

## SÉCHAGE CONVECTIF DE LIMONS : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

### CONVECTIVE DRYING TESTS OF SILTS: EXPERIMENTAL STUDY

Pierre GERARD <sup>1</sup>, João BERNARDINO <sup>2</sup>, Angélique LEONARD <sup>3</sup>, Robert CHARLIER <sup>1</sup>,  
Frédéric COLLIN <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Liège, Département ArGEnCo, Belgium

<sup>2</sup> Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Portugal

<sup>3</sup> Université de Liège, Laboratoire de Génie Chimique, Belgium

**RÉSUMÉ** – En vue de déterminer les transferts de fluide en paroi lors de l'excavation de galeries, des essais de séchage d'échantillons de sols sont réalisés grâce à un micro-sécheur convectif. Les essais permettent la détermination d'un coefficient de transfert de masse entre le milieu poreux et l'atmosphère. L'influence de la température de séchage est étudiée.

**ABSTRACT** – In order to determine the fluid exchanges at the galleries wall during the excavation, drying tests of soils samples are achieved in a convective micro drying rig. The results of the drying tests permit to evaluate a mass transfer coefficient between the porous medium and the atmosphere. The influence of the drying temperature is studied.

### 1. Introduction

L'une des solutions envisagées à l'heure actuelle pour le stockage des déchets radioactifs de haute activité et à longue durée de vie est leur enfouissement dans des couches géologiques profondes et peu perméables (Delay et al., 2007). Un enjeu important de ces stockages est la caractérisation de l'éventuel développement d'une zone endommagée au sein de la roche hôte (*excavated damage zone*, EDZ), au sein de laquelle la perméabilité augmente.

Des simulations numériques des processus couplés se déroulant lors de l'excavation et à plus long terme sont donc nécessaires pour comprendre et prédire le comportement du massif rocheux. En particulier, la question de la condition limite hydraulique à imposer en paroi de galerie est un enjeu crucial, car elle peut influencer fortement la réponse du géomatériau peu perméable.

Au sein des galeries, des systèmes de ventilation contrôlent et maintiennent l'air à une humidité relative et une température constantes. Dès lors, à long terme, un équilibre thermodynamique devrait être atteint entre l'air circulant dans la cavité et les pressions de pore en paroi.

Une condition limite hydraulique non classique a ainsi été développée au sein du code aux éléments finis Lagamine, développé à l'Université de Liège. Elle a pour but de reproduire au mieux les échanges fluides se produisant entre l'air humide au sein de la galerie et la roche hôte. Elle combine deux types de flux : les flux de suintement et les flux d'évaporation (Gerard et al., 2008). Les flux de suintement imposent une condition unilatérale en paroi, empêchant toute venue d'eau liquide de la galerie vers le massif rocheux. Les flux d'évaporation entre l'atmosphère et le massif rocheux sont supposés proportionnels à la différence des masses volumiques de vapeur d'eau (Ben Nasrallah et al., 1998). Le coefficient de proportionnalité est appelé également coefficient de transfert de masse.

Une approche expérimentale est proposée pour déterminer le coefficient de transfert de masse entre l'atmosphère et la roche hôte à partir d'essais de séchage. Des échantillons cylindriques de sols sont ainsi placés au sein d'un micro-sécheur convectif contrôlé en humidité relative, température et vitesse de l'air. La mesure de la perte de masse au cours du temps permet de déterminer le flux d'évaporation à partir duquel le coefficient de transfert de matière est calculé.

Dans cette communication, l'expression du flux d'évaporation est tout d'abord développée. Ensuite, en vue de la détermination d'un coefficient de transfert de masse entre un milieu poreux et l'atmosphère, un dispositif expérimental de séchage convectif est présenté. Des premiers essais sont réalisés sur du limon d'Awans. L'influence de la température de séchage sur les résultats est analysée, avant de tirer les premières conclusions et perspectives.

## 2. Échanges de vapeur d'eau en paroi de galerie

Lors des processus d'excavation, la pression d'eau en paroi de galerie diminue. Vu la ventilation des tunnels, il est raisonnable d'imaginer qu'à long terme, l'humidité en paroi de la roche hôte tend progressivement vers l'humidité relative de l'air, grâce à des échanges d'eau et de vapeur. Ce phénomène peut être modélisé en imposant en fin de creusement une humidité relative en paroi équivalente à l'humidité relative de l'air (Hoxha et al., 2004). Un équilibre quasi-instantané entre les pressions partielles de vapeur est de la sorte supposé, ce qui est sans doute trop optimiste.

