HAL
open science

Apport d'un nouveau dispositif pour améliorer l'estimation du retrait-gonflement des argiles

Tatiana Maison, Jean-Bernard Kazmierczak, Farid Laouafa, Patrice Delalain

To cite this version:

Tatiana Maison, Jean-Bernard Kazmierczak, Farid Laouafa, Patrice Delalain. Apport d'un nouveau dispositif pour améliorer l'estimation du retrait-gonflement des argiles. 6. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG 2012) "Espaces Urbains, Ruraux, Souterrains et Littoraux", Jul 2012, Bordeaux, France. pp.419-426. ineris-00973673

HAL Id: ineris-00973673

https://ineris.hal.science/ineris-00973673

Submitted on 4 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

APPORT D'UN NOUVEAU DISPOSITIF POUR AMELIORER L'ESTIMATION DU RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES

CONTRIBUTION OF A NEW DEVICE TO IMPROVE THE ESTIMATION OF THE SWELLING-SHRINKAGE OF CLAYS

Tatiana MAISON[1], Jean-Bernard KAZMIERCZAK[2], Farid LAOUAFA[2], Patrice DELALAIN[2]

1 Institut Polytechnique LaSalle, Beauvais, France
2 INERIS, Verneuil-en-Halatte, France

RÉSUMÉ — L'article présente un nouveau dispositif expérimental, développé dans un Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE), permettant de mesurer simultanément l'évolution de la déformation surfacique d'agrégats argileux et l'évolution de leur teneur en eau. L'état initial des échantillons est sous forme de poudre, ce qui permet d'effectuer un cycle d'humidification-séchage complet en 24 heures, à la différence des essais classiques à l'échelle mésoscopique. Les résultats obtenus peuvent être corrélés aux profils d'évolution de la teneur en eau en fonction de la profondeur établis in situ.

ABSTRACT — The paper presents a new experimental device, developed in an Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM), allowing to measure simultaneously the evolution of the surface strain of clayey aggregates and the evolution of their water content. The initial state of samples is in powder form, what allows making a complete cycle of wetting-drying in 24 hours, unlike the classic tests in the mesoscopic scale. The obtained results can be correlated in the profiles of evolution of the water content according to the depth workbenches in situ.

1. Introduction

Le réchauffement climatique, reconnu par une grande partie de la communauté scientifique, peut induire des périodes de sécheresse dans les régions tempérées à équatoriales. Cette sécheresse a engendré ces dernières années des conséquences de grande ampleur sur les sols argileux. Ces sols ont la particularité de se dilater (gonflement) et se contracter (retrait) selon l'évolution de la teneur en eau, dépendante, entre autres, de la pluviométrie, de l'hygrométrie et de la température. Ces phénomènes de retrait/gonflement se traduisent par deux conséquences majeures : la modification des propriétés physiques du sol et des déformations induisant des tassements différentiels sur les structures.
L'amélioration de la connaissance des mécanismes physico-chimiques mis en jeu à l'échelle locale lors du retrait et du gonflement des matériaux argileux est une étape incontournable pour la caractérisation de la sensibilité de ces sols et de leur prédisposition vis-à-vis du phénomène de retrait/gonflement.

Le retrait-gonflement des sols argileux exige, pour son évaluation sur une zone donnée, des paramètres obtenus par des essais en laboratoire, menés sur des échantillons de plusieurs centimètres cubes. La faible cinétique des sols argileux implique des durées de tests jusqu'à trois mois pour des tests triaxiaux ou des courbes de rétention.

Aujourd'hui, cet inconvénient peut être surmonté avec l'utilisation du Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE). Le contrôle des conditions hygrométriques dans la chambre du MEBE permet l'analyse de l'échantillon dans des conditions hygrométriques in situ (Romero et Simms, 2008). Les échantillons peuvent être étudiés sous forme de poudre, ce qui diminue la durée du test à 24 heures pour les argiles.

Pour étudier le comportement du retrait-gonflement dans les sols argileux, des observations au MEBE ont été effectuées sur des argiles naturelles (prélevées *in situ*). Deux argiles sont présentées comme exemple : une argile naturelle homogène (montmorillonite grecque) (Fleureau *et al.,* 1993 ; Christidis *et al.,* 1997) et une argile naturelle hétérogène (argile verte de Romainville) (Audiguier *et al*., 2007).

