



Confrontation numérique / expérimental : Cas d'une paroi test

Christophe Lanos

LGCGM – Univ. Rennes



Projet européen ISOBIO

1 Objectifs

- Adapter des modèles physicochimiques et des outils de simulation numérique à l'étude du transfert thermohydrique au sein des matériaux biosourcés

2. Mur de référence ISOBIO et propriétés des matériaux

3. Equations de Kunzel

4. Le modèle de cinétique locale de sorption

5. Simulation de la sorption : validation du modèle de cinétique locale

6. Simulation du démonstrateur ISOBIO

7. Conclusions

2. Mur de référence ISOBIO et propriétés des matériaux

- **Bétons de chanvre étudiés**

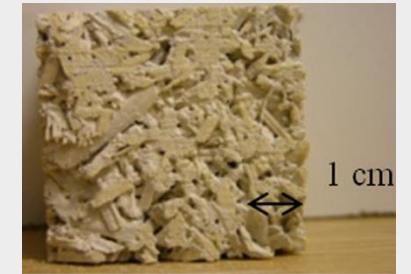
- PHC (Béton chanvre préfabriqué)
- SHC (Béton chanvre projeté)
- MHC (Béton de chanvre moulé)



+

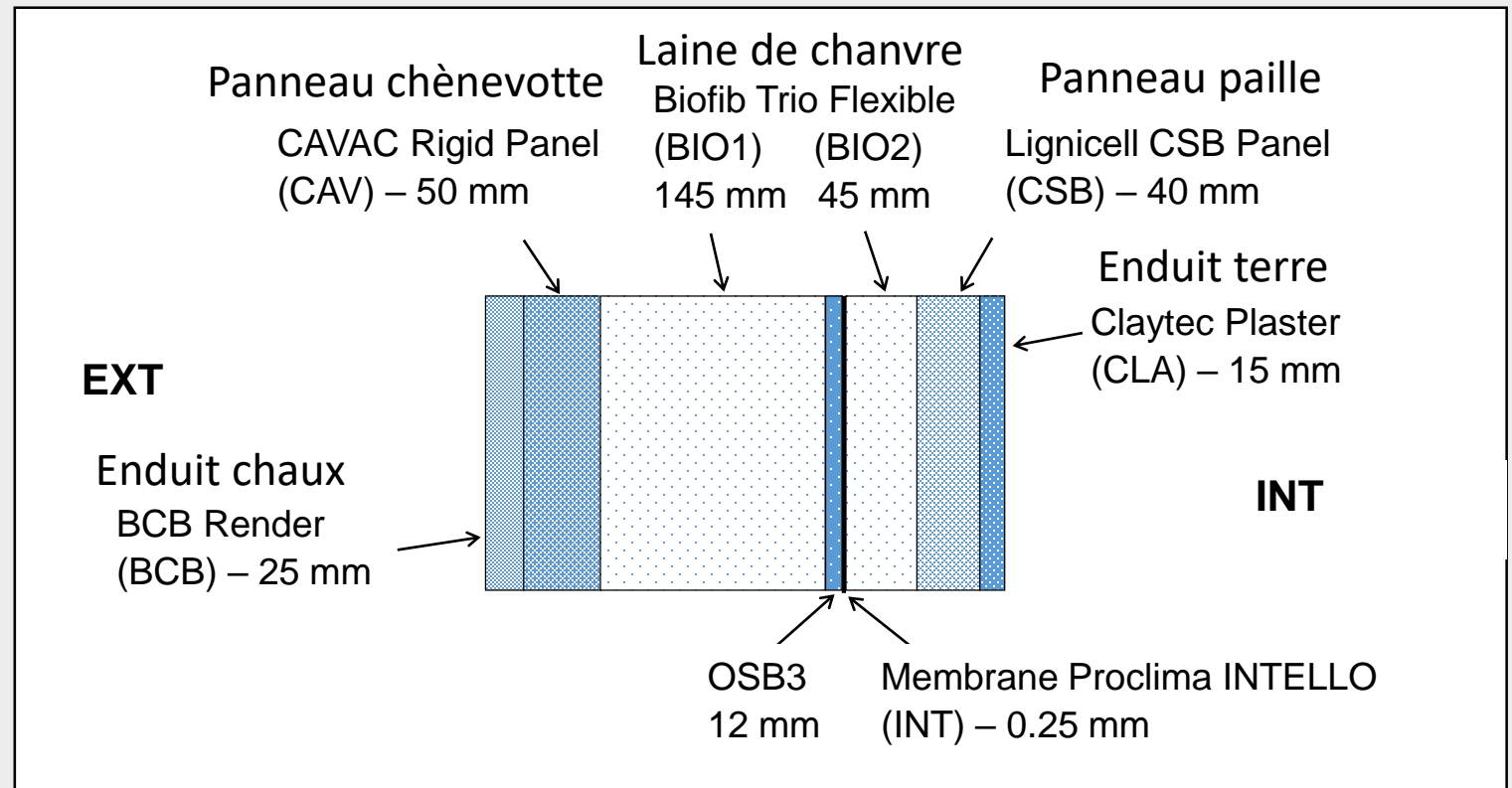


=



- **Matériaux du mur ISOBIO**

Configuration du mur multicouches
Epaisseur = 33.2 cm



2. Mur de référence ISOBIO reference et propriétés des matériaux

- **Compilation des propriétés hygrothermiques des matériaux** (Collet et al., Energy and Buildings 2013, ICBBM 2019)

	Density ρ_0 (kg.m ⁻³)	Porosity ε_0 (-)	Vapor resistance factor μ_0 (-)	Thermal conductivity λ_0 (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Specific heat capacity Cp_0 (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	
3 bétons de chanvre	PHC	450	0.68	4	-	
	SHC	425	0.66	4	-	
	MHC	425	0.77	4	-	
Matériaux u mur ISOBIO	BCB	530	0.55	9	0.13	1006
	CAV	197	0.87	11	0.07	2100
	BIO	28	0.98	3.6	0.039	1800
	OSB3	567	0.61	138	0.13	1600
	INT	85	0.085	1.36.10 ⁵	2.4	2500
	CSB	505	0.72	27	0.10	1700
	CLA	1392	0.29	10	0.62	1040

2. Mur de référence ISOBIO et propriétés des matériaux

- Modélisation des propriétés

- Isothermes de sorption ajustées avec un modèle de Van Genuchten (VG):

$$W_{eq}(RH) = W_{sat} \left[1 + (-h \ln(RH))^\eta \right]^{1/\eta-1}$$

- Conductivité thermique calculée à l'aide d'un schéma auto-coherent :

