



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 175–183



Géomatériaux / Geomaterials

Répartition des minéraux argileux et contrôle tectono-eustatique dans les bassins de la marge tunisienne

Clay mineralogical distribution and tectono-eustatic control in the Tunisian margin basins

Fakher Jamoussi ^{a,*}, Mourad Bédir ^a, Nouredine Boukadi ^b, Samir Kharbachi ^c, Fouad Zargouni ^b, Alberto López-Galindo ^d, Hélène Paquet ^e

^a Laboratoire Géoresource, INRST BP 95, 2050 Hamam-lif, Tunisie

^b Département de géologie, faculté des sciences de Tunis, 1060 Belvédère, Tunis, Tunisie

^c Serept, 8, rue Slimen-Ben-Slimen-Manar-II, Tunis, Tunisie

^d IACT-CSIC, Universidad de Granada, Avenida Fuentenueva, 18002 Granada, Espagne

^e Centre de géochimie de surface, EOST, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg, France

Reçu le 23 mai 2002 ; accepté le 12 novembre 2002

Présenté par Jean Dercourt

Résumé

L'étude minéralogique des argiles de la série stratigraphique du Paléozoïque au Néogène à travers les bassins sédimentaires de la marge tunisienne a été réalisée dans différents domaines paléogéographiques. Ce travail a pour objectif de percevoir la relation entre la répartition des argiles dans le temps et dans l'espace et les événements géodynamiques et eustatiques. Les cortèges argileux contemporains des régressions marines, accompagnées d'une intensification de l'érosion, sont ainsi à prédominance d'illite, alors que ceux relatifs aux transgressions suivies de climat chaud et sec sont accompagnés de smectite. Le minimum de niveau marin coïncide avec l'abondance de palygorskite. On tentera de relier les variations observées dans la nature et la teneur des minéraux argileux aux événements tectoniques de soulèvement et d'érosion et à ceux de *rifting* et de subsidence.

© 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

We have studied the clay assemblages found in the different palaeogeographic domains located at the several Tunisian margin basins, ranging in age from Palaeozoic to Neogene. This study has allowed us to characterize and highlight the relationship between the clay distribution in time and space and the geodynamic and eustatic events. Marine regressions, with the intensification of erosion, seem to be responsible for illite increases, whereas transgressions, in concordance with a warm and dry climate, coincide with the smectite dominance. The minimum marine level coincides with the abundance of palygorskite.

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : Fakher.Jamoussi@inrst.rmr.tn (F. Jamoussi), hpaquet@illite.u-strasbg.fr (H. Paquet).

Mineralogic changes in the clay assemblages as well as in the proportion of the different clay minerals will tentatively be related to erosive tectonic events and/or to subsiding and rifting events, marked by the inheritance or the neoformation of the several clays.

© 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Mots-clés : Minéralogie ; Argile ; Eustatisme ; Tectonique ; Géodynamique ; Tunisie

Keywords: Mineralogy; Clay; Eustatism; Tectonics; Geodynamics; Tunisia

Abridged English version

1. Introduction

This study consists of a mineralogical identification of the Tunisian clays along the stratigraphic succession from Palaeozoic to Neogene. These series overly the Palaeozoic metamorphic and granitic basement to the south and are investigated by petroleum wells (Fig. 1). The studied domain [1,5,9,10,13,32] spreads from the Saharan platform to the south to the nappes zone to the north (Fig. 1). More than 800 clays samples had been analysed by XRD [22]. Mineralogical characterization is compared to eustatic and tectonic events. Relationship between these different parameters is tentatively highlighted.

2. Tectonic and structural evolution

Tectono-palaeogeographic domains of Tunisia developed due to a succession of geodynamic events related to the motion of the African plate [1–3,5,9,36,38, 39].

The Tunisian margin is made up of a mosaic of tectonic inherited blocks. The Saharan platform to the south is marked by the Palaeozoic Caledonian and Hercynian orogenes unconformities due to the rising of granitic and metamorphic basement [2]. To the north, the Atlasic domain is characterized by a folded sedimentary cover cut by Triassic diapirs and strike-slip faults. The structuring of Atlasic area is the result of the Triassic–Jurassic and Cretaceous Tethyan rifting, inducing graben and platform basins that were sealed and folded by the compressive Austrian, Upper Cretaceous and Tertiary Pyrenean and Alpine Atlasic events [2]. These events can be summarized by:

- (1) Caledonian and Hercynian orogenies of Ordovician–Devonian and Permian [2],

- (2) Tethyan rifting of Triassic–Jurassic and Early Cretaceous times [2],
- (3) Austrian Aptian orogeny,
- (4) Early–Pyrenean orogeny of Late Cretaceous times,
- (5) Late–Pyrenean orogeny of Palaeocene–Eocene times,
- (6) Middle–Miocene rifting,
- (7) Alpine and Atlasic orogeny of Upper Miocene to Quaternary.

