Influence de la température sur le comportement hydrique de milieux poreux partiellement saturés

Salager Simon

LMGC – UMR 5508 - Université Montpellier II – CC 048 Place Eugène Bataillon 34095 Montpellier cedex 5

RESUME. On présente une étude visant à quantifier l'influence de la température sur le comportement hydrique des milieux poreux non saturés. Pour couvrir tous les domaines hydriques, deux modèles thermo-hydriques différents sont proposés. Ils permettent de prédire, à partir de mesures expérimentales réalisées à des températures données, les isothermes de sorption et les courbes de rétention pour toute autre température. Deux dispositifs expérimentaux, le premier de type banc de sorption et le second de type plaque de pression, ont été mis au point pour fonctionner dans un environnement thermostaté. Des essais réalisés à 20 et 60°C, sur une céramique (terre cuite) et sur un sable limoneux argileux, permettent de valider les modélisations.

MOTS-CLÉS : modèle thermo-hydrique, banc de sorption, plaque de pression.

ABSTRACT. This paper present a study on the effect of temperature on the hydric behaviour of unsaturated porous media. To cover all hydric domains, two differents models are proposed. Using data for given temperature, these models are used to predict sorption isotherm and retention curve for other temperatures. Two experimental devices, sorption testing bench and pressure cell, were used in a thermo-regulated environment. The models were valided by several tests on a ceramic and a clayey silty sand, at 20 and $60^{\circ}C$.

KEYWORDS : thermo-hydric model, sorption testing bench, pressure plate.

1. INTRODUCTION

La caractérisation du comportement hydrique d'un milieu poreux est souvent présentée en terme d'isotherme de sorption dans le domaine hygroscopique, et en terme de courbe de rétention d'eau dans les domaines funiculaire et pendulaire. Ces courbes expriment, pour une température T donnée, la teneur en eau volumique θ ou massique w, en fonction de l'humidité relative HR pour le domaine hygroscopique, et en fonction de la succion s pour les deux autres domaines. L'allure de ces courbes dépend en particulier de la porosité, de la granulométrie, de la tortuosité du réseau poreux et de la nature minéralogique de la phase solide.

Les problèmes de conservation des aliments (Kumar et al., 2006), d'isolation hydrique, de géostructure énergétique (Saix, 1987 ; Laloui et al., 2003) ou encore de stockage de déchets radioactifs (Olchitzky, 2002), font de la température une variable incontournable dans l'étude du comportement hydrique des milieux poreux. En particulier, il est nécessaire de maîtriser l'influence de la température sur l'isotherme de sorption et sur la courbe de rétention. Cet article présente, pour chacune de ces courbes, une modélisation théorique et une étude expérimentale de cette influence dans le cas de

matériaux poreux non saturés. A partir de mesures expérimentales obtenues à des températures données, les modélisations permettent de prédire l'isotherme de sorption et la courbe de rétention pour d'autres températures. On réduit ainsi considérablement le nombre d'essais expérimentaux nécessaires pour obtenir la caractérisation hydrique d'un milieu poreux à plusieurs températures. La pertinence des modélisations est validée expérimentalement dans le cas d'une céramique en terre cuite et d'un sable limoneux argileux.

2. LES DIFFERENTS DOMAINES HYDRIQUES

Les valeurs de succion appliquées pour la caractérisation du comportement hydrique de milieux poreux varient classiquement de 0 (état saturé) à 10⁹ Pa (état considéré comme sec). Comme l'illustre la figure 1, l'état hydrique du milieu dans cette plage de sollicitation hydrique, peut être scindé en trois domaines plus ou moins distincts suivant la nature du matériau (Salager et al., 2005).

- Le domaine hygroscopique (1) : L'eau se trouve sous forme adsorbée autour des grains. La phase liquide est discontinue ; la phase gazeuse est continue. Les échanges d'eau se font par changement de phase et par filtration gazeuse.