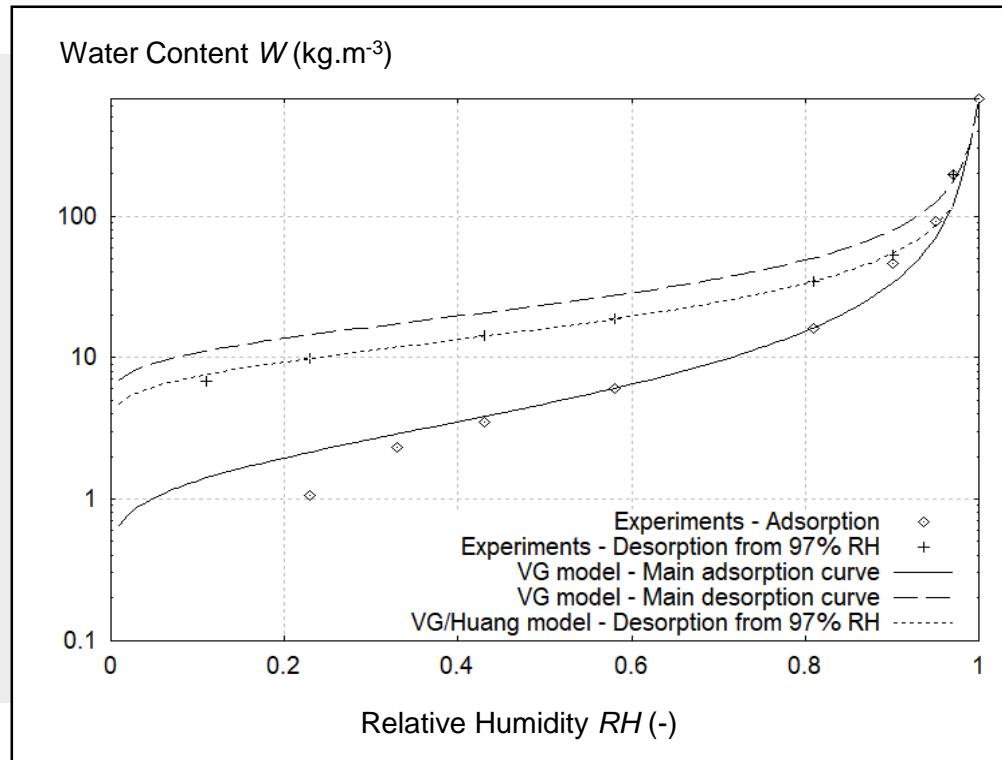
$$\lambda(W) = \lambda_s \left\{ 1 + \varepsilon_0 \left[(1 - \varepsilon_0)/3 + (3 + (W/1000\varepsilon_0)(0.025/0.6 - 1)) \cdot (3(0.025/\lambda_s - 1) - (W/1000\varepsilon_0)(0.025/0.6 - 1)(2 \cdot 0.6/(\lambda_s + 1)))^{-1} \right]^{-1} \right\}$$

	W_{sat} (kg.m ⁻³)	h_{ads} (-)	η_{ads} (-)	h_{des} (-)	η_{des} (-)	λ_s (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
PHC	680	166	2.05	258	1.65	-
SHC	660	378	1.77	500	1.46	-
MHC	770	185	1.98	75	1.66	-
BCB	546	8524	1.38	-	-	0.312
CAV	874	4830	1.435	-	-	0.115
BIO	348	198852	1.473	-	-	0.048
OSB3	609	25410	1.325	-	-	0.809
INT	85	2091	1.42	-	-	2.73
CSB	720	12966	1.334	-	-	0.317
CLA	294	12000	1.36	-	-	0.995

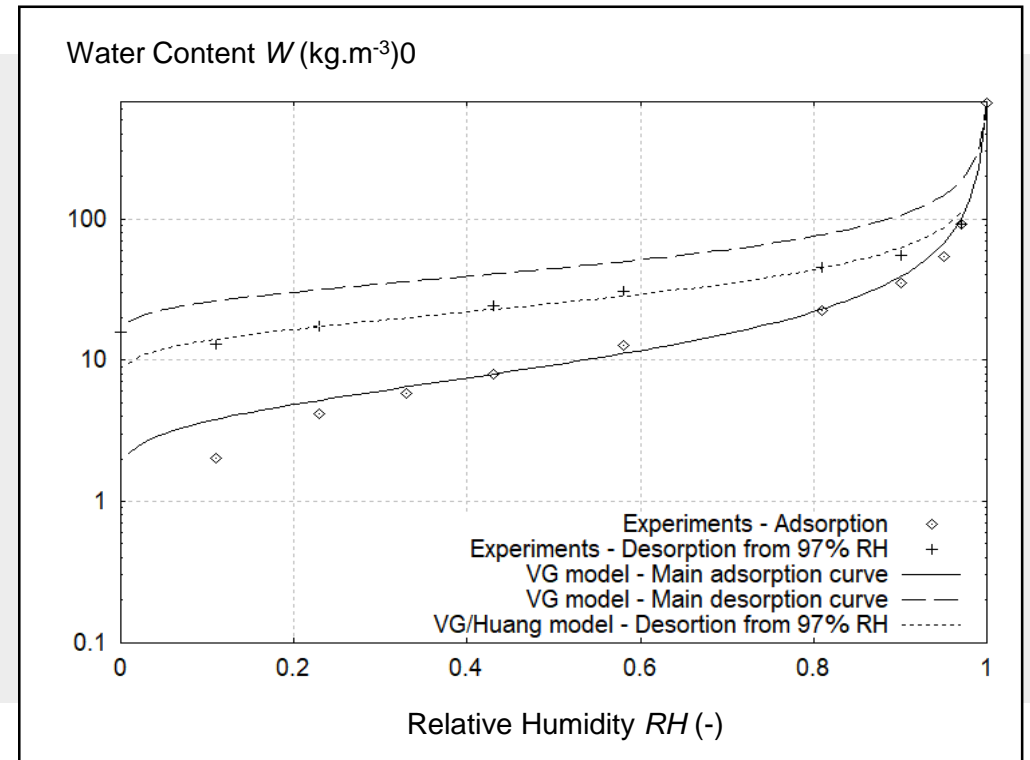
2. Mur de référence ISOBIO et propriétés des matériaux