3. Palaeogeographic clay minerals distribution

The synthesis of hundreds of mineralogical analyses [22] of clay associations in these different Tunisian palaeogeographic domains has allowed us to identify the mineralogical characterization and distribution from the Palaeozoic to the Neogene formations (Fig. 2).

The Palaeozoic clays are usually dominated by illite (36–80%) with subordinate kaolinite (12–55%) and chlorite (0–18%).

The Triassic shows a prevailing illite (60–74%) accompanied by chlorite (12–15%) and kaolinite (13–17%) as a typical association of Triassic deposits.

The Jurassic levels, from Toarcian to Bajocian, show a predominance of illite (90–92%) associated with low rates of kaolinite (5–6%) and chlorite (2–3%), whereas smectite appears in noticeable amounts (35–45%) in Callovian–Kimmeridgian deposits of the central Atlas.

The Lower–Cretaceous clays shows a predominance of illite (33–79%) over kaolinite (6–58%), interstratified Ill/Sm (0–10%) and chlorite (0–13%). However, the presence of abundant palygorskite (0–41%) and sepiolite (0–7%) must be noted. From the Upper Cretaceous, smectite becomes more abundant (20–89%) and is accompanied by an assemblage of illite, kaolinite and Ill/Sm.

The Palaeocene clays are rich in smectite (40–65%) from the southern to the northern Atlas. This mineral decreases considerably at the contact with the Nappe Zone and there is a subsequent increase of Ill/Sm and sepiolites.

The Eocene clays show a rather high content of smectite (27–55%), accompanied by illite, kaolinite, Ill/Sm and sepiolite. The abundance of palygorskite (68–77%) in some places of the southern and central Atlas indicates continental deposits.

The Oligocene clays are characterized by a decrease of smectite (4–6%) that can be related to the enrichment in palygorskite in the southern Atlas and to the increase of kaolinite in the Nappe Zone.

The Miocene clays show a mineralogical constancy with a predominance of smectite (23–45%) over illite (0–30%) and kaolinite (17–35%). To the forehead of the Nappe Zone, halloysite was identified [22]. Pliocene deposits are made up of a mixture of smectite, illite, kaolinite, Ill/Sm and palygorskite.

Clay mineralogy can be, thus, a witness of the different discontinuities found within the stratigraphical succession.

4. Mineralogy, eustatism and tectonic relationship

The confrontation of mineralogical [22], eustatic [37] and tectonic data [1–3,5,9,10,36,38,39] indicates that the marine regressions are globally accompanied by intensification of erosion and increase of illite, whereas transgressions are accompanied by smectite [22]. In addition, lower marine levels coincide with the formation of confined basins and the abundance of palygorskite (Fig. 2). These changes are respectively contemporaneous with the Caledonian, Hercynian, Alpine and Atlasic orogenic events and to the Tethyan and Mesogean rifting [2].

5. Conclusions

Numerous clay minerals identified in the Tunisian margin basins, from the Saharan platform, to the south, to the Atlasic zone, to the north, are of terrigenous origin. They are markers of the palaeoenvironmental conditions in adjacent continental zones but also of tectonic activity or relaxation and of sea-level changes. It is still difficult to specify the respective part of these three parameters.

1. Introduction

L'établissement d'une charte des argiles de la Tunisie, en vue de leur utilisation potentielle dans le domaine de l'agriculture et de l'industrie, ainsi que l'inventaire des minéraux argileux sédimentaires a été effectué à partir de 800 échantillons prélevés dans les différents domaines paléogéographiques du pays [22]. Du nord au sud, il s'agit : de la plate-forme saharienne, de l'Atlas méridional, de l'Atlas central, de l'Atlas oriental, de l'Atlas septentrional et de la zone des nappes (Fig. 1). Les prélèvements s'échelonnent depuis les formations paléozoïques à travers les données des forages pétroliers, jusqu'aux affleurements du Cénozoïque. Les échantillons de 44 coupes étudiées et de cinq forages pétroliers ont été analysés de point de vue minéralogique par un diffractomètre de type Kristalloflex 810 de marque Siemens à anticathode Cu K α à l'INRSST de Tunis et au Centre de géochimie de la surface de Strasbourg. Le calcul semi-quantitatif a été réalisé par la méthode de la surface des pics et des pouvoirs réflecteurs des différents minéraux. L'analyse chimique des éléments majeurs, des éléments traces et des terres rares complète systématiquement l'analyse minéralogique. L'analyse des éléments majeurs a été effectuée à l'Office national des mines de Tunisie par spectrophotométrie d'absorption atomique; l'analyse chimique des éléments traces et des terres rares a été effectuée au Centre d'instrumentation scientifique de Grenade (Espagne) par spectrométrie de plasma-masse.

À partir de ces nombreuses données, nous avons tenté de déterminer les relations existant entre la minéralogie argileuse de la série stratigraphique, d'une part, et les variations eustatiques, les événements tectoniques et les épisodes climatiques mis en évidence [20], depuis le Paléozoïque jusqu'au Cénozoïque, d'autre part.