- Le domaine pendulaire (2) : Ce domaine est encore mal défini. L'eau forme des ponts liquides entre les grains (eau capillaire). Les transferts se font par filtration liquide et gazeuse et par changement de phase.

- Le domaine funiculaire (3) : la phase liquide est continue et la phase gazeuse se trouve sous forme de bulles occluses. Les transferts d'eau se font par filtration liquide. Le schéma (4) est un cas particulier de ce domaine, il représente l'état saturé dans lequel la phase gazeuse a entièrement disparue.



Figure 1 : Représentation schématique des états hydriques d'un milieu poreux.

Les mécanismes qui régissent la capacité de rétention d'eau de la phase solide varient suivant les domaines. Dans le domaine hygroscopique, l'eau est retenue par le sol sous l'action de forces physicochimiques alors que ce sont les forces capillaires qui sont prépondérantes dans les domaines pendulaire et funiculaire.

3. COMPORTEMENT THERMO-HYDRIQUE DANS LE DOMAINE HYGROSCOPIQUE

3.1. MODELISATION

Dans les processus qui conduisent à l'adsorption d'une molécule d'eau sur la phase solide, on distingue la physisorption, qui conserve l'identité des molécules adsorbées, et la chimisorption qui conduit à la rupture de liaisons chimiques. Ce dernier processus qui conduit à des modifications irréversibles ne sera pas pris en compte. Les forces de physisorption sont de trois types : les forces de

Van der Waals, les forces polaires résultant de la présence de champs électriques dans les micropores et les liaisons hydrogène dues aux groupements hydroxyle ou amine.

Les auteurs Guggenheim, Anderson et de Boer ont chacun développé le modèle de GAB (Van Den Berg, 1984) qui rend compte des différents processus de physisorption. Son équation permet de modéliser les isothermes de sorption et s'écrit sous la forme :

$$w = \frac{X_m C_g K_g HR}{\left(1 - K_g HR\right)\left(1 + \left(C_g - 1\right)K_g HR\right)}$$
[Eq. 1]

où *HR* est l'humidité relative de la phase gazeuse et X_m , C_g et K_g sont les paramètres du modèle. Ces paramètres peuvent être reliés à la température absolue par des fonctions d'Arrhenius (Moreira et al., 2002) :

$$X_m = A_X e^{\frac{h_x}{RT}}; C_g = A_C e^{\frac{h_C}{RT}}; K_g = A_k e^{\frac{h_k}{RT}}$$
[Eq. 2]

où R est la constante des gaz parfaits. Le modèle thermo-hydrique ainsi obtenu comporte 6 paramètres que l'on peut déterminer à partir de deux isothermes établis à deux températures différentes.

3.2. VALIDATION EXPERIMENTALE

3.2.1. Dispositif expérimental et matériaux utilisés

L'étude expérimentale de validation du modèle a porté sur deux matériaux :

• Le premier est une céramique en terre cuite. Sa masse volumique spécifique est 2738 kg.m⁻³ et sa masse volumique apparente sèche 1870 kg.m⁻³; son indice des vides est 0,464. Avant tout chargement thermo-hydrique, les échantillons de céramique sont saturés en eau chimiquement pure; la teneur en eau massique de saturation est 16,9% à 20°C.

• Le deuxième matériau est un sable limoneux-argileux. Sa masse volumique spécifique est 2650 kg.m⁻³. Les échantillons sont compactés pour atteindre une masse volumique apparente sèche de 1500 kg.m⁻³, ce qui correspond à un indice des vides de 0,767. Enfin, l'état initial saturé correspond à une teneur en eau massique de 28,9% à 20°C.

