



## **Caractérisation calcimétrique et sédimentométrique des dépôts argileux du bassin néogène de Boudinar (Rif nord-oriental, Maroc) : implication sur l'évolution eustatique et hydrodynamique du bassin et intérêt économique**

### **Calcimetric and sedimentometric characterization of clay deposits in the Neogene Boudinar basin (North Eastern Rif, Morocco): implication on the eustatic and hydrodynamic evolution of the basin and economic interest**

**H. Nasri<sup>1</sup>, K. Elhammouti<sup>1</sup>, A. Azdimoussa<sup>1,2</sup>, M. Achalhi<sup>1</sup>, S. Bengamra<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> *Laboratoire des Géosciences Appliquées, Faculté des Sciences, Université Mohammed 1er, Oujda, Maroc.*

<sup>2</sup> *Faculté Pluridisciplinaire de Nador, Université Mohammed 1er, Oujda, Maroc.*

<sup>3</sup> *Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Al Hoceima, Université Mohammed 1er, Oujda, Maroc.*

*Received 13 Jun 2015, Revised 24 Aug 2015, Accepted 25 Aug 2015*

*\*Corresponding Author. E-mail: [hicham.nasri.eps@gmail.com](mailto:hicham.nasri.eps@gmail.com); Tel: (+212674020121).*

#### **Abstract**

The sedimentological study of Messinian and Pliocene clays of Boudinar basin allowed us to determine the calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>) rate of the analyzed samples through two methods: Titration calcimetry and Bernard calcimeter. Although, the clay, silt and sand proportions have been highlighted in the same samples by sedimentometry. The calcimetry results show a concordance between the two methods. Indeed, they allowed to qualify these clay deposits. Thus, the calcium carbonate rate varies from 9% to 27.5%, furthermore, This variation can be correlated to the sea level fluctuations recorded in the basin during the Messinian and Pliocene [1]. So, the sediment calcimetry is not only an analytical approach to establish the quality of clays in order to highlight their economic interests, but also a way to track environmental and eustatic changes in the sedimentary basins. For its part, the sedimentometry allowed to classify the Messinian and Pliocene deposits of Boudinar Basin. So, according to the Shepard system [2], the Messinian samples are silty clay generally exceeding 60% of clay. Although, the Pliocene samples correspond to sandy-clayey silt with clay rate varies between 25% and 36%. However, silt rate varies from 35% to 47%. The sands rates vary inversely with clay rates. Indeed, they do not exceed 4% in the Messinian samples while they range from 20% to 27.27% in the Pliocene samples. The Flemming system [3] classifies the Messinian sediment in silty clays. Nevertheless, the Pliocene starts with clayey slightly sandy muds which become silty slightly sandy muds. The series ends with Pliocene silty sandy muds. This approach informed us about hydrodynamic evolution of the deposit environment. The calcimetry results represent a first valuation of clays while the sedimentometry results have more qualified these clay deposits and also provided clarification over eustatic and hydrodynamic evolution of basin.

**Keywords:** clay, calcimetry, sedimentometry, Neogene, Boudinar, North Eastern Rif, Morocco.

#### **Résumé**

L'étude sédimentologique des argiles du Messinien et du Pliocène du bassin de Boudinar nous a permis de déterminer le taux de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>) dans les échantillons analysés par le biais de deux méthodes : la calcimétrie par titrage et le calcimètre de Bernard. Quant aux proportions d'argile, de limon et de sable, elles ont été mises en évidence par sédimentométrie. Les résultats de la calcimétrie présentent une

concordance entre les deux méthodes. Ils ont permis de qualifier ces dépôts argileux. Ainsi, le taux de carbonate de calcium varie entre 9% et 27,5%. Cette étude nous a montré aussi que les variations de ce taux est fonction des fluctuations du niveau marin enregistrées dans le bassin au cours du Messinien et du Pliocène [1]. L'analyse calcimétrique des sédiments s'avère donc une démarche analytique non seulement pour valoriser la qualité des argiles et leurs intérêts économiques, mais aussi un moyen pour retracer les changements eustatiques et environnementaux dans les bassins sédimentaires. De son côté, la sédimentométrie a permis de classer les sédiments messiniens et pliocènes du bassin de Boudinar. Selon le système de Shepard [2], les échantillons du Messinien sont des argiles limoneuses avec des taux d'argiles dépassant généralement 60%. Pour les échantillons d'âge pliocène, ils correspondent à des limons argilo-sableux avec des teneurs d'argiles comprises entre 25% et 36%. Cependant, le taux de limon varie entre 35% et 47%. Quant aux taux de sables, ils varient inversement aux taux d'argiles. Ils ne dépassent pas 4% dans les échantillons messiniens alors qu'ils sont compris entre 20% et 27,27% dans les échantillons pliocènes. Le système de Flemming [3] classe les sédiments messiniens dans la catégorie des argiles limoneuses. Néanmoins, le pliocène commence avec des vases argileuses peu sableuses qui deviennent des vases limoneuses peu sableuses. La série pliocène se termine par des vases limono-sableuses. L'analyse sédimentométrique a permis ainsi de renseigner sur l'évolution hydrodynamique du milieu de dépôt. Les résultats de la calcimétrie ont abouti à une première valorisation des argiles tandis que les résultats de la sédimentométrie ont qualifié davantage ces dépôts argileux et ont aussi apporté des précisions sur l'évolution eustatique et hydrodynamique du bassin.

*Mots clés* : Argile, Calcimétrie, Sédimentométrie, Néogène, Bassin de Boudinar, Rif nord-oriental, Maroc.

## 1. Introduction

Le bassin sédimentaire de Boudinar est connu, comme ses voisins du secteur du Rif nord-oriental, par des remplissages marneux et argileux d'âge néogène. Ce type de dépôts présente un intérêt industriel et environnemental d'une grande importance [4-8].

Afin de valoriser ces sédiments, on a mené une approche de quantification de la fraction argileuse par l'application de certaines techniques analytiques telles que : la calcimétrie par titrage et par le calcimètre de Bernard. Ces deux méthodes, utilisées par plusieurs chercheurs [9-12], nous ont permis de déterminer le taux de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) dans chaque formation géologique. Quant à la sédimentométrie, méthode décrite par Kindermans [13], couplée à la granulométrie en utilisant les tamis 2 et 0,08 mm, elle nous a permis de décrypter les proportions d'argile, de limon et de sable dans les sédiments étudiés.

La détermination du taux de  $\text{CaCO}_3$  a permis d'une façon directe, de quantifier la fraction chimique carbonatée contenue dans ce type de sédiments. Par conséquent, elle mène à les qualifier et les classer soit dans les argiles ou dans les marnes [14]. Tandis que la quantification des fractions détritiques fines qualifie davantage ces dépôts. En effet, elle les classe selon un système qui se base sur un diagramme ternaire sable-limon-argile [2, 3].

