

Carbonatation des matériaux cimentaires

- Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation
 - Etude des « Ecobétons »
- Analyse d'un essai de carbonatation accéléré

Philippe TURCRY

Université de La Rochelle - LaSIE

philippe.turcry@univ-lr.fr

Contexte & enjeux

Contexte & enjeux

Durabilité des ouvrages en béton armé (BA)

Exemple emblématique :

Viaduc de Millau livré en 2004

Durée de vie prévue = **120 ans**



Bruno Auroy (août 2013)

Contexte & enjeux

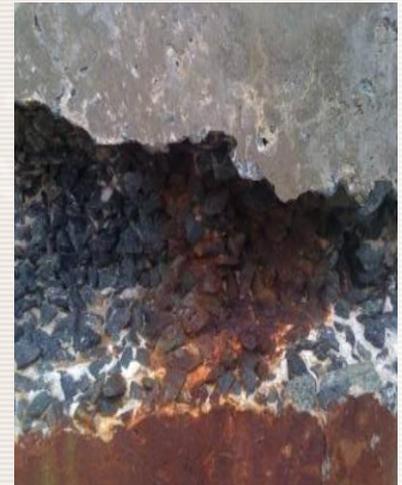
Durée de vie réelle des structures en BA ?

Exemple :

Pont de l'Île de Ré livré en 1988

Durée de vie prévue = **100 ans**

Dégradations constatées en 2010 :



PY Mahieux

Contexte & enjeux

Durée de vie réelle des structures en BA ?

Statistiques des services de l'Équipement (CETE de l'Ouest - 2010)

Durée de vie théorique = **100 ans**

En moyenne, âge de démolition :

→ ponts en béton armé = **51 ans !**

→ ponts en béton précontraint = **31 ans !**

Age moyen des ponts en service = **36 ans**

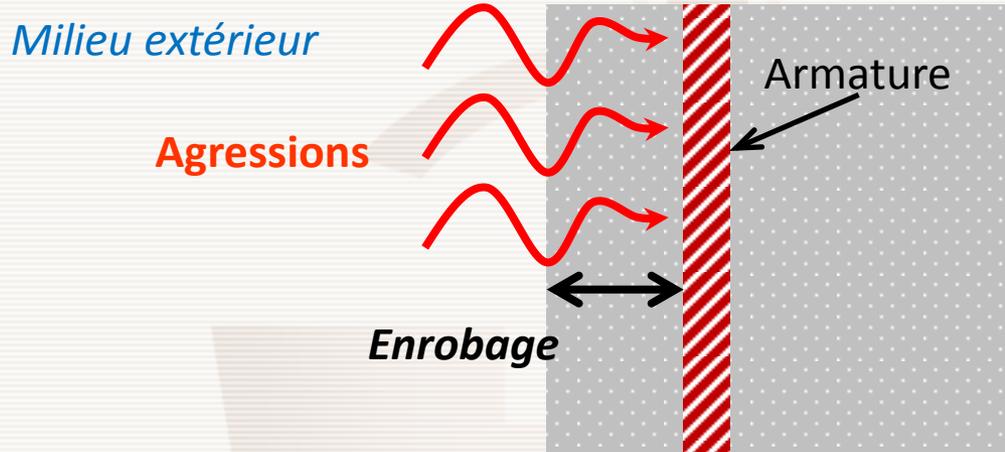
Causes des dégradations :

Corrosion des aciers due à un enrobage de mauvaise qualité



Contexte & enjeux

Zone d'intérêt pour la durabilité : l'enrobage



Eurocode 2 :
Enrobage minimal = 20 mm

Durée de vie d'une structure en BA

~ Temps que vont mettre les **espèces agressives** à **atteindre** les armatures

→ CO₂ de l'air ambiant

→ Ions Chlorures (cf. cours O. Millet)

Contexte & enjeux

Carbonatation des matériaux cimentaires

Carbonatation = réaction de la matrice cimentaire avec le CO_2 de l'air ambiant

Principale conséquence :

- ⇒ **Acidification** de la matrice : pH initial $\sim 13 \rightarrow \text{pH} < 9$
- ⇒ **Dépassivation** des aciers
- ⇒ Risque de **corrosion**



Contexte & enjeux

Etudier la carbonatation en 2013 ?

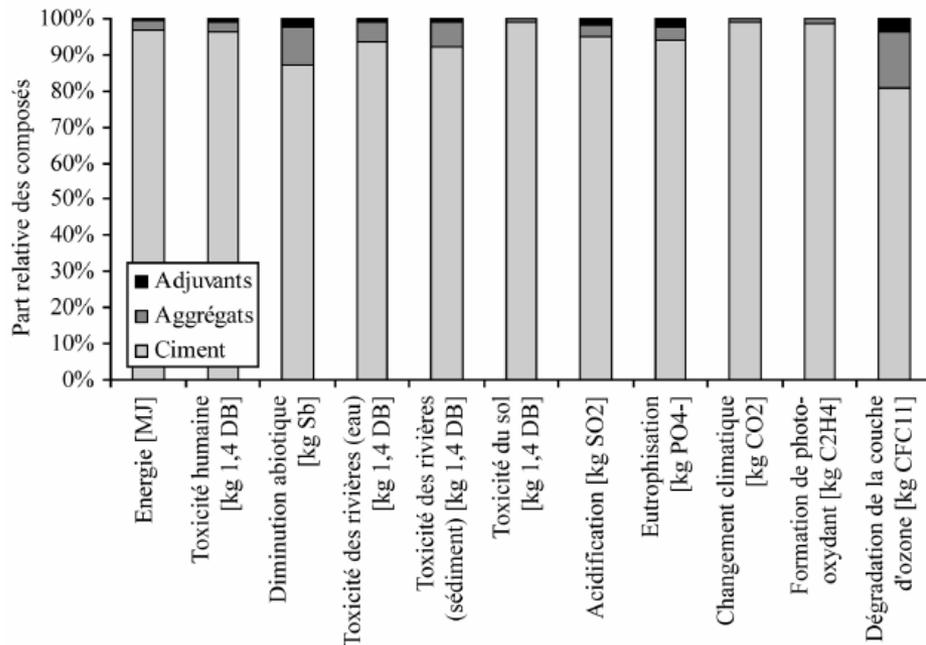
- Durabilité des ouvrages d'art anciens et récents
- Approche performantielle (cf cours E. Rozière)
(Projet National « PerfDub » prévu pour 2014)
- De « nouveaux bétons » à faible impact sur l'environnement

Contexte & enjeux

Vers des bétons à faible impact sur l'environnement

1^{ère} approche pour réduire l'impact sur l'environnement du béton :

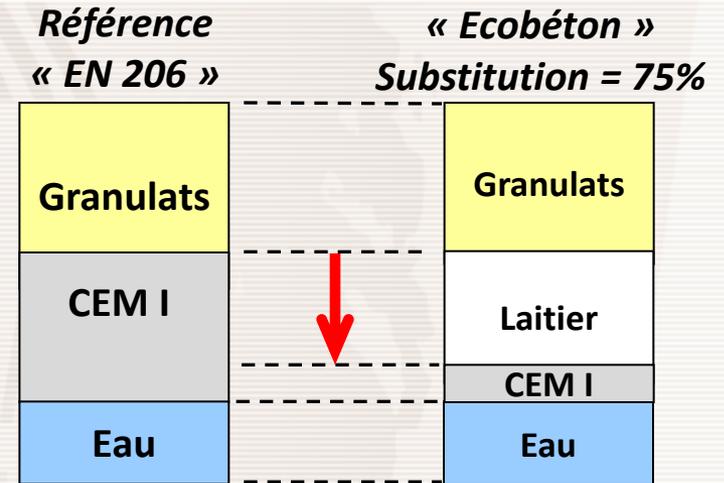
Ciment = 1^{er} contributeur aux impacts



(Habert et al, 2008)

Réduire le dosage en ciment

⇒ Remplacement partiel par d'autres liants



(Khohkar et al, 2010) (Projet ANR Ecobéton, 2010)

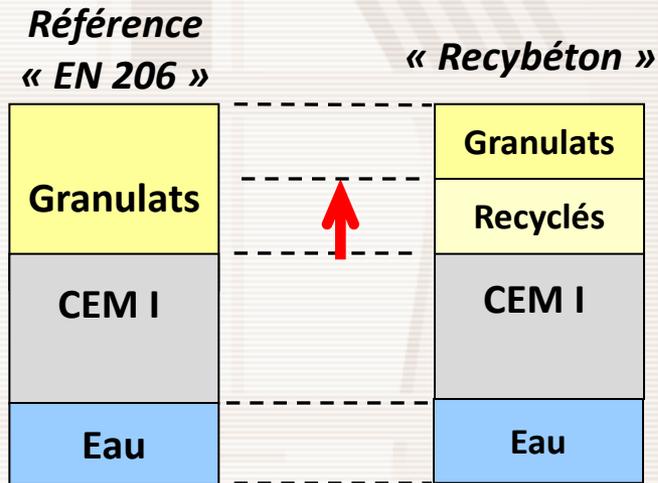
Contexte & enjeux

Vers des bétons à faible impact sur l'environnement

2^{ème} approche pour réduire l'impact sur l'environnement du béton :

Réduire la consommation de « ressources naturelles »

⇒ Utilisation généralisée de granulats « recyclés » (issus de béton de démolition)



(Projet ANR Recybéton, en cours)

Contexte & enjeux

Etudier la carbonatation en 2013 ?

