

---

Thème

# TRANSFERTS THERMO-HYDRIQUES DANS LES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

---

**LOUBNA KAHLERRAS**

**Doctorante en cotutelle de thèse entre l'Université de  
Liège (Belgique) et l'Université de Constantine (Algérie)**

**sous la direction de : Pr. Angélique Léonard**

**Pr. Azzedine Belhamri**



# Pâte de ciment, mortier et béton

## ❖ Variété de bétons



- Les matériaux de base (type de grains et de ciment )
- Rapport eau/ciment (E/C) utilisé lors de la fabrication.

## ❖ Constitution du béton

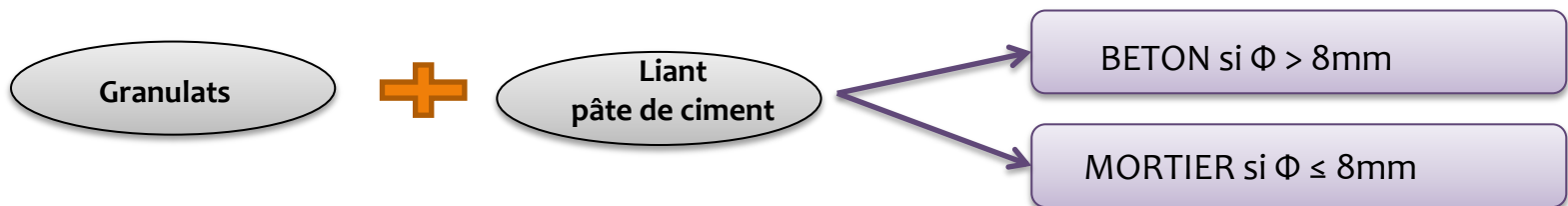


Solide : pâte cimentaire (7 à 14 % du volume total) liant les granulats (50 à 80 % du volume total)

Liquide : eau libre, absorbée ou capillaire (10 à 20 % du volume total)

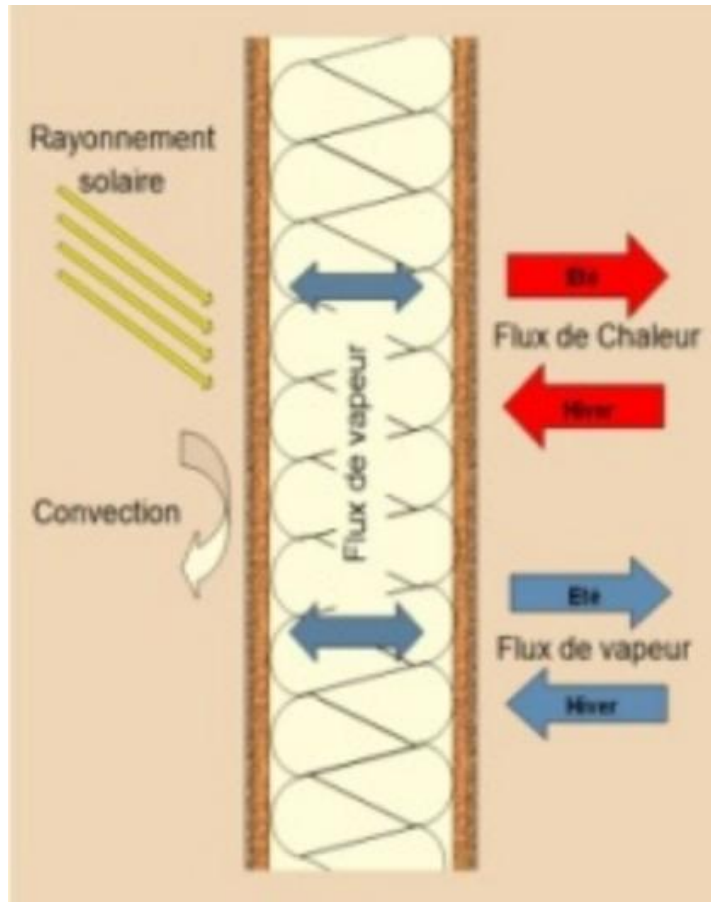
Gazeuse : air, vapeur d'eau (1 à 6 % du volume total)

## ❖ Différence entre béton mortier et pâte de ciment



# ➔ Problématique

Endommagement des parois soumise aux sollicitations de l'environnement



- **Maîtriser les transferts couplés de chaleur et d'humidité dans les matériaux**
- **Déterminer les propriétés physico-chimiques**

Diffusivité massique :  $D_{\text{eff}}$

Conductivité thermique :  $\lambda$

Coefficients de transfert de chaleur et de masse :  $\alpha$  et  $\beta$  .....

- **Caractériser la structure et microstructure** (porosité, distribution et taille des pores...)

# Composition des mortiers et des pâtes de ciment

composants	références	Mo4 Composition (en gramme)	Mo5 Composition (en gramme)	Mo6 Composition (en gramme)	Co4 Composition (en gramme)	Co5 Composition (en gramme)
sable	CEN	(1350±5) g	(1350±5) g	(1350±5) g	-	-
ciment	52,5 R HES	(450±2) g	(450±2) g	(450±2) g	(450±2) g	(450±2) g
eau	Eau distillée	(180±1) g	(225±1) g	(270±1) g	(180±1) g	(225±1) g
Rapport eau/ciment		0,4	0,5	0,6	0,4	0,5
Rapport sable/ciment		3	3	3	-	-

- Le sable **CEN**: un sable naturel siliceux, teneur en silice = 98%
- Le ciment de type: portland du type **52,5 R HES**.

