

Analyse de la porosité dans un profil d'encroûtement carbonaté sur les basaltes du Trias du Moyen Atlas (Maroc)

Porosity analysis in a carbonate crust profile developed on Triassic basalt from the Middle Atlas (Morocco)

El Mokhtar Hamidi^{a,*}, Yves Géraud^b, Fabrice/Colin^c, Bruno/Boulangé^c

^a Département de géologie, faculté des sciences, BP 4010, Bni M'hammed, Meknès, Maroc

^b Institut de géologie, UMR 7517, CGS, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex, France

^c UM-Geco, Cerege, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France

(Reçu le 14 avril 1999, accepté après révision le 12 juillet 1999)

Abstract — A carbonate crust profile has developed from Triassic basalt flows in the Moroccan Middle Atlas. The study of pore distribution of these supergene formations shows a good agreement between calculated (from density measurements) and directly measured values of porosity (mercury porosimetry). Weathering of basalt develops clayey layers (saprolite and soil) displaying increases in porosity (macroporosity essentially). In the Quaternary, these very porous and permeable layers permitted easy meteoric water circulation and a profile calcitization by *per descensum* processes. Carbonate precipitation occurs by epigenesis replacement of silicate minerals. In the friable saprolite, carbonate replaces directly the basaltic primary minerals, while this replacement operates on the weathering products (smectites) and residual primary minerals in the coherent saprolite, indicating the very fast progression of the calcitization front. At the weathering front, within the coherent saprolite, both smectitic weathering and carbonatation compete as functions of time and fluid chemical composition. (© 1999 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS.)

basalt / porosity / density / alteration / carbonate / crust / Middle Atlas / Morocco

Résumé — L'étude de la porosité a été effectuée dans un profil d'encroûtement sur basalte dans le Moyen Atlas marocain. Les résultats montrent une assez bonne concordance entre les porosités calculées à partir des densités et les porosités mesurées par injection de mercure. Dans le profil étudié, l'altération argileuse du basalte, après sa mise en place, entraîne une augmentation de la porosité (essentiellement la macroporosité). Pendant le Quaternaire, ces porosités assez importantes ont favorisé la circulation des solutions et une carbonatation du basalte *per descensum*. La précipitation des carbonates se fait par remplacement épigénique des minéraux silicatés. La progression rapide du front de calcitisation fait que le carbonate remplace directement les minéraux primaires relictuels du basalte dans la saprolite friable, sans phase d'altération argileuse intermédiaire, comme c'est le cas dans la saprolite cohérente. La smectitisation au front d'altération est alors couplée avec le développement de la carbonatation, ces deux processus se générant l'un l'autre au sein d'un système géochimique couplé. (© 1999 Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS.)

basalte / porosité / densité / altération / carbonate / encroûtement / Moyen Atlas / Maroc

Note présentée par Georges Pedro.

* Correspondance et tirés à part.
Hamidi@cerege.fr

C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes / *Earth & Planetary Sciences*
1999. 329, 351-356

351



Fonds Documentaire ORSTOM
Cote: Bx-19253 Ex: 1

Abridged version

Carbonate crusts are widespread in arid and semi-arid climatic regions. Accumulation of pedogenic carbonates is always associated to weathering processes of parent materials. The two processes, weathering and carbonate accumulation, are controlled by parent and relative weathered material porosity, which itself can be modified by these processes. In this work, we have studied the role and the evolution of the porosity in carbonate-rich and weathered mantle developed at the expense of Triassic basaltic flows, located in the Tazouta area within the Moroccan Middle Atlas (*figure 1*). Sample porosity is calculated using the bulk dry sample density and the mean mineral matrix density, and measured by mercury injection.

The representative soil profile is 2.8 m thick and shows 3 main layers from the bottom to the top (*figure 2a*): the fresh basalt, the saprolite, divided in a coherent and a friable saprolite and the topsoil. The coherent saprolite is dominated by primary minerals weathering to smectitic products, where calcite concentrations increase upwards to the profile to reach 50 weight % in the friable saprolite (*figure 2*). Calcite growth occurs by epigenetic replacement of primary and secondary minerals.