→ Durabilité des ouvrages d'art anciens et récents

→ Approche performantielle (cf cours E. Rozière)

→ De « nouveaux bétons » :

↳ **Performances des « Ecobétons » vis-à-vis de la carbonatation ?**

Contexte & enjeux

Dans la suite, on prend pour exemple les matériaux suivants :

(Younsi, 2011) (Projet ANR Ecobéton)

Ref I	Ref III	L 30	L 75
100% CEM I 52,5	CEM III / C 32,5 (85% laitier)	70% CEM I 52,5	25% CEM I 52,5
		30% laitier	75% laitier
Eau	Eau	Eau	Eau

	Ref I	Ref III	L 30	L 75
CEM I 52.5 N	301	0	219	103
CEM III/C 32.5 N	0	361	0	0
Laitier	0	0	94	310
Eau efficace	182	184	182	170
Superplastifiant	0	1	0.26	1.89
A/(A+C)	0	0	0.30	0.75
E/(A+C)	0.60	0.48	0.58	0.41
$f_{c_{28j}}$ (MPa)	36	31	36	40

- **Ref I, Ref III et L30** conformes à la norme NF EN 206 (classe XC3)
- **L75** non conforme mais $f_{cm2j} > 10\text{MPa}$ et $f_{cm28j} > 35\text{MPa}$

Carbonatation des matériaux cimentaires

Carbonatation des matériaux cimentaires

Phénoménologie de la carbonatation

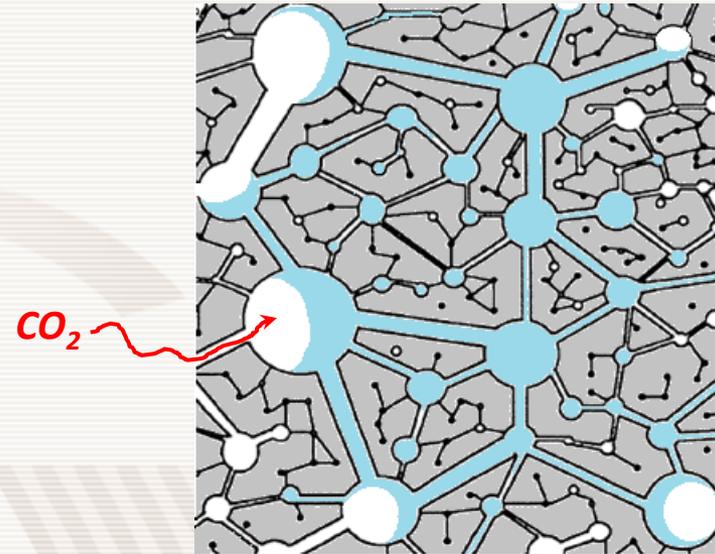
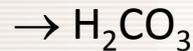
1) Diffusion du CO_2 gazeux dans la porosité

$$\text{Loi de Fick : } J_{CO_2g} = D_{CO_2} \text{ grad } [CO_2]_g$$

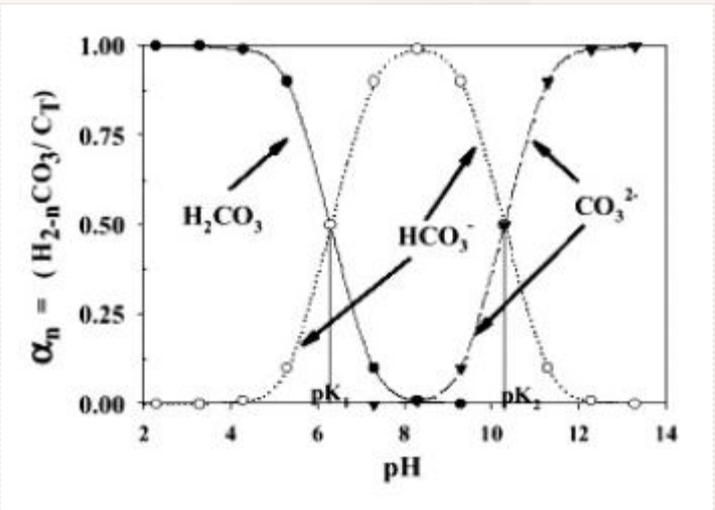
2) Dissolution du CO_2 gazeux

$$\text{Loi de Henri : } [CO_2]_g = H [CO_2]_{\text{dissout}}$$

Différentes formes du CO_2 dissout :



(d'après Houst, 1992)



(Delmi, 2004)

Carbonatation des matériaux cimentaires

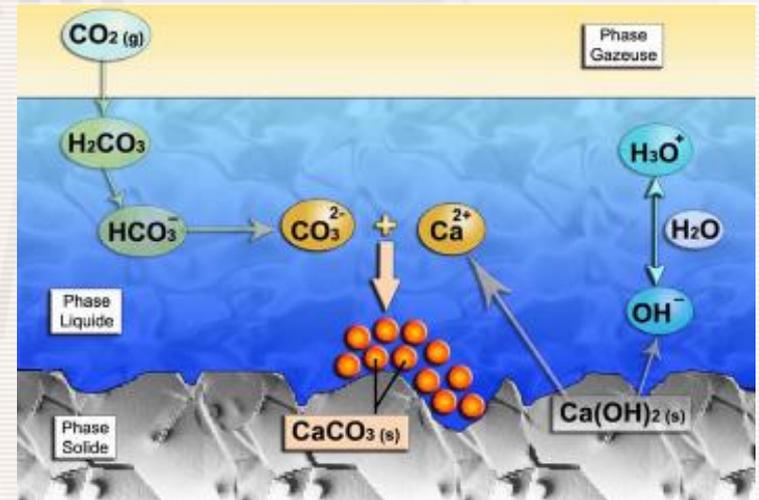
Phénoménologie de la carbonatation

2^{bis}) Dissolution des hydrates (exemple de la Portlandite)



3) Diffusion des ions en solution

4) Réaction « CO₂ dissous » / « hydrates dissous »

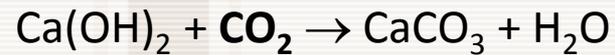


(Thiery, 2005)

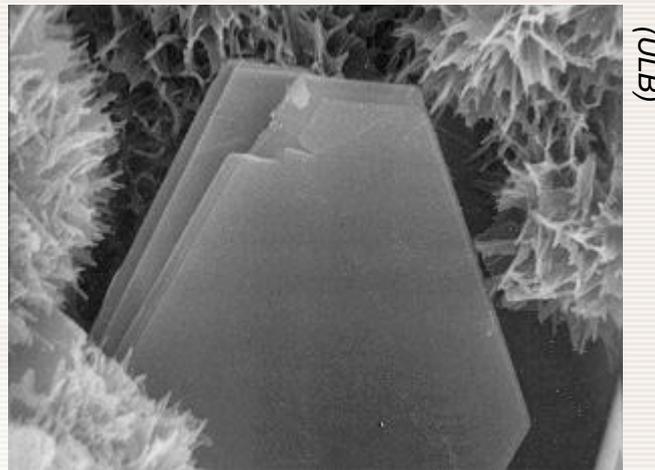
Carbonatation des matériaux cimentaires

Phénoménologie de la carbonatation

Bilan macroscopique de la carbonatation de la **Portlandite** :



En réalité, les autres constituants de la matrice (**CSH**, anhydres) se carbonatent également.



Carbonatation des matériaux cimentaires

Phénoménologie de la carbonatation

Carbonatation = phénomène **complexe** car modification du matériau en cours de carbonatation :

- diminution de la porosité et changement de la distribution poreuse
- variation du degré de saturation en eau
- accessibilité moindre de la Portlandite

Donc forts **couplages** entre phénomènes de transfert et chimie

Carbonatation des matériaux cimentaires

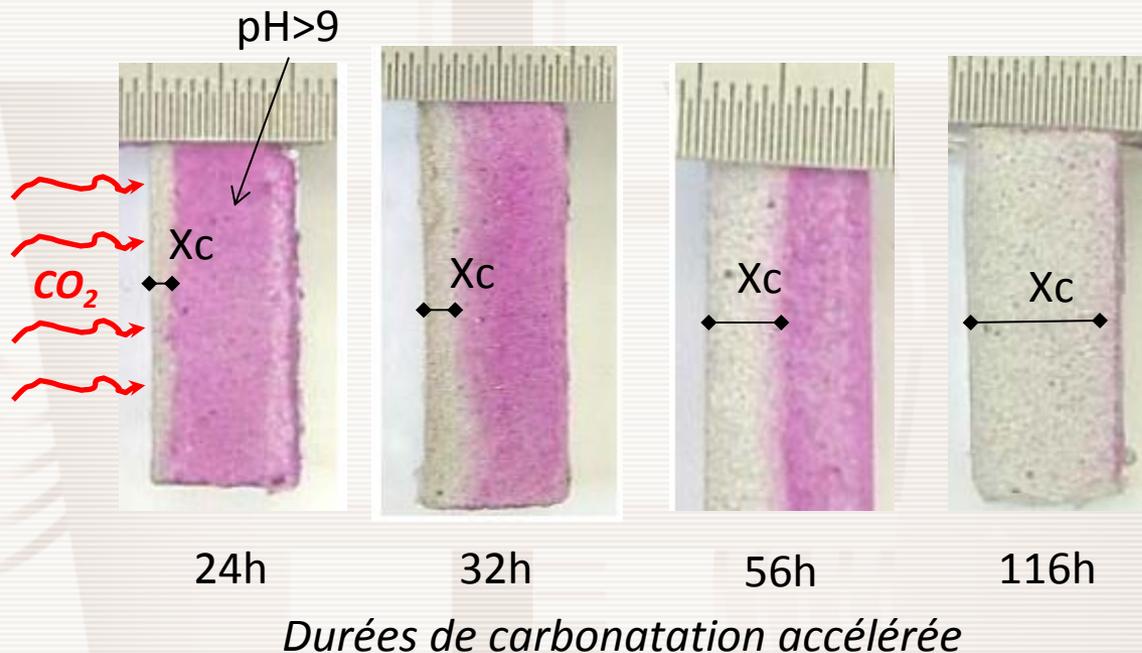
Mise en évidence expérimentale de la carbonatation

Carbonatation des matériaux cimentaires

Mise en évidence expérimentale de la carbonatation

- *Mise en évidence du changement de pH :*

Pulvérisation d'un indicateur de pH (phénolphthaléine) sur un échantillon fendu
→ Profondeur de carbonatation (X_c)



(Omikrine-Metalssi, 2006)