# Contraintes sur la confection des éprouvettes et choix des dimensions

- ❑ Exigences sur la taille par rapport aux dispositifs expérimentaux.
- ❑ Des durées de séchage pas très longues.
- ❑ Un volume d'éprouvette représentatif du matériau



- Taille des cubes 20x20x15 mm
- Taille des cylindres 17x20 mm

# Réalisation des éprouvettes

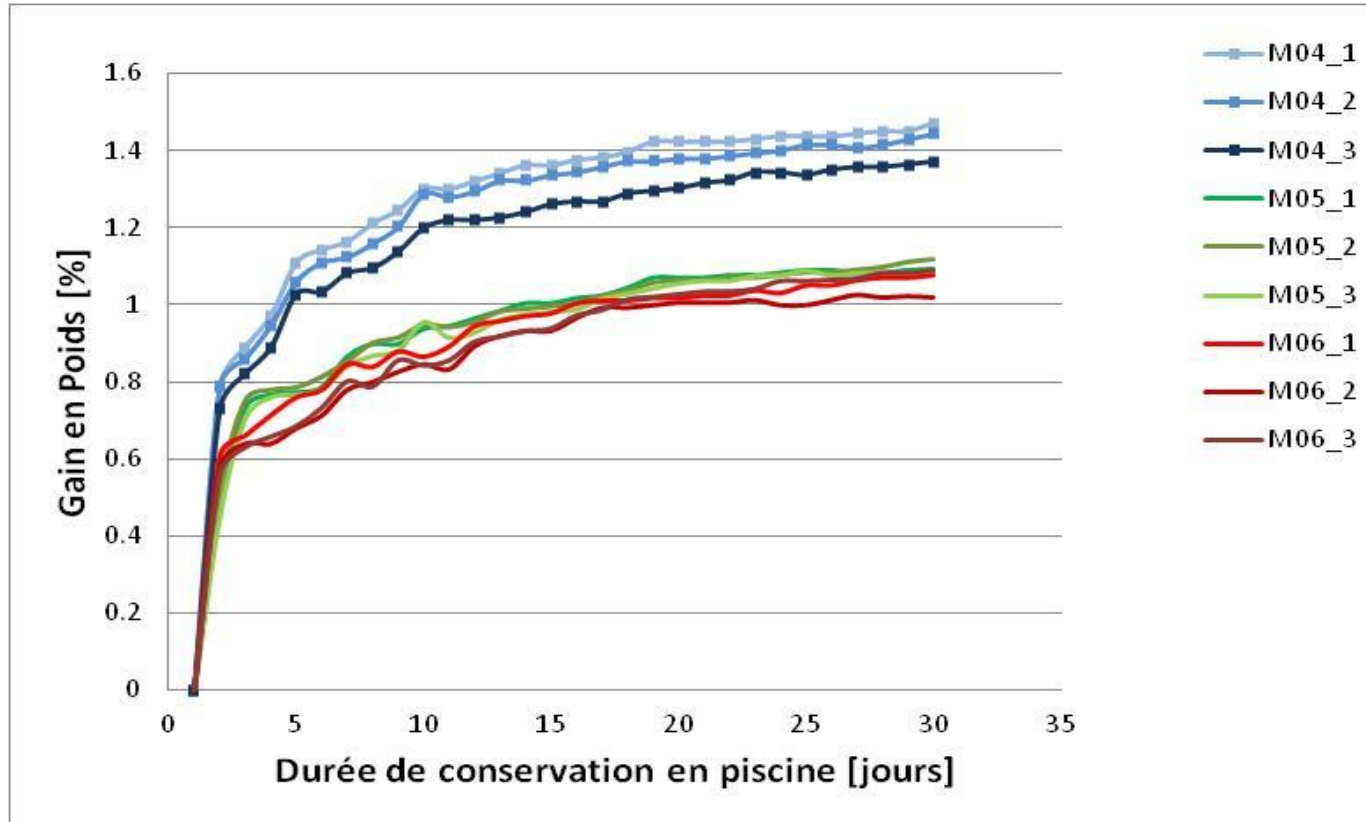
Préparation de la gâchée  
(malaxage)



Mortiers de ciments M04 M05 et M06  
(éprouvettes 20x20x160 mm)



# Maturation des éprouvettes



➤ Au bout de 28 jours, le poids est stable

Évolution du poids en fonction de la durée de maturation en piscine thermostatée (3 éprouvettes pour chacun des matériaux)

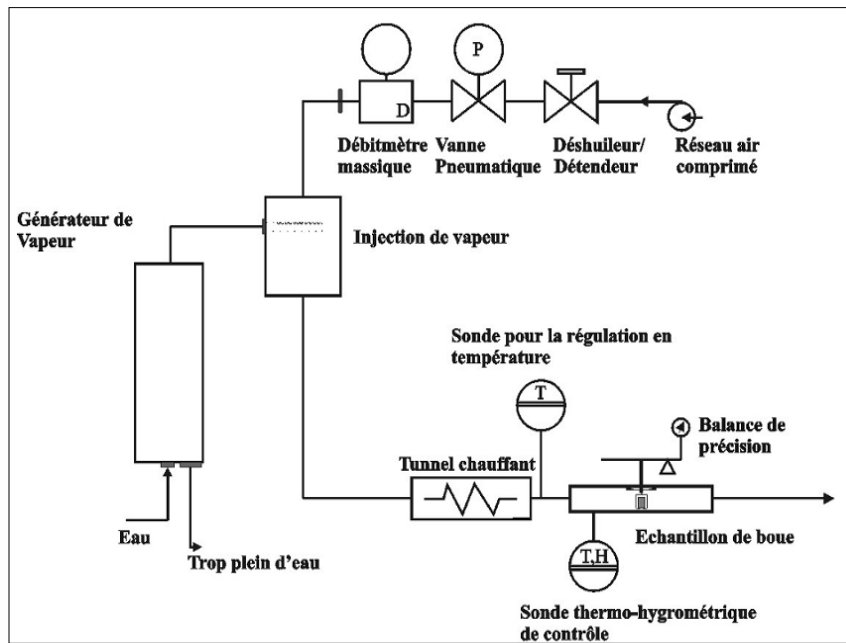
# Caractérisation des propriétés des matériaux

## D'un point de vue macroscopique.

- ✓ L'étude de l'influence du séchage sur les propriétés de transfert .
- ✓ L'obtention des gradients hydriques à l'intérieur des matériaux testés.

