

# Les transferts couplés de chaleur et d'humidité et l'hystérésis de sorption

Imane Oubrahim<sup>\*1,2,3</sup>, Thierry Duforestel<sup>1,3</sup>, Rafik Belarbi<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> EDF R&D, TREE

EDF Lab Les Renardières, 77818 Moret-sur-Loing, France

<sup>2</sup> LaSIE

UMR 7356, CNRS, La Rochelle Université, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1, France

<sup>3</sup> 4ev Lab

CNRS, Université de La Rochelle, Electricité de France EDF, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle Cedex 1, France

\*imane.oubrahim@edf.fr

---

*RESUME.* La modélisation du phénomène d'hystérésis de sorption de l'eau a fait l'objet de nombreuses études dans les domaines de la géotechnique et de la construction (Sols, béton, matériaux biosourcés, etc). Cependant, ce phénomène est souvent négligé dans la modélisation des transferts couplés de masse et de chaleur, et l'équilibre de sorption est le plus souvent représenté par une courbe moyenne. Dans cet article, nous présentons et comparons certains modèles d'hystérésis existant dans la littérature. Ensuite, nous proposerons une méthode d'intégration d'un modèle d'hystérésis dans un logiciel des transferts couplés (SYRTHES développé par EDF R&D). Nous montrerons ensuite, l'effet de la prise en compte de ce phénomène sur la prédiction du comportement hygrothermique et ce pour des évolutions réelles de l'humidité autour de composants d'enveloppe du bâtiment.

*MOTS-CLÉS.* Hystérésis de Sorption, Modélisation, Humidité

---

---

*ABSTRACT.* The modeling of the water sorption hysteresis phenomenon has been the subject of numerous studies in the fields of geotechnics and construction (Soils, concrete, bio-based materials, etc.). But it is often overlooked in the modeling of coupled mass and heat transfers, and the sorption equilibrium is most often represented by a single averaged curve. In this article, we will, firstly, present and compare some models of hysteresis existing in the literature. Secondly, we will propose a method to integrate the hysteresis in the heat/mass transfers' software (SYRTHES developed by EDF R&D), and we will show, on real evolutions of humidity around envelope components of building, the effect of taking this phenomenon into account on the prediction of hygrothermal behavior.

*KEYWORDS.* Sorption Hysteresis, Modeling, Humidity.

---

## 1 INTRODUCTION

En pratique, les matériaux dans des conditions réelles et naturelles subissent des cycles incomplets de désorption et d'adsorption. Ainsi, il est nécessaire de connaître, pour toutes les situations possibles, les différentes courbes d'isothermes : principales, primaires et intermédiaires. Cela est possible expérimentalement, mais la couverture de toutes les situations possibles prend un temps considérable. En ce sens, la modélisation de l'hystérésis est un moyen presque indispensable pour prédire la teneur en eau d'un matériau pour une humidité relative donnée, quelque soit l'histoire du matériau.

Les modèles d'hystérésis existant dans la littérature ont été développés pour les sols et ont parfois été validés pour d'autres matériaux (comme les matériaux cimentaires).

Ces modèles sont répartis en deux familles : Modèles empiriques et Modèles conceptuels. Les modèles empiriques sont des formules mathématiques se basant sur la forme des courbes. Les modèles conceptuels sont des modèles physiques décrivant la distribution de l'eau dans les pores. La première famille de modèles, nécessite en plus des courbes principales, les courbes primaires de sorption pour l'identification des paramètres du modèle. Ces modèles sont plus simples à programmer et, souvent, ils ne dépendent que du dernier point de changement du sens des courbes. Ceci dit, ces modèles présentent des problèmes de dépassement des courbes entre elles et parfois de dépassement des courbes d'enveloppe. Par contre, la deuxième famille de modèles donnent une représentation physique des isothermes intermédiaires et ne prennent en entrée que les courbes principales de sorption. Mais dans ces modèles, l'histoire du matériau doit être connue et enregistrée.

Dans cet article, nous présentons les modèles les plus utilisés. Ensuite, nous choisirons un de ces modèles et, en nous basant sur la bibliographie, nous évaluerons sa validité pour les matériaux ligno-cellulosiques. Par la suite, nous présenterons la méthode d'intégration de ce modèle dans le logiciel des transferts couplés de la chaleur et d'humidité développé par EDF R&D SYRTHES. Puis, nous comparerons les prédictions du logiciel intégrant le modèle choisi, avec les résultats expérimentaux et les prédictions du même logiciel avec une courbe moyenne de sorption. Enfin, nous discuterons les résultats de ces comparaisons.

