

Géosciences de surface (Paléoclimatologie)
Restitution de l'histoire de la mousson nord-africaine
entre 6,2 et 4,9 Ma et relations possibles avec
les événements tardi-Miocène

Christophe Colin ^{a,*}, Giuseppe Siani ^a, Farid Segueni ^a, Dominique Blamart ^b,
Simona Giunta ^c, Jean-Pierre Suc ^d, Zhifei Liu ^e, Norbert Frank ^b, Louis Briquieu ^f

^a UMR 8148, laboratoire des interactions et dynamique des environnements de surface, département des sciences de la Terre, université Paris-XI, 91405 Orsay, France

^b UMR 1572 CEA-CNRS-UVSQ, laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, domaine du CNRS, avenue de la Terrasse, 91118 Gif-sur-Yvette, France

^c Dipartimento di Scienze del Mare, Università politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 60131 Ancona, Italie

^d UMR 5125 PEPS, CNRS, université Lyon-1, campus de la Doua, bâtiment Géode, 69622 Villeurbanne cedex, France

^e State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, 200092 Shanghai, Chine

^f UMR 5243, département de géosciences, université de Montpellier-II, 34095 Montpellier cedex 05, France

Reçu le 21 décembre 2006 ; accepté après révision le 1 juillet 2008

Disponible sur Internet le 7 septembre 2008

Présenté par Jean-Claude André

Résumé

Une étude minéralogique et géochimique a été réalisée sur les sédiments du Site ODP 659, afin d'établir un modèle de dépôt des sédiments au niveau du plateau du Cap Vert et de restituer la variabilité de la mousson nord-africaine sur la période 6,2 Ma–4,9 Ma. Les périodes d'intensification de la mousson africaine se caractérisent par une réduction des apports éoliens provenant du domaine saharien et une augmentation des apports par les fleuves. La remise en eau de la Méditerranée à la fin de la crise de salinité messinienne (5,33 Ma) est associée à une aridification du domaine saharien. *Pour citer cet article* : C. Colin et al., C. R. Geoscience 340 (2008).

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

Abstract

Reconstruction of Northern African monsoon between 6.2 and 4.9 Ma and possible relationships with Late Miocene events. Mineralogical and geochemical investigations have been realized on ODP Site 659 in order to better understand the detrital sedimentation of the Cap Verde plateau and to reconstruct African monsoon intensity variations between 6.2 and 4.9 Ma. Time intervals corresponding to an intensification of the summer African monsoon rainfall are associated to a reduction of eolian input from the Sahara and an intensification of the African river input. The reflooding of the Mediterranean Sea at the end of the Messinian salinity crisis (MSC) (5.33 Ma) is correlated to a greater aridity in the Sahara. *To cite this article*: C. Colin et al., C. R. Geoscience 340 (2008).

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

Mots clés : Mousson africaine ; Apport éolien ; Crise de salinité messinienne

Keywords: African monsoon; Dust input; Messinian salinity crisis

* Auteur correspondant.

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

Abridged English Version

Introduction

The northern part of Africa is affected by a climatic system of monsoon type, characterized by a latitudinal subdivision of climatic zones between the Sahara hyperarid region and the wet equatorial zone. This is a consequence of the seasonal migration of the inter-tropical convergence zone (ITCZ) controlled by variations of insolation received by the African continent. During boreal summer, the ITCZ centered near 20° N generates wet climate on Sahel and westward winds favouring Saharan dust input to the North Equatorial Atlantic between 10 and 30° N of latitude (Fig. 1) [29]. During boreal winter, the ITCZ migrates southward at around 0–5° N of latitude inducing dry climate on Sahel and Sahara regions. The consequence of such effects is a more potential dust carried by middle altitude winds on the tropical Atlantic between 10° N and 5° S (Fig. 1) [29]. During the Plio-Pleistocene, changes in the African monsoon intensity have been mainly controlled by the insolation received by the earth at low latitude [32] and in a lesser extent by glacial–interglacial cyclicities [1,12,13,33].

The sediments of the Ocean Drilling Program (ODP) at Site 659 collected off the East African shelves constitute an ideal archive to reconstruct past changes of North-African monsoon [28,32] as they allow for recording the eolian input controlled by aridity conditions in North Africa as well the intensity of coastal upwelling [12,13,25].

The aim of the present study is to reconstruct by a detailed record of terrigenous fluxes, combined with magnetic susceptibility and clay mineralogy, the African monsoon fluctuations between 6.2 and 4.9 Ma. The establishment of a high resolution tuning orbital age scale allows a comparison between the ODP Site 659 record and events occurred during the Late Miocene in the Mediterranean Sea.

Materials and methods

The ODP Site 659 (Leg 108) is located on the Cap Verde plateau (18°04'63"N, 21°01'57"W; 3071,2 m water depth) (Fig. 1). The studied sedimentary unit consists of lithologically homogeneous hemipelagic ooze corresponding to the depth interval between 146 to 167 meter composit depth (mcd).

A calcareous nannoplankton biostratigraphy has been realized every 5 cm along the core. Oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}$) measurements were performed with a

MAT Finigan 251 mass on the benthic foraminifera *Cibicides wuellerstorfi* (> 250 μm) sampled every 10 cm along the core. Carbonate contents have been analyzed every 5 cm and the low field susceptibility was measured on U-channels with a Bartington instrument every 2 cm with a resolution of about 4 cm. Clay mineralogy determinations were made by standard X-ray diffraction on the smaller than 2 μm size fraction following the procedure described by Colin et al. [10]. Finally, Grey level was obtained by numerical measurement of luminance on grey scale pictures.

Results and discussion

Chronological framework

Age model for ODP Site 659 was initially established by a linear interpolation between the occurrence of three bioevents based on a calcareous nannoplankton study [1] and the recovering of two glacial stages TG12 and TG22 identified by the $\delta^{18}\text{O}$ record [16,17,30,31] (Fig. 2). Spectral analyses performed by the Analseries software [24] on the magnetic susceptibility, grey levels and $\delta^{18}\text{O}$ records indicate periodicities close to those of the orbital parameters of obliquity and precession (Fig. 3). In order to better precise our chronological framework, a two-step tuning was performed on the $\delta^{18}\text{O}$ filtering signal with obliquity and on a 23 ka magnetic susceptibility and grey level filtering with the insolation curve calculated for 65° N latitude in July [22,32].

Sedimentary sources and transportation of sediments to the Cap Verde plateau, relationship with North African monsoon

Biogenic carbonate content ranges between 30 and 90% wt and fits well the grey level variations (Fig. 2). Terrigenous fluxes were calculated in order to assess detrital input to the Cap Verde plateau using the following relationship:

$$\begin{aligned}\text{Flux}_{\text{tot}} &= \rho_s \cdot \text{Tx}, \\ \text{Flux}_{\text{tot}} &= (100 - C) \cdot \text{Flux}_{\text{det}} + C \cdot \text{Flux}_{\text{car}},\end{aligned}$$

where, Flux_{tot} , Flux_{det} and Flux_{Car} correspond to total, terrigenous and carbonate fluxes ($\text{g cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$), respectively; C = biogenic carbonate proportion (%); ρ_s = dry bulk density (g cm^{-3}) and Tx = linear sedimentation rate (cm ka^{-1}).

