

L'eau et la terre

Régulation de l'hygrométrie



© Nicolas Meunier



© Erwan Hamard

Antonin Fabbri, chercheur au LTDS – site de l'ENTPE

avec la participation de **Fionn McGregor**, **Henry Wong** et **Stéphane Cointet**

L'eau et la terre

Régulation de l'hygrométrie *et comportement hygromécanique*



© Nicolas Meunier



© Erwan Hamard

Antonin Fabbri, chercheur au LTDS – site de l'ENTPE

avec la participation de **Fionn McGregor**, **Henry Wong** et **Stéphane Cointet**

Presentation de l'ENTPE



Presentation de l'ENTPE

Quelques points clés....

- Ecole d'ingénieurs publique créée en 1953
- Sous tutelle du MTES (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire)
- Domaines : Bâtiments, travaux publics, transports, environnement , politiques urbaines, analyse et prévention des risques
- 200 à 250 étudiants par an, dont la moitié de fonctionnaires

➤ **Thème de recherche important depuis 1982**

➤ **Activités**

Recherche scientifique sur les comportements mécanique, (hygro)thermique, sismiques, acoustiques

Participation à la rédaction de normes et de guides de recommandation

Participation à des comités nationaux et internationaux

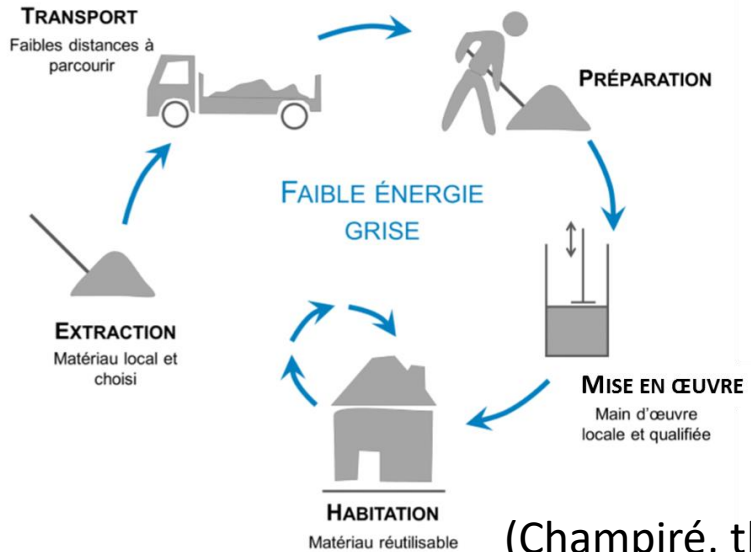
Equipe actuelle LTDS :

Technicien référent : Stéphane Cointet: stephane.cointet@entpe.fr

Chercheurs : *Site de l'ENTPE*: Antonin Fabbri (mécanique, hygrothermie)
Fionn McGregor (hygrothermie, QAI)
Henry Wong (mécanique)
Rudy Bui (hygrothermie, physique du bâtiment)
Stéphane Hans (mécanique, dynamique)
Site de l'ECL: Eric Vincens (mécanique)
Elise Contraire (phénomènes de surface)

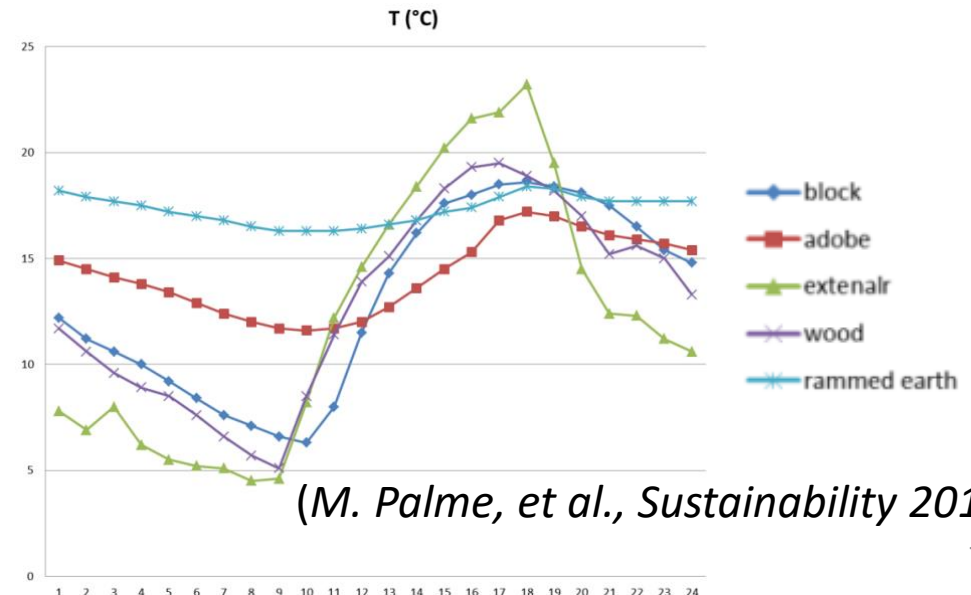
Doctorants : Noha Al Haffar (optimisation de la stabilisation de la terre) avec l'ATILH
Thibaud Maufré (phénomènes de surface) avec l'ECL
Lassana Traoré (Comportement au gel-dégel - expérimental) avec l'ETS
Youneng Liu (Comportement au gel-dégel – modélisation) avec le CSC
Xin Li (Hydro-thermo-mécanique cyclique) avec le CSC

Construire en terre ?

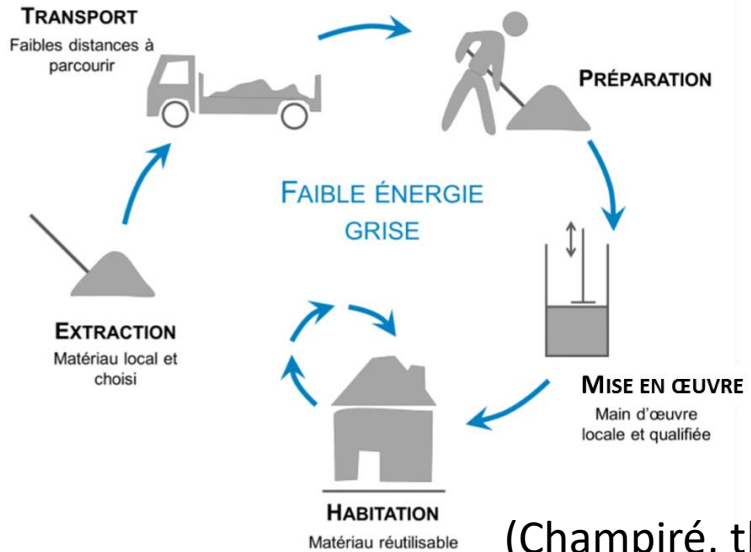


(Champiré, thèse, 2017)

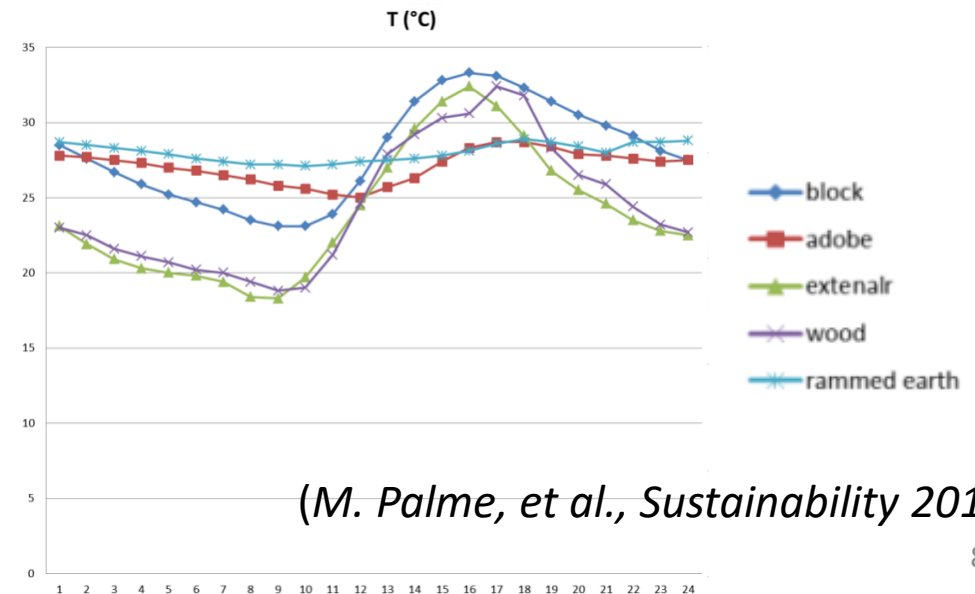
Maison en pisé au Chili – Période hivernale



Construire en terre ?



Maison en pisé au Chili – Période estivale



MAIS

Limites du matériau



Exemple du tremblement de terre de 2003 en Iran
“no more mud” BBC news.

http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/middle_east/3363125.stm

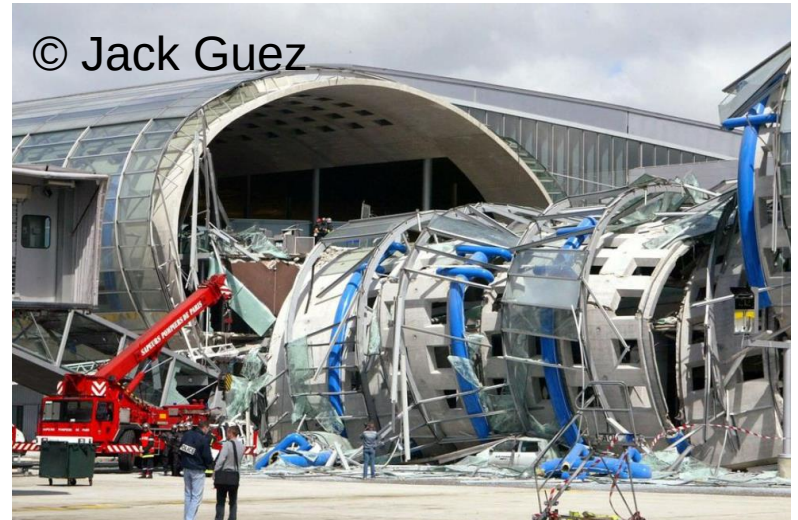
Le matériau terre est-il le problème ?



Citadelle de Bam, avant et après le tremblement de terre (Wikipedia)



Pont Morandi (Gênes, Italie), avant effondrement en in 2018 (google map).



© Jack Guez

CDG terminal 2E (2004, France)

Non, le matériau terre n'est pas le problème !

Comme tout matériaux de construction,
Le matériau terre est *durable* si :

- Les constructions sont dimensionnées correctement
- Le matériau correctement implémenté,
- Les opérations de maintenance et de réhabilitation sont réalisées correctement, en adéquation avec les spécificités du matériau

Besoin de quantifier les limites et les atouts du matériaux en tenant compte de ses spécificités

- Variabilité des procédures de mise en œuvre
- **Hétérogénéité du matériau**
- **Impact de l'eau (liquide et vapeur)**



Le matériau terre nécessite une réglementation spécifique appropriée pour sa mise en œuvre et sa maintenance, ainsi que des tests spécifiques pour évaluer ses performances et sa durabilité

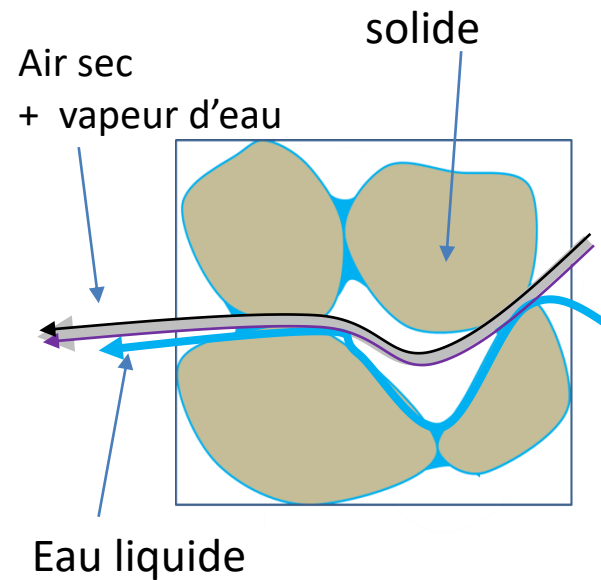
Partie 1



***Comportements thermiques et
hygrothermiques***

Matériau hygroscopique

?