## 2. Cadre géologique

Le bassin de Boudinar est situé dans le Rif nord-oriental du Maroc, sur les bordures méridionales de la mer d'Alboran. Il présente une forme triangulaire d'une superficie d'environ 215 km<sup>2</sup>. Il s'ouvre, dans sa partie nord, sur la mer d'Alboran (Méditerranée occidentale). Son arête orientale est matérialisée par la faille décrochante senestre de Nekor orientée NE-SO. Cette dernière sépare le bassin du massif métamorphique mesorifain des Tamsamane [15-17]. Son arête Ouest est un accident tectonique dextre-normal de direction NNW-SSE, qui le sépare, dans sa partie Nord-Ouest du volcanisme néogène de Ras Tarf [1, 18] et vers le sud de l'unité intrarifaine de Kétama (figure 1 et 2).

Le bassin s'est installé au Néogène, plus précisément au Tortonien inférieur [18] sur les terrains créacés des unités de Kétama et des Tamsamane (Rif externe) [1]. Il se caractérise par ses dépôts néogènes post-nappes de nature marneuse-argileuse.

Une stratigraphie complète du Néogène de Boudinar a été établie suite aux études de Guillemain et Houzay [18], Azdimouza et al. [1], mais aussi par des études plus antérieures par Marçais et Lecointre [18]. La série stratigraphique commence par le Tortonien terminal, conglomératique à la base, et marneux dans le reste

jusqu'à la limite Tortono-Messinienne. Elle se poursuit par le Messinien transgressif. Sa base est représentée par un conglomérat marin surmonté d'un niveau de grès marneux, puis des marnes à passées cinéritiques et diatomitiques sur des épaisseurs plus importantes et variables qui peuvent atteindre 150 m au centre du bassin [1]. La fin du Messinien, régressive, est représentée par des marnes sableuses d'épaisseur plus faible. Ces dernières persistent pendant le Pliocène mais avec une séquence transgressive jusqu'à la fin de cette période où une régression fini-Pliocène se met en place (figure 9). Il faut signaler que la sédimentation évaporitique qui marque la crise de salinité messinienne dans la région est absente dans le bassin [1, 20-22].

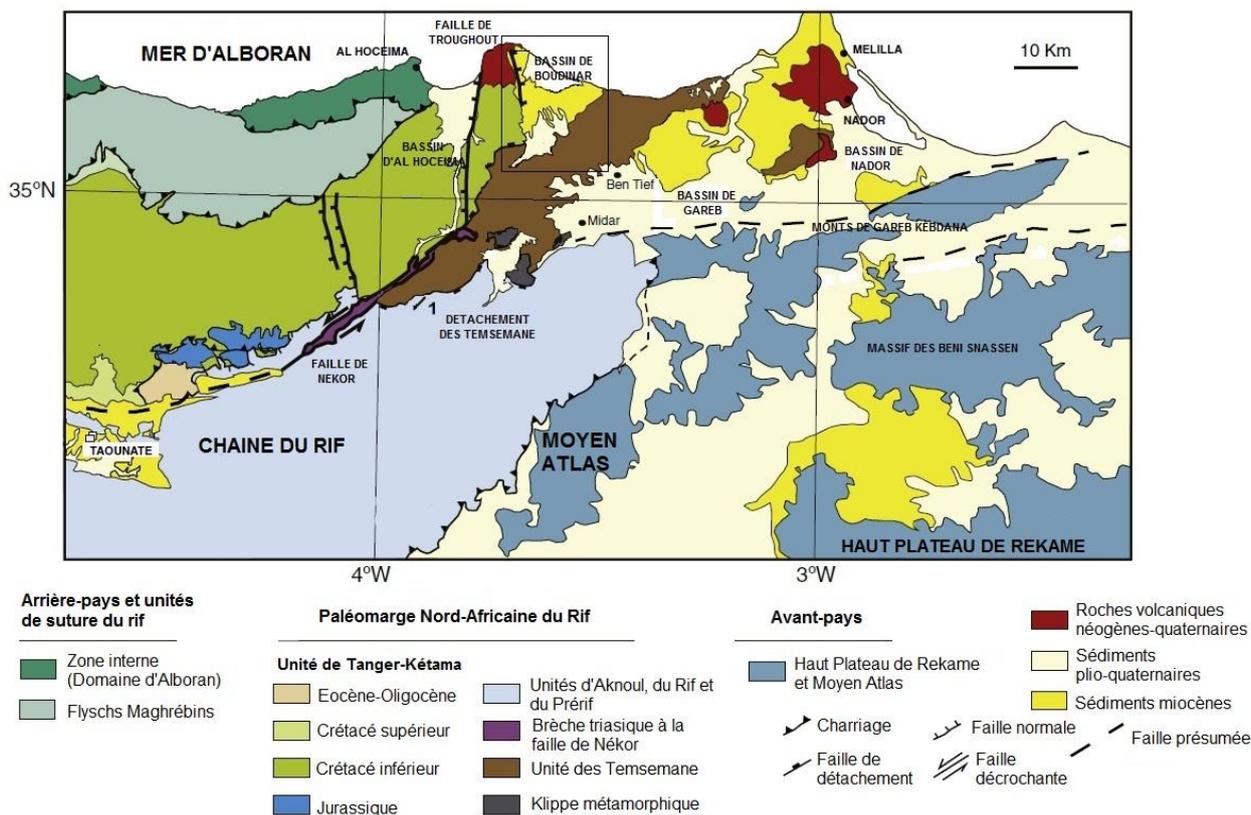


Figure 1. Position du secteur d'étude dans le schéma structural du Rif nord-oriental (Maroc) [19], modifiée.

### 3. Méthodologie

L'échantillonnage a été réalisé dans les formations messiniennes et pliocènes du bassin de Boudinar. Sept échantillons de nature marneuse-argileuse ont été prélevés. Trois dans le Messinien (Ira 13-10, Ira 13-2 et Ira 13-3) et quatre dans le Pliocène (Ira 13-5, Ira 13-6, Ira 13-8 et Ira 13-7). Les points d'échantillonnage sont présentés dans le schéma structural de la région (figure 2) qui a été réalisé sur la base des cartes géologiques d'Al Hoceima [23], de Boudinar [17] et de Kebdani [24]. Les mêmes échantillons sont représentés dans la figure 3 selon la dimension temps.

#### 3.1. Calcimétrie

Le taux de (CaCO<sub>3</sub>) a été déterminé en utilisant deux méthodes calcimétriques différentes : la calcimétrie par titrage et le calcimètre de Bernard. Généralement, le principe consiste en une attaque des roches par de l'acide chlorhydrique (HCl) de concentration relativement élevée selon la réaction suivante :



La mesure du volume d'HCl qui a réagi avec tout le carbonate de calcium contenu dans la roche permet de calculer sa masse, c'est le principe de la calcimétrie par titrage. La mesure du volume de CO<sub>2</sub> dégagé permet aussi de calculer cette masse, c'est le principe de la méthode du calcimètre de Bernard.