The terrigenous flux record (0.1 and 3 $\text{g cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$) is well correlated to the insolation curve calculated for 20° N in July (Fig. 5). Each minimum of insolation

corresponds to an increase in terrigenous fluxes implying a control by the African monsoon intensity changes [33] (Fig. 5).

The location of ODP Site 659, on a seamount at 550 km offshore, suggests that a reworking of shelf sediments during sea level lowering is rather negligible. However, previous studies reported a strong eolian input from the Sahara to the Cap Verde [32]. The terrigenous fluxes calculated at the ODP Site 659 are similar to the modern eolian ones around the Cap Verde islands ($1\text{--}2\text{ g cm}^{-2}\text{ ka}^{-1}$, [26]) suggesting a high contribution of eolian materials. We propose that low insolation periods induced an intensification of the winter monsoon with great aridity conditions in the South Sahara. Such conditions permit strong erosion by wind and transport of eolian dusts from North Africa to the Cap Verde plateau [25].

At the ODP Site 659, the clay fraction is composed of smectite (20–60%), illite (20–60%), kaolinite (10–25%), chlorite (6–15%) and palygorskite (1–6%) (Fig. 4). In general, palygorskite, smectite, illite and chlorite distributions are similar and inversely correlated to the kaolinite one (Fig. 4). After 5.33 Ma, clay mineralogical records show a decrease of the kaolinite content and an increase of smectite and illite proportions. Changes in smectite/kaolinite and illite/kaolinite ratios show similar precession-related (23 kyr) oscillations correlating the mineralogical characteristics with the solar radiation calculated at 10° N for boreal summer (Fig. 5). Each minimum of the insolation curve is correlated to an increase of both mineralogical ratios and terrigenous flux. Eolian dust collected on the Cap Verde islands is mainly composed of illite and kaolinite [5,6]. Illite is present in high proportions in dust deriving from the Sahara. Kaolinite is abundant in Sahelian and African tropical soils. Smectite is not abundant in African dust [5,8,15] and could derive from weathering of volcanic rocks of the Canaries and Cap Verde islands and transported by Canaries current [7].

During wet periods of summer monsoon (higher insolation), the smectite/kaolinite and illite/kaolinite ratios are higher, implying a strong input of sediment from the Sahelian and sub-tropical regions and a decreasing of detrital material deriving from the Sahara and the Canaries Islands. During such period, the northward shift of the ITCZ accounts for a reduction of eolian input (illite and palygorskite) from the Sahara. As kaolinite contents increase during periods of intensification of the African monsoon, it seems not plausible that kaolinite is transported by wind but rather by African rivers such as the Senegal. A southern

location of the ITCZ could intensify smectite, with respect to the studied site.

Relations between climate changes and the Messinian salinity crisis

The Messinian salinity crisis is characterized by the deposition of a huge volume of evaporites in the Mediterranean Basin [18] during a short time-interval (5.96–5.33 Ma [14,20]). Several scenarios have been proposed to explain the deposition of evaporites [4,9,20,21,27]. All these scenarios take into account the almost complete isolation of the Mediterranean Sea tied to a tectonic activity to explain the closure of the gateways between the Atlantic and the Mediterranean Sea [19]. This event is associated to major paleogeographical changes induced by a large sea-level fall of the Mediterranean Sea (at least 1500 m) probably in several steps after 5.6 Ma [23]. Several studies have shown that the reflooding of the Mediterranean Sea at the end of the salinity crisis (5.33 Ma) can be rapid [2,23].

After 5.33 Ma, the ODP 659 mineralogical record shows a decreasing trend of kaolinite and an increased smectite/kaolinite and illite/kaolinite ratios suggesting major sedimentary source changes from the Sahelian to the Sahara regions. So, we suggest that the reflooding of the Mediterranean Sea at the end of the MSC could be responsible of a modification of albedo inducing a displacement of the low-pressure cells on the North Africa, a southern shift of the ITCZ and a greater aridity on the Sahara region.

Conclusion

An orbital time scale has been established for the ODP Site 659 between 6.2 to 4.9 Ma. Terrigenous fluxes combined with clay mineralogy permit to establish a strong relationship between detrital input to the Cap Verde plateau and African monsoon intensity variations. Periods of weak African monsoon (low insolation) are characterized by strong wind contributions, smectite/kaolinite and high illite/kaolinite in relation to a great aridity of the Saharan regions and a southern position of the ITCZ. Periods of high insolation are associated to a northern shift of the ITCZ inducing a reduction of the eolian input and an intensification of the sediment deriving mainly from African rivers (Senegal). At a longer time scale, an increasing of sediment deriving from the Sahelian and sub-tropical region after 5.33 Ma implies a reduction of the African monsoon rainfalls due to a southern shift of the low pressure over Africa.

1. Introduction

Le Nord de l'Afrique est affecté par un système climatique de type mousson et se caractérise par une répartition de zones climatiques latitudinales entre la zone hyperaride du Sahara et la zone équatoriale humide. Cela est étroitement lié à la migration saisonnière méridienne de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Ce balancement saisonnier de la ZCIT est principalement contrôlé par les changements d'insolation reçus par le continent africain entre les étés et les hivers boréaux qui modifient les positions des centres de basses pressions. Durant l'été boréal actuel, la ZCIT, située à 20° N de latitude, génère de fortes pluies sur le domaine sahélien, les vents d'Est transportent alors des particules éoliennes d'origine saharienne en Atlantique nord-équatorial suivant une bande de latitude comprise entre 10 et 30° N (Fig. 1) [29]. Durant l'hiver boréal, lorsque la ZCIT migre vers

0–5° N, les domaines sahariens et sahéliens sont soumis à une forte aridité. Les vents de moyenne altitude sont alors les vecteurs de transport de matériel éolien en Atlantique tropical et provoquent un panache situé plus au sud, entre 10° N et 5° S de latitude (Fig. 1) [29].

Dans le passé, les migrations méridiennes de cette ZCIT sont contrôlées par le gradient de pression atmosphérique terre–mer dont l'importance dépend principalement des variations de l'insolation reçue par la terre aux basses latitudes ainsi que des températures de surface du Golfe de Guinée. Ainsi, au cours du Plio-Pléistocène, l'Afrique nord-tropicale a connu des oscillations entre des phases humides et arides, suivant une rythmicité contrôlée principalement par la précession (23 et 19 ka) [32] et faiblement modulée par les alternances glaciaires/interglaciaires [3,12,13,33].

