



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Imbibition et sensibilité à l'eau des matériaux de construction biosourcés

Vincent PICANDET

📍 Centre de Recherche C. HUYGENS
Rue de Saint-Maudé – BP 92116
F-56321 **LORIENT** Cedex

🌐 www.irdl.fr



Introduction

- Biosourcé ↔ Bio dégradable (quand et comment) : rôle de l'eau
- Eau liquide ← Exposition accidentelle, exceptionnelle ou ponctuelle
 - Altération des propriétés mécaniques et thermiques
 - Stabilité dimensionnelle
- But : **Caractérisation** expérimentale simple
 - cinétique d'absorption : paramètres de transfert
- **Théorie** ↔ **Expérimentation** ↔ **Modélisation**
- Brefs rappels des principales théories considérées
 - Imbibition / diffusion unidirectionnelle (RRT – béton de chanvre)
 - Applications de modèles basiques



Capillarité

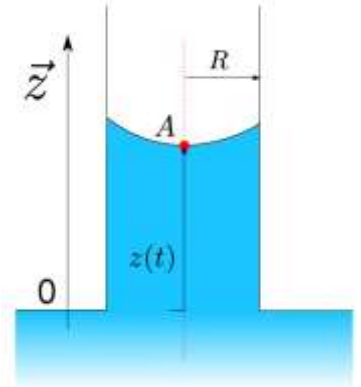
- Capillarité → pression de **Laplace**

$$P_c = P_{liq} - P_{atm} = -\frac{2\sigma \cos \theta_\tau}{R} = -\Delta P$$

σ : tension superficielle

θ_τ : angle de contact

μ : viscosité dynamique



- Ecoulement visqueux (loi de **Washburn**)

$$K_v = \frac{\rho g R^2}{8\mu}$$

- Capillaire vertical

$$\dot{z} = K_v \left(\frac{\Delta P}{\rho g z} - 1 \right) \quad \dot{z}(t) = \propto R$$

- Pesanteur négligée

$$z(t) = \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho g} t} = \sqrt{\frac{\sigma \cos \theta_\tau}{2\mu} R t} \quad \boxed{z(t) = \propto \sqrt{t}}$$

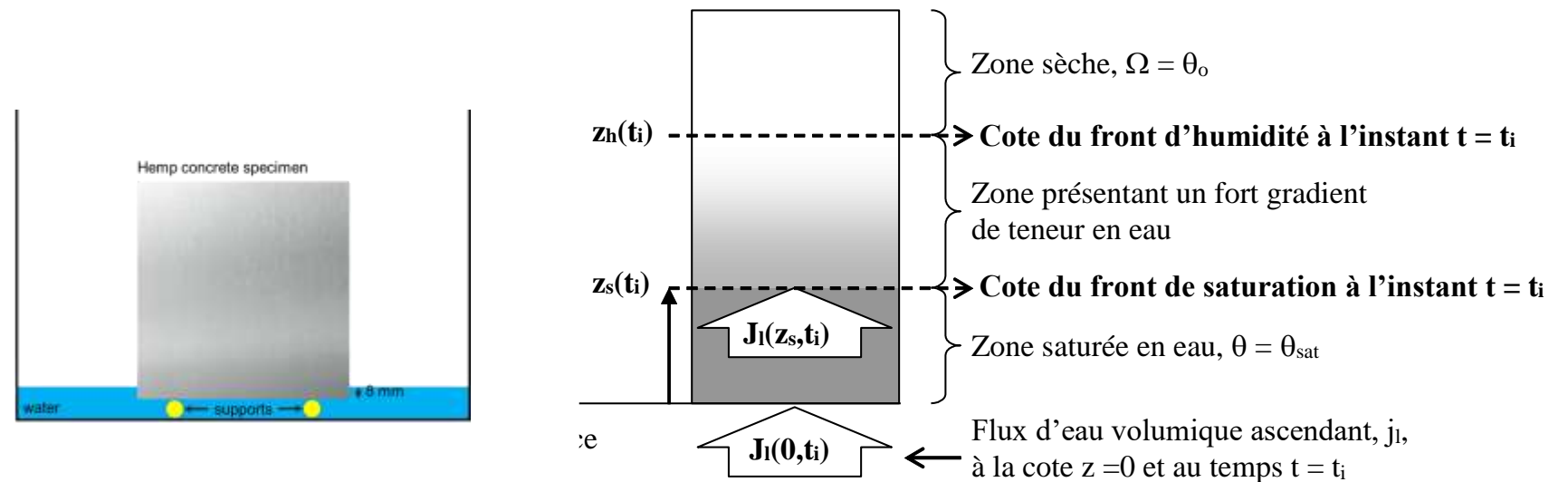
- Avec pesanteur

$$\dot{z} = K_v \left(\frac{h_\infty}{z} - 1 \right) \quad \text{où} \quad h_\infty = \frac{2\sigma \cos \theta_\tau}{R \rho g} \quad \text{hauteur de Jurin}$$