Carbonatation des matériaux cimentaires

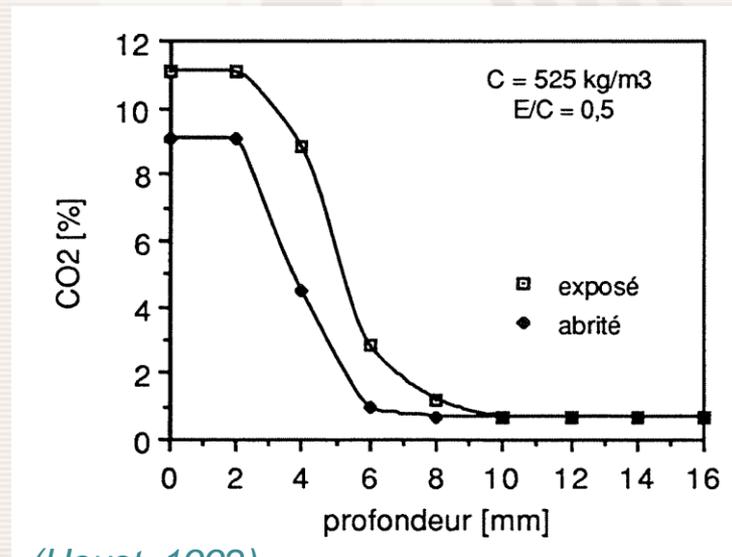
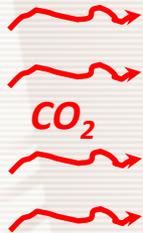
Mise en évidence expérimentale de la carbonatation

- *Mise en évidence du changement de pH :*

Intérêt : méthode rapide

Limites :

- corrosion possible pour $\text{pH} > 9$
- carbonatation réelle plus progressive

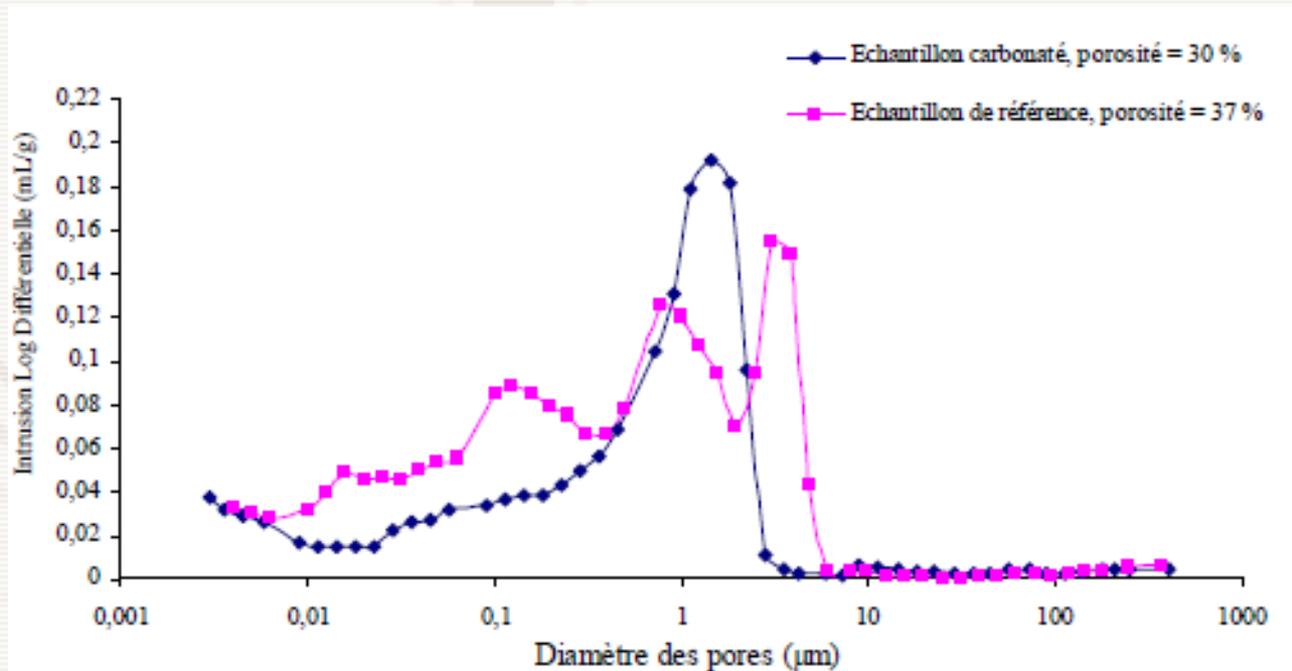


(Houst, 1992)

Carbonatation des matériaux cimentaires

Mise en évidence expérimentale de la carbonatation

- *Mise en évidence de la modification de la microstructure:*
Diminution de la porosité et modification de la distribution poreuse

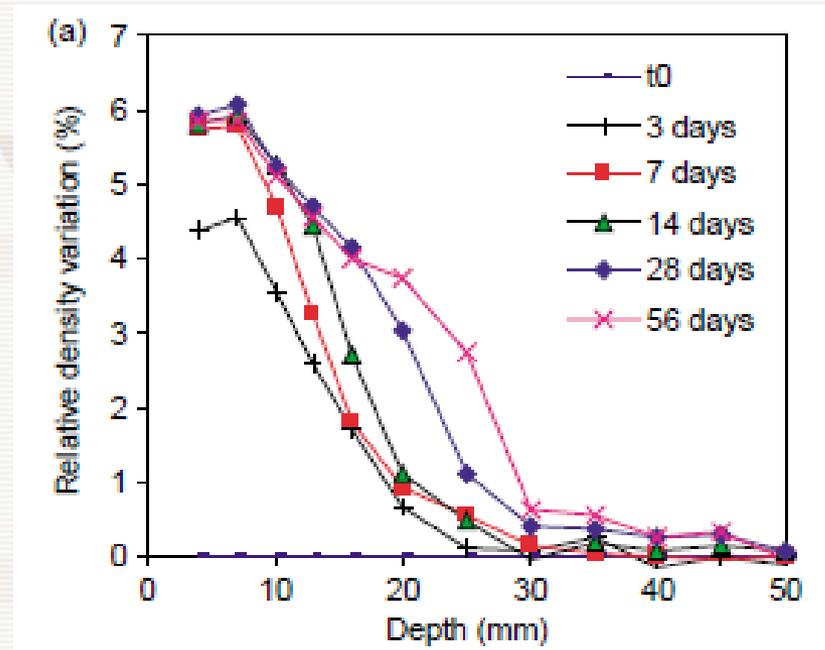
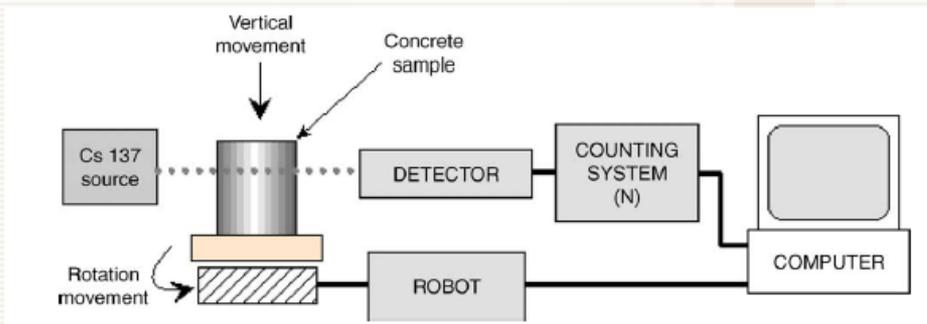


(Omikrine-Metalssi, 2006)

Carbonatation des matériaux cimentaires

Mise en évidence expérimentale de la carbonatation

- *Mise en évidence de la modification de la microstructure:*
Gammadensimétrie (Villain et al, 2006)

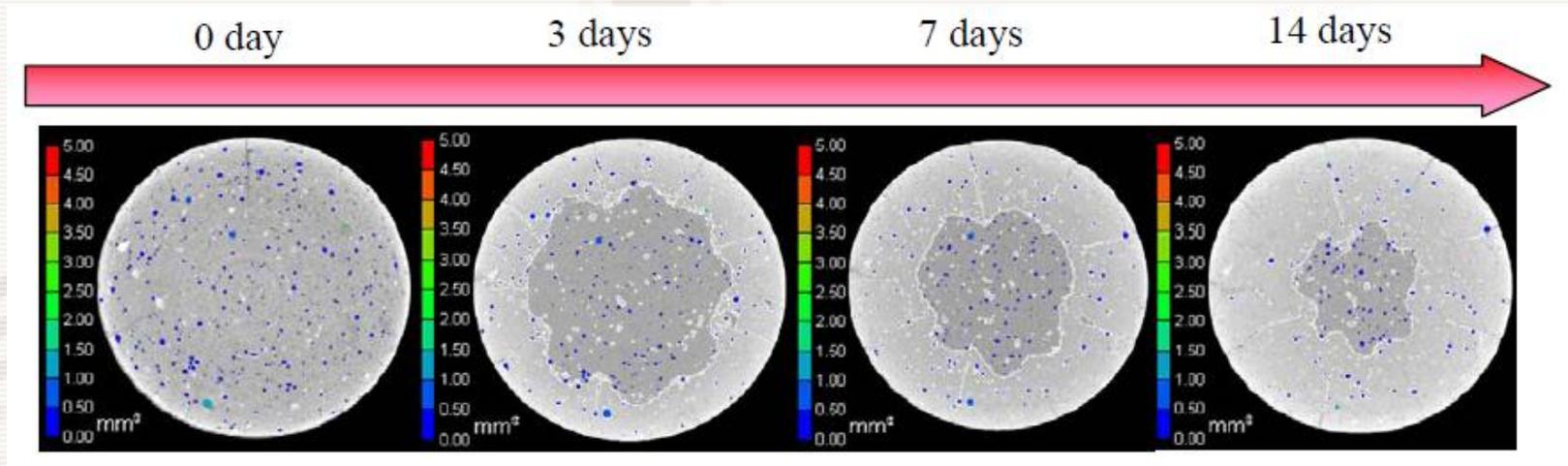


Carbonatation des matériaux cimentaires

Mise en évidence expérimentale de la carbonatation

- *Mise en évidence de la modification de la microstructure:*

Tomographie par absorption de rayon X (*Han et al, 2012*) (*Wan et al, 2014*)