Matériau hygroscopique

Peut réguler passivement l'hygrométrie intérieure

➤ Perméable

$$\mu = \frac{\text{Coefficient de diffusion dans l'air}}{\text{Coefficient de diffusion dans le matériau}} = \frac{\delta_a}{\delta_p}$$

Matériau	μ [-]
Béton	50 ~ 200
Enduit ciment	15 ~ 50
Plaque de plâtre	10 ~ 15
BTC	5 ~ 15
Enduit terre	5 ~ 15
Béton de chanvre	3 ~ 10
Laine minérale	1 ~ 5
Laine végétale	1 ~ 3

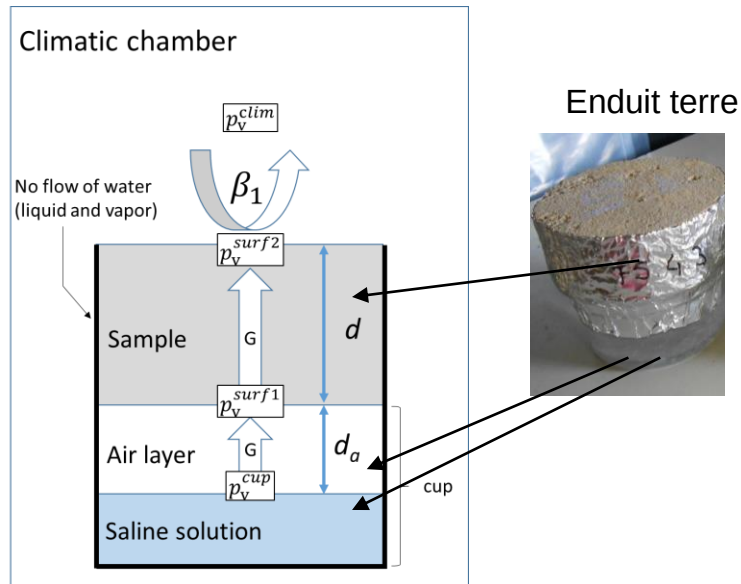
$s_d = \mu d \longrightarrow$ Épaisseur de la couche d'air équivalente en régime permanent sous sollicitations constantes

➡ Comment mesurer ce paramètre

Essai de la coupelle humide (sans effet de masque)

$$\delta_p^* = \frac{G d}{A \times (p_v^{\text{cup}} - p_v^{\text{clim}}) - \frac{G d_a}{\delta_a}}$$

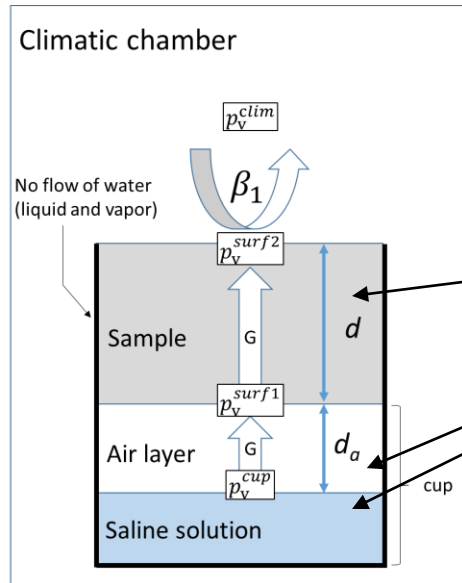
$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$$



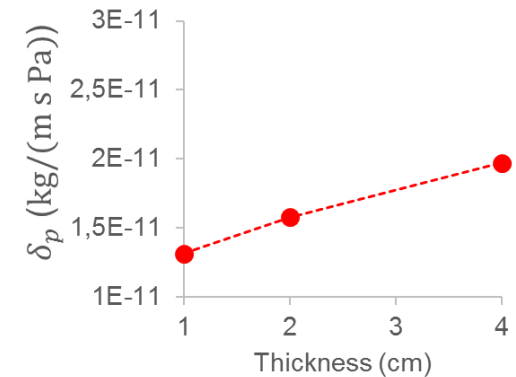
Essai de la coupelle humide (sans effet de masque)

$$\delta_p^* = \frac{G d}{A \times (p_v^{\text{cup}} - p_v^{\text{clim}}) - \frac{G d_a}{\delta_a}}$$

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta_p}$$

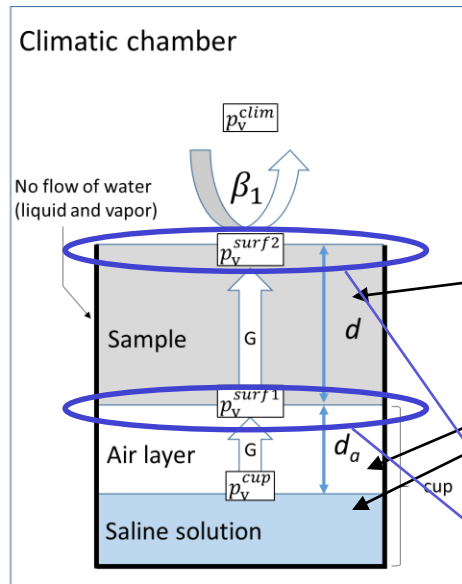


Enduit terre



Essai de la coupelle humide (sans effet de masque)

$$\delta_p^* = \frac{G d}{A \times (p_v^{\text{cup}} - p_v^{\text{clim}}) - \frac{G d_a}{\delta_a}} \longrightarrow \delta_p = \frac{G d}{A \times (p_v^{\text{cup}} - p_v^{\text{clim}}) - \frac{G}{\beta^*}}$$



Enduit terre

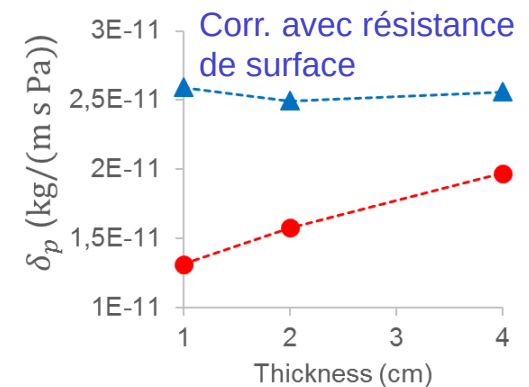


Coefficient d'échange convectif

$$\beta^* = \alpha \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{d_a}{\delta_a} \right)^{-1}$$

Coefficient de surface

Résistance de surface

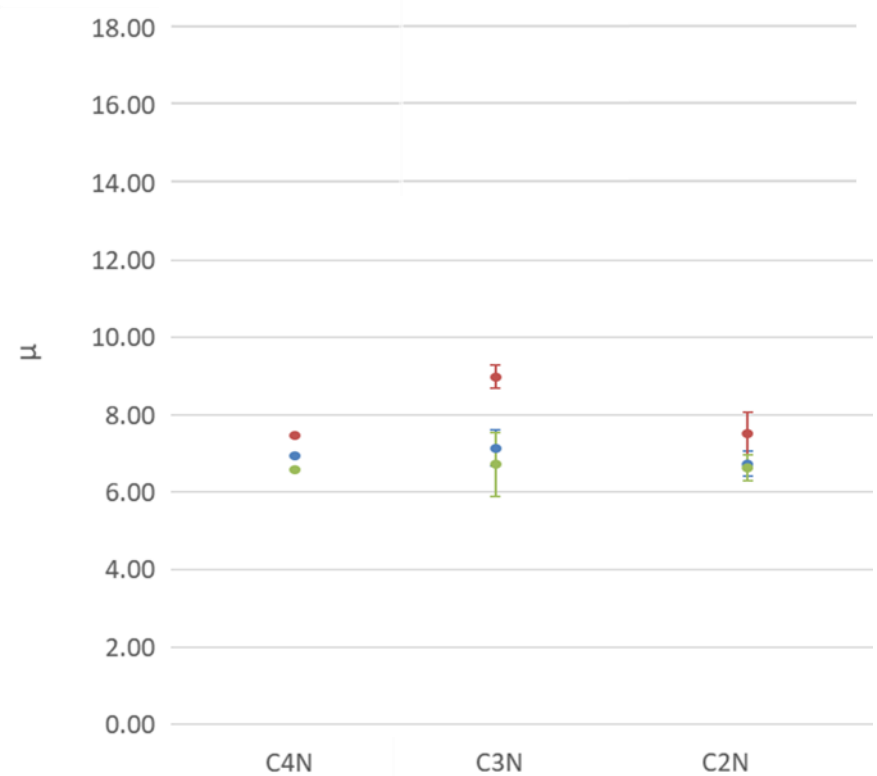
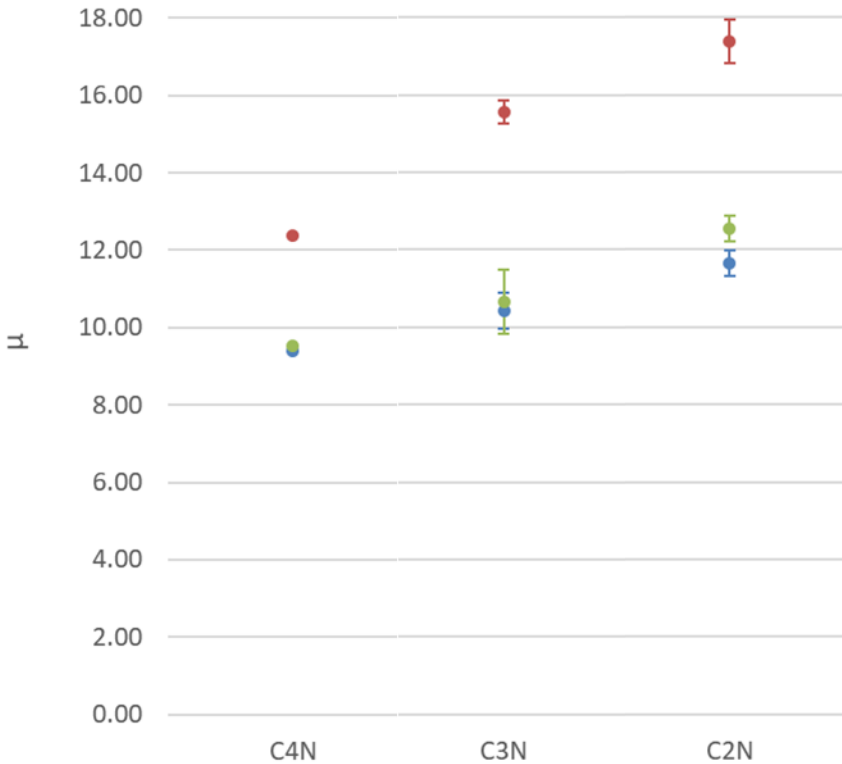




● Enceinte type 1

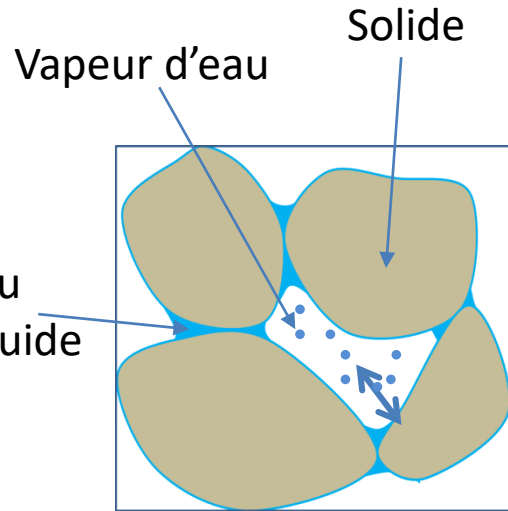
● Enceinte type 2

● Enceinte type 3



$$\delta_p^* = \frac{G d}{A \times (p_v^{\text{cup}} - p_v^{\text{clim}}) - \frac{G d_a}{\delta_a}}$$

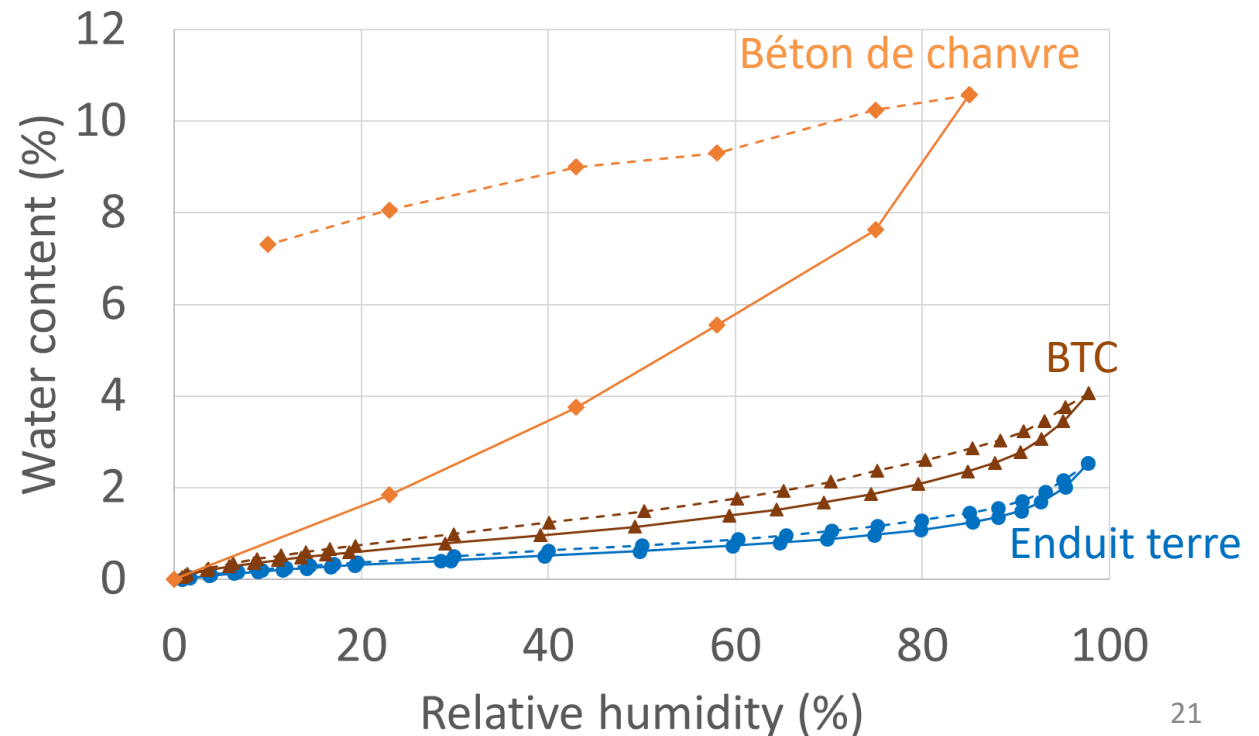
$$\delta_p = \frac{G d}{A \times (p_v^{\text{cup}} - p_v^{\text{clim}}) - \frac{G}{\beta^*}}$$



