

Effets thermique et hydrothermal de la coulée de basalte triasico-liasique sur les argiles du bassin d'Argana (Maroc)

Lahcen Daoudi^{a,*}, Jean-Luc Pot de Vin^b

^a Département de géologie, faculté des sciences et techniques, BP 549, Marrakech, Maroc

^b Université des sciences et technologies de Lille, FRE 2255 CNRS « Sédimentologie et géodynamique », FDR 1818 CNRS « Milieux naturels et anthropisés », UFR Sciences de la terre, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

Reçu le 28 mai 2001 ; accepté le 29 janvier 2002

Présenté par Jean Dercourt

Abstract – Thermal and hydrothermal effects of Triassic–Liassic basalt flow deposition on clays (Argana Basin, Morocco). Thermal and hydrothermal effects of Triassic–Liassic basalt flow deposition on sedimentary series of the Argana Basin are responsible for major modifications in detrital clays, until 20 m in depth. It expressed by transformation of detrital smectite to corrensite and moreover to chlorite, and by increasing illite crystallinity. On the 2 m of sediments located immediately under the flow, magnesium-rich hydrothermal fluids have caused precipitation of new mineral phases. *To cite this article: L. Daoudi, J.-L. Pot de Vin, C. R. Geoscience 334 (2002) 463–468.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

clays / basalt / Trias–Lias / thermal effect / Argana Basin / Morocco

Résumé – Les effets thermiques et hydrothermaux liés à la mise en place de la coulée de basalte triasico-liasique du bassin d'Argana sur les argiles de la série sédimentaire sous-jacente s'expriment jusqu'à une profondeur d'environ 20 m. Ils se traduisent par la transformation des smectites détritiques, d'abord en corrensite, puis en chlorite, et par l'amélioration de la cristallinité des illites. Dans la transition basalte–sédiment, sur une épaisseur de 2 m, les fluides émanant du basalte sont à l'origine de la précipitation de nouvelles phases hydrothermales. *Pour citer cet article : L. Daoudi, J.-L. Pot de Vin, C. R. Geoscience 334 (2002) 463–468.* © 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

argiles / basalte / Trias–Lias / effet thermique / bassin d'Argana / Maroc

Abridged version

1. Introduction

The structuration of the Triassic Moroccan margin is mainly controlled by the reactivation of the Hercynian fault [16]. The Argana Basin, located in the western part of High Atlas (western Morocco), represents the classic example for understanding geological events during Triassic stage. It is composed by a very thick detrital sedimentary series, covered by Triassic–Liassic basalt flow deposition [1, 5, 14]. The aim of this paper is to identify the initial clay assemblages of this sedimentary series and to determine the extent of modifications on clays resulting from basalt flow deposition.

2. Results

The studied section is located at Bigoudine area, in the western part of the basin (Fig. 1). Clay assemblage analysed by X-ray diffraction, scanning and transmission electron microscopy, is organised in three mineralogical zones.

– The lower zone presents a relatively constant clay assemblage composed mainly by illite (60 to 75%) and smectite (20 to 25%). Chlorite and irregularly mixed layer illite–smectite represent less than 10 to 20% of clay assemblage. Illite crystallinity is also constant in this zone and is about 0.3 to 0.4° 2 θ .

– In the intermediate zone, chlorite (50 to 90%) is the dominant clay mineral, associated with illite (20 to 35%).

* Correspondance et tirés à part.

Adresse e-mail : daoudi@fstg-marrakech.ac.ma (L. Daoudi).

Illite crystallinity is varied between $0.2^\circ 2\theta$ at the top of the zone, and $0.35^\circ 2\theta$ at the bottom. Global evolution of clay assemblage in this zone shows a decreasing content of chlorite in aid of corrensite, at the bottom.

– The upper zone located immediately under basalt flow is about 1.5 to 2 m thick. Clay assemblage is composed by corrensite (30 to 75%), chlorite (0 to 15%), kaolinite or smectite (10 to 25%) and talc (5 to 40%).