Le Site Ocean Drilling Program (ODP) 659 au large du Sahara constitue un matériel de choix pour reconstruire les changements passés de la mousson

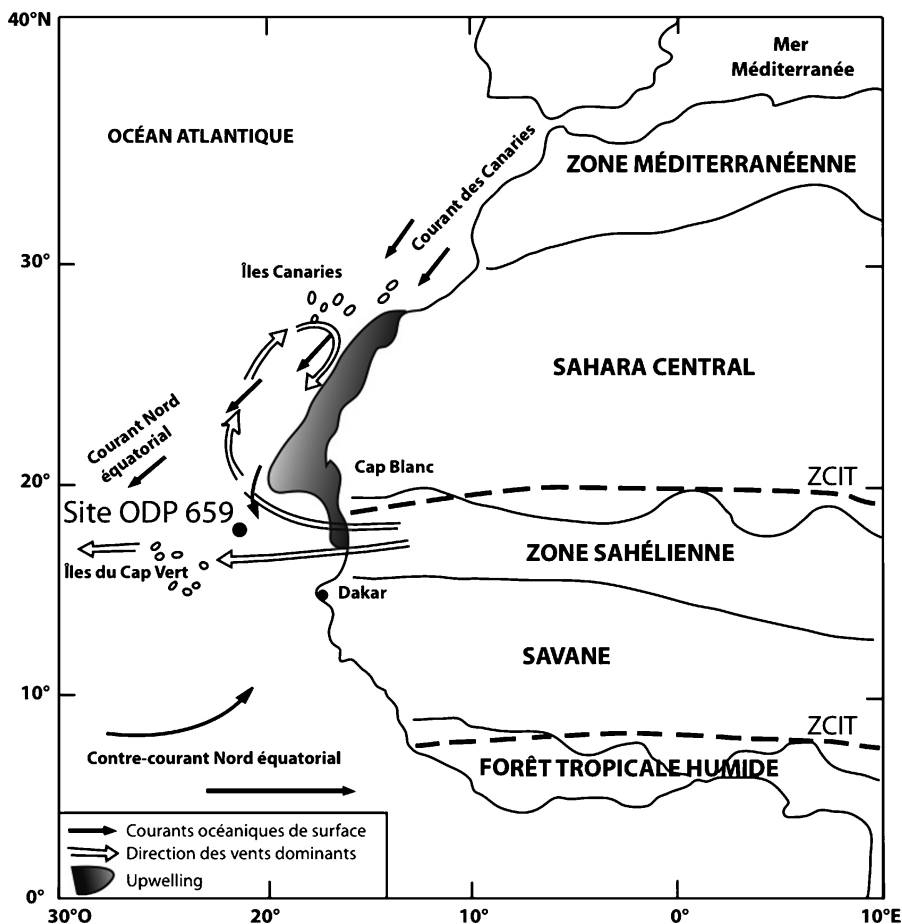


Fig. 1. Carte de localisation du site ODP 659 et des différents domaines climatiques nord-africains.
Location of the ODP Site 659 and distribution of the different climatic zones in North Africa.

nord-africaine, dans une zone-clé [28,32], car il enregistre l'arrivée des apports éoliens principalement contrôlés par les conditions d'aridité de l'Afrique du Nord [3,12,13,25].

L'objectif de cette étude est de reconstruire l'histoire de la mousson nord-africaine entre 6,2 et 4,9 Ma, à partir d'une étude à haute résolution temporelle de l'estimation des flux détritiques du site ODP 659, de la susceptibilité magnétique en champ faible et de la minéralogie du cortège argileux. Cet intervalle de temps recouvre une période, entre 5,96 et 5,33 Ma, qui est maquée par le dépôt en Méditerranée d'importantes masses d'évaporites [14,18,20]. Cela implique des changements paléoenvironnementaux majeurs en Méditerranée qui peuvent avoir eu un impact sur le climat nord-africain. Une échelle d'âge orbitale des sédiments du site ODP 659 a été construite, afin de déterminer si ces changements sont enregistrés par la sédimentation sur la marge Atlantique, ce qui devrait permettre de mieux contraindre les facteurs contrôlant l'intensité de la mousson nord-africaine.

2. Matériel et méthodes

Le site 659 du Leg ODP 108 est localisé sur le plateau du Cap Vert, à environ 350 km au large de la Mauritanie (18°04'63"N, 21°01'57"W ; bathymétrie : 3071,2 m) (Fig. 1). Entre 146 et 167 *meter composit depth* (mcd), la lithologie est homogène et constituée essentiellement de sédiments faiblement bioturbés argilosilteux, riches en nannofossiles et foraminifères. Une étude biostratigraphique du sédiment, basée sur le nannoplancton calcaire, a été réalisée, avec un pas d'analyse de 5 cm, par l'observation au microscope de frottis.

La composition isotopique de l'oxygène, exprimée en notation delta ($\delta^{18}\text{O}$ ‰) par rapport au standard V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite, [11]), a été analysée sur le foraminifère benthique *Cibicides wuellerstorfi* (fraction supérieure à 250 μm), sur le spectromètre de masse Finnigan MAT 251 du LSCE. La reproductibilité, calculée à partir d'un standard interne de calcite, est de 0,05 ‰ pour l'oxygène.

Les teneurs en carbonate ont été mesurées à l'aide d'un manocalcimètre, par attaque acide (HCl 6N) de 100 mg de sédiment dans une enceinte close (22,4 cm^3). Le manocalcimètre a été systématiquement étalonné, afin de contrôler le rendement d'attaque qui équivaut à 1 bar (à 20 °C) pour 100 mg de CaCO_3 . La susceptibilité magnétique en champ faible a été mesurée sur *u-channel* avec une bobine Bartington de petit diamètre au LSCE, avec un pas d'analyse de 2 cm et une résolution

d'environ 4 cm. Les valeurs mesurées sont exprimées en unité S.I. par une normalisation au volume de sédiment analysé. La composition minéralogique du cortège argileux (fraction inférieure à 2 μm) a été mesurée sur le diffractomètre de RX pananalytical du laboratoire IDES, suivant le protocole décrit en détail par Colin et al. [10]. Enfin, le niveau de gris a été obtenu par un traitement numérique des photographies en noir et blanc des sédiments du site ODP 659, réalisées au cours du Leg ODP 108. Les niveaux de gris, codés en 8 bits, sont exprimés sur l'échelle standard comprise entre 0 et 256, les fortes valeurs correspondant aux sédiments sombres.

3. Résultats et discussion

3.1. Chronologie

Les résultats de notre étude biostratigraphique, basée sur le nannoplancton calcaire entre 6,2 et 4,9 Ma, mettent en évidence trois bioévénements majeurs correspondant à :

- la dernière présence de *Amaurolithus amplificus* (163,72 mcd), datée à $5,993 \pm 0,002$ Ma ;
- la dernière présence de *Discoaster quinqueramus* (152,74 mcd), datée à $5,537 \pm 0,005$ Ma [1] ;
- et l'apparition de *Ceratolithus acutus*, (148,76 mcd), datée à $5,372 \pm 0,003$ Ma [1] (Fig. 2).

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ de *C.wuellerstorfi* varient entre 2,7 et 3,6 ‰ (PDB) (Fig. 2). De telles oscillations sont caractéristiques de l'évolution du climat du Néogène supérieur, qui montre une série d'événements marqués par des variations de valeurs de $\delta^{18}\text{O}$, les plus élevées étant associées aux phases glaciaires et les plus faibles aux phases interglaciaires [31]. Plus particulièrement, les excursions des valeurs isotopiques les plus élevées correspondent aux stades glaciaires majeurs TG22 et TG12, datés respectivement à 5,84 et 5,55 Ma, en accord avec les résultats des études précédentes [17,30,31], fournissant ainsi de nouvelles contraintes temporelles.

Afin de réaliser une échelle d'âge orbitale du site ODP 659, les variations de $\delta^{18}\text{O}$ de *C.wuellerstorfi* ont été couplées à celles de la susceptibilité magnétique en champ faible et du niveau de gris. La susceptibilité magnétique varie de manière significative entre 40 et $400 \cdot 10^{-6}$ SI, avec de plus fortes variations pour la période de temps antérieure à 5,4 Ma (Fig. 2). Par ailleurs, les variations du niveau de gris des sédiments sont comprises entre 120 et 230 et sont anticorrélées à celles de la susceptibilité magnétique (Fig. 2).

