

Mécanismes et cinétique d'évaporation d'un limon compacté

Régis Mpawenayo¹, Frédéric Debaste², Pierre Gerard³

¹Université libre de Bruxelles (ULB), Service BATir, mail : rmpawena@ulb.ac.be

²Université libre de Bruxelles (ULB), Service TIPs, mail : fdebaste@ulb.ac.be

³Université libre de Bruxelles (ULB), Service BATir, mail : piergera@ulb.ac.be

RÉSUMÉ. Des modèles d'évaporation de l'eau du sol tenant compte des conditions atmosphériques ont été formulés par de nombreux chercheurs. La plupart de ces modèles sont calibrés via des essais réalisés in situ ou dans des chambres environnementales. L'utilisation en laboratoire d'échantillons de taille réduite permettrait de diminuer la durée des essais et faciliterait la calibration des modèles d'évaporation. Il faut néanmoins s'assurer que les mécanismes d'évaporation observés au laboratoire sur de petits échantillons soient similaires à ceux observés in situ. Pour analyser cette question, des essais de séchage ont été réalisés sur des échantillons cylindriques d'un limon compacté de hauteurs et de diamètres variables. Les essais sont réalisés dans une chambre hermétiquement fermée sans convection forcée de l'air où l'humidité relative est contrôlée via des solutions salines saturées. Les résultats des essais de séchage réalisés montrent que la surface et la hauteur de l'échantillon ont une influence sur la cinétique d'évaporation de l'eau du sol. Ils mettent également en évidence la nécessité de tester un échantillon suffisamment grand pour que les coefficients de transfert de masse déterminés soient pertinents pour les applications géotechniques.

ABSTRACT. Evaporation correlations taking into account atmosphere conditions have been formulated by many researchers. Many of proposed correlations are calibrated using tests carried out in situ or in an environmental chamber. Using small samples in laboratory tests would reduce the testing time and would facilitate the calibration of evaporation models. Nevertheless, we must ensure that the evaporation mechanisms observed in the laboratory on small samples are similar to those observed on geotechnical scale. To investigate this question, a set of drying tests have been performed on cylindrical compacted silt samples with different diameters and different heights. The tests are carried out in a drying chamber without air convection where the relative humidity is controlled by a saturated saline solution. The results of the drying tests show that the surface and the height of the sample have an influence on the kinetics of evaporation. The results highlight the necessity to test a specimen that is large enough to define relevant mass transfer coefficients for geotechnical applications.

MOTS-CLÉS : Chambre de séchage, Solution saline, Cinétique d'évaporation, Coefficient de transfert, teneur en eau critique, longueur critique

KEY WORDS: Drying chamber, Saline solution, Kinetics of evaporation, Transfer coefficient, Critical water content, Critical length

1. Introduction

Les interactions sol-atmosphère concernent principalement les échanges d'humidité entre le sol et l'atmosphère. Ces échanges comprennent l'infiltration, l'évaporation, l'évapotranspiration et le ruissellement. La compréhension et la quantification des échanges d'humidité entre les deux milieux est très importante pour comprendre certains problèmes auxquels les ingénieurs géotechniciens sont toujours confrontés : problèmes de stabilité des pentes, fondations construites dans des couches de sol argileux gonflants, stabilité des ouvrages en terre comme les digues et autres. Beaucoup de recherches ont déjà montré que le flux d'évaporation mesuré expérimentalement à la surface du sol peut être modélisé avec succès via un modèle convectif qui exprime le flux d'évaporation comme étant le produit d'un gradient moteur d'évaporation et un coefficient de transfert de masse qui caractérise la résistance de la couche limite d'évaporation à travers laquelle se font les échanges entre la surface du sol et le milieu environnant. Le gradient moteur d'évaporation peut être défini comme la différence de densités de vapeur entre la surface du sol et l'air ambiant [BEN 88]. Des modèles tenant compte de l'influence de l'humidité relative de l'air, de la vitesse de l'air et de la température ont également été développés [PEN48, HAR 58, TA 09]. La plupart de ces modèles sont calibrés via des essais réalisés in situ ou dans des chambres environnementales. Or, l'inconvénient des essais réalisés in situ est que les conditions atmosphériques changent à chaque instant. Il devient par conséquent difficile de séparer l'influence des paramètres atmosphériques et les propriétés du sol sur la mesure du flux d'évaporation. Pour éviter cet inconvénient, il est proposé de réaliser des essais de séchage en laboratoire où les conditions atmosphériques sont contrôlées. Au laboratoire, les essais sont

réalisés sur des échantillons de tailles réduites, ce qui permet de réduire la durée des essais. La question de la taille de l'échantillon (la surface d'évaporation et la hauteur de l'échantillon) à tester pour que les mécanismes d'évaporation observés au laboratoire soient similaires à ceux observés in situ n'est cependant pas bien documentée dans la littérature.