# Séchage thermique par convection forcée

## Schéma du microsécheur convectif



## Microsécheur convectif

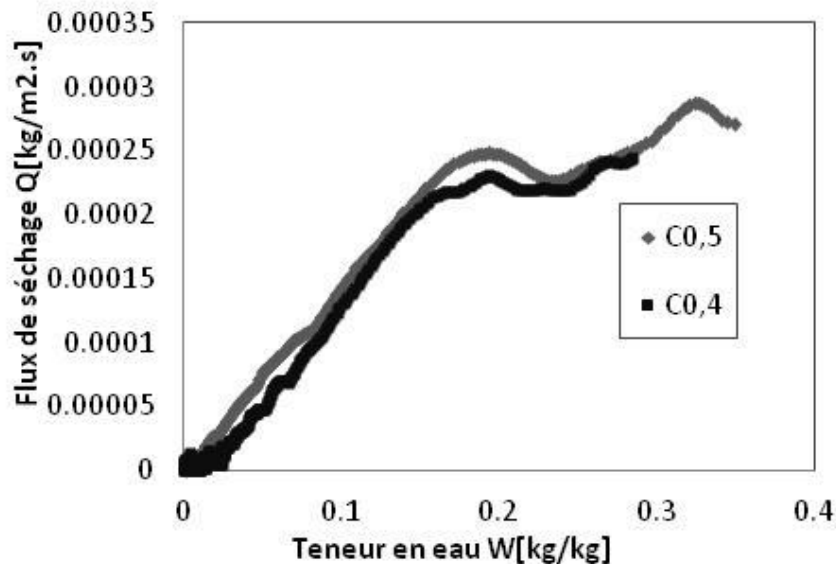


# Résultats expérimentaux

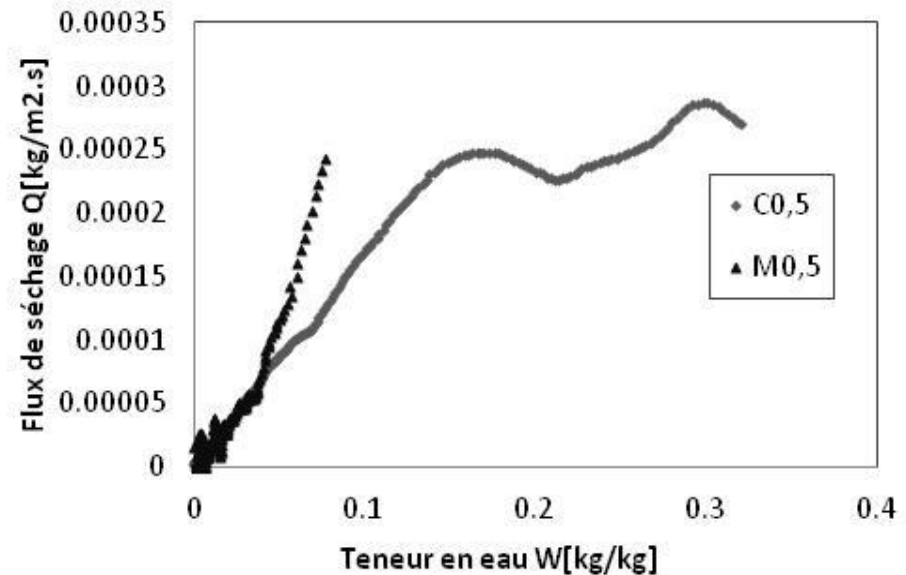
## Cinétique de séchage : influence du rapport e/c et des granulats

Courbe de Kricher de la pâte de ciment et influence du rapport e/c sur deux types de pâte de ciment ; C05 et C04

Comparaison de la cinétique de séchage du mortier M05 et de la pâte de ciment C05



(a)

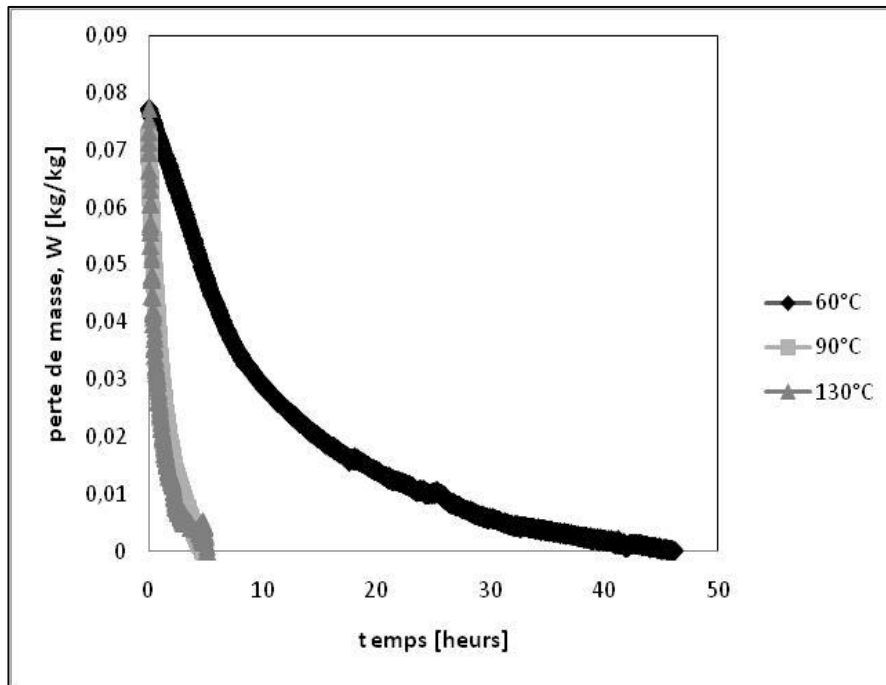


(b)