- Modélisation des propriétés

Bétons de chanvre



PHC: Isothermes d'adsorption / désorption

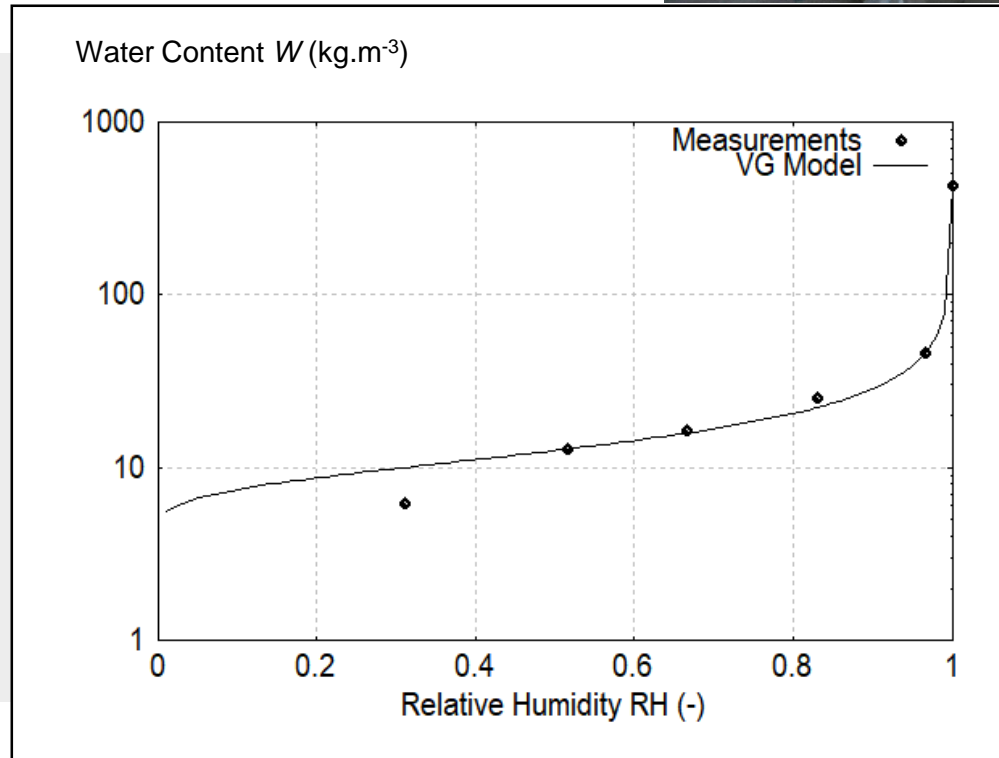


SHC: Isothermes d'adsorption / désorption

2. Mur de référence ISOBIO et propriétés des matériaux

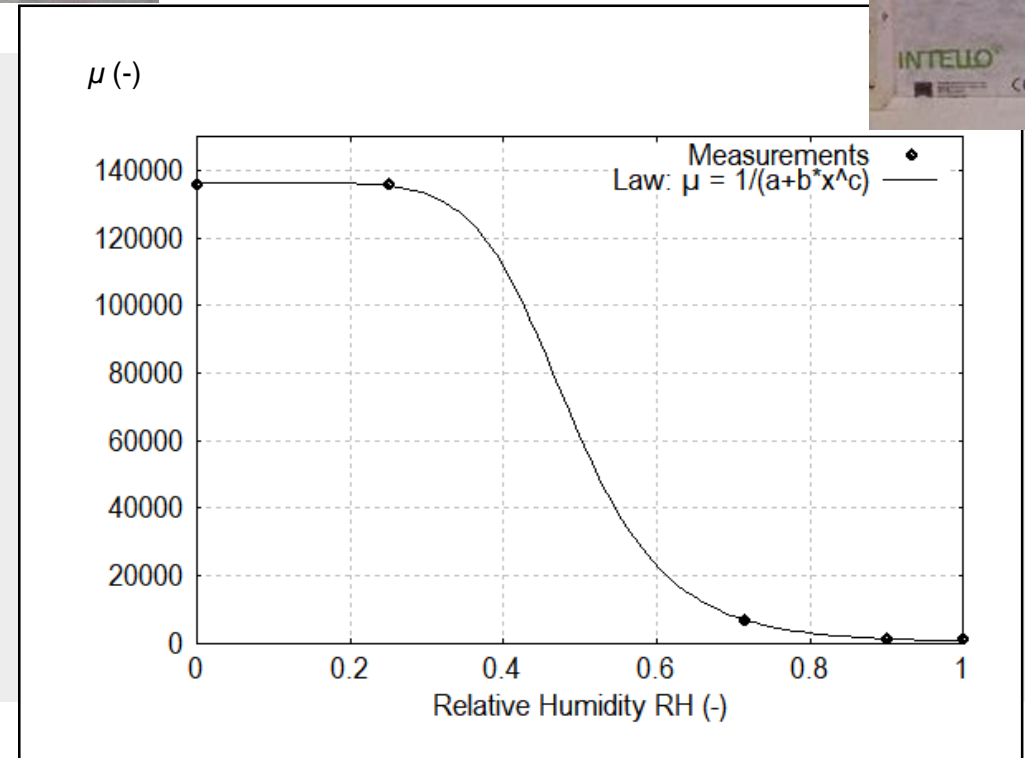
- Modélisation des propriétés

Panneaux de chènevotte



CAV: Isotherme d'adsorption

Membrane Intello



INT: Résistance à la vapeur hydrovariable

3. Equations de Künzels

- **Hypothèses de base**

Localement, l'adsorption de la valeur d'eau est très rapide donc la teneur en eau locale w évolue selon la courbe de l'isotherme de sorption:

$$w_{eq} = w_{eq}(\varphi) |_T$$

⇒ Equilibre instantané entre la teneur en eau locale w / l'humidité relative locale φ

- **Equation de conservation de la masse de Künzels**

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \Big|_T \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\frac{\delta_v}{\mu} P_{sat} + D_{p,l} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \Big|_T \right) \nabla \varphi \right] = 0$$

$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \Big|_T$: dérivée de l'isotherme de sorption

δ_v/μ : perméabilité vapeur du milieu poreux

$D_{p,l}$: diffusivité liquide

4. Le modèle de cinétique locale de sorption

- **Hypothèses**

La sorption de l'eau n'est pas aussi rapide que le flux diffusif = la cinétique locale de sorption est relativement lente

- **Equation de conservation de la masse**

$$\begin{cases} \frac{\partial(\varphi P_{sat})}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\frac{\delta_v}{\mu} \frac{RT}{M_w} \nabla(\varphi P_{sat}) \right] = -\frac{RT}{M_w} R_s \\ \frac{\partial w}{\partial t} - \nabla \cdot (D_{p,l} \nabla w) = R_s \end{cases}$$

- **vitesse de sorption**

$$R_s = k_0 (w_{eq}(\varphi) - w)^2$$

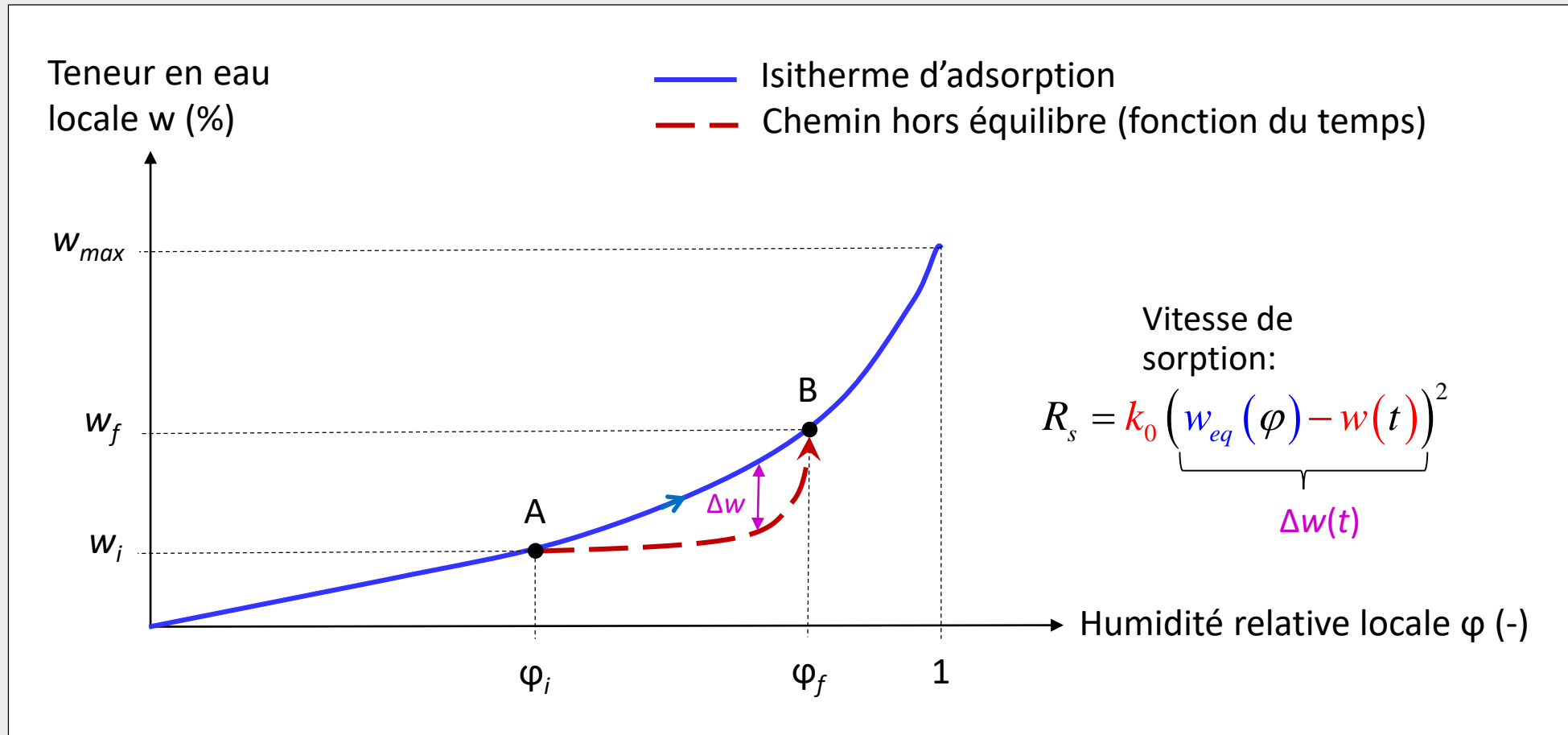
où k_0 est une constante, et la cinétique est d'ordre 2.