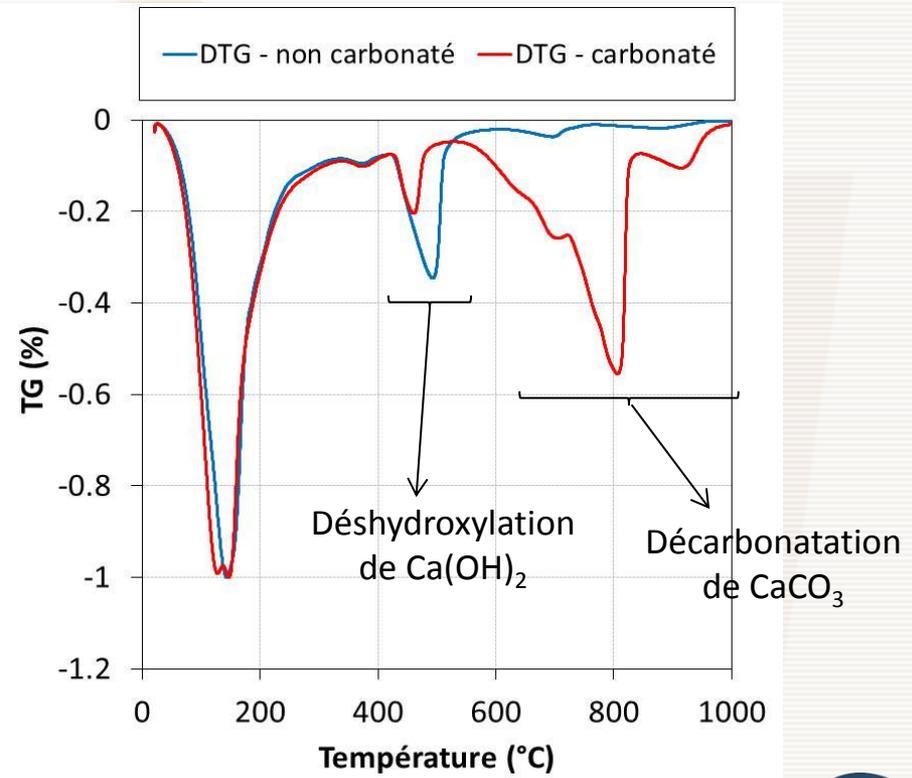
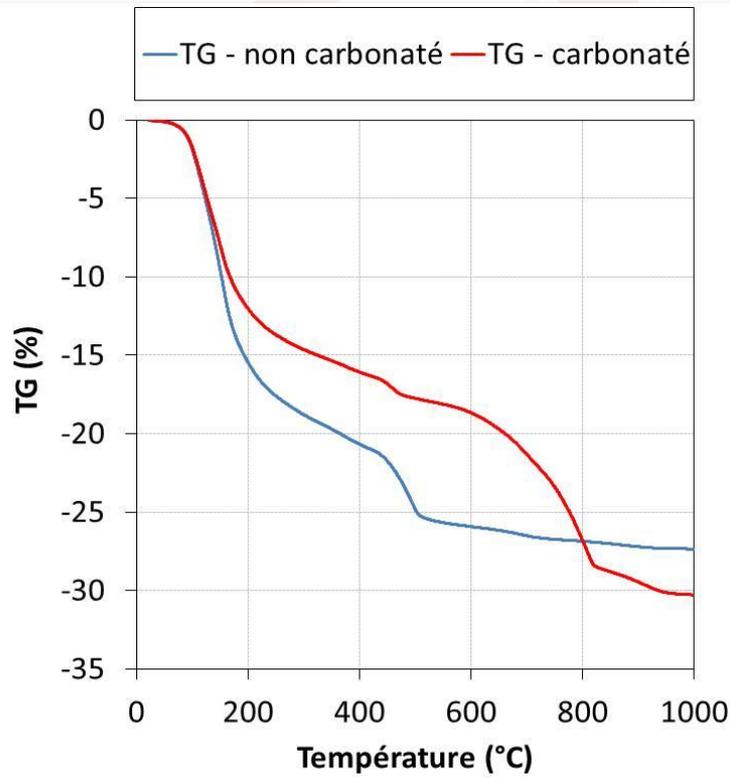


Carbonatation des matériaux cimentaires

Mise en évidence expérimentale de la carbonatation

- Mise en évidence de la modification de minéralogie:

Analyse Thermo-Gravimétrique (ATG)

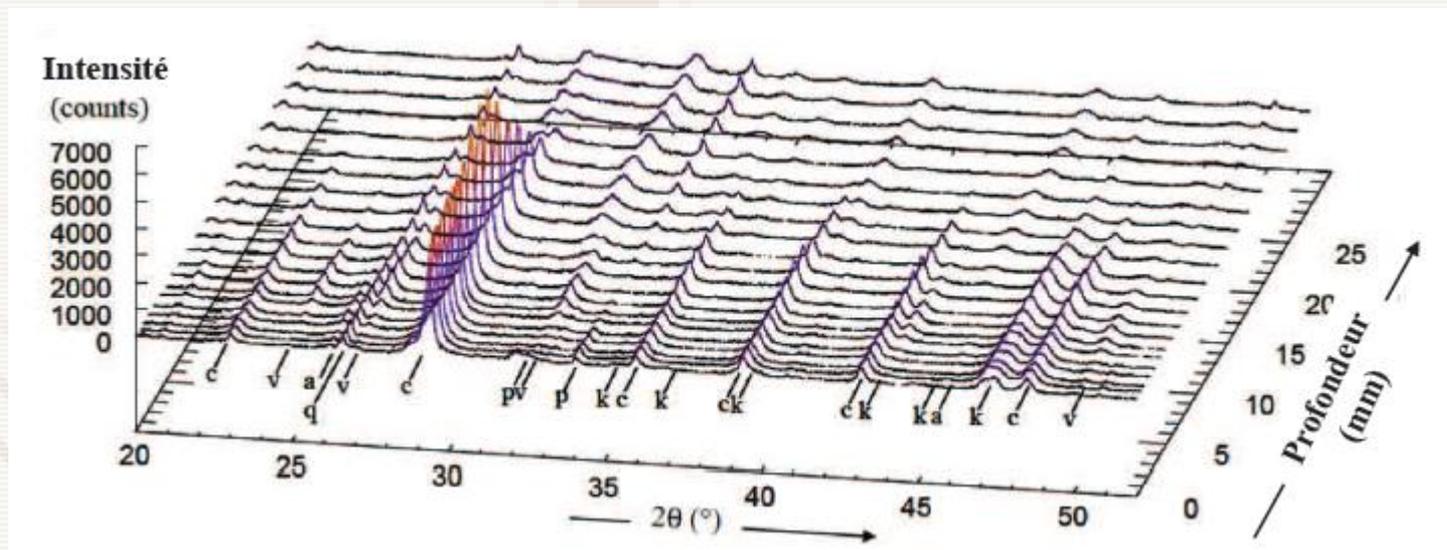


Carbonatation des matériaux cimentaires

Mise en évidence expérimentale de la carbonatation

- *Mise en évidence de la modification de minéralogie:*

Analyse par diffraction des rayons X (DRX)



(Drouet, 2010)

Carbonatation des matériaux cimentaires

Paramètres clés de la carbonatation :

mise en évidence au moyen d'une modélisation simplifiée

Carbonatation des matériaux cimentaires

Paramètres clés de la carbonatation :

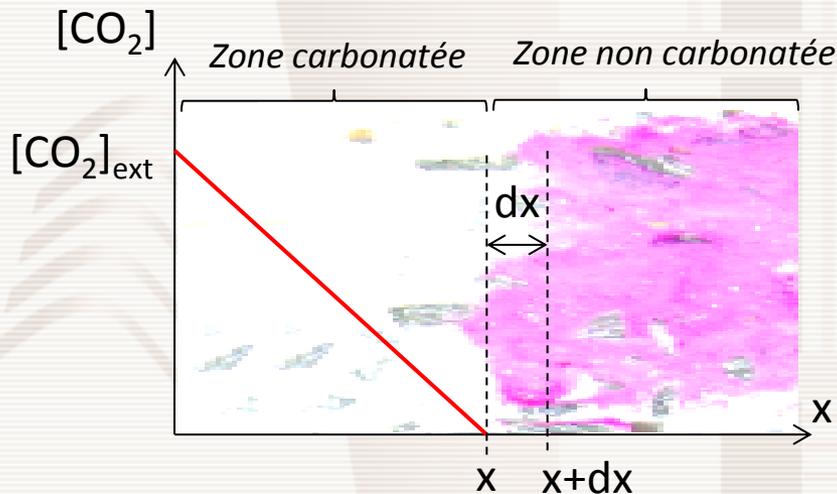
mise en évidence au moyen d'une modélisation simplifiée

Hypothèses :

- Réactions en solution instantanées
- Progression du front de carbonatation après consommation de toutes les espèces carbonatables

On peut montrer que :

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_{\text{CO}_2}[\text{CO}_2]_{\text{ext}}}{n_c}} \sqrt{t}$$



avec :

$[\text{CO}_2]_{\text{ext}}$: concentration extérieure en CO_2

n_c : teneur en éléments carbonatables

($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CSH, etc.)