Le but de cet article est de proposer l'observation et l'analyse de l'évolution du retrait-gonflement des deux argiles naturelles en fonction de leur teneur en eau. A cette fin, un dispositif expérimental a été développé pour peser l'échantillon sous forme de poudre en même temps que l'observation des particules d'argile. Avec la mesure de l'évolution du poids et la teneur en eau initiale, l'évolution de la teneur en eau peut être obtenue et liée avec l'évolution de la déformation surfacique des particules argileuses.

A partir de ces résultats, quelques applications peuvent être imaginées comme la corrélation avec des mesures d'évolution de la teneur en eau *in situ* en fonction de la profondeur. L'extrapolation de l'échelle microscopique du MEBE à l'échelle macroscopique des structures pourrait être établie pour l'évaluation du retrait-gonflement, par exemple sur une zone donnée.

2. Principales caractéristiques des argiles étudiées

La montmorillonite grecque provident de l'île de Milos, dans l'archipel des Cyclades, et présente une origine volcanique. Comme son nom l'indique, elle est composée principalement de smectite, une espèce argileuse gonflante. Les principales caractéristiques de cette argile sont présentées dans le tableau 1. Pour cette argile, un gonflement libre d'environ 90 % a été mesuré avec des essais géotechniques classiques (Fleureau *et al.,* 1993).

L'argile verte de Romainville provient de l'Est de Paris (France), et présente une origine sédimentaire. Les espèces argileuses en présence sont la kaolinite, l'illite, des interstratifiés illite/smectite et elle contient également des carbonates, du quartz et du feldspath. Le caractère hétérogène de cette argile se retrouve également à l'échelle microscopique. Cette argile a été caractérisée par Audiguier (Audiguier *et al.*, 2007) et Makki (Makki *et al.,* 2008) (Tableau 2). Des essais de gonflement libre à l'oedomètre ont été effectués sur des échantillons remaniés à la limite de liquidité et ramenés à la teneur en eau initiale. Le taux de gonflement libre moyen (rapport entre

le déplacement maximal et la hauteur initiale de l'éprouvette) mesuré lors de ces essais sur échantillons remaniés est de 25 % (Audiguier *et al.,* 2007).

Tableau 1 . Caractérisation géotechnique de la montmorillonite grecque (d'après Fleureau *et al.,* 1993 et Christidis *et al.,* 1997)

Limite de liquidité, w_L, %	Limite de plasticité, w_P, %	Indice de plasticité, I_p	Surface spécifique, m²/g	CEC, meq/100 g	Teneur en eau initiale (%)
170	60	110	61,76	104,4	5

Tableau 2 . Caractérisation géotechnique de l'argile verte de Romainville (d'après Audiguier *et al.,* 2007 et Makki *et al.*, 2008)

Limite de liquidité, w_L, %	Limite de plasticité, w_P, %	Indice de plasticité, I_p	Surface spécifique, m²/g	CEC, meq/100 g	Teneur en eau initiale (%)
75	40	35	195	39,5	32

3. Analyse du retrait/gonflement au Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE)

3.1. Présentation du MEBE

Le Microscope Electronique à Balayage Environnemental (MEBE) permet d'observer des échantillons dans des conditions environnementales (température, pression, hygrométrie) contrôlées. La particularité du MEBE est d'avoir un système de pompage différentiel qui sépare la chambre (lieu de positionnement de l'échantillon) de la colonne (par où passe le faisceau d'électrons). Ainsi la colonne est soumise à un vide élevé (10^{-5} Torr[1]), alors que dans la chambre règne une pression de quelques Torr (0,1 à 20 Torr). Le gaz utilisé lors de nos expériences est la vapeur d'eau, qui joue à la fois le rôle de gaz d'ionisation (Figure 1) pour la formation de l'image et de fluide d'hydratation de l'échantillon.
Le mode « environnemental » permet l'observation des échantillons sans aucune préparation préalable (comme par exemple la métallisation à l'or ou au carbone, indispensables en mode classique) et ainsi de préserver la structure des échantillons et leur teneur naturelle en eau. Par effet Peltier, il est possible d'imposer une température à l'échantillon et, par l'intermédiaire du contrôle de la pression dans la chambre d'observation, d'effectuer des analyses sous hygrométrie contrôlée. Le MEBE ne permet toutefois que des observations microscopiques de surface. Les essais réalisés peuvent être monotones (hydratation, séchage) avec ou sans palier, mais également cycliques.