Expression établie et validée pour 3 bétons de chanvre

(Reuge et al., Transp. in porous med., 2019)

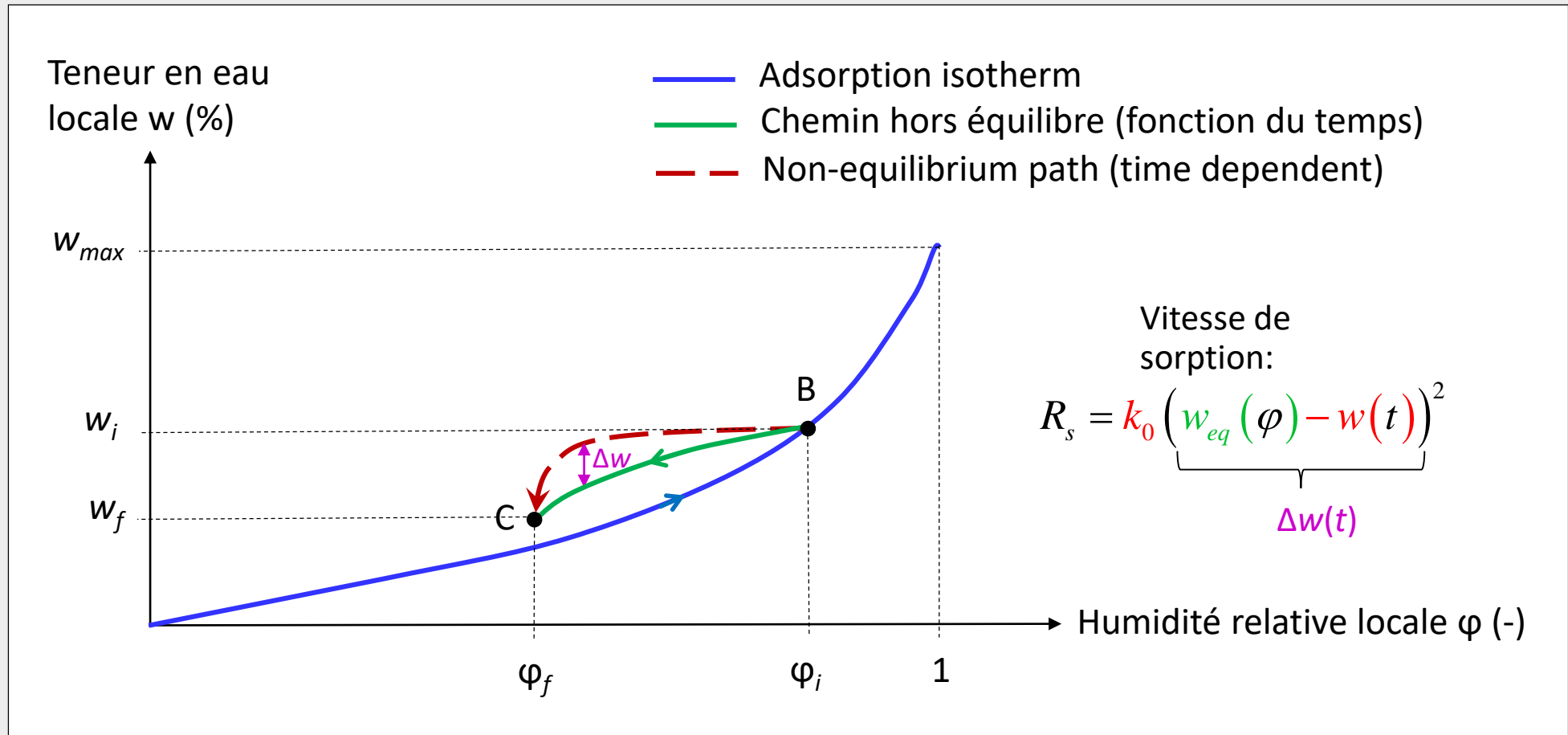
4. Le modèle de cinétique locale de sorption

- Illustration de la cinétique locale (adsorption)



4. Le modèle de cinétique locale de sorption

- Illustration de la cinétique locale (désorption)

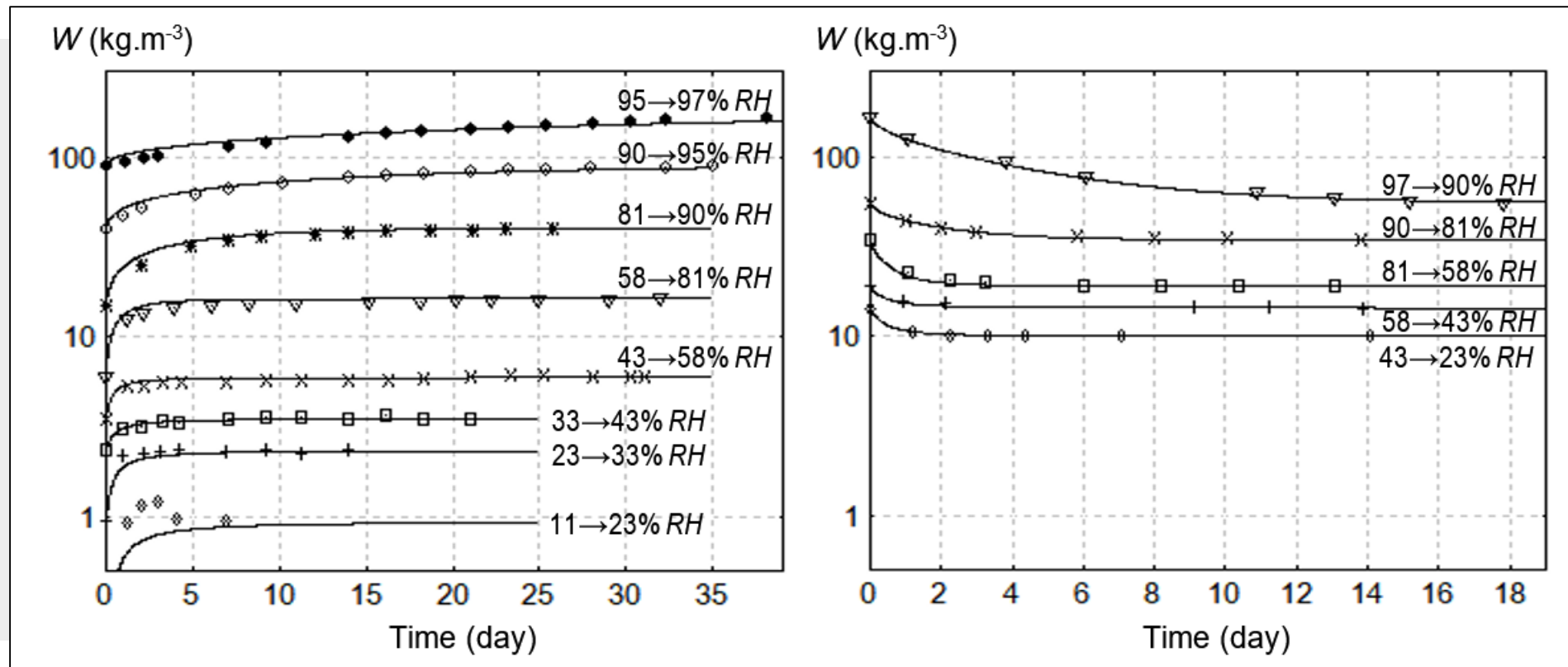


5. Simulation de la sorption : validation du modèle de cinétique locale

- Béton de chanvre MHC, cinétique d'adsorption /désorption à l'échelle de l'échantillon