## 2 LES MODÈLES D'HYSTÉRÉSIS

Les isothermes de sorption sont représentées par la relation  $\theta(RH)$ . Dans cet article, nous adopterons la relation  $\theta(P_c(RH))$ . La fonction  $P_c(RH)$  présente la loi de Kelvin (1) reliant la pression capillaire à l'humidité relative.

$$P_c(RH) = -\rho_l r_v T \ln(RH) \quad (1)$$

Avec :

$\rho_l$  : Masse volumique de l'eau liquide en  $Kg/m^3$ .

$r_v$  : La constante massique des gaz parfaits relative à la vapeur d'eau ( $J/kg.K$ ),  $r_v = R/M_v$ .

$T$  : La température en Kelvin.

$\theta$  : La teneur en eau du matériau.

### 2.1 MODÈLES POUR LES COURBES ENVELOPPE

La modélisation des courbes principales se fait généralement par des modèles empiriques. Ce sont généralement des fonctions avec des termes inconnus pouvant être identifiés à l'aide de résultats expérimentaux. Plusieurs modèles existent dans la littérature :

— Les modèles uni-modaux :

Ces modèles considèrent que le solide est composé d'un seul système des pores ; comme

le modèle de Van Genuchten 3 (VG3) (Genuchten, 1980) avec trois paramètres inconnus à identifier avec les résultats expérimentaux (2), le modèle de Van Genuchten à deux paramètres ; la même équation du VG3 avec une relation proposée entre deux paramètres du modèle (3). Enfin, le modèle de Fredlund et Xing. Ce dernier est une version modifiée du modèle VG2 et qui garde les mêmes paramètres du modèle à identifier.

— Les modèles multi-modaux :

Ces modèles considèrent que le solide se compose de plusieurs systèmes des pores. La prise en compte de ces systèmes dans un matériau, se traduit par une équation dans laquelle la relation  $\theta(RH)$  est composée d'une somme pondérée des fonctions de saturation  $\theta_i(RH)$  (Une fonction  $\theta_i(RH)$  par famille de pores).

Parmi ces modèles, nous trouvons le modèle bimodal de Durner (Durner, 1994) (pour les sols). Il considère deux familles de pores et utilise la fonction VG2 pour chaque système.

$$\theta(RH) = \theta_u \left[ 1 + \left( \frac{P_c(RH)}{a_v} \right)^{n_v} \right]^{-m_v} \quad (2)$$

Cette équation a été simplifiée par la suite par Van Genuchten lui même en proposant une relation entre les paramètres  $m_v$  et  $n_v$  :

$$m_v = 1 - \frac{1}{n_v} \quad (3)$$

## 2.2 MODÈLES POUR LES COURBES INTERMÉDIAIRES

Dans la littérature, les modèles décrivant les courbes intermédiaires peuvent être classifiées selon deux grandes catégories :