Matériau hygroscopique

Peut réguler passivement l'hygrométrie intérieure

- Perméable
- Bonnes propriétés de sorption



Conservation de la masse d'eau (isotherme):

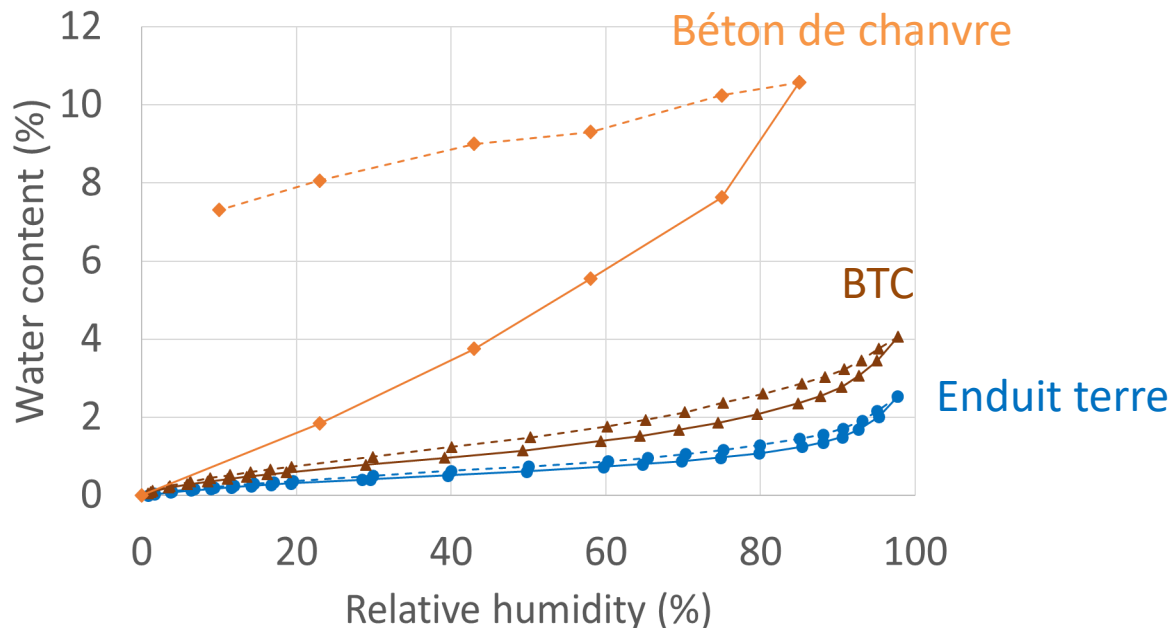
Variation de la masse d'eau = flux d'eau qui sort moins flux d'eau qui entre

$$\frac{\partial(\rho_d w)}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = \text{div}(\underline{j_v} + \underline{j_L})$$

MVA sèche : $\rho_d = \frac{m_{sec}}{V}$

Teneur en eau : $w = \frac{m - m_{sec}}{m_{sec}}$

Importance de la
cohérence des méthodes
utilisées pour estimer les
différentes masses sèches



Conservation de la masse d'eau (isotherme):

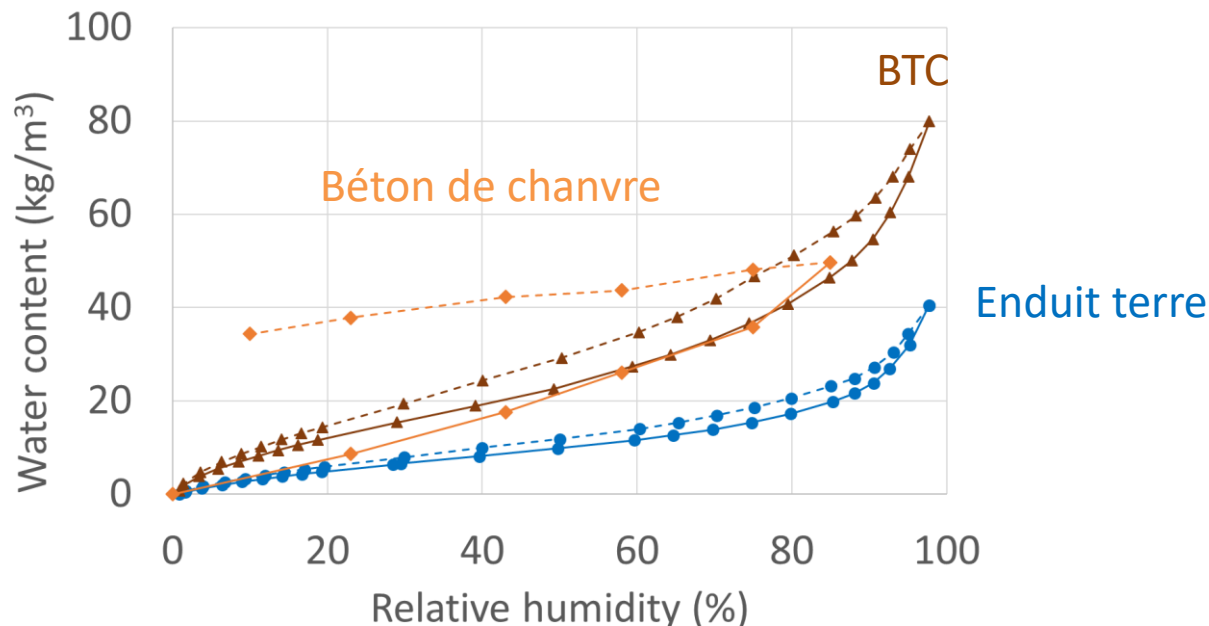
Variation de la masse d'eau = flux d'eau qui sort moins flux d'eau qui entre

$$\frac{\partial(\rho_d w)}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = \text{div}(\underline{j_v} + \underline{j_L})$$

MVA sèche : $\rho_d = \frac{m_{sec}}{V}$

Teneur en eau : $w = \frac{m - m_{sec}}{m_{sec}}$

Importance de la cohérence des méthodes utilisées pour estimer les différentes masses sèches



Conservation de la masse d'eau (isotherme):

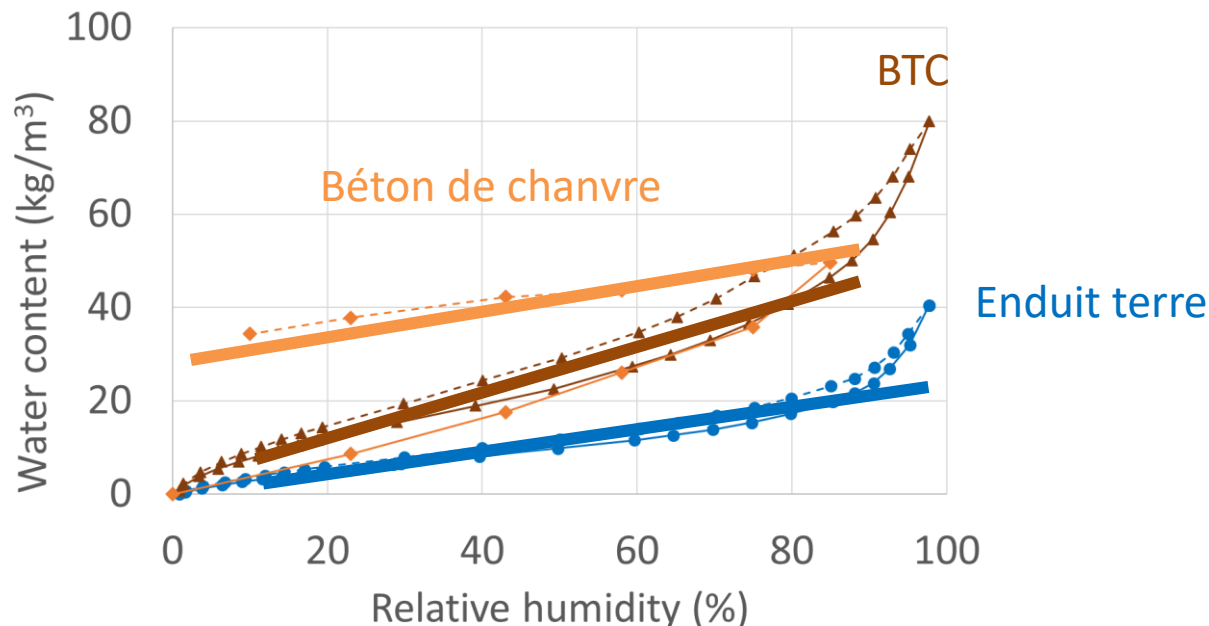
Variation de la masse d'eau = flux d'eau qui sort moins flux d'eau qui entre

$$\xi \left(\frac{\partial(\rho_d w)}{\partial HR} \right) \frac{\partial HR}{\partial t} = \text{div}(\underline{j_v} + \underline{j_L})$$

MVA sèche : $\rho_d = \frac{m_{sec}}{V}$

Teneur en eau : $w = \frac{m - m_{sec}}{m_{sec}}$

Importance de la cohérence des méthodes utilisées pour estimer les différentes masses sèches



Les capacités hydriques des matériaux terres sont dans la même gamme que celles des matériaux biosourcés

➤ Quantification du potentiel hygroscopique

Essai dynamique : **Moisture Buffering Value (MBV)**

Conditions extérieure : 10°C et 80% HR (Automne/hiver)

