



L'origine du kaolin de l'arène de la granodiorite des Béni-Snassène (Maroc nord-oriental) The origin of Kaolin in the Béni-Snassène granodiorite sand (Northeastern Morocco)

Hafida Dahmani^{1*}, Mohamed Jadid², Kamal El Hammouti¹ et Fouad Talbi²

¹ *Laboratoire des Géosciences Appliquées, Faculté des Sciences, Université Mohammed 1er, Oujda, Maroc.*

² *Laboratoire de Géopatrimoine, Géo-environnement et Prospection Minière et Hydrique, Université Mohammed 1^{er}, Oujda, Maroc.*

Received 10 May 2016; Revised 21 Nov 2016, Accepted 25 Nov 2016

**Corresponding author. E-mail: imyass2007@hotmail.fr ; Tel: (+212-661690302)*

Abstract

The Béni-Snassène granitic massif is composed principally of granodiorite that was the object of a strong arenisation accompanied with a locally strong kaolinization. The weathering sequences of this granodiorite have been studied by macroscopic and microscopic analyses, X-Ray diffraction (XRD) and chemical analyses (XRF). Chemical Index of Weathering (CIW) and the Alteration Index of Ishikawa (AI) were calculated and used as weathering proxies. The results show that the weathering is mostly meteoric than hydrothermal alteration. The lack of sulphides within the kaolinized zone suggests a supergene kaolinization. However, the influence of the hydrothermal alteration is certain and proven by the presence of Pb-Zn-Cu-Ba mineralization indices.

Keywords: Granodiorite, Alteration, Kaolinization, Béni-Snassène, Northeastern Morocco.

Résumé

Le massif granitique des Béni-Snassène est formé principalement de granodiorite qui fait l'objet d'une forte arénisation accompagnée d'une kaolinisation localement plus poussée. La séquence d'altération de cette granodiorite a été étudiée au moyen de l'analyse macroscopique et microscopique, de la diffraction des Rayons X (DRX), des analyses chimiques (XRF), ainsi que le calcul d'indices d'altération météorique (CIW) et hydrothermale d'Ishikawa (AI). Les résultats ont mis en évidence une altération météorique qui l'emporte largement sur l'altération hydrothermale. Ce cadre typiquement météorique et l'absence au sein de la zone kaolinisée de filon de silice et de sulfures constituent autant de raisons pour envisager une kaolinisation supergène. Cependant, l'influence de l'altération hydrothermale est certaine et révélée par la présence dans la région d'indices de minéralisations Pb-Zn-Cu-Ba.

Mots clés: Granodiorite, Altération, Kaolinisation, Béni-Snassène, Maroc nord-oriental.

1. Introduction

Au cours de leurs histoires géologiques, les massifs granitiques peuvent être l'objet aussi bien d'une altération hydrothermale (hypogène), induite par l'action de fluides chauds, que d'une altération météorique (supergène). Ces deux processus d'interactions eau/roche, qui dépendent du climat et des facteurs de station [1, 2, 3], conduisent à la transformation des minéraux primaires en minéraux argileux en plus des éléments solubles [4].

Bien que le massif granitique des Béni-Snassène et ses environs aient fait l'objet de nombreux travaux géologiques [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], aucune étude sur l'évaluation du type et le degré d'altération de ce granite et sa kaolinisation n'a été effectuée. Le présent travail est une contribution à la caractérisation pétrographique, minéralogique et géochimique d'un profil d'altération développé sur le granite des Béni-Snassène dans le but de mettre en évidence le type d'altération. Pour ce faire, des indices d'altération météorique (CIW) et hydrothermale d'Ishikawa (AI) ont été calculés pour déterminer la part de chacun de ces processus dans la kaolinisation de ce massif granitique.

2. Cadre géographique

Le massif granitique des Béni-Snassène est situé à une vingtaine de kilomètres au Sud de Berkane et à une trentaine de kilomètres au Nord-Ouest de la ville d'Oujda. Ce pluton affleure sur une superficie de 17km² et présente une forme approximativement ovoïde qui s'étend du Nord-Ouest au Sud-Est sur environ 7km de long et 2 à 3km de large (Fig. 1).

3. Contexte géologique

Situé au Nord-Est du Maroc (Fig. 1), le massif des Béni-Snassène se présente comme un vaste bombement anticlinal orienté ENE-WSW. Il est composé d'un socle affleurant sous forme de boutonnières et constitué pour l'essentiel d'une série schisto-gréseuse à caractère flyschoidé, d'âge dévonien inférieur à moyen [13]. Ce socle est localement recoupé de stocks granitiques tardi-hercyniens dont la granodiorite des Béni-Snassène [11] datée de 247 ± 7 Ma [8]. La granodiorite affleure principalement sur le versant NE de Jbel Bou Zabel, le SW du Jbel Bou Hammed et le versant SW de Jbel Fourhal.

Sur cet ensemble primaire pénéplané en grande partie, se sont déposés des conglomérats du Permo-Trias surmontés de basaltes doléritiques intercalés par des passées carbonatées et d'argiles triasiques [14]. Ces dernières sont recouvertes de puissantes assises carbonatées du Jurassique inférieur, elles-mêmes coiffées à leur sommet par des grès et des shales du Jurassique supérieur [15]. Après une grande lacune sédimentaire englobant tout le Crétacé, le Paléogène et la base du Néogène se déposent, en discordance angulaire sur le Jurassique et le Trias. Le Néogène est représenté par une assise molassique (conglomérats, grès et argiles) annonçant la transgression miocène [15]. Le Quaternaire est composé de faciès fluvio-lacustres localement recoupés de basaltes alcalins plio-quaternaires datés de 6.3 et 0.65 Ma (39 Ar/ 40 Ar) [16].

