

EVALUATION DES INDICES D'ALTERATION CHIMIQUE SUR UN PROFIL KAOLINISE CAS : TAMAZERT (NE ALGERIE)

ASSESSMENT OF CHEMICAL WEATHERING INDICES IN KAOLINISED PROFIL CASE: TAMAZERT (NE ALGERIA)

M. BOUKOFFA^(1,2), L. BOUABSA⁽¹⁾, B. LAMOURI^(1,2), N. FAGEL⁽²⁾

⁽¹⁾ Laboratoire de Géodynamique et ressources minérales (LGRM), Université Badji Mokhtar, 23000 Annaba-Algérie

⁽²⁾ UR Argile, Géochimie et Environnements sédimentaires (AGeS), Quartier Agora, Allée du six Août, 14 B-4000 Liège (Sart Tilman) – Belgique
boukoffam@yahoo.fr

RESUME

Les indices d'altération chimique sont couramment utilisés pour caractériser les profils d'altération développés sur des roches mères hétérogènes ou homogènes. Parmi les indices d'altération évalués dans cette étude, l'indice de Parker (WIP), l'indice chimique d'altération (CIA), l'indice de météorisation chimique (CIW), l'indice d'altération des plagioclases (PIA), Ruxton ratio (R). L'objectif principal de cette étude est d'examiner l'étendue de l'altération chimique affectée les différentes roches surtout gneissiques dans la zone de Tamazert et de tester l'aptitude d'application des indices d'altération chimique pour des profils d'altération hétérogènes. La pétrographie et la géochimie des éléments majeurs de la roche mère et du produit d'altération ont été discuté dans ce travail.

MOTS CLES: Géochimie, Indices d'altération, Kaolin, Tamazert.

ABSTRACT

Chemical weathering indices are commonly used for characterizing weathering profiles developed on heterogeneous or homogeneous parent rock by incorporating bulk major element oxide chemistry into single metric of each sample. Chemical weathering indices evaluated in this study are: weathering index of Parker (WIP), the chemical index of alteration (CIA), chemical index of weathering (CIW), plagioclase index of alteration (PIA), Ruxton ratio (R). The main purpose of this study is to review the scope of chemical weathering affected different gneissic rocks especially in Tamazert area and test the ability of application of chemical weathering index for heterogeneous alteration profiles. Petrology and geochemistry of the major elements of rock and alteration product have been discussed in this work.

KEYWORDS: Geochemistry, Weathering Indices, Kaolin, Tamazert.

1 INTRODUCTION

Du fait de sa position en surface, les roches de l'écorce terrestre continentale subit des altérations physiques et chimiques. L'influence des agents climatiques modifient les caractéristiques minéralogiques, pétrographiques et géochimiques des roches, en particulier l'eau météorique qui s'infiltré en profondeur à travers les fissures, les diaclases et les joints de stratifications. La quantification et l'évaluation géochimique du degré d'altération s'effectue par le biais de plusieurs indices d'altération chimiques afin de capturer la signature géochimique de l'altération et de fournir des échelles pour l'accompagnement des

changements dans l'état physique (Matsuo et Nishida, 1968 ; Onodera et al., 1974 ; Malomo, 1980 ; Rocha Filho et al., 1985 ; Tuncer, 1988 ; Esaki et Jiang, 1999).

2 CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude située à environ 17 Km au Nord d'El Milia (NE Algérie) (Fig.1). Du point de vue géologique la zone d'étude est encaissée dans les formations géologiques de l'édifice de Beni-Ferguène, cette unité fait partie du massif de la Petite Kabylie qui s'étale le long du littoral sur 150Km entre Filfila (Skikda) à l'Est et la région de Jijel à