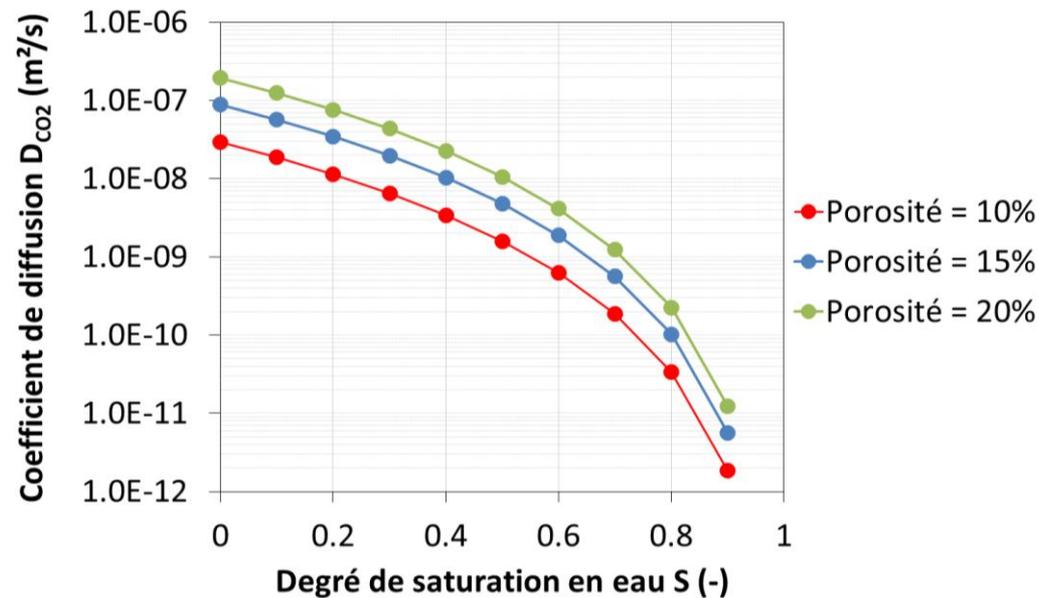
D_{CO_2} : coefficient de diffusion du CO_2 gazeux

Carbonatation des matériaux cimentaires

Paramètres clé de la carbonatation

- En première approche, la cinétique de carbonatation dépend donc de :
 - $[\text{CO}_2]_{\text{ext}}$: la concentration extérieure en CO_2
 - n_c : la teneur en éléments carbonatables ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CSH, etc.)
 - D_{CO_2} : le coefficient de diffusion du CO_2 gazeux

D_{CO_2} est fonction de la porosité ϕ et du degré de saturation en eau S



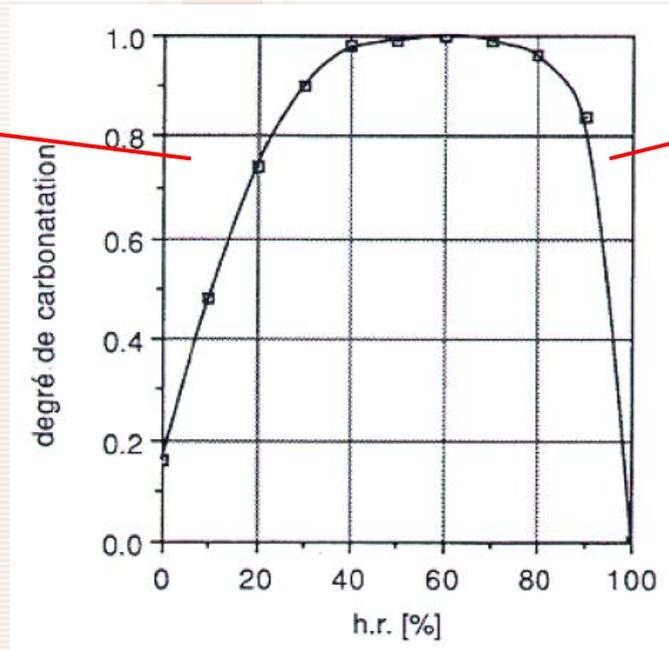
Carbonatation des matériaux cimentaires

Paramètres clé de la carbonatation

Remarque : cette approche ne montre pas que la cinétique devient lente pour les faibles degrés de saturation (ou faibles HR):

Matériau trop sec

⇒ Peu de réactions en solution



Matériau trop saturé en eau

⇒ diffusion lente du CO_2

(Vénuat, 1978)

Carbonatation des matériaux cimentaires

Cas des Ecobétons

A priori sur la carbonatation des bétons à faible dosage en ciment Portland :

$$X_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2} [CO_2]_{ext}}{n_c}} \sqrt{t}$$

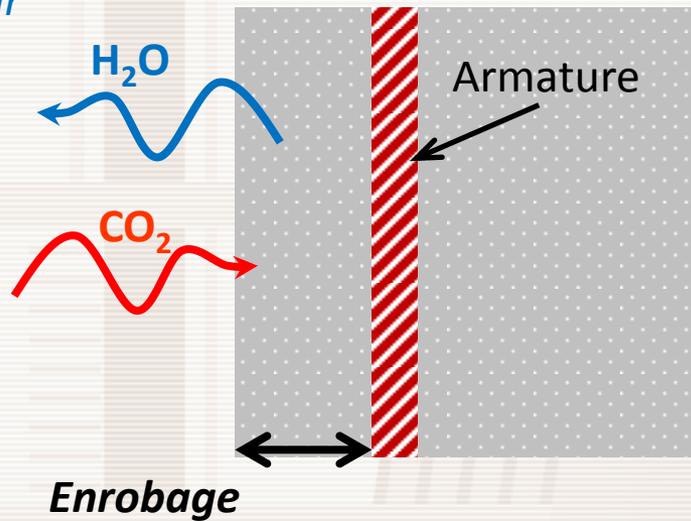
Risque de carbonatation plus élevé car n_c plus faible que dans le cas des bétons au ciment Portland
(ou plutôt teneur en Portlandite $Ca(OH)_2$ plus faible)

Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation

Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation

Après décoffrage, 3 phénomènes vont se produire dans la zone d'enrobage : **hydratation** du ciment, **transferts hydriques**, **carbonatation**.

Milieu extérieur



Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation

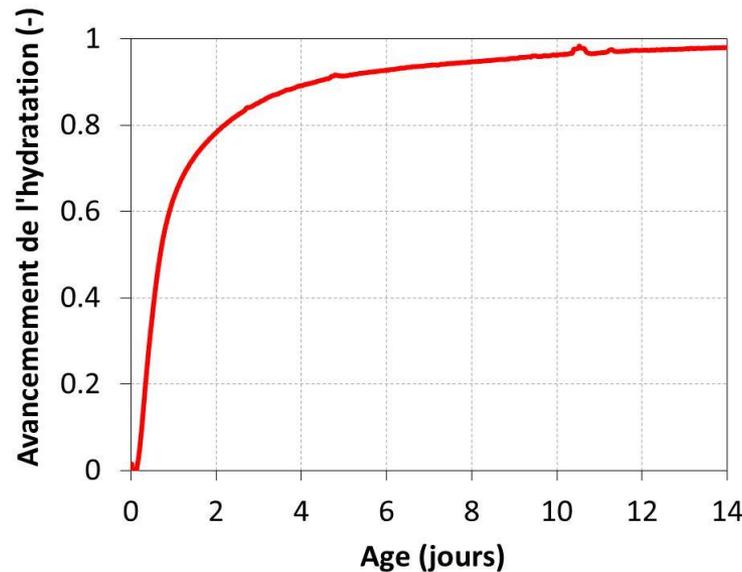
Interactions entre les 3 phénomènes ?

Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation

Interactions entre les 3 phénomènes ?

- Durée caractéristique de l'hydratation

Exemple : cinétique d'hydratation d'un béton au ciment Portland CEMI



(Younsi, 2011)

⇒ Durée < **1 mois**

Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation

- **Durée caractéristique du séchage**

Analyse à l'aide d'un modèle de transfert écrit en fonction de l'humidité relative (h)

$$\left(\frac{\partial w}{\partial h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_h(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right)$$

Avec : w : teneur en eau (kg/m³)

$\left(\frac{\partial w}{\partial h} \right)$: pente de l'isotherme de désorption de vapeur d'eau

$D_h(h)$: coefficient de diffusion (m²/s)

ρ_w : masse volumique de l'eau (kg/m³)

$$h = \frac{P_v}{P_{vs}(T)}$$

h : humidité relative (-)

P_v : pression de vapeur (Pa)

P_{vs} : pression de vapeur saturante (Pa)

Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation

- **Durée caractéristique du séchage**

Exemple : béton au ciment CEMI (Younsi, 2011)(Granger, 1997)

$$\left(\frac{\partial w}{\partial h}\right) \approx 100 \text{ kg/m}^3 \quad D_h(h) = 10^{-14} \exp(5h)$$

$$t \approx \frac{l^2}{10D_h(h)(1+5\Delta h)}$$

avec :

t : durée caractéristique et l : longueur caractéristique

AN : l = 0,02 m (enrobage de 2 cm)

h extérieur = 0,5 et h initiale = 1 $\Rightarrow \Delta h = 0,5$

pour $D_h(h=1) = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ $\Rightarrow t \sim$ **2 mois**

pour $D_h(h=0,5) = 1,3 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ $\Rightarrow t \sim$ **30 mois**

Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation

- **Durée caractéristique de la carbonatation**

$$x_c = \sqrt{\frac{2D_{\text{CO}_2}[\text{CO}_2]_{\text{ext}}}{n_c}} \sqrt{t} \quad \Rightarrow \quad t \approx l^2 \left(\frac{n_c}{2D_{\text{CO}_2}[\text{CO}_2]_{\text{ext}}} \right)$$

AN: n_c = teneur en Portlandite du béton = 0,8 mol/l (= 60 kg/m³ de béton)
 $[\text{CO}_2]_{\text{ext}}$ = 1,6 · 10⁻⁵ mol/l (= 0,035% : concentration volumique dans l'air)
 l = 0,02 m (enrobage)

pour $S = 0,6$, $D_{\text{CO}_2} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \Rightarrow t \sim 200 \text{ ans !}$

pour $S = 0,9$, $D_{\text{CO}_2} = 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} \Rightarrow t \rightarrow \infty$

Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation

- **Des échelles de temps différentes (voire très différentes) :**

Hydratation < 1 mois

Séchage > 1 mois

Carbonatation >>> 12 mois

- **Absence d'interaction ?**

- Les échelles de temps calculées dépendent beaucoup de la nature du liant et des valeurs des paramètres...
- Certains phénomènes ne sont pas pris en compte...