Du point de vue structural, le socle paléozoïque et sa couverture méso-cénozoïque ont subi les effets conjugués des orogénèses hercynienne [6] et atlasique [17]; donnant lieu à une variété de structures tectoniques dont les plis et les schistosités associées, en plus des fractures et des failles de direction NE-SW, NW-SE, ENE-WSW à E-W et N-S [17].

4. Matériel et méthodes

L'analyse d'un profil d'altération sur la granodiorite des Béni-Snassène a été effectuée sur le flanc Sud-Ouest de Jbel Foughal et plus précisément dans la localité Jdayen (Fig. 1 et 2).

Le profil d'altération étudié a été exploré suivant une toposéquence longue de 30m environ le long d'une falaise, afin de prendre en compte la variété des matériaux observés. Les échantillons ainsi prélevés ont été étudiés du point de vue macroscopique et au microscopique polarisant. La détermination des minéraux argileux a été faite par diffraction des rayons X (DRX) au laboratoire de Minéralogie de l'Université de Liège en Belgique. Le diffractomètre est de type Bruker D8 Eco-Advance couplé à un logiciel de type EVA et présentant les caractéristiques suivantes: une source anticathode CuK α ($\lambda = 1,5418\text{\AA}$), un générateur de haute tension (40 kV; 30mA ; 1200W), un goniomètre avec un pas de 0,02° 2 Θ , une vitesse de mesure de 0,6 sec/pas, une vitesse de rotation de 2° 2 Θ /min et un détecteur de type compteur à scintillation.

Les analyses géochimiques élémentaires des échantillons étudiés ont été effectuées à l'aide d'un Spectromètre à Fluorescence X de type « Axion », à dispersion de longueur d'ondes 1 kW. Ces analyses chimiques ont été réalisées aux laboratoires des UATRS, CNRST (Rabat).

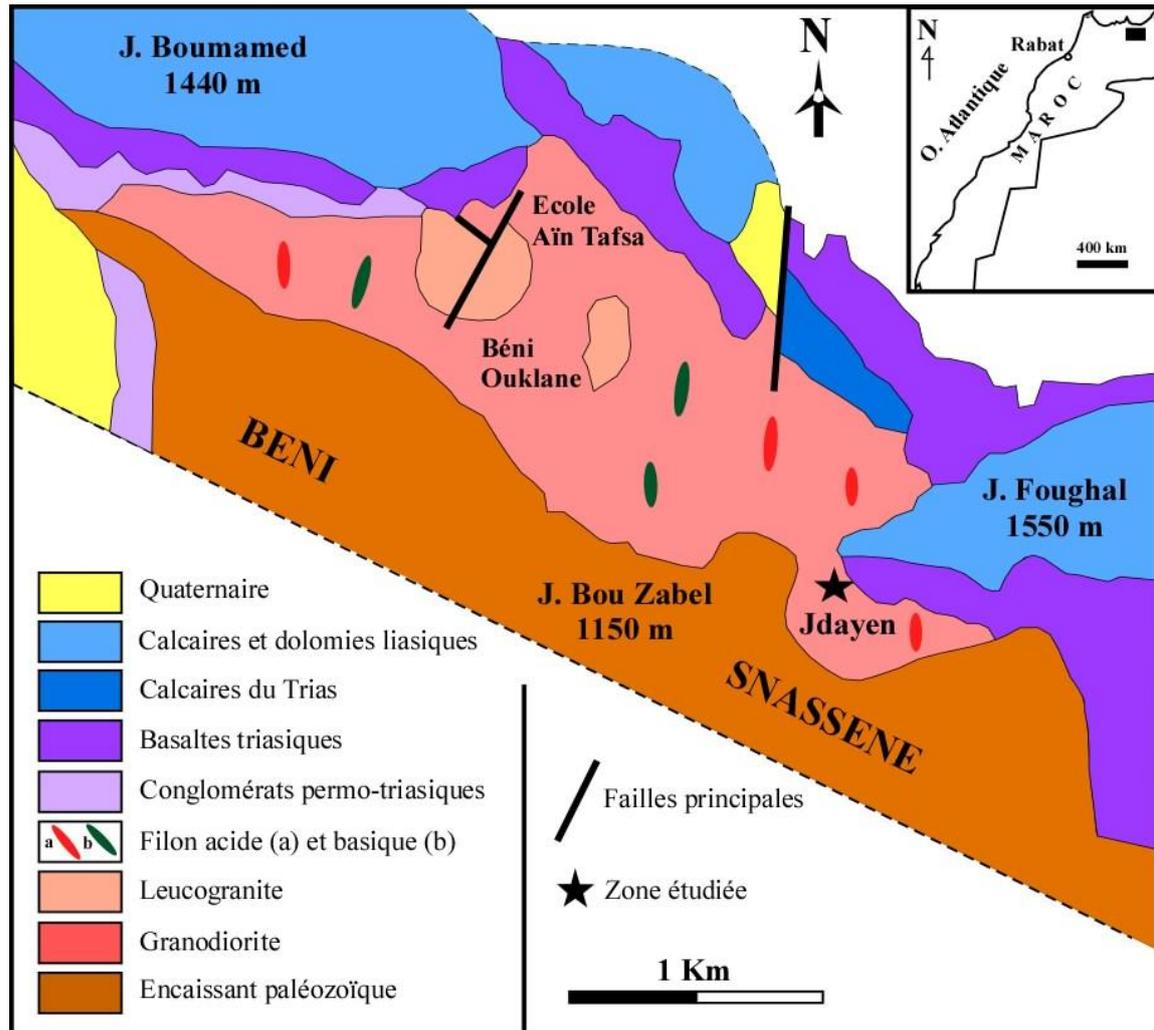


Figure 1 : Carte géologique indiquant les faciès du massif granitique des Béni-Snassène et la localisation de la zone étudiée [7, 10].

