellis, J. Galloway, L. Hansen, T. Jickells, A. Knap, K. Reinhardt, B. Schneider, A. Soudine, J. Tokos, S. Tsunogai, R. Wollast, M. Zhou, The atmospheric input of trace species to the world ocean, *Glob. Biogeochem. Cycles* 5 (1991) 193–259.
- [13] S.L. Goodbred, S.A. Kuehl, Enormous Ganges–Brahmaputra sediment discharge during strengthened Early Holocene monsoon, *Geology* 28 (2000) 1083–1086.
- [14] S.P. Harrison, K.E. Kohfeld, C. Roeland, T. Claquin, The role of dust in climate changes today, at the last glacial maximum and in the future, *Earth Sci. Rev.* 54 (2001) 43–80.
- [15] T. Holtzapffel, Les minéraux argileux. Préparation, analyse diffractométrique et détermination, université de Lille-1, Lille, France. Société géologique du Nord, Publication n°12, 1985 (136 p.).
- [16] W. Huang, P. Wang, A quantitative approach to deep-water sedimentation in the South China Sea: changes since the last glaciation, *Sci. China, Ser. D* 41 (2) (1998) 195–201.
- [17] J. Imbrie, J.D. Hays, D.G. Martinson, A. McIntyre, A.C. Mix, J.J. Morley, N.G. Pisias, W.L. Prell, N.J. Shackleton, The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record, in: A.L. Berger et al. (Eds.), *Milankovitch and Climate, part 1*, D. Reidel Publishing Company, 1984, pp. 269–305.
- [18] Z. Jian, B. Huang, W. Kuhnt, H.-L. Lin, Late Quaternary upwelling intensity and East Asian monsoon forcing in the South China Sea, *Quat. Res.* 55 (2001) 363–370.
- [19] B. Koopman, Saharan dust deposition in the subtropical Atlantic during the last 25,000 years (in German), *Meteor. Forschergeb. C5* (1981) 23–54.
- [20] Z. Liu, A. Trentesaux, S.C. Clemens, C. Colin, P. Wang, B. Huang, S. Boulay, Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years, *Mar. Geol.* 201 (2003) 133–146.
- [21] D.W. Oppo, Y. Sun, Amplitude and timing of sea surface temperature change in the northern South China Sea: dynamic link to the East Asian Monsoon, *Geology* 33 (2005) 785–788.
- [22] R. Petschick, 2000. MacDiff, Available at: <http://servermac.geologie.un-frankfurt.de/Rainer.html>.

- [23] M.A. Prins, G.J. Weltje, End-member modelling of siliciclastic grain size distributions: the Late Quaternary record of eolian and fluvial sediment supply to the Arabian Sea and its paleoclimatic significance, in: SEPM Special Publications, Vol. 63, Numerical Experiments in Stratigraphy: Recent Advances in Stratigraphic and Sedimentologic Computer Simulation, 1999.
- [24] M.A. Prins, G. Postma, J. Cleveringa, A. Cramp, N.H. Kenyon, Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the Late Quaternary: the Indus Fan, *Mar. Geol.* 169 (2000) 327–349.
- [25] M.A. Prins, L.M. Bouwer, C.J. Beets, S.R. Troelstra, G.J. Weltje, R.W. Kruk, A. Kuijpers, P.Z. Vroon, Ocean circulation and iceberg discharge in the glacial North Atlantic: inferences from unmixing of sediment distributions, *Geology* 30 (2002) 555–558.
- [26] D. Rea, M. Leinen, Asian aridity and the zonal westerlies: Late Pleistocene and Holocene record of eolian deposition in the Northwest Pacific Ocean, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 66 (1988) 1–8.
- [27] D. Rea, S. Hovan, Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediments: Lessons from the North Pacific, *Paleoceanography* 10 (1995) 251–258.
- [28] F. Tamburini, T. Adatte, K. Föllmi, S.M. Bernasconi, P. Steinmann, Investigating the History of East Asian monsoon and climate during the last glacial-interglacial period (0–140,000 years): mineralogy and geochemistry of ODP sites 1143 and 1144, South China Sea, *Mar. Geol.* 201 (2003) 147–168.
- [29] L. Wang, M. Sarnthein, H. Erlenkeuser, J. Grimalt, P. Grootes, S. Heilig, E. Ivanova, M. Kienast, C. Pelejero, U. Pflaumann, East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea, *Mar. Geol.* 156 (1999) 245–284.
- [30] P. Wang, Response of West Pacific marginal seas to glacial cycles: paleoceanographic and sedimentological features, *Mar. Geol.* 156 (1999) 5–39.
- [31] P. Wang, W.L. Prell, P. Blum et al., Proc. ODP, Init. Repts., 184: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 2000.
- [32] P. Wang, L. Wang, Y. Bian, Z. Jian, Late Quaternary Paleocceanography of the South China Sea surface circulation and carbonate cycles, *Mar. Geol.* 127 (1995) 145–165.
- [33] P.J. Webster, *The Elementary Monsoon*, New York, John Wiley & Sons, 1987, pp. 3–32.
- [34] R. Wehausen, H.J. Brumsack, Astronomical forcing of the East Asian monsoon mirrored by the composition of Pliocene South China Sea sediments, *Earth Planet. Sci. Lett.* 201 (2002) 621–636.
- [35] R. Wehausen, J. Tian, H.J. Brumsack, X. Cheng, P. Wang, Geochemistry of Pliocene sediments from ODP site 1143 (Southern South China Sea), in: W.L. Prell, P. Wang, P. Blum, D.K. Rea, S.C. Clemens (Eds.), Proc. ODP Sci. Res. 184 (2003), [online] version pdf disponible à l'adresse: http://www.odp.tamu.edu/publications/184_sr/volume/chapters/201.pdf.
- [36] G.J. Weltje, End-member modelling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem, *J. Math. Geol.* 29 (1997) 503–549.
- [37] J. Xiao, S.C. Porter, Z. An, H. Kumai, S. Yoshikawa, Grain Size of Quartz as an Indicator of Winter Monsoon Strength on the Loess Plateau of Central China during the Last 130,000 yr, *Quat. Res.* 43 (1995) 22–29.
- [38] J. Zhang, W. Huang, M. Liu, Geochemistry of major Chinese river–estuary systems, in: D. Zhou, et al. (Eds.), *Oceanology of China Seas*, 1, Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands, 1994, pp. 179–188.