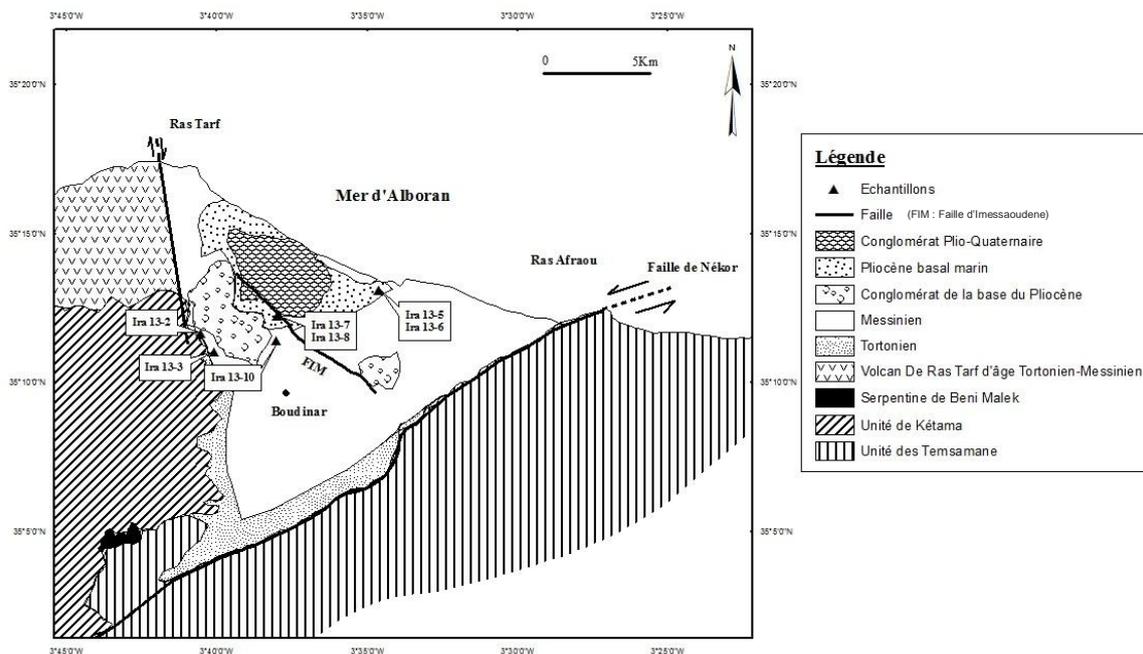


Figure 2. Schéma structural de la région du bassin de Boudinar avec les différents points d'échantillonnage.

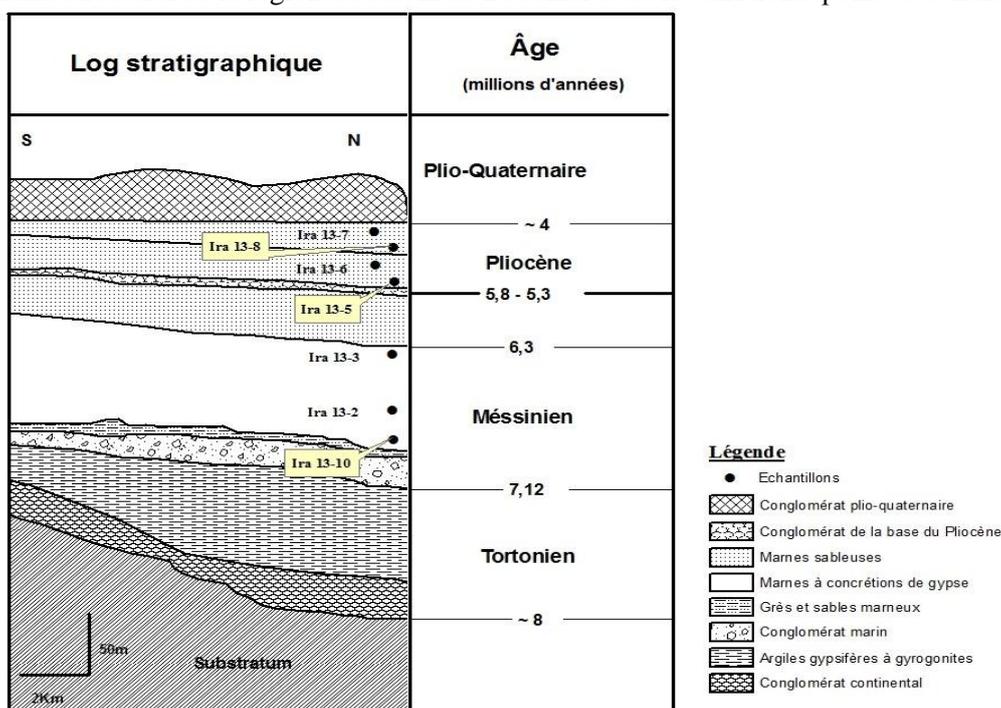


Figure 3. Log stratigraphique synthétique du bassin de Boudinar [1], modifié, montrant la localisation des points d'échantillonnage.

### 1.1.1. Calcimétrie par titrage

Cette méthode se base sur la mesure du volume d'HCl qui a réagi avec tout le carbonate de calcium suivant la réaction (1). On prend une prise d'essai d'un gramme d'échantillon, cette quantité contient une masse  $m_{CaCO_3}$  inférieure ou égale à 1g de carbonate de calcium dont le taux est :

$$P = \frac{100 \cdot m_{CaCO_3}}{1g} \quad (2)$$

On met cette prise d'essai dans un petit bécher, on verse 20 ml d'HCl de concentration  $N_{HCl} = 1\text{mol/l}$ . Cette quantité d'acide suffit pour décarbonater 1 gramme de  $CaCO_3$ . Puis on agite soigneusement la solution et on laisse jusqu'à la fin de la réaction. On filtre la solution dans un erlenmeyer à vide. On ajoute quelques

gouttelettes de Bleu de Bromotymol (BBT) (indicateur coloré dont la zone de virage est pH = 7). La solution devient orange indiquant un milieu acide. On fait un titrage avec une solution basique d'hydroxyde de potassium (KOH) d'une même concentration  $N = 1 \text{ mol/l}$ . Cette dernière réagit avec l'HCl restant de la réaction (1) selon la réaction :



Tant que la solution de la réaction (3) contient encore de l'HCl, elle reste orange. Quand la couleur devient verte, elle indique que le milieu est devenu neutre et par conséquent la totalité d'HCl restant a réagi avec toute la quantité de la base KOH ajoutée. A ce moment, on note le volume de la base :  $V_{eq}$ . La couleur de la solution ne doit pas atteindre le bleu qui indique un milieu basique, sinon la lecture sera erronée.