Le dispositif utilisé pour déterminer les isothermes de sorption, à différentes températures, est le banc de sorption dont le schéma est présenté sur la figure 2. Chaque échantillon, saturé en eau, est placé dans un dessiccateur, enceinte hermétique au fond de laquelle une solution saline régule l'humidité relative de l'air. Les sels utilisés permettent d'obtenir des ambiances dont l'humidité relative est comprise entre 6 et 97%. Les dessiccateurs sont plongés dans un bain thermostaté permettant de réaliser des essais à des températures variant de 20 à 70°C. Lorsqu'on a atteint l'équilibre entre la phase liquide de l'échantillon et la vapeur d'eau de l'atmosphère, on détermine par pesée différentielle entre la masse humide et la masse sèche, la teneur en eau.



Figure 2 : Schéma de principe du banc de sorption.

3.2.2. Résultats et discussion

La figure 3a montre les résultats obtenus pour la céramique en terre cuite et la figure 3b ceux pour le sable limoneux argileux. Sur chacun des graphes, les deux courbes supérieures sont les ajustements des points expérimentaux obtenus à 20 et 40°C. C'est à partir de ces courbes qu'ont été déterminés les 6 paramètres du modèle. Les points représentent les valeurs expérimentales mesurées à 60°C et la courbe inférieure est le résultat de la modélisation. On peut constater dans les deux cas une très bonne concordance entre résultats expérimentaux et modélisation.



Figure 3 : Isotherme de sorption (expérimentation et modélisation) ; a) céramique, b) sable limoneux argileux.

4. COMPORTEMENT THERMO-HYDRIQUE DANS LES DOMAINES PENDULAIRE ET FUNICULAIRE

4.1. MODELISATION

Dans ces domaines, l'influence de la température sur le comportement hydrique d'un matériau poreux est due, en particulier, à la dilatation thermique des phases ainsi qu'aux variations de la tension superficielle du liquide et de l'angle de mouillage (Bachmann, 2002). Le modèle proposé résulte du développement de la différentielle de la succion s par rapport aux trois variables indépendantes :

teneur en eau volumique θ , température T et indice des vides e. Seul un chemin de chargement hydrique en drainage, à partir d'un état saturé en eau chimiquement pure, est considéré ici. Ceci exclut toute situation faisant intervenir le phénomène d'hystérésis. La différentielle de la succion s'exprime sous la forme:

$$ds = \left(\frac{\partial s}{\partial \theta}\right)_{T,e} d\theta + \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{\theta,e} dT + \left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{T,\theta} de$$
 [Eq. 3]

Cette relation est développée dans la suite en exprimant les différents termes de dérivées partielles à partir de relations physiques. La teneur en eau volumique θ peut être exprimée en fonction des masses volumiques spécifiques des phases solide ρ_s^* et liquide ρ_e^* , de la teneur en eau massique *w* et de l'indice des vides *e* par la relation :

$$\theta = \frac{\rho_s^* w}{\rho_e^* (1+e)}$$
[Eq. 4]

La variation infinitésimale $d\theta$, déduite de la relation [Eq. 4], s'exprime sous la forme :

$$d\theta = \frac{\rho_s^*}{\rho_e^*(1+e)} dw + \frac{\rho_s^* w}{\rho_e^*(1+e)} (\beta_e - \beta_s) dT - \frac{\rho_s^* w}{\rho_e^*(1+e)^2} de$$
 [Eq. 5]

où β_e et β_s sont les coefficients de dilatation thermique de l'eau et de la phase solide. L'équation [Eq. 4] conduit également à la relation:

$$\left(\frac{\partial s}{\partial \theta}\right)_{T;e} = \frac{\rho_e^*(1+e)}{\rho_s^*} \left(\frac{\partial s}{\partial w}\right)_{T;e}$$
[Eq. 6]

Dans les domaines funiculaire et pendulaire, la rétention de l'eau dans le milieu est due principalement aux forces capillaires. On peut donc appliquer ici la loi de Jurin qui relie la succion à la tension superficielle de l'eau σ_s , au rayon moyen des pores *r* et à l'angle de mouillage ϕ :

$$s = \frac{2\sigma_s \cos\phi}{r}$$
 [Eq. 7]

