

# Apports des phyllosilicates dans la différenciation entre altération hypogène et altération supergène dans le basalte triasique du Moyen Atlas (Maroc)

Abdelilah Dekayir<sup>a,\*</sup>, Michel Danot<sup>b</sup>, Nabil Allali<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Département de géologie, faculté des sciences, BP 4010, Beni M'hamed, Meknès, Maroc

<sup>b</sup> Laboratoire de chimie des solides, institut des matériaux Jean-Rouxel, 2, rue la Houssinière, BP 32299, 44322 Nantes cedex 03, France

<sup>c</sup> Laboratoire de chimie minérale appliquée, faculté des sciences, BP 4010, Beni M'hamed, Meknès, Maroc

Reçu le 12 avril 2002 ; accepté le 5 août 2002

Présenté par Georges Pédro

---

**Abstract – Contribution of phyllosilicates to distinguish between hypogene alteration and weathering in Triassic basalt from Middle Atlas (Morocco).** Triassic basalt of the Middle Atlas has been subject to metamorphic transformation then weathering. Occurrence in both metabasalt and saprolite of ubiquitous clay minerals, such as smectite and mixed layers chlorite–smectite, makes it difficult to distinguish between the two alteration facies and explains the interest of complementary sources of information. In the Bhallil weathering profile, petrographical and mineralogical analyses of primary igneous minerals and their alteration products coupled with Fe oxidation state determination in clay fractions allow to identify three alteration facies: (i) metamorphic basalt, where iron occurs mainly as the ferrous form; (ii) the lower part of saprolite, where iron is partially oxidized to its ferric form; (iii) the upper part of saprolite, where iron is completely oxidized. **To cite this article:** A. Dekayir et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 877–884.

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

basalt / Trias / metamorphic alteration / weathering / Mössbauer spectroscopy / phyllosilicate

**Résumé –** Au cours de leur histoire géologique, les basaltes triasiques du Moyen Atlas ont subi une transformation métamorphique précoce, à laquelle est venue se superposer une altération supergène. La présence de minéraux argileux ubiquistes (smectite et interstratifiés chlorite/smectite), à la fois dans le basalte et dans la saprolite, rend difficile la distinction entre les deux faciès et explique l'intérêt que présente toute source complémentaire d'information. Ainsi, dans le profil de Bhallil, les analyses pétrographiques et minéralogiques des minéraux primaires et de leurs produits d'altération, couplées avec l'analyse de l'état d'oxydation du fer dans les fractions argileuses, ont permis de distinguer trois faciès d'altération : (i) le basalte métamorphisé où la quasi-totalité du fer est sous forme ferreuse, (ii) un niveau situé à la base de la saprolite, caractérisé par une oxydation partielle à l'état ferrique, (iii) le sommet de la saprolite, où cette oxydation est totale. **Pour citer cet article :** A. Dekayir et al., C. R. Geoscience 334 (2002) 877–884.

© 2002 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS

basalte / Trias / altération métamorphique / altération supergène / spectrométrie Mössbauer / phyllosilicate

---

## Abridged version

### 1. Introduction

Basalt, like other rocks, transforms after its emplacement, in response to deuteric, metamorphic and hydrother-

mal alterations [1, 3]. These transformations give newly formed rock facies, which serve as primary substrata for weathering. Moroccan triassic basalts have suffered a metamorphic transformation up to the prehnite–pumpellyite facies [9]. At the microscopic scale, it is difficult to distinguish between metamorphic and weathered rocks, be-

---

\* Correspondance et tirés à part.

Adresses e-mail : dekayir@fsmek.ac.ma (A. Dekayir), danot@cnrs-ismn.fr (M. Danot), allali@fsmek.ac.ma (N. Allali).

cause of the similarity of alteration features and the presence of ubiquitous clay minerals in both alteration facies. Thus, to solve this problem, iron present in phyllosilicates was used as a geochemical indicator [12, 13].

## 2. Material and methods

The studied weathering profile is located at 15 km from the City of Fes (Fig. 1a). The bedrock is represented by an intracontinental flood basalt. Samples were taken on 10 m depth. Three weathered levels were distinguished: (i) metabasalt, (ii) saprolite, and (iii) soil.

Mineralogical and textural relationships were made by optical microscopy and SEM imaging, coupled with energy dispersive X-ray spectrometry (with a 100-nm spot size). For mineralogical identification, clay fractions extracted from each specimen were examined by XRD.  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer spectra were recorded at room temperature using  $^{57}\text{Co/Rh}$  source, the isomer shift values are referred to  $\alpha\text{-Fe}$  at 300 K. The analysed phyllosilicates are amygdalic clay minerals and clay fractions under  $2\ \mu\text{m}$ , extracted from bulk basaltic rocks.