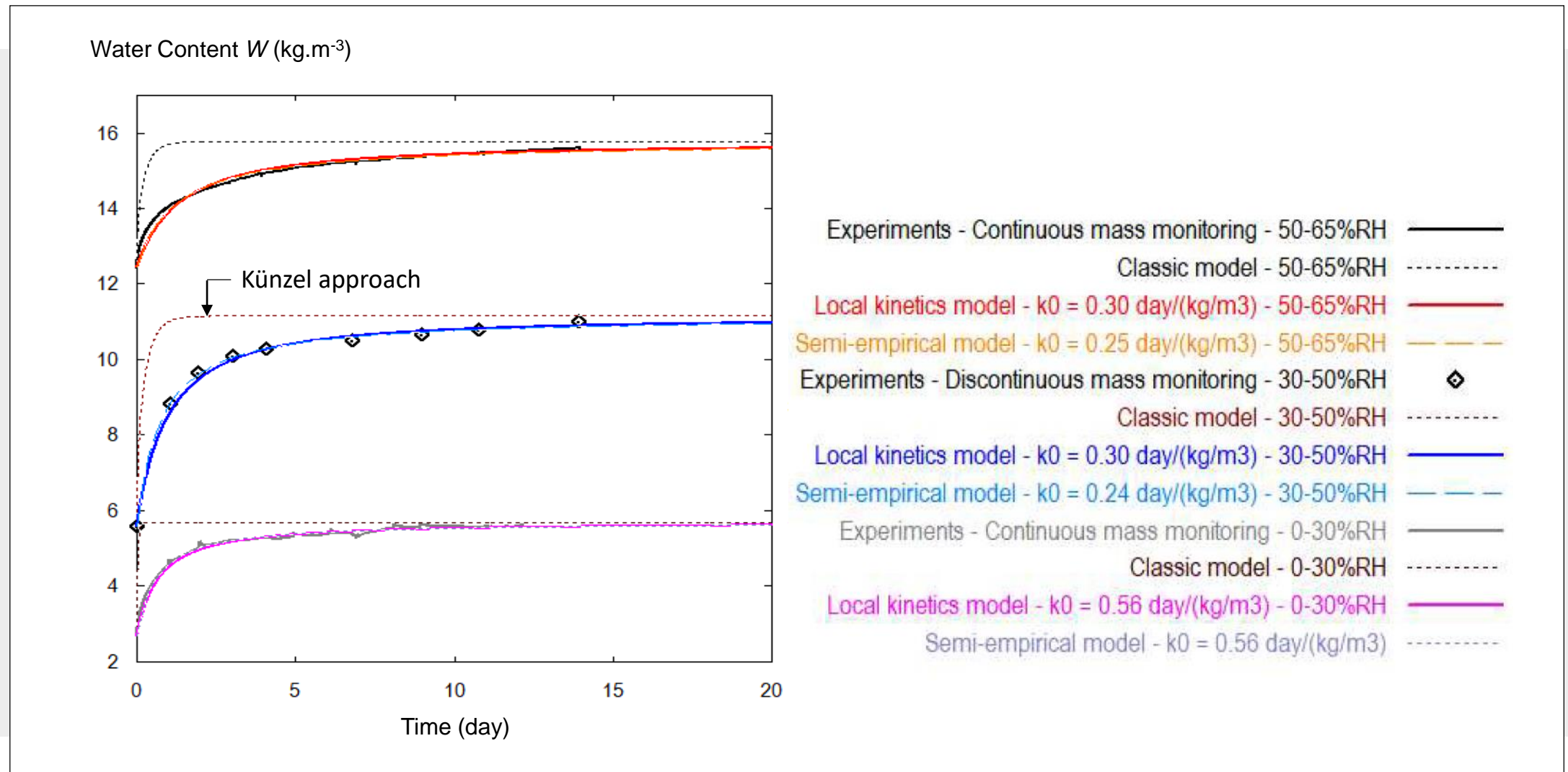
La constant cinétique est déterminée par ajustement de simulations numériques en 1D cylindrique :

$$k_0 = 2 \text{ day}^{-1}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$$



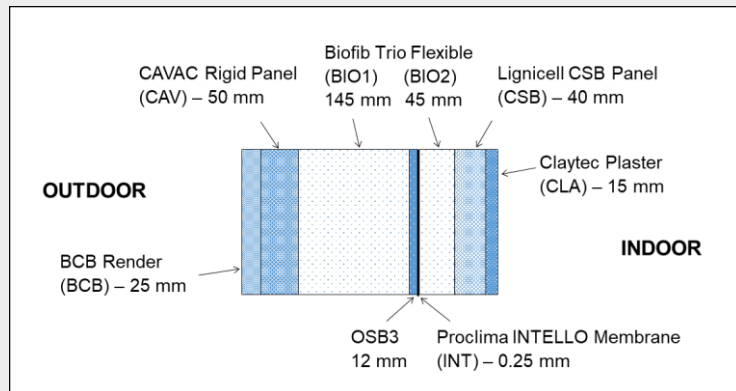
5. Simulation de la sorption : validation du modèle de cinétique locale

- Panneau de chènevotte rigide (CAV), cinétique d'adsorption à l'échelle de l'échantillon



5. Simulation de la sorption : validation du modèle de cinétique locale

- Compilation des constantes de cinétique locale k_0



	k_0 (day ⁻¹ /(kg.m ⁻³))
MHC	2
SHC	0.65
PHC	0.5
BCB	0.0015
CAV	0.3
BIO	10
OSB3	0.25
INT	-
CSB	0.007
CLA	-

$$R_s = k_0 (w_{eq}(\varphi) - w)^2$$

- Modèle cinétique semi-empirique (à l'échelle de l'échantillon :

$$W(t) = \left[W_i + W_f (W_f - W_i) k_0 t \right] / \left[1 + (W_f - W_i) k_0 t \right]$$

→ permet de déterminer k_0 avec une expression analytique au lieu d'utiliser des simulations numériques

6. Simulation du démonstrateur ISOBIO

- démonstrateur HIVE (Wroughton, UK)

→ Mur de référence ISOBIO équipé de capteurs T et HR

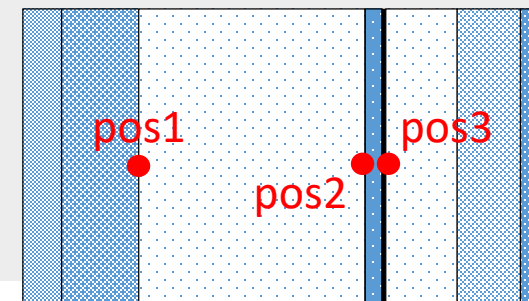
→ Mesures réalisées Durant 18 jours en février 2018



Position des capteurs:

- Dans le démonstrateur
- **pos1** à l'interface CAV/BIO1
- **pos2** à l'interface BIO1/OSB3
- **pos3** à l'interface INT/BIO2
- A l'extérieur du démonstrateur (station météo)