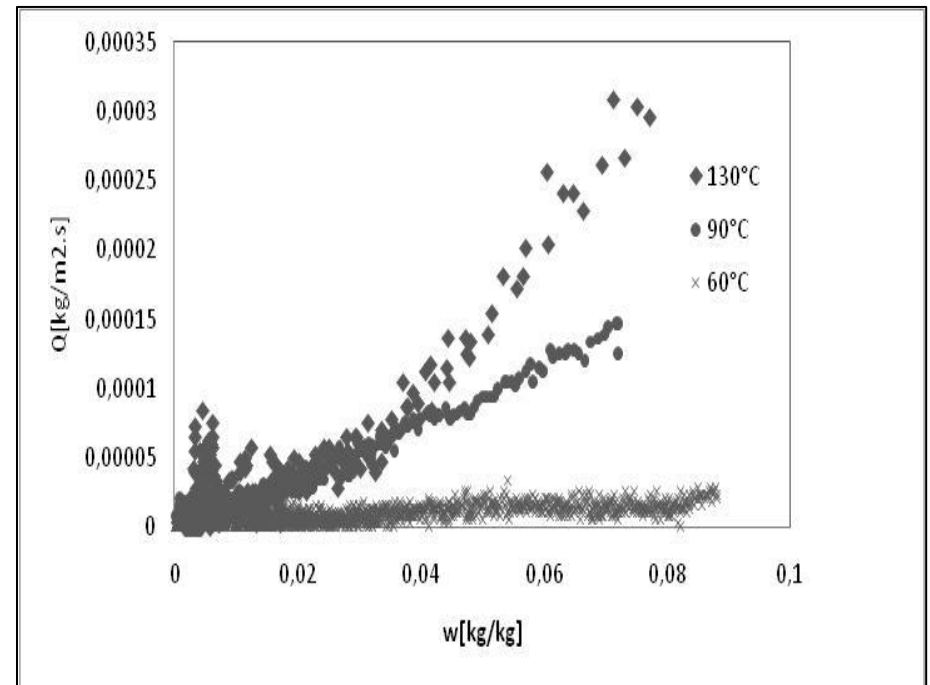
# Résultats expérimentaux

## Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

Évolution de la teneur en eau du mortier pour différentes températures de l'air de séchage ( $H_r \approx 1\%$ , vitesse de l'air = 2m/s)



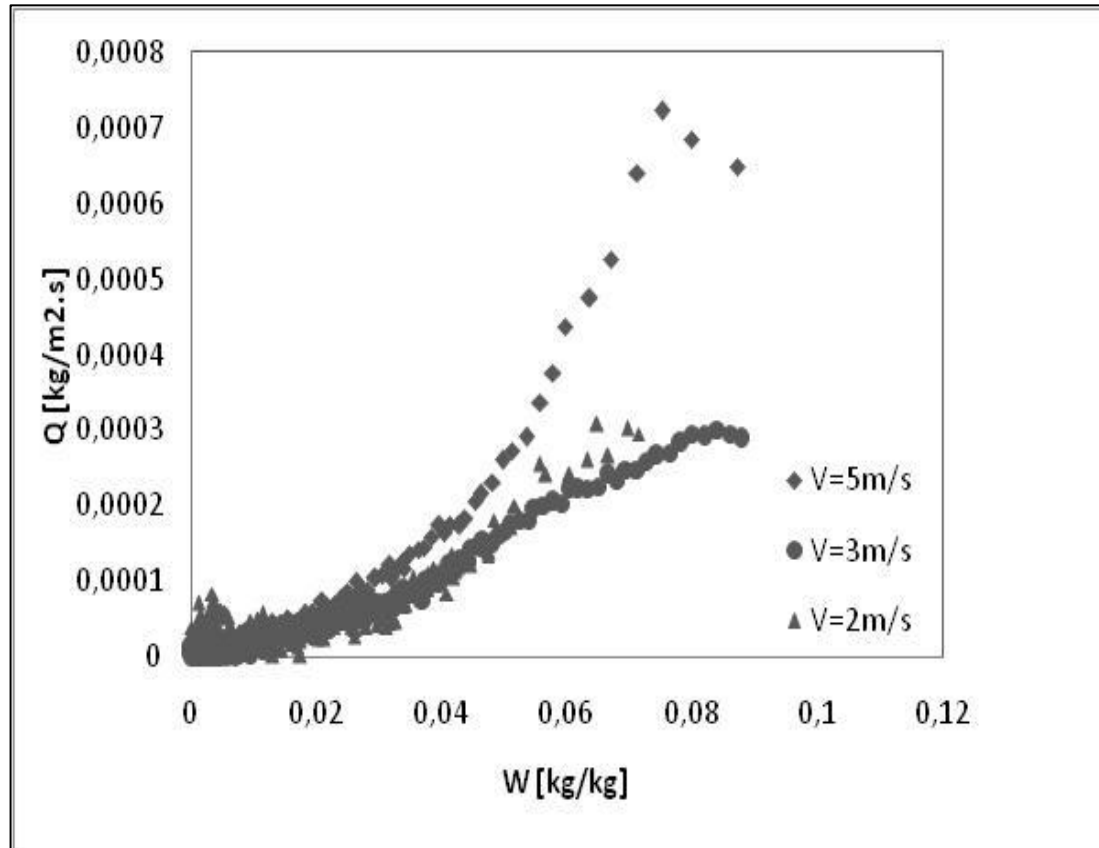
Influence de la température de séchage sur la cinétique de séchage du mortier M05, ( $H_r = 1\%$ , vitesse de l'air = 2m/s)