## 3. Results

### 3.1. Mineralogy of metamorphic basalt and weathering levels

Metabasalt contains primary igneous minerals: labrador (45%), augite (26%), glass (<5%), and titanomagnetite (7%). Coarse amygdales (7%) are filled by clays, calcite, iron oxides, and quartz. Pyroxene and glass are replaced by Fe-saponite, which can be accompanied by mixed layers chlorite–smectite. In saprolite, plagioclase is replaced by Al-smectite, whereas pyroxene is altered to Fe-saponite (Table 1). In the upper part of saprolite, X-ray diffraction shows the dominance of smectite and the disappearance of talc. Very small amounts of kaolinite are detected. Corrensite is sporadic. Plagioclase and pyroxene weathering products show montmorillonite–beidellite compositions (Table 1). In the soil, the structure of basalt cannot be recognized and clay minerals are represented mainly by smectite, with small amount of corrensite and probably kaolinite.

### 3.2. Mössbauer study

In metabasalt, the Mössbauer spectrum of the clay fraction (<  $2\ \mu\text{m}$  and hand-picked clay from amygdales) shows two doublets. The first one, with an isomer shift ( $\delta$ ) of  $1.14\ \text{mm s}^{-1}$  and a quadrupole splitting ( $\Delta$ ) of  $2.66\ \text{mm s}^{-1}$ , contributes for 86% of the total absorption area and can be assigned to  $\text{Fe}^{2+}$  in octahedral sites of saponite [4, 13]. The second doublet, characterised by  $\delta = 0.36\ \text{mm s}^{-1}$  and  $\Delta = 1.04\ \text{mm s}^{-1}$  (14% of the total absorption area) can be attributed to  $\text{Fe}^{3+}$  in saponite and corrensite [4, 14] (Fig. 2a).

In saprolite, the Mössbauer spectrum of clays also shows two doublets. The doublet characterised by  $\delta = 1.12\ \text{mm s}^{-1}$  and  $\Delta = 2.65\ \text{mm s}^{-1}$  (20% of the total Fe amount) can be assigned to  $\text{Fe}^{2+}$  in M2 octahedral sites in saponite [4, 14]. The other doublet, which shows  $\delta$  and  $\Delta$  values of  $0.36\ \text{mm s}^{-1}$  and  $0.72\ \text{mm s}^{-1}$ , respectively, can probably be attributed to the location of  $\text{Fe}^{3+}$  in M2 octahedral sites of saponite [14] (Fig. 2b). In the upper part of saprolite, the Mössbauer spectrum is represented by one doublet with values of  $\delta$  and  $\Delta$  values of  $0.36\ \text{mm s}^{-1}$  and  $0.56\ \text{mm s}^{-1}$ , respectively, typical of the presence of  $\text{Fe}^{3+}$  in sites M2 of montmorillonite–beidellite species [8, 10].

## 4. Discussion and conclusion

The studied Triassic basalt has been subjected to a metamorphic transformation, which has transformed primary igneous minerals into Fe-saponite, possibly accompanied by corrensite. Amygdales are filled by talc, saponite and sometimes corrensite. After weathering, this metamorphic mineralogical heritage has been converted to trioctahedral smectite and kaolinite [7, 9]. In saprolite, clinopyroxene is transformed into Fe-saponite, which is converted to Al–Fe-rich smectite. These transformations give evidences of supergene evolution of Fe-saponite at supergene conditions [12, 13].

In Bhallil weathering profile, mineralogical and Mössbauer data allow to distinguish three weathering facies: (i) metabasalt, where trioctahedral Fe-rich phyllosilicates are dominant, (ii) saprolite, where metamorphic phyllosilicates – namely Fe-saponite – are transformed, giving montmorillonite–beidellite, and (iii) soils containing ferric phyllosilicates (mainly smectite).

## 1. Introduction

Comme d'autres roches de l'écorce terrestre, les basaltes subissent au cours de, ou après, leur mise en place, différentes transformations, attribuées à des phénomènes précoces, tels que l'altération deutérique [3], l'altération hydrothermale ou le métamorphisme [1, 15]. Ces transformations endogènes aboutissent à la naissance d'un nouveau faciès pétrographique, qui présente des caractéristiques différentes

de celles de la roche saine dont il dérive et qui servira de nouveau substrat pour l'altération supergène. Dans les profils développés sur roches basiques, la distinction entre les altérations hypogène et supergène est rendue délicate, en raison de la formation de phyllosilicates ubiquistes, tels que les smectites [12].

Au Maroc, les dolérites du Trias ont subi, au cours de leur histoire géologique, un métamorphisme de basse température allant jusqu'au faciès prehnite–pumpellyite [9]. Dans les conditions de surface, ces

dolérites s'altèrent en boules de taille décimétrique, voire métrique. À l'échelle microscopique, il est difficile de distinguer entre les paragenèses minérales d'origine hypogène et celles d'origine supergène, en raison de la ressemblance entre les structures et de la présence de saponite et d'interstratifiés chlorite/smectite, à la fois dans le basalte et dans la saprolite. En raison de ces difficultés pour distinguer les deux faciès, le fer présent dans les phases argileuses d'altération a été utilisé comme sonde géochimique. Ainsi, la spectroscopie Mössbauer, couplée à d'autres approches, spectroscopiques, cristallographiques et isotopiques, a permis de mettre en évidence la présence de talcs de haute et de basse température dans des profils d'altération sur roche ultrabasique [12, 13].