Dans le pluton granitique des Béni-Snassène deux principaux types de faciès peuvent être reconnus (Fig. 1):

- Une granodiorite à grain grossier, de couleur grisâtre et constituant la masse principale du massif. Elle est de texture grenue, dépourvue de pyroxène et d'amphibole, et composée de plagioclase, quartz, feldspath potassique, biotite et quelques minéraux accessoires tels l'apatite et le zircon (Fig. 3a).
- Un leucogranite de couleur rosâtre, intrusif dans la granodiorite, de texture grenue relativement fine et constitué de grandes plages de feldspath potassique perthitique, plagioclase, quartz et biotite. Le contact entre le leucogranite et la granodiorite est souvent mal défini et parfois faillé ou marqué par d'abondantes enclaves microgrenues sombres.

Ce massif granitique est également sillonné par un cortège filonien d'aprites, de microgranites et de microgabbros orienté N-S à NNE - SSW et dont la puissance s'étale entre 0,1 et 30m. Il faut signaler aussi que la granodiorite est généralement très altérée aux épontes de ces filons. Il est important aussi de souligner que le manteau d'altération est lardé localement de filonnets centimétriques à décimétriques d'hématite.

La partie supérieure de la granodiorite des Béni-Snassène a été affectée par une altération très poussée sous un climat tropical humide probablement au cours du Jurassique supérieur et Crétacé inférieur [18]. Cette altération est à l'origine d'un manteau d'altération (Fig. 2) qui s'apparente aux arènes de météorisation et dont l'altération est aussi prononcée en surface et décroît progressivement avec la profondeur. La granodiorite altérée montre un

blanchiment général caractérisé macroscopiquement par un aspect crayeux que prennent les feldspaths dès les premiers faciès d'altération. Cette altération, plus ou moins profonde en kaolinite, est bien exprimée dans le lit de l'Oued Guijdane et localement au niveau du contact entre l'intrusion et son encaissant.

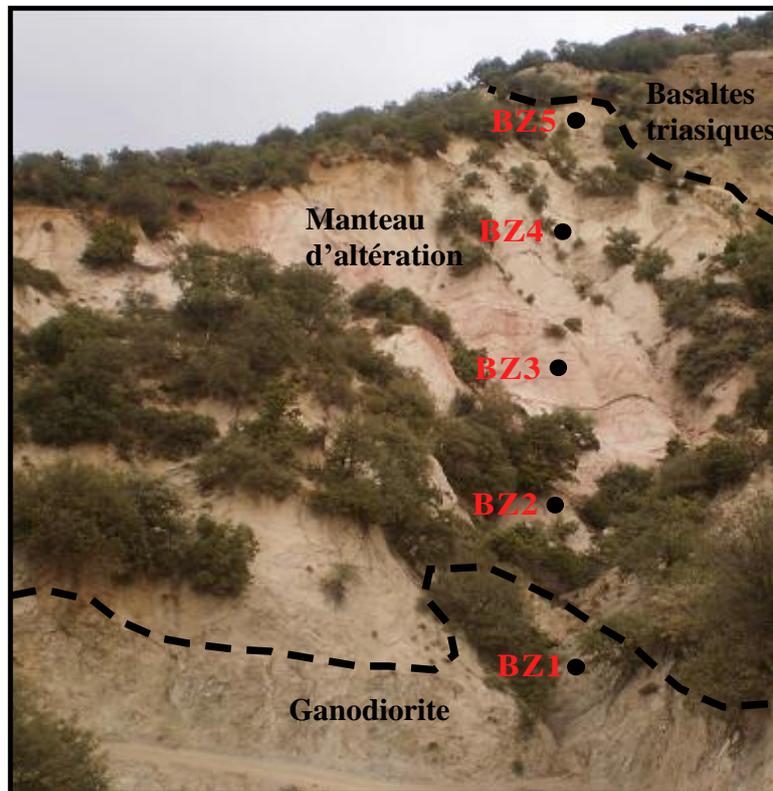


Figure 2 : Profil d'altération étudié et localisation des échantillons analysés.

4.1. Etude pétrographique et minéralogique

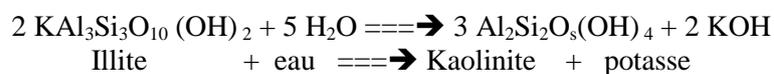
Au microscope polarisant, la granodiorite altérée montre, à côté des feldspaths alcalins et du quartz, des plagioclases plus ou moins complètement séricitisés et des biotites affectées par une chloritisation partielle ou totale (Fig. 3b). Cette altération se manifeste aussi par une microdivision des plagioclases et du quartz (Fig. 3b) résultant de l'apparition de nombreuses fissures microscopiques et d'une altération de certaines propriétés optiques des plagioclases (macles de l'albite moins nette).

Sur le plan minéralogique, le dépouillement des diffractogrammes sur poudre totale obtenus pour l'ensemble des échantillons du profil (Fig. 4) montre essentiellement la présence du quartz, feldspath résiduel, chlorite et une phase argileuse néoformée.