# Résultats expérimentaux

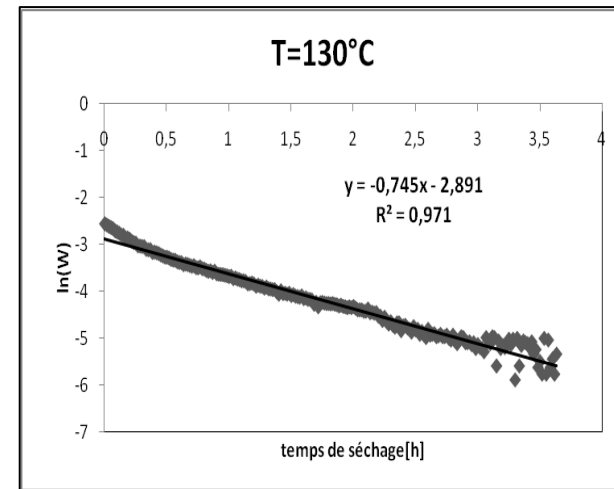
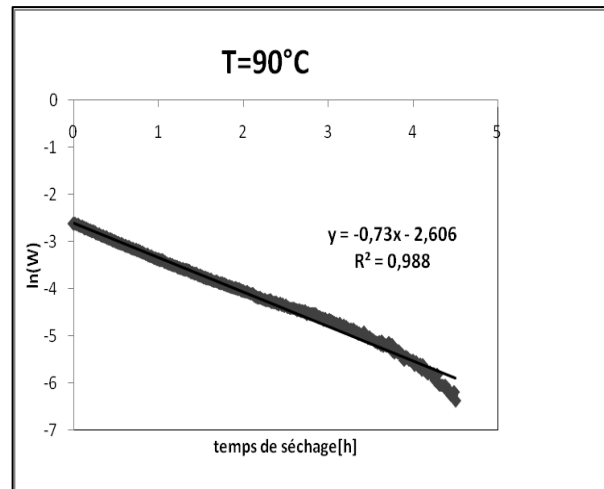
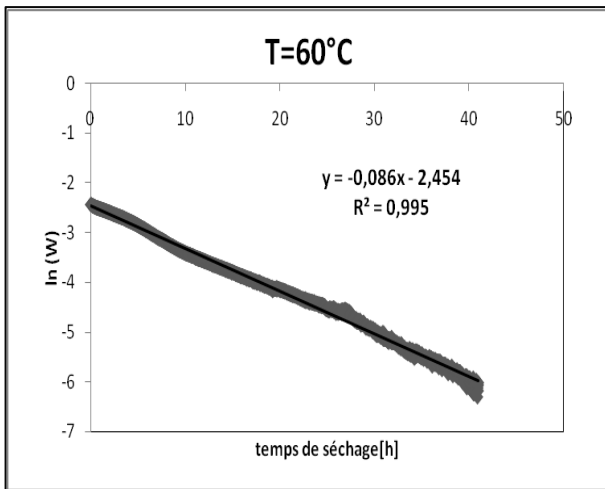
## Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage

Influence de la vitesse sur la cinétique  
de séchage du mortier M05 ( $H_r=1\%$ ,  $T=130^\circ\text{C}$ )



# Quelques résultats représentatifs

□ Calcul du coefficient de diffusion effectif " $D_{eff}$ " de la pâte de ciment pour différentes températures de séchage



$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{eff} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)$$

Température [°C]	Diffusivité effective [m <sup>2</sup> /s]
60	1.64 10 <sup>-10</sup>
90	13.95 10 <sup>-10</sup>
130	14.23 10 <sup>-10</sup>

# Quelques résultats représentatifs

## □ Calcul des coefficients de transfert de chaleur et de masse externes

température de l'air de séchage °C	vitesse de l'air de séchage m/s	$\alpha$ [m/s]	$\beta$ [w/m <sup>2</sup> °C]
60°C	V=2m/s	0.055 m/s	7.71 w/m <sup>2</sup> °C
130°C	V=2m/s	0.023 m/s	14.77 w/m <sup>2</sup> °C
130°C	V=5m/s	0.045 m/s	28.64 w/m <sup>2</sup> °C

$$\alpha = \frac{Q}{\rho_{v0}(T_h) - \rho_{vair}}$$

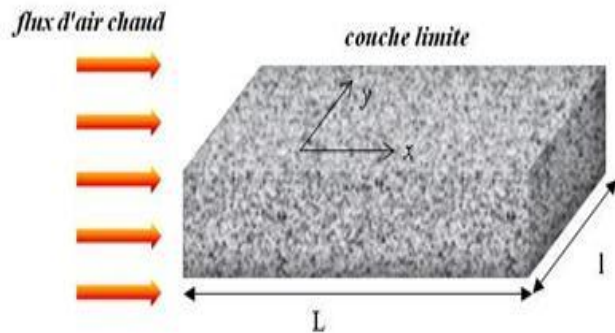
$$\beta = \frac{Q^* L}{\rho_{air} - T_h}$$

Q : Le flux de séchage durant la phase à flux constant

$\rho_o$  ,  $\rho_{vair}$  La masse volumique de la vapeur d'eau à la température humide de la paroi ( $T_h$ ) et la masse volumique de cette vapeur à la température de l'air ( $T_{air}$ ) respectivement.

L : la chaleur latente d'évaporation.

# Couplages des transferts thermo-hydriques pendant le séchage d'une paroi en béton



▪ Équations gouvernant les transferts à la surface de la paroi « équations de la couche limite »

✓ Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

✓ Equation de conservation de la quantité de Mouvement

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

✓ Equation de conservation de l'énergie

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

✓ Equation de conservation des espèces

$$u \frac{\partial C_v}{\partial x} + v \frac{\partial C_v}{\partial y} = D_v \frac{\partial^2 C_v}{\partial y^2}$$

▪ Équations gouvernant les transferts à l'intérieur de la paroi

□ L'équation de diffusion

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)$$

Diffusivité  
massique

□ L'équation de l'énergie

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \Delta h_v \frac{\partial \dot{m}_v}{\partial y}$$