[1] 1 Torr = $1{,}3332.10^2$ Pa

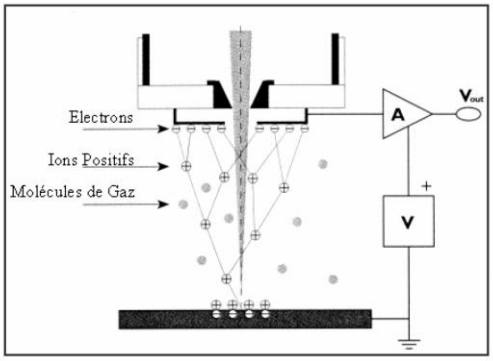

Figure 1 . Représentation schématique de l'ionisation d'un gaz dans la chambre du MEBE (Montes-H., 2002)

3.2. Développement d'un dispositif expérimental

Pour mesurer la teneur en eau de l'échantillon et la déformation surfacique des particules simultanément, un nouveau dispositif expérimental a été développé dans le MEBE, qui a été breveté (brevet n°10-54771). Le principe est de peser l'échantillon et d'obtenir une évolution et une intensité précises de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative. Pour cela, le dispositif expérimental est constitué d'un capteur de force couplé à un bras de levier afin d'amplifier l'évolution du poids. Le bras de levier est assez long pour obtenir une amplification suffisante et est réalisé en aluminium. Son extrémité contient une coupelle avec une cavité où le microéchantillon de sol (sous forme de poudre) de très petit volume (quelques millimètres cube) est déposé et un plateau pour la zone d'observation. Pour concentrer l'humidité relative sur l'échantillon, l'extrémité du bras de levier est entourée d'un doigt de confinement en cuivre qui est relié avec la platine Peltier du MEBE. Faute d'une place suffisante, une partie du dispositif doit être externalisée par rapport à la chambre du MEBE. A cet effet et pour maintenir les conditions environnementales (pression et température), une enceinte en aluminium est installée sur le MEBE (Figure 2B). Une centrale d'acquisition permet de suivre simultanément plusieurs paramètres dans la chambre du MEBE :

- la température à l'intérieur du doigt de confinement (capteur PT100);
- la température à l'intérieur de la chambre du MEBE (capteur PT100);
- la température de la platine Peltier (donnée par le MEBE);
- la pression à l'intérieur de la chambre du MEBE (jauge de pression);
- l'évolution de poids de l'échantillon (capteur de force).

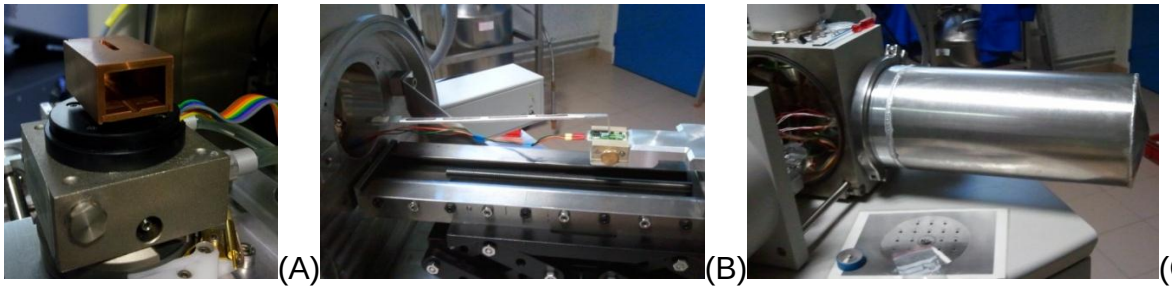

Figure 2 . Configuration du dispositif expérimental dans la chambre du MEBE : doigt de confinement (A) ; capteur de force et bras de levier (B); fermé avec l'enceinte (C)