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Description du profil d'altération étudié et prélèvement d'échantillons

Le profil d'altération étudié est situé à 15 km au sud-est de la ville de Fès (Fig. 1a). La roche mère est représentée par un basalte à caractère tholéiitique, de texture doléritique. Le profil d'altération est traversé par un réseau dense de fissures d'épaisseur centimétrique, remplies de calcite et de quartz. Les échantillons étudiés ont été prélevés le long d'un puits, profond d'environ 10 m. De la base vers le sommet, trois faciès d'altération ont été distingués (Fig. 1b).

#### 2.1.1. Le metabasalte

Au fond du puits, le basalte massif est de couleur noire. Il est parsemé de vésicules millimétriques à centimétriques, remplies d'argiles verdâtres et de quartz. Les fissures sont remplies de calcite et de quartz.

#### 2.1.2. La saprolite

À sa base, le basalte noir-verdâtre perd légèrement de sa cohérence, avec une ouverture de la porosité qui atteint 20%. La texture doléritique du basalte demeure conservée. Les vésicules remplies de silice se débitent facilement. À proximité du sol, la roche friable, brun-jaunâtre, est traversée par de petites fissures (de quelques millimètres d'épaisseur) remplies de produits ferrugineux en provenance de la surface du profil. La diminution de la porosité à ce niveau (Fig. 1d) témoigne des phénomènes d'accumulation signalés dans de nombreux profils d'altération sur basalte [6].

#### 2.1.3. Le sol

Sur la saprolite se développe un sol brun de structure grumeleuse et épais de 40 cm environ. Il est formé de reliques de basalte altéré et de graviers calcaires de

taille centimétrique à décimétrique, enrobés dans une matrice argilo-silteuse. La porosité importante est estimée à 30% (Fig. 1d). Le système racinaire est abondant. De la base vers le sommet du profil d'altération, huit échantillons orientés ont été prélevés d'une manière systématique (Fig. 1b).

### 2.2. Méthodes d'analyse

Pour une étude au microscope optique, les échantillons prélevés ont été indurés à l'araldite, puis montés sur lames minces. L'étude pétrographique a été complétée par des analyses ponctuelles (MEB-EDX) des minéraux primaires et de leurs produits d'altération. Les fractions argileuses extraites des différents échantillons traités ont ensuite été montées en agrégats orientés et analysées par diffraction des rayons X, pour chacun des différents traitements (saturations au glycol, à l'hydrazine et chauffage à 500 °C). Le diffractomètre utilisé est un appareil Philips 1780, équipé d'une anode de Co et d'un monochromateur de C, piloté par le programme informatique Philips version 3.5B (Automated Powder Diffraction PW 1877). Les spectres Mössbauer du  $^{57}\text{Fe}$  des fractions argileuses ont été enregistrés à température ambiante, en utilisant le rayonnement  $\gamma$  d'une source  $^{57}\text{Co/Rh}$ , montée sur un vibreur électromagnétique fonctionnant selon une loi de vitesse en dent de scie symétrique. Les paramètres Mössbauer des différents sites de fer (déplacement isomérique ( $\delta$ ), écart quadripolaire ( $\Delta$ ), demi-largeur de raie à mi-hauteur ( $\Gamma$ ) et contribution relative à l'aire totale d'absorption ( $A\%$ )) ont été affinés par moindres carrés, sur la base de raies lorentziennes. Les déplacements isomériques sont exprimés par rapport à la référence  $\alpha\text{-Fe}$  à 300 K. Nous avons vérifié, pour quelques échantillons, que les contributions relatives des différents sites n'évoluent pas de façon significative quand on abaisse à 77 K la température de mesure ; ceci montre que les valeurs de  $A$  déterminées à température ambiante peuvent être considérées comme représentatives des populations des différents sites.