3. Discussion

3.1. Initial clay assemblage significance

The lower zone sedimentary series, the more distant than thermal influence of the basalt flow, is characterised by a constant clay assemblage composed mainly by illite associated with smectite. The same composition is also identified in the detrital red formation of Lower Lias, over the basalt formation. The independence between clay assemblage evolution, on the one hand, and lithological variations and burial depth, on the other one, suggests a palaeogeographical control of the clay sedimentation. In this case, the abundance of illite with an increasing crystallinity (0.3 to $0.4^\circ 2\theta$) expresses a proximal detrital crystalline source, submitted to active erosion [8, 9]. Transmission electron analysis of illites shows a round or irregular outline particles, suggesting a detrital origin (Fig. 2A). This is consistent with sedimentological and tectonical data, showing an important subsidence responsible for the destabilisation of adjacent Palaeozoic reliefs in this period [2, 14, 16]. Smectite probably resulting from surface alteration processes suggests a warm and seasonally contrasted humidity climate [15], as currently admitted in the most part of the palaeoclimatic reconstitution [2, 3].

3.2. Basalt flow influence on detrital clay assemblage

Thermal and geochemical conditions resulting from basalt flow deposition are responsible for change of the mineral equilibrium of several phases. Detrital clay minerals became instable under these new conditions and new hydrothermal phases precipitate from hydrothermal fluid [10].

In the intermediate zone, the clay assemblage evolution is characterised by a gradually decreasing content of tri-octahedral chlorite (90% at the top to 50% at the bottom), in aid of corrensite and moreover of smectite. This mineral sequence reflects a decreasing geothermal gradient toward the bottom of the zone, which is also materialised by increasing illite crystallinity. Detrital smectite initially present in the lower zone sediments became instable under these new thermal conditions and was converted into corrensite and moreover into chlorite [7, 11]. This transformation necessitates magnesium rich-water [12], whose source can be hydrothermal fluids emanating from basalt flows or contemporaneous alteration of basalt fragments by heating interstitial fluids.

In the upper zone, we assist to a total transformation of detrital clays and to the formation of new mineral phases (corrensite, smectite, chlorite, kaolinite and talc). These minerals, characterised by an increasing crystallinity and by an automorphous shapes (Figs. 2B and 2C), evoke a hydrothermal origin [4, 6, 7, 13]. The presence of smectite and kaolinite (low temperature minerals) in this zone suggests a second hydrothermal episode, corresponding to another basalt flow deposition.

4. Conclusion

Triassic–Liassic sedimentary series of Argana Basin present a detrital clay assemblage, composed mainly by illite, associated with smectite. This clay assemblage suggests a deposit under tectonic destabilisation and warm and sub-arid climate. Thermal and geochemical new conditions resulting from basalt flow deposition are responsible for the change of the equilibrium conditions of mineral phases. Detrital clay minerals became instable under these new conditions; the new hydrothermal phases precipitate. At the basalt–sediment transition, hydrothermal fluids emanating from basaltic lavas reactivate dissolution and precipitation processes. Thermal effect of basalt flow on detrital clay minerals expressed until depths of about 20 m.

1. Introduction

La structuration de la marge marocaine au cours du Trias est contrôlée principalement par la réactivation des accidents hercyniens et tardi-hercyniens [16]. Ces structures synsédimentaires extensives se manifestent plus particulièrement dans les bassins triasiques situés le long de la côte atlantique, à l'ouest du Maroc [2, 14]. Le bassin d'Argana représente l'un des bassins clé pour la compréhension des événements géologiques qui se sont produits au cours du Trias. Il est constitué d'une série sédimentaire détritique très épaisse, coiffée d'un complexe de coulées basaltiques d'âge Trias–Lias, qui résulte de la fracturation du bassin en relation avec le début du *rifting* de la

marge marocaine [1, 5, 14]. L'apport de chaleur et d'éléments chimiques consécutif à la mise en place de ce basalte doit être à l'origine de modifications des conditions d'équilibre des constituants de la série sédimentaire sous-jacente. L'objet de cette note est d'identifier le cortège argileux initial de cette série sédimentaire détritique et de déterminer l'ampleur des modifications subies par ces assemblages argileux, à la suite de la mise en place de ce basalte.