L'analyse DRX sur lames orientées a montré (Fig. 5) qu'indépendamment du lieu de prélèvement dans le profil étudié, les fractions argileuses (< 2 µm) sont principalement constituées d'illite, de kaolinite et accessoirement de chlorite.

L'estimation de l'abondance relative de ces minéraux argileux montre que le minéral dominant dans tous les échantillons du profil est l'illite. La seconde phase correspond à la kaolinite. Cette dernière s'enrichit progressivement de la base du profil (27%) vers son sommet (45%) au profit de l'illite qui décroît de 72% à 46%.

Cet enrichissement en kaolinite au dépend de l'illite de la base au sommet du profil peut être expliqué par le remplacement, lors d'un drainage intense, de l'illite par la kaolinite selon la réaction suivante [19] :



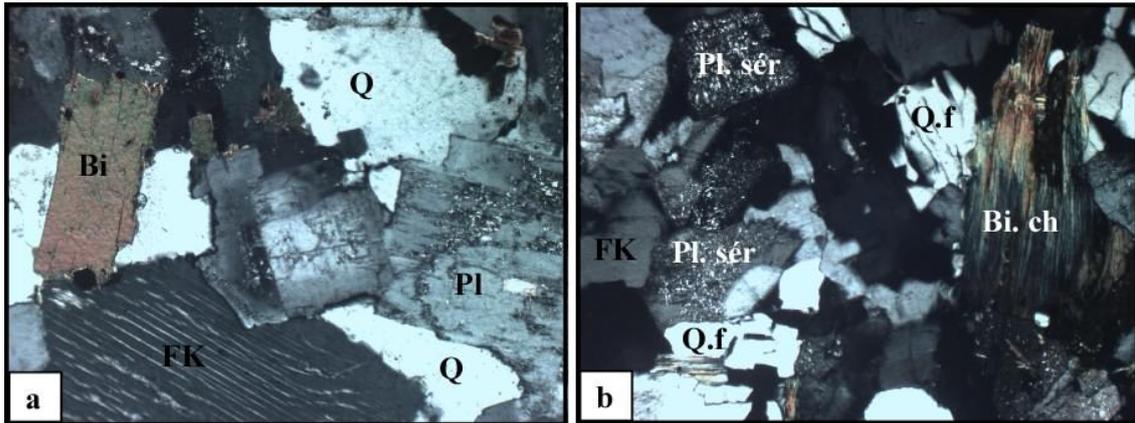


Figure 3 : Microphotographies en lumière polarisée, montrant (a) : granodiorite fraîche (BZ1) et (b): granodiorite altérée (BZ3) (Q: Quartz, Q.F: Quartz fissuré, Pl: Plagioclase, Pl.Ser: Plagioclase séricité, FK: Feldspath potassique, Bi: Biotite, Bi. Ch: Biotite chloritisée).

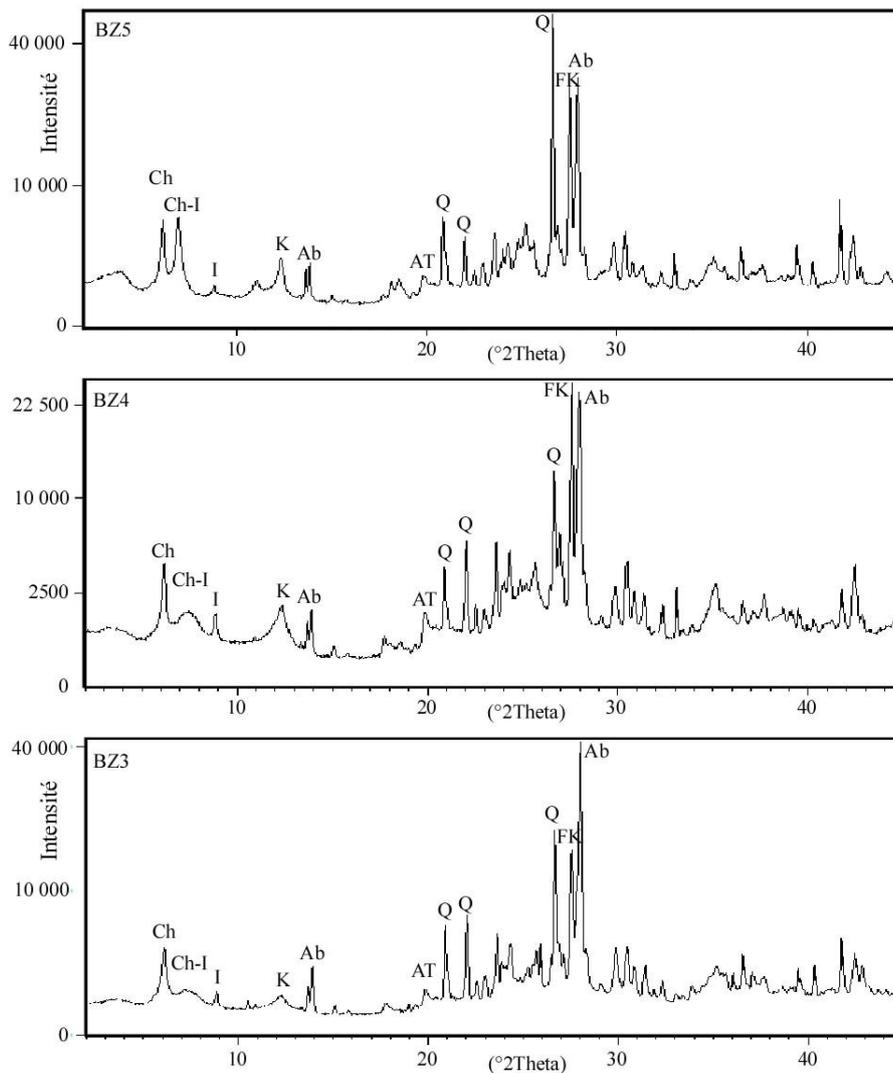


Figure 4 : DRX sur la poudre de roche totale des échantillons BZ1, BZ2 et BZ3 pris le long du profil étudié. (Ch: Chlorite, I: Illite, K: Kaolinite, AT: Argile totale, Q: Quartz, FK: Feldspath potassique, Ab: Albite).