- Les modèles empiriques : Ce sont les modèles qui se basent sur la forme des courbes pour modéliser l'hystérésis. Plusieurs types de modèles existent dans la littérature ; les modèles basés sur une méthode linéaire (Hanks et al. (1969)), les modèles de la méthode du point, les modèles de la méthode de la pente (Jaynes (1984) (Jaynes, 1984)) et les modèles incrémentaux. Ces derniers supposent que la différence entre  $\theta(RH)$  et la saturation du point de départ de la courbe intermédiaire sur les courbes intermédiaires est la même que sur les courbes principales (Li (2004) (Li, 2005)). L'avantage de ces modèles est l'indépendance de l'histoire du chargement hydrique du matériau. La connaissance de l'état du matériau à l'instant  $t - 1$  est suffisante. Mais, la non-prise en compte de la physique de l'hystérésis dans ces modèles cause un dépassement des courbes principales par les courbes intermédiaires. Ce qu'on appelle le "Pumping effect" ou "Pumping Errors". Pour remédier à ce problème numérique, (Rémond et al., 2018) proposent le modèle "The gripped-box", qui permet de donner des valeurs limites aux valeurs de la teneur en eau pour les garder à l'intérieur de l'enveloppe. Il a été développé pour les matériaux ligno-cellulosiques.
- Les modèles conceptuels : Ce sont les modèles qui se basent sur la physique et sur les diagrammes de distribution de l'eau dans les pores pour prédire les courbes intermédiaires d'hystérésis. Ils sont constitués de deux familles : Les modèles indépendants. Ces modèles considèrent qu'un pore ne peut être qu'entièrement vide ou entièrement rempli. Plusieurs modèles existent dans la littérature comme : Enderby (1955) (Enderby, 1955), Preisach (1935) (Preisach, 1935), et le diagramme de Néel (1942,1943) (Néel, 1943), Mualem 1973 et 1974 (Mualem, 1973) (Mualem, 1974), Poulouvassilis (Poulouvassilis, 1962), Philip (Philip, 1964), Topp, et Parlange et Everett (Parlange, 1976).  
Les modèles dépendants. Dans ces modèles sont pris en compte la dépendance des pores entre eux. Cette dépendance est représentée dans les modèles par deux coefficients de pondération de la fonction de la distribution de l'eau dans les pores ;  $p_d$  et  $p_w$  ( $d$  pour

désorption et  $w$  pour adsorption (wetting)). Le coefficient  $p_d$  ( $p_w$ ) représente le ratio des pores réellement vides (remplis) sur ceux qui sont supposés être vides (remplis) dans la théorie des domaines indépendants. Parmi ces modèles, nous en citons : Mualem and Dagan's model-III (1975), Pouloussis and El-Ghamry (1978), Mualem et Miller's model-IIIexpl (1979), and Mualem (1984b), Everett (1967), Topp (1971a) et Pouloussis et Childs (1971).

Il est à noter que dans le modèle de Mualem chaque courbe intermédiaire est définie par un point  $(RH, \theta)$ . Ce point est le point de départ de la courbe. Dans ce modèle, chaque courbe à un ordre bien défini. Les courbes enveloppes sont des courbes d'ordre 0, les courbes primaires (courbes commençant par un point sur les courbes principales) sont des courbes d'ordres 1, les courbes avec un point de départ sur les courbes primaires sont d'ordre 2, etc (1). Donc, pour une nouvelle valeur  $RH$ , nous avons deux possibilités ; La définition d'une nouvelle courbe intermédiaire si changement de sens, ou la continuation sur la courbe intermédiaire qui est déjà définie.

Lorsque nous continuons sur une courbe intermédiaire, les deux conditions (5) et (7) permettent de définir l'ordre de la courbe sur laquelle nous allons continuer (dans le même sens). En effet, sur la figure 1, le point  $x_4$  a défini une nouvelle courbe d'adsorption intermédiaire d'ordre 4. Tant que la condition (5) est vérifiée, les valeurs de teneur en eau pour des humidités relatives supérieures à  $x_4$  seront calculées avec l'équation de la courbe d'ordre 4. Une fois la condition est non vérifiée, nous revenons sur la courbe intermédiaire d'adsorption d'ordre inférieur, dans ce cas, c'est la courbe d'ordre 2 (figure 2). Pareil, tant que la condition 5 est vérifiée, donc tant que  $\theta(RH) \leq \theta_w(RH_1)$ , nous restons sur la courbe d'ordre 2, sinon, nous revenons sur la courbe d'ordre 0 (3).

Il est à noter que nous pouvons écrire les équations de Mualem 1974 (4) et (6) , en utilisant directement la valeur d'humidité relative du point de départ de la courbe et sa teneur en eau  $\theta(RH_N)$ .

— Pour les courbes intermédiaires d'adsorption :

$$\theta(RH) = \theta_w(RH) + [\theta_w(RH_{N-1}) - \theta_w(RH)] \frac{\theta_d(RH_N) - \theta_w(RH_N)}{\theta_u - \theta_w(RH_N)} + \sum_{i=1}^{(N/2)-1} [\theta_w(RH_{2i-1}) - \theta_w(RH_{2i+1})] \frac{\theta_d(RH_{2i}) - \theta_w(RH_{2i})}{\theta_u - \theta_w(RH_{2i})} \quad (4)$$