Apparent and bulk density were measured on carbonate-devoid samples (only basaltic component). Taking into account the grain density and the carbonate concentration, we calculated the density and the porosity for carbonate-rich samples (basalt and carbonate). In both cases, calculated porosity increases upwards from the basalt to the coherent saprolite then decreases in the friable saprolite and increases again in the topsoil (*figure 3*). For the carbonate-rich samples, the calculated porosity is higher in bulk samples due to the porous carbonate component compared to the basaltic component *sensu stricto*.

Measuring porosity by mercury injection allows both the open and trapped porosity to be calculated. For the same sample, open porosity measured is in agreement with the calculated one. Nevertheless, there is still a small and random discrepancy between the two porosity values. Open porosity is

divided using pore diameter relative to micro ($\phi < 0.1 \mu\text{m}$), meso ($0.1 \mu\text{m} < \phi < 10 \mu\text{m}$) and macroporosity ($\phi > 10 \mu\text{m}$). In the basalt, from the bottom of the weathering sequence, macroporosity (centered on a 240 μm peak) is of structural type (cracks) and is very low compared to the textural mesoporosity (centered on 6–8, 1.9 and 0.5 μm peaks) and to the microporosity ($< 0.1 \mu\text{m}$) attributed to primary and clay mineral pattern (*figure 3*). Internal porosity of minerals and presence of strangling cracks is responsible for high trapped porosity (78 %) in the fresh basalt. The coherent saprolite displays an increase of the trapped porosity and macroporosity which became centered to pore diameter of 20 μm (*figure 4a*) by partial filling of cracks by inherited primary mineral weathering products. In the friable saprolite, mesoporosity develops strongly (more than 60 % of the open porosity) by partial dissolution and epigenetic replacement of primary minerals by carbonates. In this layer, basalt is poorly weathered and exhibits the same micro- and macroporosity distribution as those observed in the fresh basalt (*figure 4b*). In the saprolite, part of the macroporosity is due to no-longer active root voids. The topsoil porosity is dominated by a structural inter-aggregate macroporosity (20 μm).

These results demonstrate that from Trias to Early Quaternary, the weathering of basalt has developed a porous and clayey saprolite. During the Quaternary, meteoric water circulation induced carbonate precipitation, firstly taking place by secondary and primary mineral replacement (within the coherent saprolite) and secondly by direct weathering of primary minerals within the friable saprolite. In the coherent saprolite, the dominance of smectitic weathering and partial filling of fracture by clay minerals induces an increase of the open porosity (micro and mesoporosity) and the trapped porosity. While the porous character of the friable saprolite is linked to the abundance of carbonate matrix which replaces the primary minerals. At the weathering front, within the coherent saprolite, both smectitic weathering and carbonatation compete as a coupled self-organized chemical system.

1. Introduction

La porosité d'une roche constitue un paramètre essentiel de la circulation des solutions et donc du contrôle des interactions eau-roche. De plus, l'étude et le traitement de certains problèmes environnementaux, tels que pollution des sols, anoxie..., nécessite une connaissance quantitative et qualitative de la porosité des systèmes étudiés. En effet, la porosité agit directement sur le temps de résidence des éléments chimiques dans le sol, et donc sur leur taux de transfert dans la nappe phréatique (Beven et Germann, 1982 ; White, 1985 ; Mertz, 1991). Dans un sol, la porosité est partagée entre une composante texturale, liée à l'arrangement des constituants du sol, et une composante structurale, correspondant aux fissures, à l'activité biologique et aux agrégats (Childs, 1969 ; Monnier et al.,

1973). Cette porosité évolue par ailleurs simultanément aux transferts et aux accumulations de matière (dissolution, précipitation...), qui peuvent modifier les pores dans le temps et dans l'espace (Katsube et Kamineni, 1983). L'étude de la porosité doit ainsi permettre de suivre l'histoire de l'altération supergène de matériaux primaires et secondaires.