$$\boxed{z \approx h_\infty \left[1 - \exp\left(-\frac{K_v}{h_\infty} t\right) \right]}$$

Imbibition : principe

- Imbibition sous charge hydraulique nulle ou positive
- Imperméabilisation des faces latérales → diffusion unidirectionnelle



- Modèle basé sur la capillarité → réseau de tubes parallèles, saturés ou non
- Nécessité de considérer les transferts en zone insaturée
→ milieu homogène : porosité multi-échelle interconnectée



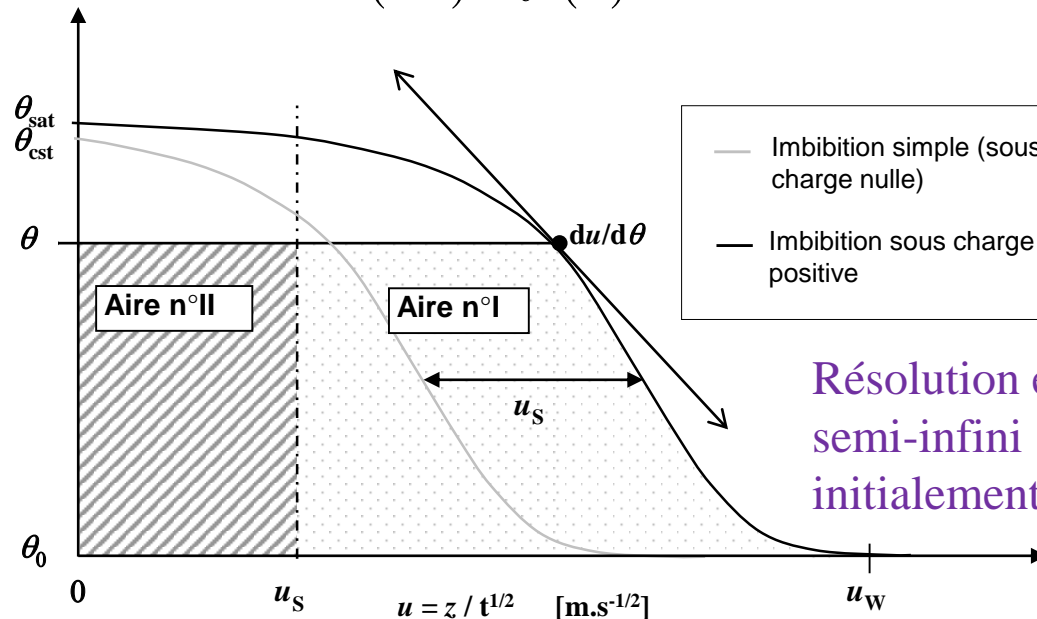
Diffusivité

- Diffusivité hydrique isotherme

$$\dot{\theta} = \text{div}(K_{\theta} \nabla(\psi_{\theta} + z)) \quad \text{avec} \quad D_{\theta} = K_{\theta} \frac{\partial \psi_{\theta}}{\partial \theta}$$

- Cas unidimensionnel $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d}{dz} \left(D_{\theta} \frac{d\theta}{dz} \right) + \frac{dK_{\theta}}{dz}$

- Unicité de $\theta(z, t) = f(u)$



θ : Teneur en eau volumique
 ψ : Succion (P_c en mce), ≤ 0 [m]
 K_{θ} : Conductivité hydraulique en zone insaturée [m.s⁻¹]
 D_{θ} : Diffusivité [m.s⁻²]

→ Eq. Richards
 [Bear 1998, Dullien 1991, Musy 1991]