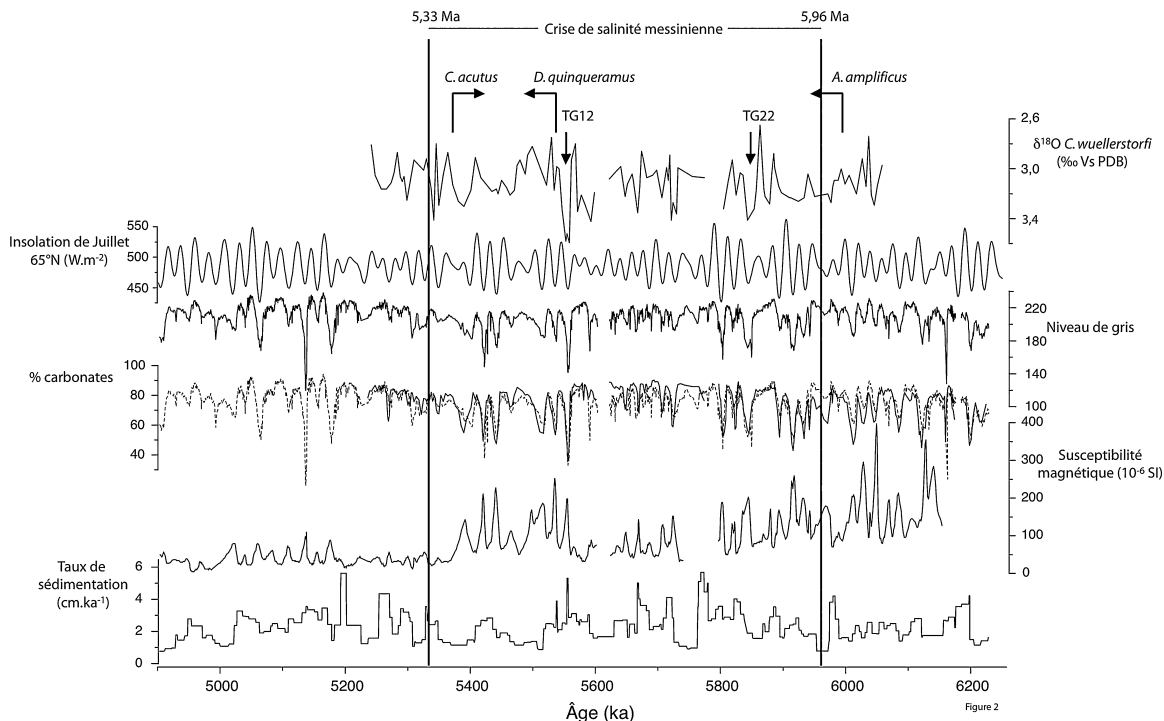


Fig. 2. Variations du $\delta^{18}\text{O}$ (‰) de *C. wuellerstorfi*, du niveau de gris (unité arbitraire), de la teneur en carbonate (% poids), de la susceptibilité magnétique en champs faibles (10^{-6} SI) et du taux de sédimentation ($\text{cm}\cdot\text{ka}^{-1}$), en fonction de l'âge des sédiments (ka). La courbe en pointillés correspond à la teneur en carbonate estimée à partir du niveau de gris. Les marqueurs biostratigraphiques déterminés par l'étude du nannoplancton y sont aussi reportés. L'insolation moyenne ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) de juillet, calculée à 65° N de latitude à partir du logiciel Analyseries [24], y figure pour comparaison.

Variations of *C. wuellerstorfi* $\delta^{18}\text{O}$ (‰), grey level, carbonate contents (% wt), low field susceptibility (10^{-6} SI) and linear sedimentation rates ($\text{cm}\cdot\text{ka}^{-1}$) versus age (ka). The dotted line represents variations of the carbonate contents estimated from the grey level. Time points from the biostratigraphical investigation are also displayed. Insolation curve ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) calculated for the month of July at latitude of 65° N using the Analyseries software [24] is also reported for comparison.

Sur la base d'une échelle d'âge intégrant les pointeurs biostratigraphiques ainsi que les stades isotopiques TG22 et TG12, des analyses spectrales effectuées avec le logiciel Analyseries [24], suivant la méthode de Blackman-Tukey (Fig. 3), sur les enregistrements de $\delta^{18}\text{O}$ de *C. wuellerstorfi*, mettent en évidence une dominance des périodicités à 62, 45, 35, 26 et 21 ka. Certaines de ces périodicités sont proches de celles des paramètres orbitaux de l'obliquité (41 ka) et de la précession des équinoxes (19 et 23 ka). Les variations de la susceptibilité magnétique sont fortement modulées par des cyclicités à 90, 23 et 20 ka, suggérant une forte contribution de la précession. Il s'en dégage également des périodicités à 88 ka, qui pourraient être associées à celles des changements du paramètre orbital de l'excentricité (100 ka). Par ailleurs, les variations du niveau de gris se caractérisent par des périodicités à 78, 50, 40, 31, 25 et 20 ka (Fig. 3).

La mise en évidence de ces différentes périodicités permet de réaliser une échelle d'âge orbitale sur les bandes de fréquence de la précession et de l'obliquité. Ce calage orbital a été réalisé en deux étapes successives, suivant la méthodologie de Tiedemann et al. [32]. Dans une première étape, les variations de $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques ont été calées sur les changements du paramètre orbital de l'obliquité. Dans une seconde étape, l'échelle d'âge ainsi obtenue a été affinée par une corrélation des variations de la susceptibilité magnétique et du niveau de gris avec la courbe d'insolation, calculée à 65° N de latitude pour le mois de juillet [22,32] (Fig. 2). Les variations de la susceptibilité magnétique et du niveau de gris étant fortement marquées par les modulations à 100 ka de la précession des équinoxes, il a été possible d'assigner sans ambiguïté les groupes de cycles à 23 ka correspondant à cette modulation, à ceux de la courbe d'insolation. En conséquence, les taux de sédimentation