Dans ce travail, nous proposons d'étudier les variations de la porosité accompagnant la transformation supergène des basaltes du Trias du Moyen Atlas marocain. Le manteau d'altération choisi présente la particularité d'associer une altération argileuse et une accumulation de carbonates sous forme d'encroûtement. Il nous a donc paru intéressant de comparer l'influence de ces deux processus et leur interaction mutuelle sur la distribution de la porosité du basalte altéré.

2. Site d'étude et méthodes utilisées

La zone d'étude choisie est située sur le Causse de Sefrou dans le Moyen-Atlas (*figure 1*). Le profil d'altération développé sur basalte présente une puissance de 2,8 m. Il montre, de bas en haut : un basalte peu altéré, une saprolite subdivisée en une saprolite cohérente et une autre friable et, au sommet, un sol brun rouge. Macroscopiquement, le profil (*figure 2a*) montre une présence croissante des carbonates, du basalte frais jusqu'au sommet de la saprolite friable. Ces carbonates se développent entre les blocs de basalte et à leurs dépens, la taille des blocs diminuant vers le sommet du profil.

Les caractérisations minéralogiques ont été effectuées par diffraction de rayons X, microscopie optique et microscopie électronique à balayage. La quantification des carbonates a été faite par attaque ménagée à l'acide chlorhydrique dilué à 2 %. La porosité a été estimée par deux méthodes : (1) calcul à partir de la densité de la roche sèche (D_{app}) et de la densité moyenne de la matrice minérale (D_r) — formule (a) — et (2) par porosimétrie par injection de mercure.

$$P = \left(\frac{D_r}{D_{app}} - 1 \right) \times 100 \quad (a)$$

La porosimétrie au mercure permet de quantifier la porosité réellement impliquée dans les processus de circulation des solutions (porosité ouverte). Elle permet

également d'accéder à la distribution de la taille des accès aux pores de cette porosité ouverte. Le principe de base de cette technique consiste à faire pénétrer du mercure dans un échantillon préalablement dégazé, en exerçant des pressions croissantes sur le mercure. Dans le cas d'un capillaire droit, le diamètre de ce capillaire peut être relié à la pression appliquée au mercure, grâce aux lois de Jurin et de Laplace. La relation s'exprime sous la forme :

$$P = \frac{2 \sigma \cos \theta}{r} \quad (b)$$

avec P la pression appliquée (Mpa), θ l'angle de raccordement du ménisque mercure-vapeur de mercure à la paroi, r le rayon du capillaire, σ la tension superficielle du mercure et de sa vapeur.

La porosimétrie au mercure permet aussi d'accéder à la mesure de la porosité piégée. Celle-ci correspond au volume de mercure restant dans l'échantillon après retour à la pression atmosphérique. Ce piégeage est dû, en première approximation, à la morphologie des cavités et permet d'accéder à un rapport $V_{pores}/V_{fissures}$ (Wardlaw et Mc Kellar, 1981).

3. Résultats

La caractérisation minéralogique du profil montre une dominance des processus d'altération argileuse dans la saprolite cohérente. Ceux-ci sont illustrés par l'abondance des smectites au regard des autres composants (*figure 2b*). En revanche, la saprolite friable contient une forte quantité de calcite. La calcite se développe aux dépens des minéraux silicatés primaires et secondaires par remplacement pseudomorphique.

3.1. Porosité calculée

Le basalte le moins altéré (à la base du profil) présente une porosité calculée totale de 9 %. Pour la composante basaltique, dans la saprolite cohérente, cette porosité augmente et atteint 23 % (*figure 2c*) ; en revanche, dans la saprolite friable, la porosité est comparable à celle du basalte frais, exception faite des échantillons 10 et 11, plus poreux (22 %).