2. Structuration et évolution tectonique

Les six domaines paléogéographiques mentionnés plus haut (Fig. 1) se sont développés à la suite d'une succession d'événements géodynamiques en relation avec la tectonique de la marge nord de la plaque Africaine [1–3,5,9,36,38,39] et qui sont les suivants :

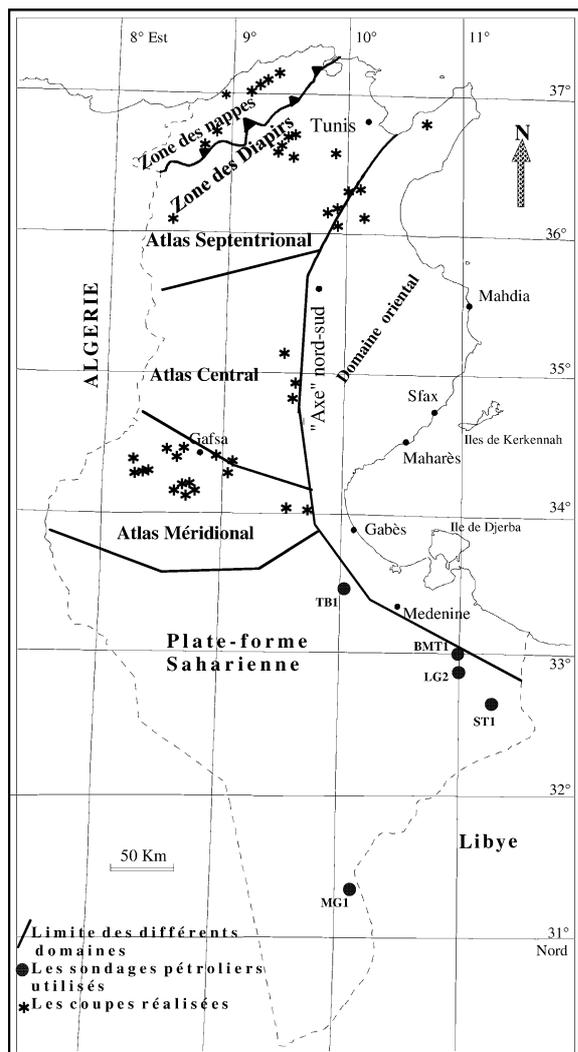


Fig. 1. Localisation des coupes et des sondages pétroliers étudiées.
Fig. 1. Location map of studied cross-sections and petroleum wells.

- (1) l'orogénèse calédonienne et hercynienne au Dévonien-Silurien et au Permien ;
- (2) le *rifting* téthysien au Trias-Jurassique et au Crétacé inférieur ;
- (3) l'orogénèse aptienne de la phase autrichienne ;
- (4) l'orogénèse pyrénéenne précoce au Crétacé terminal ;
- (5) l'orogénèse pyrénéenne tardive au Paléocène-Éocène ;
- (6) le *rifting* du Miocène moyen au Langhien ;

- (7) l'orogénèse alpine et atlasique du Miocène supérieur et du Quaternaire.

Il en résulte que la marge tunisienne se présente comme une mosaïque de blocs tectoniques hérités et réagencés. La plate-forme saharienne, au sud, est marquée par un socle précambrien granitique et métamorphique, recouvert en discordance par les séries paléozoïques argilo-gréseuses [3,9,12,13,22,28]. Vers le nord, le domaine atlasique consiste en une couverture sédimentaire plissée, percée de diapirs triasiques et coupée par des décrochements ; sa structuration est le résultat de *rifting* téthysien au Trias jurassique et au Crétacé inférieur. Ce dernier a induit un système de bassins de plate-forme et de graben scellés et plissés par les événements compressifs des phases orogéniques autrichienne, pyrénéenne et alpine [1,5,10,11, 26,38]. Le domaine atlasique est limité, au nord, par de larges structures de dômes et extrusions triasiques [31,34], qui constituent la « zone des diapirs » [18,31, 34]. Au-delà du domaine atlasique s'observe la « zone des nappes », constituée d'un empilement d'unités allochtones, où le flysch numidien constitue l'essentiel des affleurements [18,27,32,35].

3. Répartition des minéraux argileux dans l'espace et dans le temps

La compilation des résultats de l'analyse minéralogique des échantillons en provenance des différents domaines paléogéographiques conduit au log synthétique présenté sur la Fig. 2.

Le *Paléozoïque*, pour lequel on ne dispose de données que pour la plate-forme saharienne, révèle une association illite-kaolinite-chlorite, dans laquelle la chlorite est toujours en faible teneur et l'illite dominante (36–80%), sauf au passage Dévonien-Silurien et Carbonifère inférieur-Carbonifère supérieur, où c'est la kaolinite qui prédomine (45–49%).