Le volume d'HCl ( $V_{HCl}$ ) recherché, c'est-à-dire qui a réagi avec tout le carbonate de calcium contenu dans la roche est donc :

$$V_{HCl} = 20\text{ml} - V_{eq} \quad (4)$$

La masse de carbonate de calcium est alors calculée, à partir de la réaction (1), par l'équation :

$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{V_{HCl} N_{HCl} M_{\text{CaCO}_3}}{2} \quad (5)$$

Avec  $N_{HCl}$  : la concentration d'HCl (= 1mol/l), et  $M_{\text{CaCO}_3}$  : la masse molaire du carbonate de calcium (=100,086g/mol).

Finalement, le pourcentage de carbonate de calcium contenu dans la roche est calculé par la formule (2).

### 1.1.2. Calcimètre de Bernard

La deuxième méthode calcimétrique utilise le calcimètre de Bernard selon la norme française NF P 94-048 [14]. Son principe se base sur la mesure du volume  $V_b$  de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dégagé par une masse  $m$  d'échantillon sous l'action d'acide chlorhydrique en excès suivant la réaction (1) citée ci-dessus. Cette mesure se fait par un appareillage dit calcimètre de Bernard.

La masse  $m$  de la prise d'essai du matériau sec se base sur les résultats de l'évaluation préalable du taux de  $\text{CaCO}_3$  par la méthode de la calcimétrie par titrage (tableau 1).

**Tableau 1.** Masse d'une prise d'essai (méthode du calcimètre) en fonction de la teneur présumée en carbonate [14].

Teneur en carbonate présumée (%)	< 4	4 à 9	10 à 19	20 à 39	40 à 79	≥80
Masse de la prise d'essai de matériau sec (g)	10	5	2,5	1	0,5	0,25

Le calcul du pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  se fait en se référant à un essai témoin avec une masse  $m_t$  (= 0,25g) de  $\text{CaCO}_3$  pur qui dégage un volume  $V_t$  de  $\text{CO}_2$  après réaction avec de l'HCl en excès.

La teneur en  $\text{CaCO}_3$  est calculée par la formule :

$$P = \frac{m_t}{m} \frac{V_b}{V_t} \frac{(\theta_t + 273)}{(\theta_b + 273)} \quad (6)$$

Avec  $\theta_b$  et  $\theta_t$  : les températures de la salle d'essai, respectivement, lors de l'essai sur le matériau et lors de l'essai sur le carbonate de calcium pur, exprimées en degré Celsius.

### 3.2. Sédimentométrie

En principe, la sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage pour les fractions inférieures à 80 $\mu\text{m}$ . En effet, dans notre étude, la technique a été couplée à la granulométrie par tamisage sous l'eau en utilisant les tamis : 2 et 0,08 mm. Elle a pour objet la détermination des taux de sable, de limon et d'argile. La sédimentométrie se base sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse limite de sédimentation en fonction du diamètre (D) d'une particule solide de masse spécifique  $\gamma_s$  dans un liquide de masse spécifique  $\gamma_l$  et de viscosité  $\eta$  [13].

$$v = g \frac{\gamma_s - \gamma_l}{18\eta} D^2 \quad (7)$$

Plusieurs autres techniques sont utilisées pour déterminer les proportions des différentes fractions granulométriques fines telles que la méthode de la pipette, le tube de sédimentation, le granulomètre laser et la sédimentation aux rayons X [25]. En effet, la sédimentométrie présente des résultats compatibles avec ceux de la granulométrie par la pipette de Robinson et par le granulomètre aux Rayons X [26-28].

On a effectué l'essai de la sédimentométrie sur les mêmes échantillons du bassin de Boudinar, en utilisant la norme française NF P 49-057 [29], après décarbonatation. Cette dernière consiste à une attaque totale des carbonates contenus dans chaque échantillon par une quantité suffisante d'acide chlorhydrique à 7%.

## 4. Résultats

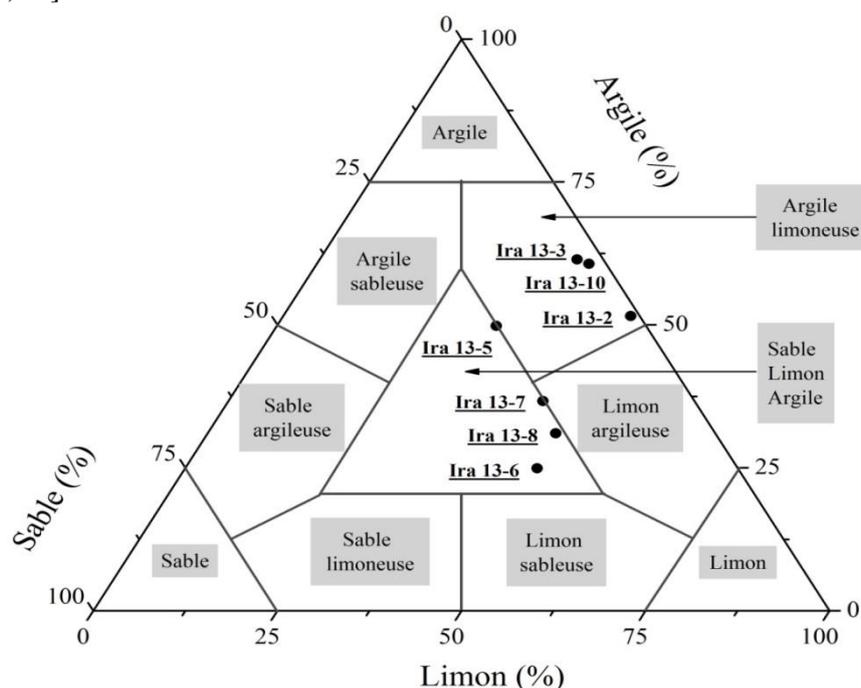
### 4.1. Sédimentométrie

L'étude granulométrique du détrit des échantillons d'âge Messinien et Pliocène du bassin de Boudinar, dépourvus de CaCO<sub>3</sub>, a permis de déterminer les taux des fractions : sable, limon et argile (tableau 2).

**Tableau 2.** Résultats de la sédimentométrie des échantillons messiniens et pliocènes de Boudinar.

Echantillons	Age	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)
Ira 13-7	Pliocène	20,61	42,73	36,66
Ira 13-8		21,68	47,28	31,04
Ira 13-6		27,27	47,81	24,92
Ira 13-5		20,35	29,82	49,83
Ira 13-3	Messinien	03,57	35,00	61,43
Ira 13-2		01,24	47,22	51,54
Ira 13-10		02,34	37,00	60,66

La représentation de ces résultats dans le diagramme ternaire sable-limon-argile a permis de les classer selon le système de classification de Shepard [2] en utilisant le programme informatique SEDPLOT [30] (figure 4). Ce système est utilisé dans les interprétations des analyses granulométriques en sédimentologie, en géologie et en géomorphologie [25, 31].