EXT

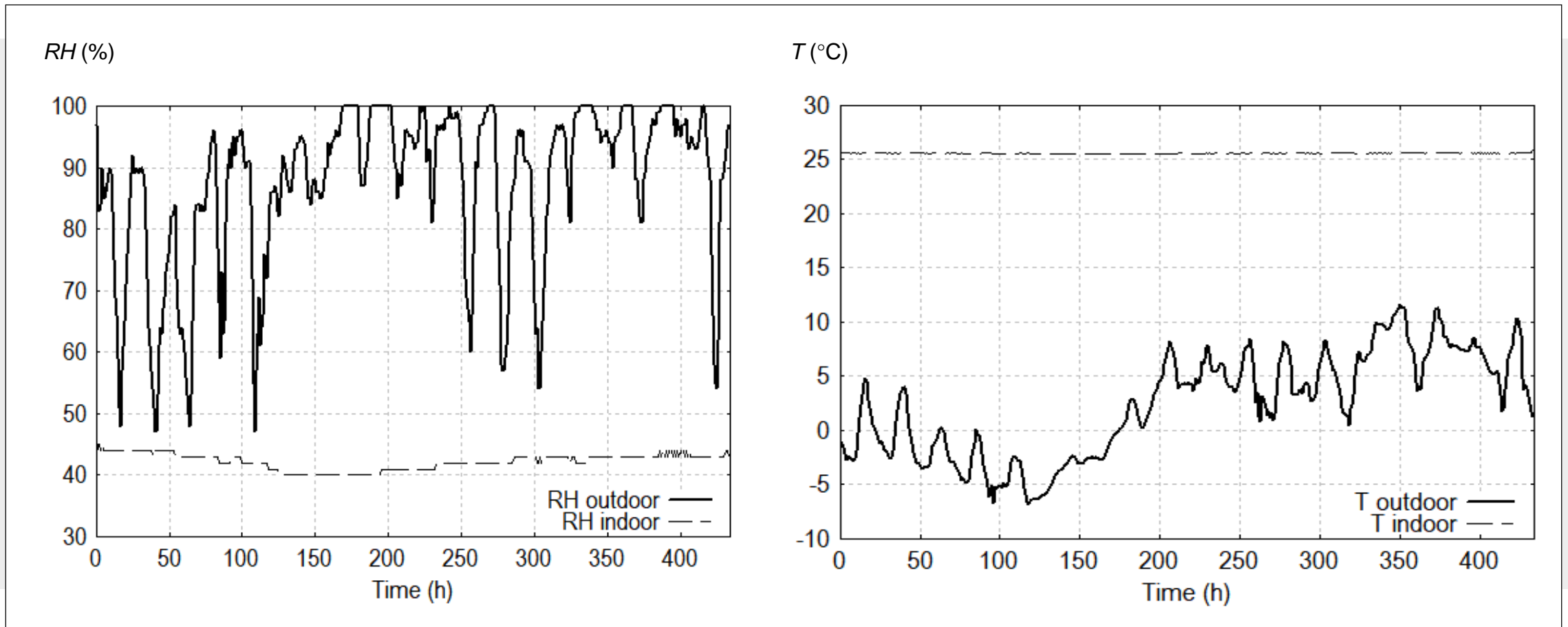


INT

6. Simulation du démonstrateur ISOBIO

- **Conditions aux limites**

→ climat froid et humide – prise en compte des apports solaires (pas de pluie)



6. Simulation du démonstrateur ISOBIO

- **Conditions initiales**

- Etape 1:

- $t = -54$ jours, 80% RH et $T = 10^{\circ}\text{C}$ appliqué dans le mur (à la teneur en eau d'équilibre pour chaque couche)

- Etape 2

- Le mur est soumis à 3 cycles préliminaires de 18 jours de climat:

- cycle P1 = résultats finaux (T, HR) = conditions initiales du cycle suivant

- cycle P2 = résultats finaux (T, HR) = conditions initiales du cycle suivant

- cycle P3 =

- résultats finaux (T, HR) = conditions initiales à $t = 0$ pour les simulations

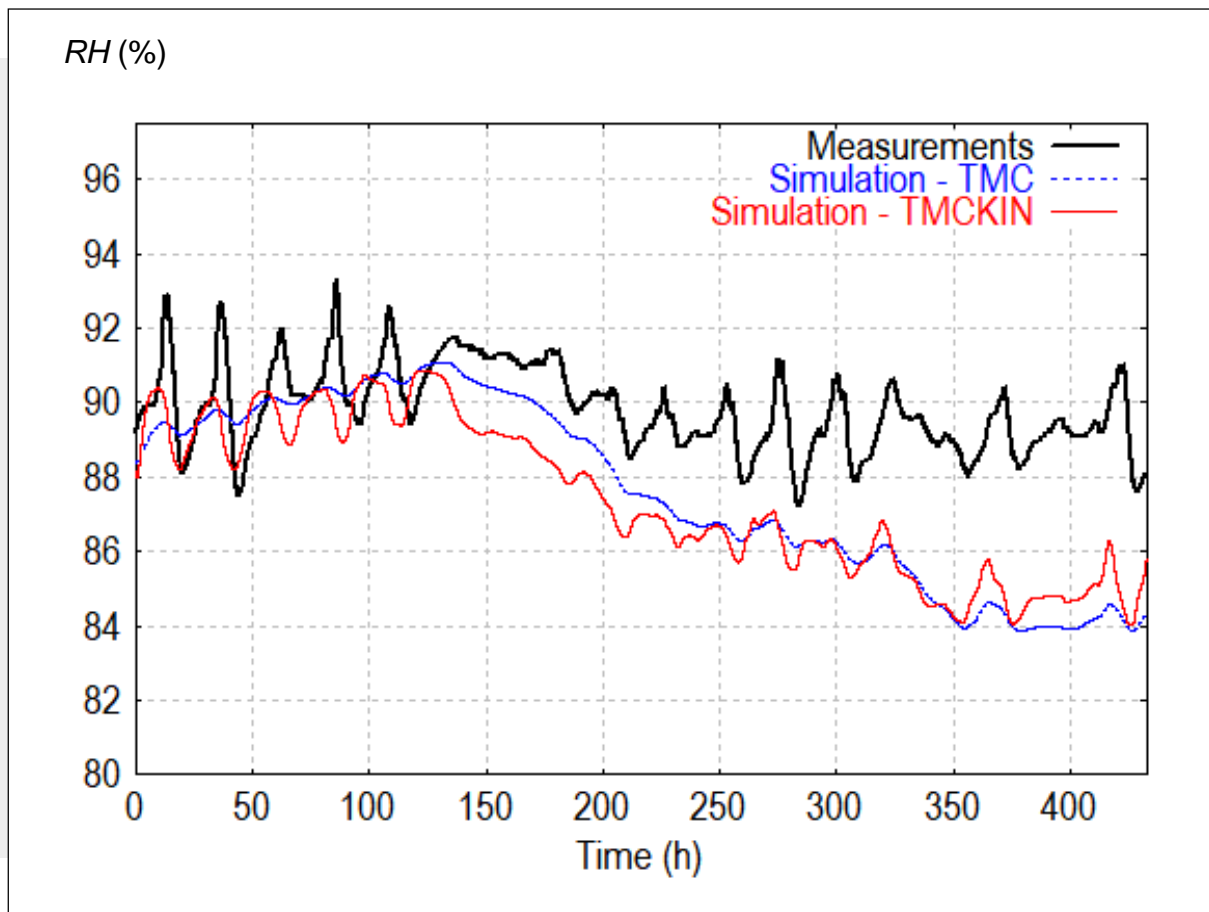
- **Outil numérique**

- Outil 1D Cartésien développé sous Matlab
 - Transferts de masse et de chaleur : approche classique de Kunzel couplée avec la cinétique locale de sorption
 - Effets de la température sur la sorption négligée
 - Pas d'effet d'hystérésis
 - Diffusion liquide négligée

6. Simulation du démonstrateur ISOBIO

- Résultats des simulations

→ TMC basé sur l'approche de Künzel (1D) / TMCKIN basé sur l'approche selon la cinétique locale (1D)



A la pos1 (interface CAV/BIO1):