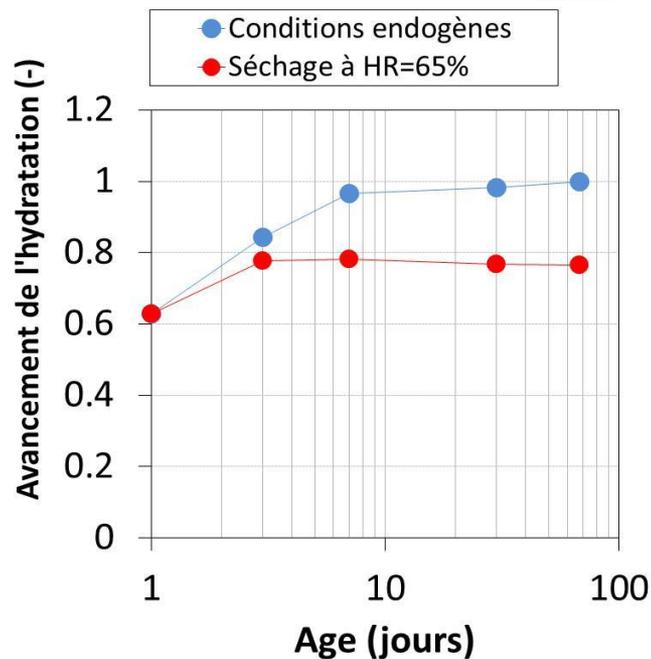
Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation

- Interaction entre séchage et hydratation

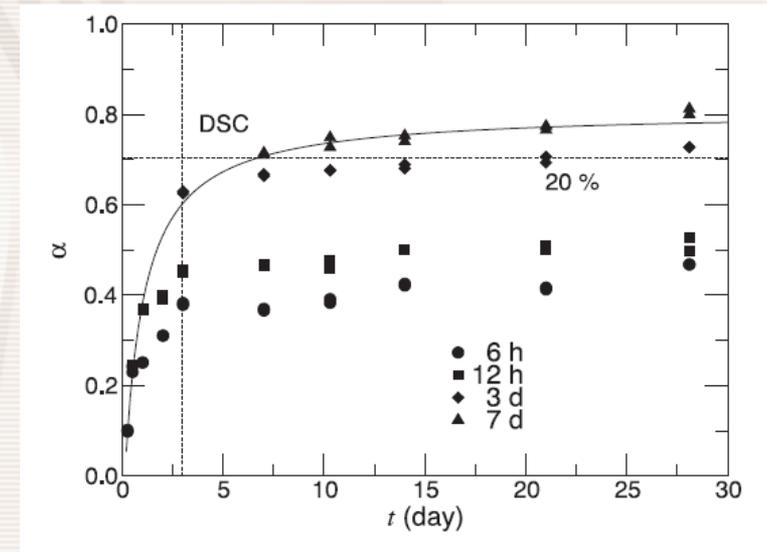
Séchage -> Hydratation

Arrêt de l'hydratation lorsque le degré de saturation en eau est faible.

Exemple :



Hydratation suspendue pour HR<90%
(Snyder, 2004)



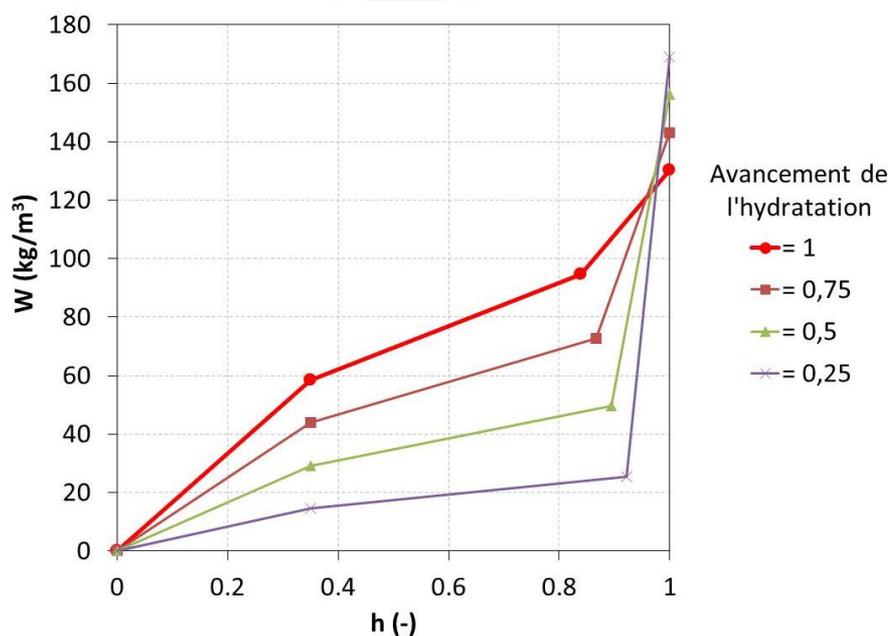
Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation

- Interaction entre séchage et hydratation

Hydratation -> Séchage

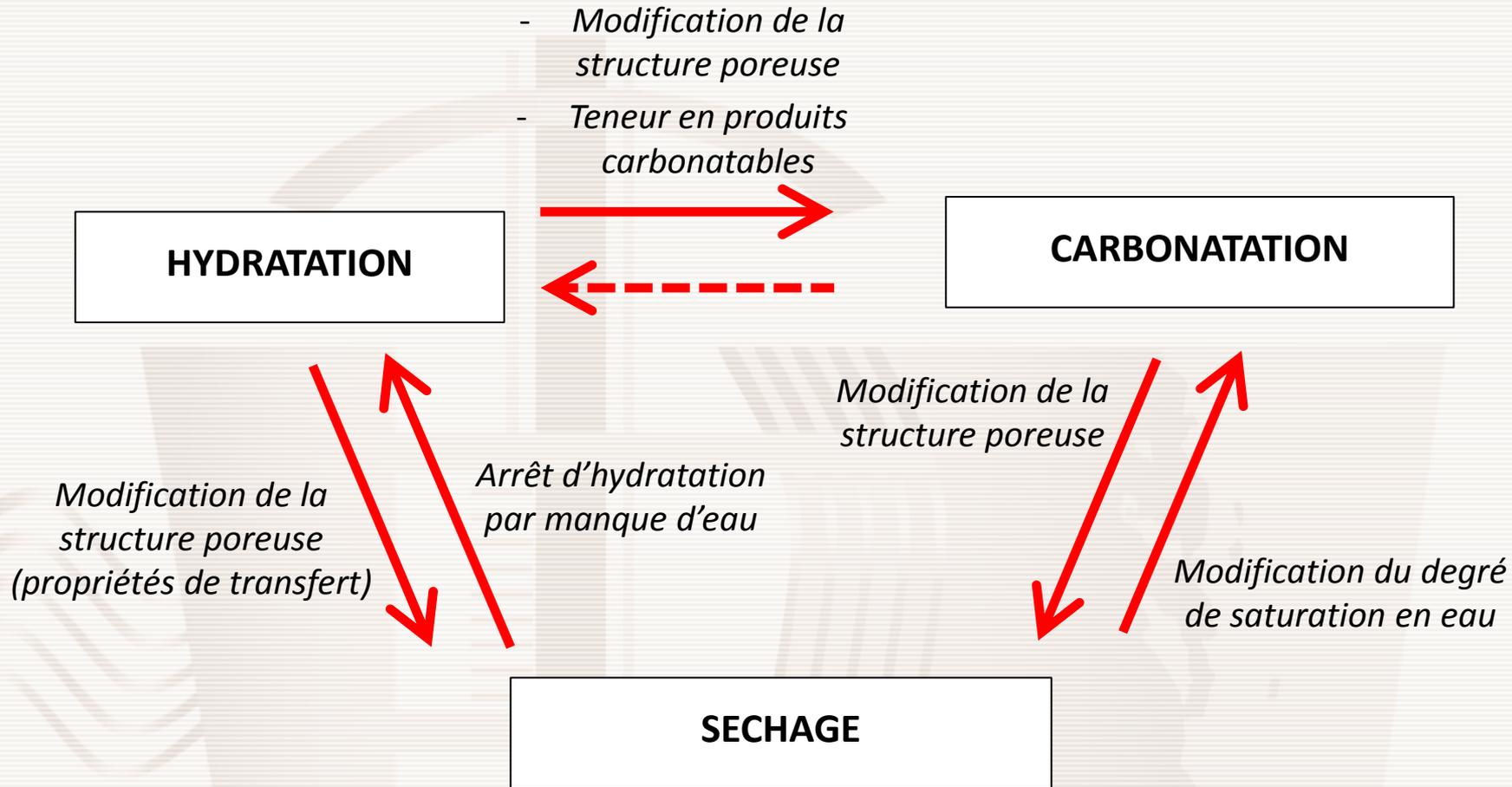
$$\left(\frac{\partial w}{\partial h}\right) \frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_h(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right)$$

$\left(\frac{\partial w}{\partial h}\right)$ et $D_h(h)$ dépendent de l'avancement de l'hydratation.



(Roelfstra, 1989)

Analyse des interactions entre hydratation, séchage et carbonatation



Etude du couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- Etude des couplages entre séchage et hydratation dans le cas des Ecobétons
- Impact du séchage sur les paramètres contrôlant la carbonatation
- Approche : modélisation numérique du couplage « séchage / hydratation »

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- **Bétons étudiés** (Younsi, 2011) (Projet ANR Ecobéton) :

Ref I	Ref III	L30 (BFS30)	L75 (BFS75)
100% CEM I 52,5	CEM III / C 32,5 (85% laitier)	70% CEM I 52,5	25% CEM I 52,5
		30% laitier	75% laitier
Eau	Eau	Eau	Eau

Equivalence de performances vis-à-vis de la carbonatation ?