l'Ouest et large de 50Km du Nord vers le Sud (Fig.1). L'unité de Beni-Ferguène est caractérisée par la superposition de plusieurs sous-unités géologiques probablement Alpines. La sous-unité supérieure paragneissique (micaschistes feldspathiques ou gneiss fin), recoupée par des sills d'amphibolites. La sous-unité intermédiaire métapélitique dans laquelle s'intercalent des lames d'épaisseurs plurimétriques d'orthogneiss ocellés (dalles d'orthogneiss) et de granite à sillimanite. La sous-unité inférieure formée par alternance de métapélites claires, de métapélites sombres, des lentilles de pyroxénites et de granite à grain fin orthogneissifiés et à couronne de grenat. Cet édifice est chevauché au Sud par l'édifice supérieur (unité de socle S.S) et recouvert au Nord par les formations Nummidiennes, l'Oligo-Miocène Kabyle (OMK) et les olistostromes de flyschs. Le pluton granitique de Beni Touffout traverse l'ensemble des formations de cet édifice. Une des particularités de cet édifice réside dans la superposition de deux métamorphismes M1 (BP) et M2 (HP), où on note un remplacement des paragenèses minérales de BP par des paragenèses minérales de HP (Mahdjoub, 1991). Le massif est caractérisé par une couverture végétale très dense, un climat méditerranéen chaud en été et froid en hiver et un réseau hydrographique très développé dans tout le massif.

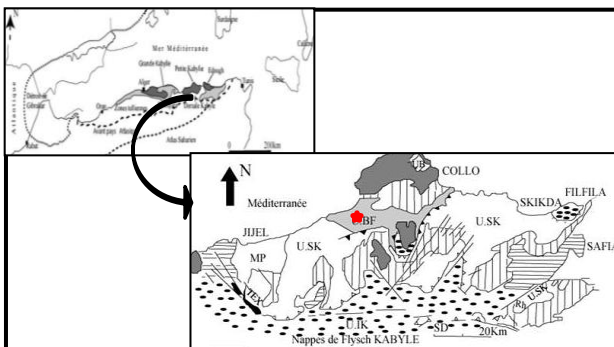


Figure 01: Position géographique et structurale du massif de la Petite Kabylie dans le domaine interne maghrébin (Durand D.M, 1969 ; Vila J.M, 1980)

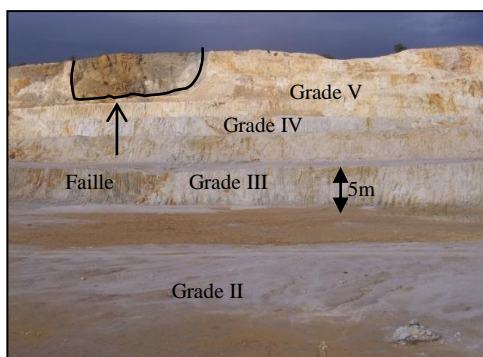


Figure 02: Profil d'altération du site Tamazert

Les échantillons sur lesquels cette étude est basée ont été collectés à partir du gisement de kaolin (Tamazert) selon un profil de direction Nord-Sud (06 échantillons), la roche mère (facies granulitique) a été échantillonnée. Les lames minces ont été confectionnées au laboratoire de Pétrologie sédimentaire à l'université de Liège Belgique. Les analyses chimiques ont été effectuées au "Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques" (CRPG -CNRS Nancy, France) par Spectrométrie d'Emission Atomique utilisant une source plasma à couplage inductif (ICP-AES) pour les éléments majeurs. La perte au feu (LOI) a été déterminée à 1000 °C après la fusion avec LiBO₂ et dissolution dans HNO₃. La limite de détermination (LD) est calculée comme 6 fois l'écart type relatif de 100 mesures de blanc. L'incertitude de mesure est calculée pour 200 mg d'échantillons préparés. Le blanc analytique soustrait du signal de l'échantillon était une solution de LiBO₂ (900 mg, dilués dans 100 ml de HNO₃- H₂O₂ mélange de glycérol).