Afin de mieux prendre en compte les processus hydro-mécaniques autour des galeries, une formulation d'une condition aux limites non classique a été développée, proposant une expression du flux d'évaporation (Gerard et al., 2008).

Les échanges de vapeur d'eau se développent lorsqu'il existe une différence entre la pression partielle de vapeur de l'air au sein de la cavité et celle au sein de la roche hôte. Dans le modèle proposé ci-dessous, la distribution des concentrations de vapeur d'eau est supposée uniforme en paroi (Ghezzehei et al., 2004). Les échanges de vapeur d'eau entre la paroi et l'atmosphère se développent au sein d'une couche limite, dont l'épaisseur est contrôlée par le coefficient de transfert de masse. Différentes expressions du flux d'évaporation existent dans la littérature, selon qu'ils soient supposés proportionnels à la différence des masses volumiques de vapeur d'eau (Ben Nasrallah et al., 1998), des pressions de vapeur (Zhongxhuan et al., 2004) ou des humidités relatives (Anagnostou, 1995). Le coefficient de proportionnalité, appelé également coefficient de transfert de masse, peut être déterminé expérimentalement et peut s'exprimer comme une fonction de différents paramètres tels que la saturation relative, la porosité ou la vitesse de l'air au sein de la galerie (Anagnostou, 1995 ; Dracos, 1980). On a choisi d'exprimer les échanges de vapeur  $F$  comme étant proportionnels à la différence des masses volumiques de vapeur entre l'air au sein du tunnel et le massif rocheux en paroi :

$$F = \alpha \cdot (\rho_v^f - \rho_v^{gal}) \quad (1)$$

avec  $\rho_v^f$  et  $\rho_v^{gal}$  les masses volumiques de vapeur d'eau respectivement dans la formation et au sein de la galerie ( $\text{kg/m}^3$ ), et  $\alpha$  le coefficient de transfert de masse ( $\text{m/s}$ ).

La masse volumique de vapeur d'eau  $\rho_v$  est fournie par la relation suivante :

$$\rho_v = h \cdot \rho_{v,0} \quad (2)$$

où  $h$  est l'humidité relative (-) et  $\rho_{v,0}$  la masse volumique de vapeur saturante ( $\text{kg/m}^3$ ).

L'humidité relative d'un milieu poreux est reliée à la pression capillaire  $p_c$  (Pa) grâce à la loi de Kelvin. La masse volumique de la vapeur saturante est obtenue par la loi des gaz parfaits. La pression de vapeur saturante  $p_{v,0}$  (Pa) est quant à elle fournie par l'expression expérimentale suivante (Gerard et al., 2008) :

$$p_{v,0} = a \cdot \exp(-b/T) \quad (3)$$

avec  $a = 112659$  MPa et  $b = 5192,74$  pour des températures comprises entre 273 et 373K.

Des exemples de simulations numériques d'excavation de galeries dans un géomatériau fortement dilatant ont montré l'influence du coefficient de transfert de masse sur la réponse mécanique et hydraulique du massif rocheux (Gerard et al., 2008). Un coefficient de transfert de masse élevé suppose un équilibre quasi-instantané des humidités relatives de l'atmosphère et de la roche en paroi, tandis qu'un coefficient plus faible caractérise un équilibre à très long terme. Les différences de profils de pressions d'eau qui en découlent peuvent influencer le comportement géomécanique de la roche hôte (par exemple la convergence). La détermination expérimentale de ce coefficient de transfert de masse est donc un enjeu important pour caractériser au mieux les transferts fluides en paroi de galerie.

### 3. Micro-sécheur convectif

#### 3.1. Introduction

Un dispositif expérimental de séchage convectif développé au laboratoire de Génie Chimique de l'Université de Liège est utilisé en vue de la détermination du coefficient de transfert de masse entre un sol poreux et l'air ambiant. Il s'agit d'un micro-sécheur conçu pour le séchage d'échantillons individuels et qui permet de comprendre les mécanismes fondamentaux qui gouvernent le procédé de séchage. Un air conditionné à une certaine humidité, température et vitesse est envoyé vers la chambre de séchage dans laquelle l'échantillon de sol est posé sur un support fixé à une balance. Le support est conçu de telle manière que le séchage a lieu sur toute la surface externe de l'échantillon (Léonard et al., 2002).

