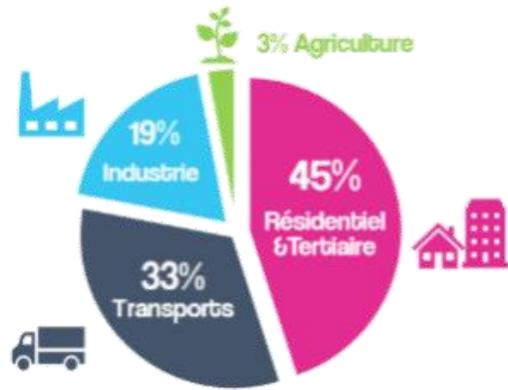




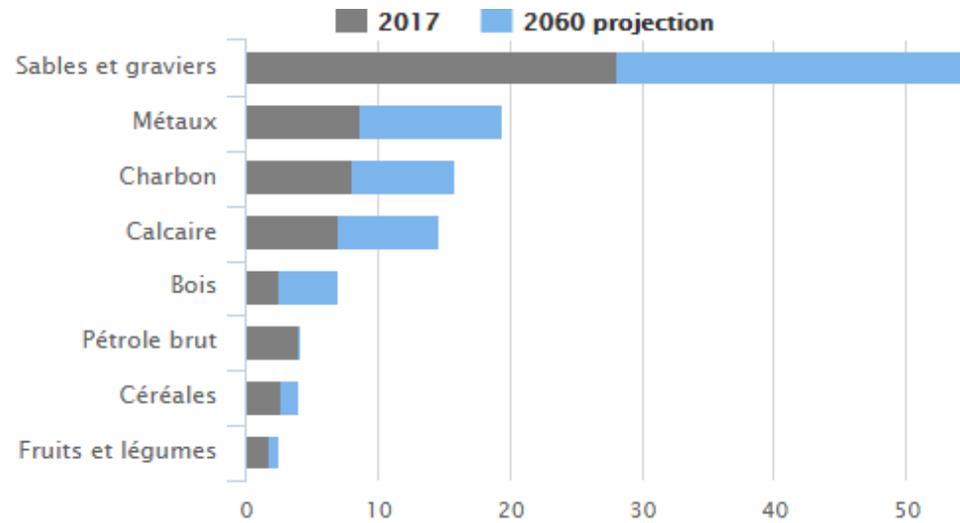


## Matériaux et applications

- Béton de polystyrène



Consommation énergétique en 2016



Consommation des matières premières

- 45% de la consommation totale d'énergie
  - 25% des émissions de CO<sub>2</sub>
  - 50 % de ressources naturelles exploitées



Utilisation de déchets recyclés

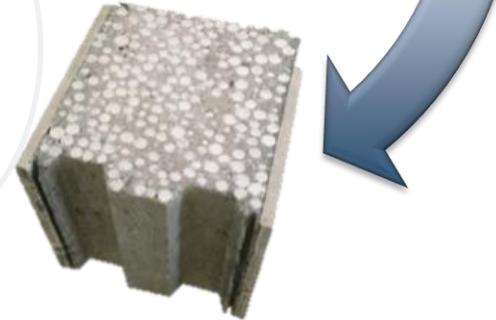


Déchet

Traitement

1,5 million de tonnes de polystyrène utilisé (UE)