3 RÉSULTATS

3.1 Description pétrographique du profil d'altération (Boukoffa, 2008)

Les caractéristiques pétrographiques des échantillons formant le profil d'altération du site kaolinisé de Tamazert sont résumées dans le tableau 1. La roche mère (Grade I) représente un gneiss ocellé, dont les yeux (centimétriques) sont formés par un assemblage quartzo-feldspathique. Elle est composée de quartz, sub-ovoïde ou xénomorphe est souvent fracturé et à extinction onduleuse ; les feldspaths potassiques, représentés par l'orthose et le microcline présentant différentes sections et différentes tailles; les plagioclases de type (oligoclase à andésine) en lattes rectangulaires présentent un légère séricitisation; les micas (muscovite et biotite), se présentent en lattes allongées entourant les cristaux de feldspaths potassiques et de plagioclases. La biotite, moins abondante que la muscovite est souvent blindée dans les cristaux de quartz. Les minéraux d'altération sont représentés par la chlorite qui se développe aux dépens de la biotite et la séricite avec des traces de kaolinite se développant aux dépens de plagioclases et feldspaths potassiques. Les minéraux accessoires sont représentés par du zircon, de la monazite et de l'apatite. Au fur est à mesure de l'augmentation de l'intensité de l'altération un mélange de (séricite + argile) remplace les grains de plagioclases et micas jusqu'au la disparition totale de ces grains et la dominance des minéraux argileux néoformés.

Tableau 01: Grade d'altération et caractéristiques pétrographiques des échantillons

N° d'éch	Grade d'altération	Description pétrographique
Rm	Grade I	- structure : ocellée, foliée (originelle) - quartz; micas (biotite et muscovite); feldspaths potassiques et plagioclases: états frais - minéraux accessoire: apatite ; zircon et monazite
T1	Grade II	- structure conservée: visible à l'œil nu - quartz frais
T2		- légère altération des micas (biotite et muscovite), plagioclases et feldspaths potassiques - développement des nodules de kaolinite ; chlorite et séricite
T3	Grade III	- structure encore conservée - quartz fracturé
T4		- biotite et plagioclases totalement altérés - stade avancé des feldspaths potassiques
T5	Grade IV	- disparition de la structure originelle - dissolution de quartz - kaolinite avec des reliques de feldspaths potassiques
T6	Grade V	- développent d'un sol blanc (kaolinite + muscovite + quartz)

Les photos (a, b, c et d) de la (fig.3) montrant la succession du degré d'altération de la base au sommet du profil de Tamazert. Les minéraux susceptibles d'être altérés en premier lieu sont les minéraux feldspathiques (feldspath potassique et plagioclase) avec les micas (biotite). La progression du degré d'altération provoque la destruction totale des feldspaths et les autres minéraux micacés pour donner une phase ultime de l'altération (kaolinite). La chloritisation et la séricitisation (photos. g et h) sont des phénomènes accompagnateurs de l'altération des roches et minéraux.

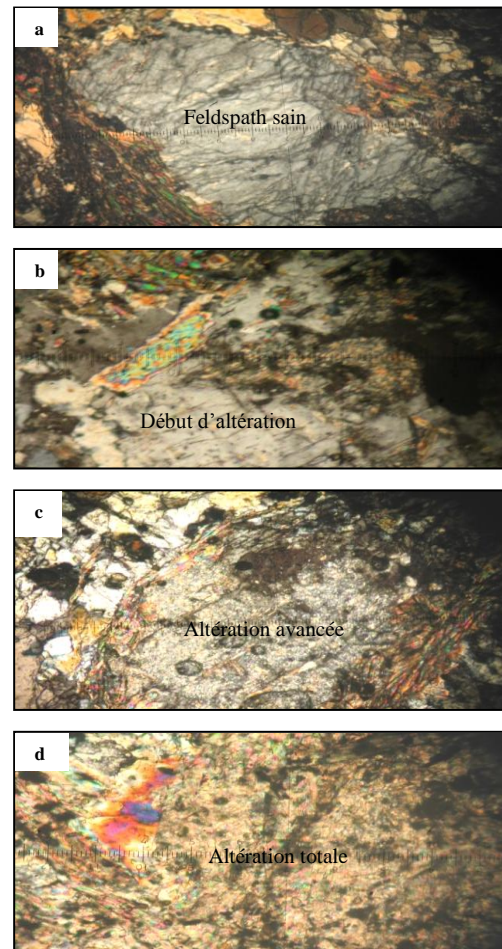


Figure 03 : Photos de lames minces (LP x 30) montrant le degré d'altération dans le profil de Tamazert