Hors source d'humidité intérieure

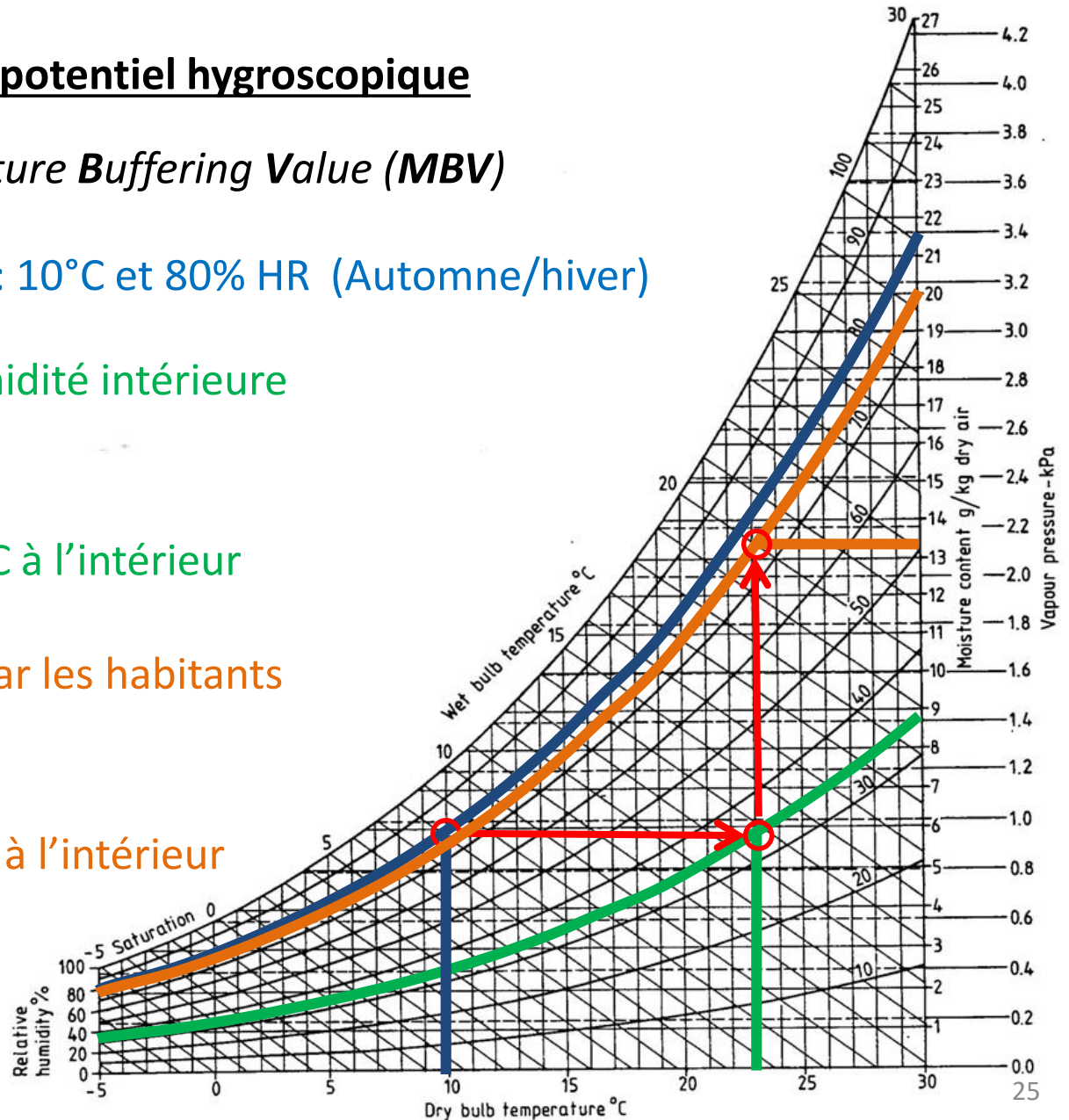


33%RH pour 23°C à l'intérieur

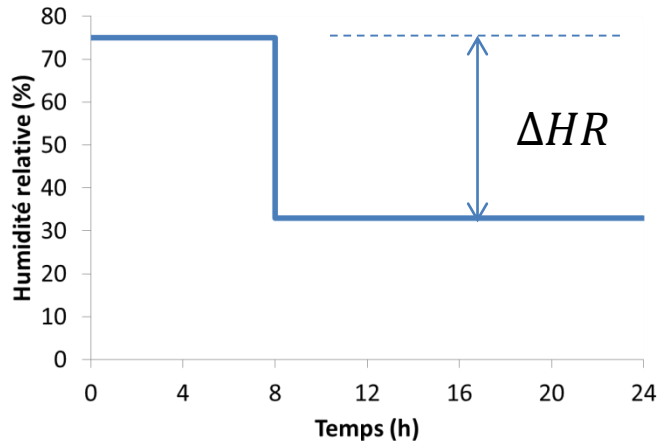
Humidité induite par les habitants



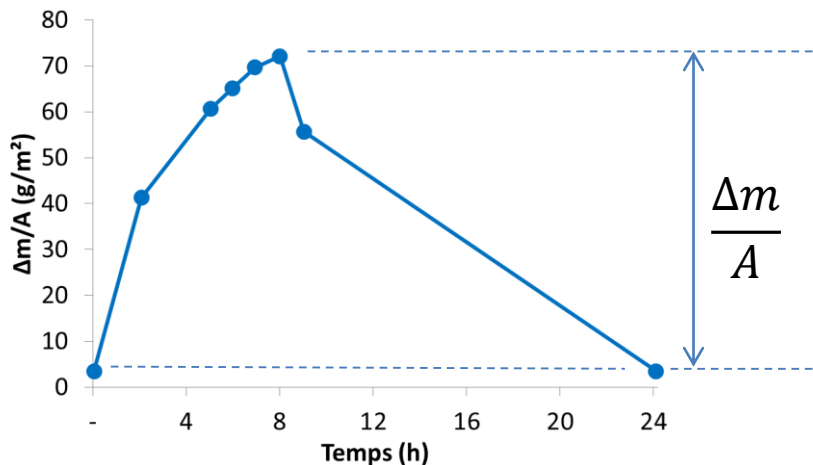
75%RH pour 23°C à l'intérieur



Essai de sorption-desorption dynamique : **Moisture Buffering Value (MBV)**



$$MBV = \frac{\Delta m}{A \Delta HR}$$



Béton,
terre cuite

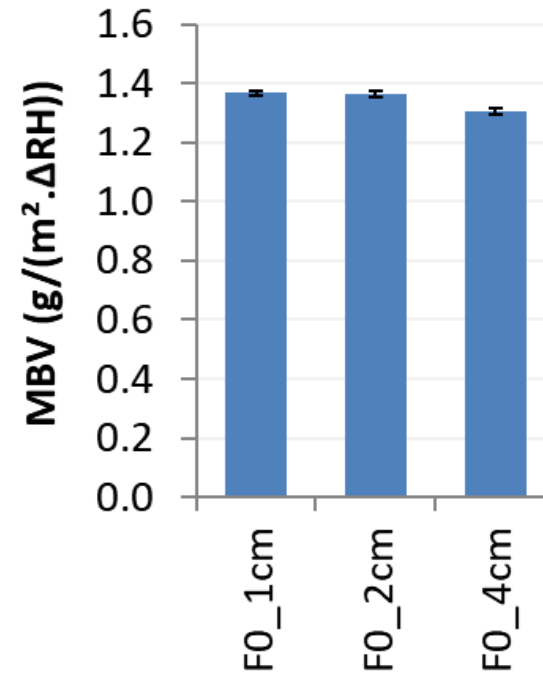
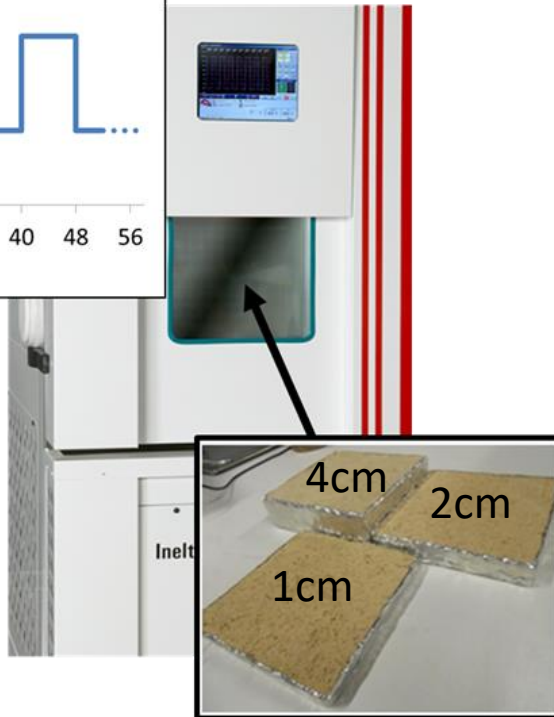
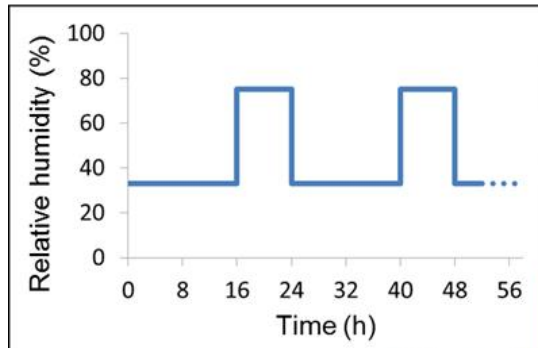
Béton cellulaire

Terre crue

Biosourcés

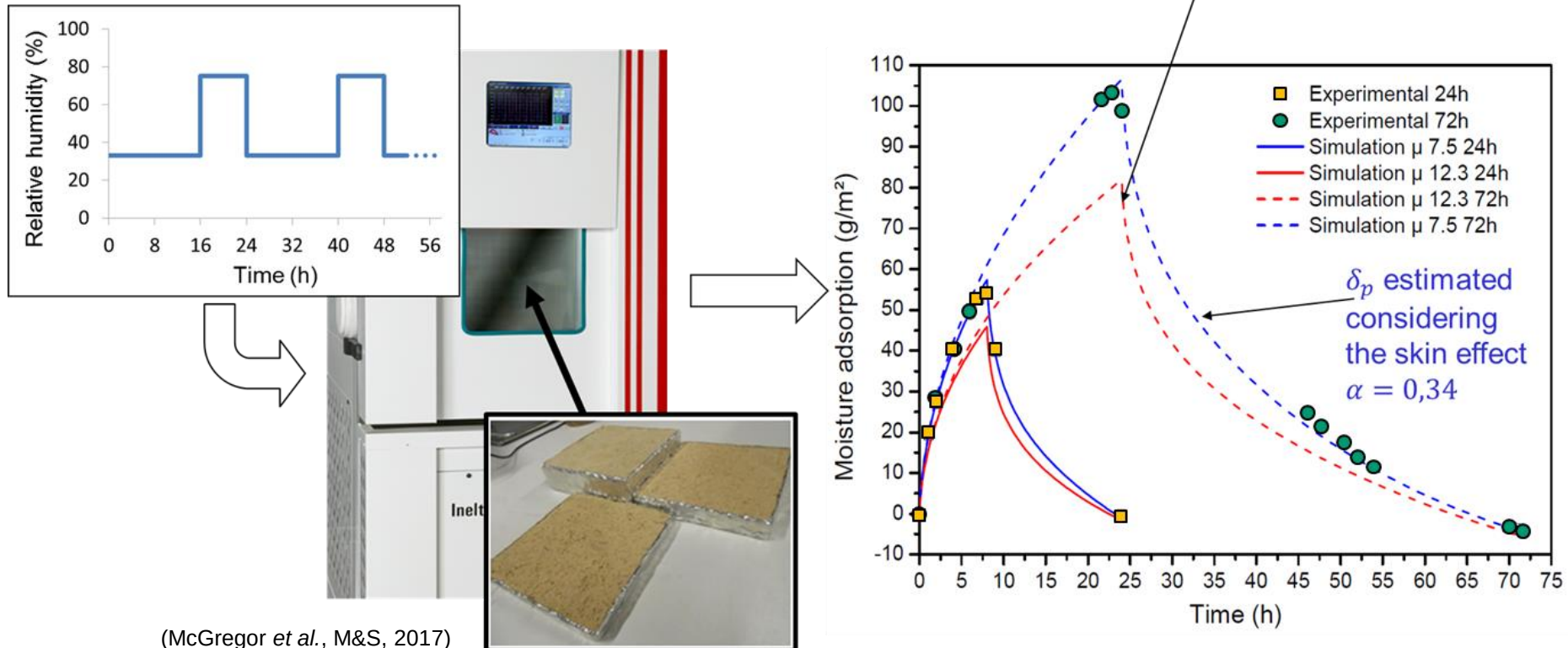
Classes de MBV d'après (Rode et al. 2005)

MBV [$g/(m^2 \cdot \%RH)$]	Classification
0-0,2	Négligeable
0,2-0,5	Limité
0,5-1,0	Modéré
1,0-2,0	Bon
>2,0	Excellent



Seuls les premiers centimètres jouent dans les phénomènes de tampon hygroscopiques journaliers

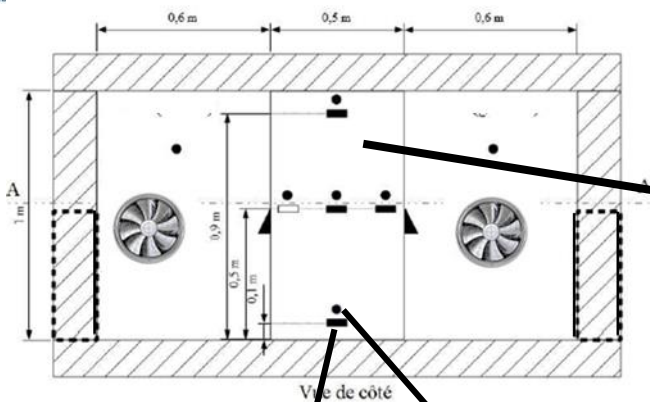
➤ Modélisation du comportement hygroscopique

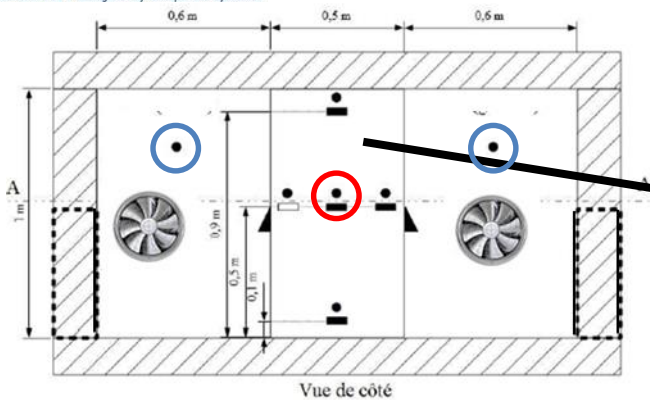


(McGregor *et al.*, M&S, 2017)

Comportement **HygroThermique**

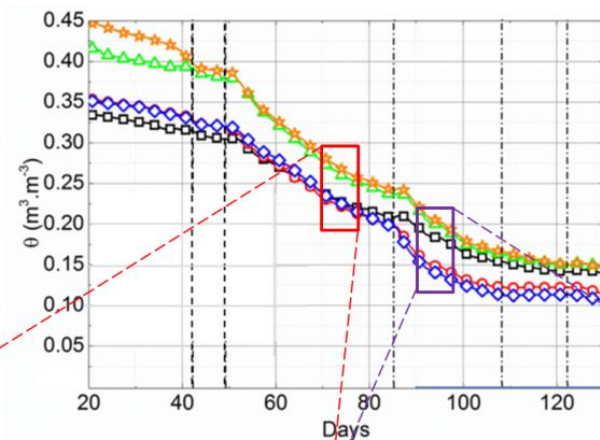
Couplage entre les échanges de
masse d'eau et de **chaleur**