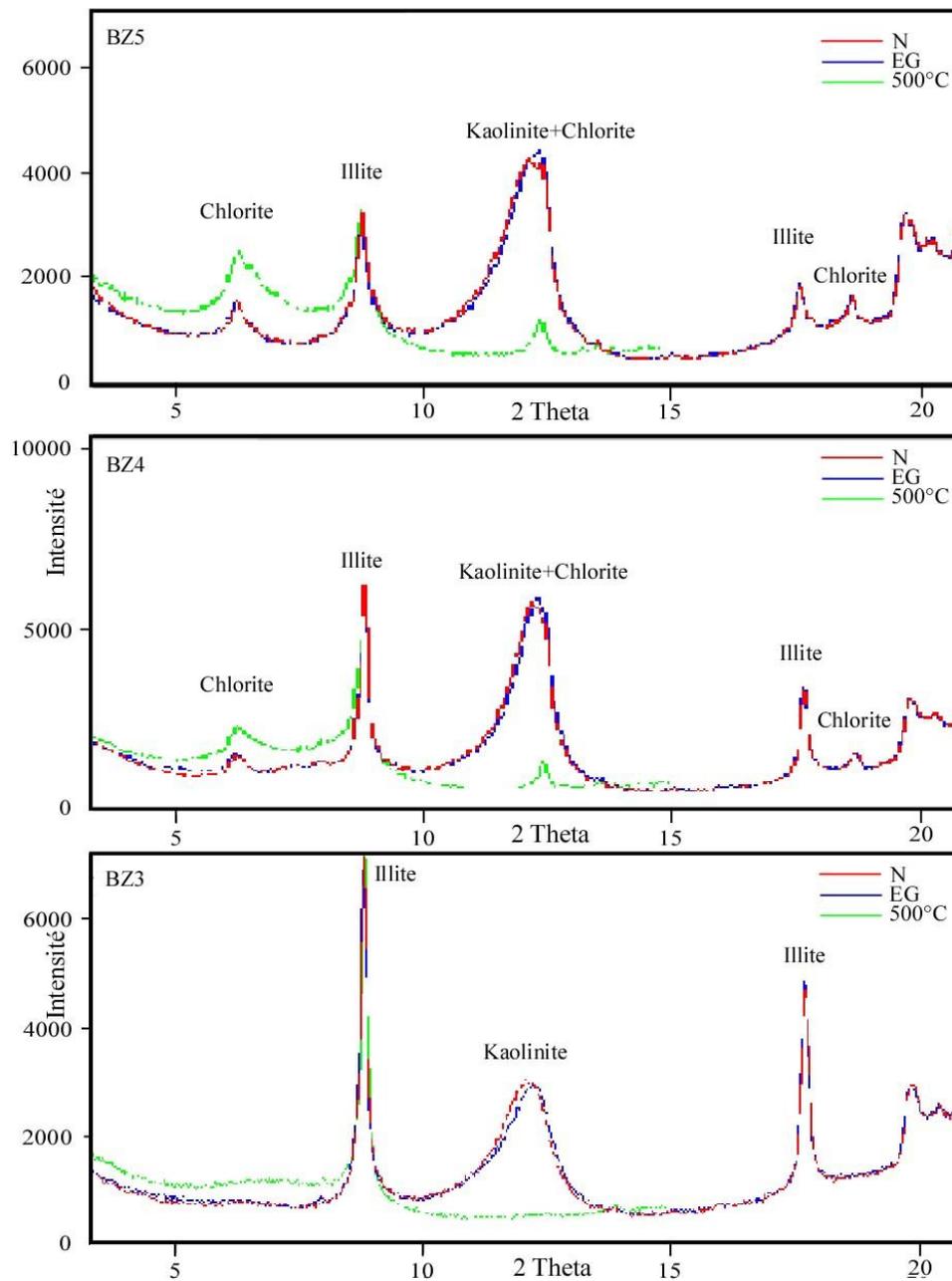


Figure 5 : DRX sur la fraction argileuse (< 2 µm) des échantillons BZ3, BZ4 et BZ5 pris le long du profil. (N: Normal ; EG: Traitement à l'éthylène glycol ; 500°C: Chauffage à 500°C pendant 4h).

4.2. Géochimie

Les résultats des analyses chimiques, consignés dans le Tableau 1, montrent des variations qui sont en étroite relation avec le degré d'altération. Les indicateurs chimiques de l'existence d'une altération se reflètent aussi bien par de fortes valeurs de la perte au feu (P.F > 3%), que par le comportement des éléments chimiques dans la roche (Fig. 6). Ainsi la teneur en silice est très élevée dans les roches saines et sa teneur avoisine 67% contre 54 % en moyenne dans la roche altérée au sommet du profil. Il y a aussi une forte augmentation des pourcentages d'Al₂O₃ (28,3%) et de Fe₂O₃ (2,2%) dans les roches altérées comparativement aux roches saines qui est respectivement en moyenne de 14,7% et 0,7 %. D'ailleurs, le fer libéré lors de la kaolinisation de la granodiorite des Béni-Snassène a pu être accumulée sur place sous forme de filonnets d'hématite, assez fréquents dans la partie la plus kaolinisée du massif.