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- Modèles (code MLS® de FEMMASSE®)

→ Hydratation :

Degré d'avancement de l'hydratation :

$$\alpha_{hyd}(M) = \frac{\alpha(M)}{\alpha_u}$$

avec α : degré d'hydratation et α_u : degré d'hydratation ultime

et M : maturité (ou âge équivalent – cf. cours de A. Loukili)

$$M(t) = \int_{t_0}^t e^{\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \frac{1}{1 + [a_c - a_c h(t)]^{b_c}} dt$$

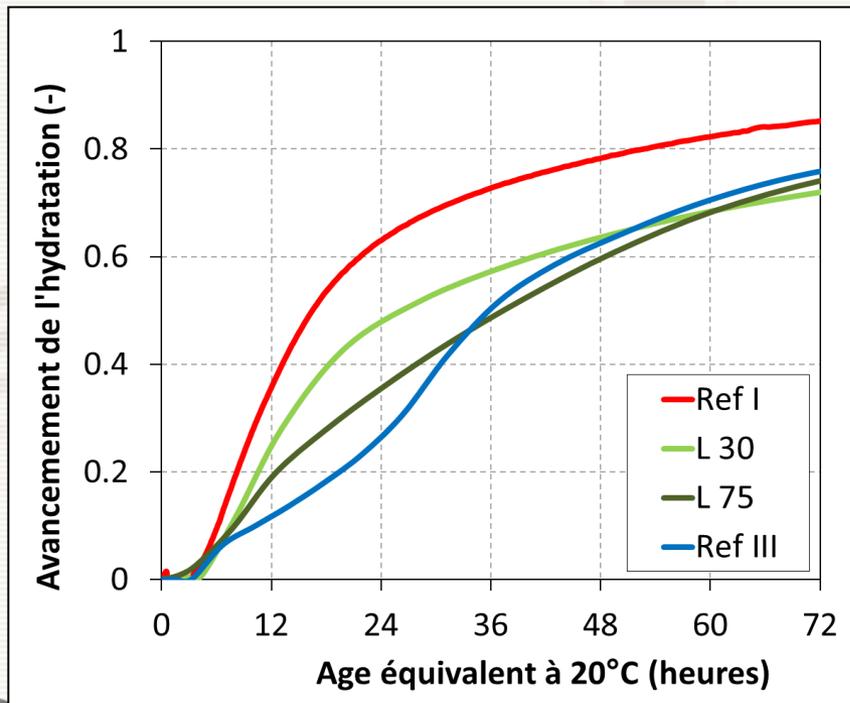
1^{er} terme de couplage entre hydratation (α) et séchage (h)
Pour $h < 0,9$: arrêt de l'hydratation $\Leftrightarrow M = \text{constant}$
(Bazant, 1986)

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- Modèles utilisés (code MLS[®] de FEMMASSE[®])

→ Hydratation :

Données d'entrée : courbes d'avancement déduites d'essais de calorimétrie (pour h=1 et à 20°C)



Remarque :

Au décoffrage (24 h), avancements très différents

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- Modèles utilisés (code MLS® de FEMMASSE®)

→ Séchage :

Modèle Fickéen avec un terme puits

$$\left(\frac{\partial w}{\partial h} \right) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_h(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{dw_{\text{hyd}}}{dt}$$

Diffusion

Pente de l'isotherme de désorption
fonction de α et de h
Modèle de Roelfstra (1989)
2^{ème} terme de couplage

Consommation d'eau due à l'hydratation
3^{ème} terme de couplage

Exemple :

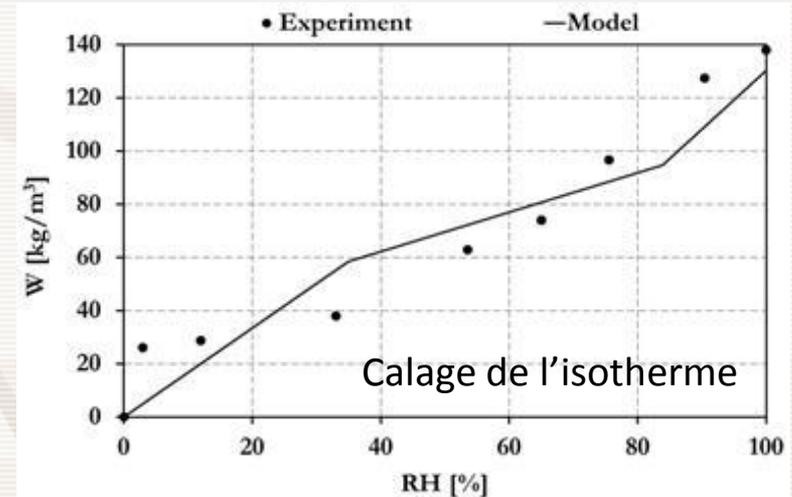
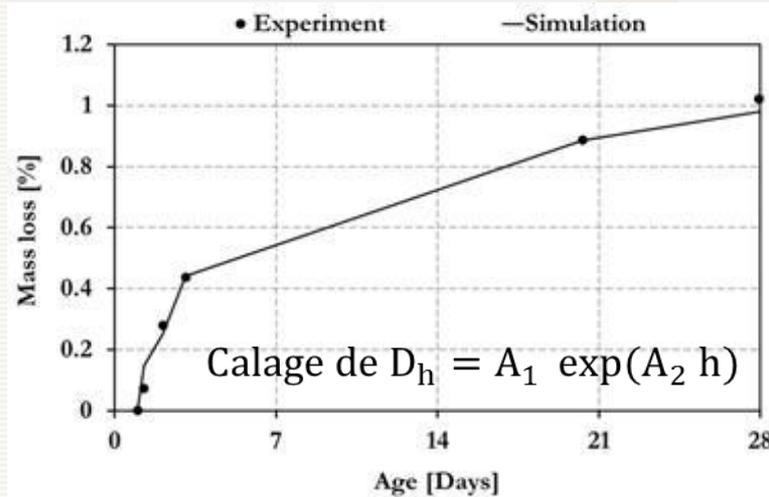
$dw_{\text{hyd}} = 0,25C d\alpha$ avec C : masse de ciment (kg/m³)

avec : $D_h = A_1 \exp(A_2 h)$

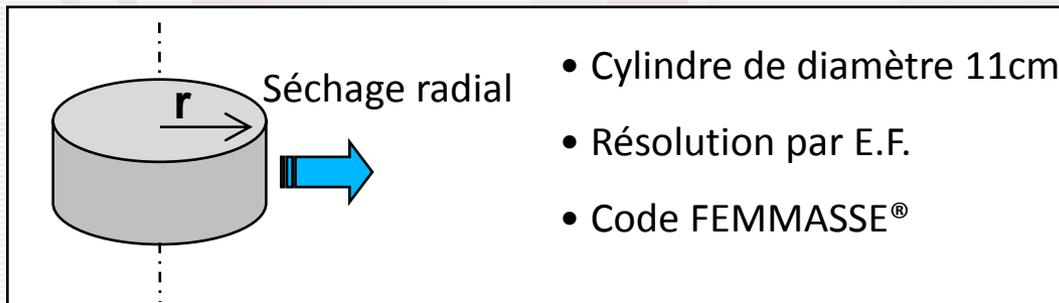
A_1 et A_2 : constantes
(Mensi, 1988)

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- Données d'entrée



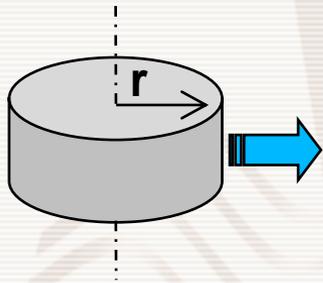
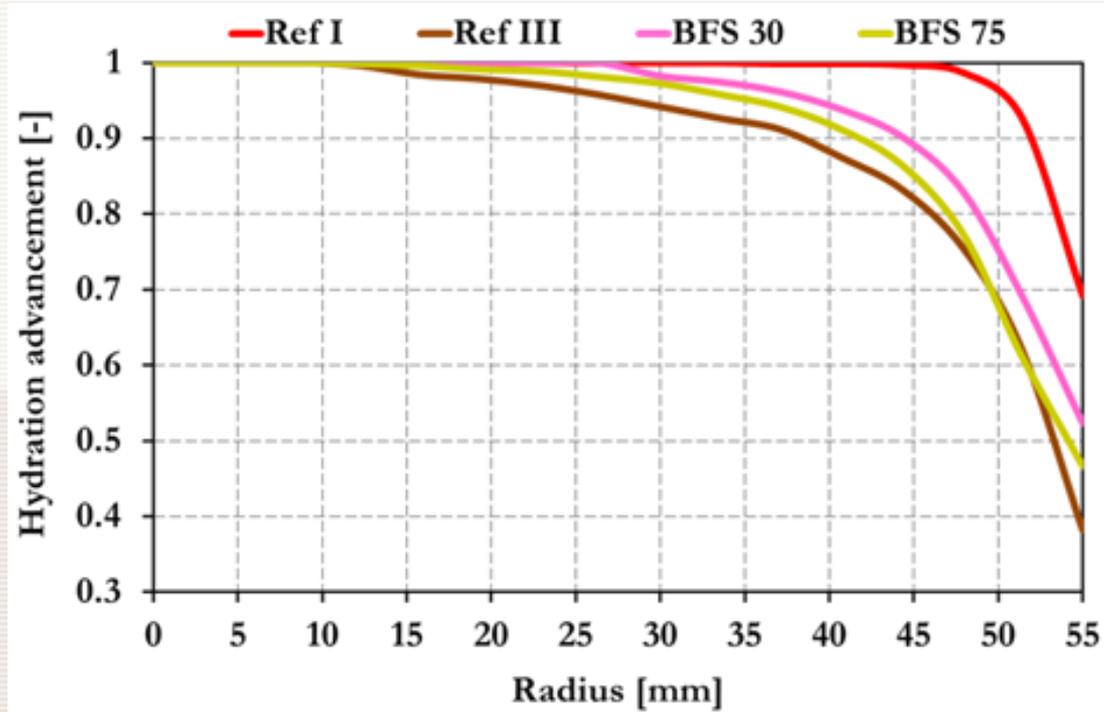
- Système simulé et résolution numérique