↑  
La chaleur  
volumique

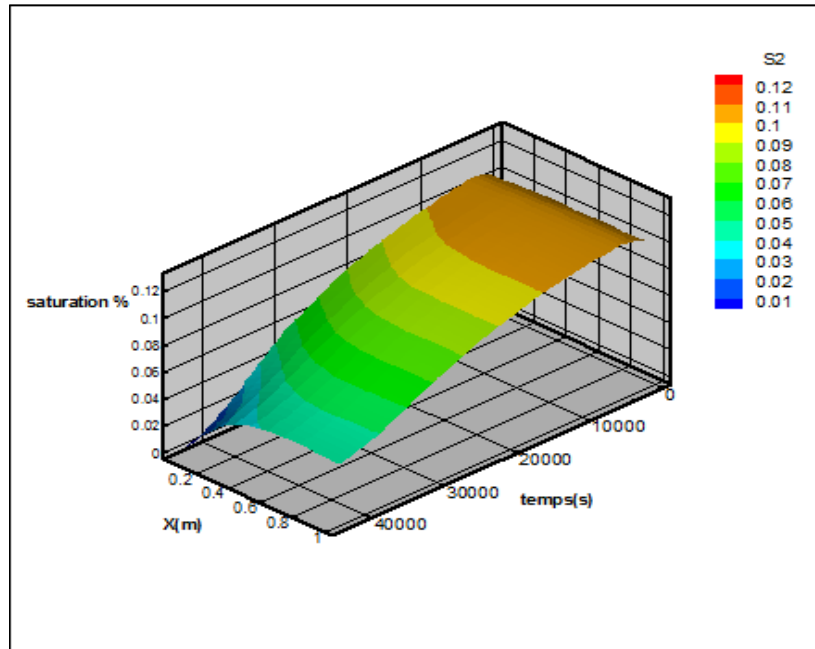
↑  
Chaleur latente  
de vaporisation

Flux massique  
d'évaporation

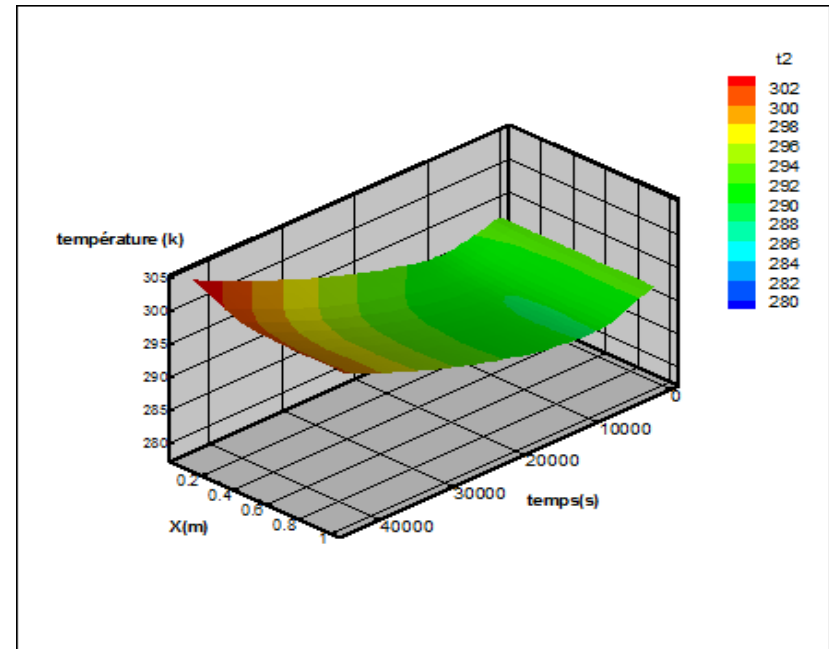


# Résultats de la simulation numérique

Évolution spatiotemporelle de l'humidité  $S(x, t)$  à l'intérieur de la paroi durant le séchage



Évolution spatiotemporelle de la température  $T(x, t)$  à l'intérieur de la paroi durant le séchage



- ✓ Séchage progressif de la paroi dans le sens de l'écoulement.
- ✓ Effet de la couche limite sur le processus de séchage.
- ✓ Séchage non homogène, peut causé des déformations.

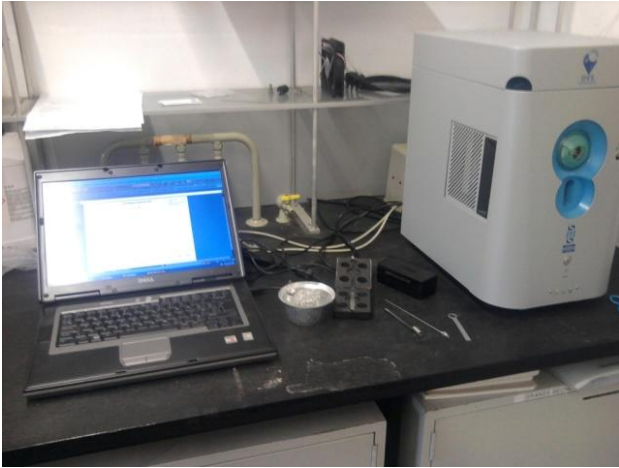
---

# Caractérisation des propriétés des matériaux D'un point de vue microscopique.

- ❑ Au moyen d'isothermes d'adsorption/désorption par DVS
- ❑ Par porosimétrie à mercure.
- ❑ Observation au micro-tomographe à rayons X .