Taux de recyclage de 30 %



Matériau recyclé



Dalles sur hourdis



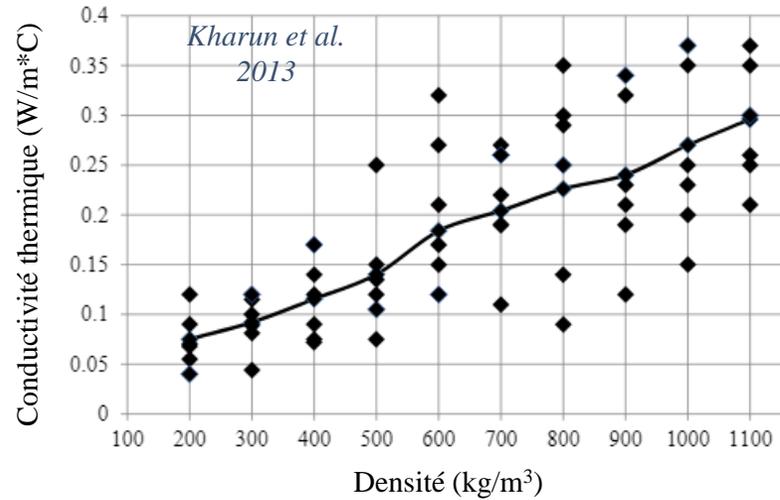
Toitures



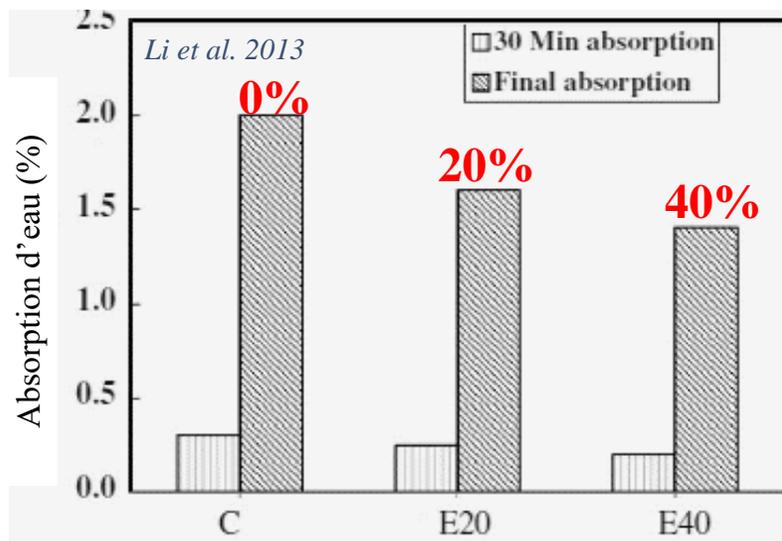
Chapes de sol

# Avantages

➤ Amélioration de

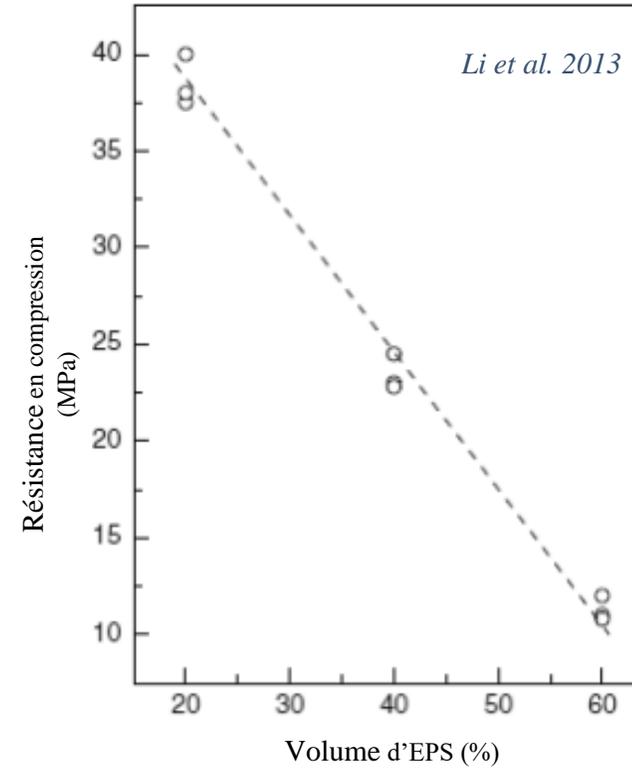


➤ Amélioration de la **durabilité**

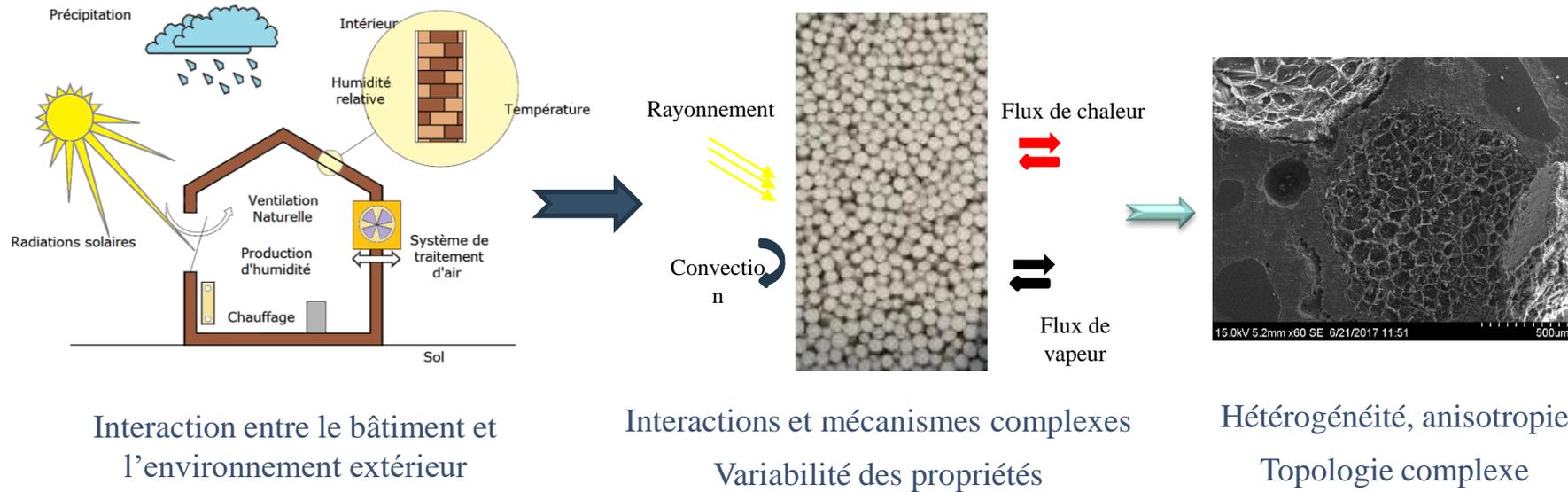


# Inconvénients

➤ Altération des propriétés **mécaniques**



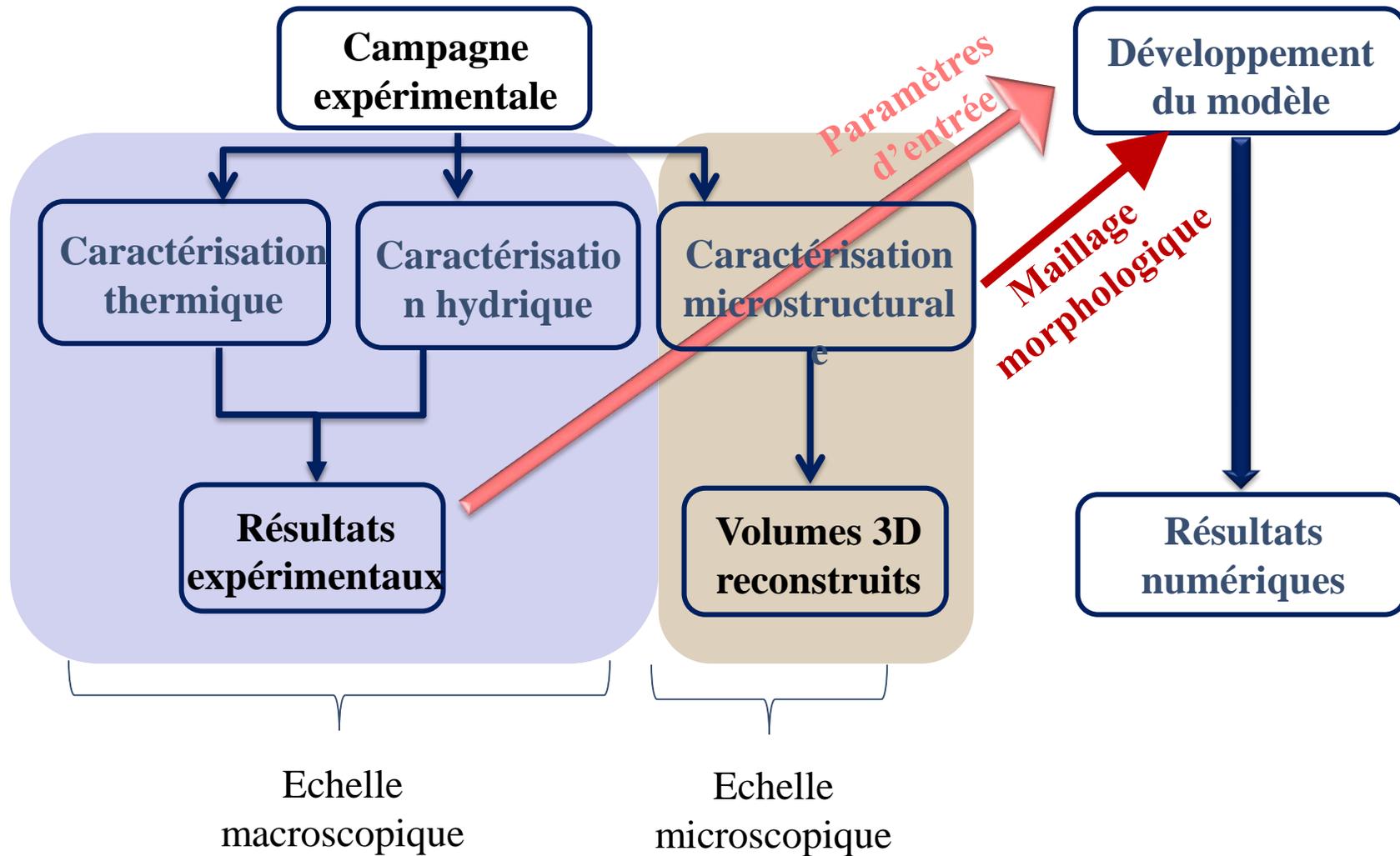
# Phénomènes multi-échelles



**Barrière au développement de l'utilisation des matériaux innovants (éco-matériaux, bio-sourcés, recyclés)**



**Nécessité de modéliser le comportement thermo-hydrrique de ces matériaux de construction**



# Composition des matériaux



# Caractérisation microscopique



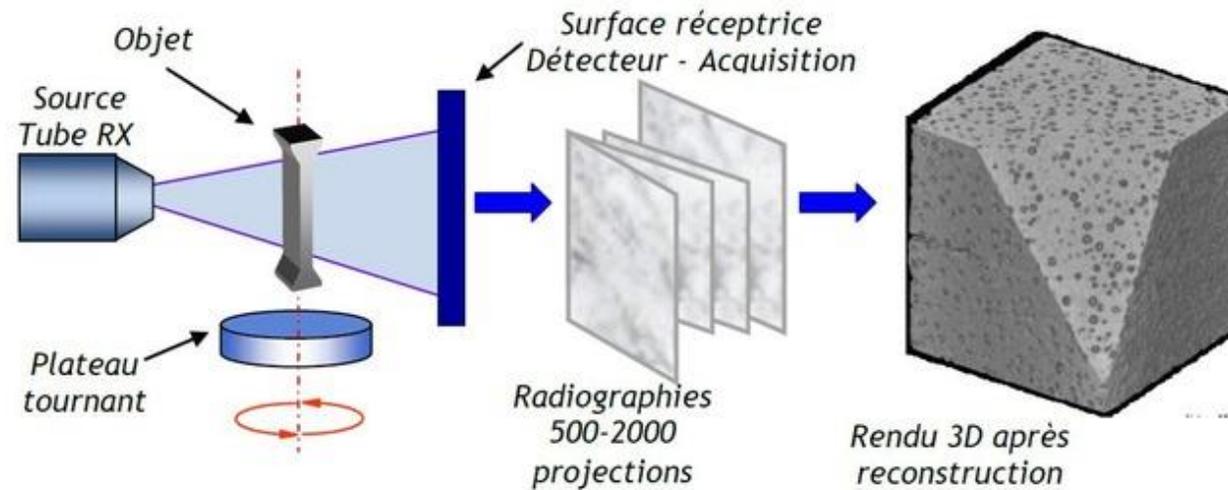
- Micro-tomographie à rayons X

- Microscopie électronique à balayage

- Microscopie numérique

# Micro-tomographie à rayons X

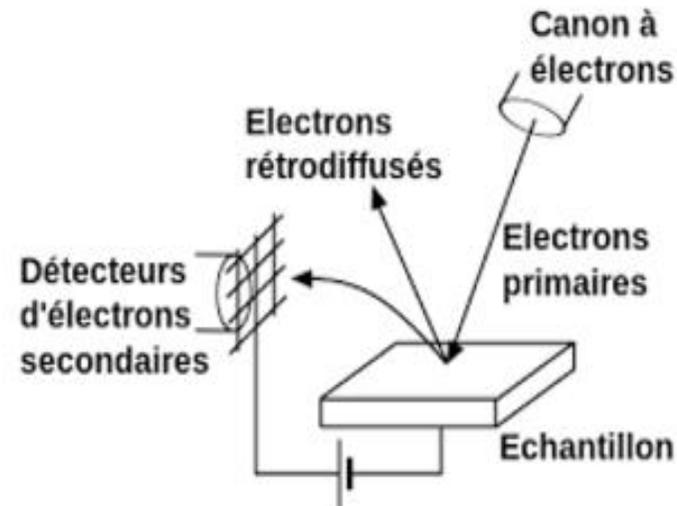
- Technique non destructive
- Analyse multidirectionnelle
- Reconstruction 3D des volumes réels



: Principe de fonctionnement de l'acquisition des données  
Image N. Limodin, J. Réthoré, J.-Y. Buffière, A. Gravouil, F. Hild, S. Roux

# Microscopie électronique à balayage

- Technique non destructive mais nécessite un dépôt métallique pour les matériaux isolants
- Observation de la morphologie en surface
- Détermination des différentes phases



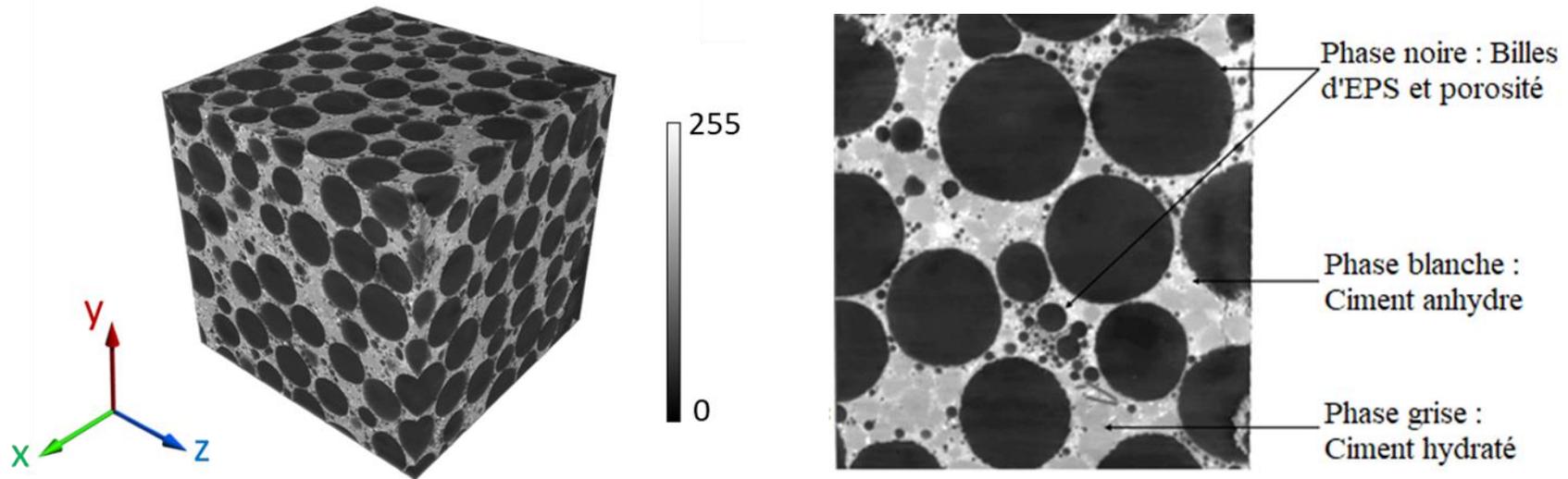
# Microscopie numérique

- Technique non destructive
- Observation de la morphologie en surface
- Possibilité de reconstructions morphologiques en 3D