2. Résultats minéralogiques

La coupe étudiée se situe dans la région de Bigoudine, sur la bordure occidentale du bassin (Fig. 1).

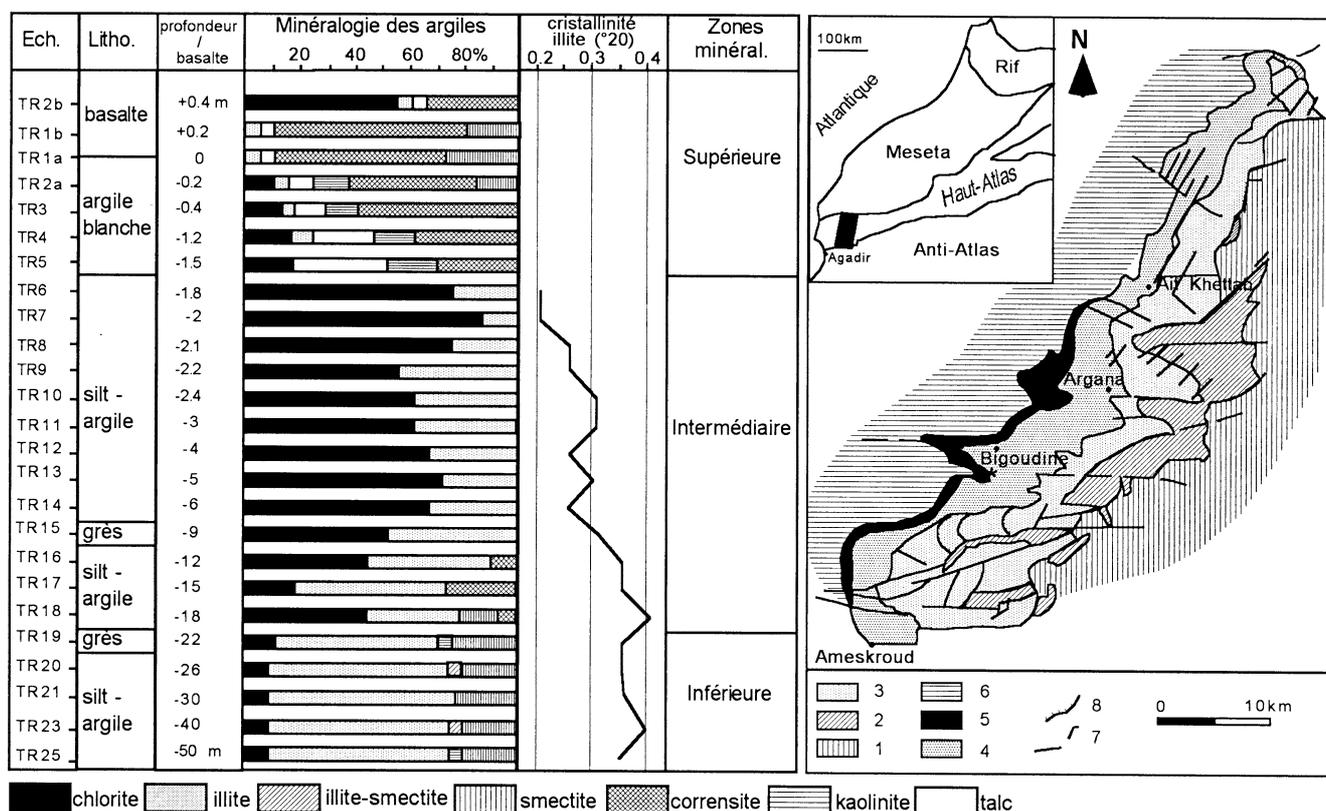


Figure 1. Minéralogie des argiles de la série sous-jacente à la coulée de basalte triasico-liasique. Cadre géographique, géologique et structurale. 1 : Socle paléozoïque ; 2 : formation d'Ikakern ; 3 : formation de Timezgadiouine ; 4 : formation de Bigoudine ; 5 : basalte triasico-liasique ; 6 : Secondaire et Tertiaire ; 7 : faille inverse, 8 : faille normale.