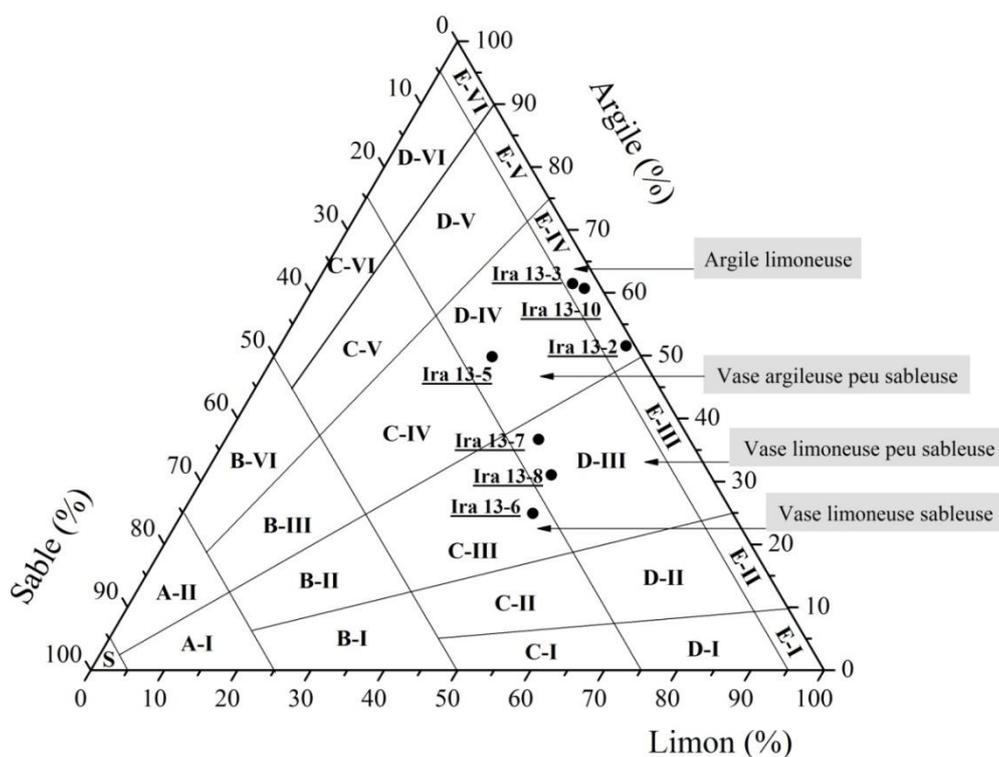


**Figure 4.** Représentation des échantillons messiniens et pliocènes de Boudinar dans le diagramme ternaire sable-limon-argile de Shepard.

Suivant ce système de classification, les échantillons messiniens correspondent à des argiles limoneuses présentant un pourcentage d'argile de 51,54% dans l'échantillon Ira 13-2, et un pourcentage légèrement supérieur à 60% dans les deux autres échantillons (Ira 13-3 et Ira 13-10). Cependant, l'échantillon Ira 13-5 du Pliocène basal est une argile limono-sableuse dont le taux d'argile est de 49,83%. Les autres échantillons pliocènes sont des limons argilo-sableux avec des taux d'argile qui varient entre 24 et 37%.

Cependant, le système de Shepard n'attribue aucun nom au mélange Argile-Limon-Sable avec des proportions approximativement égales. Ce mélange est nommé Boue ou vase (argile + limon) par le système de classification de Flemming [3] (figure 5). Ce nouveau système, utilisé dans plusieurs autres travaux [32, 33], permet de distinguer entre les différents régimes hydrodynamiques. En effet, les lignes peuvent être utilisées pour délimiter des gradients d'énergie. Ainsi, ces derniers diminuent en allant du pôle sable vers la ligne vase (ligne Argile-Limon). Ils diminuent aussi en allant de la ligne sable-limon vers le pôle argile.

La représentation des mêmes échantillons dans ce dernier système est représentée dans la figure 5. C'est ainsi que les échantillons messiniens sont des argiles limoneuses. L'échantillon Ira 13-5 du Pliocène basal est une vase argileuse peu sableuse. Puis, les deux échantillons pliocènes qui suivent (Ira 13-7 et Ira 13-8) sont des vases limoneuses peu sableuses. Enfin, le sommet de la série pliocène (Ira 13-6) est une vase limoneuse sableuse.

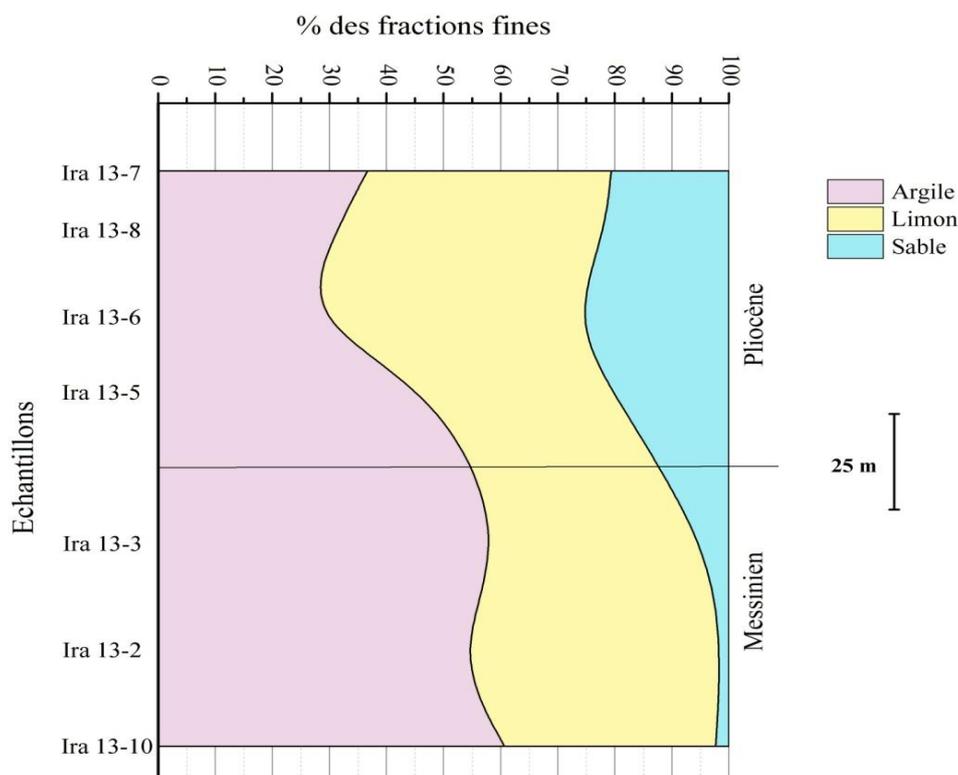


**Figure 5:** Représentation des échantillons messiniens et pliocènes de Boudinar dans le diagramme ternaire sable-limon-argile de Flemming.