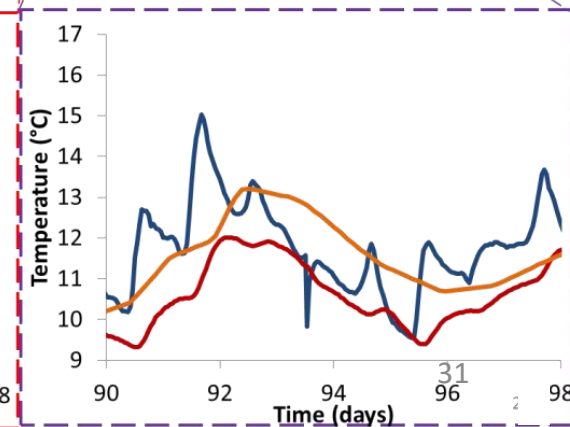
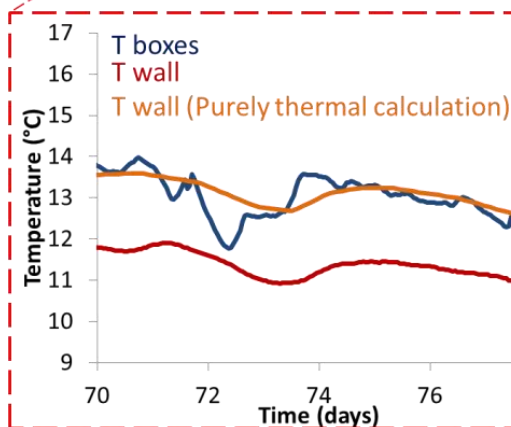


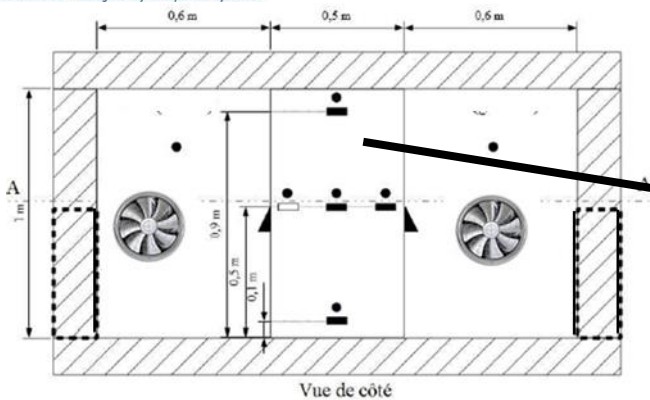
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - (C_G \underline{\omega}_G + C_L \underline{\omega}_L) \cdot \nabla T$$

Natural drying conditions



Forced drying conditions

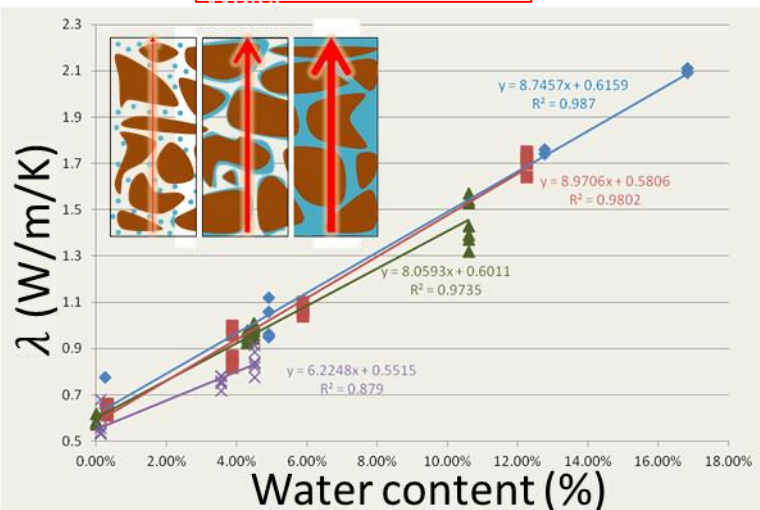




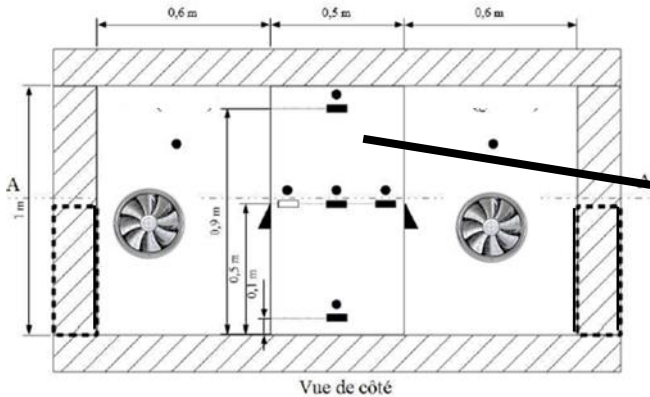
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - (C_G \omega_G + C_L \omega_L) \cdot \nabla T$$

Conductivité thermique

$$\lambda \approx A w + \lambda_d$$



Material	λ_d [W/(m.K)]
Béton	1.5 ~ 2
BTC	0.5 ~ 1.5
Béton de chanvre	0.05 ~ 0.15
Laine minérale	0.03 ~ 0.05

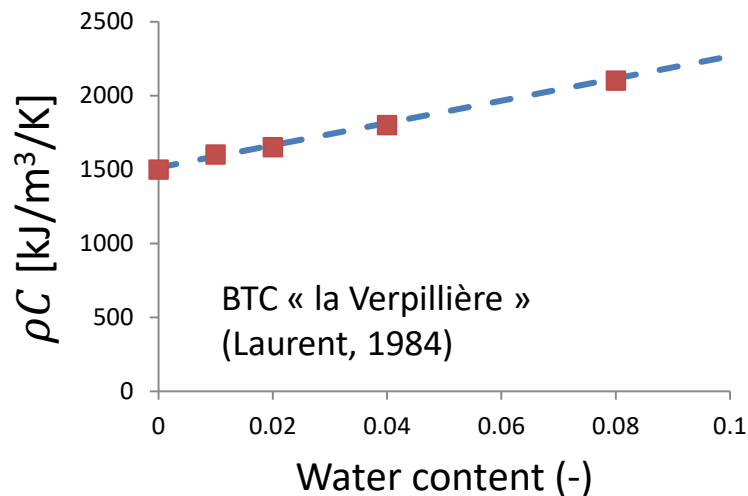


$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - (C_G \omega_G + C_L \omega_L) \cdot \nabla T$$

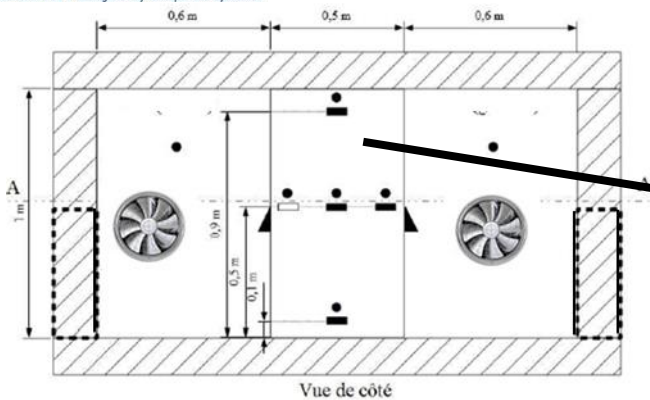
Capacité thermique

$$\rho C \approx \rho C_d + \rho_d w c_L$$

c_L : Capacité thermique spécifique de l'eau
 $c_L \approx 4200 \text{ J/kg/K}$



Material	ρC_d [kJ/(m³.K)]
Béton	1500 ~ 2500
BTC	1300 ~ 1700
Béton de chanvre	400 ~ 800
Laine minérale	25 ~ 50



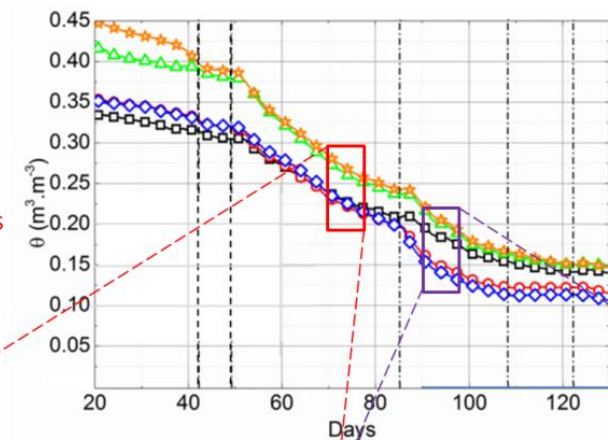
Test sur un mur en pisé...



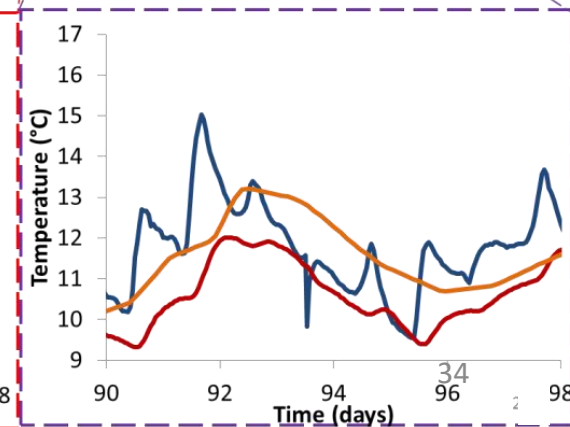
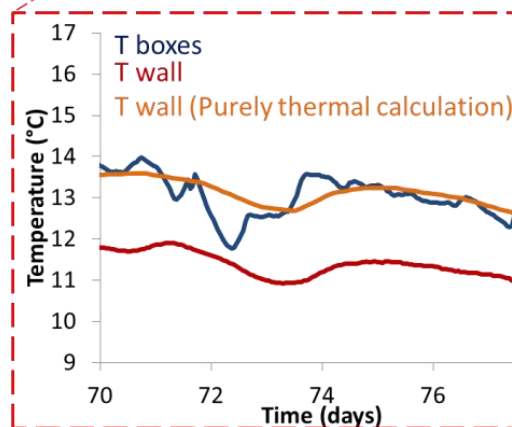
...dans une double enceinte climatique

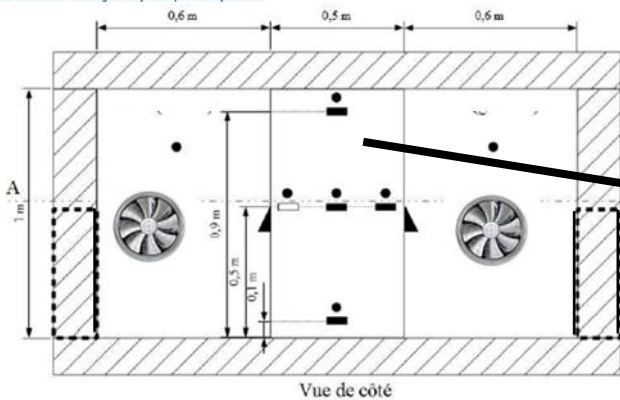
$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - (C_G \underline{\omega}_G + C_L \underline{\omega}_L) \cdot \nabla T$$

Natural drying conditions



Forced drying conditions





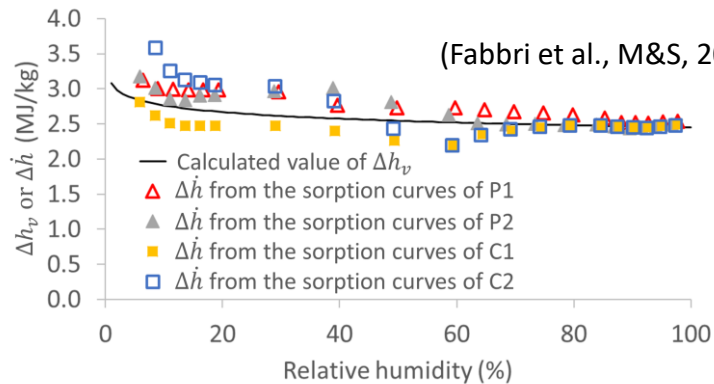
Test sur un mur en pisé...