# □ Mesure des isothermes de sorption

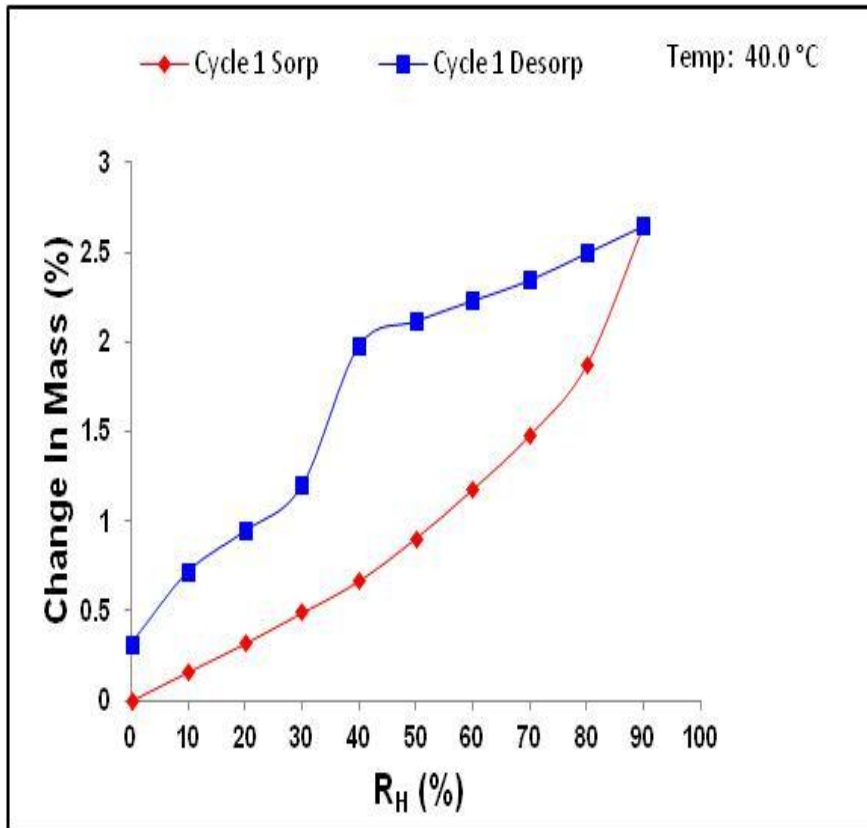
## Conditions isothermes



- Mesurer les isothermes de sorption de l'eau sur: le mortier, la pâte de ciment et le sable
- Méthode dynamique DVS (Dynamic Vapor Sorption) : durée de l'essai 2 semaines. Méthode gravimétrique (solutions salines saturées) : durée de l'essai > an.
- Poids maximum toléré 1mg, petits morceaux de quelques millimètres provenant du concassage des échantillons de mortier et de pâte de ciment séchés préalablement dans une étuve à 90°C.
- Essais sur le sable sec normalisé (CEN, EN 196-1, ISO 679).
- Essais pour différentes taille des concassas (différents poids)

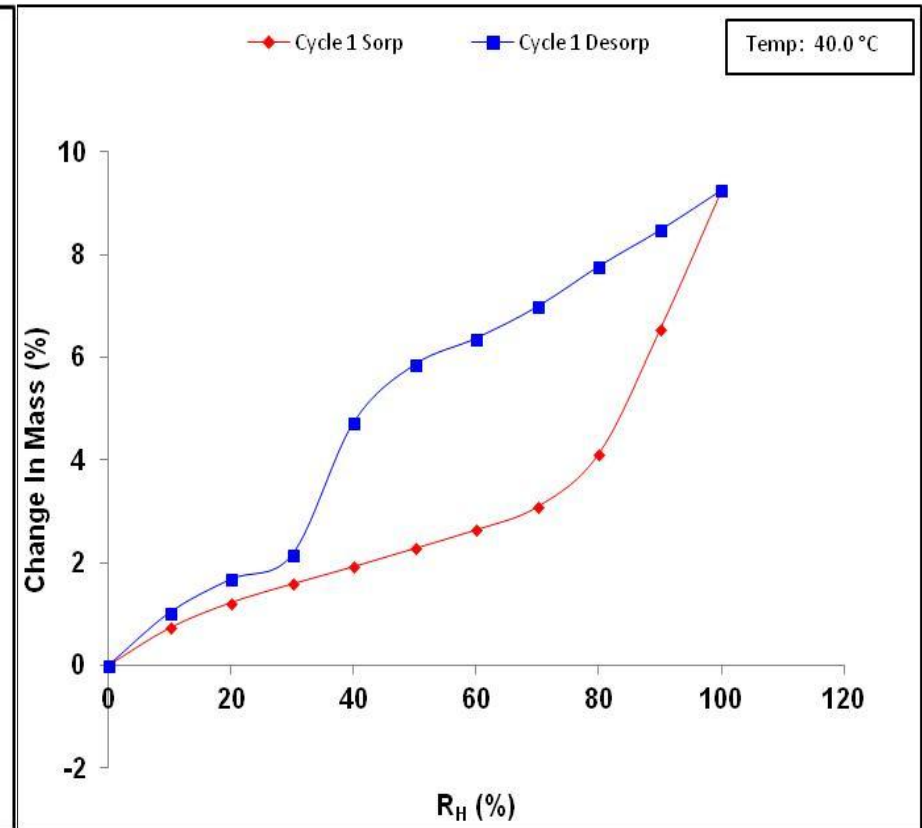
# Courbes de sorption obtenues par DVS

Isothermes de sorption de la vapeur d'eau du Mortier de ciment Mo4



(a)

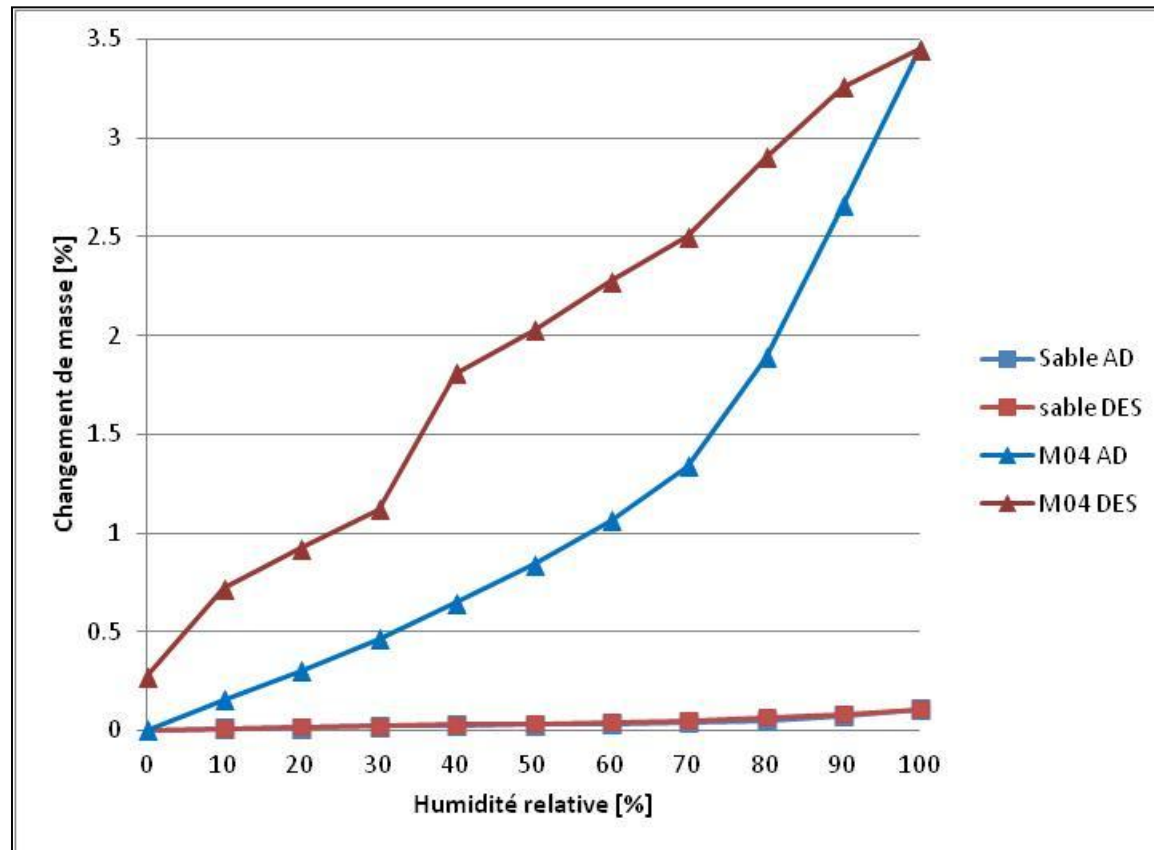
Isothermes de sorption de la vapeur d'eau de la pâte de ciment Co4