Dans cet article, on se propose de réaliser une campagne expérimentale d'essais de séchage pour étudier l'influence de la taille de l'échantillon sur la cinétique de séchage et particulièrement sur le coefficient de transfert de masse. Pour cela, une chambre de séchage où l'humidité relative est contrôlée via des solutions salines saturées a été développée. Elle permet de réaliser des essais de séchage sans convection forcée de l'air. Cet article propose de nouvelles perspectives sur la compréhension des processus d'évaporation à la surface du sol et au niveau de la couche limite. Il apporte également une contribution dans la compréhension physique de l'effet de la hauteur de l'échantillon sur la cinétique d'évaporation.

2. Matériels et méthodes expérimentales

2.1. Matériau et préparation des échantillons

Le sol testé dans cette campagne expérimentale est un limon extrait de la région de Marche-les-Dames (Belgique). Certaines de ses caractéristiques sont les suivantes : limite de liquidité (WL)=32.5% ; indice de plasticité (IP)=15%. La distribution de la taille des grains est représentée à la figure 1 (13% d'argile, 63% de limon et 24% de sable).

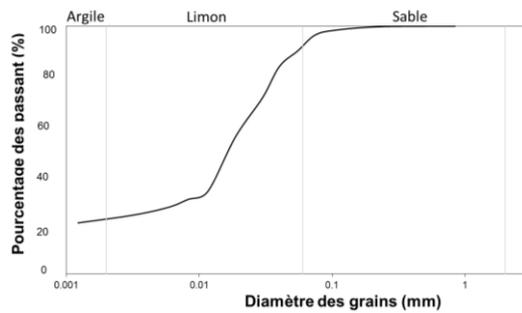


Figure 1 : Courbe granulométrique du limon de Marche-Les-Dames

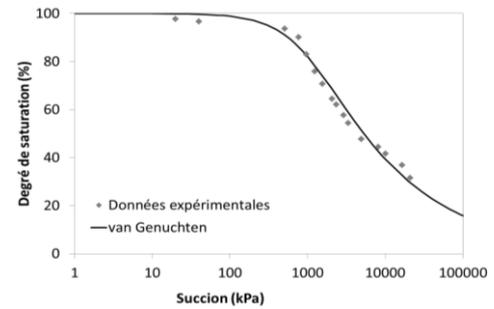


Figure 2 : Courbe de rétention du limon de Marche-Les-Dames

La perméabilité de ce limon compacté à l'optimum Proctor (teneur en eau initiale $w_0 = 14.8\%$; densité sèche initiale $\rho_{d0} = 18.40 \text{ kN/m}^3$) puis saturé d'eau est égale à 10^{-10} m/s . La courbe de rétention a été déterminée expérimentalement en utilisant deux techniques : la technique de translation d'axes [RIC 41] et la technique du psychromètre à effet miroir [DEL 98]. La première technique est valable pour des succions inférieures à 1500kPa tandis que la seconde est précise pour les succions supérieures à 1500kPa. Les résultats expérimentaux sont représentés à la figure 2 où le modèle de Van Genuchten [GEN 85] est utilisé pour reproduire ces résultats :

$$S_r = \left[1 + \left(\frac{s}{P_r} \right)^n \right]^{-(1-\frac{1}{n})} \quad [1]$$

avec s la succion, S_r le degré de saturation, P_r et n deux paramètres du modèle qui valent respectivement dans ce cas 1000kPa et 1.4.

Les échantillons de différentes dimensions (voir tableau 1 section 3) ont été d'abord compactés à l'optimum Proctor. Les échantillons de 15mm de hauteur ont été compactés dans un anneau œdométrique ($D=50\text{mm}$; $H=15\text{mm}$) puis saturés dans une cellule œdométrique. Une fois saturés, les échantillons sont coupés à l'aide d'un emporte-pièce pour les ramener à des diamètres voulus (15 et 35mm). Les échantillons de hauteurs supérieures à 15 mm sont compactés statiquement dans un moule triaxial ($D=35\text{mm}$; $H=70\text{mm}$) puis saturés dans une cellule triaxiale (60 kPa de pression de confinement et 50 kPa de pression d'eau injectée dans l'échantillon). Pour obtenir des échantillons de différentes hauteurs ($H=25$ et 45mm), un papier filtre est placé dans l'échantillon pendant le compactage pour séparer les couches de sol correspondant aux hauteurs voulues.