3.3. Protocole expérimental

Le protocole expérimental réalisé lors de l'analyse de ces agrégats consiste à appliquer graduellement des degrés d'humidité relative avec des paliers de temps d'équilibre régulier (de 10 à 60 minutes selon le type de sol argileux), afin de laisser suffisamment de temps pour que les processus d'hydratation et de déshydratation atteignent un état d'équilibre au sein des agrégats argileux. Le taux d'humidification est ainsi plus lent et régulier et semble plus proche des conditions in situ. Le protocole expérimental comporte deux phases: pendant la première, les paliers de temps sont appliqués pour différents incréments d'humidité relative (HR) (incréments de 10 % d'HR jusqu'à 85 % d'HR). Dans la seconde phase, les paliers de temps sont appliqués pour différents incréments de pression (incréments de 10 Pa, 5 Pa et 1 Pa) (Figure 3). Avec un tel protocole, une bonne précision dans l'hydratation des agrégats argileux et dans les mesures de gonflement aux fortes humidités relatives, peut être obtenue. L'immersion de la zone d'observation est retardée grâce au taux d'hydratation modéré, rendant ainsi possible l'analyse des images acquises lors de l'essai.

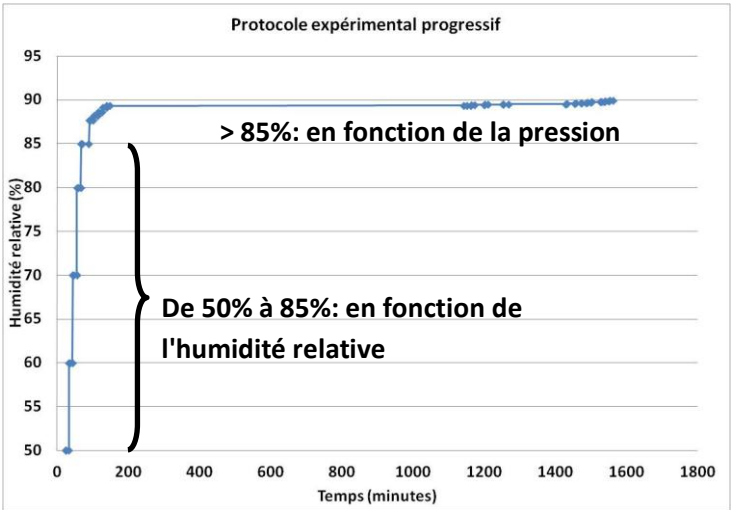

Figure 3 . Humidité relative en fonction du temps : protocole expérimental utilisé pour l'argile verte de Romainville

L'argile verte de Romainville est analysée sous forme de poudre et soumise à un cycle d'humidification-séchage. Afin d'effectuer des observations au MEBE, la poudre est déposée sur un scotch double face carbone pour éviter le déplacement des agrégats pendant l'humidification. La température est maintenue constante à 18°C à l'intérieur du doigt en cuivre et la pression est contrôlée pour obtenir l'humidité relative désirée. L'hygrométrie initiale dans la chambre du MEBE est d'environ 50 %. Le cycle d'humidification-séchage est appliqué sur l'ensemble de l'échantillon mais seule une zone est observée.
L'évolution de la surface apparente des agrégats argileux est suivie en temps réel. La déformation surfacique induite par le retrait et le gonflement est déduite de l'analyse des images acquises (de 1500 à 2000 photos en moyenne) avec le logiciel Scandium. Le terme « déformation surfacique » est utilisé pour définir le changement relatif de surface des agrégats au temps t_i par rapport à l'état initial (Figure 4) :

$$\varepsilon_s = \frac{S_i - S_0}{S_0} = \frac{\Delta S}{S_0} \qquad (1)$$

où S_i = déformation surfacique au temps t_i; S_0 = surface initiale de l'agrégat.
La déformation volumique ε_v est égale à:

$$\varepsilon_v = \alpha \varepsilon_s \qquad (2)$$

Où $\alpha > 1$ est fonction du degré d'isotropie ou d'anisotropie du gonflement ou du retrait.