Figure 1. Clay mineralogy of sedimentary series under Triassic–Liassic basalt flow. Location map of the studied area. 1: Palaeozoic basement; 2: Ikakern Formation; 3: Timezgadiouine Formation; 4: Bigoudine Formation, 5: Triassic–Liassic basalt; 6: Mesozoic and Cainozoic; 7: reverse fault; 8: normal fault.

La technique utilisée pour l'identification de la fraction argileuse (inférieure à 2 µm) est la diffraction des rayons X sur pâtes orientées ; certains échantillons ont également fait l'objet d'observations par microscopie électronique à transmission et balayage. Les minéraux argileux rencontrés sont très diversifiés ; les variations des proportions relatives des minéraux argileux permettent d'individualiser trois zones minéralogiques.

1. La zone inférieure est constituée essentiellement de silts et d'argiles, avec des intercalations de quelques niveaux gréseux fins. Elle présente un cortège argileux relativement constant, formé principalement d'illite (60 à 75%) et de smectite (20 à 25%). La chlorite représente 10 à 20% de l'assemblage argileux et les interstratifiées irréguliers illite–smectite apparaissent à l'état de traces. La cristallinité de l'illite, également constante, est de l'ordre de 0,3 à 0,4° 2θ.

2. La zone intermédiaire est de même nature lithologique que la zone précédente. La fraction argileuse est dominée par la chlorite (50 à 90%),

associée à de l'illite (20 à 35%). La chlorite est légèrement gonflante ; la réflexion (001) varie de 14 à 15,4 Å suivant le traitement. L'indice de cristallinité de l'illite varie de 0,2° 2θ, au sommet de la zone, à 0,35° 2θ à la base. L'évolution générale du cortège argileux au sein de cette zone montre une diminution, vers la base, de la teneur en chlorite au profit de la corrensite.

3. La zone supérieure, épaisse de 1,5 à 2 m, se situe immédiatement sous les basaltes. Elle est constituée de silts et d'argilites vert blanchâtre, entrecoupés par des veinules noires. Le cortège argileux, très diversifié, est formé principalement de corrensite (30 à 75%), de chlorite (0 à 15%) de kaolinite ou de smectite (10 à 25%) et de traces d'illite. Les différents minéraux formant ce cortège sont très bien cristallisés, avec des pics de diffraction très étroits. L'analyse diffractométrique a également mis en évidence la présence de talc, caractérisé par une raie stable à 9,3 Å (5 à 40%). La kaolinite est particulièrement concentrée dans des veinules constituées d'argilites noires, intercalées dans cette zone.