(a): feldspath non altéré dans la roche mère, (b): début d'altération du feldspath, (c): feldspath fortement altéré, (d): feldspath totalement altéré en kaolinite, (e): zircon minéral accessoire) dans la roche mère, (f): apatite (minéral accessoire) dans la roche mère, (g): phénomène de séricitisation, (h): phénomène de chloritisation avec oxydes de (Fe et Ti).

3.2 Géochimie

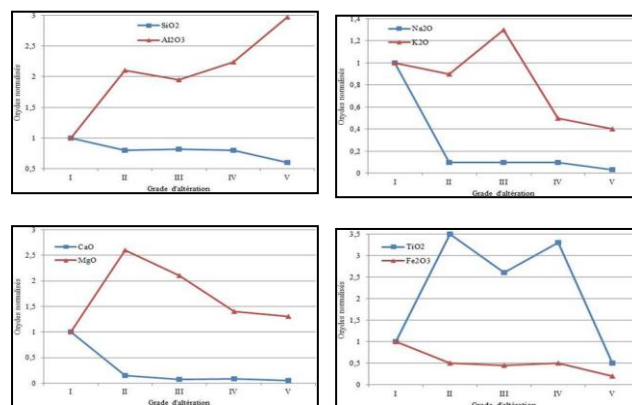
Les données de l'analyse chimique sur roche totale sont résumées dans le tableau 2. Dans cette étude, aucun élément n'a été supposé être immobile. Au contraire, tous les éléments ont été normalisés en utilisant leur concentration roche-mère. Si la valeur normalisée de l'élément X est inférieur à 1, cela signifie que l'élément appauvri (mobilisé) dans l'échantillon d'altération par rapport à la roche-mère; A l'inverse, si la valeur est supérieure à 1, signifié que l'élément a été enrichi (fixé).

Tableau 02 : Composition chimique des éléments majeurs (% en poids)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
SiO ₂	59.00	64.55	63.28	61.07	48.72	64.51
Al ₂ O ₃	26.38	21.39	22.50	25.60	34.02	21.72
Fe ₂ O ₃	0.70	0.77	0.57	0.26	0.26	0.72
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	<1.d	0.00
MgO	0.42	0.46	0.33	0.23	0.22	0.39
CaO	<1.d	0.16	0.05	0.05	0.03	0.04
Na ₂ O	0.04	0.56	0.23	0.09	0.07	0.24
K ₂ O	2.96	4.35	5.49	1.90	1.76	5.12
TiO ₂	0.56	0.48	0.37	0.50	0.60	0.39
P ₂ O ₅	0.07	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04
Pf	9.74	6.62	6.57	9.76	13.86	6.93
ρ _(app)	1.13	1.14	1.14	0.93	0.91	1.12