La matrice carbonatée présente une porosité de 52 %. Connaissant l'abondance de cette matrice dans les échantillons contenant du carbonate (saprolite friable), nous avons recalculé la porosité totale de ces échantillons. Cette porosité varie entre 26 et 34 % ; elle est nettement supérieure à la porosité de la composante basaltique seule (*figure 2c*).

Dans le sol, la porosité totale est de 49 %.

3.2. Porosité mesurée par injection de mercure

3.2.1. Porosité ouverte et porosité piégée

Dans le basalte de la base du profil, la porosité ouverte est de 9,7 %, fraction dans laquelle la porosité piégée représente 78 %. Dans la saprolite cohérente, la porosité

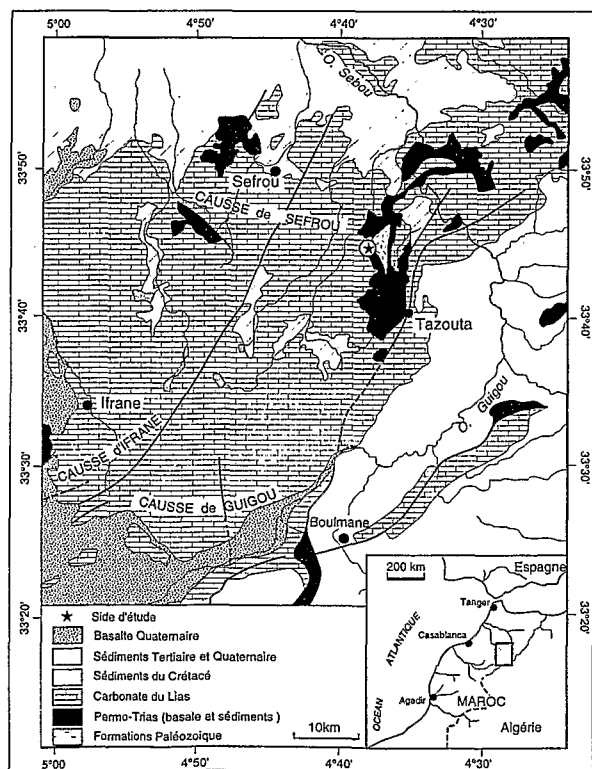


Figure 1. Localisation du site d'étude (*) sur une carte géologique du Moyen Atlas central (d'après Martin, 1973).

Location of the studied site (*) on a geological map of the central Middle Atlas (after Martin, 1973).