Sans considération de pesanteur

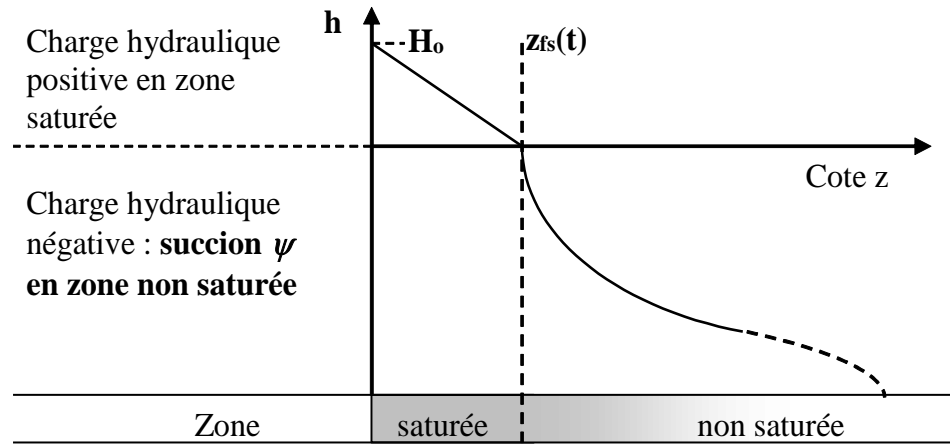
Variable de Boltzmann $u = \frac{z}{\sqrt{t}}$

$$-\frac{u}{2} \frac{d\theta}{du} = \frac{d}{du} \left(D_{\theta} \frac{d\theta}{du} \right)$$

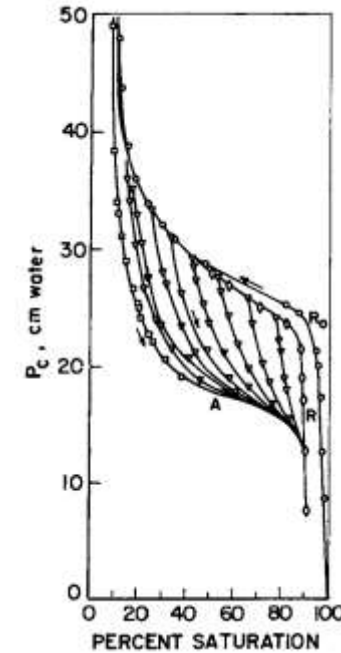
$$D_{\theta} = -\frac{1}{2} \frac{d\theta}{du} \int_{\theta_0}^{\theta} u(\theta) d\theta$$



Milieu insaturé



[Picandet & al. 2007]

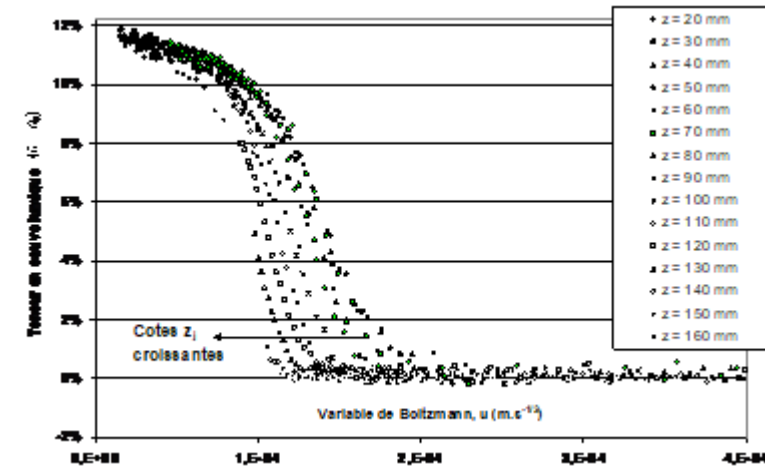
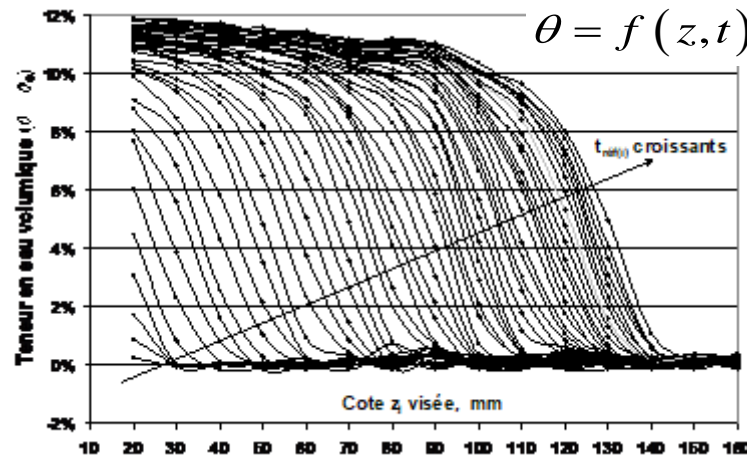


