



## Etude environnemental du littoral Nord Marocain: Approche multidisciplinaire (Environmental study of the northern Moroccan coast: Multidisciplinary Approach)

A. Lalilti<sup>1</sup>, N. Alaoui Mhammedi<sup>1</sup>, V. Magalhães<sup>3</sup>, L.M. Pinheiro<sup>3</sup>,  
A. El Cadi<sup>4</sup>, A. El Arrim<sup>1</sup>, B. El Moumni<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Environnement, Océanologie et Ressources Naturelles, Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdelmalek Essaadi, BP 416, Tanger, Maroc.

<sup>2</sup> Laboratoire d'études pluridisciplinaires. FP-Larache. BP 745 – Poste Ple , 92 004 – Larache, Maroc

<sup>3</sup> Laboratoire d'Océanographie et de Géologie Marine, Département des Géosciences, Université d'Aveiro, Campus Universitaire de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

<sup>4</sup> Laboratoire Physico-chimie des Matériaux, Substances Naturelles et Environnement, Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Université Abdelmalek Essaadi, BP 416, Tanger, Maroc.

Received 7 Dec 2013, Revised 16 July 2014, Accepted 17 September 2014

\* Corresponding author. E mail: [lalilti.anass@gmail.com](mailto:lalilti.anass@gmail.com)

### Résumé

Ce travail présente l'étude de quatre carottes prélevées au Golf de Cadix lors des deux campagnes océanographiques TTR16 et TTR17 faisant partie du programme de l'université flottante de l'UNESCO/IOC, qui a comme objectif la formation des jeunes chercheurs et des étudiants à des techniques de prélèvements en mer et d'interprétation des résultats. Nous présentons les résultats des analyses de la sédimentologie et de la minéralogie des argiles et de la roche totale des argiles dans les Carottes recueillies des volcans de boue Yuma et Gemini dans la marge Atlantique marocaine; et du volcan de boue BonJardim dans la marge Atlantique portugaise. Les résultats nous ont permis de déduire l'origine et la profondeur des unités qui alimentent les volcans de boue dans la marge atlantique marocaine et leur comparaison avec les autres volcans situés au niveau de la marge Ibérique. L'étude géochimique et la comparaison de la distribution des différents métaux le long des carottes étudiées, nous a permis de déterminer les possibles contributions particulières en métaux des sédiments provenant des volcans de boues.

*Mots-clés:* Sédimentologie sous-marine; Volcans de boue; Golfe de Cadix; Marge Atlantique Marocaine; Géochimie; minéralogie des argiles.

### Abstract

This paper presents the study of four cores collected at the Gulf of Cadiz during two oceanographic research surveys TTR16 and TTR17 as part of the floating university program of UNESCO / IOC, which targeted the training of young researchers and students to sampling techniques at sea and interpretation of the results. We present the results of analysis of sedimentology and clay mineralogy and whole rock in the collected cores at the mud volcanoes Yuma and Gemini in the Moroccan Atlantic Margin, and BonJardim mud volcano in the Portuguese Atlantic Margin. The results allowed us to deduce the origin and depth of supplying units of the Moroccan Atlantic Margin mud volcanoes and their comparison with other volcanoes located at the Iberian margin. The geochemical study and comparison of the distribution of different minerals along the selected cores, allowed us to determine if there are possible specific contributions of minerals from the mud volcanoes sediments.

*Key words:* subsea sedimentology; mud volcanoes; Gulf of Cadiz; Moroccan Atlantic margin; geochemistry; clay mineralogy.