La dérivée partielle de la succion par rapport à la température, déduite de la loi de Jurin [Eq. 7] est :

$$\left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_{\theta,e} = \frac{s}{\sigma_s} \frac{d\sigma_s}{dT} - s \tan\phi \frac{d\phi}{dT}$$
[Eq. 8]

La relation [Eq. 8] prend en compte le fait que la tension superficielle et l'angle de mouillage dépendent uniquement de la température. En notant F_w l'inverse de la pente de la courbe de rétention à température et indice des vides constants, et en introduisant [Eq. 5], [Eq. 6] et [Eq. 8] dans [Eq. 3], on obtient une nouvelle expression de la différentielle de la succion :

$$ds = F_w dw + \left(F_w w (\beta_e - \beta_s) + \frac{s}{\sigma_s} \frac{d\sigma_s}{dT} - s \tan \phi \frac{d\phi}{dT}\right) dT + \left(\left(\frac{\partial s}{\partial e}\right)_{T,\theta} - \frac{F_w w}{(1+e)}\right) de \quad [\text{Eq. 9}]$$

Le membre de droite de la relation [Eq. 9] explicite trois termes qui traduisent les contributions respectives des variations de teneur en eau, de température et d'indice des vides, à la variation infinitésimale de la succion. Les deux premiers termes expriment un couplage fort entre la succion, la

teneur en eau et la température. Le troisième terme devient négligeable devant les deux autres dans le cas d'un squelette solide peu déformable. Sa détermination expérimentale tout au long d'un cheminement thermo-hydro-mécanique n'est pas aisée. Par ailleurs, les variations infinitésimales de l'indice des vides s'entendent ici à contraintes mécaniques extérieures nulles, ce qui limite les déformations. Dans une première approche, ce terme sera négligé. La pertinence de ce choix sera discutée par la suite. De même, la variation de la masse volumique spécifique de la phase solide en fonction de la température sera négligée devant celle de l'eau. Enfin, le manque de données expérimentales ne permet pas la prise en compte de la variation de l'angle de mouillage en fonction de la température. Toutes ces considérations conduisent à une expression simplifiée de la relation [Eq. 9] sous la forme :

$$ds = F_w dw + \left(F_w w \beta_e + \frac{s}{\sigma_s} \frac{d\sigma_s}{dT}\right) dT$$
 [Eq. 10]

A partir de la donnée de la courbe de rétention à la température T_0 , la relation [Eq. 10] permet de déterminer, pour chaque valeur de la succion, la variation de la teneur en eau en fonction de la variation de température. On obtient ainsi la courbe de rétention à une température quelconque *T*.

4.2. VALIDATION EXPERIMENTALE

4.2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour la validation du modèle dans le domaine funiculaire est la plaque de pression dont le schéma de principe est donné par la figure 6. Ce dispositif permet d'appliquer la succion par la méthode de surpression d'air [Jamin, 2003]. L'échantillon se trouve dans une cellule hermétique dont la pression d'air est régulée par un circuit pneumatique. Il est disposé sur une céramique poreuse à haute pression d'entrée d'air permettant la continuité de la phase liquide entre l'échantillon et le circuit hydraulique. Un panneau de contrôle permet de visualiser la pression de l'eau. La cellule contenant l'échantillon est immergée dans un bain thermostaté, permettant ainsi d'obtenir des courbes de rétention pour différentes températures.

L'étude expérimentale de validation du modèle a porté sur les deux mêmes matériaux que précédemment : la céramique en terre cuite et le sable limoneux argileux.



Figure 6 : Schéma de principe de la plaque de pression et de l'environnement de mesure.