Dullien 1979

D_θ : coefficient global de diffusion en phase liquide + phase vapeur

$$D_\theta = D_{\theta liq} + D_{\theta vap}$$

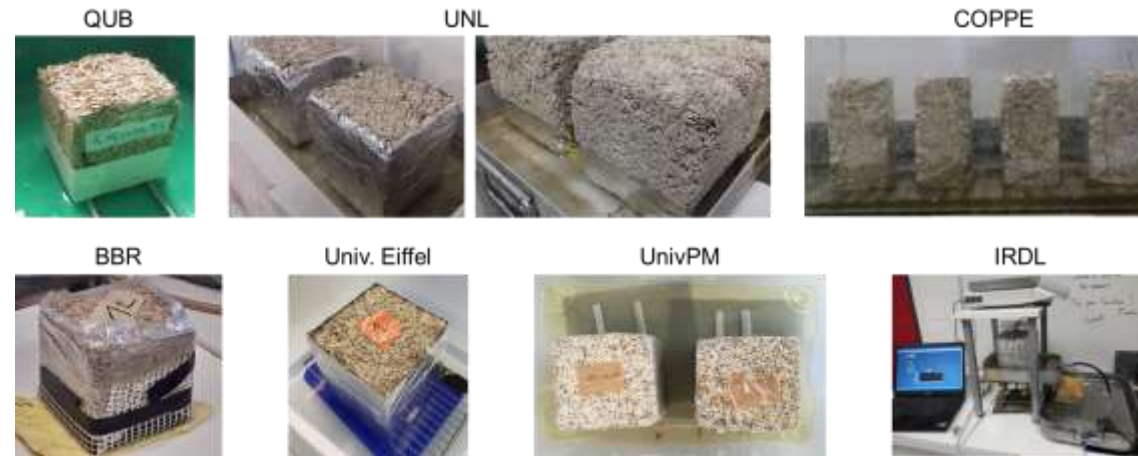
Profils de teneur en eau : imbibition sous charge nulle de béton hydraulique : non unicité de $\theta = f\left(u = \frac{z}{\sqrt{t}}\right)$



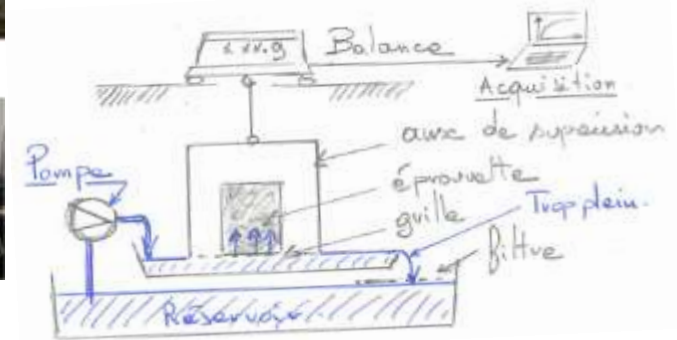


Observations

- **Béton de chanvre** (cubes de 150mm de côté, ou 75x75x150mm³)
- Round Robin Test RILEM 275 HDB
- Imbibition sous charge hydraulique nulle : test simple et accessible