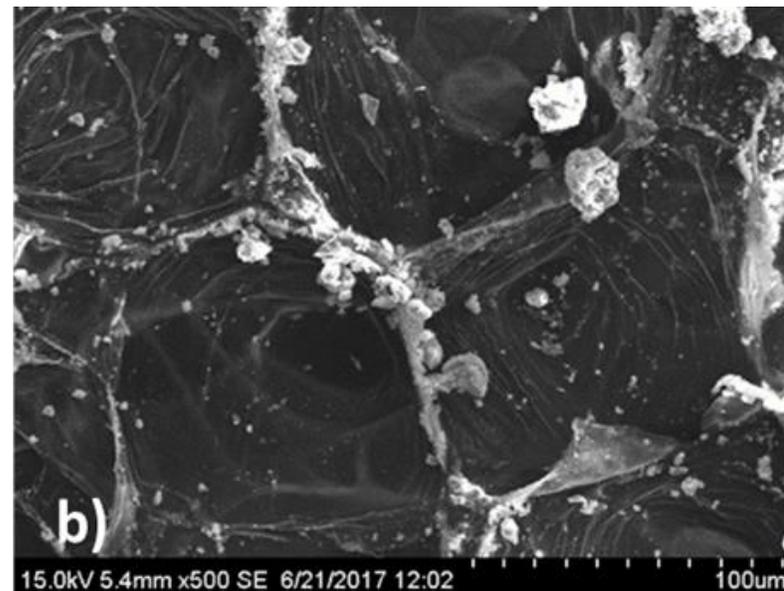
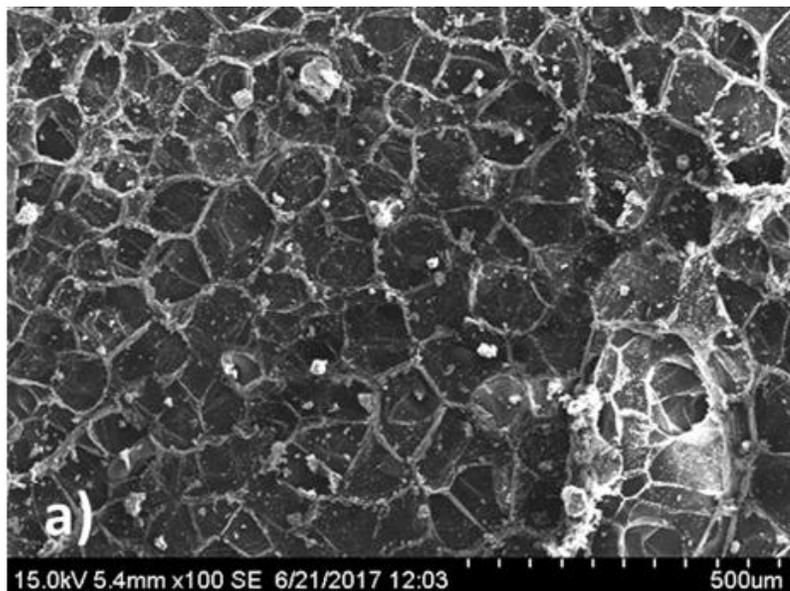


# Reconstruction des volumes

- Phase sombre : Phase très peu dense et n'absorbe presque pas de rayons X, elle correspond donc à la porosité (air présent dans la matrice) et aux billes de polystyrène
- Phase claire : Matrice cimentaire sa densité est plus importante et il absorbe des rayons X

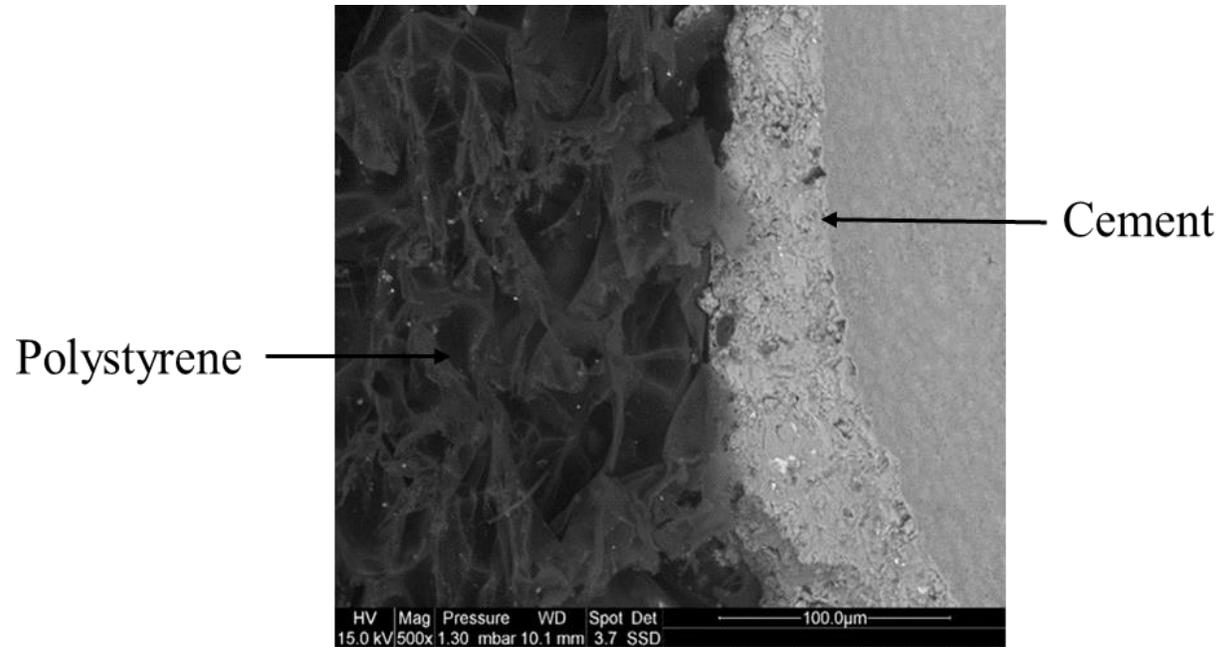


## Structure des billes d'EPS



- Structure cellulaire des billes de polystyrène
- Parois alvéolaires très fines
- Cause de la faible densité du polystyrène expansé

# Interface entre les différentes phases

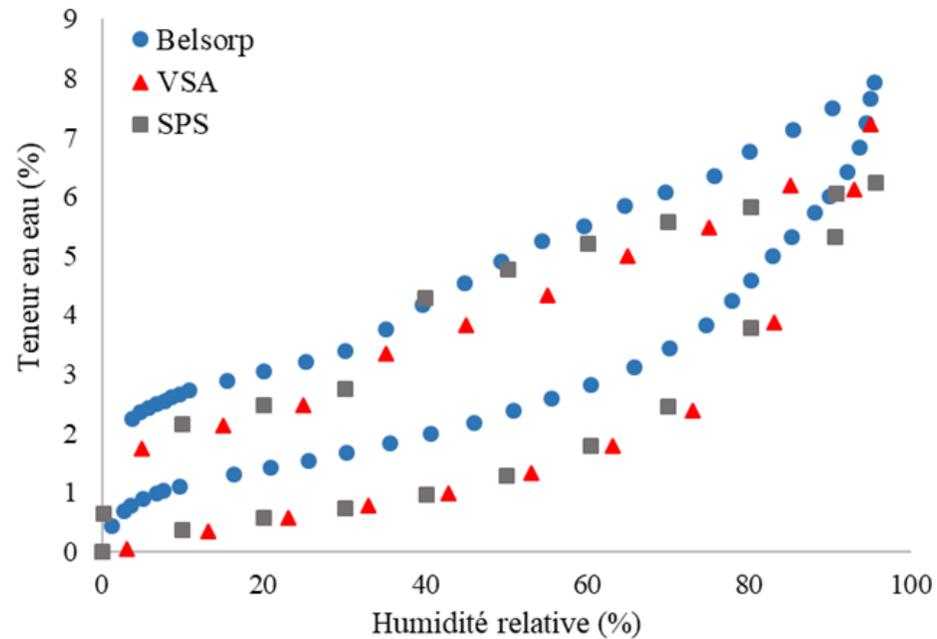


- Bonne adhérence entre le ciment et le polystyrène
- Pas de zone de transition interfaciale

## Caractérisation macroscopique

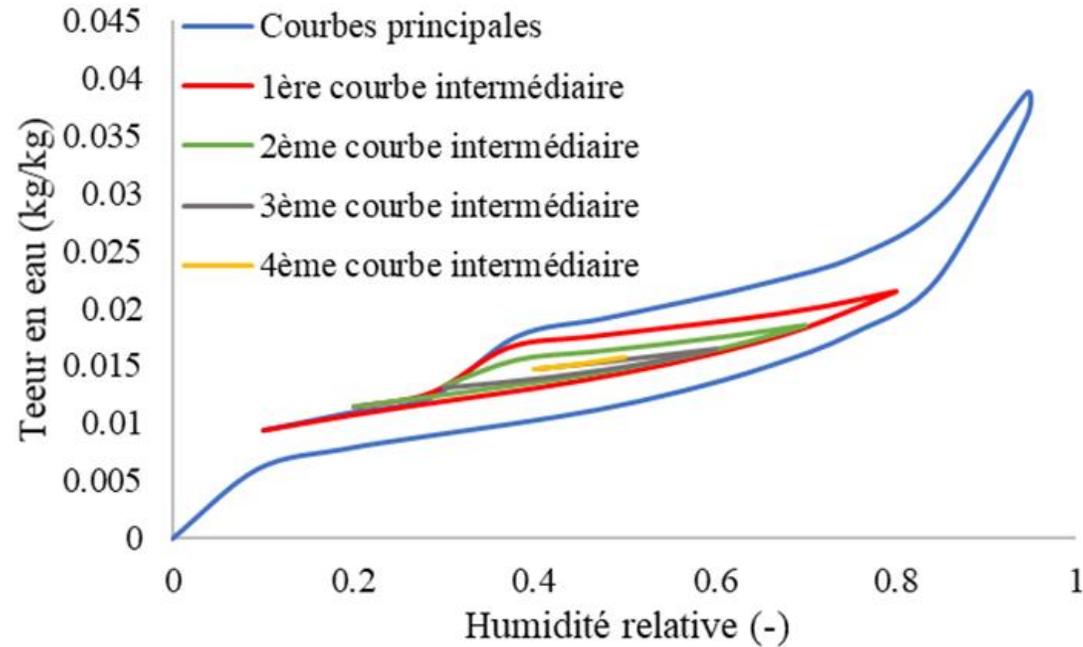
- Isothermes d'adsorption et de désorption
- Capacité de stockage d'humidité
- Pouvoir tampon hydrique
- Conductivité thermique
- Chaleur spécifique
- Perméabilité à la vapeur

# Isothermes d'adsorption et de désorption



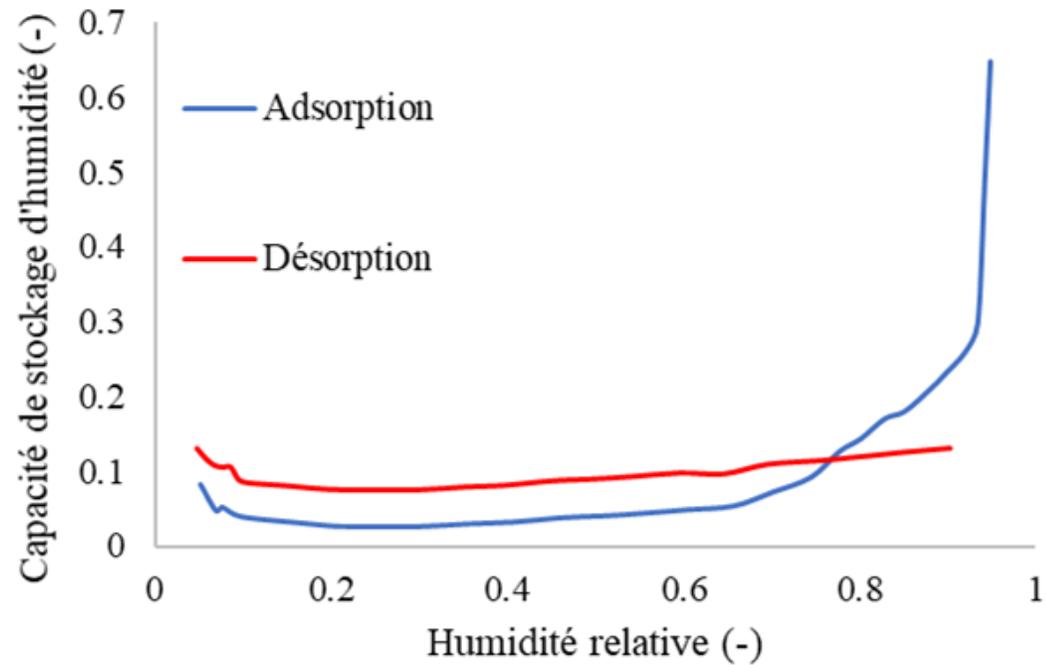
- Teneur en eau à saturation plus importante à l'aide de la méthode de mesure volumétrique
- Teneur en eau max du matériau peu élevée → Matériau peu hygroscopique