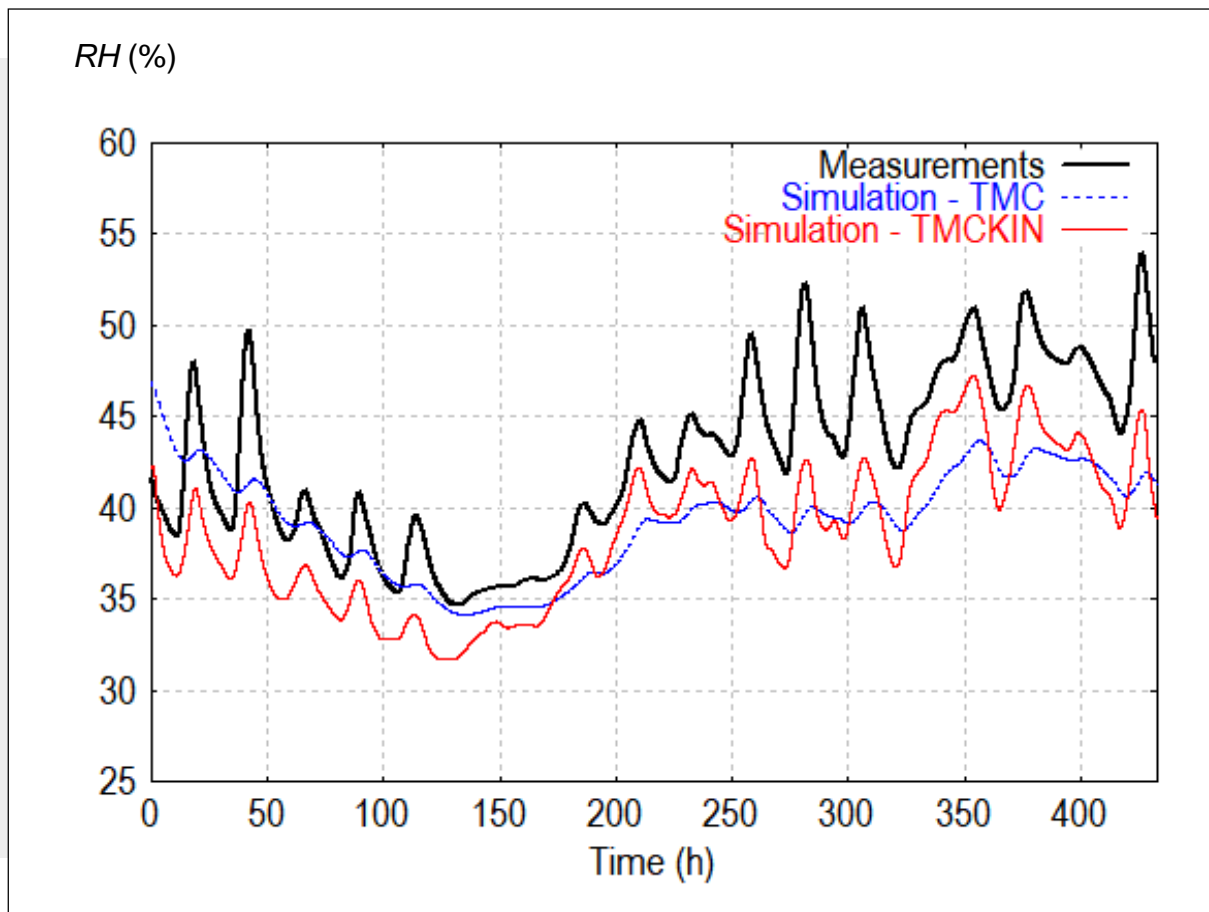
La dynamique du signal HR sur courte période (≈ 10 h) sous-estimée par TMC. Beaucoup mieux prédite par TMCKIN.

→ c'est un effet de la cinétique locale

6. Simulation du démonstrateur ISOBIO

- Résultats des simulations

→ TMC basé sur l'approche de Künzel (1D) / TMCKIN basé sur l'approche selon la cinétique locale (1D)



A la pos2 (interface BIO1/OSB3):

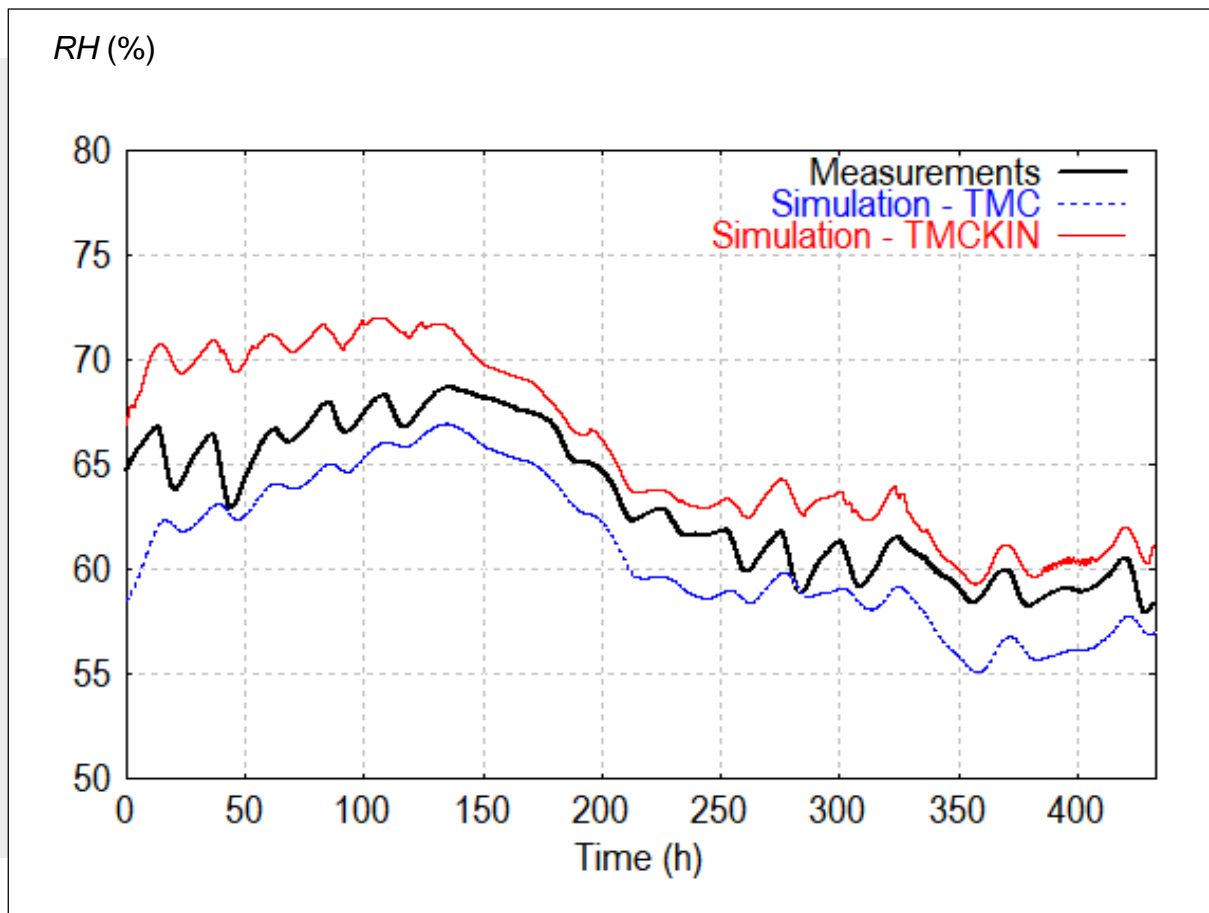
La dynamique du signal HR sur courte période (≈ 10 h) sous-estimée par TMC. Beaucoup mieux prédite par TMCKIN.

→ c'est un effet de la cinétique locale

6. Simulation du démonstrateur ISOBIO

- Résultats des simulations

→ TMC basé sur l'approche de Künzel (1D) / TMCKIN basé sur l'approche selon la cinétique locale (1D)