Dans le but de créer des conditions de séchage similaires à celles de la surface du sol (écoulement unidimensionnel), la base et la surface latérale de l'échantillon sont protégées (figure 3). L'échantillon est d'abord couvert par un film plastique puis par un papier aluminium et enfin, il est couvert d'une couche de paraffine. Avec un objet tranchant, la surface supérieure est mise à nu.



Figure 3: Imposition de l'écoulement unidimensionnel de l'eau de l'échantillon de sol

2.2. Dispositif expérimental

Le calcul du coefficient de transfert de masse est basé sur la détermination expérimentale du flux d'évaporation au cours des essais de séchage dans des conditions d'humidité relative contrôlées. Pour réaliser ces essais, une chambre de séchage sans convection forcée a été développée. L'humidité relative HR dans la chambre est contrôlée via des solutions salines saturées $MgCl_2$ ($HR=33\%$). L'échantillon est suspendu dans la chambre hermétiquement fermée, puis relié par à une balance via un fil pour un suivi de l'évolution temporelle de sa masse (figure 4). Certains essais sont réalisés sur de très petits échantillons ($D=15mm$; $H=15mm$). Les variations de la masse à mesurer sont très faibles, ce qui nécessite le recours à des balances de grande précision (précision de $0.0001g$). Les variations de la masse de l'échantillon sont récoltées toutes les cinq minutes.

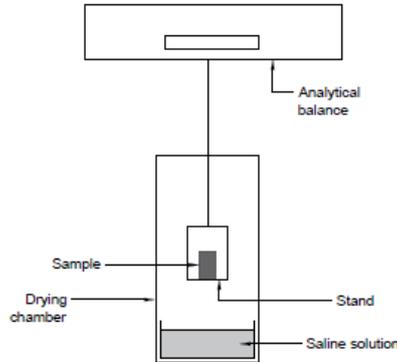


Figure 4: Représentation schématique du dispositif de séchage sans convection forcée

2.3. Traitement des données

Les données expérimentales obtenues sous forme de la masse de l'échantillon en fonction du temps $M(t)$ sont traitées et présentées sous la forme de la courbe de Krischer. La courbe de Krischer est une courbe qui représente le flux d'évaporation q ($kg.m^{-2}.s^{-1}$) en fonction de la teneur en eau de l'échantillon w (formule 2).

$$w = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M(t) - M_s}{M_s} \quad [2]$$

$$q = \frac{M(t) - M(t + \Delta t)}{A \Delta t} \quad [3]$$

où Δt , A et M_s sont respectivement : l'intervalle de temps entre deux mesures successives, la surface d'évaporation de l'échantillon, la masse sèche des grains solides obtenue après séchage de l'échantillon dans un four pendant 24h à une température de $110^\circ C$.

En raison des faibles variations de masse, la courbe du flux d'évaporation obtenue en appliquant la formule 3 est fortement bruitée. La méthode de Lanczos [PRI 15] a été utilisée pour lisser cette courbe pour en faciliter l'interprétation. L'allure de la courbe obtenue met en évidence deux phases d'évaporation (figure 5): la phase à flux constant (Phase I) et la phase à flux décroissant (Phase II) [WIL 94, KEM 01]. La phase I débute avec une teneur en eau initiale de l'échantillon w_0 jusqu'à une teneur en eau limite à partir de laquelle le flux d'évaporation commence à décroître. Cette teneur en eau est dénommée teneur en eau critique w_c . Au cours de cette phase, la surface de l'échantillon est saturée ou presque et le flux d'évaporation est maximal et constant q_{max} . Durant cette phase, ce sont les conditions atmosphériques (paramètres externes) qui influencent l'évaporation. Au fur et à mesure du séchage, l'échantillon se désature. La perméabilité de l'échantillon diminue aussi si bien que la quantité d'eau qui remonte à la surface ne permet plus d'entretenir un flux d'évaporation maximal. La phase II commence alors avec une diminution du flux d'évaporation. La transition de la phase I à la phase II autour de la teneur en eau critique est interprétée comme un développement progressif de la résistance interne au transfert de masse de l'échantillon vers l'atmosphère qui s'ajoute aux facteurs externes influençant le transfert de masse ci-haut évoqués [LEO 02, PRI 15].