# Isothermes d'adsorption et de désorption intermédiaires



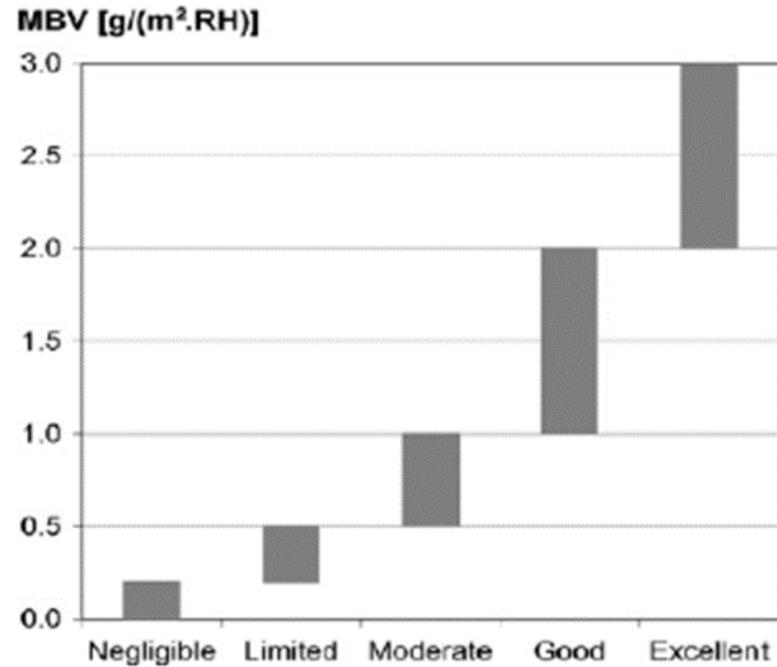
- Même allure que les courbes principales
- Après quatre cycles, les courbes commencent à se superposer

# Capacité de stockage d'humidité



- Courbes différentes en adsorption et désorption
- Augmentation importante aux hautes hygrométries

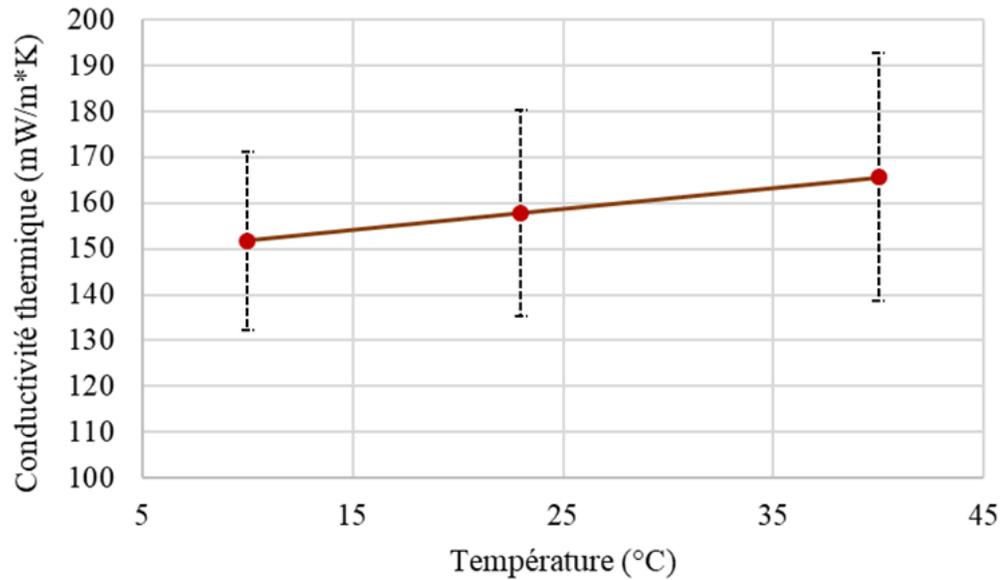
# Pouvoir tampon hydrique (Moisture Buffer Value)



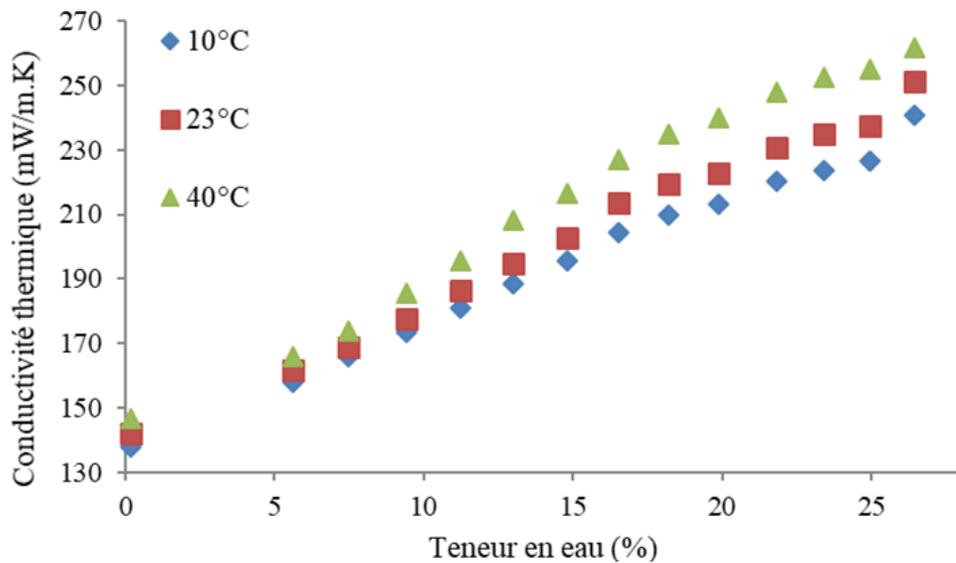
$$\text{MBV} = 0,55\text{g/m}^2.\%HR$$

- Béton de polystyrène a un pouvoir tampon hydrique modéré
- Pas de régulation d'humidité

# Conductivité thermique

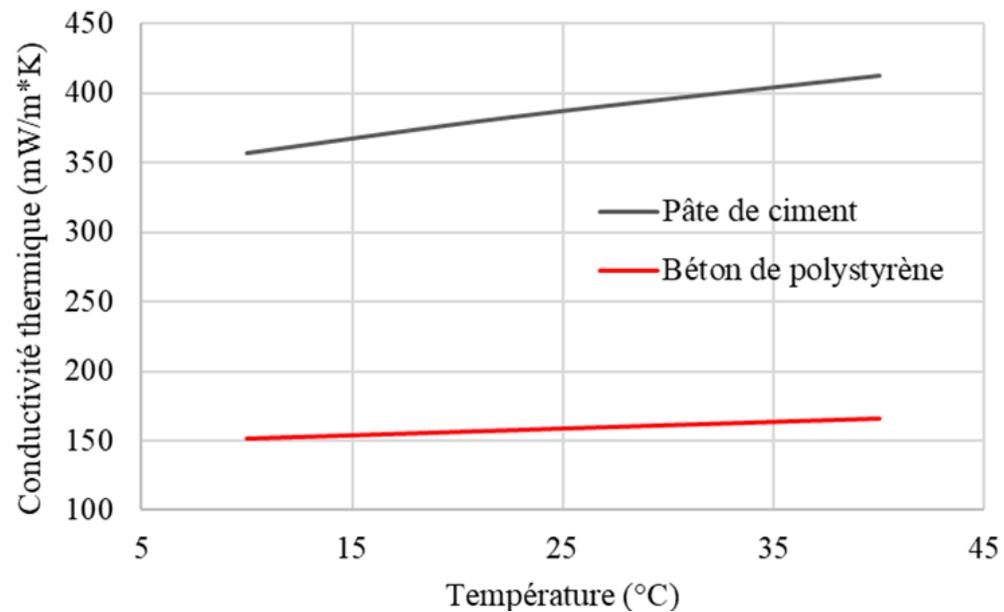


Augmentation en fonction de la température



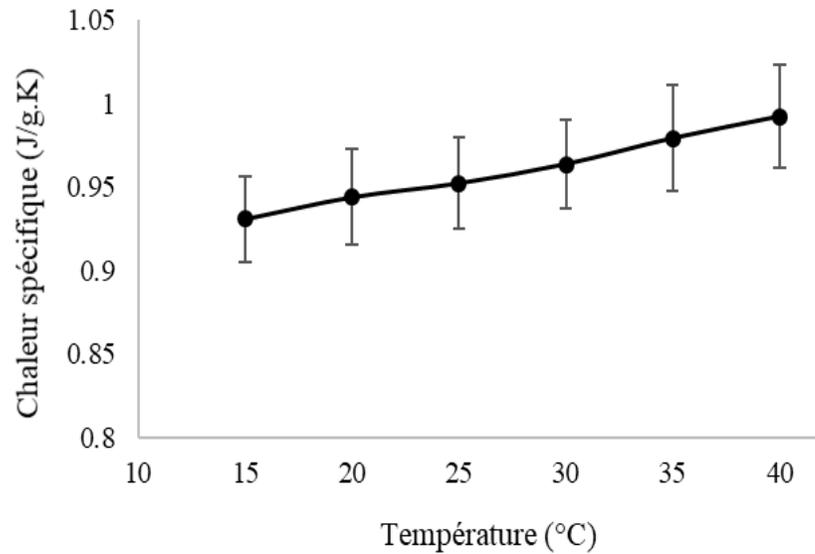
Augmentation en fonction de la teneur en eau