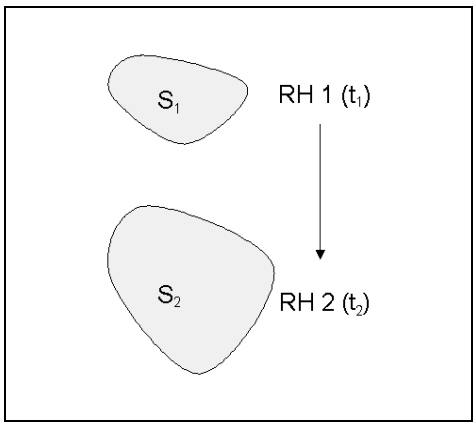

Figure 4 . Définition de la déformation sur la base des paramètres du temps, de la surface et de l'humidité relative des agrégats argileux

4. Analyse expérimentale

Ces expériences permettent de déterminer deux types de résultats. Les mesures sur la zone d'observation permettent d'obtenir l'évolution de la déformation surfacique en fonction de l'humidité relative. Pour la même taille de particules d'argile (50 µm), le temps requis pour atteindre le temps d'équilibre (30 minutes pour la montmorillonite grecque, 1 heure pour l'argile verte de Romainville) et le gonflement (60 % pour la montmorillonite grecque, 27 % pour l'argile verte de Romainville) sont différents. Rappelons que la première est composée principalement de smectite et la deuxième

de divers minéraux (kaolinite, illite, interstratifiés illite/smectite, carbonates, quartz, feldspath). Le gonflement peut se développer librement dans la montmorillonite grecque grâce à la smectite. En revanche, le gonflement peut être gêné dans l'argile verte de Romainville à cause de deux paramètres : (i) la présence de kaolinite et illite, qui sont des espèces argileuses avec des liaisons fortes; (ii) les carbonates connus pour constituer une cimentation (Maison *et al*. 2010a). Cependant, l'allure générale de la courbe est semblable, montrant que la majeure partie des déformations surfaciques se produit aux fortes humidités relatives (supérieur à 75 % d'humidité relative). Il peut être souligné que le gonflement mesuré pour l'argile verte de Romainville dans les observations au MEBE est semblable au gonflement mesuré avec des essais oedométriques de gonflement libre classiques (Maison *et al*. 2010b). Les mesures d'évolution du poids avec le dispositif expérimental permettent d'obtenir l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative. La qualité de cette courbe dépend fortement de la quantité de sol, le temps d'équilibre des paliers et la stabilité des conditions environnementales pendant l'expérience. Ces deux courbes peuvent être corrélées pour obtenir l'évolution de la déformation surfacique en fonction de la teneur en eau (Figure 5). Nous retrouvons la différence entre les deux types d'argiles avec la gamme de teneur en eau (jusqu'à 28 % pour la montmorillonite grecque; jusqu'à 12 % pour l'argile verte de Romainville) en raison de la présence de smectite qui permet une évolution de la teneur en eau plus importante.