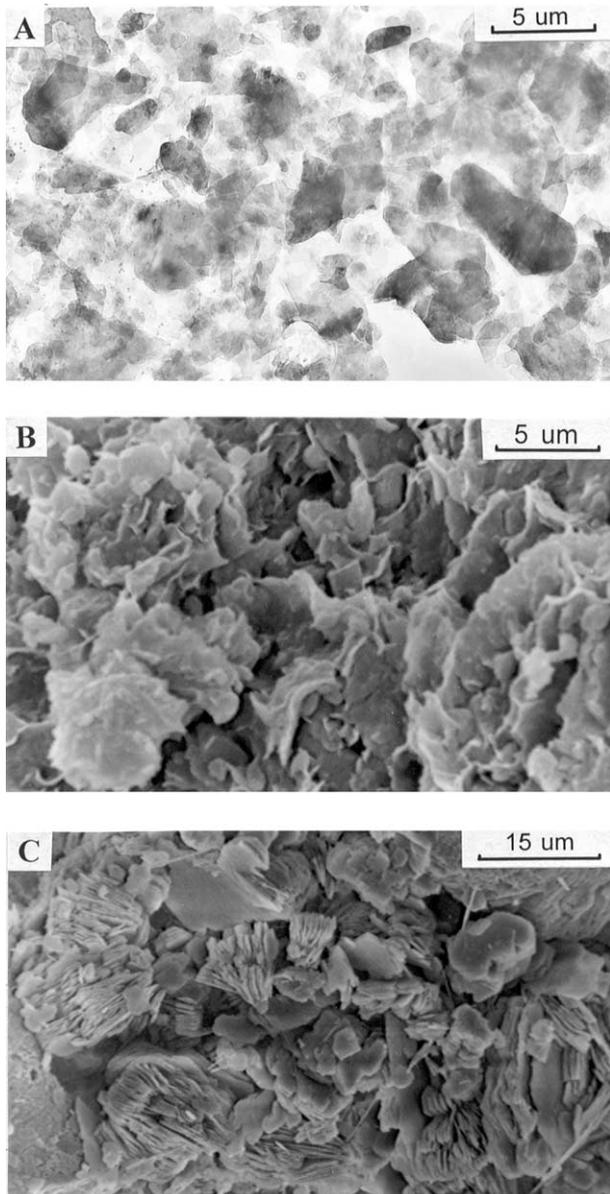


Figure 2. Photo MET d'illite détritique de la zone inférieure (A). Photos MEB de corrensite authigénique de forme pétaoloïde (B) et de kaolinite (concentrée dans des veinules noires) en structure d'accordéons (C) de la zone supérieure.

Figure 2. Transmission electron micrograph of detrital illite in the lower zone (A). SEM micrographs of authigenic corrensite (B) and of concentrated kaolinite in black veinules in the upper zone (C).

3. Discussion

3.1. Signification du cortège argileux détritique

Dans les zones situées loin de l'influence thermique du basalte (zone inférieure), la série sédimentaire présente un cortège argileux relativement constant, constitué principalement d'illite, associée à de la smectite. Ce cortège minéralogique est également identifié dans la série rouge détritique du Lias

inférieur surmontant la coulée de basalte. L'indépendance entre la minéralogie des argiles et la lithologie, d'une part, et la profondeur d'enfouissement, d'autre part, montre que ce cortège caractérise moins des changements intrinsèques du bassin récepteur que des modifications dans l'évolution paléogéographique des marges. De ce fait, l'abondance relativement élevée de l'illite ainsi que sa bonne cristallinité ($0,3$ à $0,4^\circ 2\theta$), reflètent la proximité des massifs cristallins, soumis à l'altération physique, ainsi que l'existence de reliefs continentaux déclinés favorisant une érosion active [8, 9]. L'examen au microscope électronique à transmission montre que les particules d'illite présentent des tailles variées et des contours irréguliers ou arrondis, qui suggèrent une origine détritique (Fig. 2A). Cet assemblage à illite dominante paraît donc marqué par l'héritage de matériaux métamorphiques anté-permiens, activement érodés. Ceci est en accord avec les données sédimentologiques et tectoniques, qui indiquent qu'à cette période la réactivation du réseau d'accidents hercyniens et tardi-hercyniens est à l'origine d'une subsidence importante qui engendre la déstabilisation des bordures du bassin [2, 14, 16]. L'érosion mécanique active qui affecte les massifs paléozoïques voisins entrave ainsi l'établissement des sols et favorise en revanche l'érosion des substrats rocheux à illite. La smectite associée à ces illites présente des raies de diffraction mal définies qui suggèrent la présence de phases mal cristallisées, caractéristiques des processus d'altération de surface. Cet assemblage minéralogique paraît refléter l'établissement d'un climat chaud à forts contrastes saisonniers de l'humidité [15]. Ce fait est d'ailleurs admis dans la plupart des reconstitutions paléoclimatiques [2, 3].

3.2. Influence de la coulée basaltique sur le cortège argileux détritique

La coulée de basaltes triasico-liasiques d'Argana, à structure doléritique et à aspect très altéré, notamment à la base, s'est manifestée dans une sédimentation finement détritique. L'absence de *pillow lavas* et la présence de niveaux gréseux ou oxydés dans les affleurements de ces basaltes indiquent une mise en place en plusieurs étapes, dans des conditions aériennes à sub-aériennes [1]. L'apport de chaleur et d'éléments chimiques, en particulier de magnésium, consécutif à la mise en place de la coulée basaltique a entraîné des changements des conditions d'équilibre des différentes phases. Les minéraux argileux détritiques deviennent instables sous ces nouvelles conditions et de nouvelles phases hydrothermales précipitent à partir de fluides de haute température [10].