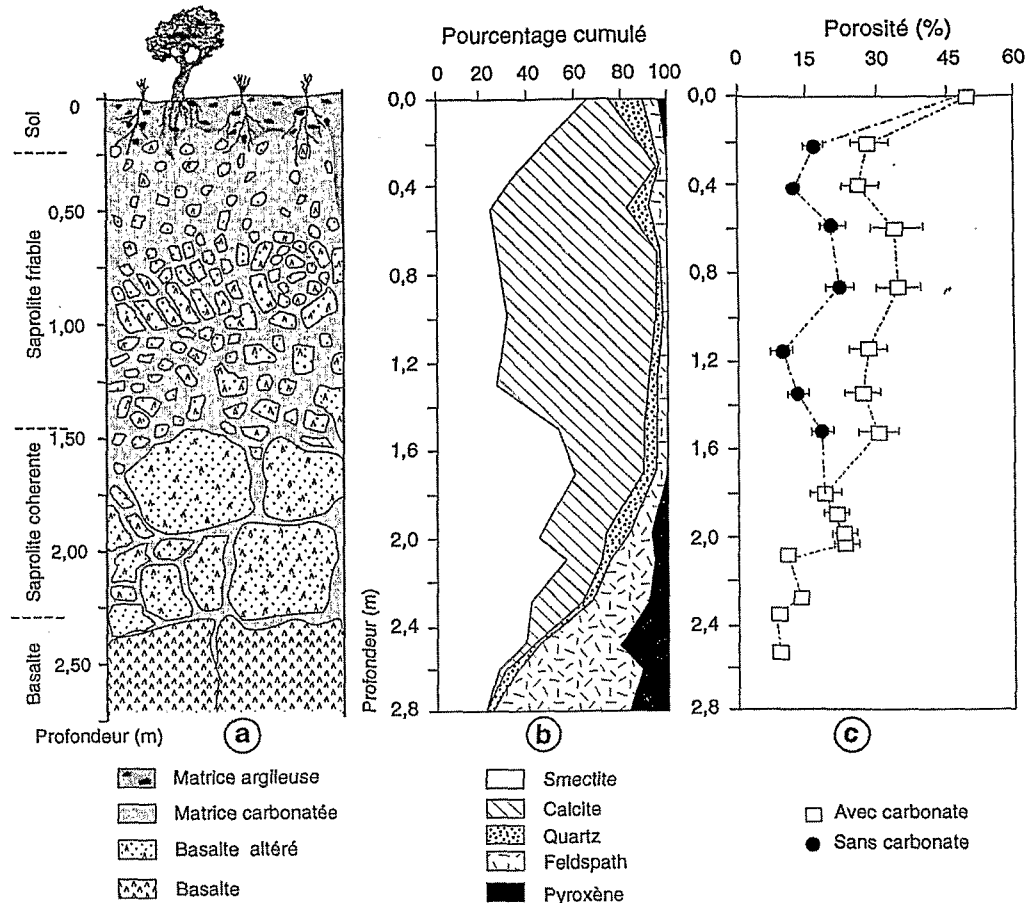


Figure 2. Schéma simplifié du profil étudié (a) et évolution des compositions minéralogiques (b) et de la porosité (c) le long du profil.

Sketch of the studied profile (a) with mineralogical (b) and porosity (c) evolution.

ouverte augmente et atteint 21,8 %, la porosité piégée étant de 84 %. Dans la saprolite friable, et exception faite de l'échantillon T11, la porosité ouverte et la porosité piégée diminuent par rapport aux valeurs mesurées dans la saprolite cohérente. Dans le sol, la porosité ouverte représente 50,3 % de l'échantillon total. Enfin, la matrice carbonatée présente une porosité ouverte de 51,9 %, dont seulement 57 % est piégée.

Les porosités calculées par la méthode des densités et mesurées par injection de mercure montrent une bonne concordance. Les écarts entre les valeurs données par ces deux méthodes restent cependant relativement aléatoires, d'un échantillon à l'autre.

3.2.2. Macro, méso et microporosité

Le seuil de coupure entre la macroporosité et la mésoporosité est variable selon les auteurs et dépend des matériaux étudiés. Les valeurs les plus couramment utilisées sont 1 μm (Bousquié, 1979 ; Dessandier, 1995), 4 μm (Dekayir, 1994) et 7,5 μm (Caye et al., 1970).

Nous allons considérer, pour notre part, 3 classes de porosités ouvertes : la macroporosité ($\phi > 10 \mu\text{m}$), la mésoporosité ($0,1 \mu\text{m} < \phi < 10 \mu\text{m}$) et la microporosité ($\phi < 0,1 \mu\text{m}$). La signification de la partie supérieure de la classe de macroporosité peut être discutée. Une porosité

apparente dont les diamètres d'accès sont supérieurs à 100 μm peut être induite par des effets de surface, dus à la rugosité de la surface de l'échantillon.

La répartition de ces classes de porosité dans les différents faciès est illustrée par la figure 3. Dans le basalte, la macroporosité est réduite et ne représente que 13 % de la porosité ouverte. Elle est représentée par une famille de pores centrés sur 240 μm (figure 4a). La mésoporosité représente 46 % de la porosité ouverte et comprend 3 familles de diamètres d'accès, centrés sur 6-8, 1,9 et 0,5 μm . La microporosité représentant 40 % de la porosité ouverte correspond à une famille de pores de diamètre inférieur à 0,01 μm .