Dans les six domaines paléogéographiques étudiés, les *dépôts triasiques* sont à dominante d'illite (60–74%) : dans la plate-forme saharienne, celle-ci est accompagnée de palygorskite, et, dans l'Atlas septentrional, de smectites. La zone des nappes enregistre les teneurs en chlorite les plus élevées de toute la colonne stratigraphique (26%).

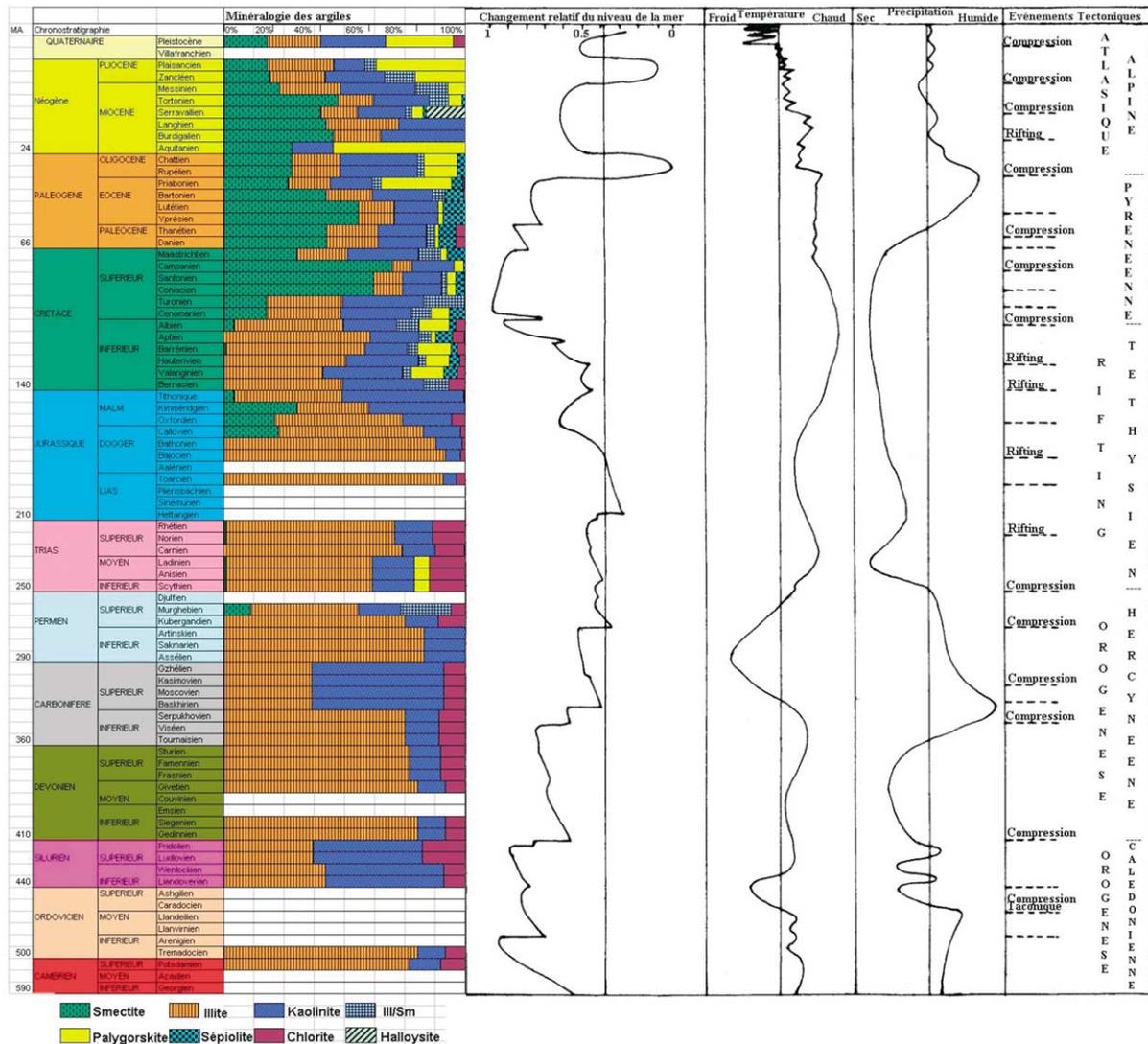


Fig. 2. Relation entre minéraux argileux, eustatisme [37], température, précipitations [20] et tectonique.

Fig. 2. Clay mineralogy, eustatism [37], temperature, precipitations [20] and tectonic relationships.

Au *Jurassique* et jusqu'au *Bathonien*, dans les six domaines paléogéographiques, l'illite est nettement dominante (80–95%). Au-delà, si, dans l'Atlas septentrional, elle reste prédominante, dans la plate-forme saharienne, la teneur en kaolinite égale celle de l'illite, puis, dans l'Atlas central, elle la dépasse, accompagnée d'importantes quantités de smectites (entre 35 et 45%).