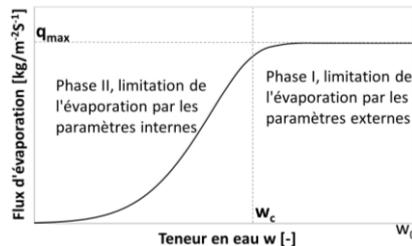


Figure 5: Forme de la courbe de Krischer avec les deux phases d'évaporation : phase I ($w > w_c$) et phase II ($w < w_c$)

Rappelons que le modèle convectif de transfert de masse exprime le flux d'évaporation q comme le produit du coefficient de transfert α et d'un gradient moteur d'évaporation [BEN 88]. Durant la phase à flux constant, q_{max} est donné par

$$q_{max} = \alpha (\rho_{v,0,sample} - \rho_{v,air}) \quad [3]$$

où, q_{max} est le flux maximal d'évaporation durant la phase I, $\rho_{v,0,sample}$ est la densité de vapeur d'eau saturante à la surface de l'échantillon, $\rho_{v,air}$ est la densité de vapeur d'eau dans l'air ambiant.

Le coefficient de transfert de masse peut être obtenu par :

$$\alpha = \frac{q_{max}}{\rho_{v,0,sample} - \rho_{v,air}} \quad [4]$$

Plusieurs formules existent dans la littérature pour déterminer $\rho_{v,0}$. Au cours de ce travail, la formule utilisée est tirée de l'article d'Ewen & Thomas [EWE 89].

$$\rho_{v,0}(T) = [194.4 \exp(-0.06374 T + 0.1634 \cdot 10^{-3} T^2)]^{-1} \quad [5]$$

Où T est la température en degré Celcius.

Comme l'évaporation est un phénomène endothermique, la température à la surface de l'échantillon varie en cours de séchage. Durant la phase d'évaporation à flux constant (flux maximum d'évaporation), la température à la surface de l'échantillon est considérée égale à la température humide (T_h). La température humide T_h est calculée par la formule suivante [NAD 95] :

$$T_h = \frac{1810.8(p_{v,0}(T_h) - p_v(T)) - T(p_{atm} - p_{v,0}(T_h))}{2 * p_{v,0}(T_h) - p_v(T) - p_{atm}} \quad [6]$$

Où T_{air} est la température de l'air ambiant ($^{\circ}C$), p_{atm} la pression atmosphérique, $p_{v,0}$ la pression de vapeur saturante et p_v la pression de vapeur.

3. Résultats et discussions

Sept échantillons cylindriques de différents diamètres et différentes hauteurs ont été séchés dans une chambre de séchage sans convection forcée à une humidité relative HR égale à 33%. La température de l'air dans la chambre où les essais sont réalisés est constante et est égale à $24^{\circ}C$. Le flux d'évaporation maximal et la teneur en eau critique sont déduits des courbes de Krischer respectives. Les coefficients de transfert de masse sont déterminés par la formule (4). Ces différentes valeurs qui caractérisent la cinétique de séchage sont reprises dans le tableau 1.

N°	Diamètre D (mm)	Hauteur H (mm)	Humidité relative de l'air HR (%)	Flux maximal d'évaporation q_{max} ($kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$)	Coefficient de transfert de masse α (ms^{-1})	Teneur en eau critique w_{crit} (-)
1	50	15	33	$2.4 \cdot 10^{-5}$	$5.32 \cdot 10^{-3}$	0.08
2	35	15	33	$3.0 \cdot 10^{-5}$	$6.06 \cdot 10^{-3}$	0.09
3	15	15	33	$5.50 \cdot 10^{-5}$	$1.11 \cdot 10^{-2}$	0.10
4	15	15	33	$5.00 \cdot 10^{-5}$	$1.01 \cdot 10^{-2}$	0.10
5	35	70	33	$3.0 \cdot 10^{-5}$	$6.82 \cdot 10^{-3}$	0.14
6	35	45	33	$2.8 \cdot 10^{-5}$	$6.37 \cdot 10^{-3}$	0.11
7	35	25	33	$3.0 \cdot 10^{-5}$	$6.82 \cdot 10^{-3}$	0.095

Tableau 1: Conditions expérimentales et résultats des essais de séchage sans convection forcée