### 1. Introduction

Bien que décrite et étudiée depuis des années, les volcans de boue et de volcanisme de boue restent parmi les plus mystérieux événements géologiques de la nature ; ce qui est assez remarquable compte tenu d'un certain nombre de faits. Tout d'abord, des milliers de volcans de boue existent dans le monde, déterminant et affectant l'habitat et la vie quotidienne des millions de personnes vivant parmi eux. Deuxièmement, la distribution des

volcans de boue est intimement liée à la formation et la distribution de l'activité pétrolière du monde, servant ainsi comme indicateur de ressources naturelles précieuses [1]. Troisièmement, les volcans de boue offrent un aperçu autrement caché au plus profond des processus structuraux et diagenétiques tels que la formation des hydrates de gaz, la dissolution des minéraux et leur transformation, la dégradation de la matière organique avec des réactions à haute pression/température [2]. Et finalement, le volcanisme de boue implique généralement des générations et des émissions volumineuses du méthane et du dioxyde de carbone, ce qui fait des volcans de boue une source naturelle de gaz à effet de serre et par conséquent jouent un rôle important dans la dynamique du climat mondial [3-7].

## 2. Matériel et méthodes

Dans l'objectif d'étudier l'évolution de l'environnement de la marge Atlantique du Nord du Maroc et du Golf de Cadix, et afin de déterminer les variations marquantes du milieu, des carottes ont été prélevées durant les campagnes océanographiques TTR-16 et TTR-17 à bord du RV/Professor Logachev.

5 carottes correspondantes aux volcans de boue Darwin, Yuma, Gemini et BonJardim prélevées lors de ces missions font l'objet de ce travail:

- 3 carottes: 660G, 661G et 677G ont fait l'objet des analyses par DRX pour déterminer la composition de la roche totale et la nature des minéraux argileux (fraction <math> < 2\mu\text{m}</math>) au département des Géosciences de l'Université d'Aveiro.
- la carotte: 603G a fait objet des analyses par DRX au département des Géosciences de l'Université d'Aveiro et des analyses Géochimiques au CNRST-Rabat.
- la carotte: 666G a fait l'objet des analyses Géochimiques au CNRST-Rabat.