Le comportement des éléments chimiques pendant l'altération chimique est plus complexe (Düzgoren-Aydin et al., 2002). Les analyses chimiques montrent la dominance de deux oxydes, SiO₂ (60% en moyenne) et Al₂O₃ (25% en moyenne). Les éléments alcalins (Na₂O et K₂O) présentent deux comportements différents. On note la disparition quasi-totale de Na₂O dans tous les échantillons, au contraire K₂O montre des fluctuations de teneurs d'un échantillon à l'autre le long du profil d'altération, certains échantillons sont enrichis suite à la présence de fragments de feldspaths frais (Dominguez et Murray, 1999). D'autres échantillons sont appauvris, ce qui reflète la faible abondance de feldspaths potassiques dans la roche mère altérée. Les éléments alcalino-terreux Ca et Mg, les oxydes de fer et de titane Fe₂O₃; TiO₂ et le P₂O₅ montrent des teneurs plus faibles que les teneurs de la roche mère. La perte au feu (Pf) augmente avec l'augmentation du degré d'altération de chaque échantillon (Sueoka et al., 1985). Les diagrammes (fig.5) montrent le comportement des principaux oxydes par rapport à la progression du degré d'altération le long du profil. Ces diagrammes ont été tracés à partir des teneurs normalisées de chaque oxyde dans l'échantillon altéré par rapport à la teneur de chaque oxyde dans la roche mère ($X_{alt} / X_{R.mère}$) où X est l'élément chimique considéré pour la normalisation. On remarque un comportement divergent

entre SiO₂ et Al₂O₃. La progression du degré d'altération provoque la décomposition de feldspaths ce qui conduit à l'augmentation des teneurs en Al₂O₃ et lessivage de SiO₂. Le diagramme des oxydes K₂O et Na₂O montre clairement les fluctuations de K₂O par rapport à la diminution nette de Na₂O. Le potassium K est retenu dans le profil d'altération sous forme d'illite néoformé et muscovite hérité pour former un mélange illite/muscovite. Les diagrammes (CaO et MgO), (TiO₂ et Fe₂O₃) présentent des comportements similaires. Le plus fort lessivage de ces éléments est dû à leur forte mobilité durant le processus d'altération.

**Figure 04: Diagrammes des éléments majeurs normalisés par rapport à la roche mère vs degré d'altération**

3.3 Indices d'altération

Les indices d'altération sont principalement proposés pour les roches felsiques et/ou intermédiaires altérées sous un climat humid bien drainé (Ruxton, 1968 ; Ifran, 1996). Dans ce travail quelques indices (R, CIA, CIW, PIW et PIA) ont été utilisés pour tester leurs aptitudes d'application sur un socle métamorphique acide hétérogène. Les indices d'altération chimique sont basés sur la composition des éléments majeurs de la roche, à l'exception de l'abrasion du pH des grains de feldspaths. Les résultats de calcul des indices d'altération et les paramètres statistiques sont résumés dans le tableau 3.

Tableau 03: Sommaire des calculs de paramètres statistiques et indices d'altération

Paramètres statistiques des indices d'altération					Indices d'altération						
	R ²	t-test	p.valeurs	n.s.(%)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	
R	0.577	5.663	≤0.0002	95	R	2.23	3.01	2.81	2.38	1.43	2.96
WIP	0.720	5.294	≤0.0004	95	CIA	89.80	80.83	79.03	92.61	95.05	96.14
CIA	0.710	208.6	≤0.0001	95	CIW	99.84	96.74	98.77	99.45	99.7	98.73
CIW	0.256	29.551	≤0.0001	95	WIP	2418	3878	4567	1610	1378	4281
PIA	0.100	18.070	≤0.0001	95	PIA	99.82	95.94	98.38	99.41	99.69	68.14

n.s : niveau de signification

Les indices d'altération ont été tracés dans des diagrammes empiriques de progression d'altération en fonction de la densité apparente (fig.5). Tous les indices (R, CIW, CIP, CIA et PIA) montrent des tendances appropriées à l'indice

d'altération considéré avec de bons coefficients de corrélation malgré l'hétérogénéité des roches altérées. CIW montre une corrélation minimal de 0.256 avec p-valeur correspondant 0.0001. Les coefficients de corrélation élevés

avec des faibles p -valeurs sont souhaitables. Cependant, pour les manteaux d'altération hétérogènes un p -valeurs inférieur à 0.06 est statistiquement considéré comme significatif et représente un niveau de signification de 88%.