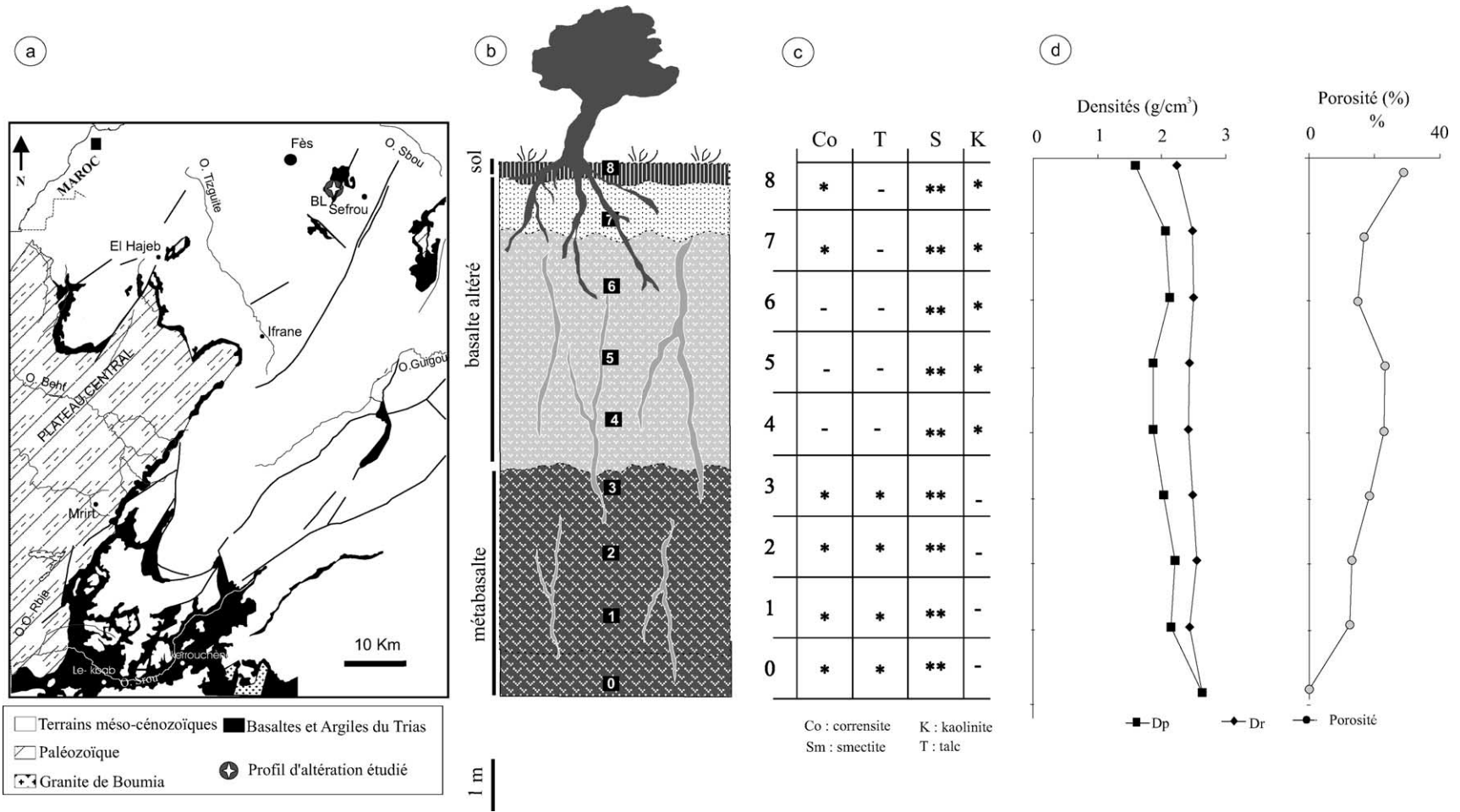
## 3. Résultats

### 3.1. Minéralogie du basalte et des faciès d'altération

#### 3.1.1. Le metabasalte

Dans ce faciès, les minéraux primaires sont représentés par le labrador (45%), l'augite (26%), le verre (< 5%) et la titanomagnétite (7%). Le basalte est parsemé de vésicules (7%) remplies d'argiles, de calcite, d'oxydes de fer et de quartz.

Le pyroxène est transformé en argile très biréfringente, d'une composition chimique de type saponite-



**Figure 1.** Carte géologique simplifiée du Moyen Atlas (d'après [11]) et représentation schématique du profil d'altération de Bhallil : (a) localisation du site, (b) profil, (c) minéralogie des argiles, (d) variations des densités (apparente Dp et réelle Dr) et de la porosité.

**Figure 1.** Geological map of Middle Atlas (from [11]) and weathering profile sketch: (a) site situation, (b) weathering profile, (c) clay mineralogy, (d) porosity and density variations along the weathering profile.

**Tableau 1.** Composition chimique moyenne (MEB–EDX) des produits d’altération du pyroxène et du plagioclase dans le metabasalte (BM), à la base (SC<) et au sommet (SC>) de la saprolite (S : smectite ; I : interstratifiés chlorite–smectite ; T : talc ; PI–S : plagioclase transformé en smectite ; Px–S et Px–I : pyroxène transformé respectivement en smectite et en interstratifiés chlorite–smectite ; le partage du Fe total en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et en FeO est basé sur les données Mössbauer ; m : moyenne des analyses).

**Table 1.** Mean chemical composition (SEM–EDX) of pyroxene and plagioclase–feldspar alteration products in metabasalt (BM), in the bottom (SC<) and at upper part (SC>) of saprolite (S: smectite; I: chlorite–smectite mixed-layers; T: talc; PI–S: plagioclase transformed into smectite; Px–S et Px–I: pyroxene transformed respectively into smectite and chlorite–smectite mixed-layers; partition of total Fe between Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and FeO is based on Mössbauer data; m: average of analyses).