Le *Crétacé inférieur* se caractérise, sur la plate-forme saharienne et dans l'Atlas central, par la dominance alternée de l'illite (45–79%) et de la kaolinite (18–58%), accompagnées de faibles teneurs de chlorite. Dans l'Atlas méridional et septentrional, s'observe un mélange d'illite, interstratifiés illite–smectite, smectite, et de minéraux fibreux, palygorskite et/ou sépiolite, qui peuvent représenter jusqu'à la moitié de la

fraction argileuse. Le Crétacé supérieur est à smectite dominante (20–89%) sur la kaolinite et l'illite, accompagnées de minéraux fibreux (entre 10 et 15%) dans l'Atlas méridional.

Du Crétacé supérieur au Lutétien, excepté dans la zone des nappes, la smectite est prépondérante par rapport à la kaolinite, à l'illite et aux minéraux fibreux, ceux-ci n'étant présents que dans l'Atlas méridional. La zone des nappes se différencie des autres provinces présentant un mélange de minéraux alternativement dominants, à savoir illite, interstratifiés illite–smectite, smectite, kaolinite, sépiolite.

L'Éocène supérieur et l'Oligocène se caractérisent par l'abondance de palygorskite dans l'Atlas méridional et dans l'Atlas central (68–77%). Le minéral fibreux reste aussi dominant au Mio-Pliocène dans l'Atlas méridional et la plate-forme saharienne (30–74%), et on l'y observe également en quantités notables au Quaternaire (28%). Dans l'Atlas méridional et l'Atlas central, la palygorskite est accompagnée d'un peu d'illite, de kaolinite et de smectite, qui va devenir le minéral cardinal au Mio-Pliocène, dans l'Atlas central. Pour la même période, les Atlas occidental et oriental et la zone des nappes se caractérisent par un mélange d'illite, interstratifiés illite–smectite, smectite et kaolinite.

Les argiles serravalliennes de la zone des nappes sont assez particulières, comportant une forte dominance d'halloysite.

4. Caractéristiques de certains types de minéraux argileux répertoriés

Une étude détaillée des smectites, réalisée à la suite de celle effectuée sur les smectites du Sud tunisien [23], révèle qu'à partir du Crétacé supérieur les smectites sont de type beidellite ferrifère, c'est-à-dire qu'elles ont une composition proche de celles qui caractérisent les altérations supergènes en climat tropical à saisons contrastées [30].

Par ailleurs, Ben Aboud et al. [4] indiquent que les palygorskites des séries éocènes continentales se seraient formées à partir d'un précurseur détritique aluminosilicaté dans un environnement confiné à forte activité en Si et Mg.

En outre, les analyses de terres rares effectuées dans les différents étages de la colonne stratigraphique [22] fournissent des spectres de distribution de ces

terres rares – normalisées par rapport au NASC (*North Atlantic Shale Composition*) – pratiquement plats, exception faite pour les argiles du Trias extrusif (palygorskite et chlorite) et du Serravalien (halloysite présentant des valeurs de terres rares très faibles).

5. Relation entre minéraux argileux, eustatisme, tectonique, climat

Si les paramètres eustatiques, tectoniques et climatiques [20,21,37] sont mis en regard du log des argiles, on peut faire les principales observations suivantes, depuis la base jusqu'au sommet de la colonne stratigraphique (Fig. 2).

- Si, dans son ensemble, le Paléozoïque est à illite dominante, la diminution de la teneur en illite au profit de la kaolinite entre l'Ordovicien et le Silurien, qui coïncide avec l'abaissement du niveau marin, correspond à l'orogénèse calédonienne et à la compression tectonique, marquée par les discordances angulaires de l'Ordovicien et du Silurien, sur la plate-forme saharienne [2].
- La constance du cortège minéralogique du Dévonien au Carbonifère inférieur à illite dominante coïncide avec une stabilité du niveau marin.
- L'augmentation de la teneur en kaolinite entre le Carbonifère inférieur et le Carbonifère supérieur correspond à une baisse du niveau marin, les dépôts étant contemporains de la phase de compression hercynienne.
- La ré-augmentation de la teneur en illite au Permien coïncide avec les événements compressifs tardifs de l'orogénèse hercynienne, qui est bien marquée par la discordance angulaire de la base du Trias sur le Permien [2].
- L'augmentation de la teneur en chlorite et l'apparition de la palygorskite au Trias correspondent à la baisse du niveau marin, puis à une stabilité eustatique. C'est également une période de calme tectonique jusqu'au *rifting* téthysien, à climat chaud et aride, au Trias supérieur.
- Le *rifting* téthysien se poursuit au Jurassique moyen riche en illite, jusqu'au Malm, où celle-ci est subordonnée à la kaolinite et où la smectite apparaît en quantités notables. Cette période correspond à de plus hauts niveaux marins.