Dans la saprolite cohérente, le basalte altéré montre une augmentation de la macroporosité, qui atteint 43 % de la porosité ouverte. Cette macroporosité est dominée par une famille de pores autour de 20 μm (figure 4a). La mésoporosité (autour de 40 % de la porosité ouverte), centrée sur des pores de 7,5 μm de diamètre, est comparable à celle du basalte de la base du profil. La microporosité ne dépasse pas 28 % de la porosité ouverte et présente des diamètres d'accès inférieurs à 0,01 μm .

Dans la saprolite friable, la macroporosité est comparable, en abondance (moins de 20 % de la porosité ouverte) et en distribution de taille des pores (240 μm), à celle

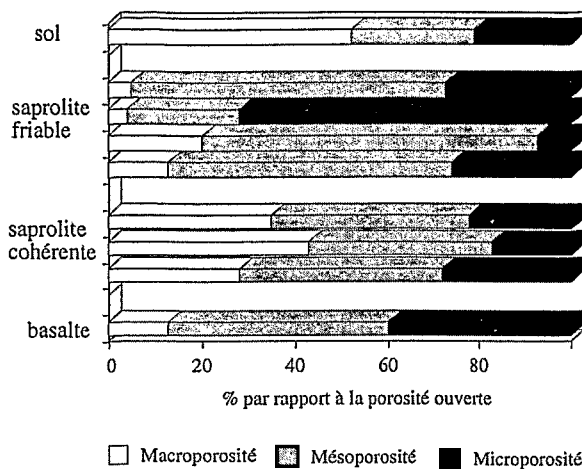


Figure 3. Variations de l'importance relative de la micro, de la méso et de la macroporosité (exprimée en % de la porosité ouverte) dans le profil.

Relative variation of micro, meso and macroporosity (in % of open porosity) over the profile.

du basalte le moins altéré (figure 4b). En revanche, la mésoporosité est importante (plus de 60 % de la porosité ouverte) et correspond à des pores de diamètre d'accès étendus entre 10 et 0,1 μm , centrés sur 1 μm . La matrice carbonatée est dominée par une mésoporosité (plus de 60 %) centrée sur des pores de diamètre d'accès de 8–10 μm (figure 4b).

4. Discussion et conclusion

Les porosités des échantillons bruts (méthode des densités et porosimétrie à mercure) augmentent dans le profil en partant du basalte le moins altéré à la base du profil, dans la saprolite cohérente riche en argiles, puis dans la saprolite friable à dominante carbonatée.

La porosité mesurée dans le basalte de la base du profil (9 à 10 %) est très élevée. Elle correspond à une porosité interne aux minéraux primaires et aux argiles (microporosité et mésoporosité). Celle-ci, par exemple, peut atteindre 2 % en volume dans les plagioclases (Montgomery et Drace, 1975). À ceci se rajoute une porosité liée à des fissures inter- et intracrystallines (macroporosité). L'importance de la porosité piégée dans ce basalte est liée, d'une part, à la tortuosité et à la présence d'étranglements dans les fissures et, d'autre part, aux pores développés dans les minéraux primaires.

Dans la saprolite cohérente, les modifications du spectre poral du basalte sont attribuées à deux processus majeurs.

L'altération supergène des minéraux primaires

La relation entre l'altération des minéraux et les modifications de la porosité est bien illustrée par l'altération des pyroxènes. En effet, l'altération des pyroxènes permet