	Pyroxène				Plagioclase		Produits de vésicules		
	BM	BM	SC<	SC>	SC<	SC>	BM	BM	SC>
	Px–I	Px–S	Px–S	Px–S	PI–S	PI–S	S	T	S
	m = 6	m = 12	m = 4	m = 5	m = 4	m = 9	m = 18	m = 5	m = 5
SiO <sub>2</sub>	37,46	44,24	53,10	52,26	43,32	57,74	46,14	60,17	50,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,25	5,98	10,72	23,45	16,19	30,41	5,61	1,89	12,34
FeO	19,17	11,00	8,42	0,00	0,00	0,00	11,12	10,18	0,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	2,33	9,46	3,82	4,74	0,00	0,00	12,45
MgO	18,30	15,21	19,83	10,44	8,09	3,96	17,67	27,59	18,32
TiO <sub>2</sub>	0,03	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
MnO	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
CaO	1,57	0,96	2,94	3,21	1,32	2,16	1,55	0,00	1,99
Na <sub>2</sub> O	0,45	0,27	0,87	0,65	0,45	0,52	0,38	0,00	1,46
K <sub>2</sub> O	0,14	1,10	0,11	0,16	0,99	0,52	0,24	0,00	0,57
Somme	89,37	78,87	98,32	99,62	74,26	100,05	82,80	99,83	97,99
Si	3,29	3,66	3,47	3,26	3,57	3,46	3,62	3,93	3,31
Al	0,71	0,34	0,53	0,74	0,43	0,54	0,38	0,07	0,69
Al	0,56	0,24	0,29	0,98	1,15	1,61	0,14	0,05	0,26
Fe <sup>3+</sup>	–	–	0,11	0,44	0,05	0,21	–	–	0,61
Fe <sup>2+</sup>	1,41	0,76	0,46	0,00	0,21	0,00	0,73	0,66	0,00
Mg	2,40	1,87	1,93	0,97	0,99	0,35	2,07	1,80	1,78
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca	0,15	0,09	0,21	0,21	0,12	0,14	0,13	0,00	0,14
Na	0,08	0,04	0,11	0,08	0,07	0,06	0,06	0,00	0,18
K	0,02	0,12	0,01	0,01	0,10	0,04	0,02	0,00	0,05

Fe et quelquefois en interstratifié chlorite/smectite de type corrensite (Tableau 1). Le verre est transformé également en saponite microcristalline, de teinte vert olive. Au sein des vésicules, les phyllosilicates tapissent les bordures, le centre est rempli de quartz et/ou de calcite. Les analyses chimiques effectuées sur ces argiles de remplissage montrent la présence de talc et de saponite-Fe (Tableau 1). L’étude minéralogique des argiles extraites dans ce faciès montre la dominance de smectite trioctaédrique, avec du talc et de la corrensite en faibles quantités (Fig. 1c).

### 3.1.2. La saprolite

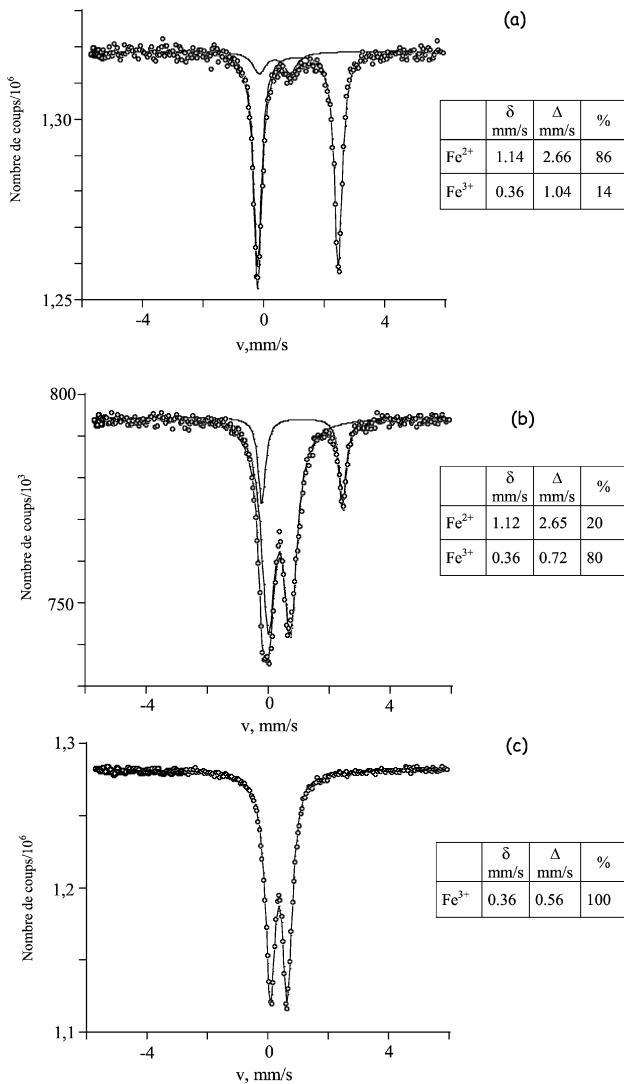
À sa base, la texture du basalte est conservée. Ce faciès montre les mêmes structures d’altération que celles observées dans le basalte. En effet, les vésicules contiennent les mêmes produits de remplissage. Les microanalyses EDX réalisées sur les produits d’altération des minéraux primaires montrent que le plagioclase est transformé en smectite alumineuse. En

revanche, le pyroxène est transformé en saponite-Fe (Tableau 1).