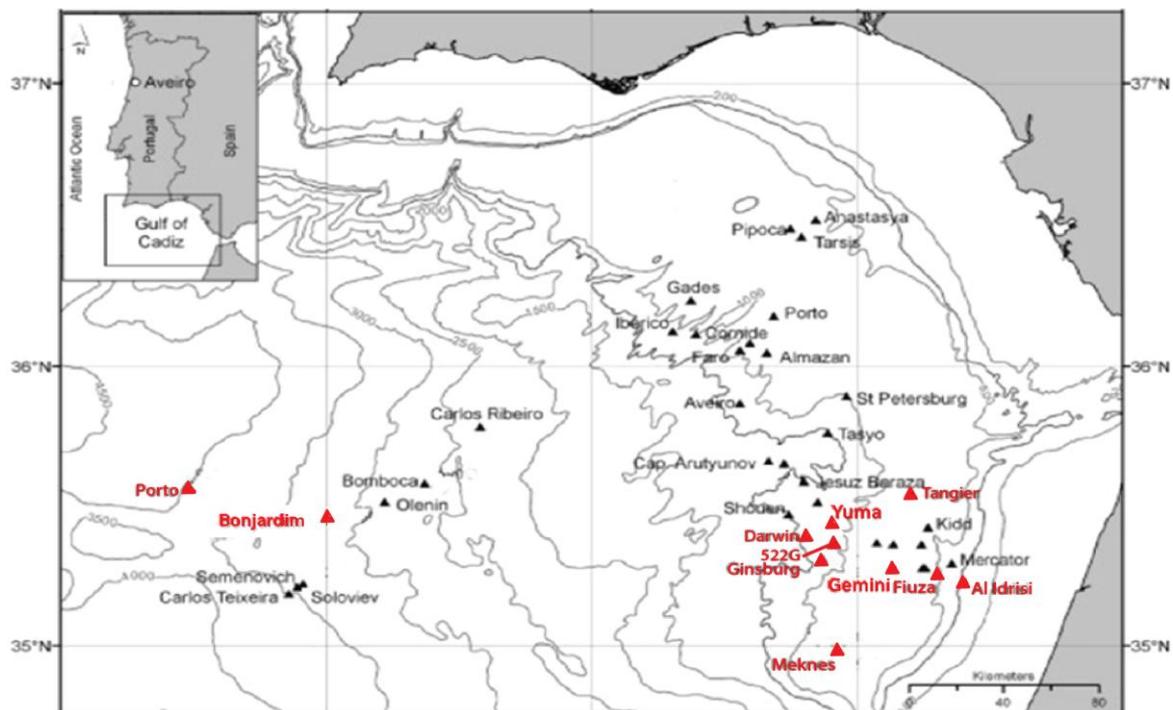


Figure 1 : La localisation des volcans de boue étudiées dans ce travail

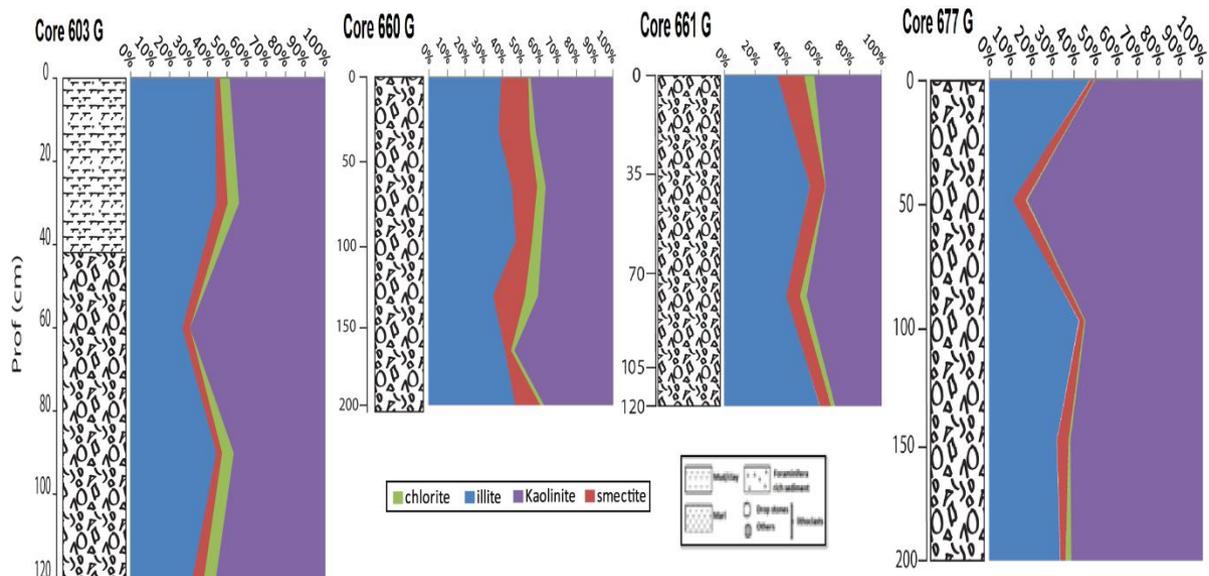
L'association des minéraux argileux et leurs proportions relatives ont été déterminées par diffraction des rayons X. Après l'élimination de la teneur en carbonate, chaque échantillon a été lavé avec de l'eau distillée et centrifugée à plusieurs reprises. La fraction argileuse de moins de 2  $\mu\text{m}$  a été séparée par centrifugation et déposée sur des lames de verre. Les granulats d'argile orientés ont été séchés par l'air et analysés; d'autres lames de granulats d'argile orientés sont traitées avec de l'éthylène glycol pendant 24 h dans des dessiccateurs et analysées; les dernières lames de granulats d'argile orientés sont chauffés à 500°C et analysés.

La détermination des spectres de la Diffraction Des Rayons X est réalisée par le logiciel libre "MacDiff 4.2.5 alias" au Laboratoire d'Océanographie et de Géologie Marine du Département des Géosciences à l'Université d'Aveiro au Portugal et chaque minéral dans l'assemblage a été identifié par la réflexion correspondante aux pics caractéristiques.