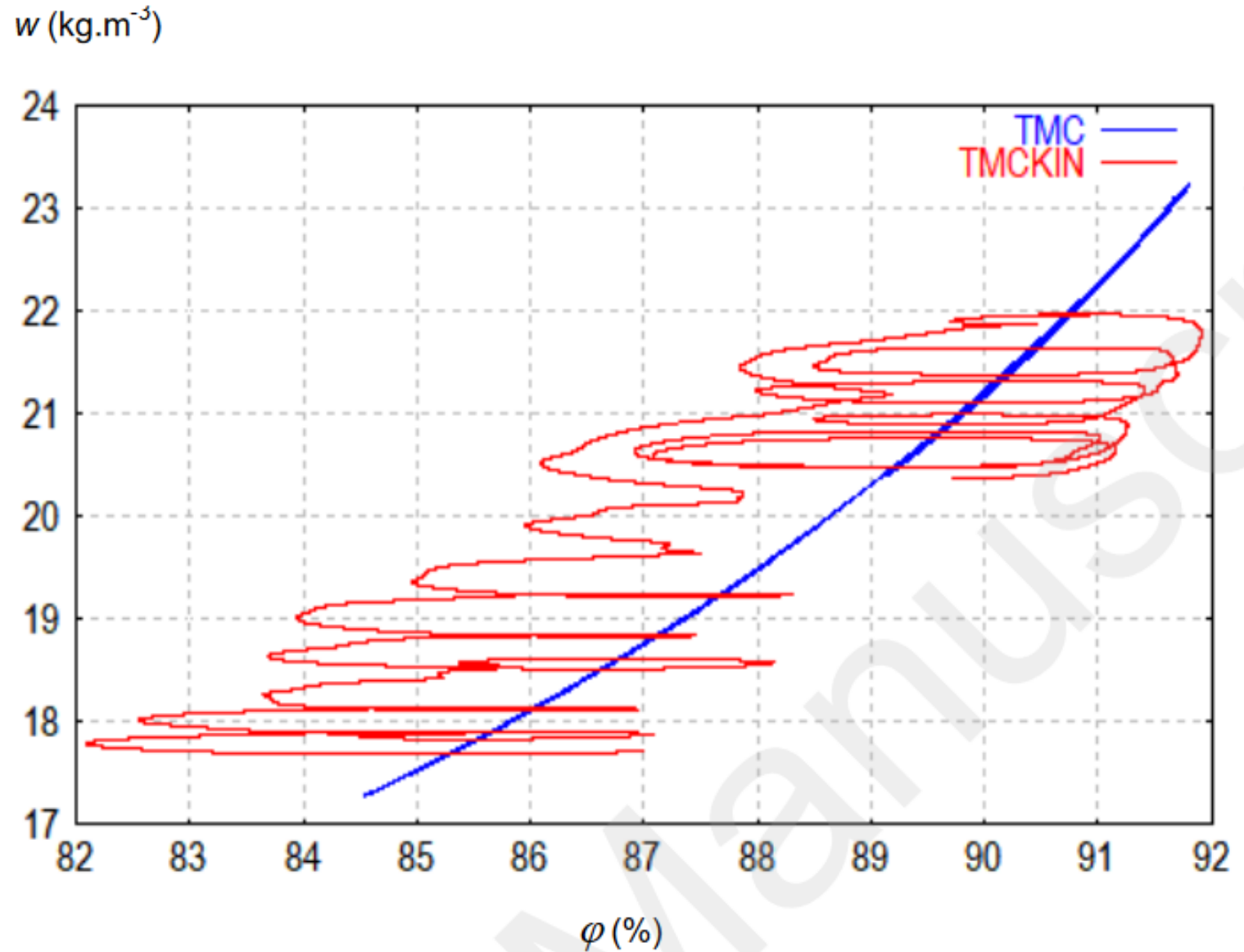
A la pos3 (interface INT/BIO2):

Plus petit impact de la dynamique du signal HR sur courte période, à cette position

→ INT agit comme un filtre vis à vis de la dynamique de HR

7. Conclusions

- Résultats des simulations
→ teneur en eau versus HR



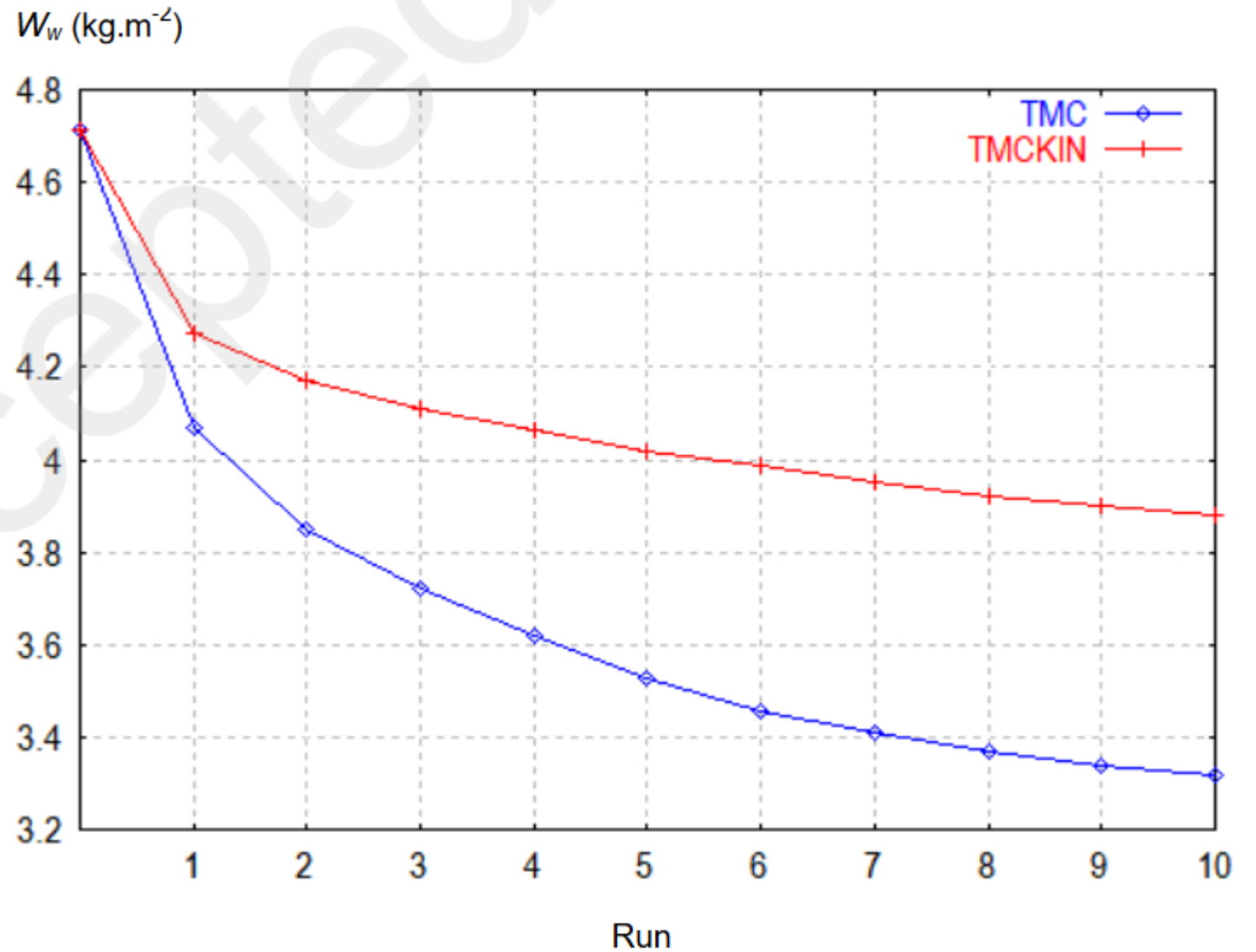
Evolution of local water content w as a function of local relative humidity φ at position 1 during the studied period of time (18 days) – TMC and TMCKIN simulations

7. Conclusions

- Résultats des simulations

→ dérive de la teneur en eau moyenne

→ Influence de l'histoire hygrique



Total water content in the ISOBIO wall predicted after consecutive runs – TMC and TMCKIN simulations

7. Conclusions

- La classique approche selon Künzel est invalidée
- La nouvelle approche basée sur la cinétique locale de sorption est validée pour plusieurs matériaux
 - est ce un caractère universel (au moins pour les matériaux biosourcés)?
- L'effet de la cinétique locale sur la dynamique du signal HR sur courte période (≈ 10 h) a été mis en évidence et est en accord avec les enregistrements produits sur le mur démonstrateur
- L'écart léger entre le signal UR expérimental et numérique, lié aux conditions initiales fixées
 - influence de l'histoire hydrique vécue par le matériau
- Couplage cinétique – hystérésis = complexe sur le plan numérique mais affine les résultats

• Références

Collet et al., Energy and Buildings 2013, ICBBM 2019

Reuge et al., Transp. in porous med., 2019

Ait Oumeziane et al., Transport In Porous Media, 2014 103, 515-533

Collet et al., 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials, June 26th -28th 2019

Reuge et al., Construction and Building Materials, 2020