Pour :

$$\theta_w(RH) \leq \theta_w(RH_{N-1}) \quad (5)$$

— Pour les courbes intermédiaires de désorption :

$$\theta(RH) = \theta_w(RH) + [\theta_w(RH_N) - \theta_w(RH)] \frac{\theta_d(RH) - \theta_w(RH)}{\theta_u - \theta_w(RH)} + \sum_{i=1}^{(N-1)/2} [\theta_w(RH_{2i-1}) - \theta_w(RH_{2i+1})] \frac{\theta_d(RH_{2i}) - \theta_w(RH_{2i})}{\theta_u - \theta_w(RH_{2i})} \quad (6)$$

Pour :

$$\theta_w(RH) \geq \theta_w(RH_{N-1}) \quad (7)$$

$\theta_u$  : La teneur en eau maximale.

— Pour les courbes intermédiaires d'adsorption :

$$\theta(RH) = \theta(RH_N) + [\theta_w(RH) - \theta_w(RH_N)] \frac{\theta_u - \theta_d(RH_N)}{\theta_u - \theta_w(RH_N)} \quad (8)$$

— Pour les courbes intermédiaires de désorption :

$$\theta(RH) = \theta(RH_N) - [\theta_w(RH_N) - \theta_w(RH)] \frac{\theta_u - \theta_d(RH)}{\theta_u - \theta_w(RH)} \quad (9)$$

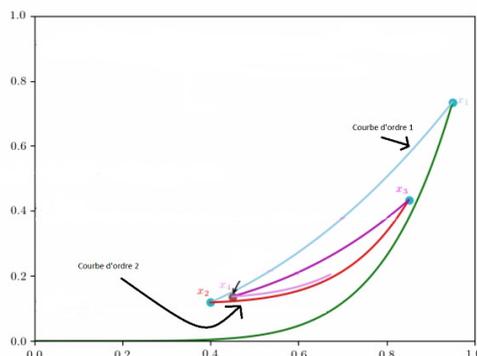


FIGURE 1. Les différents ordres des courbes intermédiaires du modèle de Mualem

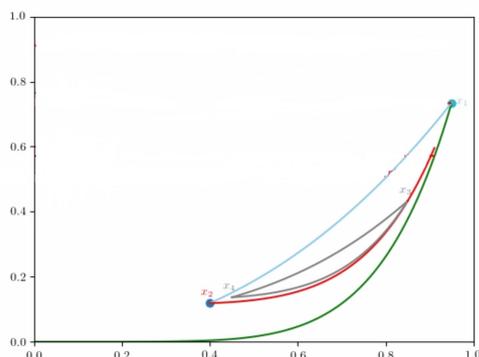


FIGURE 2. La condition 5 de Mualem pour revenir sur une courbe d'ordre inférieur  $N - 1$

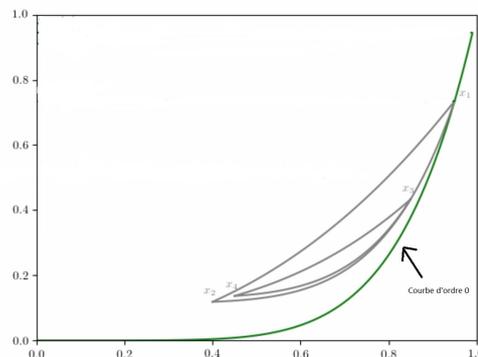


FIGURE 3. La condition 5 de Mualem pour revenir sur une courbe d'ordre inférieur  $N - 2$

### 3 CHOIX ET VALIDATION DU MODÈLE

Pour choisir un modèle d'hystérésis pour les applications du bâtiment, nous nous sommes basés sur des articles (Pham et al., 2005) et (Zhang et al., 2014). Le premier article a comparé les modèles par rapport à certains types de sols et sables. Le deuxième article a validé les modèles d'hystérésis les plus utilisés par rapport aux matériaux cimentaires. Au regard de ces deux articles, nous concluons que les modèles de Van Genuchten permettent de bien prédire les courbes enveloppe et qu'en augmentant le nombre des paramètres à calibrer, nous augmentons la précision des modèles. Donc, le VG3 permet une meilleure prédiction que le VG2, mais nous retenons les deux pour mener l'analyse qui suit. Pour les courbes intermédiaires, le modèle conceptuel de Mualem 1974 (Mualem, 1974) et le modèle empirique de Li (Li, 2005) semblent présenter des résultats comparables et satisfaisants.