### 3. Résultats

#### 3.1. Carotte AT-603G:

La teneur en smectite est variable le long de cette carotte, dans la partie supérieure 0-60cm le pourcentage de la smectite augmente de 2% à 6% ensuite baisse à 3% à 100cm et ré-augmente de nouveau à 6% à 120cm. L'Illite enregistre un taux maximal de 44% dans les 10 premiers centimètres de la carotte et à 100 cm. <44% à 60cm, et <27% à 80cm et 32% à 120cm. La concentration de la kaolinite varie entre 44% et 69% tout au long de la carotte; Elle baisse de 49% à 44% entre 10 et 60 cm, puis augmente à 69% dans l'intervalle 60-80 cm et diminue encore entre 80 et 120 cm de 69% à 56%. La Chlorite enregistre des valeurs faibles (6%) et disparaît à 80cm.



**Figure 2 :** Colonne lithologique et teneurs en minéraux argileux des carottes gravitaires des volcans de boue Yuma Gemini et Bonjardim.

#### 3.2. Carotte AT-660G:

L'association des minéraux argileux est dominée par l'illite avec une valeur moyenne de 42%, qui le long de la carotte oscille entre 35% et 47%. La smectite présente une valeur minimale de 3% à une profondeur de 160 cm. La kaolinite a des pourcentages allant de 36% à 53% le long de la carotte. Au sommet de la carotte, l'illite constitue 40%, et baisse à 38% à 20cm de profondeur; la teneur maximal en illite (47%) est enregistré au milieu et à la base de la carotte (200cm). La teneur en chlorite varie le long de la carotte entre 1% et 7%.

#### 3.3. Carotte AT661G:

Dans cette carotte l'association des minéraux argileux est dominée par l'illite avec une moyenne de 47,187%, un taux maximal de 61% est enregistré à 120cm. Le pourcentage de la smectite baisse de 17% au sommet à 7% à 120cm. La Chlorite présente des valeurs variables de 1% à 6% le long de la carotte.

#### 3.4. Carotte AT-677G:

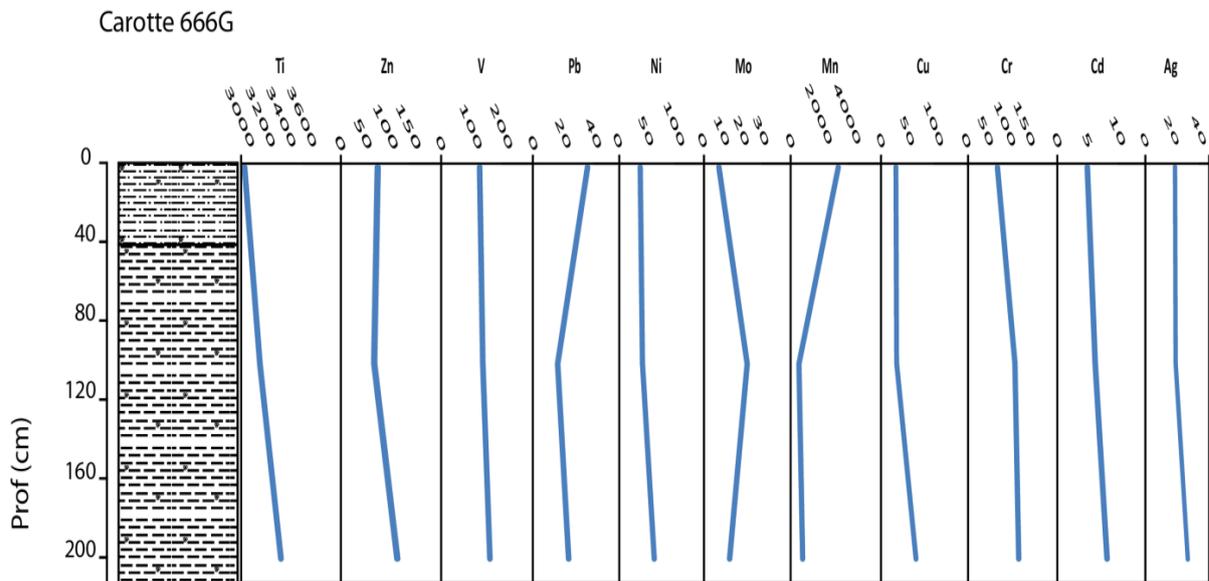
La smectite a des concentrations variant entre 2% et 6% avec des variations distinctes de valeur: dans l'intervalle de 0- 60 cm la smectite augmente de 2% à 6% et de 60 à 120cm son taux baisse de 6% à 2%, puis augmente à 5% à 180 cm, le taux diminue encore à 2% vers 200cm. Le taux de l'illite varie entre une valeur minimale de 11% à 62 cm de profondeur et une valeur maximale de 47% au sommet. La Kaolinite présente une importante concentration qui varie de 50% à 82%, la chlorite est faiblement présente avec un taux très faible qui ne dépasse pas 3%.