Cette première phase expérimentale a essentiellement pour but de mettre au point un mode opératoire de préparation des échantillons, ainsi que d'étudier la faisabilité des essais de séchage. L'influence de la température de séchage sur les résultats est également étudiée.

#### 3.2. Cinétique de séchage

Le dispositif expérimental permet la pesée continue des échantillons placés dans le micro-sécheur convectif, ce qui fournit l'évolution temporelle de la masse de l'échantillon (Figure 1a). Cette courbe peut être transformée afin de tracer l'évolution du flux matériel  $F$  (kg/m<sup>2</sup>s) en fonction de la teneur en eau sur base sèche de l'échantillon  $w$  (kg eau/kg solide sec) (Figure 1b). Pour un matériau humide subissant un retrait, il est nécessaire de connaître l'évolution de la surface externe  $A(w)$  (m<sup>2</sup>) avec la teneur en eau :

$$F = \frac{1}{A(w)} \left( -\frac{dM}{dt} \right) \quad (4)$$

avec  $M$  (kg) la masse de l'échantillon.

L'évolution au cours du séchage de la surface disponible pour les transferts de matière et de chaleur peut être déterminée par microtomographie à rayons X (Léonard et al., 2004). Dans une première approche, on considère le retrait du matériau comme négligeable durant le séchage.

La courbe d'évolution du flux en fonction de la teneur en eau permet de repérer une phase relativement courte de séchage à flux constant et maximum. On considère que durant cette période, souvent isenthalpique, la surface du matériau où s'effectue l'évaporation est totalement saturée (Nadeau et Puiggali, 1995). Cette phase perdure tant que la surface est alimentée de manière suffisante en eau venant de l'intérieur du solide. Les résistances au transfert se situent presque exclusivement dans la couche limite. La vitesse de séchage ne dépend donc principalement que des conditions externes, c'est-à-dire la vitesse superficielle, l'humidité relative et la température de l'air, ainsi que la surface exposée au séchage (Geankoplis, 1993).

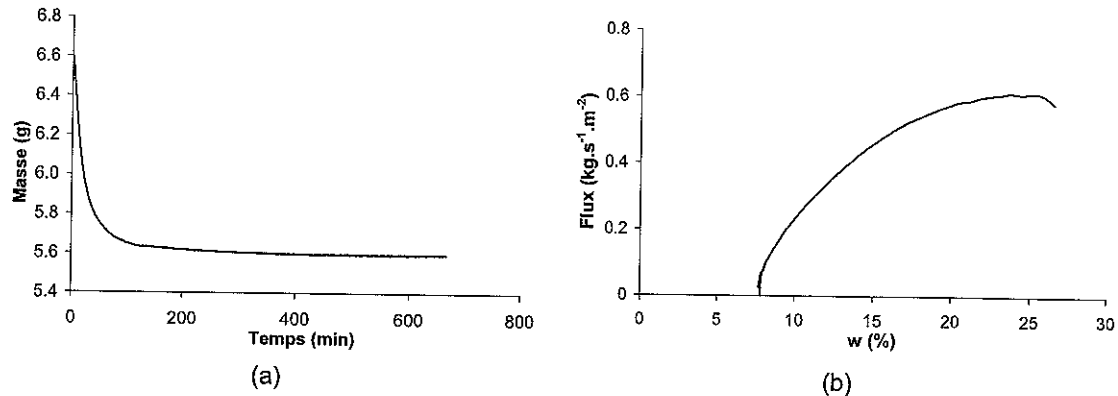


Figure 1. (a) Évolution temporelle de la masse de l'échantillon ; (b) Évolution du flux matériel en fonction de la teneur en eau.

De plus, un flux de chaleur se développe en parallèle aux échanges de vapeur d'eau, utilisé pour la vaporisation de l'eau. La température dans la couche limite n'est donc pas constante au cours de l'essai, si ce n'est durant la phase à flux constant et maximum, où les résistances au transfert de chaleur sont limitées à cette couche limite. La température à la surface de l'échantillon est alors égale à la température du bulbe humide (Nadeau et Puiggali, 1995).

Vu que la nature et la structure interne du matériau poreux n'interviennent pas dans la phase à flux constant et maximum du séchage, le coefficient de transfert de masse peut être déterminé à partir de cette période, durant laquelle la surface de l'échantillon poreux est supposée saturée et à température humide. À partir de l'équation (1), le coefficient de transfert de masse peut donc être déterminé grâce à :

$$\alpha = \frac{F_{\max}}{(\rho_{v,0}^{\text{éch}} (T_h) - \rho_v^{\text{air}})} \quad (5)$$

où  $F_{\max}$  est le flux de séchage maximum (kg/m<sup>2</sup>s),  $\rho_{v,0}^{\text{éch}}$  la masse volumique de vapeur saturante de l'échantillon (kg/m<sup>3</sup>),  $T_h$  la température du bulbe humide (°C) et  $\rho_v^{\text{air}}$  la masse volumique de vapeur de l'air (kg/m<sup>3</sup>).