Pour les courbes intermédiaires, nous avons choisi le modèle de Mualem indépendant de 1974. La raison de ce choix est que le modèle de Mualem ne se base que sur les courbes principales (facilement accessible expérimentalement) et ne présente pas de problème de dépassement. Ainsi, dans cet article, nous testerons la pertinence des modèles de Van Genuchten, et celui de Mualem avec les courbes principales VG2 (et VG3) par rapport aux matériaux ligno-cellulosiques.

### 3.1 DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Les données expérimentales utilisées pour tester la pertinence de ce modèle ont été recueillies de l'article (Rémond et al., 2018). Il présente cinq matériaux différents :

- La laine de chanvre et de lin : 44% de la fibre du lin, 44% de la fibre du chanvre et 12% du polyster ;
- L'Épicéa de Norvège ;
- La paille de blé ;
- La Cellulose : 90% du papier des journaux recyclés, 5% du borax et 5% de l'acide borique ;
- Le LDF (Low Density Fiberboard) ;

### 3.2 CRITÈRES D'ÉVALUATION DES MODÈLES

Nous retenons deux critères d'évaluation :

- L'erreur moyenne normalisée  $NME$  :

$$NME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\theta_i^{mod} - \theta_i^{exp}|}{\theta_i^{exp}} \quad (10)$$

- Le coefficient de détermination  $R^2$  :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i^{exp} - \theta_i^{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_i^{exp} - \theta_{moy})^2} \quad (11)$$

Avec  $\theta_i^{exp}$  représente la valeur mesurée,  $\theta_i^{mod}$  représente la valeur calculée par le modèle,  $\theta_{moy}$  représente la valeur moyenne des mesures expérimentales utilisées, et  $n$  le nombre des valeurs utilisées.

### 3.3 ÉVALUATION DES MODÈLES

Nous présentons dans les figures : 4, 5, 6 et 7 les graphes de comparaison entre : le modèle VG2, le modèle VG3, le modèle de Mualem avec VG2 et le modèle de Mualem avec VG3 et l'expérience pour le matériau Épicéa de Norvège.

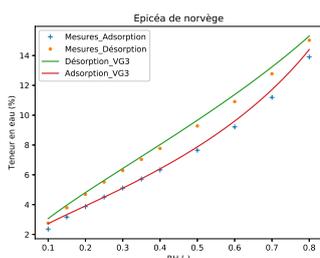


FIGURE 4. Les courbes principales des deux modèles VG3 pour L'Épicéa

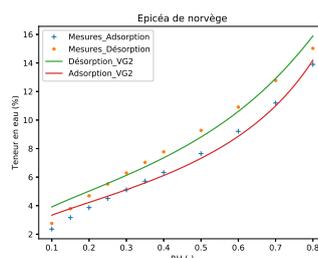


FIGURE 5. Les courbes principales des deux modèles VG2 pour L'Épicéa

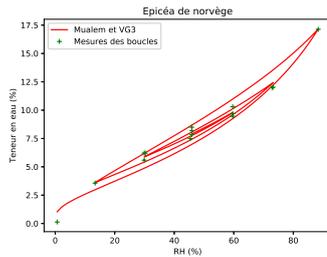


FIGURE 6. Les courbes intermédiaires du modèle de Mualem avec VG3 pour L'Épicéa

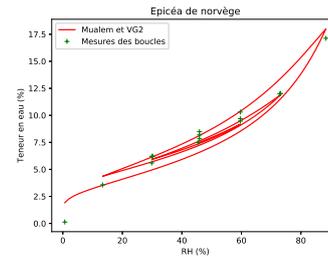


FIGURE 7. Les courbes intermédiaires du modèle de Mualem avec VG2 pour L'Épicéa

Pour tous les cas étudiés, les valeurs de l'erreur moyenne (10) sont inférieures à 0.16 et celles du coefficient de détermination (11) sont supérieures à 0.9.

Cependant, un examen plus en détail montre que les options avec VG3 donnent de meilleurs résultats. Nous avons opté donc pour le VG3 et le Mualem avec VG3 pour l'intégration d'un modèle d'hystérésis dans notre logiciel de simulation SYRTHES.