Dans la partie supérieure de la saprolite, la structure du basalte commence à disparaître progressivement. Les diagrammes de diffraction des rayons X des argiles montrent une dominance des smectites, avec apparition de la kaolinite. La corrensite apparaît de façon sporadique. Les feldspaths sont altérés en produits argileux isotropes smectitiques. Les minéraux ferromagnésiens ainsi que les argiles de remplissage des vésicules sont de couleur jaune pâle, imprégnées d’oxydes et d’hydroxydes de fer. Les analyses chimiques réalisées sur ces pseudomorphoses correspondent à une smectite de composition intermédiaire entre la montmorillonite et la beidellite (Tableau 1).

### 3.1.3. Le sol

Dans le sol, la structure du basalte est effacée. Les reliques de basalte profondément altérées sont enrobées dans une matrice argilo-ferrugineuse. À ce ni-



**Figure 2.** Spectres Mössbauer de la fraction argileuse (< 2  $\mu\text{m}$ ) extraite : (a) dans le metabasalte, (b) à la base de la saprolite (SC<), (c) au sommet de la saprolite (SC>).

**Figure 2.** Mössbauer spectra of clay fraction (< 2  $\mu\text{m}$ ) extracted from: (a) metabasalt, (b) bottom of saprolite (SC<), (c) upper part of saprolite (SC>).

veau, les produits d'altération du basalte et les produits de transfert sont complètement mélangés. Les minéraux argileux sont représentés essentiellement par la smectite, avec de faibles quantités de corrensite, et probablement la kaolinite.

## 3.2. Étude Mössbauer

### 3.2.1. Le metabasalte

Les spectres Mössbauer enregistrés sur les argiles de remplissage des vésicules et sur la fraction argileuse globale montrent des signatures spectrales semblables, typiques des phyllosilicates riches en Fe<sup>2+</sup>. Dans les deux cas, on observe deux doublets (Fig. 2a). Le premier doublet, de forte intensité (86% du Fe),

est affiné pour les deux échantillons, avec un déplacement isomérique ( $\delta$ ) de 1,1 mm s<sup>-1</sup> (par rapport à  $\alpha$ -Fe) et un écart quadripolaire ( $\Delta$ ) de 2,6 mm s<sup>-1</sup>. Ces paramètres sont caractéristiques du Fe<sup>2+</sup> en site octaédrique dans la saponite ( $\delta = 1,00$ –1,13 mm s<sup>-1</sup> et  $\Delta = 2,65$ –2,66 mm s<sup>-1</sup> [4, 14]) et de la corrensite ( $\delta = 1,01$ –1,02 mm s<sup>-1</sup> et  $\Delta = 2$ –2,65 mm s<sup>-1</sup> [4]). Pour le second doublet, l'affinement du déplacement isomérique conduit à une valeur de 0,44 mm s<sup>-1</sup>. Cette valeur correspondrait bien au fer (III) octaédrique, mais elle s'écarte un peu de celle du fer (III) présent dans les autres échantillons ( $\delta = 0,36$  mm s<sup>-1</sup>, voir ci-dessous). Cependant, la valeur 0,44 mm s<sup>-1</sup> n'est certainement pas très précise, en raison de la faible contribution du second doublet (14% du Fe) et de la superposition de sa raie gauche avec la raie gauche du doublet majoritaire. Nous avons alors fixé le déplacement isomérique à la valeur trouvée (0,36 mm s<sup>-1</sup>) pour le fer (III) des autres échantillons et affiné les autres paramètres. Comme cela n'altère ni la qualité de la reproduction du spectre, ni les paramètres du fer (II) par rapport à l'affinement précédent mené sans contrainte, nous considérons que le modèle avec  $\delta = 0,36$  mm s<sup>-1</sup> est plus réaliste, puisqu'il respecte la continuité du système. Dans ces conditions, cette contribution ( $\delta = 0,36$  mm s<sup>-1</sup>,  $\Delta = 1,04$  mm s<sup>-1</sup>) évoque bien le fer (III) dans les sites de la saponite ( $\delta = 0,30$ –0,33 mm s<sup>-1</sup> et  $\Delta = 0,77$ –1,09 mm s<sup>-1</sup>) [4, 14] et de la corrensite ( $\delta = 0,30$  mm s<sup>-1</sup> et  $\Delta = 0,99$  mm s<sup>-1</sup> [4]).

### 3.2.2. La saprolite

Le spectre Mössbauer des argiles extraites à la base de la saprolite comporte également deux doublets (Fig. 2b). L'un est exactement identique à celui attribué ci-dessus au Fe<sup>2+</sup> octaédrique de la saponite [4, 14], mais son intensité très atténuée (20% du fer) témoigne de la disparition d'une partie importante du constituant correspondant. L'autre doublet, avec un déplacement isomérique de 0,36 mm s<sup>-1</sup> et un écart quadripolaire de 0,71 mm s<sup>-1</sup>, provient probablement de Fe<sup>3+</sup> en site octaédrique M2 de la saponite ( $\delta = 0,33$  mm s<sup>-1</sup> et  $\Delta = 0,77$  mm s<sup>-1</sup>) [14]. Ce dernier constituant est largement majoritaire (80% du fer), ce qui dénote un processus d'oxydation avancé.