### 3.3. Préparation des échantillons

Le matériau testé initialement est le limon d'Awans, qui est représentatif des sols de la région de Hesbaye (Belgique). Les essais sont réalisés sur des échantillons de limon remanié, de manière à rendre les conditions expérimentales les plus proches de celles du sol lors du prélèvement. La reconstitution des échantillons est une opération délicate. La technique de préparation des échantillons est basée sur un procédé développé par Masekanya (2008).

Pour reconstituer l'échantillon, le sol va être compacté dans un moule à l'aide d'une presse, à vitesse très lente, afin que l'air puisse s'échapper aisément et que l'échantillon soit maintenu dans un état le plus homogène possible. Connaissant le volume du moule, la masse volumique sèche que l'on souhaite obtenir (celle du sol en place), on détermine la masse de sol à placer dans le moule. Une fois le compactage réalisé, les échantillons sont saturés au sein d'une cellule triaxiale, sous une contrainte de confinement de 200 kPa et une pression d'injection d'eau de 190 kPa. Les carottes saturées sont alors découpées, afin de former des échantillons cylindriques d'environ 15 mm de hauteur et 15 mm de diamètre.

### 3.4. Résultats

L'objectif de la première phase expérimentale est de déterminer l'influence de la température sur le coefficient de transfert de masse. Pour cela, des échantillons de limon d'Awans ont été séchés avec un air pratiquement sec (on considère une humidité relative de 2%), à différentes températures (17, 50, 60 et 70°C). Les échantillons sont issus d'une même carotte saturée, d'une teneur en eau initiale de 25%. Une mesure de la masse de l'échantillon est réalisée chaque minute pendant 12 heures.

Vu la difficulté de produire des échantillons de dimensions exactement identiques, les masses initiales varient et les courbes d'évolution temporelle de la masse des échantillons sont difficilement analysables. Il est donc plus intéressant d'analyser les résultats des essais de séchage en terme d'évolution du flux de séchage en fonction de la teneur en eau, pour les différentes températures d'essais (Figure 2). Cette figure laisse clairement apparaître la bonne reproductibilité des essais aux différentes températures testées.

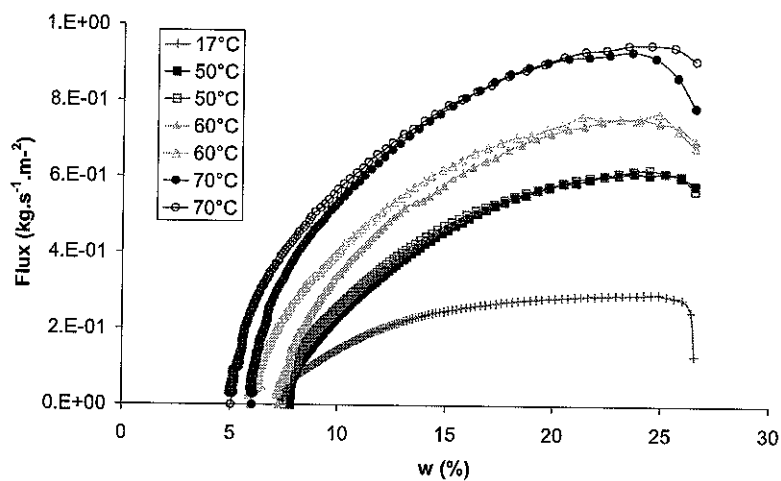


Figure 2. Flux de séchage en fonction de la teneur en eau pour différentes températures de séchage.