3.1. Influence de la surface de l'échantillon sur la cinétique d'évaporation

Pour étudier l'influence de la surface de l'échantillon sur la cinétique d'évaporation, des échantillons de hauteur $H=15\text{mm}$ préparés dans les mêmes conditions mais de surface d'évaporation différentes ont été séchés dans une chambre de séchage à une même humidité relative $RH=33\%$ (Tableau 1, N°1 à 4). Les résultats montrent que le flux d'évaporation est plus élevé pour les échantillons de diamètre $D=15\text{ mm}$ par rapport à celui des échantillons de diamètre $D=35\text{mm}$. Mais pour les échantillons de $D=35\text{mm}$ et celui de $D=50\text{mm}$, les flux d'évaporation sont similaires (figure 6). Le coefficient de transfert de masse diminue aussi de l'échantillon de $D=15\text{mm}$ à l'échantillon de $D=35\text{ mm}$, mais il reste ensuite constant quand le diamètre augmente à $D=50\text{mm}$ (figure 7). Physiquement, ceci peut être expliqué par le développement de la couche limite au-dessus de la surface d'évaporation et surtout sur le bord de la surface d'évaporation. En effet, au centre de la surface d'évaporation, l'évaporation n'a lieu que dans la direction verticale. Par contre, sur le bord de l'échantillon, même si l'évaporation latérale est empêchée, elle peut également se faire selon la direction horizontale. L'épaisseur de la couche limite n'est donc pas constante sur toute la surface d'évaporation, mais l'influence de cet effet de bord devient négligeable lorsque le diamètre de l'échantillon augmente (figure 8). C'est pour cela que les coefficients de transfert déterminés pour les échantillons de diamètres $D=35$ et 50mm sont équivalents, ce qui n'est pas le cas pour les échantillons diamètre $D=15\text{mm}$.

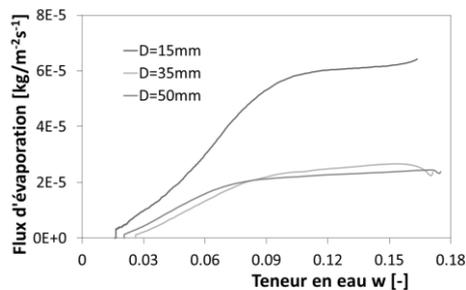


Figure 6 : Influence de la surface d'évaporation sur le flux d'évaporation

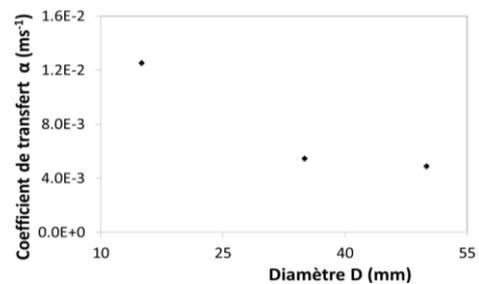


Figure 7 : Influence de la surface d'évaporation de l'échantillon sur le coefficient de transfert

La même tendance est observée sur les valeurs des teneurs en eau critique (Tableau 1) où les valeurs des teneurs en eau critique sont toujours plus élevées pour les échantillons de petit diamètre $D=15\text{mm}$ que celles des échantillons de diamètres supérieurs. Ceci peut être également expliqué par le développement de la couche limite au-dessus de la surface d'évaporation de l'échantillon. En effet, comme l'évaporation est rapide au bord de la surface d'évaporation, c'est sur le bord que débute la limitation de l'évaporation par les propriétés internes du sol. Lorsque les propriétés de transfert du sol commencent à limiter le flux d'évaporation au bord, la deuxième phase d'évaporation commence. Cette diminution de l'évaporation n'est pas uniforme sur toute la surface parce qu'au milieu de la surface d'évaporation, l'eau est encore suffisante pour maintenir un flux d'évaporation maximal. Cet effet de bord sur l'évaporation devient donc négligeable pour les échantillons de grande surface d'évaporation.

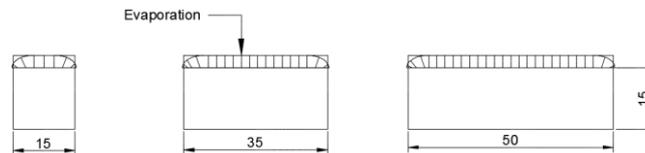


Figure 8 : Développement de la couche limite au-dessus de la surface d'évaporation-effet de bord

3.2. Influence de la hauteur de l'échantillon sur la cinétique d'évaporation

L'influence de la hauteur de l'échantillon est analysée en comparant les flux d'évaporation de 4 échantillons (Tableau1, N°2, 5-7) de même diamètre ($D=35\text{mm}$) séchés à une même humidité relative ($HR=33\%$), mais avec des hauteurs différentes (15, 25, 45, 70mm). Les figures 9 et 10 représentent les flux d'évaporation des quatre échantillons en fonction de la teneur en eau et en fonction du temps respectivement. Ces essais nous permettent

de dégager les observations suivantes : i) Les résultats montrent que le flux maximal d'évaporation ne dépend pas de la hauteur de l'échantillon. ii) La teneur en eau critique est influencée par la hauteur de l'échantillon. iii) Le temps critique t_{crit} augmente avec la hauteur de l'échantillon, si ce n'est pour les échantillons de hauteur $H=45$ et 70mm où le passage de la phase I à la phase II est observé après la même durée de séchage.