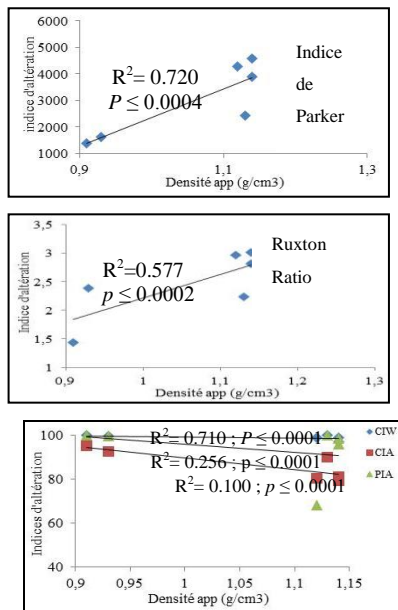


Figure 05: Diagrammes empiriques de progression de l'altération du profil de Tamazert

4 DISCUSSION

L'étude pétrographique montre une succession logique d'altération des minéraux constituant les différents types de roches et surtout gneissiques. Vu leur faible température de cristallisation, les feldspaths potassiques, les plagioclases et mica (biotite) s'altèrent en premier lieu pour donner des minéraux secondaires (chlorite, séricite et kaolinite). La progression du degré d'altération, favorisent la dégradation des minéraux primaires de la roche et se poursuit jusqu'à la disparition quasi complète de ces minéraux et leur remplacement par de minéraux néoformés. Les indices d'altération exprimés dans cette étude ont fait l'objet d'évaluer leurs potentielle d'application et de mesure de l'intensité d'altération chimique sur un profil métamorphique hétérogène. Aucun indice d'altération seule ne peut satisfaire tous les critères énoncés par certains auteurs (Harnois, 1988; Eswaran, 1973; Fedo et al., 1995) et aucun indice d'altération ne donne un résultats équivoque lorsqu'elle est appliquée à des tels environnement d'altération. Ruxton ratio (R) ; indice de Parker (WIP) et l'indice d'altération chimique (CIA) montrent des fortes corrélations où $0.577 < R^2 < 0.720$ et p -valeurs très faible (≤ 0.0001). CIW et PIA ne donnent pas d'informations satisfaisantes concernant la progression de l'altération dans des profils hétérogènes. WIP est souhaitable pour l'application à ce type d'environnement d'altération modéré, mais avec prudence d'utilisation pour les altérations intenses puisqu'elle utilise dans sa formulation que les éléments alcalins et alcalino-terreux qui sont très mobiles durant l'altération.

5 CONCLUSION

Dans ce travail nous avons suivi le développement d'un manteau d'altération (kaolinite) sur un socle métamorphique hétérogène et sous un climat méditerranéen par la combinaison des caractéristiques pétrographique du profil d'altération qui a permet de suivre l'altération de la roche mère jusqu'à la roche totalement altérée. On note, l'évaluation des indices d'altération chimique afin de tester leur potentielle d'application sur des socles métamorphiques hétérogènes acides. La corrélation des différents indices entre la roche non altérée et les échantillons altérés tracée sur les diagrammes empiriques de progression d'altération montre clairement que certains indices d'altération ne s'appliquent pas tous sur les mêmes types de socle (ex: R, CIW et PIA) et leur application nécessite la prudence d'utilisation des données chimiques et la connaissance du stage d'altération subit par les échantillons du profil. Au contraire, PIW s'applique pour les socles homogènes et hétérogènes. en général, notre site d'étude peut être subdivisée en cinq niveaux : 1- roche mère non altérée ; 2- boules en masses légèrement fracturés ; 3- boules fortement fracturés et début d'altération dans la partie sommitale ; 4- fortement altéré à structure conservée ; 5- développement d'un sol blanc. Il est difficile de distinguer clairement sur le terrain les limites entre les différents niveaux.

REMERCIEMENT

Les auteurs tiennent à remercier vivement Joel Otten, Nicolas Delmelle ainsi que le personnel du Département de Géologie pour leur soutien durant mon stage au sein de l'AGES à l'Université de Liège. Ce travail est réalisé dans le cadre du programme PNR financé par le gouvernement algérien.