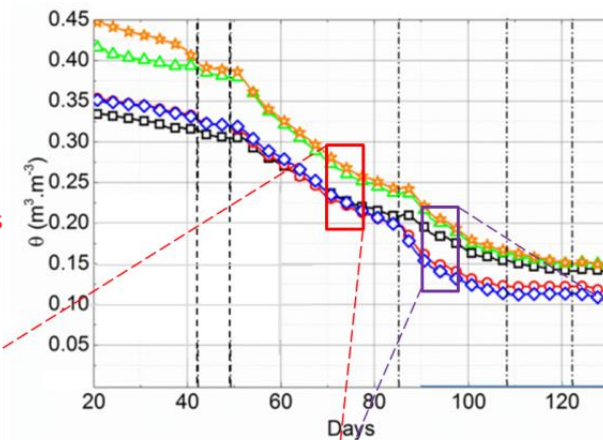
...dans une double enceinte climatique

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - (C_G \underline{\omega}_G + C_L \underline{\omega}_L) \cdot \nabla T - \Delta h_v \dot{m}_{\rightarrow v}$$

Enthalpie de désorption

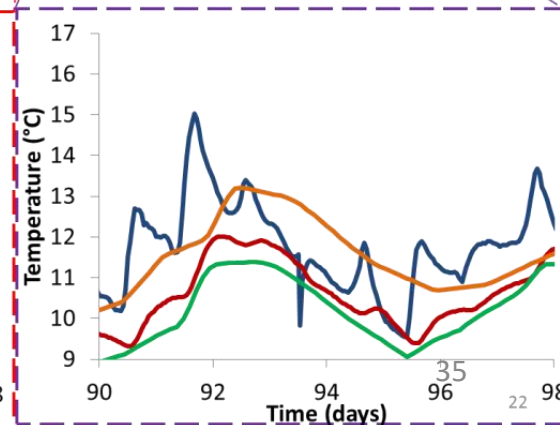
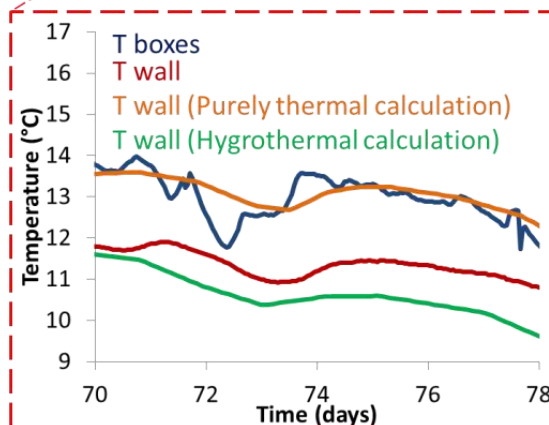


Natural drying conditions



Forced drying conditions

Impact sur le comportement thermique d'un bâtiment ?



Partie 2

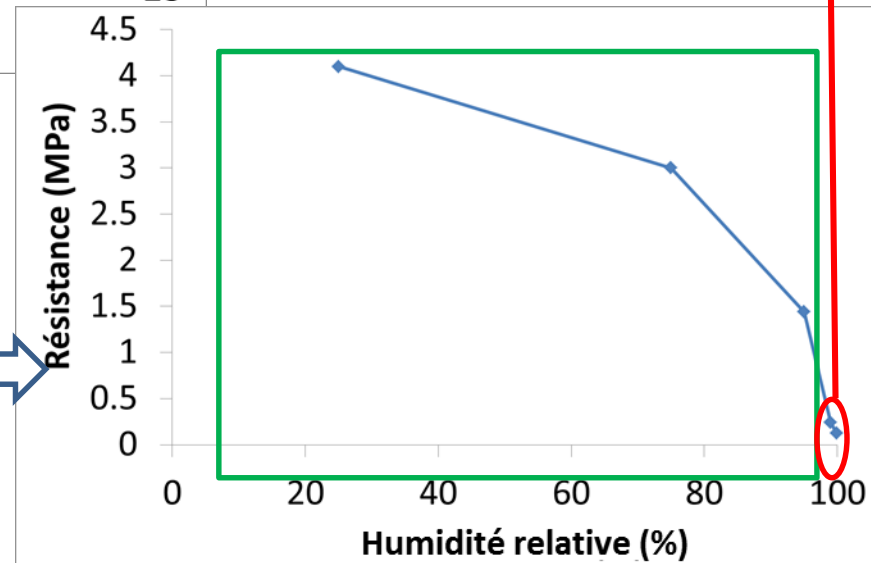
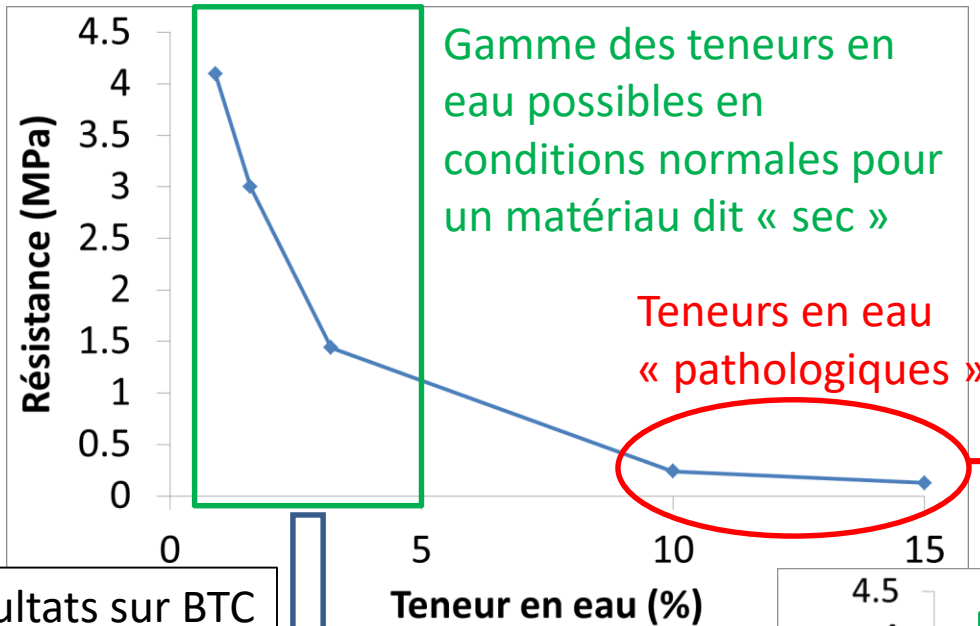


© R. El Nabouch (LOCIE)

Comportement Hydromécanique

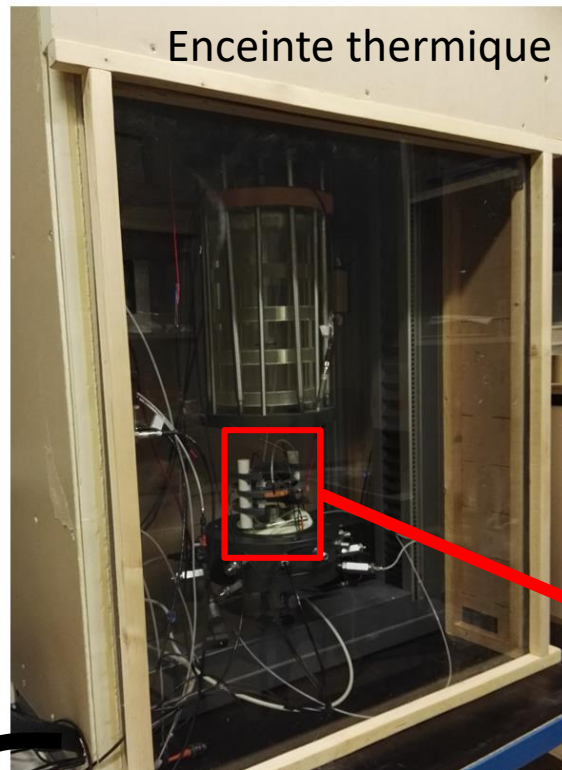
➤ Lien teneur en eau et humidité relative

- ✓ Problèmes d'effondrement au mouillage bien connus en géotechnique



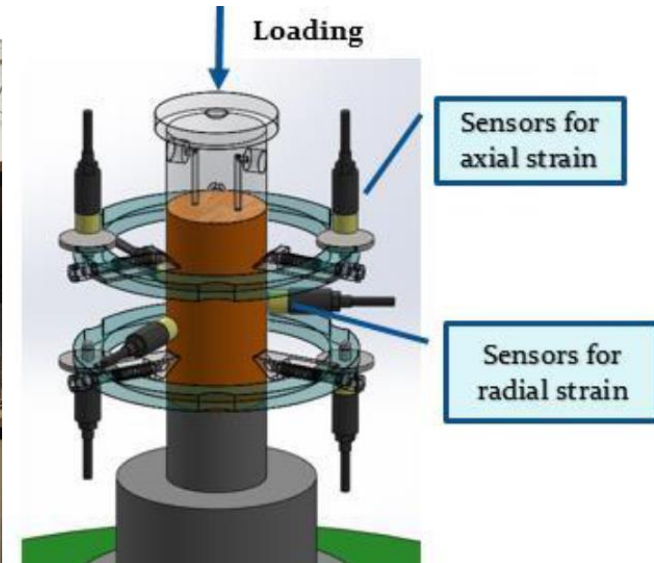
Mise au point d'une cellule triaxiale à HR/T contrôlées

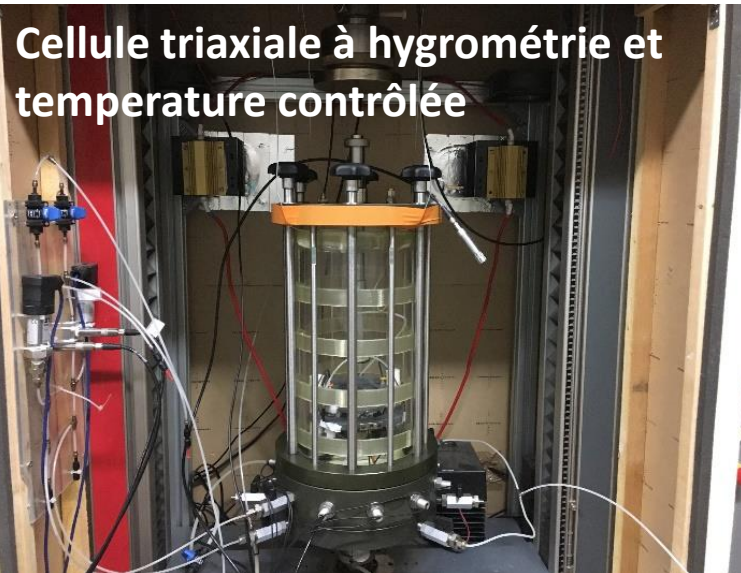
Générateur d'eau à
hygrométrie et
température contrôlées



Débit d'air de 5mL/min
à 200 mL/min

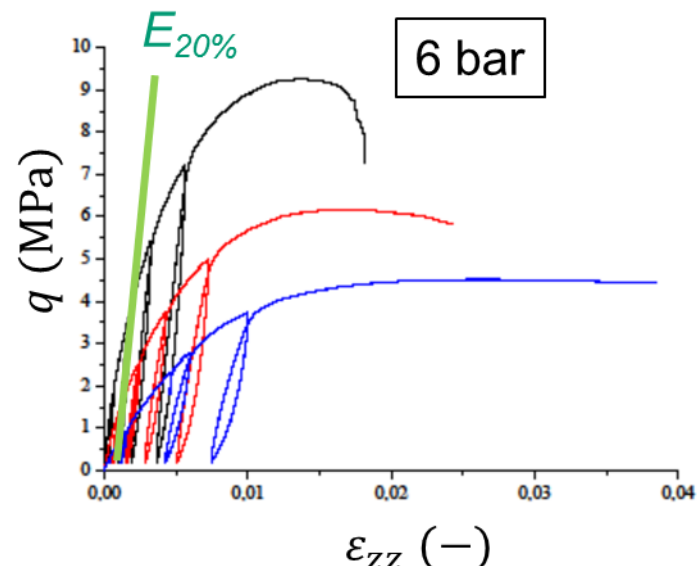
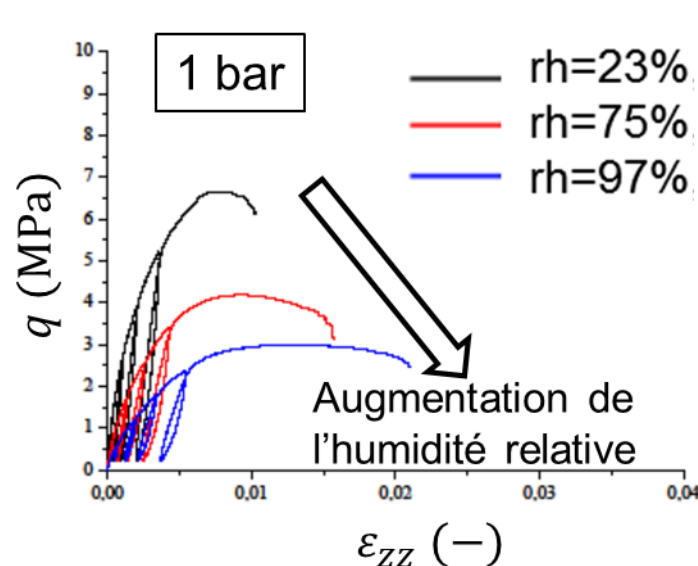
HR de 0% to 95%
T de 25°C to 40°C





Variation de la contrainte effective suivant 2 approches :