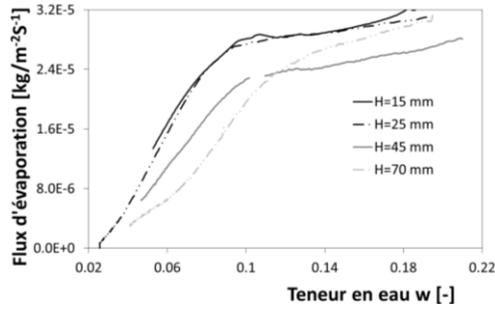


Figure 9 : Influence de la surface d'évaporation sur le flux d'évaporation

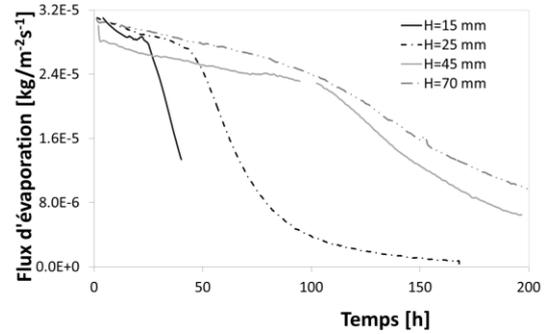


Figure 10 : Influence de la surface d'évaporation de l'échantillon sur le coefficient de transfert

Ces observations sont cohérentes avec le concept de longueur critique dans les milieux poreux en cours de séchage telle que proposée par [LEH 08] et appliqué par [PRI 15] dans le cadre du séchage d'une craie. Ils considèrent que la transition de la phase I à la phase II d'évaporation est expliquée la perte de la connectivité hydraulique entre le front de séchage et la surface de l'échantillon. Une longueur critique est alors définie comme étant la profondeur du front d'évaporation à partir de laquelle cette connexion est rompue. Il faut cependant noter que cette approche de [LEH 08] a été développée sur un matériau faiblement hygroscopique (le sable) dans lequel l'eau transférée à la surface pendant la phase à flux constant l'est essentiellement sous forme liquide. Dans des sols fins tels que le limon testé dans cette étude, des résistances internes liées à la microstructure du matériau impactent cette première phase d'évaporation, d'où la légère diminution du flux observée durant cette période aux figures 6 et 9. Il est néanmoins considéré ici que ces résistances internes dans la phase à flux constant n'impactent pas significativement les conclusions de [LEH 08] concernant la notion de longueur critique et la transition de la phase I à la phase II de séchage.

[LEH 08] ont en effet proposé une relation analytique pour estimer cette longueur critique basée sur l'équilibre entre les forces capillaires ascendantes et les forces de gravité et de viscosité (qui sont opposées aux forces capillaires) agissant sur l'eau interstitielle.

$$\Delta h_{cap} = \Delta h_{grav} + \Delta h_{visc} \quad [7]$$

avec Δh_{cap} , Δh_{visc} , Δh_{grav} les hauteurs liées respectivement aux forces capillaires, aux forces de viscosité et aux forces de gravité.

Les forces capillaires sont fortement dépendantes de la microstructure du sol. Pour estimer la hauteur liée au gradient capillaire Δh_{cap} , [LEH 08] utilisent la courbe de rétention du matériau (figure 2) et proposent de considérer la pente de la tangente de la courbe de rétention au point d'inflexion (Voir [LEH 08] pour plus de détails).

$$\Delta h_{cap} = \frac{P_r}{(n-1)} \left(\frac{2n-1}{n} \right)^{(2n-1)/n} \left(\frac{n-1}{n} \right)^{(1-n)/n} \quad [8]$$

Avec P_r et n , les paramètres du modèle de Van Genuchten (formule 1).