# Conductivité thermique

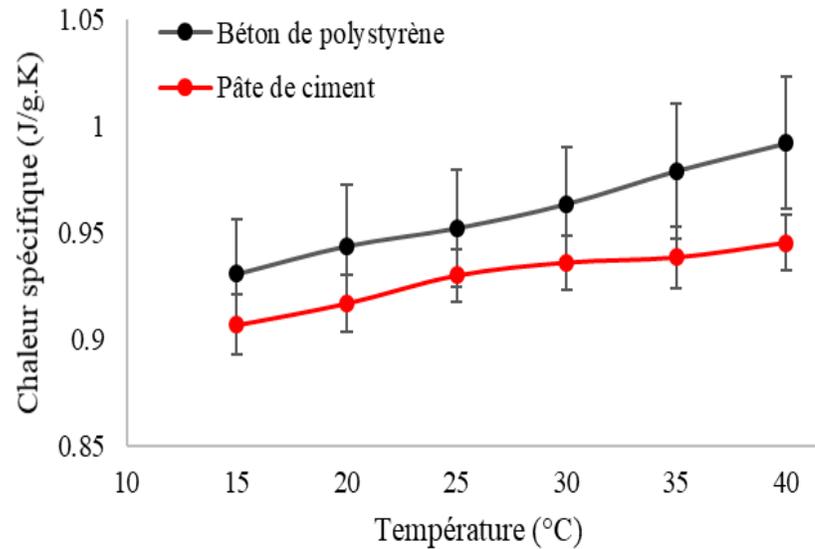


Le polystyrène expansé améliore les performances d'isolation thermique

# Chaleur spécifique

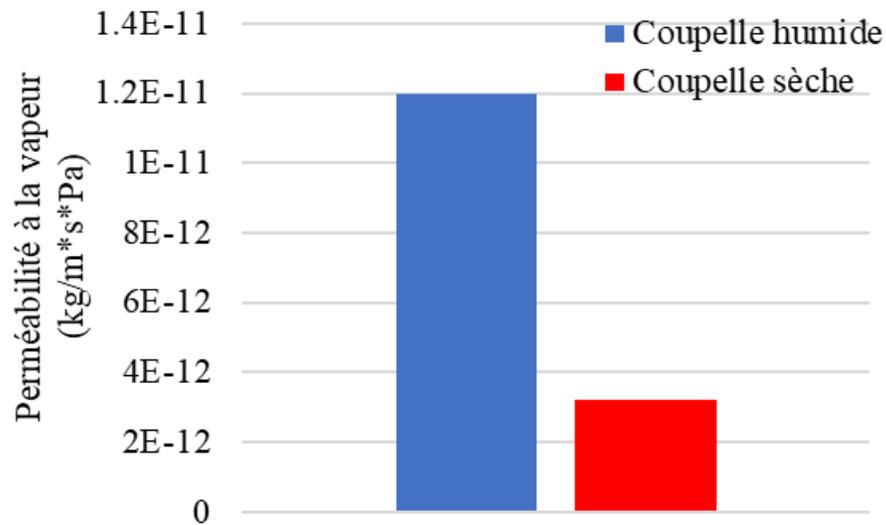


Augmentation en fonction de la température

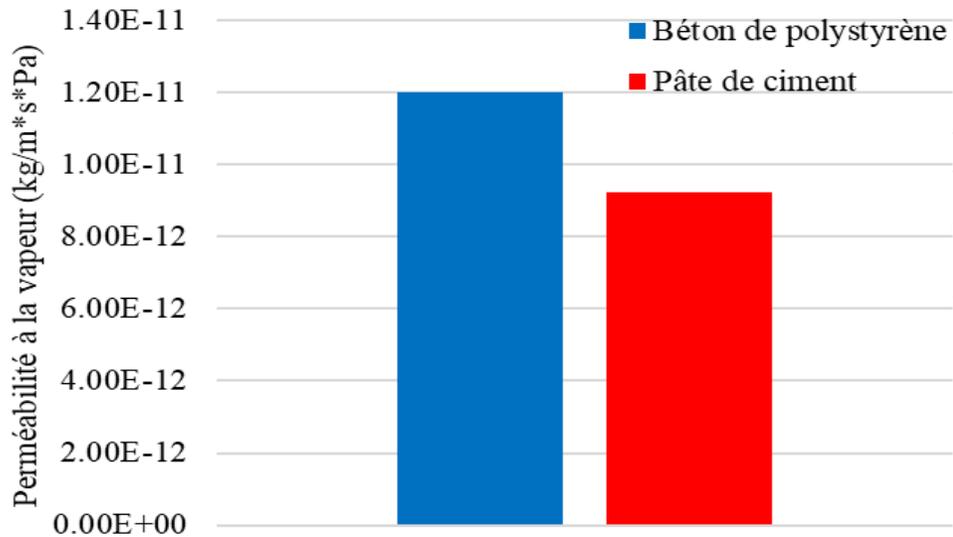


Le polystyrène expansé améliore la capacité de stockage de chaleur

# Perméabilité à la vapeur



Augmentation en fonction du gradient de pression de vapeur



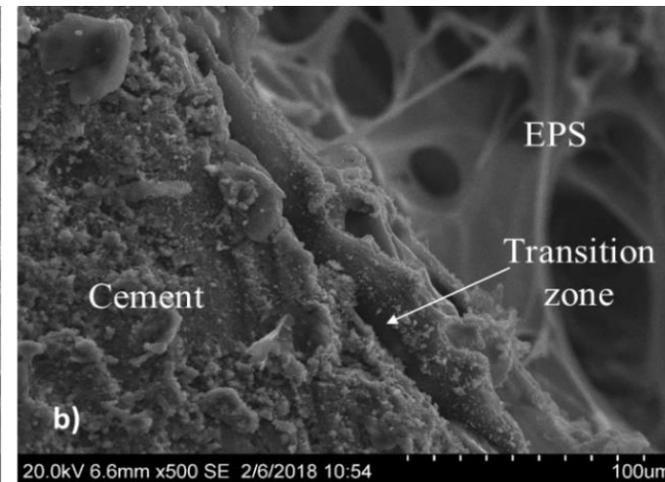
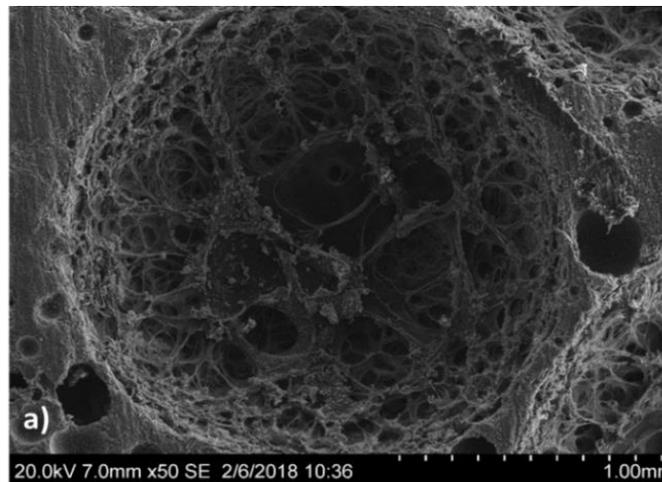
L'ajout de polystyrène expansé entraîne la formation de bulles d'air

# Résistance aux sollicitations thermiques

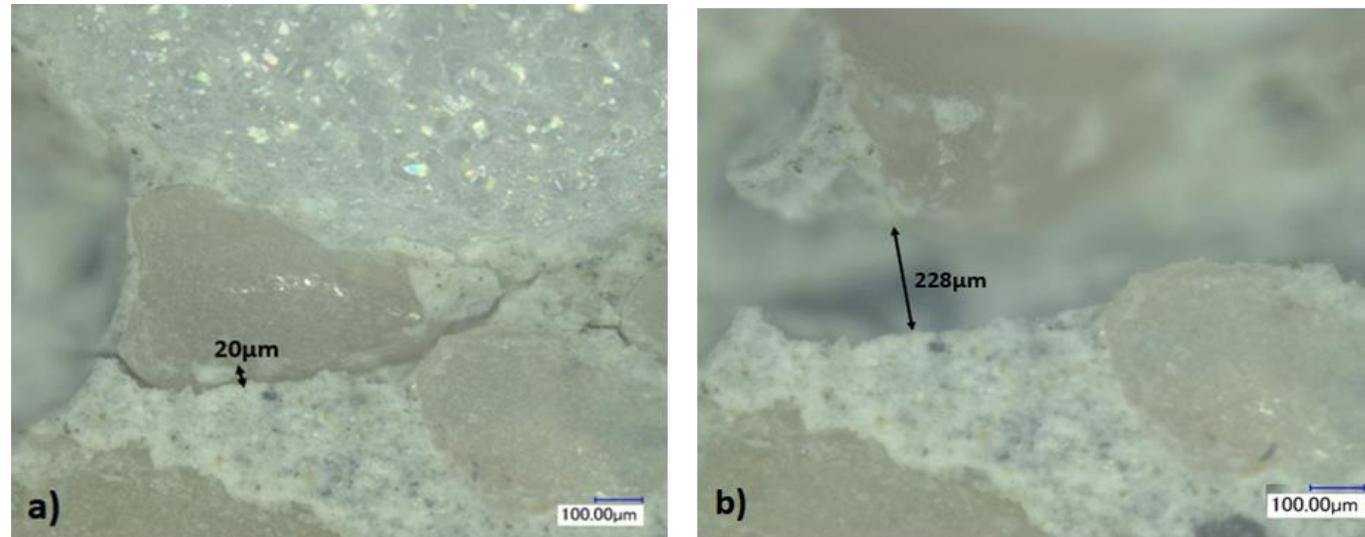
Palier de température (°C)	Durée (h)
50	12
60	14
70	16
80	18
90	14
100	10
110	10



Reconstruction 3D d'une bille après 10h d'exposition à 110° C



# Résistance aux sollicitations thermiques

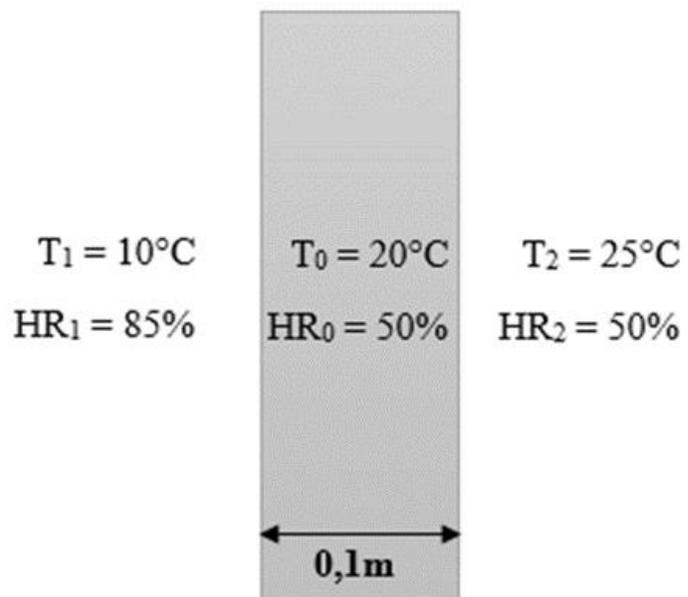


Fissures dans la matrice cimentaire après 8 heures à (a) 90° C et b) 100° C

- Dégradation du polystyrène expansé à partir de 90° C
- Apparition d'une zone de transition entre les deux phases
- Apparition de fissures dans la matrice cimentaire à partir de 90° C