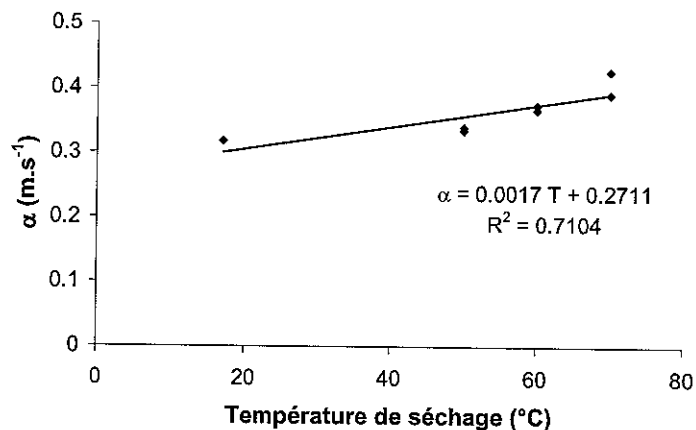


Figure 3. Coefficient de transfert de masse  $\alpha$  en fonction de la température de séchage

À partir de ces résultats et sur base de l'équation (5), il est possible d'étudier l'influence de la température de séchage sur le coefficient de transfert de masse. La Figure 3 montre ainsi une très légère tendance à une augmentation du coefficient avec la température, dans la gamme

des températures testées. De nouveaux essais à d'autres températures doivent confirmer cette évolution.

#### 4. Conclusions et perspectives

En vue d'une meilleure connaissance des transferts de fluide en paroi de galerie, des essais de séchage d'échantillons de sols ont été réalisés. Des échantillons cylindriques sont ainsi placés au sein d'un micro-sécheur convectif et une pesée continue de leur masse est réalisée.

Cette première phase expérimentale avait pour but la mise au point d'un procédé de préparation de petits échantillons saturés. Cette procédure a été expérimentée avec succès sur du limon d'Awans. Le dispositif expérimental a été testé à plusieurs températures (de 17 à 70°C) et montre la bonne reproductibilité des résultats. Ces derniers permettent la détermination d'un coefficient de transfert de masse, qui semble augmenter très légèrement avec la température.

Dans cette première phase exploratoire, l'éventuel retrait du matériau est négligé. Sur base de ces premiers résultats, une deuxième phase expérimentale doit être réalisée en utilisant des matériaux moins perméables, caractéristiques de ceux des galeries d'enfouissements des déchets radioactifs. Elle aura pour but l'étude de l'influence de la température, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air de séchage sur le coefficient d'échange. Ensuite, des simulations numériques de ces expériences auront pour but de valider le développement de la condition limite représentant les transferts fluides en paroi de galerie.

#### 5. Références bibliographiques

- Anagnostou G. (1995) Seepage flow around tunnels in swelling rock. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, 19, 705-724.
- Ben Nasrallah S., Pere P. (1998) Detailed study of a model of heat and mass transfer during convective drying of porous media. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31(5), 957-967.
- Dracos Th. (1980) *Hydrologie, Eine Einführung für Ingenieure*. Springer-Verlag: Wien, New York.
- Delay J., Vinsot A., Krieguer J.M., Rebours H., Armand G. (2007) Making of the underground scientific experimental programme at the Meuse/Haute-Marne underground research laboratory, North Eastern France. *Phys. Chem. Earth.*, 32, 2-18.
- Geankoplis C. J. (1993) *Transport processes and unit operations*. Prentice-Hall: Englewood Cliffs, New Jersey
- Gerard P., Charlier R., Chambon R., Collin F. (2008) Influence of evaporation and seepage on the convergence of a ventilated cavity. *Water Resour. Res.*, doi:10.1029/2007WR006500 (*in press*).
- Ghezzehei T.A., Trautz R.C., Finsterle S., Cook P.J., Ahlers C.F. (2004) Modeling coupled evaporation and seepage in ventilated cavities. *Vadose Zone J.* 3, 806-818.
- Léonard A., Blacher S., Marchot P., Crine M. (2002) Use of X-ray microtomography to follow the convective heat drying of wastewater sludges. *Drying Technology*, 20(4&5), 1053-1069.
- Léonard A., Blacher S., Marchot P., Pirard J.-P., Crine M. (2004) Measurement of shrinkage and cracks associated to convective drying of soft materials by X-ray microtomography. *Drying Technology*, 22(7), 1695-1708.
- Masekanya J.P. (2008) *Stabilité des pentes et saturation partielle. Etude expérimentale et modélisation numérique*. Ph.D. Thesis. Université de Liège.
- Nadeau J.-P. et Puiggali J. R. (1995) *Séchage. Des processus physiques aux procédés industriels*. Technique et Documentation - Lavoisier : Paris.
- Zhongxuan L., Fengzhi L., Yingxi L., Yi L. (2004) Effect of the environmental atmosphere on heat, water and gas transfer within hygroscopic fabrics. *J. Comput. Appl. Math.*, 163, 199-210.