Dans la partie supérieure de la saprolite, l'analyse Mössbauer de la fraction argileuse montre un spectre simplifié ne présentant qu'un seul doublet (Fig. 2c). Les valeurs respectives du déplacement isomérique et de l'écart quadripolaire (0,36 mm s<sup>-1</sup> et 0,56 mm s<sup>-1</sup>) évoquent le Fe<sup>3+</sup> en site M2 de la montmorillonite et de la beidellite ( $\delta = 0,33$ –0,35 mm s<sup>-1</sup> et  $\Delta = 0,54$ –0,60 mm s<sup>-1</sup>) [8, 10].

### 3.2.3. Commentaires

Même si la comparaison des valeurs des déplacements isomériques et des éclatements quadripolaires

que nous avons trouvées avec celles de substances de référence ne permet pas, à elle seule, d'identifier les sites de fer avec une certitude absolue (spécialement pour les composantes à faible contribution), il est incontestable que le déplacement isomérique de  $1,1 \text{ mm s}^{-1}$  correspond au fer (II), et celui de  $0,36 \text{ mm s}^{-1}$  au fer (III). L'évolution du rapport Fe (III)/Fe (II), depuis le basalte jusqu'au niveau supérieur de la saprolite, illustre donc de façon évidente la progression du processus d'oxydation.

Par ailleurs, on peut remarquer que les largeurs des raies relatives au fer (II) et au fer (III) sont différentes. Pour le fer (II), les raies sont très peu élargies ( $\Gamma = 0,15 \text{ mm s}^{-1}$ ) par rapport à la largeur instrumentale ( $\Gamma = 0,12 \text{ mm s}^{-1}$ ) mesurée sur un composé de référence ( $\alpha\text{-Fe}$ ). Ce faible élargissement montre que la substance correspondante est structuralement bien organisée, ce qui est parfaitement logique, compte tenu de la température élevée à laquelle elle s'est formée. En revanche, la contribution de fer (III) présente dans les spectres des Figs. 2a et b est sensiblement plus large ( $\Gamma = 0,26 \text{ mm s}^{-1}$ ), ce qui témoigne d'une organisation beaucoup moins parfaite, en accord avec la température de formation nettement moins élevée. Cependant, pour l'échantillon totalement oxydé (Fig. 2c), la largeur de raie devient moins importante ( $\Gamma = 0,20 \text{ mm s}^{-1}$ ), comme si le fait d'atteindre l'oxydation complète permettait une amélioration de l'organisation cristalline par rapport aux faciès d'oxydation partielle.

Enfin, l'éclatement quadripolaire relatif au fer (III) diminue lorsque l'oxydation progresse. Cela signifie que, plus l'échantillon est oxydé, plus la distorsion des sites de fer III s'atténue.

#### 4. Discussion

Le basalte triasique étudié a subi deux phases d'altération. La phase métamorphique qui survient en premier a essentiellement transformé la paragenèse minérale primaire en phyllosilicates trioctaédriques (saponite). Les vésicules sont remplies également de saponite et de talc, éventuellement accompagnés par de la corrensite. À cet héritage minéralogique secondaire vient se superposer une phase d'altération supergène, transformant la plupart des minéraux argileux trioctaédriques en phases argileuses de type smectite tri-dioctaédrique riches en Al-Fe et en kaolinite. Ces évolutions minéralogiques ont été décrites dans d'autres profils d'altération développés sur basalte triasique au Moyen Atlas [7, 9].

Compte tenu des difficultés que présente la différenciation des faciès d'altération hypogène et supergène, la spectroscopie Mössbauer des fractions argileuses prélevées en différents points d'un profil d'altération constitue un outil efficace pour fournir des signatures propres aux minéraux argileux néoformés. Il est certain qu'en présence de mélanges complexes de phases argileuses, il est délicat de faire un partage des teneurs en  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$  analysées entre les sites cristallographiques d'un phyllosilicate donné [4]. Néanmoins, les pourcentages obtenus en  $\text{Fe}^{2+}$  et en  $\text{Fe}^{3+}$  dans chaque échantillon permettent de différencier les divers faciès d'altération le long du profil.

Dans le sol, en plus des smectites, de la corrensite en faible quantité a été mise en évidence. Dans la saprolite, une pseudomorphose de pyroxène en saponite-Fe montre que cette saponite elle-même se transforme vers la périphérie en smectite tri-dioctaédrique par perte de Mg et gain de Fe et d'Al. Ces échanges d'éléments chimiques entre la saponite et les solutions présentes dans les microsites d'altération témoignent d'une transformation de ces saponites sous l'effet de l'action supergène.