S : sable ; A-I : sable peu limoneux ; A-II : sable peu argileux ; B-I : sable très limoneux ; B-II : sable limoneux ; B-III : sable argileux ; B-IV : sable très argileux ; C-I : vase sableuse extrêmement limoneuse ; C-II : vase sableuse très limoneuse ; C-III : vase sableuse limoneuse ; C-IV : vase sableuse argileuse ; C-V : vase sableuse très argileuse ; C-VI : vase sableuse extrêmement argileuse ; D-I : vase peu sableuse extrêmement limoneuse ; D-II : vase peu sableuse très limoneuse ; D-III : vase peu sableuse limoneuse ; D-IV : vase peu sableuse argileuse ; D-V : vase peu sableuse très argileuse ; D-VI : vase peu sableuse extrêmement argileuse ; E-I : limon ; E-II : limon peu argileux ; E-III : limon argileux ; E-IV : argile limoneuse ; E-V : argile peu limoneuse ; E-VI : argile.

En outre, l'étude de la variation verticale des taux des fractions fines messiniennes et pliocènes du bassin (figure 6) montre que la proportion des limons n'est pas trop variable. Les taux les plus faibles sont enregistrés à la base et au sommet du Messinien (37% à Ira 13-10, 35% à Ira 13-3) ainsi qu'au Pliocène basal (29,82% à Ira 13-5). La partie moyenne du Messinien, et les niveaux supérieurs du Pliocène inférieur enregistrent des taux de limon compris entre 42 et 48%.

Quant au taux d'argile, il varie d'une manière inverse par rapport à celui des sables. Il commence, au Messinien, avec des valeurs importantes allant de 51,54% dans l'échantillon Ira 13-2 et dépassant 61% dans les deux autres échantillons (Ira 13-2 et Ira 13-10). Ensuite, il diminue légèrement au pliocène basal (Ira 13-5) vers 49,83%. Et continue à diminuer vers des valeurs comprises entre 24,92% et 36,66% dans le reste du Pliocène (Ira 13-6, Ira 13-8 et Ira 13-7). Contrairement au taux d'argile, celui du sable commence avec des valeurs très faibles au Messinien, ne dépassant pas 4%, alors qu'au Pliocène, ce taux dépasse 20% arrivant même à 27,27% dans l'échantillon Ira 13-6.



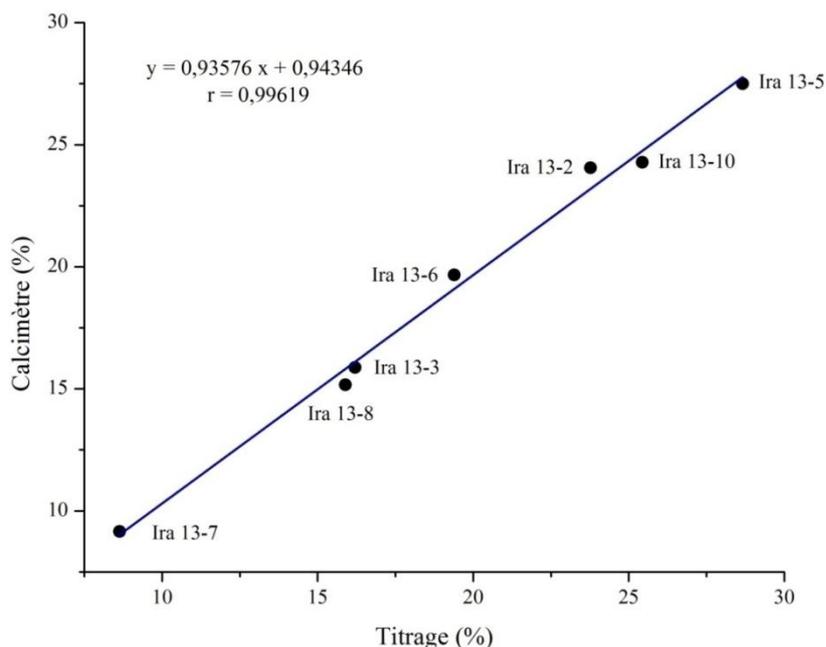
**Figure 6.** Variation des taux des fractions fines (sable, limon et argile) de Boudinar au cours du Messinien et du Pliocène.

#### 4.2. Calcimétrie

Les teneurs en  $\text{CaCO}_3$  des échantillons du bassin de Boudinar sont éditées dans le tableau 3, et représentées dans la figure 7 avec une courbe d'ajustement linéaire. Cette dernière présente le degré de concordance entre les résultats des deux méthodes calcimétriques utilisées. Ce type de comparaison a été utilisé principalement pour une détermination du taux de  $\text{CaCO}_3$  des sols [9].

Echantillons	Age	Calcimétrie par titrage (%)	Calcimètre de Bernard (%)
Ira 13-7	Pliocène	08,63	09,16
Ira 13-8		15,89	15,17
Ira 13-6		19,39	19,67
Ira 13-5		28,66	27,50
Ira 13-3	Messinien	16,20	15,88
Ira 13-2		23,77	24,06
Ira 13-10		25,44	24,28

**Tableau 3.** Calcimétrie des échantillons du bassin de Boudinar par titrage et par calcimètre de Bernard.



**Figure 7.** Courbe d'ajustement linéaire des résultats de la calcimétrie par titrage et par calcimètre de Bernard.

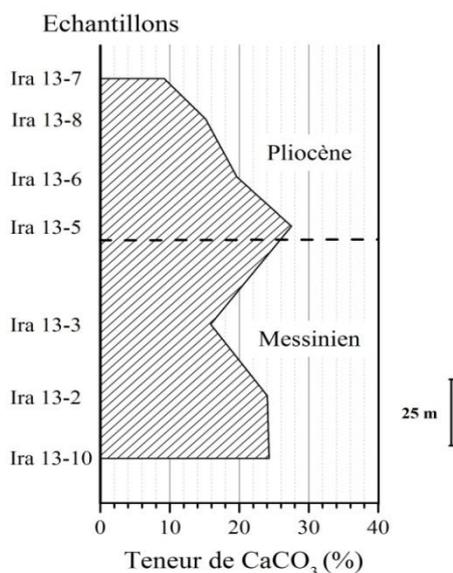
La courbe d'ajustement linéaire présente une corrélation positive presque totale puisque le coefficient de corrélation de Pearson  $r$  est égal à  $0,99619$  ( $\sim 1$ ). L'équation de la courbe est :

$$y = 0,94346 + 0,93576 x \quad (8)$$

Avec,  $y$  : taux de carbonate déterminé par la méthode du calcimètre de Bernard ;

$x$  : taux de carbonate déterminé par la méthode de calcimétrie par titrage.