Mesure en continu

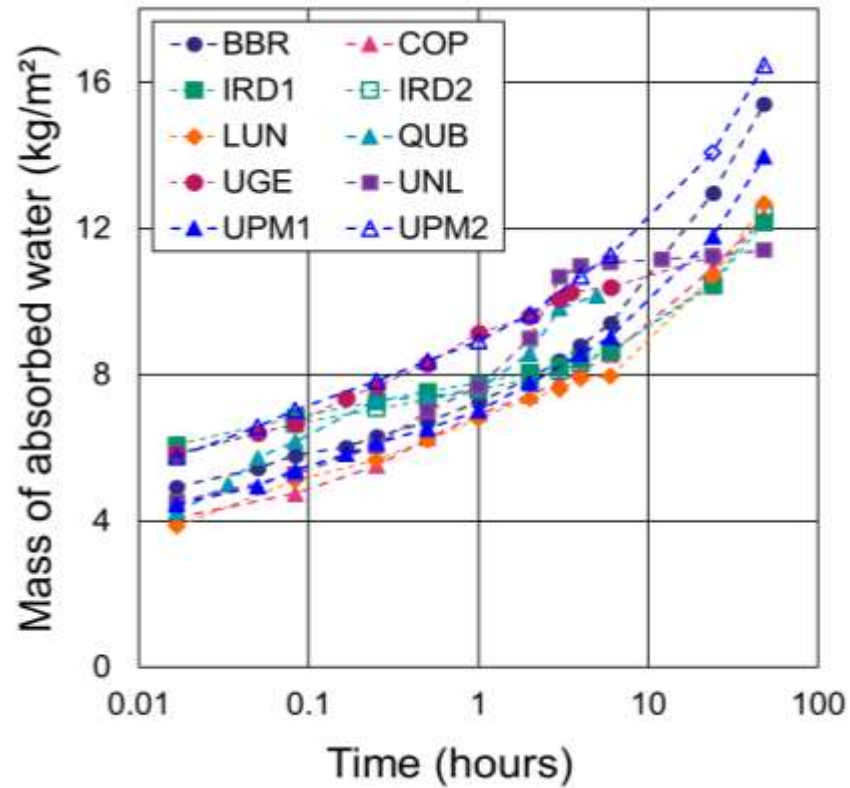


- Mesures séquentielles :
 - Manipulation : dégradation du matériau et perte d'eau absorbée ?
 - Décompte du temps de pesée ?
 - Maintien du niveau d'eau constant ?