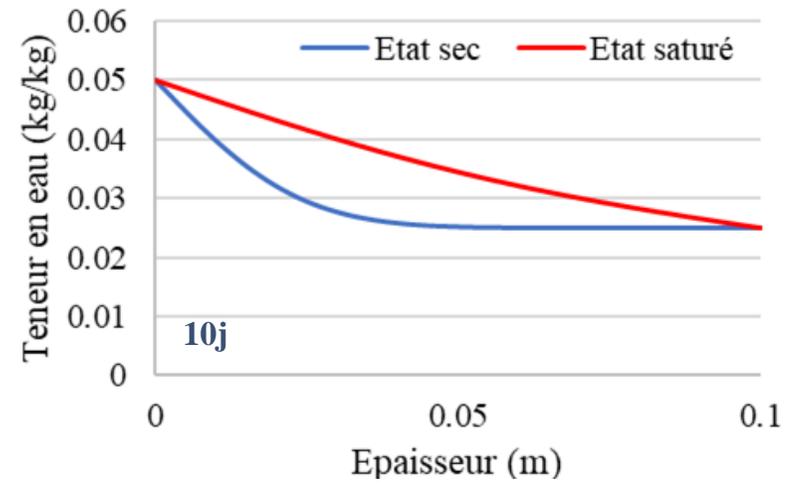
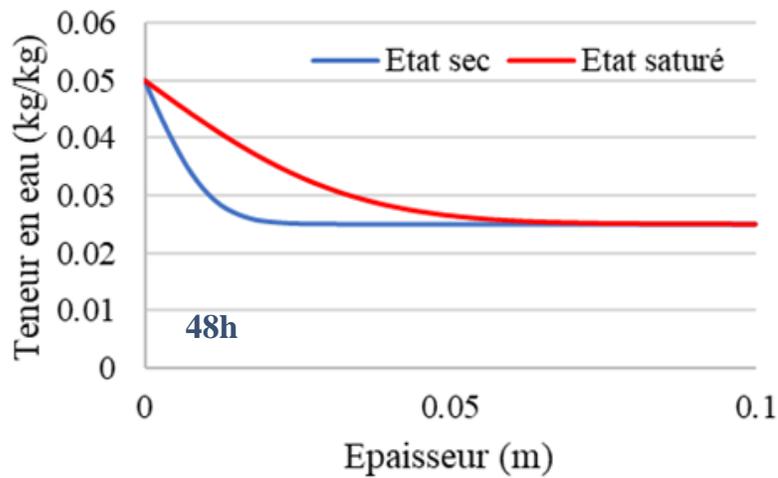
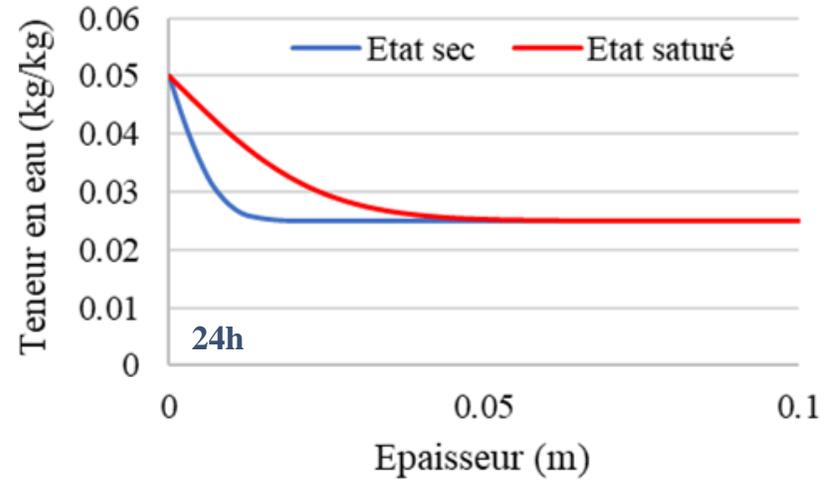
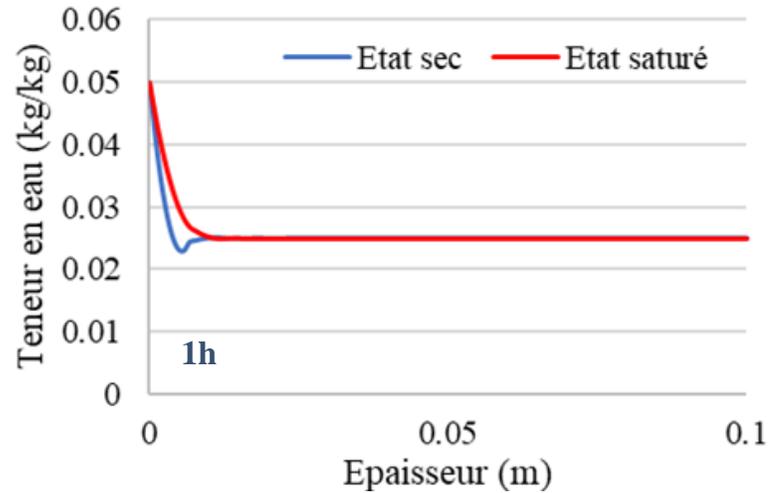
# Simulations en 1D

- Influence de l'état hydrique

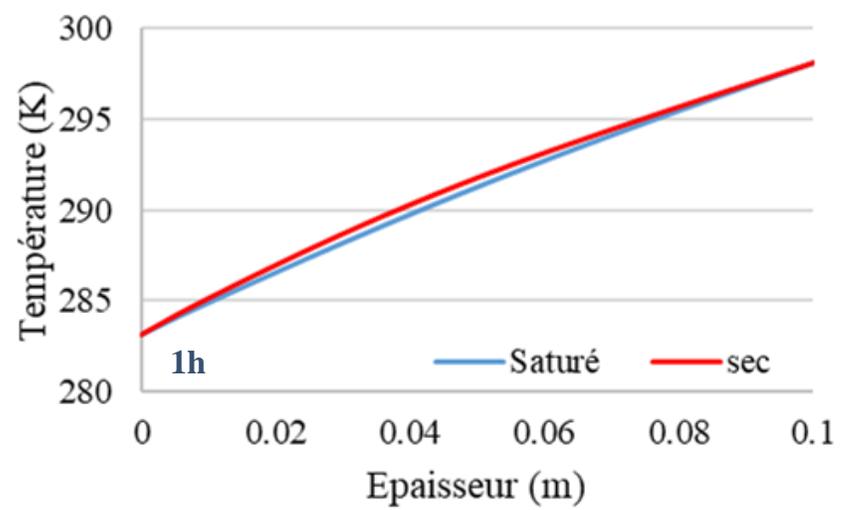
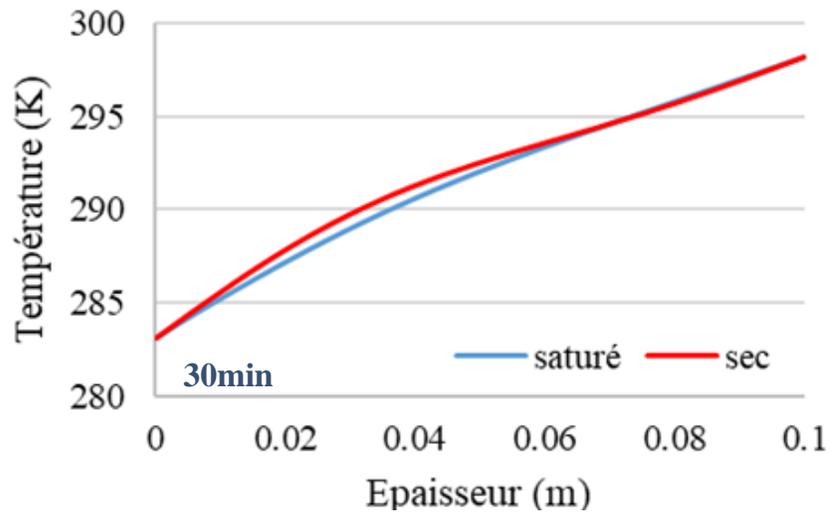
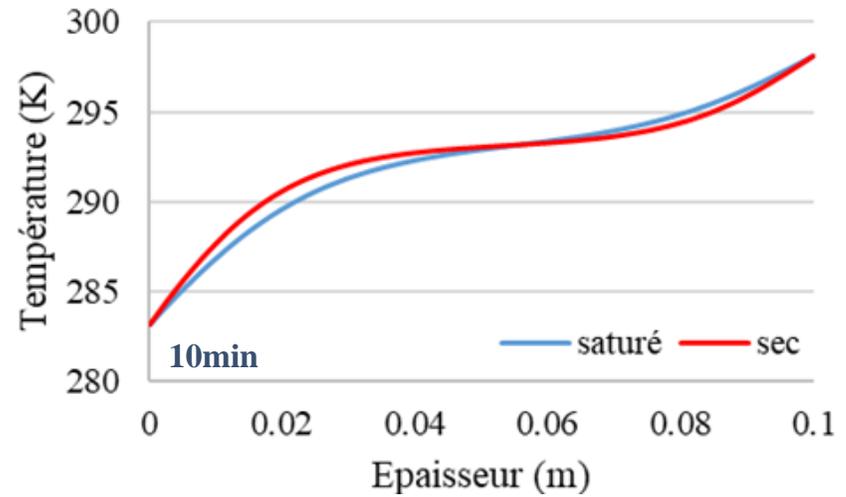
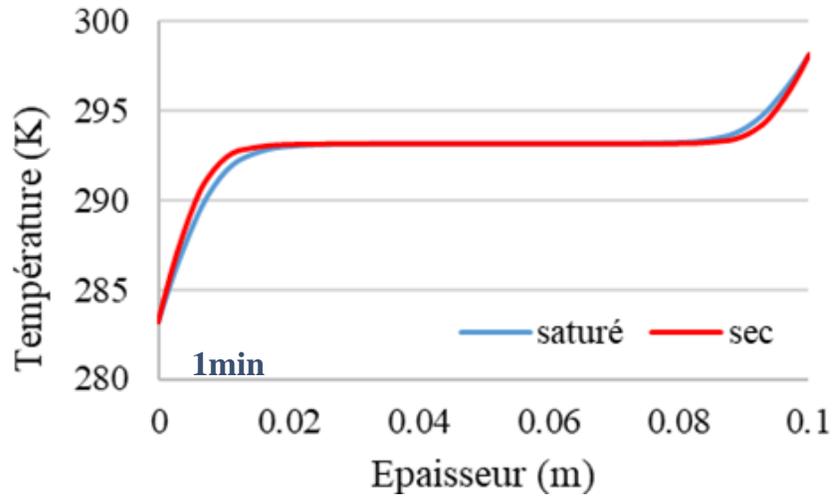


- Transferts unidirectionnels
- Paroi monocouche

# Profils de teneur en eau en 1D



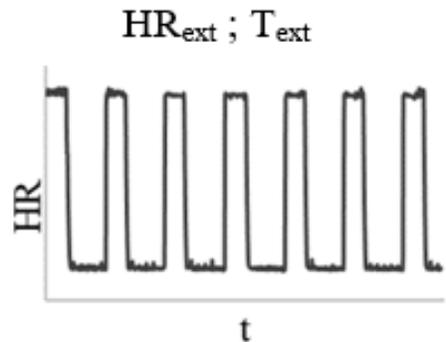
# Profils de température en 1D



# Simulations numériques en 1D

## Influence du phénomène d'hystérésis

- Echantillon isolé par la surface latérale et la surface inférieure
- Transferts unidirectionnels
- Conditions extérieures cycliques