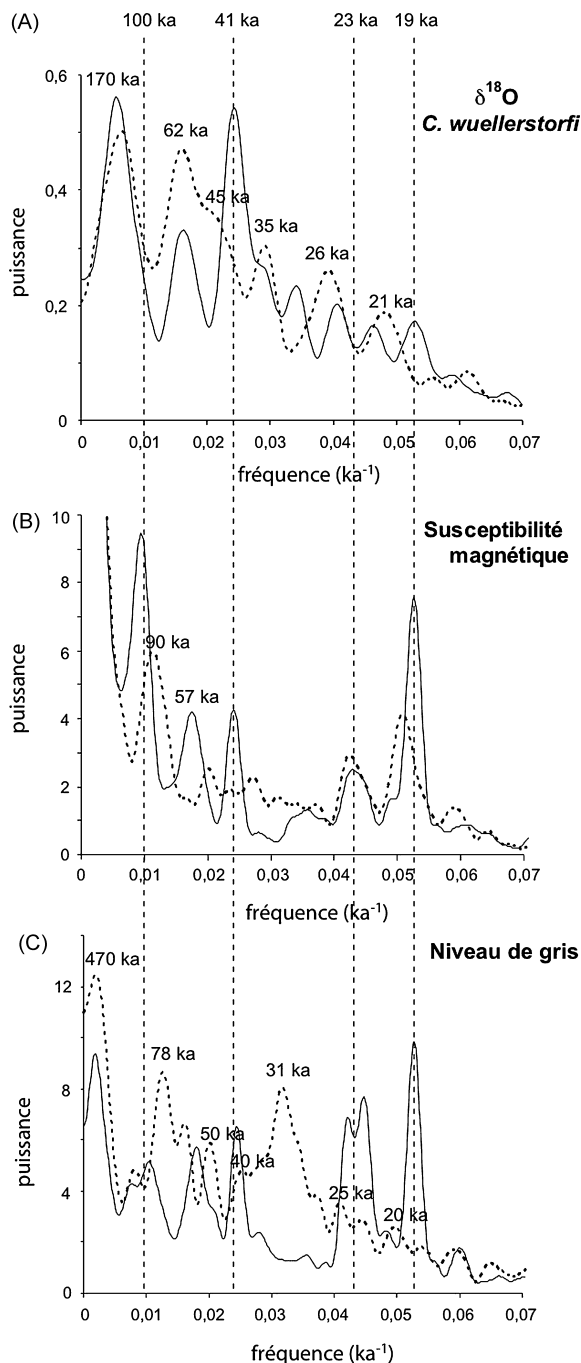


Fig. 3. Spectres de fréquence du $\delta^{18}\text{O}$ de *C. wuellerstorfi* (A) de la susceptibilité magnétique en champ faible (B) et du niveau de gris (C). La courbe en pointillés correspond aux analyses spectrales réalisées sur les enregistrements calés temporellement à partir des trois marqueurs biostratigraphiques et de l'identification des stades isotopiques TG12 et TG22. La courbe noire correspond aux analyses spectrales réalisées sur les enregistrements datés par calage orbital.

Periodograms of the $\delta^{18}\text{O}$ of *C. wuellerstorfi* (A), low field susceptibility (B) and grey level (C). The dotted line corresponds to spectral analyses applied on records dated with biostratigraphic time points

estimés entre 6,2 et 4,9 Ma, varient entre 1 et 6 cm ka^{-1} (Fig. 2).

Les analyses spectrales des variations de la susceptibilité magnétique, du niveau de gris et de $\delta^{18}\text{O}$ de *C. wuellerstorfi*, suivant l'échelle d'âge orbital, ont été reportées sur la Fig. 3. En adéquation avec le modèle d'âge réalisé, les variations de la susceptibilité magnétique sont dominées par des périodicités à 19, 23 et 100 ka correspondant à la précession (19 et 23 ka) et à l'excentricité (100 ka). L'enregistrement du niveau de gris est pour sa part principalement dominé par des cyclicités à 19 et 23 ka. Pour les deux enregistrements, la périodicité à 41 ka correspondant au paramètre orbital de l'obliquité est relativement peu marquée. En revanche, les variations de $\delta^{18}\text{O}$ de *C. wuellerstorfi* sont pour leur part contrôlées par une forte cyclicité à 41 ka (Fig. 3), en accord avec de nombreuses études menées en Atlantique [16,17,34].

3.2. Sources et dynamiques des apports sédimentaires au plateau du Cap Vert, relations avec la mousson nord-africaine

Les variations de la teneur en carbonate sont comprises entre 30 et 90% (poids) et covarient avec les changements des valeurs du niveau de gris (Fig. 2). Des observations au microscope, couplées à quelques analyses par diffractométrie de RX du sédiment, ont montré l'absence de carbonate détritique (dolomite) et une fraction carbonatée dominée par des foraminifères planctoniques. Afin de s'affranchir des effets de dilution par la productivité carbonatée et de surface, ainsi qu'à d'éventuels effets de compaction différentielle des sédiments et de rendre compte de l'importance des apports détritiques au plateau du Cap Vert, les flux détritiques (Fig. 4) ont été restitués à partir des équations suivantes :

$$\text{Flux}_{\text{tot}} = \rho_s \cdot \text{Tx}$$

$$\text{Flux}_{\text{tot}} = (100 - C) \cdot \text{Flux}_{\text{det}} + C \cdot \text{Flux}_{\text{car}}$$

où, Flux_{tot} , Flux_{det} et Flux_{car} correspondent respectivement au flux total, détritique et carbonaté ($\text{g cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$) ; C = teneur de carbonate biogénique (%); ρ_s = masse volumique sèche (g cm^{-3}) et Tx = vitesse de sédimentation (cm ka^{-1}).

and from the identification of TG12 and TG22 on the $\delta^{18}\text{O}$ record. Black curve corresponds to spectral analyses applied on records dated by orbital tuning.

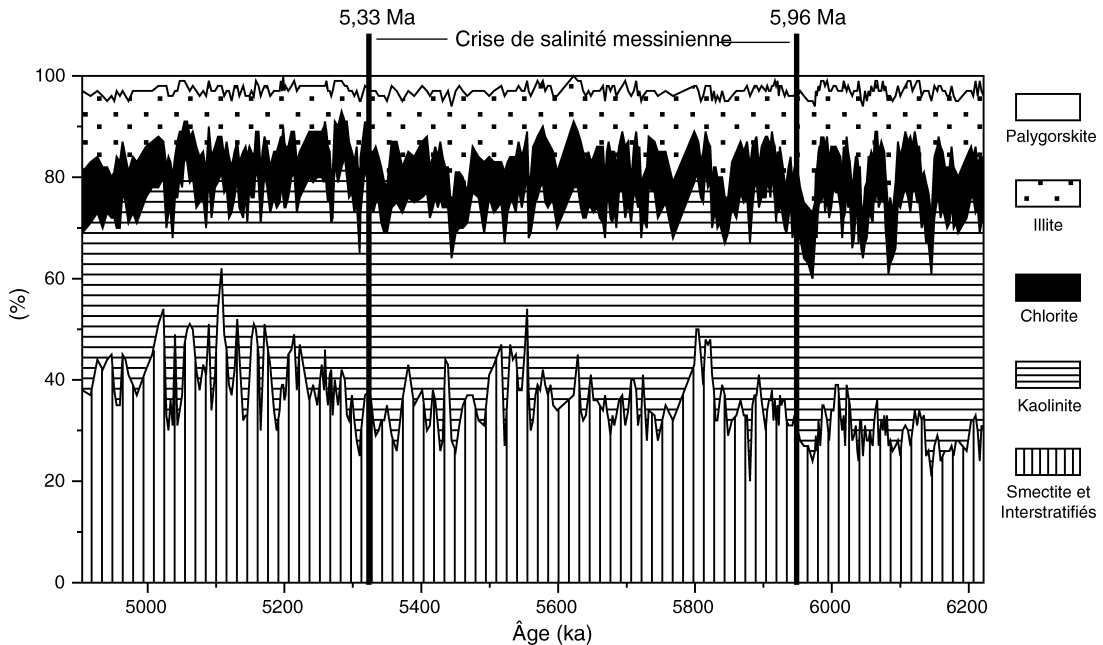


Fig. 4. Variations de la proportion (%) des minéraux argileux de la fraction $< 2 \mu\text{m}$ du site ODP 659 en fonction de l'âge (Ma).
Variations of clay minerals proportion (%) on the $< 2 \mu\text{m}$ size fraction versus age (Ma) for ODP Site 659.