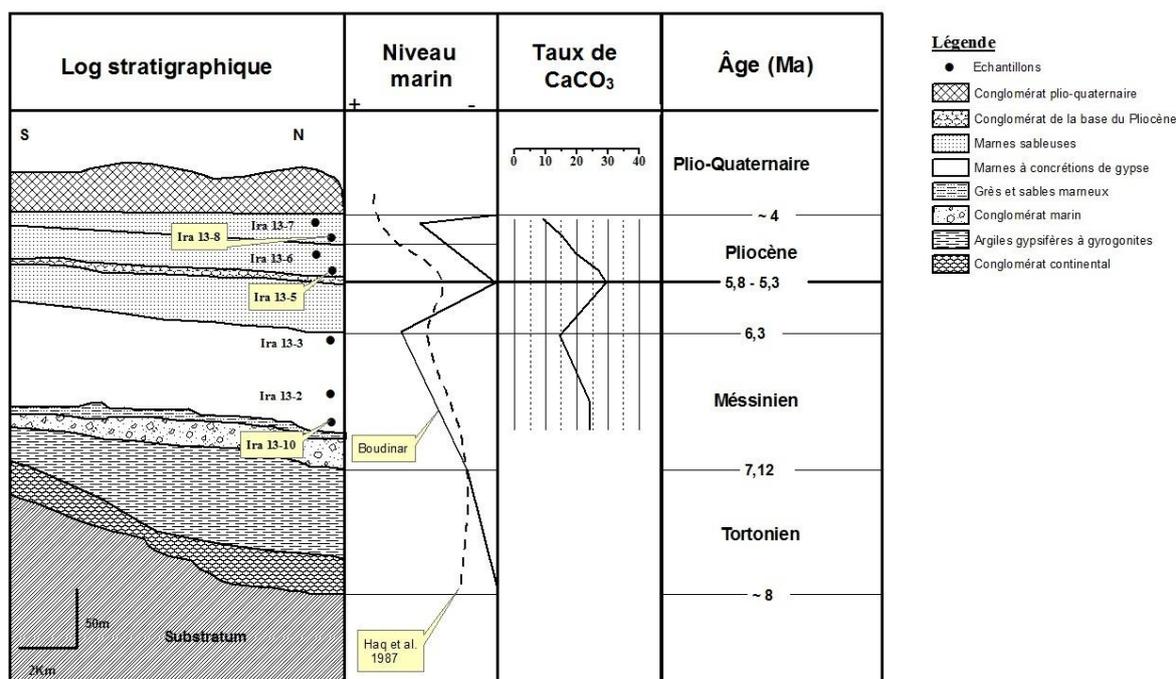
La différence maximale enregistrée entre les résultats des deux méthodes est 1,16% au niveau des échantillons Ira 13-5 et Ira 13-10. Ce qui montre clairement que ces méthodes calcimétriques donnent des résultats scientifiques concordants. Dès lors, on utilise les résultats calcimétriques obtenus par la méthode du calcimètre de Bernard en raison de sa normalisation. Toutefois, la figure 8 montre la variation du taux de  $\text{CaCO}_3$  du bassin de Boudinar au cours du Messinien et du Pliocène.



**Figure 8:** Variation verticale des teneurs en  $\text{CaCO}_3$  dans les échantillons messiniens et pliocènes du bassin de Boudinar.

On constate que la base du Messinien est relativement plus carbonatée, avec des valeurs qui avoisinent 24% (entre 24% et 24,3%), que le Messinien final où cette teneur diminue vers 15,88%. De même, le pliocène basal est le plus carbonaté dans la série avec 27% à Ira 13-5. Ce taux diminue au cours du temps passant de 19,67% à Ira 13-6 et arrivant à 9,16% au sommet de la série pliocène (Ira 13-7).

Aussi, il apparaît clairement que la courbe de variation calcimétrique verticale calque bien la courbe de variation eustatique du bassin établie par Azdimousa et al. [1] (figure 9). Les courbes calcimétriques sont des excellents outils de corrélation dans les formations à prédominance carbonatée [12], mais aussi dans les faciès détritiques fins avec des teneurs faibles à moyennes en carbonates.



**Figure 9.** Corrélation entre la variation eustatique [1] et la variation calcimétrique verticale enregistrées durant le Messinien et le Pliocène dans le bassin de Boudinar.

## 5. Discussion

L'analyse sédimentométrique et calcimétrique des échantillons messiniens et pliocènes issus du bassin de Boudinar montre que la partie inférieure du Messinien est caractérisée par un environnement de mer ouverte profonde [1]. C'est pourquoi l'apport en matière terrigène fine (argile et limon) s'est accompagné d'un apport relativement important de matière carbonatée. Ceci explique les teneurs relativement élevées (24%) en  $\text{CaCO}_3$ . Au cours du Messinien, le niveau marin augmente en transgression messinienne et atteint son apogée de sorte que l'apport en matière carbonatée diminue vers les niveaux sommitaux profonds. Ce qui explique la diminution de la teneur en  $\text{CaCO}_3$  (15,88% à Ira 13-3). On constate alors que dans le bassin de Boudinar, la ligne du rivage était lointaine impliquant des teneurs très faibles en sable (inférieures à 4%). La régression fini-messinienne a mis en place un niveau marin le plus bas dans le cycle et qui a persisté au Pliocène basal. Ceci est matérialisé par la teneur la plus grande en carbonate (27,5% à Ira 13-5). Dès lors, l'apport en sable devient important avec des valeurs comprises entre 20,35% et 27,27%.

Au Pliocène, la transgression et l'augmentation du niveau marin entraînent une diminution de l'apport carbonatée. Ceci explique la diminution des taux de  $\text{CaCO}_3$  au cours de cette période.

L'application de l'approche de Flemming [3] renseigne sur le régime hydrodynamique. Ainsi, l'énergie du milieu augmente du Messinien au Pliocène passant d'un domaine argileux à un domaine vaseux. Cette énergie continue à augmenter au cours du Pliocène où la série commence par une vase argileuse peu sableuse qui devient une vase limoneuse peu sableuse. Puis, elle se termine par une vase limoneuse sableuse.

D'une autre part, et selon la norme NF P 94-048 [14], les échantillons analysés sont qualifiés de non calcaires à peu calcaires caractérisant, dans notre cas, les argiles et les marnes. Ainsi, les sédiments du Messinien sont plutôt des marnes limoneuses ( $\%CaCO_3 > 20\%$ ) à la base et deviennent des argiles limoneuses au sommet ( $\%CaCO_3 < 20\%$ ). Toutefois, des marnes limono-sableuses ( $\%CaCO_3 > 20\%$ ) prennent place au Pliocène basal puis deviennent des limons argilo-sableuses dans le reste du pliocène.