Isolation

# Simulations numériques en 1D

## Influence du phénomène d'hystérésis

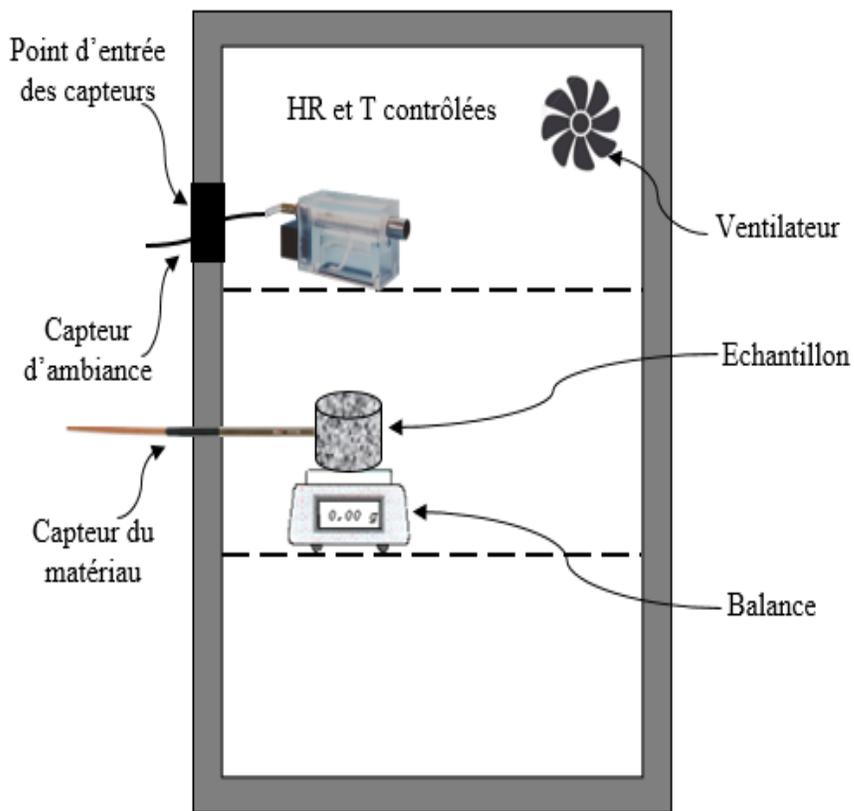


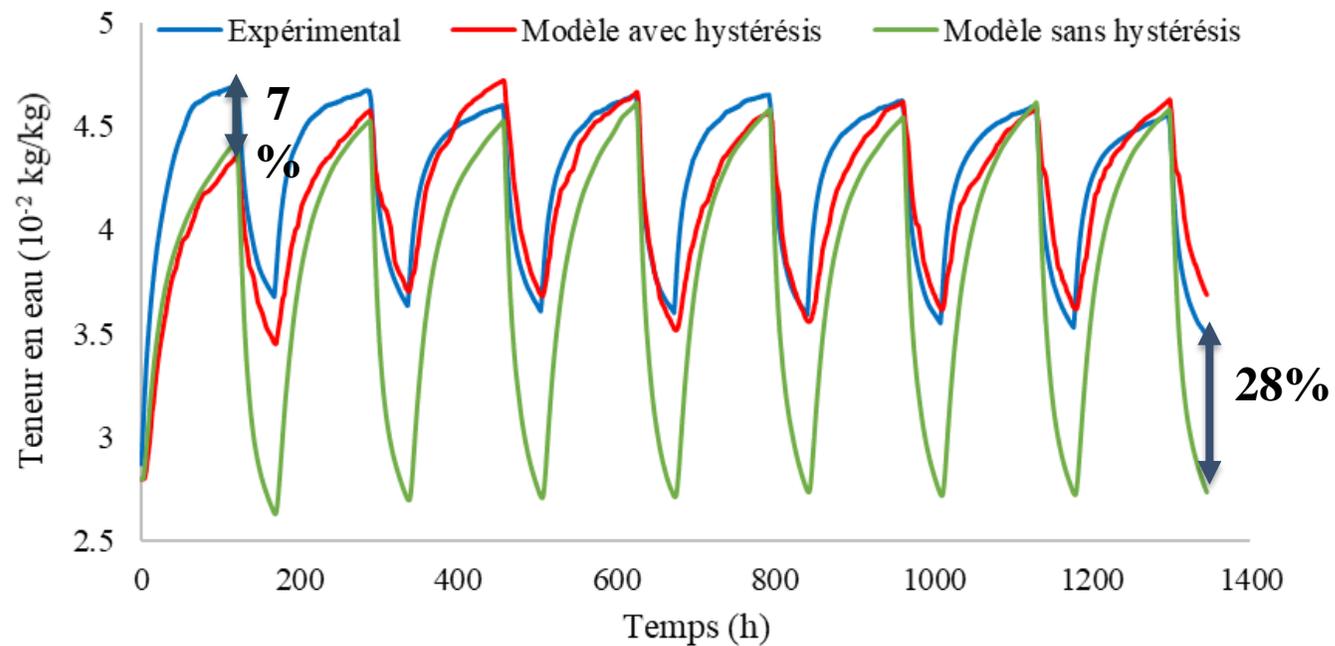
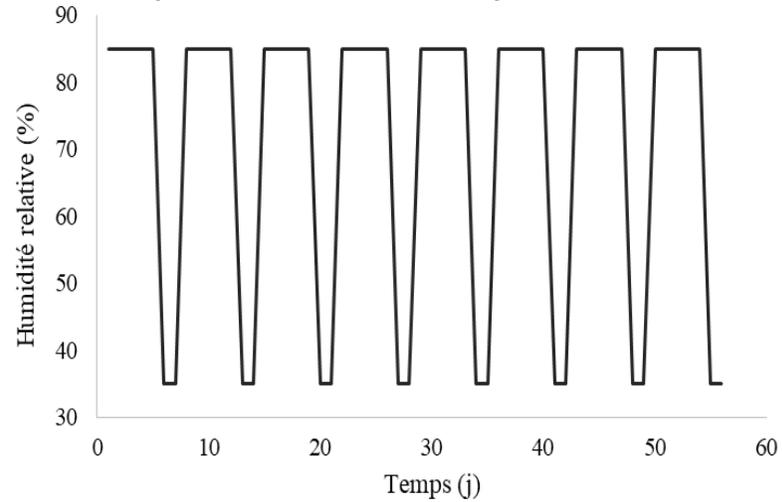
Schéma du dispositif



Dispositif réel

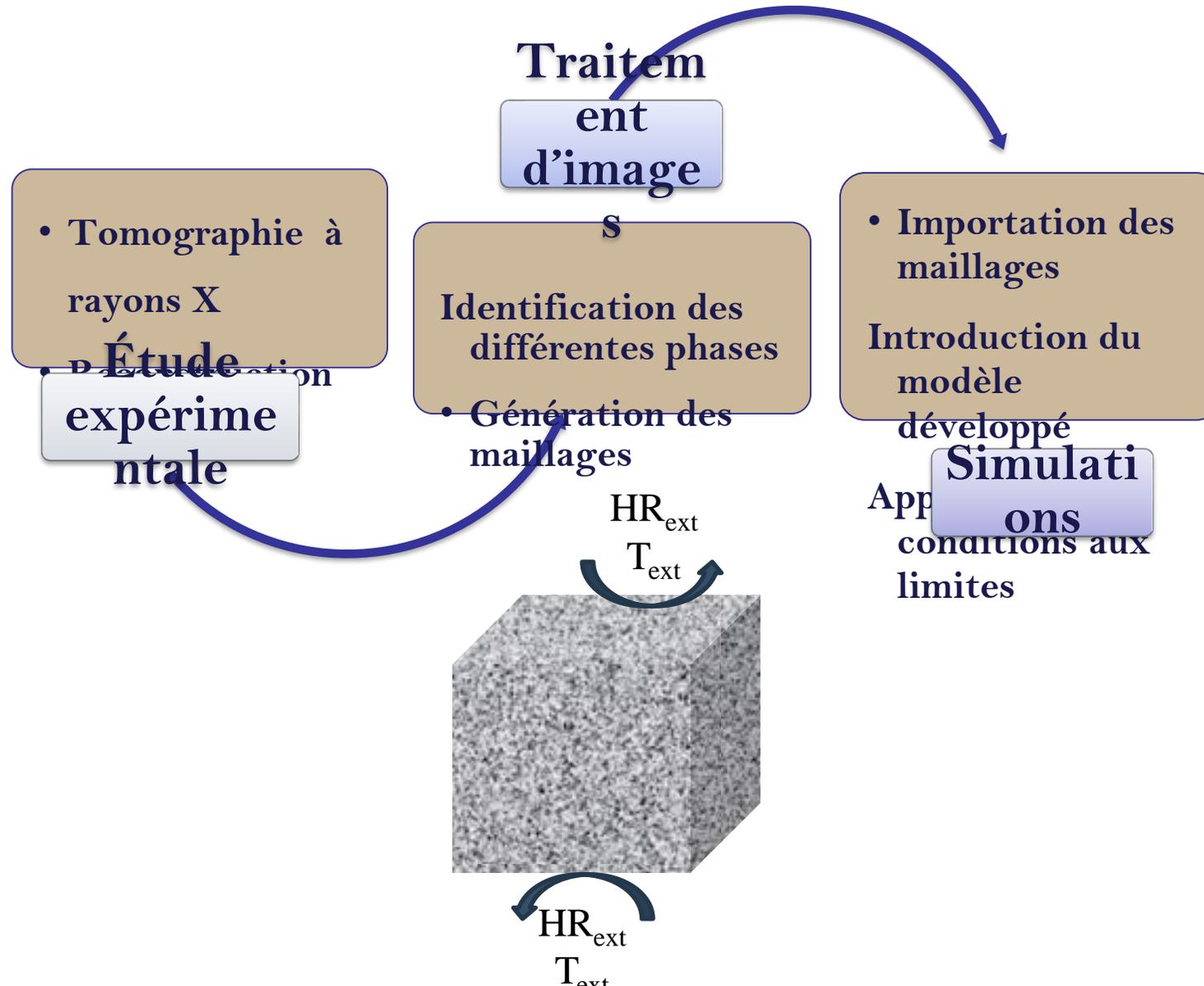
# Simulations numériques en 1D

## Influence du phénomène d'hystérésis



# Simulations numériques en 3D

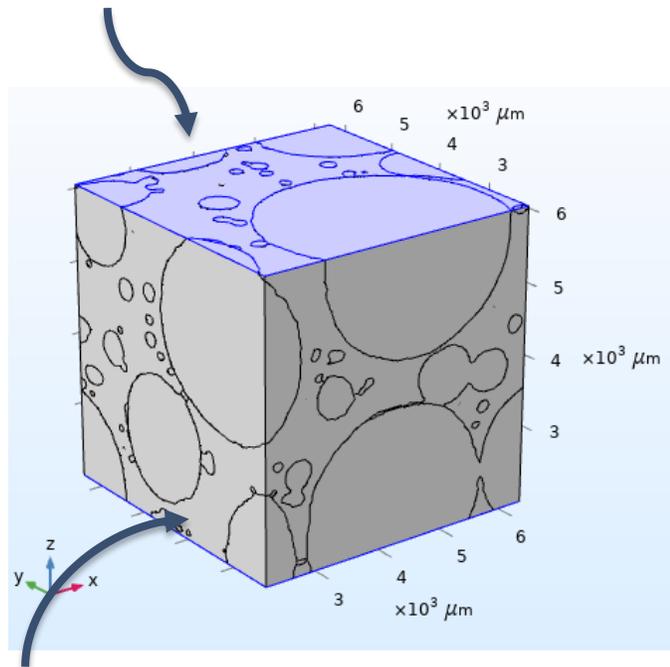
Influence de la morphologie réelle du matériau