- Absente des dépôts du Crétacé inférieur, la smectite est abondante, voire prédominante dans les sédiments du Crétacé supérieur et du Tertiaire, marqués par un climat chaud et indiquant une stabilisation des marges [14]. Son association fréquente avec la palygorskite, plus ou moins abondante, y est la marque du cortège minéralogique, même si celui-ci comporte aussi, illite, kaolinite, voire chlorite subordonnées.
- L'apparition de la palygorskite accompagne les événements compressifs pyrénéens. Son abondance accompagne les déformations compressives néogènes de l'Aquitainien–Burdigalien et du Serravalien–Tortonien, suivies par les inversions de bassin, qui coïncident avec le minimum de niveau marin, favorisant la formation de milieux de dépôts confinés.

6. Discussion

Si l'on tente de préciser l'origine des minéraux argileux dans les différents étages des bassins de la marge tunisienne, force est de constater, si l'on considère l'analyse des terres rares, que l'existence de spectres de distribution pratiquement plats est une référence caractéristique du milieu continental [8]. La nature des smectites de type beidellite ferrifère à partir du Crétacé supérieur [23] et des palygorskites éocènes à précurseur détritique alumino-silicaté [4] va dans le même sens.

C'est dire qu'une grande partie des minéraux argileux répertoriés sont des argiles terrigènes qui conservent la mémoire de leur origine continentale. À ce titre, on peut considérer que ces minéraux « détritiques » reflètent les influences combinées de la lithologie et du climat régnant sur les zones sources, mais également de la stabilité ou de l'instabilité tectonique de ces zones continentales, tout en étant tributaires des variations du niveau marin lors de leur dépôt.

Ainsi, l'illite témoigne de processus hydrolytiques modérés et de l'érosion directe de la roche mère (en général, substrats cristallins) sous des conditions climatiques tempérées à tempérées froides et/ou d'altitude dans l'arrière-pays, mais aussi d'une instabilité tectonique, avec rajeunissement du relief et abaissement du niveau marin. Il en est de même pour les interstratifiés et la chlorite. Mais les zones très arides

peuvent également alimenter les sédiments en illite et en chlorite directement issues des roches mères.

En régime de calme tectonique, les couvertures d'altération peuvent se développer. Alors, les kaolinites marines sont considérées, dans la plupart des cas, comme dérivant de sols intertropicaux et les smectites marines comme le reflet de conditions climatiques intermédiaires entre le climat froid et sec et le climat chaud et humide, règne des sols vertisoliques. Quant à la palygorskite détritique, son origine est à rechercher dans les encroûtements calcaires nés sous climat très aride.

Certaines argiles répertoriées ne sont pas le fruit d'un héritage à partir des masses continentales adjacentes. En effet, la palygorskite triasique de la plateforme saharienne est considérée comme authigénique et la chlorite triasique de la zone des nappes comme diagénétique [22]. Quant à l'halloysite serravalienne de la zone des nappes, les valeurs très faibles des terres rares par rapport à l'encaissement en confirment l'origine hydrothermale [22].

C'est l'ensemble des minéraux hérités et des minéraux d'origine autochtone qui enregistrent alors l'histoire géodynamique des bassins.

7. Conclusions

1. Destinée à l'établissement d'une charte des argiles de Tunisie, la répartition des minéraux argileux a été étudiée, à grande échelle, dans le temps et dans l'espace, à travers les bassins sédimentaires tunisiens s'étalant du Permien au Néogène, depuis la plateforme saharienne, au sud, jusqu'au domaine atlasique, au nord; elle montre que la composition minéralogique des sédiments comporte une forte composante de minéraux argileux terrigènes en d'autres termes hérités des terres émergées avoisinantes, remodelée par l'histoire géodynamique des bassins [24]. Cette étude, bien que régionale, s'inscrit dans l'histoire générale de la Téthys, en donnant une intégrale des phénomènes ou des tendances, que l'analyse des coupes détaillées permet de préciser [6,7], et qui vérifient les assertions de Chamley [14,16,19].

2. Il peut être admis [6,14] que le mélange illite, interstratifiés, chlorite reflète plutôt un paléoclimat frais et humide dans les zones sources et représente un ensemble de minéraux peu altérés et directement rema-

niés des substrats rocheux, en période de tectonique active [15].

3. La palygorskite est abondante dans les sédiments paléogènes qui recouvrent le bouclier africain. Sa présence confirme le caractère péri-marin, voire continental des dépôts, comme on a pu le démontrer en Tunisie centrale [33] et centro-méridionale [25]. La palygorskite constitue aussi un marqueur de climat chaud et aride sur les masses continentales [7,29] et un indicateur de mouvements compressifs.

4. Les smectites sont présentes et souvent abondantes, lors des périodes de haut niveau marin, du Jurassique au Paléogène, comme Chamley et al. [17] l'ont décrit dans les océans téthysien et atlantique. Elles sont aussi le reflet de conditions climatiques chaudes et sèches dans les couvertures d'altération des zones sources.