Ces mêmes analyses chimiques révèlent en effet une diminution sensible et progressive de CaO alors que K₂O présente une diminution puis un léger enrichissement vers la surface. Les teneurs de Na₂O se maintiennent ou augmentent légèrement. Celles de MgO et de TiO₂ ne montrent pas de variations significatives ; le titane est cependant légèrement plus lessivé que le magnésium.

Tableau 1: Teneurs en éléments majeurs (en % poids) des échantillons prélevés le long du profil d'altération étudié (* analyse d'El Hadi et al., [11] ; nd : non déterminé).

Echantillons	BZ1*	BZ2	BZ3	BZ4	BZ5
SiO ₂	67,57	67,44	55,90	54,80	54,80
TiO ₂	0,55	0,53	0,37	0,35	0,33
Al ₂ O ₃	15,42	15,64	25,80	27,90	28,3
Fe ₂ O ₃	0,61	0,55	2,84	2,34	2,20
FeO	3,06	2,76	nd	nd	nd
MnO	0,10	0,08	0,15	0,13	0,14
MgO	1,71	2,07	1,95	2,08	2,00
CaO	2,77	2,45	1,57	1,36	0,88
Na ₂ O	3,75	3,69	4,51	3,63	3,55
K ₂ O	3,69	2,26	2,37	3,04	2,97
P ₂ O ₅	0,00	0,19	0,31	0,25	0,22
PF	0,61	2,05	3,97	3,77	4,40
Total	99,84	99,71	99,74	99,65	99,79
CIW	57	59	71	76	79
AI	42	42	42	50	52

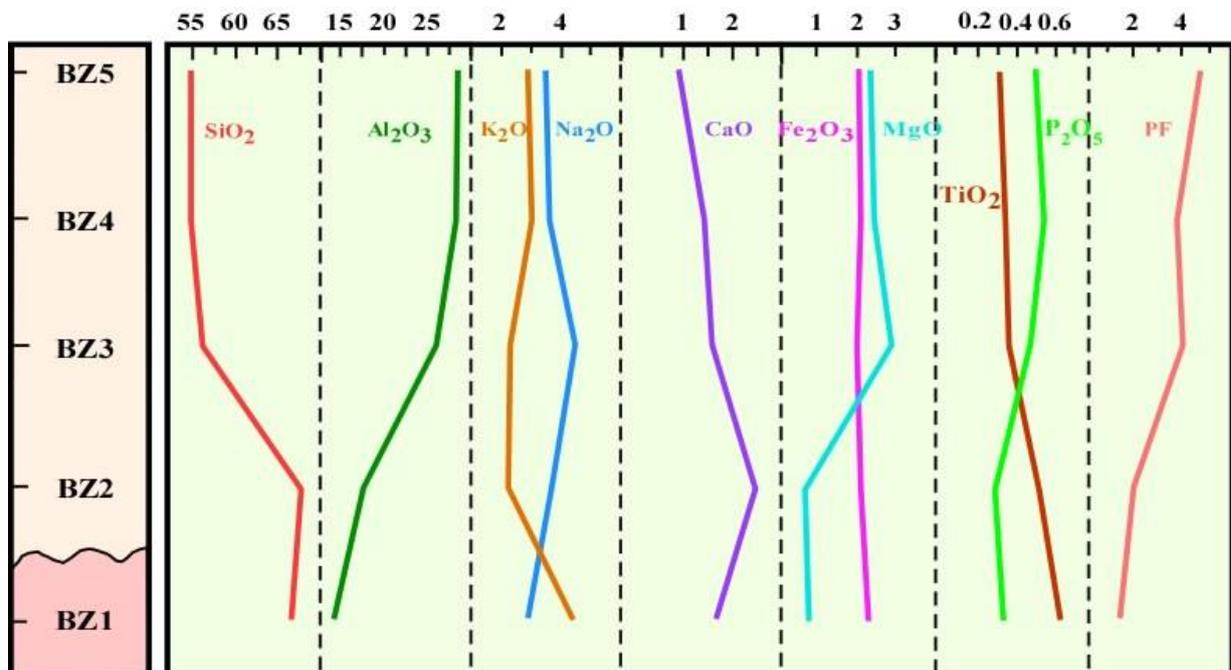


Figure 6 : Evolution verticale des éléments majeurs (en % poids) et de la perte au feu (PF) le long du profil d'altération étudié.

4.3. Altération

Pour pouvoir caractériser et estimer quantitativement l'état d'altération d'une roche, différents indices d'altération peuvent être utilisés. Dans notre étude, deux indices d'altération chimique ont été calculés à l'aide des résultats d'analyse par fluorescence X qui donnent le pourcentage massique des oxydes basé sur les équations arithmétiques selon les relations :

- Indice d'altération météorique [20] :
 $CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)] \times 100$
- Indice d'altération hydrothermale [21] :
 $AI = (MgO + K_2O) / (MgO + K_2O + CaO + Na_2O) \times 100$

Dans le calcul de ces indices, les oxydes Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O et K_2O sont exprimés en proportions molaires.

L'indice d'altération météorique ou CIW évalue la mobilité des éléments majeurs tels que le calcium et le sodium par rapport à l'aluminium qui est considéré comme élément immobile. Plus cet indice se rapproche de 100, plus le degré d'altération de la roche est élevé.