## 4 INTÉGRATION DANS SYRTHES

### 4.1 L'OUTIL SYRTHES

L'outil SYRTHES est un logiciel initialement développé à EDF R&D pour la simulation des transferts thermiques. Il a été adapté à la simulation des transferts couplés de chaleur et de masse. Le modèle physique utilisé dans SYRTHES pour la simulation des transferts couplés se base sur les trois équations de conservation développées dans (Duforestel, 2015) : la conservation de la masse d'air sec, de la masse d'eau et de la chaleur.

### 4.2 MÉTHODE D'INTÉGRATION

Dans le modèle de Mualem chaque courbe intermédiaire d'ordre  $N$  est définie par son point de départ  $N$ . Pour ses équations, ce modèle a besoin des points de départ des courbes intermédiaires d'ordre inférieurs à la courbe actuelle (les points  $RH$  où une courbe intermédiaire change de sens (adsorption  $\leftrightarrow$  désorption)). Donc, pour calculer la teneur en eau pour une valeur de  $RH$ , il faut déterminer :

- Le type de la courbe intermédiaire : Adsorption ou désorption ;
- Le point de départ de cette courbe : à cette étape, nous pouvons calculer la teneur en eau par deux méthodes différentes ;
  - En utilisant directement toutes les valeurs des humidités relatives de l'histoire avec les formules de Mualem 4 et 6 ;
  - En utilisant la valeur de la teneur en eau du point de départ avec les formules 8 et 9 ;

Pour l'optimisation de la mémoire, nous avons choisi les équations de Mualem 9 et 8. Dans ce cas, nous allons conserver les humidités relatives seulement. Nous remarquons aussi que dans le modèle de Mualem, nous ne nous intéressons qu'aux points de départ des courbes d'ordres inférieurs à la courbe d'ordre  $N$ . Alors, si nous trouvons sur la courbe  $N$  et en avançant nous revenons sur la courbe d'ordre  $N - 2$  (donc du point de départ  $N - 2$ ), la courbe et son point de départ  $N$  ne sont plus utiles à conserver. Ceci permet d'optimiser le nombre de points à enregistrer (Par exemple : Les points et courbes gris sur la figure 3).

En suivant cette méthode, nous avons intégré dans SYRTHES le modèle de Mualem 1974 (Mualem, 1974) avec le modèle de Van Genuchten 3 (Genuchten, 1980) pour les courbes principales,

pour calculer le taux d'humidité dans le solide et la pente de la courbe de sorption (la dérivée du taux d'humidité par rapport à la pression de vapeur).

### 4.3 CONFRONTATION AUX ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

#### 4.3.1 DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Les données expérimentales utilisées dans cette partie pour la comparaison entre les simulations avec une courbe moyenne et la simulation avec hystérésis sont issues du projet HYGROBAT. Dans ce projet, les deux surfaces d'une paroi en fibre de bois ont été soumises à des conditions climatiques différentes en température et en humidité relative. Dynamiques pour la surface extérieure et constantes pour la surface intérieure. Pendant la durée de l'essai, la température, la pression de vapeur et l'humidité relative ont été mesurées à 20 mm, à 40 mm et à 60 mm de la surface extérieure de la paroi.

#### 4.3.2 DISCUSSION

Sur la figure (8), nous avons comparé la simulation avec une courbe moyenne, la simulation avec le modèle d'hystérésis et les résultats expérimentaux à 20 mm de la surface extérieure de la paroi. Cette comparaison montre que le modèle intégré ne change guère les simulations. Nous nous attendons pourtant à ce que la prise en compte de l'hystérésis diminue la pente de l'isotherme, donc l'inertie hydrique du matériau. Mais cette pente pour la fibre de bois est quasi identique pour les courbes principales d'adsorption et de désorption. Or dans le modèle de Mualem, la pente calculée n'est pas très différente à celle de la courbe moyenne ou pour une courbe principale. Ainsi, le modèle choisi propose des pentes de courbes intermédiaires, très proches de celles des courbes principales, et donc de la courbe moyenne. En conséquence, la prise en compte de l'hystérésis avec ce modèle n'a aucun impact sur l'inertie hydrique et ne permet pas de mieux représenter la réalité expérimentale.