#### 3.5. La géochimie des volcans de boue Darwin et Yuma:

Les études géochimiques faites sur les volcans de boue de la région du golfe de Cadix ont ciblé la caractérisation de la composition des sédiments, des gaz, des hydrates de gaz et des fluides interstitiels par la mesure des teneurs en éléments majeurs.

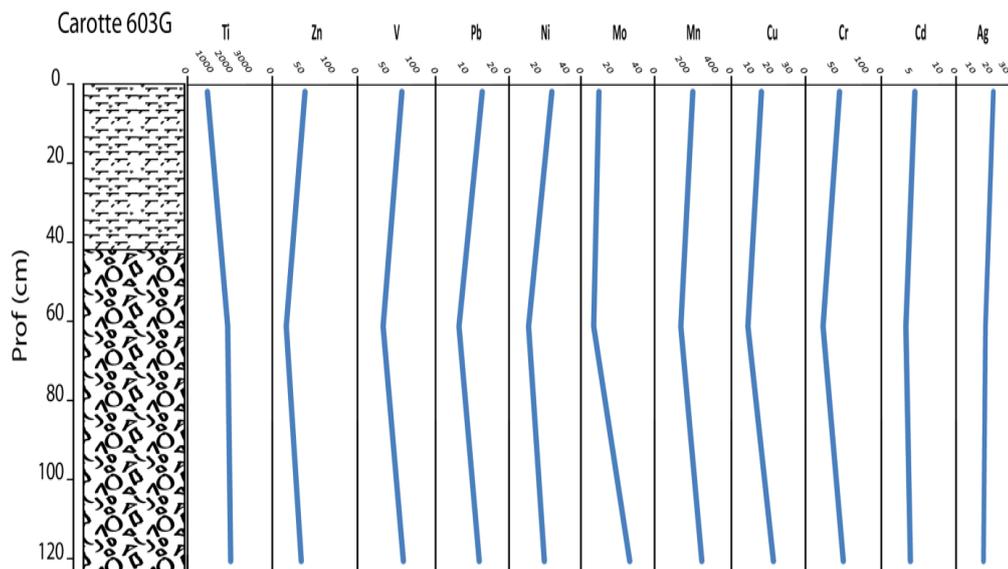
**Tableau 1** : Résultats des analyses Géochimiques des carottes 666G et 603G

	Nivea (cm)	Ag (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	V (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Ti (mg/kg)
666G	0	22,556	5,029	79,554	27,89	3360,014	8,382	39,625	36,272	128,323	82,297	3043,475
	100	23,041	6,332	125,932	30,252	611,191	22,689	42,915	16,005	138,244	73,343	3195,783
	200	32,054	8,242	134,397	66,855	878,275	13,966	63,65	23,354	161,414	124,781	3397,705
603G	1	22,36	5,765	58,521	15,722	257,842	12,054	29,872	16,071	77,737	57,648	1053,378
	61	17,652	4,128	29,611	8,399	176,382	8,542	13,809	7,972	45,839	24,913	2114,022
	121	16,477	4,914	65,618	21,824	322,309	33,676	24,571	14,887	81,372	50,731	2244,599