L'indice d'altération hydrothermale AI [21] permet, par l'évaluation de la mobilité du magnésium, du potassium, du calcium et du sodium, de caractériser l'altération hydrothermale. Plus l'indice se rapproche de 100, plus le niveau d'altération hydrothermale de la roche est élevé.

Les valeurs des indices d'altération CIW et AI obtenues sur l'arène de la granodiorite des Béni-Snassène témoignent de la présence d'une altération météorique importante (CIW varie de 57% à 79%) et une altération hydrothermale de moindre degré (AI varie de 42% à 52%) (Tableau 1). L'étude comparative de ces deux indices le long du profil étudié, a mis en évidence une évolution croissante de l'altération de la base au sommet du profil étudié (Fig. 7).

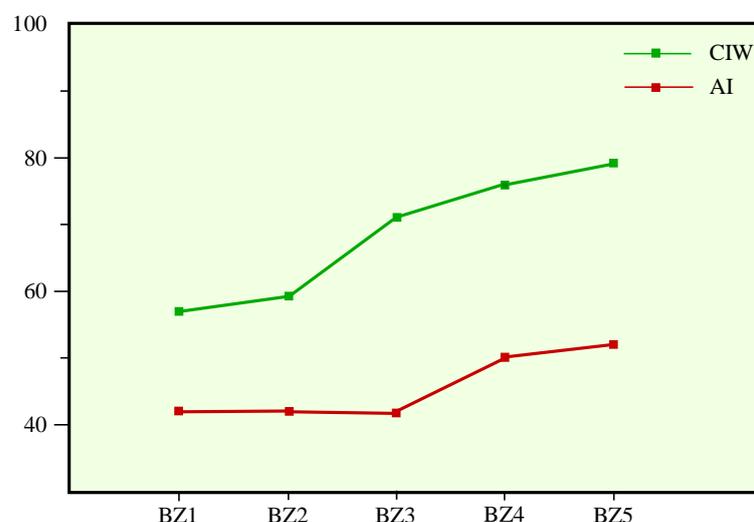


Figure 7 : Profils comparatifs de l'index d'altération météorique (CIW) et de l'index d'altération hydrothermale d'Ishikawa (AI).

5. Discussion

L'altération de la granodiorite des Béni-Snassène est caractérisée par un blanchiment général matérialisé par l'aspect crayeux que prennent les feldspaths dès les premiers faciès d'altération.

Les paragenèses minérales déterminées au microscope montrent que cette altération se manifeste essentiellement par la transformation des plagioclases en séricites puis illites puis kaolinites et des biotites en chlorite. En outre, l'étude minéralogique a mis en évidence une nette évolution de la minéralogie des matériaux altérés en lien avec l'augmentation de l'intensité d'altération de la base au sommet. Cette évolution se manifeste notamment par la formation de la kaolinite au dépend de l'illite le long du profil et indique des conditions plus acides [22, 23, 24, 25].

Les analyses chimiques révèlent en effet un lessivage progressif de l'aluminium de la roche saine et son enrichissement au sommet du profil d'altération. Cette augmentation traduit un accroissement du taux d'altération supergène et semble être concomitante de la néoformation de phyllosilicates alumineux [26].

La diminution sensible et progressive de CaO et Na₂O correspondrait à la dégradation de la structure des plagioclases. La chute puis le maintien et enfin une légère augmentation des teneurs en K₂O confirmeraient une altération moins rapide de l'orthose tout le long du profil. La teneur relativement constante de MgO peut être interprétée comme indiquant une grande stabilité des minéraux ferro-magnésiens (biotites) par rapport aux plagioclases.

Le titane ne manifeste pas d'évolution significative sans doute parce que sa mobilité n'étant pas conditionnée par l'importance de l'altération.

L'appréciation de l'importance de l'altération le long du profil étudié a mis en évidence une augmentation très nette de l'indice d'altération météorique (CIW) de 57% dans les roches saines à 79% dans la roche la plus altérée. Quant à l'indice d'altération hydrothermale (AI), il montre des valeurs relativement faibles, 42% dans la roche saine contre 52% dans la plus altérée.

Les valeurs d'indices d'altération ainsi obtenues sur l'arène de la granodiorite des Béni-Snassène sont conformes aux travaux de Price et Velbel [27] pour un profil développé sur une roche mère felsique. D'après Arikian *et al.* [28], les pourcentages des éléments mobiles tels que Na₂O, MgO, K₂O, et CaO diminuent avec l'augmentation de l'intensité de l'altération. Les travaux, de Wronkiewicz et Condie [29], ont montré aussi que le lessivage et la mobilité des éléments tels que le calcium, le sodium ou le potassium sont proportionnels au taux d'altération. D'après Nesbitt et Young [30], ces éléments sont préférentiellement lessivés.

L'aluminium et le titane sont souvent considérés comme éléments inertes dans les systèmes d'altération [31, 32, 33]. Cependant Gardner [34] et Baldeyrou *et al.* [26] ont montré que l'aluminium peut être mobilisé dans les systèmes hydrothermaux. L'aluminium, devenant alors mobile, se combine aux éléments alcalins pour former des phyllosilicates alumineux [26]. L'aluminium est immobile et stocké au niveau des roches altérées. Cet enrichissement traduit un accroissement du taux d'altération supergène ainsi qu'une concentration plus élevée de minéraux argileux dans les roches plus altérées.

Le titane est aussi considéré comme élément immobile. La mobilité de cet élément n'étant pas conditionnée par l'importance de l'altération mais semble être contrôlée par les phases titanifères (ilménite, rutile) et ferromagnésienne présentes dans la roche altérée et/ou le résultat d'un remaniement mécanique contrôlé par la topographie.