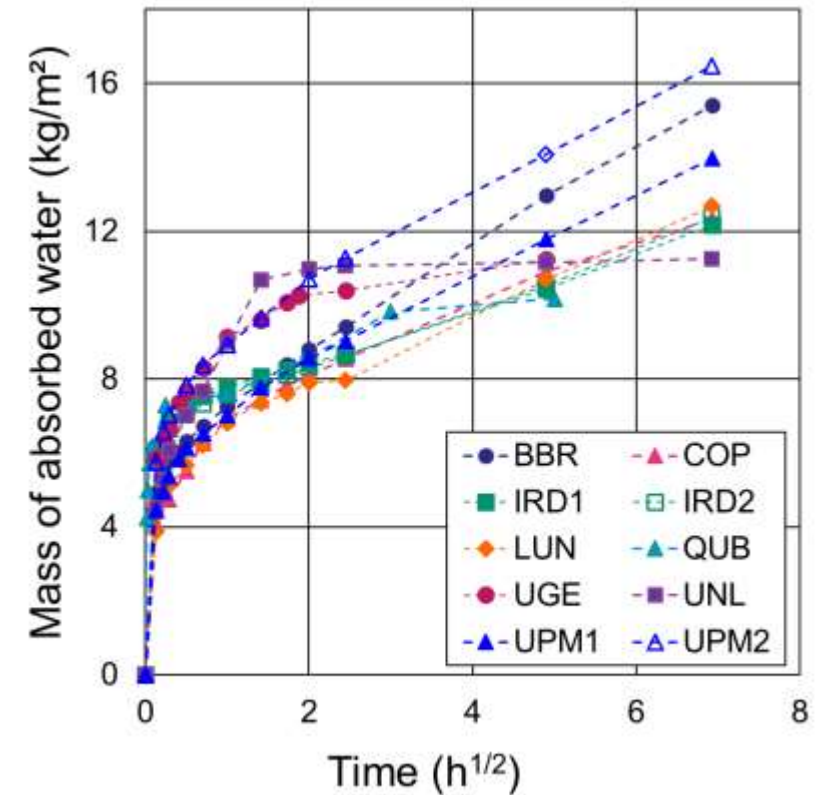


Résultats

- Selon log (t)
- Phase linéaire ente 1 min. et 6h

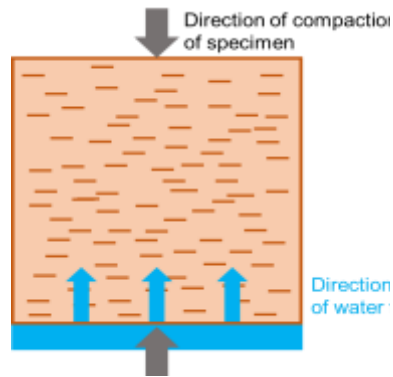
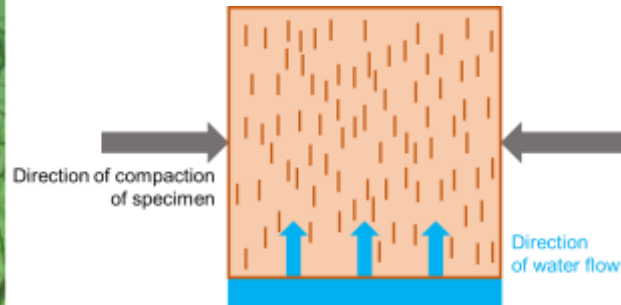


- Selon racine (t)
- Phase linéaire ente 1h et 48h

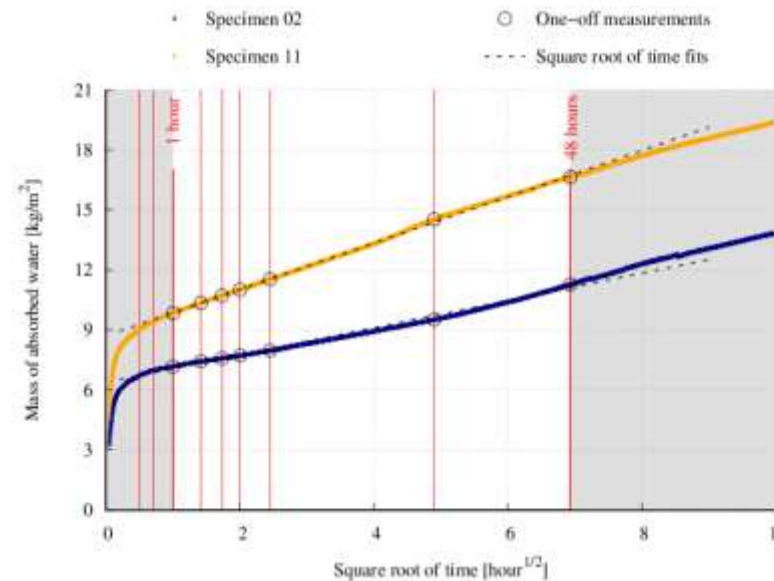
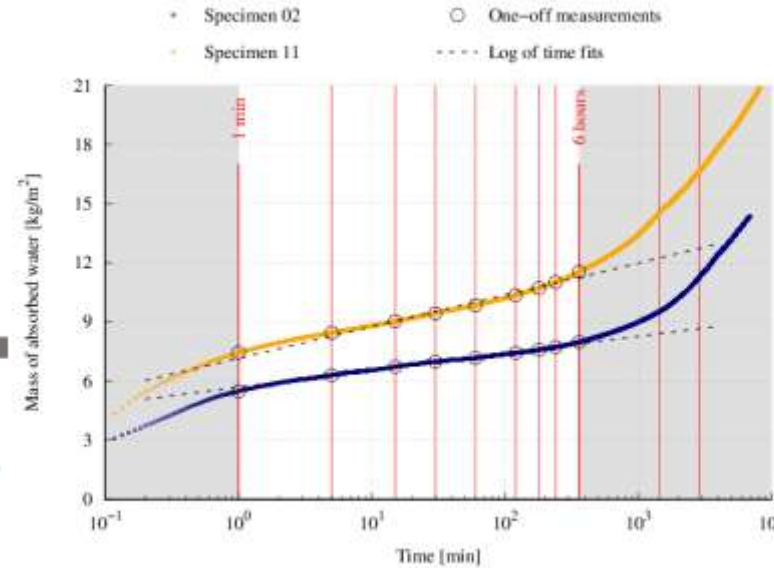


Analyse

Anisotropie induite par le procédé de fabrication



$W(t)/A$: Masse d'eau absorbée par unité de surface



$$\frac{W}{A} = K_1 \log(t) + IRA$$

Cinétique observée pour des particules immergées [Amziane & al. 2017]

$$\frac{W}{A} = C_A \sqrt{t} + k$$

[ASTM 1994]



Capillarité + Diffusivité

- Capillarité (avec effet de gravité) à court terme en zone quasi-saturée
 - Diffusivité à plus long terme
- [Martys & Ferraris 1997]*