(B)

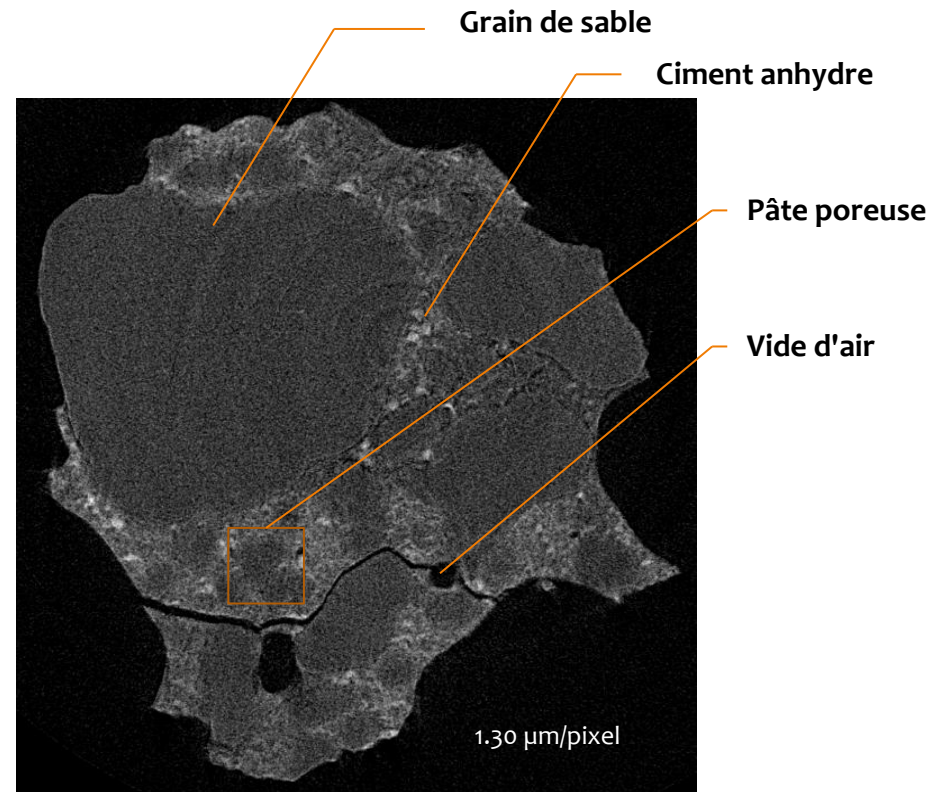
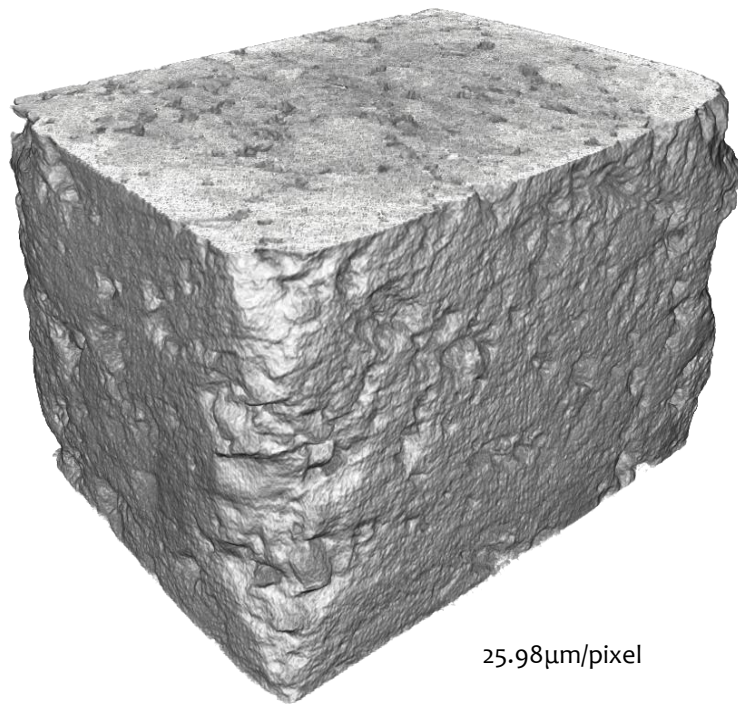
# Courbes de sorption obtenues par DVS

Isothermes de sorption de la vapeur d'eau sur le Mortier de ciment M04 et sur le sable



# □ Observation au micro-tomographe à rayons X

Reconstruction 3D des données tomographiques et coupe issue de cette reconstruction



# Suite des travaux

**Poursuivre la caractérisation des matériaux**

**Effectuer les essais de porosimétrie à mercure**

**L'obtention des dimensions des pores et leurs distribution  
pour chacun des matériaux**

**L'impacte de l'âge du matériau et sa durée d'hydratation sur  
la porosité**

**L'adaptation du modèle numérique élaboré à sa validation ...**

---

# Merci pour votre attention