Dans la zone intermédiaire, on assiste à une évolution progressive de l'assemblage argileux. Vers la

partie supérieure, la chlorite représente jusqu'à 90% du cortège argileux ; la réflexion (060) située à 1,53 Å suggère une structure trioctaédrique et les rapports de pics (001)/(002) élevés indiquent une chlorite à tendance magnésienne. Vers la base, le cortège argileux est caractérisé par la diminution progressive de la teneur en chlorite au dépens de la corrensite, puis de la smectite. Cette séquence minéralogique reflète un gradient thermique décroissant vers le bas depuis la base de la coulée basaltique, qui est également matérialisé par l'amélioration de la cristallinité de l'illite vers le sommet. La smectite détritique initialement présente dans les sédiments de la zone inférieure devient instable sous les nouvelles conditions thermiques et se transforme en corrensite. Quand les conditions thermiques deviennent plus importantes, la corrensite devient instable à son tour et se transforme en chlorite [7, 11]. Cette transformation nécessite des eaux riches en magnésium, qui favorisent la fixation d'interfoliaires brucitiques dans la structure unitaire de la smectite [12]. Les fluides hydrothermaux émanant de la lave ainsi que de l'altération contemporaine de fragments de basalte par des eaux interstitielles fortement réchauffées constituent vraisemblablement la principale source de magnésium.

Dans la zone supérieure située immédiatement sous les basaltes, on assiste à une transformation totale des argiles détritiques et la formation de nouvelles phases minérales (corrensite, smectite, chlorite, kaolinite et talc). Ces minéraux présentent des pics de diffraction très étroits qui suggèrent la présence de phases bien cristallisées, caractéristiques de processus hydrothermaux. Les diagrammes de poudre des échantillons riches en corrensite indiquent une raie (060) caractéristique des structures trioctaédriques. Au microscope électronique à balayage, les minéraux argileux associés à des cristaux de quartz de formes polygonales, présentent également des formes et des structures automorphes qui suggèrent un caractère authigène des minéraux ; la corrensite se présente sous forme pétaïoïde (Fig. 2B) et la kaolinite en cristaux hexagonaux à sub-hexagonaux empilés les uns sur les autres pour

constituer des structures en accordéons (Fig. 2C). Ces différentes structures caractérisent également des environnements hydrothermaux [4, 6, 7, 13]. Dans les niveaux inférieurs et altérés du basalte, la fraction argileuse est qualitativement identique à celle des sédiments de la zone supérieure (échantillons Tr1b et Tr2b) ; la mise en place de ce cortège argileux dans ces deux types de roche résulterait de la précipitation à partir de solutions hydrothermales. La présence de la smectite et de la kaolinite (minéraux de basse température) dans cette zone suggère que leur formation est postérieure à la mise en place de la première coulée de basalte. Elle est probablement liée à un deuxième épisode hydrothermal, rattaché à la mise en place d'une autre coulée de basalte tholéitique. La formation de la kaolinite résulterait de fortes modifications des conditions de fluides hydrothermaux, qui s'appauvriraient en magnésium.

4. Conclusion

La série sédimentaire triasico-liasique du bassin d'Argana présente un cortège argileux détritique, constitué principalement d'illite associée à de la smectite. Cet assemblage argileux traduit un dépôt sous un climat chaud à humidité saisonnière contrastée, sous un régime rhéxistasique. L'apport de chaleur et d'éléments chimiques, en particulier de magnésium, consécutif à la mise en place de la coulée basaltique, entraîne des changements des conditions d'équilibre des différentes phases. Les minéraux argileux détritiques deviennent instables sous ces nouvelles conditions et de nouvelles phases hydrothermales précipitent à partir de fluides de haute température. Dans la transition basalte-sédiment, l'incurSION tardive des fluides hydrothermaux émanant de la lave réactive les processus de dissolution et de précipitation par des mécanismes métagénétiques. L'effet thermique de la coulée sur les minéraux argileux détritiques s'exprime jusqu'à une profondeur d'environ 20 m sous la transition basalte-sédiments.