En effet, et vu les utilisations diverses des argiles [4-8], les résultats obtenus confèrent à celles du bassin de Boudinar une importance capitale dans certains domaines industriels et environnementaux. Elles peuvent être utilisées dans la fabrication des briques, des poteries, ainsi que dans d'autres utilisations telles que la conception des centres d'enfouissement techniques, l'élimination des macromolécules dans l'épuration des eaux polluées, la décoloration des huiles. Elles peuvent aussi être utilisées dans la fabrication des ciments. Le domaine agronomique peut aussi en tirer profit en raison de leurs teneurs moyennes en limon.

## Conclusion

Les deux techniques calcimétriques utilisées dans l'étude des sédiments messiniens et pliocènes du bassin de Boudinar, soit par titrage ou par calcimètre de Bernard, donnent des résultats concordants. Elles ont permis de valoriser les formations marneuses et argileuses de Boudinar. Il s'agit de dépôts pauvres en carbonate de calcium qualifiés de non calcaires à peu calcaires caractérisant les argiles et les marnes. L'utilisation industrielle de ces dernières est très large allant des briques jusqu'à la conception des centres d'enfouissement techniques.

La comparaison entre la courbe calcimétrique verticale (en fonction du temps), et la courbe de fluctuation du niveau marin enregistrées dans le bassin durant le Messinien et le Pliocène a permis de constater une parfaite superposition. Ceci confirme les résultats de l'application de la stratigraphie séquentielle au bassin de Boudinar [1]. Et par conséquent, l'analyse calcimétrique verticale apparaît utile dans la corrélation en stratigraphie séquentielle dans les dépôts marneux-argileux.

Par ailleurs, la sédimentométrie a permis de quantifier la fraction argileuse dans ces types de sédiments, de les classer, et d'apporter un surplus dans la compréhension des milieux de dépôts des sédiments. Ainsi, elle a valorisé plus les dépôts du Messinien que ceux du Pliocène en raison du taux élevé en fraction argileuse.

La classification hydrodynamique de Flemming [3] appliquée aux sédiments messiniens et pliocènes de Boudinar a prouvé une augmentation de l'énergie hydrodynamique depuis la base de la série jusqu'au sommet. Ce qui est en concordance avec les changements eustatiques enregistrés durant la même période [1].

Enfin, le bassin de Boudinar est comblé en majorité par des argiles messiniennes qui peuvent atteindre 150 m d'épaisseur au centre du bassin [1]. Cette épaisseur devient relativement plus faible vers l'ouest. Le Messinien est surmonté d'une sédimentation pliocène moins abondante. Elle est absente dans le sud du bassin, mais elle augmente vers le nord [1]. Tout cela fait du bassin un potentiel argileux très important qui reste encore vierge pour des utilisations dans les domaines industriels.

## Références

1. Azdimousa A., Poupeau G., Rezqi H., Asebriy L., Bourgois J., Aït Brahim L., *Bull. Inst. Sci. Rabat* 28 (2006) 9.
2. Shepard F. P., *J. Sediment. Petrol.* 24 (1954) 151.
3. Flemming B. W., *Cont. Shelf Res.* 20 (2000) 1125.
4. Velde B., *Springer Nl.* (1992) 198.
5. Murray H. H., *Dev. Clay Sci.* 2 (2007) 180.
6. Al-Ani T., Sarapää O., *Geol. Surv. Finland* (2008) 94.
7. Mukherjee S., *Springer* 19 (2013) 335.
8. Ouasif H., Yousfi S., Bouamrani M. L., Kouali M. E., Benmokhtar S., Talbi M., *J. Mater. Environ. Sci.* 4 (2013) 1.
9. Pakhshan M. M., Akram O. E., Mohammed S. S. D., Dalshad A. D., *Open J. Soil Sci.* 2 (2012) 263.
10. Alessi D., *Geol. Soc. Am.* 37 (2005) 98.
11. Kassim J. K., *Int. J. Environ.* 1 (2013) 9.

12. Csrppgn, *Springer Nl.* (1983) 23.
13. Kindermans J.-M., *Cent. Rech. Rout. Bxl.* (1977) 52.
14. Afnor, NF P 94-048 (1996) 11.
15. Azdimousa A., Jabaloy A., Asebriy L., Booth-Rea G., Gonzalez-Lodeiro F., Bourgois J., *Rev. Soc. Geol. Esp.* 20 (2007) 187.
16. Negro F., Agard P., Goffé B., Saddiqi O., *J. Geol. Soc. London* 164 (2007) 829.
17. Choubert G., Faure-Muret A., *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc* N° 299 (1984).
18. Guillemin M., Houzay J.-P., *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc* N° 314 (1982) 7.
19. Jabaloy-Sánchez A., Azdimousa A., Booth-Rea G., Asebriy L., Vázquez-Vílchez M., Martínez-Martínez J. M., Gabites J., *Tectonophysics* 663 (2015) 150.
20. Münch P., Cornée J. J., Féraud G., Martin J. P. S., Ferrandini M., Garcia F., Conesa G., Roger S., Moullade M., *Int. J. Earth Sci.* 95 (2006) 491.
21. Bouazza A., Ait Brahim L., Dugué O., Cattaneo G., Laville E., Delcaillau B., Charroud M., Luca P. D., *Eur. J. Sci. Res.* 28 (2009) 317.
22. Roveri M., Flecker R., Krijgsman W., Lofi J., Lugli S., Manzi V., Sierro F. J., Bertini A., Camerlenghi A., De Lange G., Govers R., Hilgen F. J., Hübscher C., Meijer P. T., Stoica M., *Mar. Geol.* 352 (2014) 25.
23. Choubert G., Faure-Muret A., *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc* N° 302 (1984).
24. Choubert G., Faure-Muret A., *Notes & Mém. Serv. Géol. Maroc* N° 301 (1984).
25. Switzer A. D., *Acad. Press* 14 (2013) 224.
26. Mutima J., Wei Li J., Nkurunziza P., Habiyaremye G., *Acad. Arena* 2 (2010) 91.
27. Cheetham M. D., Keene A. F., Bush R. T., Sullivan L. A., Erskine W. D., *Sedimentology* 55 (2008) 1905.
28. Andrenelli M. C., Fiori V., Pellegrini S., *Geoderma* 192 (2013) 380.
29. Afnor, NF P 94-057 (1992) 17.
30. Poppe L. J., Eliason A. H., *Comput. Geosci.* 34 (2008) 561.
31. Nyakairu G. W. A., Kurzweil H., Koeberl C., *J. Afr. Earth Sci.* 35 (2002) 123.
32. Chang T. S., Flemming B. W., Bartholomä A., *Sediment. Geol.* 202 (2007) 453.
33. Flemming B., *Springer Nl.* (2012) 231.
34. Haq B. U., Hardenbol J., Vail P. R., *Science* 235 (1987) 1156.

(2016); <http://www.jmaterenvirosci.com>