Les forces visqueuses Δh_{visc} sont estimées par la loi de Darcy pour l'écoulement dans les sols partiellement saturés. Elles dépendent du flux maximal d'évaporation (q_{max}) et de la profondeur du front d'évaporation (la longueur critique L_{crit} pour notre cas).

$$\Delta h_v = \frac{L_{crit} q_{max}}{K(S_r) \rho_w} \quad [9]$$

avec L_{crit} la longueur critique ; q_{max} le flux maximal d'évaporation ; ρ_w la densité de l'eau ; $\overline{K}(S_r)$ la perméabilité moyenne (qui dépend du degré de saturation S_r) entre la surface d'évaporation et le front d'évaporation en supposant une distribution hydrostatique de la teneur en eau au-dessus du front d'évaporation.

Les forces liées à la gravité dépendent uniquement de la distance entre le front d'évaporation et la surface de l'évaporation qui correspond à la longueur critique.

$$\Delta h_g = L_{crit} \quad [10]$$

La longueur critique est finalement donnée par la relation :

$$L_{crit} = \frac{\Delta h_{cap}}{1 + \frac{q_{max}}{K(S_r)}} \quad [11]$$

Si on considère le cas d'un échantillon de diamètre $D=35\text{mm}$, le flux maximal d'évaporation est égal à $3 \cdot 10^{-5} \text{ kgs}^{-1} \text{ m}^{-2}$ quelle que soit la hauteur de l'échantillon (Tableau 1). L'évolution de la perméabilité avec le degré de saturation est obtenue à partir de la formule de Mualem (1976) :

$$K(S_r) = K_{sat} S_r^{0.5} \left[1 - \left(1 - S_r^{1/(1-1/n)} \right)^{1-1/n} \right]^2 \quad [12]$$

avec K_{sat} la perméabilité en conditions saturées (voir section 2.1); n un paramètre du modèle de Van Genuchten tel que défini lors du fittage de la figure 2. Les formules [1] et [12] nous permettent donc d'obtenir la perméabilité moyenne au sein de l'échantillon.

Si on applique l'équation 11 aux résultats de séchage d'un échantillon de 70mm de hauteur et 35mm de diamètre séché à une humidité relative de 33% (tableau 1), on trouve une longueur de connexion hydraulique égale à 40mm. Au vu des hypothèses considérées dans la méthodologie de Lehmann (forces capillaires estimées à partir de la courbe de rétention, distribution hydrostatique de la teneur en eau entre la surface d'évaporation et le front d'évaporation, etc.), cette méthode donne uniquement un ordre de grandeur de la longueur critique. Une longueur critique de 40mm est cependant en conformité avec les résultats expérimentaux des figures 9 et 10 :

i. Lorsque la hauteur de l'échantillon est supérieure à la longueur critique ($H=45$ et 70mm), le début de la phase II est expliqué par la rupture de la connexion hydraulique entre le front d'évaporation et la surface de l'échantillon. La teneur en eau critique est alors dépendante de la quantité d'eau disponible dans l'échantillon lors de la perte de la connexion hydraulique. Comme la longueur critique ne dépend pas de la hauteur de l'échantillon, la teneur en eau critique augmente avec la hauteur de l'échantillon comme on peut le voir à la figure 9 ($w_{c-45} < w_{c-70}$). D'autre part, la durée de la phase I doit être identique pour ces échantillons car le flux d'évaporation maximal n'est pas influencé par la hauteur de l'échantillon. Cela a été confirmé par les résultats expérimentaux ($t_{crit-45} < t_{crit-70}$).

ii. Lorsque la hauteur de l'échantillon est inférieure à la longueur critique ($H=15$ et 25mm), la connexion hydraulique est perdue lorsque le front d'évaporation atteint la base de l'échantillon. Ce phénomène, appelé breakthrough [PRA 95], explique alors le passage de la phase I à la phase II d'évaporation. On peut alors considérer que pour les échantillons de hauteur inférieure à la longueur critique, la teneur en eau n'est pas dépendante de la hauteur de l'échantillon. C'est ce qu'on observe sur les résultats de la figure 9 ($w_{c-15} = w_{c-25}$).

Même si les conclusions faites sur la cinétique d'évaporation des échantillons de hauteur inférieure à la longueur critique sont cohérentes, elles ne sont pas applicables à grande échelle (à la nature) parce la hauteur du sol est toujours supérieure à la longueur critique.

4. Conclusion

Des essais de séchage ont été réalisés sur un limon compacté pour étudier l'influence des dimensions de l'échantillon sur la cinétique d'évaporation sur base d'un modèle convectif. Pour des échantillons de forme cylindrique, nous avons constaté que la surface d'évaporation n'a plus d'influence sur le flux maximal d'évaporation et sur le coefficient de transfert lorsque le diamètre est supérieur à 35mm. Nous avons remarqué que la hauteur de l'échantillon n'a pas d'influence sur le flux maximal d'évaporation et le coefficient de transfert.