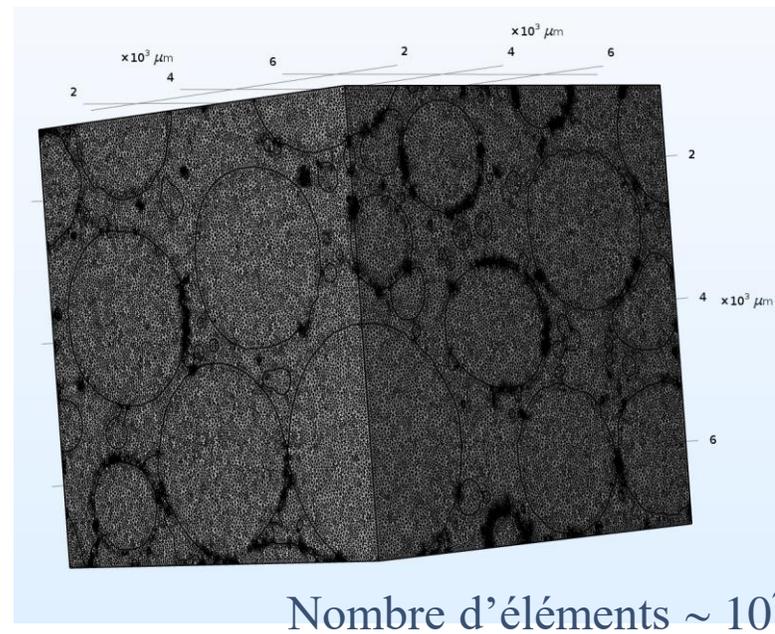
# Simulations numériques en 3D

Influence de la morphologie réelle du matériau

$\omega = 0,03\text{kg/kg}$



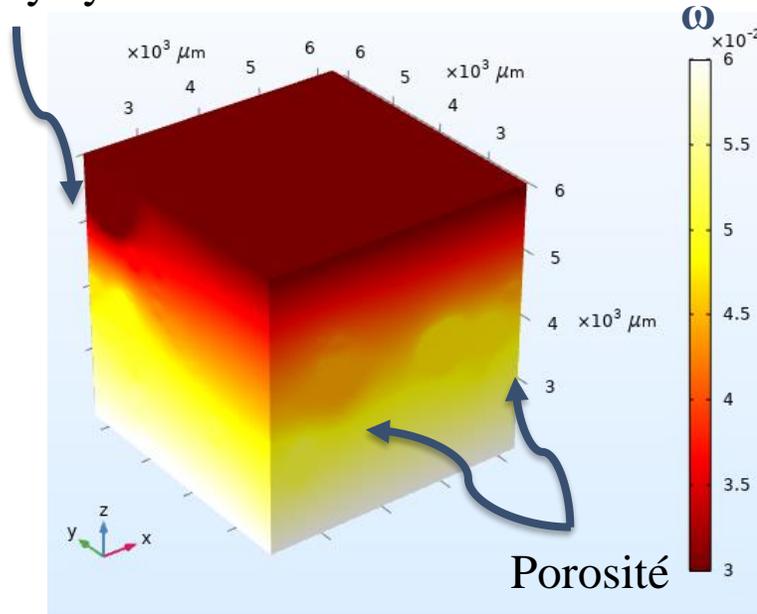
$\omega = 0,06\text{kg/kg}$



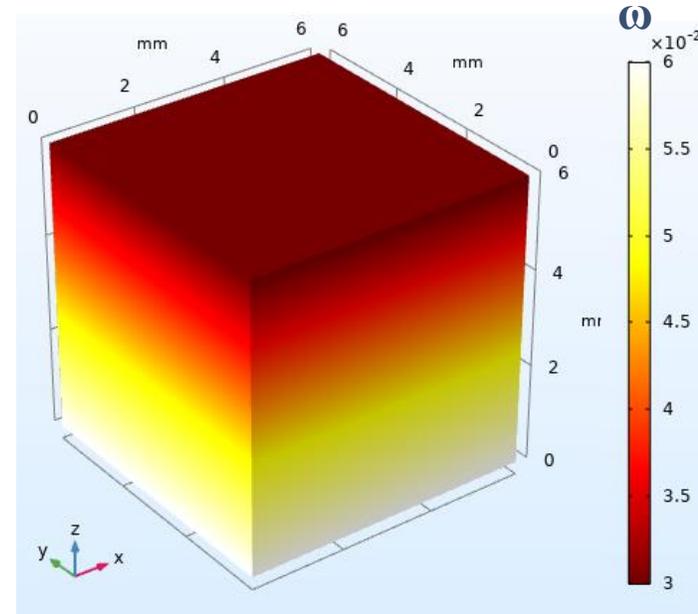
# Simulations numériques en 3D

Influence de la morphologie réelle du matériau

Bille de polystyrène



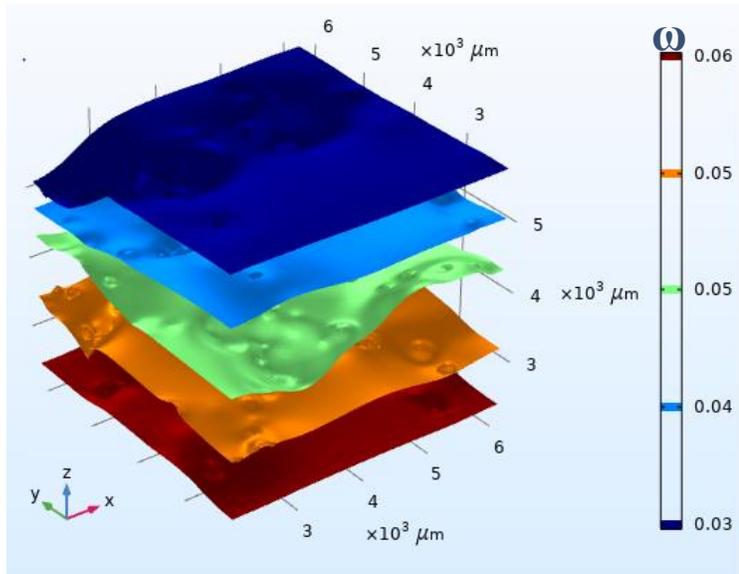
Volume réel



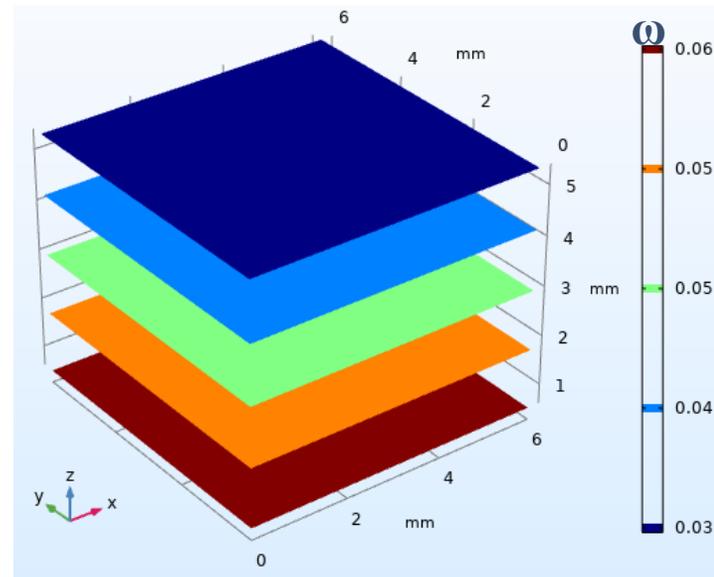
Volume homogène

# Simulations numériques en 3D

Influence de la morphologie réelle du matériau



Volume réel

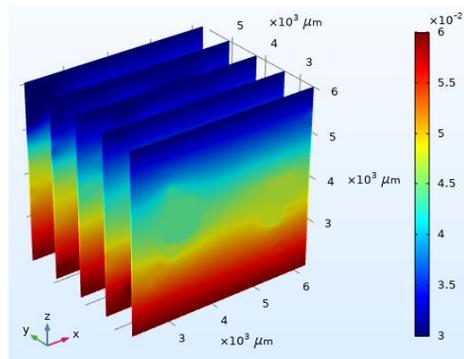


Volume homogène

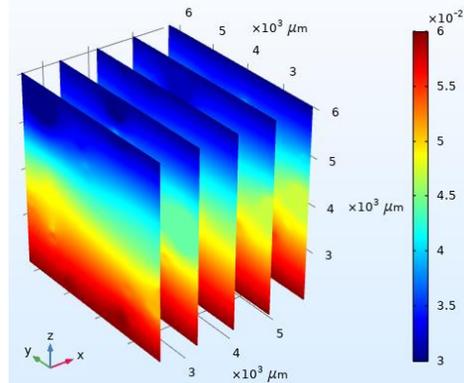
# Simulations numériques en 3D

Influence de la morphologie réelle du matériau

**Plan xz**

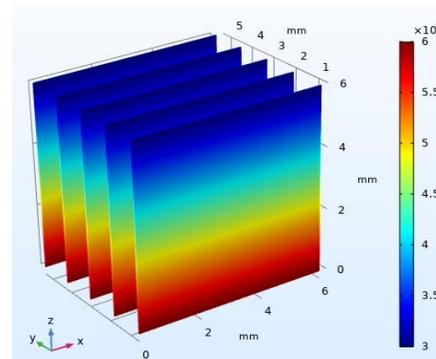


**Plan yz**

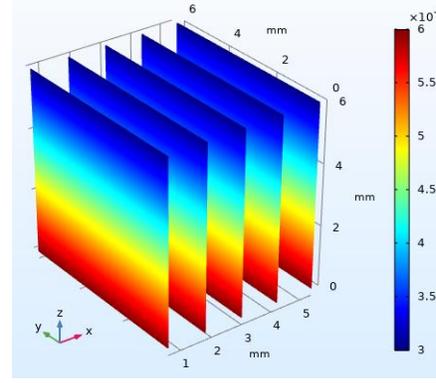


Volume réel

**Plan xz**



**Plan yz**



Volume homogène