Dans le profil de Bhallil, les phyllosilicates hypogènes, en l'occurrence la saponite, montrent une teneur en  $\text{Fe}^{2+}$  estimée à  $\sim 10\%$ . Ce fer se substitue au magnésium dans les sites octaédriques. En surface, cette saponite évolue en smectite tri-dioctaédrique par perte de Mg et gain d'Al. Cette substitution est suivie d'une oxydation rapide du  $\text{Fe}^{2+}$  en  $\text{Fe}^{3+}$ . Des mécanismes similaires ont été décrits dans les smectites  $\text{Fe}^{2+}\text{-Fe}^{3+}$  de synthèse [5] et dans les transformations de smectites naturelles [2].

#### 5. Conclusion

Dans le profil d'altération étudié, l'analyse minéralogique des argiles et la détermination du degré d'oxydation du fer par spectroscopie Mössbauer ont permis de délimiter trois faciès d'altération. Le premier faciès est représenté par le metabasalte ; les phyllosilicates de transformation des minéraux primaires et de remplissage des vésicules (saponite-Fe et corrensite) y sont très riches en fer ferreux. À la base de la saprolite, deuxième faciès, ces minéraux argileux d'origine hypogène – en l'occurrence la saponite-Fe – subissent une transformation, avec une oxydation progressive du fer ferreux en fer ferrique, accompagnée d'un appauvrissement en Mg et d'un enrichissement en Al. Enfin, dans la partie supérieure de la saprolite, la totalité du fer présent dans les minéraux argileux étudiés est oxydée en fer ferrique.

## Références

---

- [1] A.J. Andrew, Saponite and celadonite in layer 2 basalts, DSDP Leg 37, *Contrib. Mineral. Petrol.* 73 (1980) 323–340.
- [2] D. Badaut, G. Besson, A. Decarreau, R. Rautureau, Occurrence of a ferrous trioctahedral smectite in recent sediments of Atlantis II deep, Red sea, *Clay Miner.* 20 (1985) 389–404.
- [3] I. Baker, S.E. Haggerty, The alteration of olivine in basaltic and associated lavas. Part II: Intermediate and low temperature alteration, *Contrib. Mineral. Petrol.* 16 (1967) 258–273.
- [4] D. Beaufort, A. Meunier, Saponite, corrensite and chlorite–saponite mixed layers in the Sancerre–Couy deep drill-hole (France), *Clay Miner.* 29 (1994) 47–61.
- [5] A. Decarreau, D. Bonnin, Synthesis and crystallogenesi at low temperature of Fe (III)–smectites by evolution of coprecipitated gels. Experiments in partially reducing conditions, *Clay Miner.* 21 (1986) 861–877.
- [6] A. Dekayir, M. El Maâtaoui, Apport de l'analyse d'images dans l'étude de l'altération d'un basalte alcalin (Moyen Atlas, Maroc), *Eng. Geol.* 56 (2000) 325–334.
- [7] E.M. Hamidi, B. Boulangé, F. Colin, Altération d'un basalte triasique de la région d'El Hajeb, Moyen Atlas, Maroc, *J. Afr. Earth Sci.* 24 (1/2) (1997) 141–151.
- [8] L. Heller-Kellai, I. Rozenson, The use of Mössbauer spectroscopy of iron in clay mineralogy, *Phys. Chem. Miner.* 7 (1981) 223–238.
- [9] S. Kamel, R. Bouabid, B. Boulangé, F. Colin, Paléaltérations hydrothermale et supergène dans un basalte triasique du Moyen Atlas, Maroc, *J. Afr. Earth Sci.* 23 (2) (1996) 225–235.
- [10] H.M. Koster, U. Ehrlicher, H.A. Gilgh, R. Jordan, E. Murad, K. Onnich, Mineralogical and chemical characteristics of five nontronites and Fe-rich smectites, *Clay Miner.* 34 (1999) 579–599.
- [11] J. Martin, Le Moyen Atlas central. Étude géomorphologique, *Notes Mém. Serv. géol. Maroc*, 258 bis, 1981, 445 p.
- [12] Y. Noack, Différenciation entre altération météorique et altération hydrothermale. Applications aux minéraux ubiquistes : talc, chlorites, serpentine. Pétrologie, minéralogie, géochimie, thèse d'État, université de Poitiers, 1985, 200 p.
- [13] Y. Noack, A. Decarreau, A. Manceau, Spectroscopic and oxygen isotopic for low and high temperature origin of talc, *Bull. Minéral.* 109 (1986) 253–263.
- [14] G.S. Odin, A. Desprairies, P.D. Fullagar, H. Bellon, A. Decarreau, F. Fröhlich, M. Zelvelder, Nature and geological significance of celadonite, in : G.S. Odin (Ed.), *Green Marine Clays*, Elsevier, 1988, pp. 337–398.
- [15] Y.N. Shau, D. Peacor, Phyllosilicates in hydrothermally altered basalts from DSDP Hole 504B, Leg 83 – a TEM and AEM study, *Contrib. Mineral. Petrol.* 112 (1992) 119–133.