Mais la transition de la phase I à la phase II en termes de teneur en eau critique est affectée par la hauteur de l'échantillon. Ces observations nous permettent de proposer des recommandations sur la taille de l'échantillon à tester au laboratoire pour que les mécanismes d'évaporation observés expérimentalement soient similaires à ceux observés à l'échelle de la géostructure.

Lorsque l'étude de la cinétique d'évaporation porte uniquement sur le flux d'évaporation maximal et le coefficient de transfert, l'échantillon à tester doit avoir un diamètre supérieur à 35mm, quel que soit la hauteur de l'échantillon. Lorsque l'étude de la cinétique d'évaporation porte également sur le temps critique et la teneur en eau critique, en plus du diamètre qui doit être supérieur à 35mm, la hauteur de l'échantillon doit être supérieure à la longueur critique. Cette longueur dépend de la nature du sol et des conditions de séchage.

Il serait néanmoins intéressant de réaliser une étude expérimentale approfondie avec un nombre d'échantillons plus important en termes de hauteurs et de diamètres testés afin de valider ces premières conclusions. D'autre part, ces recommandations en termes de géométrie d'échantillons à tester au laboratoire ne sont valables que sur le matériau testé (limon de Marche-les-Dames) et ne peuvent être à ce stade généralisées à tous les géomatériaux.

5. Bibliographie

- [BEN 88] BEN NASRALLAH S., PERE P., « Detailed study of a model of heat and mass transfer during convective drying of porous media ». *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31(5), 1988, p. 957-967.
- [DEL 98] DELAGE P., HOWAT M. D., CUI Y. J., « The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay ». *Engineering Geology*, vol 50, 1998, p.31-48.
- [EWE 89] EWEN J., THOMAS H.R., « Heating unsaturated medium sand », *Géotechnique*, vol. 3,1989, p. 455-470.
- [GEN 80] VAN GENUTCHEN M. T., « A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils ». *Soil science society of America journal*, vol 44(5), 1980, p. 892-898.
- [HAR 58] HARBACK JR.G. E., KOHLER M. A., KOBERG G. E., Water-loss investigations; Lake Mead studies.*Geological survey professional peper 298*, 1958.
- [KEM 01] KEMP I.C, FYHR B.C., LAURENT S., ROQUES M.A., GROENEWOLD C.E ., TSOTSAS E, SRENO A.A., BONAZZI C.B., BIMBENET J.J., KIND M. «Methods for processing experimental drying kinetics data». *Drying Technology*, vol.19(1), 2001, p. 15-34.
- [LEH 08] LEHMANN P., ASSOULINE S., OR D., « Characterise lengths affecting evaporative drying of porous media », *Physical Review E* 77(5), 056309, 2008.
- [LEO 02] LEONARD A., Etude du séchage convectif de boues de station d'épuration- Suivi de la texture par microtomographie à rayons X, Thèse de doctorat, Université de Liège, 2002.
- [MUA 76] MUALEM Y., « A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media », *Water Resources Research*, vol. 12(3), 1976, p. 513-522.
- [NAD 95] NADEAU J.P., PUIGGALI J.R., Séchage - *Des processus physiques aux procédés industriels*, Technique et Documentation-Lavoisier, Paris (1995).
- [PEN 48] PENMAN H. L., «Natural evaporation from open water, bare soil and grass ». *In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193 (1032), 1948, p. 120-145.
- [PRA 95] PRAT M., « Isothermal drying on non-hygroscopic capillary-porous materials as an invasion percolation process », *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 21(5), p.875-892.
- [PRI 15] PRIME N., HOUSNI Z., FRAIKIN L., LEONARD A., CHARLIER R., LEVASSEUR S., « On water transfer and hydraulic connection layer during the convective drying of rigid porous material », *Transport in Porous Media*, vol.106(1), 2015, p. 47-72.
- [RIC 41] RICHARDS L. A., « A pressure membrane apparatus for soil suction extraction ». *Soil Science*, vol 51, 1941, p. 377-385.
- [TA 09] TA A. N., Etude de l'interaction sol-atmosphère en chambre environnementale, Thèse de doctorat. Université de Liège, 2009.
- [WIL 94] WILSON G. W., FREDLUND G. G, BARBOUR S. L., « Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation ». *Canadian Geotechnical Journal*, vol 31(2), 1994, p.151-161.