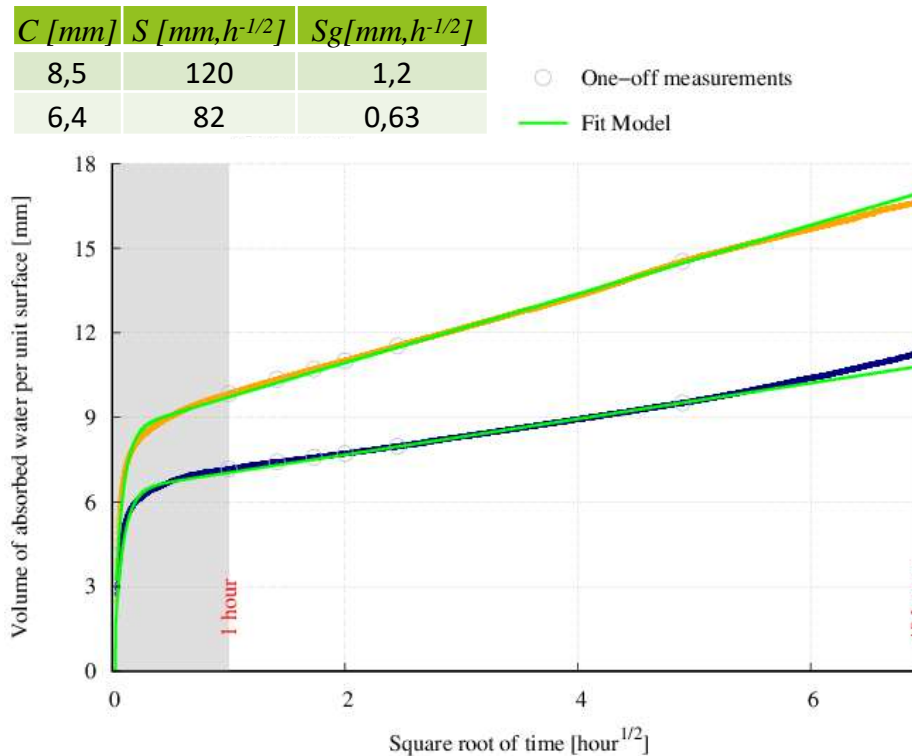
$$\frac{W}{A} = C \left[1 - \exp\left(-\frac{S}{C} \sqrt{t}\right) \right] + S_g \sqrt{t}$$

W/A : Volume d'eau absorbé par surface unitaire [m]

$C \propto$ hauteur max. de la zone quasi-saturée [m]

$S \propto$ Sorptivité des pores capillaires où les écoulements visqueux dominant [m.s^{-1/2}]

$S_g \propto$ Sorptivité des pores les plus fins où la diffusivité est prépondérante [m.s^{-1/2}]





Conclusion

Imbibition = Capillarité + Diffusivité → Transfert

- Capillarité : advection dans la porosité saturée en eau (rapide)
- Diffusivité : gradient de concentration en eau dans la zone insaturée (lent)
- **Imbibition simple : test basique**, proche des conditions réelles d'exposition
→ Caractérisation : modélisation du comportement / durée d'exposition
! Effets d'échelle : Tailles des particules / éprouvette, Temps d'observation
! Complexité : autres phénomènes associés : réactions, gonflement, osmose
+ chaleur changement de phase
- Antagonisme **Imbibition / Séchage**
→ Cycles : prédiction de la **durabilité** en service



Références

- E.W. Washburn, *The Dynamics of Capillary Flow*, Phys. Rev. 17 (1921) 273–283.
- J. Bear, *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Dover, 1988.
- F.A.L. Dullien, *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, 1991.
- A. Musy, M. Soutter, *Physique du sol*, PPUR presses polytechniques, 1991.
- V. Picandet, G. Bastian, A. Khelidj, *Compared imbibitions of ordinary and high performance concrete with null or positive water pressure head*, Cem. Concr. Res. 38 (2008) 772–782.
- S. Amziane, F. Collet, M. Lawrence, C. Magniont, V. Picandet, M. Sonebi, *Recommendation of the RILEM TC 236-BBM: characterisation testing of hemp shiv to determine the initial water content, water absorption, dry density, particle size distribution and thermal conductivity*, Mater. Struct. 50 (2017) 167
- Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, *ASTM C109-93*, Annual book of ASTM Standards, 04,01,1994
- N.S. Martys, C.F. Ferraris, *Capillary transport in mortars and concrete*, Cem. Concr. Res. 27 (1997) 747–760.