Les estimations indiquent que les flux détritiques varient entre $0,1$ et $3 \text{ g cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$ (Fig. 4). De telles variations pourraient être induites :

- soit par des processus de remaniement des sédiments de la plate-forme continentale, lors des épisodes de bas niveau marin ;
- soit par une modification des apports fluviaux ;
- soit par une modification de l'importance des apports éoliens.

Le site ODP 659 est situé sur une zone de haut fond, ce qui exclut des apports majeurs liés à un remaniement des sédiments de la plate-forme continentale, lors d'épisodes de bas niveau marin. Par ailleurs, les périodes de bas niveau marin des stades glaciaires, correspondant à de fortes valeurs de la courbe du $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques, ne sont pas systématiquement associées à de forts flux détritiques (Fig. 4). Toutefois, il existe une bonne covariance entre les variations des flux détritiques et celles de l'insolation reçue par la terre en été (juillet) à 20°N (Fig. 4). D'une manière générale, les maxima de la courbe d'insolation coïncident avec de faibles flux détritiques. Comme les variations de l'intensité de la mousson nord-africaine sur les domaines sahélien et saharien sont étroitement contrôlées par l'insolation reçue par la terre aux basses latitudes [3,33], les flux détritiques doivent être

fortement dépendants de la variabilité de l'intensité de la mousson nord-africaine.

Les fleuves alimentant la marge ouest du continent nord-africain, dont le plus important est le fleuve Sénégal, ne semblent pas être responsables de la variabilité des flux détritiques. En effet, les périodes d'intensification des précipitations de la mousson nord-africaine sur le domaine sahélien pourraient entraîner une intensification du ruissellement à terre et des apports solides plus importants par les fleuves. L'augmentation des flux détritiques n'est pas associée aux périodes de maxima de la courbe d'insolation, ce qui exclut, de ce fait, une forte modulation de ces flux par les apports fluviaux.

Plusieurs études ont montré l'existence de forts apports éoliens au niveau des îles du Cap Vert provenant des zones désertiques du Nord de l'Afrique [32]. Les flux actuels de matériel éolien à proximité des îles du Cap Vert ont été estimés à $1\text{--}2 \text{ g cm}^{-2} \text{ ka}^{-1}$ [26]. De telles valeurs de flux sont similaires aux flux détritiques estimés pour le site ODP 659, impliquant une contribution importante des apports éoliens pour ce site.

Au large des zones désertiques, la quantité de matériel éolien exporté aux océans est dépendante de l'intensité des champs de vent et des conditions d'aridification des zones sources [25]. Toute évolution de l'intensité des précipitations affectant une région donnée est associée à un changement de la densité du

couvert végétal et de l'érosion mécanique des sols par les vents. Pour le site ODP 659, les périodes de forts flux détritiques sont associées à des minima de la courbe d'insolation suggérant une extension des zones arides des domaines saharien et sahélien, en relation avec une migration vers le sud de la zone de balancement de la ZCIT. Les variations des flux détritiques semblent être étroitement reliées aux apports éoliens, eux-mêmes en étroite relation avec l'intensité des pluies et des champs de vent associés à la variabilité de la mousson nord-africaine.

La composition minéralogique de la fraction argileuse permet d'apporter des informations complémentaires sur les provinces sources des sédiments. Le cortège argileux des sédiments du site ODP 659 est constitué de smectite (20 à 60%), de kaolinite (20 à 60%), d'illite (10 à 25%) et de chlorite (6 à 15%) (Fig. 4). La palygorskite est minoritaire, avec des teneurs comprises entre 1 et 6%. D'une manière générale, les teneurs en palygorskite, en illite, en chlorite et en smectite co-varient et se caractérisent par des variations antagonistes à celles de la kaolinite. À partir de 5,3 Ma, le cortège argileux se marque par une diminution de la teneur en kaolinite, au détriment d'une augmentation de celles de la smectite et de l'illite (Fig. 4). La palygorskite et la chlorite n'étant présentes

qu'en faibles proportions, les rapports minéralogiques illite/kaolinite et smectite/kaolinite ont été reportés dans la Fig. 5, pour comparaison avec la courbe d'insolation reçue par la terre aux basses latitudes durant les mois d'été. Les périodes de faibles insolutions se caractérisent systématiquement par une augmentation de ces rapports minéralogiques dont la signification nécessite une discussion sur les sources et les voies de transport des argiles au plateau du Cap Vert.

Caqueneau [5] a mis en évidence que les aérosols modernes africains collectés au niveau des îles du Cap Vert sont dominés par l'illite et la kaolinite, avec de faibles proportions de smectite [6]. L'illite est caractéristique d'une origine saharienne, alors que la kaolinite est dominante dans les sols sahéliens et subtropicaux. Par conséquent, le rapport illite/kaolinite peut être considéré comme un indicateur discriminant des provinces sédimentaires saharienne et sahélienne. Cependant, des apports en kaolinite par les fleuves sont aussi possibles, puisque les fleuves tropicaux tels que le fleuve Sénégal se caractérisent par une charge particulière dominée par la kaolinite (40 à 50%). Tout comme dans les sédiments du site ODP 659 que nous avons étudiés, la palygorskite présente des teneurs très faibles dans les poussières éoliennes apportées par les vents depuis les zones nord sahariennes et collectées au

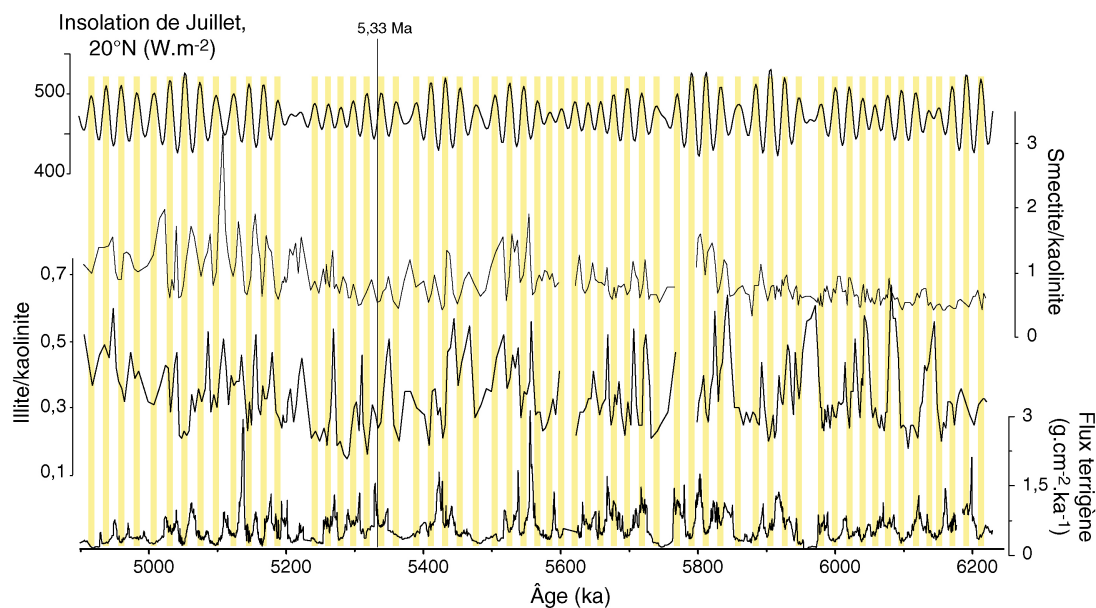


Fig. 5. Variations des rapports smectite/kaolinite et illite/kaolinite ainsi que du flux terrigène ($\text{g cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$) du site ODP 659 en fonction de l'âge (Ma). L'insolation moyenne (W m^{-2}) de juillet calculé à 20°N de latitude à partir du logiciel Analyseries [24] y figure pour comparaison. Les bandes jaunes correspondent aux intervalles d'insolation maximum.