REFERENCES

- [1] Boukoffa, M. (2008). Caractérisation géologique, géochimique et minéralogique du phénomène de kaolinisation (exemple: gisement de Tamazert NE Algérie). Mém, Magister. Univ Annaba. 92p.
- [2] Chittle-bourough, D, J. (1991). Indices of weathering for soils and paleosols formed on silicate rocks. Australian Journal of Earth Sciences 38, 115- 120.
- [3] Düzgören-Aydin, N.S; Aydin, A ; Malpas, M. (2002). Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. Engineering Geology. 63, 99-119.
- [4] Dominguez, E ; Murray, H.H.(1999). The Lote 8 kaolin deposit, Santa Cruz Province, Argentina. In: Kodama, H., Mermut, A.R., Torrance, K.K. (Eds.), Genesis and paper industrial applications. Clay for Our future. Proc. 11th Int. Clay Conf., Ottawa, Canada 1997. ICC97 Organizing Committee, Ottawa, Canada, pp, 57-64.
- [5] Durand, D.M. (1969). Mise au point sur la structure Nord-Est de la Berberie ; Bull. Serv. Carte Géol Alg. 39, 89-131.

- [6] Esaki, T; Jiang, K. (1999). Comprehensive study of weathered conditions of welded tuff from a historic stone bridge in Kagoshima, Japan. *Engng Geol.* 55, 121-130.
- [7] Eswaran, H; Stoops, G; De Paepe, R. (1973). A contribution to the study of soil formation on Isla Santa Cruz, Galapagos. *Pedologie* 23, 100-122.
- [8] Fedo, C.M; Nesbitt, H.W; Young, G.M. (1985). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implication for paleoweathering conditions and provenance. *Geology* 23, 921-924.
- [9] Ifran, T.Y. (1996). Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong. *Quart. J. Engng Geol.* 29, 5-35.
- [10] Jason R. Price, Michael A. Velbel (2003). Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical geology*, 202, 397 – 416.
- [11] Harnois, L. (1988). The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sediment. Geol.* 55, 319- 322.
- [12] Mahdjoub, Y. (1991). Cinématique des déformations et évolution P, T anté-alpine et alpine en Petite Kabylie (Algérie Nord Orientale): un modèle d'évolution du domaine tellien interne; Thèse-es-Science USTHB Alger. 196p.
- [13] Nesbitt, H.W; Young, G.M.(1982). Early Proterozoic climate and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature* 299, 715-717.
- [14] Rocha Filho, P; Antuenes, F.S; Falcao, M.F.G, (1985). Quantitative influence of weathering upon the Brasilia 1, 281-294.
- [15] Malmo, S. (1980). Abrasive Ph of feldspar as an engineering index for weathered granite. *Bull. IAEG* 22, 207-211.
- [16] Matsuo, S; Nishida, K. (1968). Physical and chemical properties of decomposed granite soils. *Soils Found.* 8, 10-20.
- [17] Onodera, T.F; Yoshinaka, R; Oda, M. (1974). Weathering and its relation to mechanical properties of granite. *Third Int. Conf. ISRM, Denver 2A*, 71-78.
- [18] Tuncer, E.R. (1988). Pore size distribution characteristics of tropical soils in relation to engineering properties. *Second Int. Conf. Geomech. Trop. Soils, Singapore 1*, 63-70.
- [19] Ruxton, B.P. (1968). Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *Journal of Geology*, 76, 518- 527.
- [20] Sueoka, T. (1988). Identification and classification of granitic residual soils using chemical weathering index. *Second Int. Conf. Geomech Trop. Soils, Singapore 1*, 55-61.
- [21] Sueoka, T. (1985). Identification and classification of granitic residual soils using chemical weathering variation in four index. *Scnd Int. Conf. Geomech. Trop. Soils, Singapore 1*, 55-61.
- [22] Vila, J.M. (1980). La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisien. *Thèse Sc. Paris.* 665p.