4.2.2. Résultats et discussions

La figure 8a montre la courbe de rétention de la céramique obtenue expérimentalement à 20 et $60^{\circ}C$. La figure 8b donne les mêmes résultats pour le sable limoneux argileux. A une succion donnée, l'augmentation de température à pour effet de diminuer la valeur de teneur en eau dans des proportions relativement faible (de l'ordre de 1%) mais significative. Un lissage des points expérimentaux est réalisé en utilisant la fonction proposée par Fredlund et Xing [Fredlund, 1994]. La courbe de rétention à $20^{\circ}C$ est utilisée comme courbe de référence pour le calcul décrit dans la section [eq. 8]. Le résultat de la modélisation, pour une température de $60^{\circ}C$, est également montré sur la figure 8a pour la céramique et la figure 8b pour le sable limoneux argileux. Les courbes de rétention issues de l'expérimentation et de la modélisation sont très proches dans les deux cas.



Figure 7 : Courbes de rétention (expérimentation et modélisation) ; a) Céramique, b) sable limoneux argileux.

Les comparaisons entre modélisation et expérimentation, pour les deux matériaux, montrent la capacité de la relation [eq. 8] à prédire la courbe de rétention à n'importe quelle température à partir d'un seul paramètre mesuré sur la courbe de rétention à une température donnée T_0 . L'hypothèse qui a conduit à négliger le troisième terme de la relation [eq. 9] devant les deux autres apparaît acceptable. En fait, bien que la variation de l'indice des vides puisse être non négligeable sur l'ensemble d'un essai, il ne semble pas nécessaire de prendre en compte explicitement cette variation dans le calcul. En effet, la détermination de la pente F_w de la courbe de rétention intègre implicitement la contribution de la déformation progressive du matériau au cours du chargement hydrique.

Les résultats présentés dans cet article permettent d'envisager la généralisation de la courbe de rétention classique à une surface de rétention exprimant la teneur en eau en fonction de la succion et de la température.

5. CONCLUSION

Deux modèles permettant de caractériser le comportement thermo-hydrique des milieux poreux partiellement saturés d'eau dans les différents domaines hydriques ont été proposés. Ils permettent de prédire à partir de mesures expérimentales réalisées à des températures données, les isothermes de sorption et les courbes de rétention pour toute autre température. Des expérimentations menées sur deux matériaux ont permis de valider ces modèles.

6. **BIBLIOGRAPHIE**

Bachmann J., Van Der Ploeg R.R. (2002) « A review on recent developments in soil water retention theory : interfacial tension and temperature effects » *Soil Sci.*, Vol.165, p.468-478.

Fredlund D.G., Xing A. (1994) « Equations for the soil-water characteristic curve » *Can. Geotech. J.*, Vol.31, p.521-532.

Jamin F. (2003) « Contribution à l'étude du transport de matière et de la rhéologie dans les sols non saturés à différentes températures », Thèse de doctorat, Université Montpellier II.

Kumar P., Mishra H.N. (2006) « Moisture sorption characterisctics of mango-soy-fortified yogurt powder » *International Journal of Dairy technology*, Vol.59, p.22-28.

Laloui L., Moreni M., Vulliet L. (2003) « Comportement d'un pieu bi-fonction, fondation et échangeur de chaleur » *Can. Geotech. J.*, Vol.40, p.388-402.

Moreira R., Vazquez G., Chenlo F. (2002), « Influence of the temperature on sorption isotherms of chickpea : evaluation of isosteric heat sorption », *Electronic Journal of environment, agricultural and food chemistry*, p.1-11.

Olchitzky E. (2002) « Couplage hydromécanique et perméabilité d'une argile gonflante non saturée sous sollicitations hydriques et thermiques », Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Saix C. (1987) « Contribution à l'étude des sols non saturés en température. Application à l'exploitation thermique des sous-sols », Thèse de doctorat d'état, Université Montpellier II.

Salager S., Jamin F., El Youssoufi M.S., Saix C. (2005) « Caractérisation thermo-hydrique de milieux poreux partiellement saturés d'eau », *Congrès Français de Mécanique*.

Van Den Berg C. (1984) « Description of water activity of foods for engineering purposes by means of GAB model of sorption », *In Engineering and food*, Mckenna and B M ed, Vol.1, p.311-321.