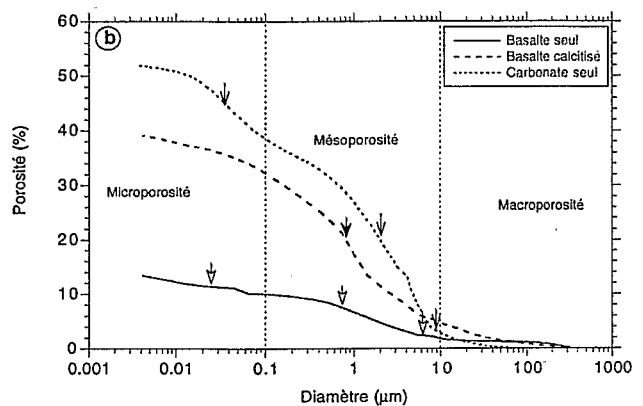
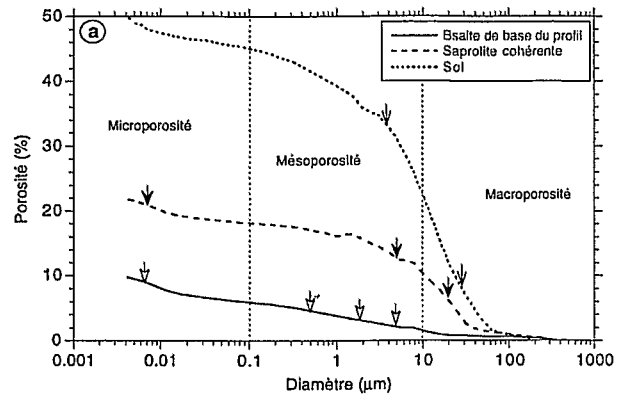


Figure 4. Exemples de courbes de porosités représentatives (a) du basalte, de la saprolite cohérente et du sol ; (b) de la saprolite friable (le basalte seul, la matrice carbonatée et le mélange basalte-carbonate). Les flèches indiquent les classes significatives de porosité.

Porosity curves of (a): basalt, coherent saprolite and soil; (b): friable saprolite (basalt, carbonate matrix and basalt-carbonate mixture). Arrows indicate the significant pore sizes.

l'ouverture, outre de la mésoporosité interne à la matrice argileuse, d'une macroporosité séparant les phases argileuses de la relique du pyroxène parental. Au cours des cycles de dessiccation-humectation, la différence de plasticité entre l'argile et le pyroxène crée des vides entre ces deux produits, qui correspondent à la macroporosité.

Le transfert et l'accumulation de matière

Les solutions circulant dans le profil induisent la précipitation ou le dépôt de phases argileuses et/ou carbonatées dans les fissures. Ce colmatage, souvent partiel, des fissures explique la diminution, dans ce faciès, du diamètre modal de la macroporosité de 240 μm à 15–20 μm . Il est également à l'origine de l'augmentation de la porosité piégée et de tortuosité, par la création d'étranglements dans les fissures. De manière générale, l'augmentation de la porosité piégée dans les premiers stades de l'altération a été rapportée dans la littérature (Géraud, 1991).

Dans la saprolite friable, mis à part l'échantillon 11, le basalte est assez peu poreux. Hormis l'échantillon 12, très

microporeux, les caractéristiques macroporales et microporales sont comparables à celles du basalte de la base du profil. En revanche, l'altération des plagioclases et des pyroxènes crée des vides de dissolution (absence de produits secondaires) et augmente la mésoporosité par rapport au basalte de la base du profil. Dans ce faciès, le principal processus supergène correspond au remplacement pseudomorphique des minéraux silicatés par les carbonates. Ces remplacements laissent apparaître deux sortes de porosités, une porosité texturale de la matrice carbonatée (microporosité au sein de la micrite) et une porosité structurale (mésoporosité) liée aux vides qui apparaissent entre le carbonate et le minéral remplacé (Wang et al., 1994). La présence et l'abondance de la matrice carbonatée rendent donc ce faciès très poreux, et plus particulièrement méso- et microporeux, avec une faible porosité piégée.

Dans le sol, la porosité est principalement une macroporosité structurale inter-agrégats, mais comprend une fraction de microporosité interne aux argiles.

Sur une grande partie de la saprolite, la macroporosité est fortement liée aux vides résultant de la dégradation des racines. Les observations au microscope optique montrent que la taille de ces vides peut varier d'une centaine de microns jusqu'au centimètre. Ces vides sont parfois partiellement remplis par des aiguilles de calcite, ce qui

expliquerait en partie l'augmentation de la porosité piégée.