5. Il est encore difficile de bien cerner la part respective qui revient aux effets de la déstabilisation tectonique, de l'eustatisme et du climat pour expliquer la composition et la distribution argileuse de la colonne sédimentaire. Il est, en tout cas, certain que celle-ci est la résultante des interactions entre ces trois types d'influences.

Remerciements

Nos remerciements vont à H. Chamley, qui nous a permis d'améliorer notre texte, grâce à des critiques très pertinentes.

Références

- [1] M. Bédir, Mécanismes géodynamiques des bassins associés aux couloirs de coulissement de la marge Atlasique de la Tunisie. Séismo-stratigraphie, séismo-tectonique et implications pétrolières, thèse d'État, faculté des sciences de Tunis, université Tunis-2, 1995, 407 p.
- [2] M. Bédir, N. Boukadi, S. Tlig, F. Ben Timzal, L. Zitouni, R. Alouani, F. Slimane, C. Bobier, F. Zargouni, Subsurface Mesozoic basins in the central Atlas of Tunisia: tectonics, sequence deposit distribution and hydrocarbon potential, A.A.P.G. Bull. 85 (5) (2001) 885–907.
- [3] M. Bédir, M. Soussi, C. Abbès, Paleozoic to Cenozoic crustal to basin structuring of the Tunisian North African Margin. African continental margins of the Mediterranean Sea, in: CIESM Workshop, Djerba, Tunisie, 2000, pp. 13–15.
- [4] A. Ben Aboud, A. Lopez-Galindo, P. Fenoll, F. Jamoussi, M. Bédir, S. Abdeljaouad, M. Setti, Mineralogy and geochemistry of some Tunisian palygorskitic outcrops, in: C.J. Stanley, et al. (Eds.), Mineral Deposits: Processes to Processing, Balkema, Rotterdam, 1999, pp. 1073–1075.
- [5] N. Ben Ayed, Évolution tectonique de l'avant-pays de la chaîne alpine de Tunisie du début du Mésozoïque à l'Actuel, thèse d'État, université Paris-Sud, Orsay, 1986, 327 p.
- [6] M.P. Bolle, T. Adatte, Paleocene–Early Eocene climatic evolution in the Tethyan realm: clay mineral evidence, Clay Miner. 56 (2001) 249–261.
- [7] M.P. Bolle, T. Adatte, G. Keller, K. Von Salis, S. Burns, The Paleocene–Eocene transition in the southern Tethys (Tunisia): climatic and environmental fluctuations, Bull. Soc. géol. France 170 (1999) 661–680.
- [8] C. Bonnot-Courtois, Géochimie des terres rares dans les principaux milieux de formation et de sédimentation des argiles, thèse d'État, université Paris-Sud, Orsay, 1981, 217 p.
- [9] S. Bouaziz, Étude de la tectonique cassante dans la plate-forme et l'Atlas saharien (Tunisie méridionale) : évolution des paléochamps de contraintes et implications géodynamiques, thèse d'État, faculté des sciences de Tunis, université Tunis-2, Tunis, 1995, 485 p.
- [10] N. Boukadi, Structuration de l'Atlas de Tunisie : signification géométrique et cinématique des nœuds et des zones d'interférences structurales au contact de grands couloirs tectoniques, thèse d'État, faculté des sciences de Tunis, université Tunis-2, 1994, 252 p.
- [11] P.-F. Buroillet, Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie Centrale, in: Ann. Min. Géol. Tunis, n° 18, 1956, p. 350, 93 fig., 93 pl.
- [12] P.-F. Buroillet, G. Busson, Plate-forme et bassins, danger d'un actualisme exagéré, in: Mém. CFP, Paris, 1983.
- [13] G. Busson, Le Mésozoïque saharien. 1^{re} partie : Extrême-Sud tunisien, in: Série géologique, Vol. 8, CNRS, Paris, 1967, pp. 1–194.
- [14] H. Chamley, Clay Sedimentology, Springer Verlag, Heidelberg, 1989, 623 p.
- [15] H. Chamley, Clay mineral sedimentation in the Ocean, in: H. Paquet, N. Clauer (Eds.), Soils and Sediments, Mineralogy and Geochemistry, Springer, Heidelberg, 1997, pp. 269–302, chapter 13.
- [16] H. Chamley, J.-F. Deconinck, Expression de l'évolution géodynamique des domaines nord-atlantique et subalpin au Mésozoïque supérieur, d'après les successions sédimentaires argileuses, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 300 (1985) 1007–1012.
- [17] H. Chamley, J.-F. Deconinck, G. Millot, Sur l'abondance des minéraux smectitiques dans les sédiments marins communs, déposés lors des périodes de haut niveau marin du Jurassique supérieur au Paléogène, C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II 311 (1990) 1529–1536.
- [18] N. Crampon, L'Extrême-Nord tunisien. Aperçu stratigraphique, pétrologique et structural, in: Ann. Min. Géol. Tunis, Vol. 26, 1973, pp. 49–85.
- [19] J.-F. Deconinck, B. Beaudoin, H. Chamley, P. Joseph, J.-F. Raoult, Contrôles tectonique, eustatique et climatique de la sédimentation argileuse du domaine subalpin français au Malm-Crétacé, Rev. Géol. Dynam. Géogr. Phys. 26 (5) (1985) 311–320.
- [20] L.A. Frakes, Climates throughout Geologic Time, Elsevier, Amsterdam, 1979, 310 p.