Variations of smectite/kaolinite and illite/kaolinite, ratios as well as terrigenous fluxes ($\text{g cm}^{-2} \text{ka}^{-1}$) versus age (Ma) for ODP Site 659. Insolation curve (W m^{-2}) calculated for July at latitude of 20°N using the Analyseries software [24] is also reported for comparison. Shaded bands denote intervals of maximum insolation.

niveau des îles du Cap Vert [5]. Les fortes teneurs en smectite mesurées pour les sédiments du site ODP 659 ne peuvent pas être liées à des apports par les vents, car elles ne constituent pas une phase minérale importante des aérosols modernes saharien et sahélien [5,8,15]. La smectite doit majoritairement provenir de l'altération des roches basaltiques des îles volcaniques du Cap Vert et des Canaries dont la minéralogie des sols est dominée par la smectite [7].

Les périodes de fortes insulations reçues par la terre, sont associées à des minimums de flux détritiques et du rapport illite/kaolinite (Fig. 5) Cela implique une augmentation des apports sédimentaires depuis les zones sahélienne et subtropicale, ainsi qu'une réduction des apports depuis la zone saharienne. Ce schéma d'alimentation est en accord avec une variabilité latitudinale des zones de pluies de la mousson sur le continent nord-africain, au cours des changements de l'insolation. Les périodes de fortes insulations entraînent une migration vers le nord, de la zone de balancement de la ZCIT, de fortes pluies sur le domaine sud Sahara et une migration vers le nord des zones de végétation. Cela est responsable d'une réduction des apports éoliens provenant des domaines sahariens. Nous proposons alors, que les plus fortes teneurs en kaolinite observées dans les sédiments du site ODP 659 ne peuvent pas être associées à une alimentation éolienne depuis les zones sahéliennes dont la couverture végétale impose une réduction de l'érosion éolienne. Les apports de kaolinite doivent s'effectuer principalement par les fleuves africains tropicaux.

Les variations de la smectite étant fortement opposées à celles de la kaolinite, nous avons été amenés à considérer que cette argile provient principalement de roches basaltiques des îles volcaniques. Dans cette hypothèse, elle pourrait être transportée principalement par le courant des Canaries et les mouvements, vers le sud, de la zone de balancement de la ZCIT seraient alors favorables à son apport au site d'étude.

3.3. Relations entre les événements de la crise de salinité messinienne et le climat nord-africain

La crise de salinité messinienne est caractérisée par le dépôt d'un considérable volume d'évaporites sur les marges et dans les bassins centraux profonds de Méditerranée [18]. Cet événement s'est produit pendant une très courte tranche de temps (5,96–5,33 Ma ; [14,20]). Plusieurs scénarios sont actuellement proposés pour expliquer et retracer le processus de cet événement [4,9,20,21,27]. Tous ces scénarios s'accor-

dent sur la nécessité d'un isolement quasi total de la Méditerranée des sources d'approvisionnement en eau de mer dont les causes furent essentiellement tectoniques, mettant en jeu la fermeture des connexions antérieures entre l'océan Atlantique et la Méditerranée, comme le corridor rifain [19]. Cet événement a entraîné un changement paléogéographique majeur, avec un abaissement considérable du plan d'eau en Méditerranée (d'au-moins 1500 m) en plusieurs phases, probablement après 5,6 Ma [23]. La remontée du niveau marin à la fin de la crise (5,33 Ma) est considérée par de nombreuses études basées sur des modèles [2] ou sur l'organisation des dépôts messinien, comme étant relativement brutale, au moins dans sa phase terminale [23].

La chronologie précise du site ODP 659 par la méthode « orbital tuning », contrainte par quelques points de calages biostratigraphiques, permet de réaliser des corrélations entre les événements de la crise de salinité messinienne et l'évolution de la mousson nord-africaine. Après 5,33 Ma, les sédiments qui s'accumulent sur la marge passive atlantique, au niveau du site ODP 659 se caractérisent par une diminution de la teneur en kaolinite et une augmentation des rapports smectite/kaolinite et illite/kaolinite. Cela implique une diminution relative des apports sédimentaires provenant du sud, au détriment d'une alimentation des provinces sédimentaires localisées plus au nord (îles des Canaries et apports éoliens depuis les domaines sahariens). Une telle évolution dans les sources sédimentaires impose, à partir de 5,33 Ma, une augmentation des conditions d'aridité des domaines saharien et sahélien, associée à une réduction des apports par les fleuves drainant le domaine subtropical. Nous suggérons que la remise en eau de la Méditerranée, à la fin de la Crise de Salinité Messinienne datée à 5,33 Ma [20], a entraîné un changement important de l'albédo et de la paléogéographie du domaine, une modification de la position et de l'intensité des centres de basses pressions du domaine nord-africain et une migration vers le sud de la zone de balancement de la ZCIT.

4. Conclusion

Une échelle d'âge orbitale des sédiments du Site ODP 659 a été établie pour l'intervalle de temps compris entre 6,2 et 4,9 Ma. Les variations des flux détritiques, combinées à la minéralogie des argiles des sédiments du Site ODP 659 ont permis d'établir un nouveau modèle de dépôt des sédiments au niveau du plateau du Cap Vert qui constitue une zone clé dans la restitution des apports éoliens à l'Atlantique depuis

le continent nord-africain. Nous avons apporté des contraintes supplémentaires sur les zones d'alimentation et les voies de transport du sédiment au plateau du Cap Vert et montré un lien étroit entre la sédimentation de cette zone et les changements de la mousson nord-africaine.

Les périodes de faible insolation (faibles précipitations de mousson) se caractérisent par de forts apports éoliens provenant essentiellement du domaine saharien (illite et palygorskite), en relation avec une migration, vers le sud, de la zone de balancement de la ZCIT. Durant les périodes de forte insolation (fortes précipitations de mousson), la migration vers le nord de la zone de balancement de la ZCIT se caractérise par la diminution des apports éoliens sahariens et une augmentation des apports de sédiments fortement altérés (kaolinite) provenant des sols tropicaux apportés par les fleuves africains. Une diminution de tels apports après 5,33 Ma, implique un impact majeur des modifications paléogéographiques liées à la remise en eau de la Méditerranée sur la variabilité de la mousson nord-africaine. Nous suggérons que les changements d'albédo et les bouleversements paléogéographiques liés à la remise en eau de la Méditerranée, après 5,33 Ma, soient associés à une migration, vers le sud, de la zone de balancement de la ZCIT et à une aridification du continent nord-africain.

Remerciements

Nous remercions vivement les deux rapporteurs anonymes pour leurs suggestions qui ont contribué à améliorer la qualité du manuscrit. Nous remercions également Luc Beaufort pour son aide dans l'étude biostratigraphique du nannoplancton calcaire réalisée sur le site ODP 659. 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 du 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 Éclipse.