Depuis sa mise en place jusqu'au Quaternaire, l'altération en boule du basalte développe une saprolite et un sol avec une porosité ouverte (macroporosité principalement) et une porosité piégée, qui augmentent du basalte frais vers le sol. Au cours du Quaternaire, la carbonatation du profil accompagne l'altération argileuse du basalte (Hamidi, 1996). L'augmentation de la porosité ouverte, de la base vers la surface, favoriserait une carbonatation du basalte *per descensum*. Dans la saprolite friable, le front de carbonatation, plus rapide, rattrape celui de l'altération argileuse. La carbonatation affecte alors directement le basalte relictuel, encore peu altéré. Ceci a été clairement observé à l'échelle du minéral, où la calcite remplace directement les minéraux primaires du basalte très peu ou non altérés, et explique le caractère peu poreux de la composante basaltique correspondant à des cœurs de boules, très peu ou non altérés dans la saprolite friable. Cependant, l'abondance d'une matrice carbonatée très microporeuse maintient quantitativement le caractère très poreux de ce faciès. Cette carbonatation directe au sein de la saprolite friable libère les éléments qui participent à la smectitisation au front d'oxydation au sein de la saprolite cohérente, les deux processus alternant au cours du temps.

5. Références

Beven K. et Germann P. 1982. Macropores and water flow in soils, *Water Resour. Res.*, 18 (5), 1311-1325

Bousquié B. 1979. Texture et porosité de roches calcaires. Relation avec la perméabilité, l'ascension capillaire, gélivité et conductivité thermique, *Thèse*, Université Paris-6, 191 p.

Caye R., Pierrot R., Ragot J.-P. et Prevosteau J.-M. 1970. Méthodes de visualisation des milieux poreux en vue de leur analyse quantitative au microscope, *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr.*, 93, 571-578

Childs E.C. 1969. An introduction to the physical basis of soils water phenomena, *Wiley Interscience*, New York, 493 p.

Dekayir A. 1994. Étude de l'altération supergène d'un basalte alcalin Quaternaire du Moyen-Atlas (Maroc), *Thèse*, Université Aix-Marseille-3, 181 p.

Dessandier D. 1995. Étude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine. Application à la durabilité des pierres en oeuvre, *Thèse*, Université de Tours, 279 p.

Géraud Y. 1991. Déformation thermomécanique et porosité des roches granitiques. Évolution des espaces poreux, *Thèse*, Université Aix-Marseille-1, 289 p.

Hamidi E.M. 1996. Altération et formation des encroûtements carbonatés sur basaltes : exemple des basaltes triasiques du Moyen Atlas (Maroc), *Thèse*, Université Aix-Marseille-3, 223 p.

Katsube T.J. et Kamineni D.C. 1983. Effect of alteration on pore structure of crystalline rocks: core samples from Atikokan Ontario, *Canad. Mineral.*, 21, 637-646

Martin J. 1973. Carte géomorphologique du Moyen Atlas central au 1/100 000, avec un schéma structural au 1/500 000, *Notes et Mém. Serv. Géol. Maroc*, 14, 117-132

Mertz J.-D. 1991. Structures de porosité et propriétés de transport dans les grès, *Sci. Géol. Mém.*, Strasbourg, 90, 149 p.

Monnier G, Stengel P. et Fiès J.-C. 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol, *Ann. Agron.*, 24, 5, 523-545

Montgomery C.W. et Brace W.F. 1975. Micropores in plagioclase, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 52, 17-28

Wang Y., Nahon D. et Merino E. 1994. Dynamic model of the genesis of calcretes replacing silicate rocks in semi-arid regions, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59 (8), 1559-1570

Wardlaw N. C. et Mac Kellar M. 1981. Mercury porosimetry and the interpretation of pore geometry in sedimentary rocks and artificial models, *Powder Technol.*, 29, 127-143

White R.E. 1985. The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil, *Adv. Soil Sci.*, 3, Springer, New York