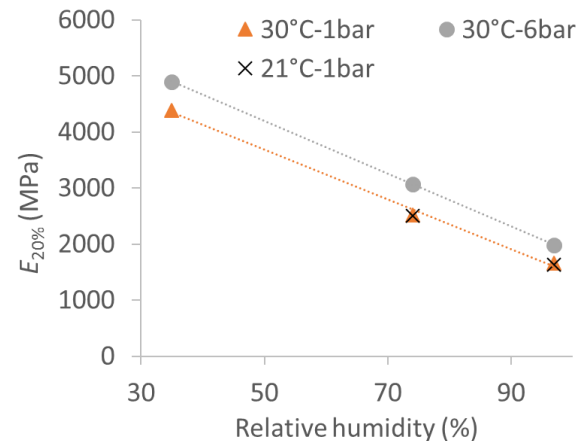
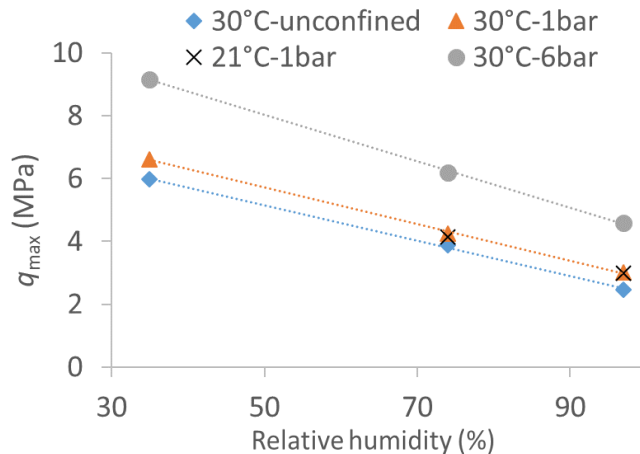
- Variation de la pression de confinement
- Variation de l'humidité relative de l'air



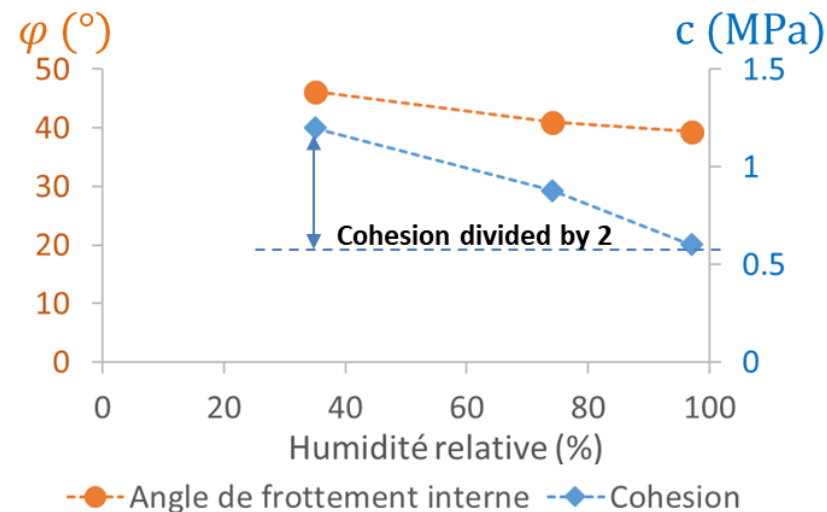
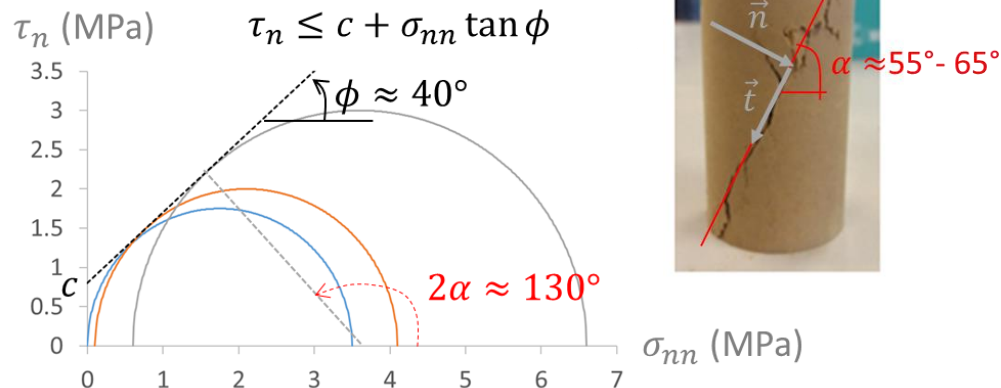
(F. Champiré, Thèse de doctorat ENTPE, 2017)

Résultats des essais triaxiaux sur des échantillons de terre

➤ Impact de l'humidité relative et de la pression de confinement

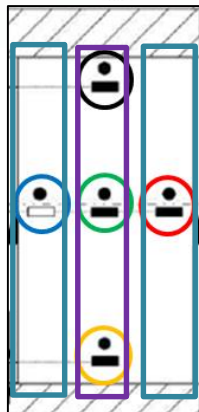
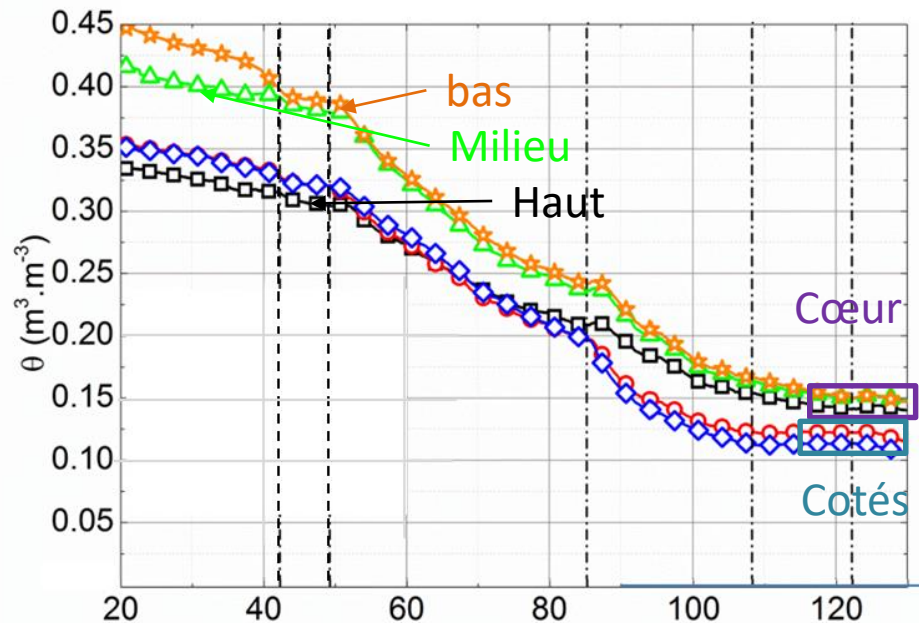


➤ Critère de Mohr-Coulomb



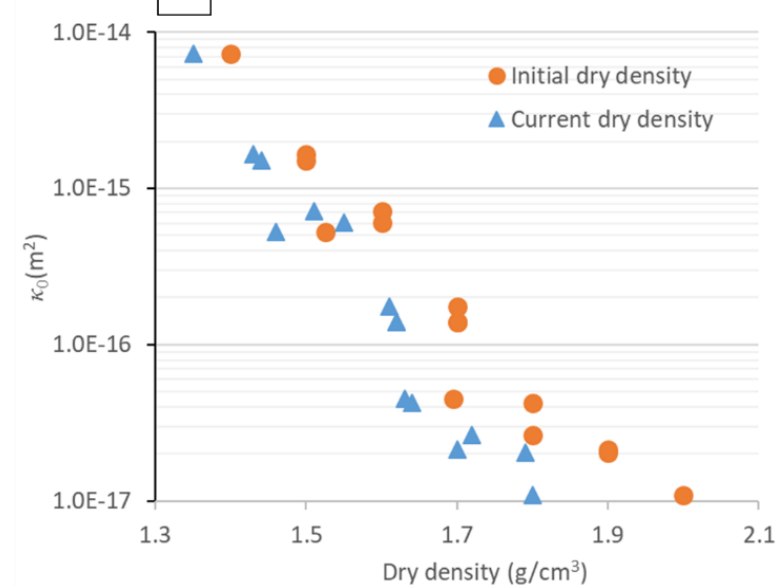
Quelle est la teneur en eau d'un mur en service?

Cinétique de séchage d'un mur en terre

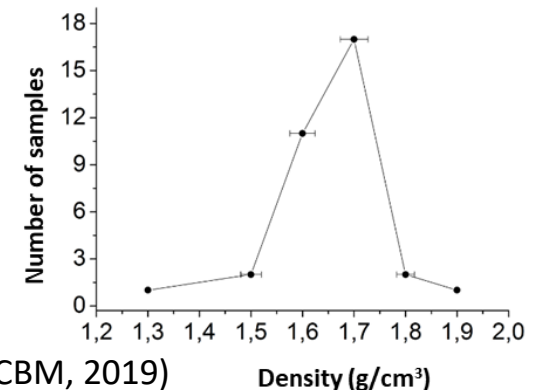


(Chabriac et al., Mat, 2014)

Variation de la perméabilité à l'eau avec la densité



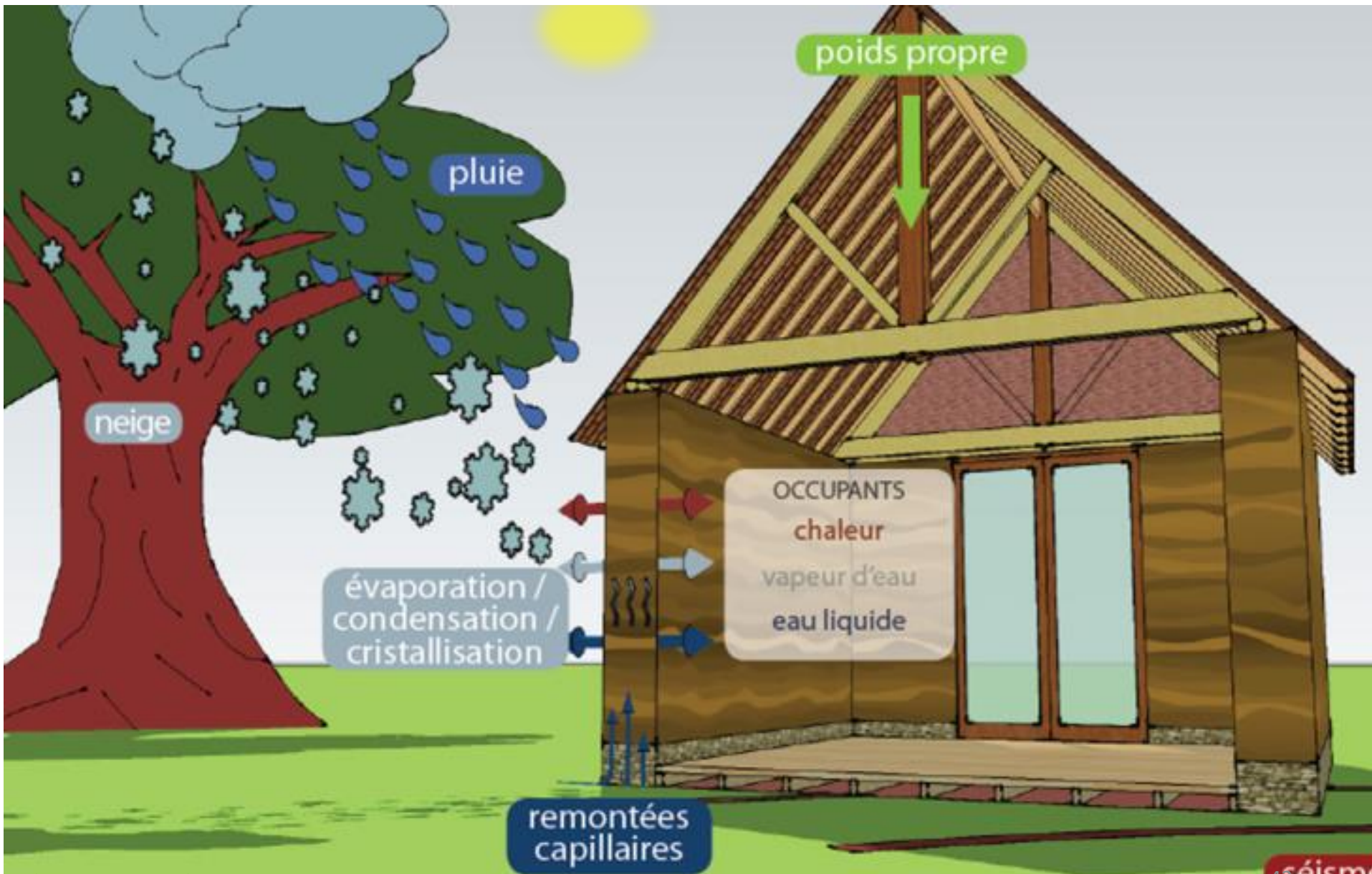
Variation de la densité dans un mur en terre

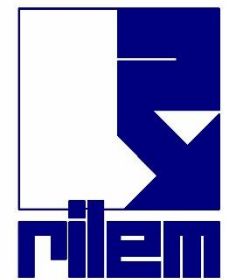


(Fabbri et al., CBM, 2019)

- Sous quelles conditions hydriques le matériau terre doit-il être testé ?
- Comment modéliser simplement son comportement ?
- Quels sont les coefficients de sécurité à appliquer lors du dimensionnement ?