**Figure 3** : Répartition des métaux au niveau de la carotte 666G (volcan de boue Darwin)

Au niveau du volcan de boue Darwin les éléments Cd, Cr, Ni, Pb, V, Zn montrent des concentrations un peu plus élevées au sommet (Figure 3) alors que les éléments Ag, Cu, Mn, Mo, Ti ont des taux plus importants à la base.



**Figure 4** : Répartition des métaux au niveau de la carotte 603G (volcan de boue Yuma)

Au volcan de boue Yuma on trouve des concentrations élevées les éléments Ag, Cd, Ni, Pb, et Zn vers le sommet (Figure 4), alors que les éléments Cr, Cu, Mn, Mo, V et Ti ont des concentrations plus élevées à la base.

#### 4. Discussion

L'assemblage des minéraux argileux au niveau des structures étudiées est composé par la smectite, l'illite, la kaolinite et le chlorite, avec des concentrations différentes. La variation la plus notable est observée pour la smectite et la kaolinite (Fig 2).

La répartition des minéraux argileux du volcan de boue Yuma de la marge atlantique marocaine est presque la même que celle du volcan de boue Bonjardim de la marge portugaise profonde, alors que malgré que les volcans de boue Darwin et Yuma sont situés dans la même unité de la marge atlantique marocaine, ils montrent des différences dans le pourcentage de minéraux argileux notamment pour la smectite et l'illite.

Les taux les plus élevés de la smectite 17% et 6% sont enregistrés respectivement aux volcans de boue Yuma et Bonjardim, ce qui est habituel par rapport aux moyennes régionales: des quantités élevées d'illite 52%, une légère quantité de smectite 30% dans la marge Atlantique marocaine [8] (tableau2). Des taux élevés de la smectite ont également été trouvés dans les volcans de boue dans la Méditerranée [9 - 10]; dans les volcans de boue des champs Tasio dans la marge Espagnol du golfe de cadix [11 - 12] (tableau 2).

**Tableau 2** : Comparaison des teneurs des minéraux argileux entre la marge atlantique espagnole [12], la marge atlantique marocaine [13] et la marge portugaise

Minéraux argileux	Marge Atlantique Espagnole [12]	Marge Atlantique Marocaine [13]	Marge Atlantique présente (la présente étude)		Marge Portugaise (la présente étude)
			Yuma	Gemini	
Smectite	18	30	4,15	11,49	11,43
illite	42	52	38,11	44,6	41,42
Kaolinite	40	18	53,14	40,22	41,34
Chlorite			4,6	3,69	5,81

La géochimie des fluides des différents volcans de boue démontre que l'origine des fluides et des résultats de déshydratation par surpression des minéraux argileux et la transformation de la smectite en illite [14][2][15] fait à une profondeur de 5 à 6km et à des températures comprises entre 60 et 150°C.

En prenant en considération un gradient géothermique moyen de 25-30°C au golfe de Cadix, la source du matériel riche en smectite se trouve à une profondeur qui ne dépasse pas 3km [16].

#### Conclusion

Les pourcentages habituellement bas de la smectite et les pourcentages élevés de l'illite dans les structures étudiées ne s'opposent pas à la transformation smectite-illite profonde. Parce que la réaction a eu lieu à plusieurs kilomètres de profondeur et ses produits sont transportés le long du système de failles entraînant la liquéfaction des sédiments des couches profondes, leur mobilisation et extrusion se fait avec la formation consécutive des volcans de boue à la surface [14]. En d'autres termes, les fluides et les couches sources du matériel solide ou la brèche de boue des volcans de boue Fiuza, Yuma, Darwin et BonJardim peuvent avoir différentes sources correspondant à différentes profondeurs. La roche source des sédiments extrudés de ces volcans de boue se situe à une faible profondeur ne dépassant pas les 3 km. Par conséquent, les différences de concentration des minéraux argileux entre toutes les structures étudiées, essentiellement les taux de la smectite et de la kaolinite, peut être liée à différentes sources des matériaux alimentant ces volcans de boue.