Nous pouvons alors suspecter que ce qui est en cause dans le modèle d'hystérésis, n'est pas

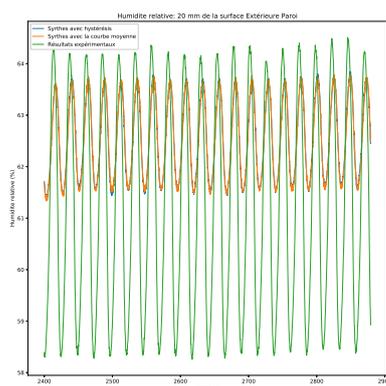


FIGURE 8. Humidité relative à 20 mm

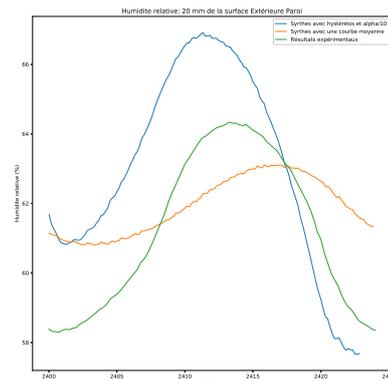


FIGURE 9. L'Humidité relative à 20 mm avec une pente 10 fois plus petite

la valeur des points intermédiaires (qui ont été mesurés et validés), mais la forme des courbes intermédiaires.

En s'appuyant sur les valeurs des points calculés par le modèle de Mualem, nous pouvons calculer la pente moyenne entre ces points à 20 mm du bord. Nous trouvons une valeur inférieure d'un facteur 10 à la valeur calculée par Mualem. En divisant arbitrairement par 10 dans le modèle la pente calculée par mualem, nous obtenons l'évolution en  $RH$  figurant sur la figure (9). Nous

constatons alors en effet, un fort impact sur l’inertie hydrique. Il semblerait qu’avec ces valeurs de pente d’isotherme, l’inertie hydrique qui était trop forte avec les isothermes moyennes ou celles de Mualem, deviennent trop faibles.

Ainsi, la forme des courbes intermédiaires de sorption pourrait effectivement être en cause. Il faudrait trouver des équations de courbes intermédiaires, basées sur les pentes de Mualem, mais qui généreraient des valeurs de pente intermédiaires entre la valeur moyenne et les valeurs données par Mualem.

C’est à quoi nous allons nous attacher désormais.

## 5 BIBLIOGRAPHIE

### RÉFÉRENCES

- Duforestel, T. (2015). *Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherches sur l’efficacité énergétique des bâtiments*. Habilitation à diriger des recherches, Faculté des Sciences et Technologies, Département de Mécanique.
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 2 :211–223.
- Enderby, A. (1955). The domain model of hysteresis. *Transactions of the Faraday Society*, 51 :835–848.
- Genuchten, M. T. V. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science*, J. 44 :892–898.
- Jaynes, D. (1984). Comparison of soil-water hysteresis models. *Journal of Hydrology*, 75 :287–299.
- Li, X. (2005). Modelling of hysteresis response for arbitrary wetting/drying paths. *Computers and Geotechnics*, 32 :133–137.
- Mualem, Y. (1973). Modified approach to capillary hysteresis based on similarity hypothesis. *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 5.
- Mualem, Y. (1974). A conceptual model of hysteresis. *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 3.
- Néel, L. (1943). théorie des lois d’aimantation de lord rayleigh. *Cah. Phys*, 13 :18–30.
- Parlange, J.-Y. (1976). Capillary hysteresis and the relationship between drying and wetting curves. *Water Resources Research*, 12 :224–228.
- Pham, H. Q., Fredlund, D. G., et Barbour, S. L. (2005). A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves. *Can. Geotech*, J.42 :1548–1568.
- Philip, J. R. (1964). Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous materials. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 69, N0. 8.
- Poulovassilis, A. (1962). Hysteresis of pore water, an application of the concept of independent domains.
- Preisach, F. (1935). Uber die magnetische nachwirkung. *Z. Phys*, 94 :277–302.
- Rémond, R., Almeida, G., et Perré, P. (2018). The gripped-box model : A simple and robust formulation of sorption hysteresis for lignocellulosic materials. *Construction and Building Materials*, 170 :716–724.
- Zhang, Z., Thiéry, M., et Baroghel-Bouny, V. (2014). A review and statistical study of existing hysteresis models for cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 57 :44–60.