- [21] B.U. Haq, J. Hardenbol, J.R. Vail, Chronology of fluctuating sea level since the Triassic, *Science* 235 (1987) 1156–1167.
- [22] F. Jamoussi, Les argiles de Tunisie : étude minéralogique, géochimique, géotechnique et utilisations industrielles, thèse d'État, faculté des sciences de Tunis, université Tunis-El-Manar, 2001, 437 p.
- [23] F. Jamoussi, E. Srasra, Mineralogy, geochemistry of smectitic clays of Gafsa area (South of Tunisia) and their industrial applications, *Miner. Petrogr. Acta* 45-A (1992) 135–145.
- [24] F. Jamoussi, M. Bedir, N. Boukadi, F. Zargouni, S. Tlig, Signature minéralogique des événements géodynamiques associés au bassin de décrochement de Gafsa, Tunisie méridionale, *Afr. Geosci. Rev.* 5 (3) (1998) 287–295.
- [25] F. Jamoussi, C. Abbès, E. Fakhfakh, M. Bédir, S. Kharbachi, M. Soussi, F. Zargouni, A. Lopez-Galindo, Découverte de l'Éocène continental autour de l'archipel de Kasserine, aux Jebels Rhéouis, Boudinar et Chamsi en Tunisie centro-méridionale : implications paléogéographiques, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIa* 333 (2001) 329–335.
- [26] A. M'Rabet, Stratigraphie, sédimentation et diagenèse carbonatée des séries du Crétacé inférieur de Tunisie centrale, in : *Ann. Min. Géol. Tunis*, Vol. 30, 1987, pp. 1–412.
- [27] C. Mahersi, Dynamique de dépôt du flysch Numidien de Tunisie (Oligo-Miocène), thèse École des mines, Paris, 1991, 228 p.
- [28] L. Memmi, I. Burollet, P.-F. Viterbo, Lexique stratigraphique de la Tunisie. Première partie : Précambrien et Paléozoïque, in : *Note du Service géologique de Tunisie*, n° 53, 1986, p. 63.
- [29] G. Millot, *Géologie des argiles*, Masson, Paris, 1964, 499 p.
- [30] H. Paquet, Évolution des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons alternées, *Sci. Géol. Mém.*, Strasbourg 30 (1970) 210.
- [31] V. Perthuisot, Dynamique et pétrogenèse des extrusions triasiques en Tunisie septentrionale, thèse d'État, Trav. Lab. Géol. (École normale supérieure), Paris, 1978, 312 p.
- [32] H. Rouvier, Géologie de l'Extrême-Nord tunisien : tectonique et paléogéographie superposées à l'extrémité orientale de la Chaîne nord-maghrébine, in : *Ann. Min. Géol. Tunisie*, Vol. 2, 1985, p. 427.
- [33] S. Sassi, J.M. Triat, G. Truc, G. Millot, Découverte de l'Éocène continental en Tunisie centrale : la formation du Jebel Chambi et ses encroûtements carbonatés, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 299 (1984) 357–364.
- [34] M. Solignac, Étude géologique de la Tunisie septentrionale, *Dir. Gén. Trav. Publ. (Serv. Min.)*, thèse d'État, Lyon, 1927.
- [35] S. Tlig, L. Er Raoui, L. Ben Aissa, R. Alouani, M.A. Tagorti, Tectonogenèse alpine et atlasique : deux événements distincts de l'histoire géologique de la Tunisie. Corrélation avec des événements clés de la Méditerranée, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. II* 312 (1991) 295–301.
- [36] M.M. Turki, Polycinématique et contrôle sédimentaire associé sur la cicatrice Zaghouan–Nebhana, thèse d'État, université de Tunis, 1985, 252 p.
- [37] P.R. Vail, R.M. Mitchum, S. Thompson, Seismic stratigraphy and global changes of sea level, in : C.F. Payton (Ed.), *Seismic stratigraphy-application to hydrocarbon exploration*, A.A.P.G. Mem. 26 (1977) 83–97.
- [38] F. Zargouni, Tectonique de l'Atlas méridional de Tunisie. Évolution géométrique et cinématique des structures en zone de cisaillement, thèse d'État, université Louis-Pasteur, Strasbourg, 1985, 304 p.
- [39] H. Zouari, Évolution géodynamique de l'Atlas centro-méridional de la Tunisie : stratigraphie, analyse géométrique, cinématique et tectono-sédimentaire, faculté des sciences de Tunis, thèse d'État, université Tunis-2, 1995, 278 p.