#### Références

1. Kopf, Significance of mud volcanism, *Rev. Geophys.*, 40(2), (2002) 1005, doi:10.1029/2000RG000093.
2. Hensen C, Nuzzo M, Hornibrook E, Pinheiro LM, Bock B, Magalhães VH, Brückmann W. Sources of mud volcano fluids in the Gulf of Cadiz—indications for hydrothermal imprint, *Geochimica et Cosmochimica*. (2007) Acta. 71(5): 1232-1248.
3. Etiope G., Klusman R.W. Geologic emissions of methane to the atmosphere. *Chemosphere*, 49, 8, (2002) 777-789.

4. Judd, A.G., Hovland, M., Submarine Fluid Flow, the Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge University Press. (2007) 475pp.
5. Dimitrov LI. Mud volcanoes \_ the most important pathway for degassing deeply buried sediments. *Earth-Sci. Rev.*, (2002) 59: 49-76
6. Milkov, A.V., R. Sassen, T.V. Apanasovich, and F.G. Dadashev (2003) Global gas flux from mud volcanoes: a significant source of fossil methane in the atmosphere and the ocean.
7. Etiope G., Milkov A.V. A new estimate of global methane flux from onshore and shallow submarine mud volcanoes to the atmosphere. *Environm. Geology*, 46, (2004) 997-1002.
8. Alaoui Mhammedi N, El Moumni B, El Hmaidi A, Raissouni A, El Arrim, A Mineralogical and geochemical study of mud volcanoes in north Moroccan atlantic margin. *Afr. J. Env. Sc. and Tech.* Vol. 2 (11), (2008) pp. 387-396.
9. Zitter TAC, Van der Gaast SJ, Woodside JM. New informations concerning clay mineral provenance in mud volcanoes, in: 36<sup>th</sup> CIESM congress, Rapp. Comm. Inter. Mer Médit. 36, Monte Carlo, (2001) p. 46.
10. Zitter, T.A.C., Mud volcanism and fluid emissions in eastern Mediterranean neotectonic zones. Thèse de Doctorat, Univ. Vrije, Amsterdam, (2004) 140pp
11. Martín Puertas C (2004). Caracterización mineralógica de estructuras ligadas a escapes de metano en el Golfo de Cádiz. Tesis de licenciatura, Universidad de Cádiz.
12. Martín-Puertas C, Mata MP, Fernández-Puga MC, Díaz del Río V, Vázquez JT, Somoza L. A comparative mineralogical study of gas-related sediments of the Gulf of Cádiz *Geo Mar* (2007) Lett :223–235.
13. Alaoui Mhammedi N, Mineralogical, geochemical and paleontological study of mud volcanoes in the Golf of Cadiz: Moroccan Atlantic margin. (PHD) (2009)
14. Dählmann A, De Lange GJ. Fluid-sediment interactions at Eastern Mediterranean mud volcanoes: a stable isotope study from ODP Leg 160, *Earth Planet. Sci. Lett.* (2003) 212: 377 391.
15. Sheppard and H. A. Gilg. Stable Isotope Geochemistry of Clay *Minerals Clay Minerals* 1996 31 : (1996) 1-24.
16. Merriman RJ, Peacor DR. Very low grade metapelites; mineralogy, microfabrics and measuring reaction progress. In: Frey M, Robinson D (eds) Low-grade metamorphism. Blackwell, Oxford, (1999) pp 10–60.

(2014) ; <http://www.jmaterenvironsci.com>