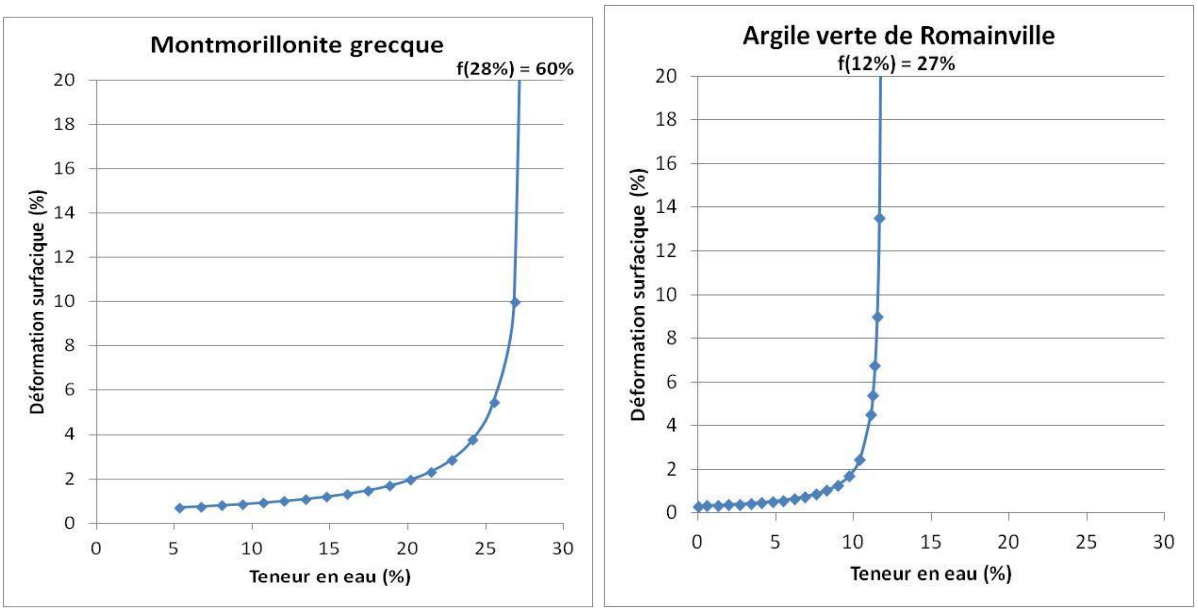

Figure 5 . Courbe reliant la variation de la déformation surfacique à la teneur en eau pour la montmorillonite grecque et l'argile verte de Romainville.

5. Conclusion et perspectives

L'étude du retrait-gonflement des sols argileux est constituée de nos jours principalement d'essais en laboratoire qui requièrent plusieurs semaines pour obtenir des résultats. Nous proposons une approche différente qui consiste en l'étude des

sols argileux avec un MEBE avec de petites quantités d'échantillon. La durée de l'expérience de temps est ainsi diminuée (jusqu'à 24 heures). Les essais consistent à mesurer l'évolution de la déformation surfacique en fonction de la teneur en eau grâce à un nouveau dispositif expérimental. Les résultats obtenus sur l'argile verte de Romainville sont cohérents avec ceux obtenus à l'échelle mésoscopique (essais en laboratoire).

A partir de ces résultats, nous pouvons imaginer quelques applications avec des approches simples afin d'extrapoler ces résultats à l'échelle macroscopique des structures. Une approche analytique, basée sur des mesures in situ d'évolution de la teneur en eau en fonction de la profondeur, pourrait permettre l'évaluation rapide du tassement différentiel sous une structure. Elle pourrait être utilisée par des laboratoires ou des bureaux d'étude comme une approche rapide qui peut être basée sur des données facilement accessibles. Une approche numérique, basée sur l'analogie avec le comportement thermomécanique, pourrait permettre de mener des simulations numériques sur plusieurs structures soumises au retrait-gonflement.

Références bibliographiques

Audiguier M., Geremew Z., Laribi S., Cojean R. (2007). Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux, Rev. franç. Géotec., 120-121, 67-82.

Christidis G.E., Scott P.W., Dunham A.C. (1997). Acid activation and bleaching capacity of bentonites from the islands of Milos and Chios, Aegean, Greece, Appl. Clay Sci., 12, 329-347.

Fleureau J.M., Kheirbek-Saoud S., Soemitro R., Taibi S. (1993). Behavior of clayey soils on drying-wetting paths, Can. Geotech. J., 30, 287-296.

Kazmierczak J.B., Maison T., Delalain P., Laouafa F. (2011). Dispositif et procédé de caractérisation d'un matériau, Brevet 10-54771, 14 juin 2011.

Makki L., Duc M., Droniuc N., Reiffsteck P., Maloula A., Magnan J.P. (2008). Essai de retrait pour une meilleure classification de la sensibilité des sols à la sécheresse, SEC2008, Paris, France, 1-3 septembre, 257-264, Editions du LCPC.

Maison T., Laouafa F., Fleureau J.M., Delalain P. (2010a). Analyse au niveau microscopique du comportement hydrique d'agrégats argileux, Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2010), 7-9 juillet 2010, Grenoble.

Maison T., Laouafa F., Fleureau J.M. (2010b). Volume changes of swelling clayey soils at microscopic scale level, UNSAT 2010, 6-8 september 2010, Barcelona, Spain.

Montes-H. G. (2002). Etude expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par microscopie à balayage environnementale (ESEM) et l'analyse digitale d'images, Strasbourg, Ecole et observatoire des sciences de la terre.

Romero E., Simms P.H. (2008). Microstructure Investigation in Unsaturated Soils: A Review with Special Attention to Contribution of Mercury Intrusion Porosimetry and Environmental Scanning Electron Microscopy, Geotech. Geol. Eng., 26, 705–727.