Références

[1] E.H. Aït Chayeb, N. Youbi, A. El-Boukhari, M. Bouabdelli, M. Amrhar, Le volcanisme permien et mésozoïque inférieur du bassin d'Argana (Haut Atlas occidental, Maroc) : un magmatisme intraplaque associé à l'ouverture de l'Atlantique central, *J. Afr. Earth Sci.* 26 (1998) 499–519.

[2] J. Beauchamp, Triassic sedimentation and rifting in the High Atlas (Morocco), in: W. Manspeizer (Ed.), *Triassic–Jurassic rifting: continental breakup and the origin of Atlantic Ocean and passive margins*, *Dev. Geotectonics* 22 (1988) 477–493.

[3] N. Benaouiss, Indicateurs d'aridité dans le Trias supérieur du Haut Atlas marocain, in: 2^e réunion du Groupe marocain du Permien et du Trias, Marrakech, 1999, p. 4.

[4] M.F. Brigatti, L. Poppi, Crystal chemistry of corrensite: a review, *Clays Clay Miner.* 32 (1984) 391–399.

[5] R.H. Brown, Triassic rocks of Argana Valley, Southern Morocco, and their regional structural implication, *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 64 (1980) 988–1003.

[6] M. Buatier, A.-M. Karpoff, M. Boni, G. Fruh-Green, J. McKenzie, Mineralogic and petrographic records of sediment-fluid interaction in the sedimentary sequence at Middle valley, Juan De Fuca ridge, Leg. 139, *Proc. Ocean Drilling Program* 139 (1994) 133–154.

- [7] H. Chamley, *Clay Sedimentology*, Springer Verlag, 1989.
- [8] H. Chamley, P. Debrabant, Héritage des minéraux métamorphiques et diagenèse dans le Mésozoïque inférieur de la marge atlantique du Maroc, C. R. Acad. Sci. Paris, série II 296 (1983) 651–656.
- [9] L. Daoudi, Contrôles diagénétiques et paléogéographiques des argiles des sédiments mésozoïques du Maroc. Comparaison avec les domaines atlantique et téthysien, thèse d'État, Fac. Sci. Marrakech, 1996.
- [10] L. Daoudi, J.-F. Deconinck, M. Portugal-Ferreira, Mise en évidence de l'influence thermique et hydrothermale de la coulée basaltique du Trias sur les argiles du bassin d'Argana (Haut Atlas occidental), in : Réunion spécialisée ASF–SGF, « Argiles : sédimentologie, diagenèse, environnement », 1998, p. 23.
- [11] A. Inoue, Conversion of smectite to chlorite by hydrothermal and diagenetic alterations, Hokuroku Kuroko mineralization area, North-East Japan, in : Proc. Int. Clay Conf., Denver, 1987, pp. 158–164.
- [12] A. Inoue, M. Utada, Smectite to chlorite transformation in thermally metamorphosed volcanoclastic rocks in the Kamikita area, Northern Honshu, Japan, *Am. Mineral.* 76 (1991) 628–640.
- [13] X. Lindqvist, Y. Harle, Corrensite of hydrothermal origin from Veitsivaara, Eastern Finland, *Clays Clay Miner.* 39 (1991) 219–323.
- [14] F. Medina, Superimposed extensional tectonics in the Argana Triassic formations (Morocco), related to the Early rifting of the Central Atlantic, *Geol. Mag.* 128 (1991) 525–536.
- [15] H. Paquet, Évolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées, *Mém. Serv. Carte Géol. Alsace–Lorraine*, Vol. 30, 1970, 210 p.
- [16] A. Piqué, E. Laville, Les séries triasiques du Maroc, marqueurs du *rifting* atlantique, C. R. Acad. Sci. Paris, série II 317 (1993) 1215–1220.