The Rilem TC “Testing and characterisation of earth-based building materials and elements” 2016-2021

Chair : Jean-Claude Morel (Coventry University)

Secretary : Antonin Fabbri (ENTPE)

7 workgroups:

- standards
- mechanical behaviour
- hygrothermal behaviour
- durability
- characterisation (geotechnique/mineralogical)
- earthquakes
- energy/sustainability

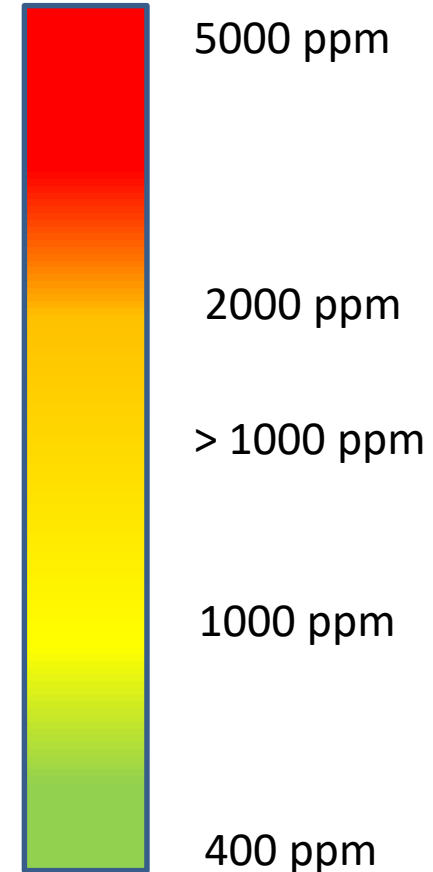
Bonus



QAI et adsorption de CO_2

Etat actuel de la réglementation

- Ventilation minimale dans les locaux d'habitation fixé par arrêté du 24/03/82 relatif à l'aération des logements
- 1000ppm comme valeur limite dans les bâtiments scolaires et bureaux
- 5000ppm comme valeur limite d'exposition professionnelles



Effets sur la santé

- Rapport de l'Anses 2013 :
 - Pas assez de connaissance actuelle sur l'effet du CO₂ pour établir des valeurs seuils
 - Nécessité d'approfondir les recherches à des concentrations faibles
- Article review de Nature Sustainability de 2019:
 - Suggère des effets dès 1000ppm
 - Nécessité d'approfondir les recherches à des concentrations faibles

Concentrations de CO₂ dans l'air intérieur et effets sur la santé

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Juillet 2013

Édition scientifique

nature
sustainability

REVIEW ARTICLE

<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0323-1>

Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide

Tyler A. Jacobson¹, Jasdeep S. Kler², Michael T. Hernke^{3,4*}, Rudolf K. Braun⁵, Keith C. Meyer⁶ and William E. Funk¹

La réalité : de nombreuses défaillance

- Niveau de CO₂ mesuré dans 896 classes (CSTB)
- Seulement 30 % des classes ont une moyenne de concentration inférieure à 1000ppm

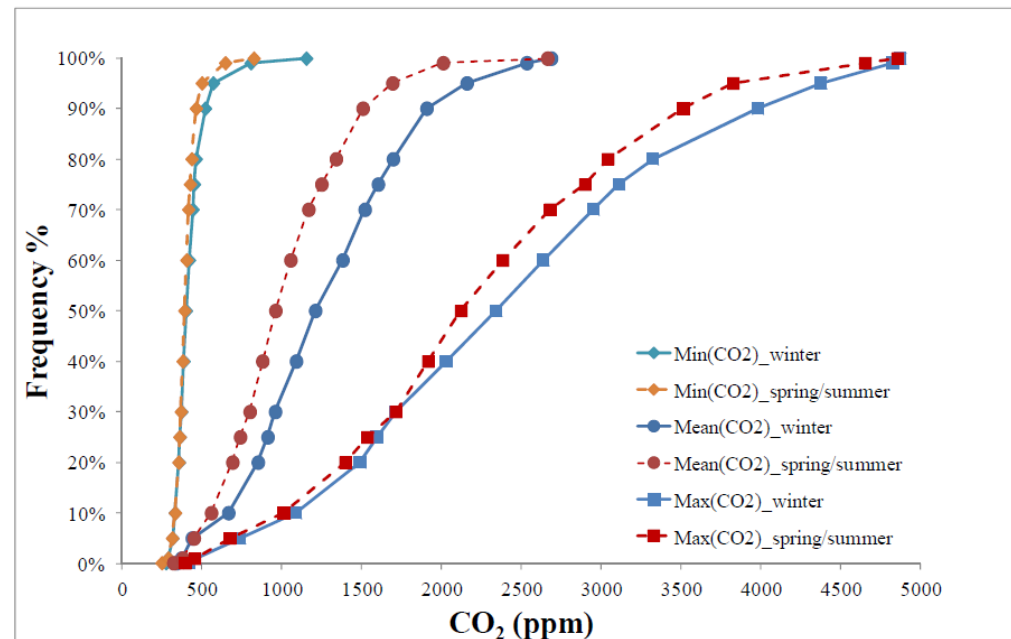
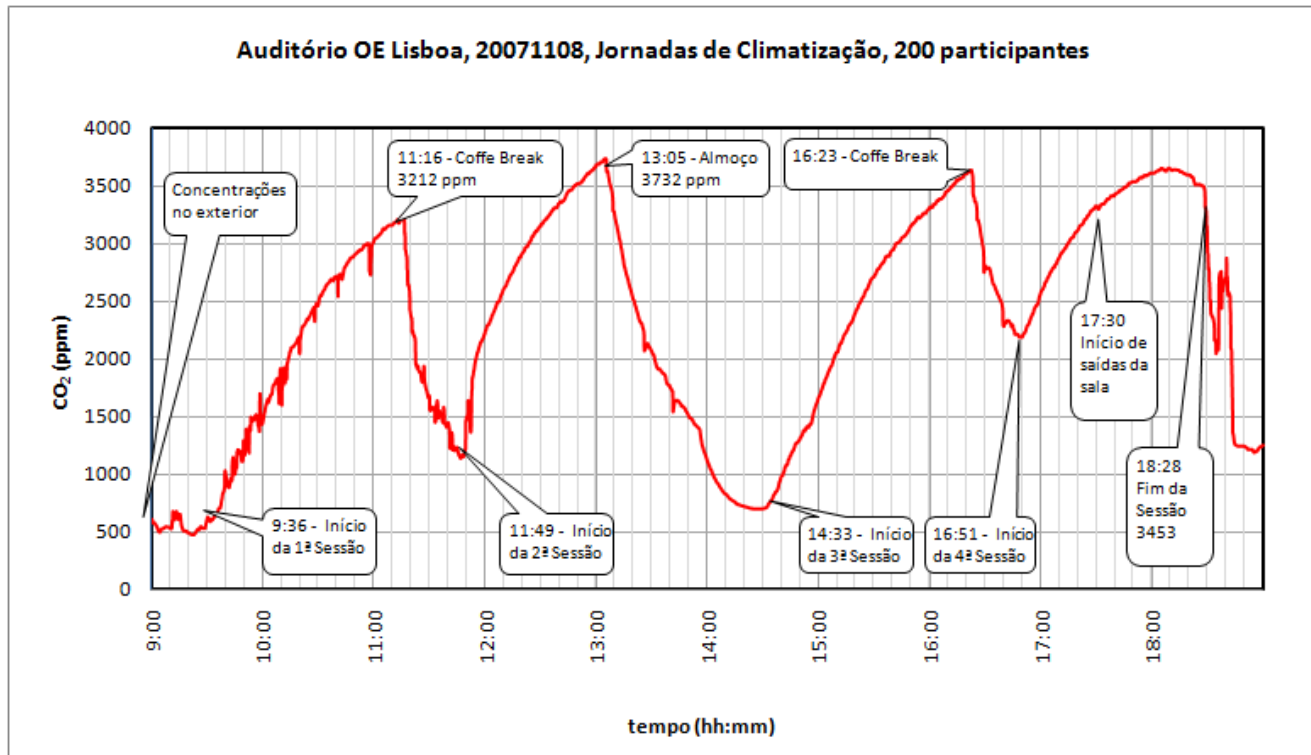


Figure 1. Distribution of minimum, mean and maximum CO₂ levels in all classrooms according to seasons.

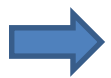
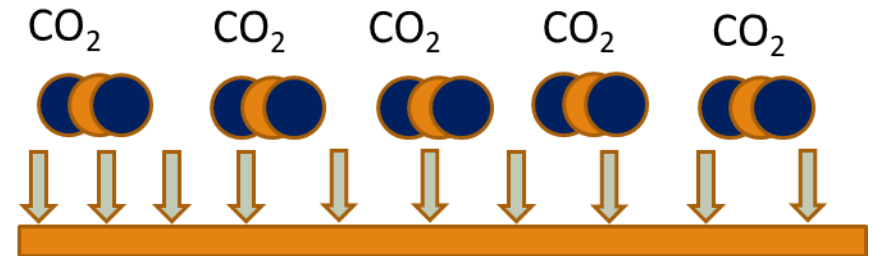
O. Ramalho, C. Mandin, J. Ribéron & G. Wyart (2013) Air Stiffness and Air Exchange Rate in French Schools and Day-Care Centres, International Journal of Ventilation, 12:2, 175-180

La réalité : de nombreuses défaillances



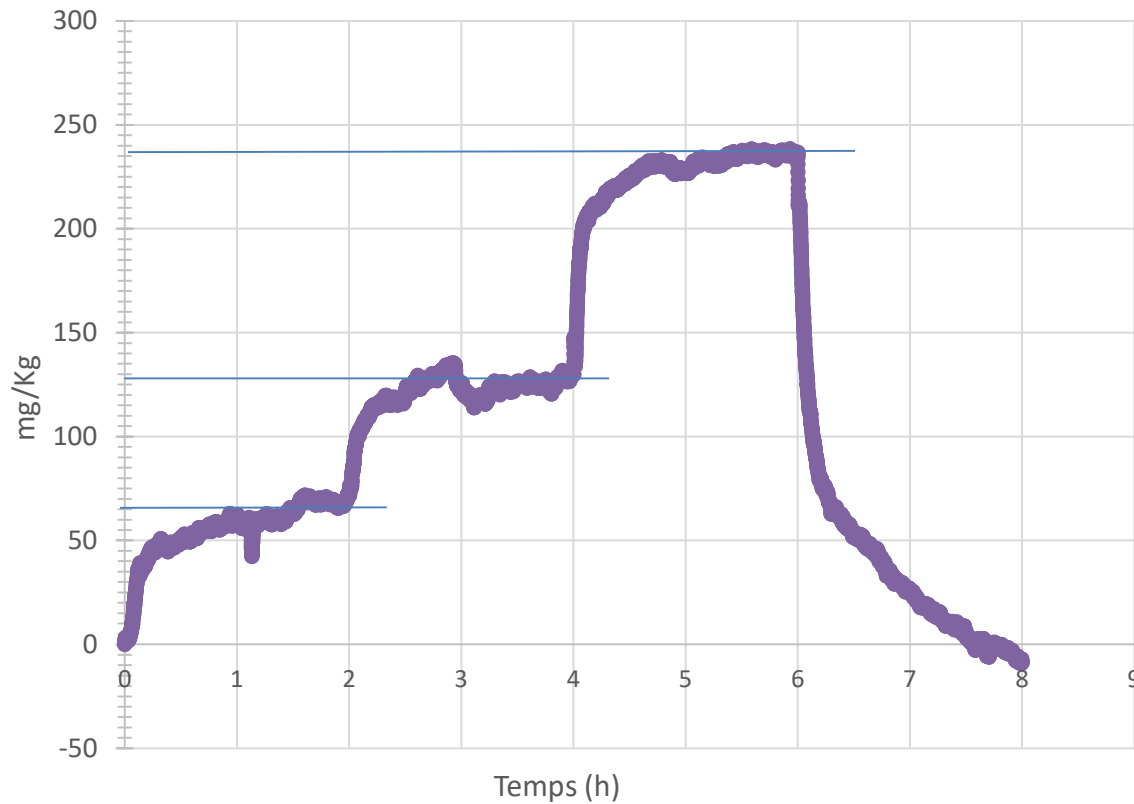
Source : **Manuel C. Gameiro da Silva**
 Reseach Group in Energy, Environment and Comfort
 ADAI-LAETA, Department of Mechanical Engineering
 University of Coimbra

Interaction du CO₂ avec les matériaux

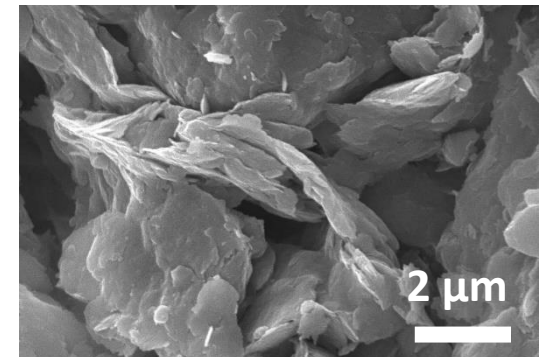


Essai de sorption du CO₂ à des concentrations très faibles de 0,1 à 100 %

Premiers résultats



- 3 Paliers de 2000, 4000 et 10000 ppm
- Echantillon de 110 mg de terre crue



Conclusion:

La quantité de CO₂ adsorbée semble non négligeable d'après les premiers résultats.

Projet de thèse :

- Etude de l'adsorption du CO₂ par les matériaux biosourcés et terre crue.
- Quel impact sur la qualité de l'air intérieur? (Relation entre le renouvellement de l'air et l'adsorption)
- Possibilité de concevoir une atténuation passive des taux de CO₂?
- Couplages adsorption d'eau et de CO₂