Références

- [1] J. Backman, I. Raffi, Calibration of Miocene nannofossil events to orbitally tuned cyclostratigraphies from Ceara rise, Proc. ODP Sci. Res. 154 (1997) 83–99.
- [2] P.L. Blanc, The opening of the Plio-Quaternary Gibraltar Strait: assessing the size of a cataclysm, Geodin. Acta 15 (2002) 303–317.
- [3] J. Bloemendal, P. deMenocal, Evidence for a change in the periodicity of tropical climate cycles at 2.4 Myr from whole-core magnetic susceptibility measurements, Nature 342 (1989) 897–900.
- [4] H. Butler, W.H. Lickorish, M. Grasso, H.M. Pedley, L. Ramberti, Tectonics and sequence stratigraphy in Messinian basins. Sicily: constraints on the initiation and termination of the Mediterranean salinity crisis, Geol. Soc. Am. Bull. 107 (4) (1995) 425–439.
- [5] S. Caquineau, Les sources des aérosols sahariens transportés au-dessus de l'Atlantique tropical nord : localisation et caractéristiques minéralogiques. Thèse de l'Université de Paris XII Val de Marne (1997) 205p.
- [6] S. Caquineau, A. Gaudichet, L. Gomes, M. Legrand, Mineralogy of saharan dust transported over northwestern tropical Atlantic ocean in relation to source regions, J. geophys. Res. 107-D15 (2002) 12.
- [7] H. Chamley, G. Coudé-Gaussen, P. Debrabant, P. Rognon, Contribution autochtone et allochtone à la sédimentation quaternaire de l'île de Fuerteventura (Canaries) : altération ou apports éoliens ? Bull. Soc. Géol. France 8–3 (1987) 939–952.
- [8] R. Chester, H. Elderfield, J.J. Griffin, L.R. Johnson, R.C. Padgham, Eolian dust along the eastern margins of the Atlantic ocean, Mar. Geol. 1 (1972) 91–105.
- [9] G. Clauzon, J.P. Suc, F. Gautier, A. Berger, M.F. Loutre, Alternate interpretation of the Messinian salinity crisis: Controversy resolved? Geology 24 (1996) 363–366.
- [10] C. Colin, J. Bertaux, A. Desprairies, L. Turpin, 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.
- [11] T.B. Coplen, C. Kendall, J. Hopple, Comparison of stable isotope reference samples, Nature 302 (1993) 236–238.
- [12] P.B. deMenocal, Plio-Pleistocene African Climate, Science 270–5233 (1995) 53–59.
- [13] P.B. deMenocal, W.F. Ruddiman, E.M. Pokras, Influences of high and low-latitude processes on African terrestrial climate: Pleistocene eolian records from equatorial Atlantic ocean drilling program Site 663, Paleoceanography 8–2 (1993) 209–242.
- [14] F. Gautier, G. Clauzon, J.-P. Suc, J. Cravatte, D. Violanti, Âge et durée de la crise de salinité messinienne, C. R. Geoscience 318 (1994) 1103–1109.
- [15] R.A. Glaccum, J.M. Prospero, Saharan aerosols over the tropical North Atlantic – mineralogy, Mar. Geol. 37 (1980) 295–321.
- [16] D.A. Hodell, R.H. Benson, D.V. Kent, A. Boersma, K. Rakic-El Bied, Magnetostratigraphic, biostratigraphic, and stable isotope stratigraphy of an Upper Miocene drill core from the Salé Briqueterie (northwestern Morocco): a high-resolution chronology for the Messinian stage, Paleoceanography 9–6 (1994) 835–855.
- [17] D.A. Hodell, H.C. Jason, F.J. Sierro, M.E. Raymo, Correlation of Late Miocene to Early Pliocene sequences between the Mediterranean and North Atlantic, Paleoceanography 16–2 (2001) 164–178.
- [18] K.J. Hsü, M.B. Cita, W.B.F. Ryan, The origin of the Mediterranean evaporites, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 13 (1973) 1203–1231.
- [19] W. Krijgsman, The Mediterranean: *Mare Nostrum* of Earth Sciences, Earth Planet. Sci. Lett. 205 (2002) 1–12.
- [20] W. Krijgsman, F.J. Hilgen, L. Raffi, F.J. Sierro, D.S. Wilson, Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis, Nature 400 (1999) 652–655.
- [21] W. Krijgsman, F.J. Hilgen, S. Marabini, G.B. Vai, New paleomagnetic and cyclostratigraphic age constraints on the Messinian

- nian of the northern Apennines (Vena del Gesso Basin, Italy), *Memorie della Società Geologica d'Italia* 54 (1999) 25–33.
- [22] J. Laskar, F. Joutel, F. Boudin, Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from –20 Myr to + 10 Myr, *Astron. Astrophys* 270 (1993) 522–533.
- [23] J. Lofi, C. Gorini, S. Berné, G. Clauzon, A.T. Dos Reis, B.F. Ryan, M.S. Steckler, Erosional processes and paleo-environmental changes in the western Gulf of Lions (SW France) during the Messinian salinity crisis, *Mar. Geol.* 217 (2005) 1–30.
- [24] D. Paillard, L. Labeyrie, P. Yiou, Macintosh Program Performs Time-Series Analysis, *Eos, Transactions, Am. Geophys. Union* 77 (1996) 379.
- [25] J.M. Prospero, R.T. Nees, Impact of the North African drought and El Nino on mineral dust in the Barbados trade winds, *Nature* 320 (1986) 735–738.
- [26] V. Ratmeyer, G. Fischer, G. Wefer, Lithogenic particle fluxes and grain-size distributions in the deep ocean off Northwest Africa: implications for seasonal changes of aeolian dust input and downward transport, *Deep Sea Res.* 46 (1999) 1289–1337.
- [27] J.M. Rouchy, A. Caruso, The Messinian salinity crisis in the Mediterranean Basin: a reassessment of the data and a integrated scenario, *Sedim. Geol.* 188–189 (2006) 35–67.
- [28] W.F. Ruddiman, T.R. Janecek, Pliocene-Pleistocene biogenic and terrigenous fluxes at equatorial Atlantic sites 662, 663 and 664, *Proc. ODP Sci. Res.* 108 (1989) 211–240.
- [29] W.F. Ruddiman, A. McIntyre, M.E. Raymo, Paleoenvironmental results from North Atlantic sites 607–609, in: W.F. Ruddiman et al., Initial Report Deep Sea Drill. Proj. 94, 1986, pp. 855–878.
- [30] N.J. Shackleton, S. Crowhurst, Sediment fluxes based on an orbitally tuned time scale 5 Ma to 14 Ma, Site 926, ODP Proceeding 154 (1997) pp. 69–82.
- [31] N.J. Shackleton, M.A. Hall, D. Pate, Pliocene stable isotope stratigraphy of site 846, ODP proceeding 138 (1995) pp. 337–355.
- [32] R. Tiedemann, M. Sarnthein, N.J. Shackleton, Astronomic timescale for the Pliocene Atlantic $\delta^{18}\text{O}$ and dust flux records of Ocean Drilling Program site 659, *Paleoceanography* 9,4 (1994) 619–638.
- [33] E. Tuenter, S.L. Weber, F.J. Hilgen, L.J. Lourens, The response of the African summer monsoon to remote and local forcing due to precession and obliquity, *Global Planet. Change* 36 (2003) 219–235.
- [34] L. Vidal, T. Bickert, G. Wefer, U. Röhl, Late Miocene stable isotope stratigraphy of SE Atlantic ODP Site 1085: relation to Messinian events, *Mar. Geol.* 180 (2002) 71–85.