Conclusion

La granodiorite des Béni-Snassène est affectée par une intense altération caractérisée par un blanchiment général et une importance considérable du manteau d'altération qui peut dépasser, par endroit, les 20 mètres d'épaisseur.

Sur le plan minéralogique, l'arène des Béni-Snassène est constituée principalement d'un peu de feldspath résiduel, quartz, biotite, chlorite et surtout de l'illite et kaolinite qui fait de ce massif un gisement potentiel de kaolin.

Les évolutions géochimiques suggèrent que la granodiorite des Béni-Snassène a été le siège d'une forte altération chimique qui se caractérise, de la base au sommet du profil étudié, par une perte en éléments majeurs tels que SiO₂, CaO, Na₂O et K₂O et une accumulation d'Al₂O₃ favorisant ainsi la néoformation des minéraux argileux, principalement les kaolinites.

L'allure des patrons des indices d'altérations le long du profil étudié témoigne de l'importance de l'altération météorique et qui a été vraisemblablement favorisée par un climat de type tropical humide et par une tectonique cassante facilitant le drainage des eaux. Cependant, l'influence de l'altération hydrothermale est certaine et révélée par la présence dans la région d'indices de minéralisations Pb-Zn-Cu-Ba.

Remerciements

Les auteurs remercient le personnel du laboratoire de minéralogie de l'Université de Liège (Belgique). Nos remerciements vont également au personnel du laboratoire des analyses chimiques des Unités d'Appui Techniques à la Recherche Scientifique (UATRS - CNRST- Rabat - Maroc).

Références:

1. Bühman C., Schoeman J.L., *Geotherma*, 66 (1995) 239-257.
2. Velde B., *Clays and the environment*. Springer-Verlag Berlin, (1995) 334.
3. Nahon D., *C.R. Géosciences*, 335 (2003) 1109-1119.
4. Meunier A., Paris : GB éditions scientifiques, (2003) 433.
5. Benabdellah A., *Serv. Géol. Maroc*, Rabat, 321 (1952) 13.
6. Hoepffner C., Thèse d'Etat, Univ. Strasbourg, 1987.
7. Tougant S., Mémoire d'Ingénieur d'Etat, E. N. I. M, Rabat, Maroc, 1989.
8. Mrini Z., Rafi A., Duthou J.-L., Vidal P., *Bull. Soc. Géol. Fr.* 3, (1992) 429-443.
9. Naciri T., Doctorat d'Etat, université Mohammed Ier, Oujda, Maroc, 1994.
10. El Hadi H., Doctorat d'Etat. Univ. Hassan II-Mohammedia, Maroc, 1998.
11. El Hadi H., Lahmam M., El khanchaoui T., Saadan A., *Ann. Soc. Géol. du Nord.* 7.9 (2^{ème} série), (2002) 199-206.
12. Bouabdellah M., Ouahhabi B., Boudchiche L., Naciri T., Benalla M., Chaieb M., Deuxième colloque sur le Jurassique marocain, Marrakech, Maroc, (2004) 36-37.
13. Marhoumi M. R., Thèse 3^{ème} cycle. Strasbourg, France, 1984.
14. Ratbi S., Bastida J., Lago M., Galé C., Arranze C. & Oujidi M., *Geotemas*, 1, 3 (2000), 283-288.
15. Laouina A., Doctorat d'Etat, Oujda, Maroc, 1987.
16. Duggen S., Hoernle K., Bogaard P., Garbeschönberg D., *Journal of Petrology*, v. 46 (2005) 1115-1201.
17. El Hammichi F., Tabyaoui H., Chaouni A., Ait Brahim L., Chotin P., *Rev. Soc. geol. Esp.*, 19, 1-2, (2006) 143-152.
18. Cattaneo G., Doctorat d'Etat, Bourgogne, France, 1987.
19. Islam M.R., Stuart R., Risto A. and Vesa P., *Journal of Asian Earth Sciences*, 20 (2002), 889-901.
20. Harnois L., *Sedimentary Geology*, 55 (1988), 319-322.
21. Ishikawa I., Sawagishi T., Iwaya S. I., Horiach M., *Mining geology*, 26: (1976) 105-117.
22. Bauer A., Schafer T., Dohrmann R., Hoffmann H., KIM J. I., *Clay Minerals*, 36, (2001) 93-103.
23. Amram K., Ganor J., *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69, (2005) 2535-2546.
24. Golubev S. V., Bauer A., Pokrovsky O. S., *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, (2006) 4436-4451.
25. Ryu K. W., Jang Y. N., Chae S. C., *Clays and Clay Minerals*, 58, (2010) 44-51.
26. Baldeyrou A., Vidal O., Fritz B., *Comptes Rendus Géoscience*, 335(4), (2003) 371-380.
27. Price J. R., Velbel M. A., *Aquatic Geochemistry*, Volume 20, Issue 2, (2013) 203-224.
28. Arikani F., Ulusay R., Aydin N., *Bull Eng Geol Environ*, 66, (2007) 415-430.
29. Wronkiewicz D.J., Condie K.C., *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51, (1987) 2401-2416.
30. Nesbitt H.W., Young G.M., *Nature*, 199, (1982) 715-717.
31. Gresens R.L., *Chemical Geology*, 2, (1967) 47-65.
32. Potdevin J.L., Caron J.M., *Bulletin de Minéralogie*. 109(4), (1986) 395-410.
33. Potdevin J.L., Marquer D., *Geodinamica Acta* 1(3), (1987) 193-206.
34. Gardner L.R., *Chemical Geology*, 30 (1980) 151-165.

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