Conditions limites :
 $h = 1$ pour $t < 1$ jour
 $h = 0,65$ pour $t > 1$ jour

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

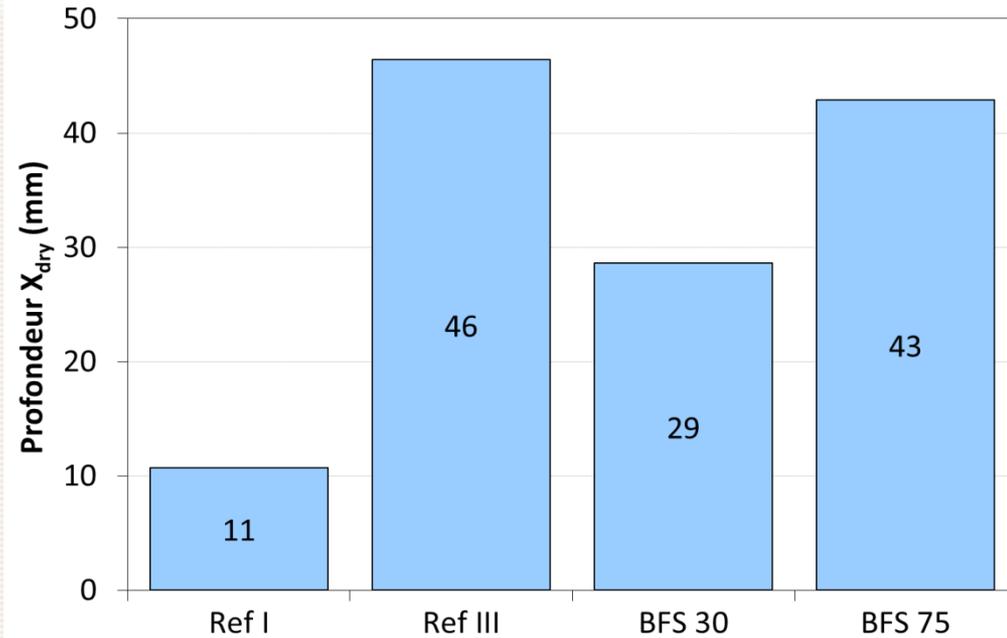
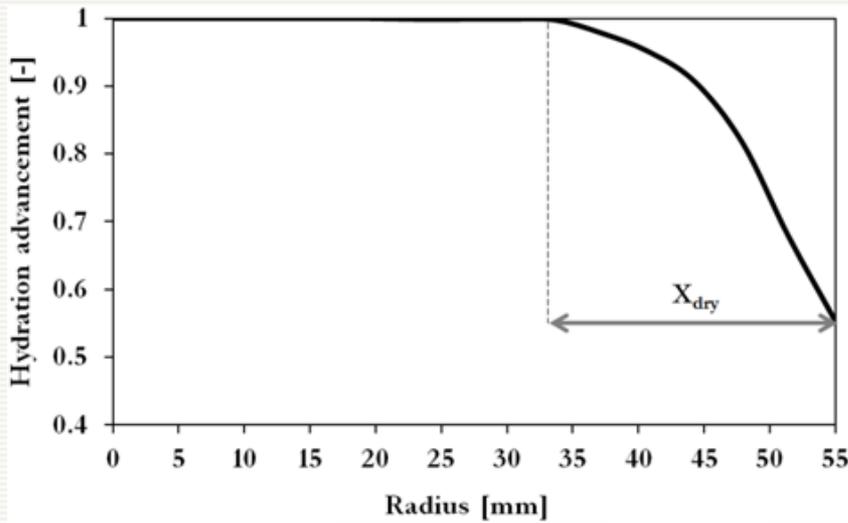
- Profils d'hydratation obtenus à 28 jours



Premiers cm fortement affectés par le séchage et l'arrêt d'hydratation dans le cas des bétons à forte substitution du clinker par le laitier

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

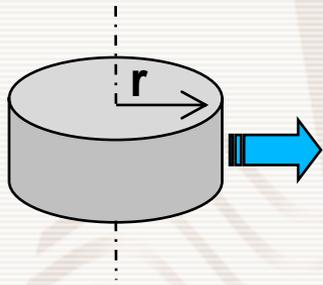
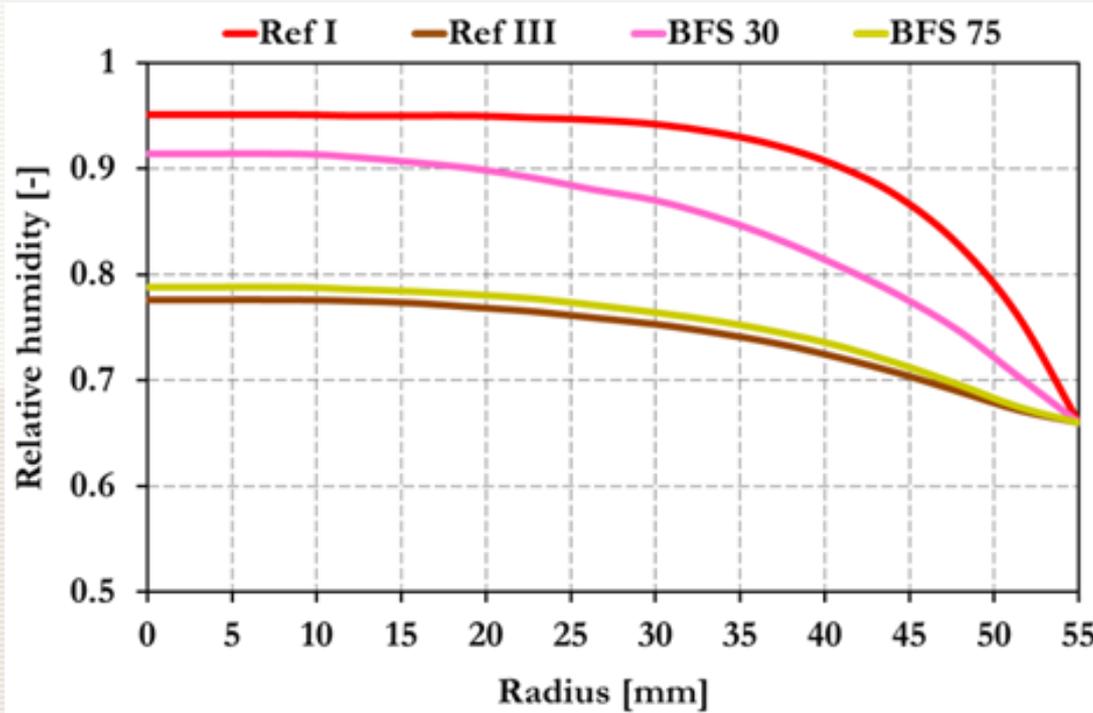
- Profondeur affectée par le séchage



$X_{dry} > 20$ mm (sauf pour RefI)

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

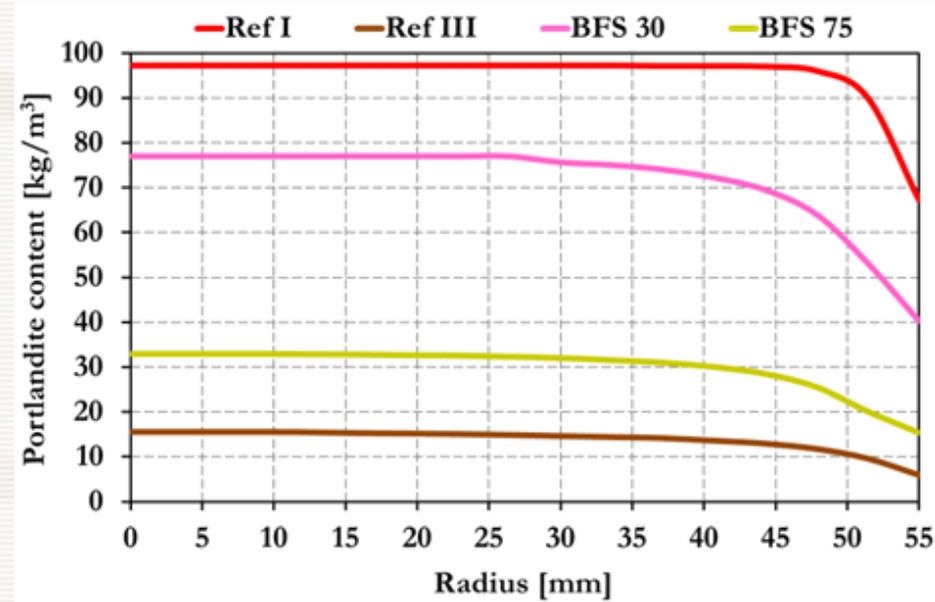
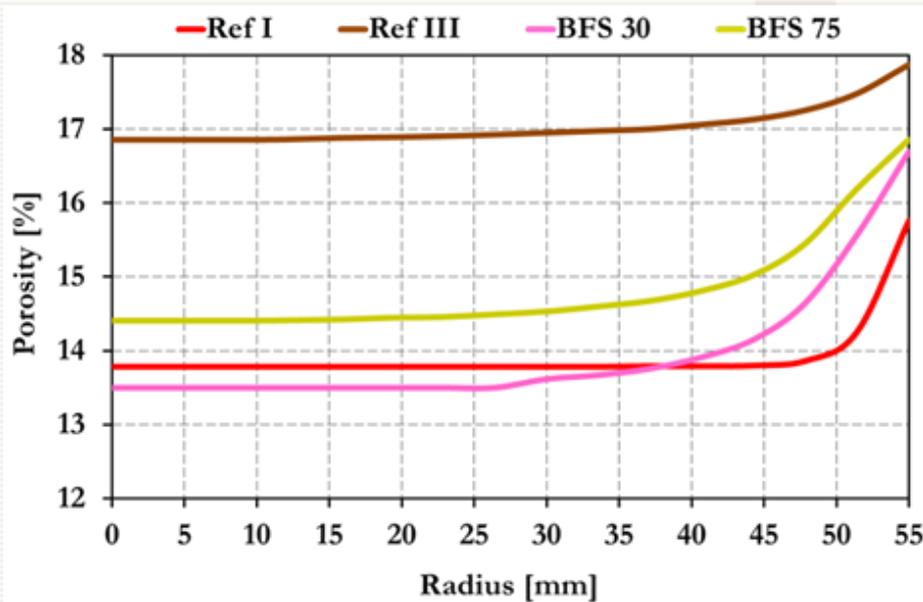
- Profil d'humidité relative h à 28 jours



RefIII et BFS75 déjà proches d'un équilibre hydrique à 28 jours

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- Profils de porosité et de teneur en Portlandite à 28 jours

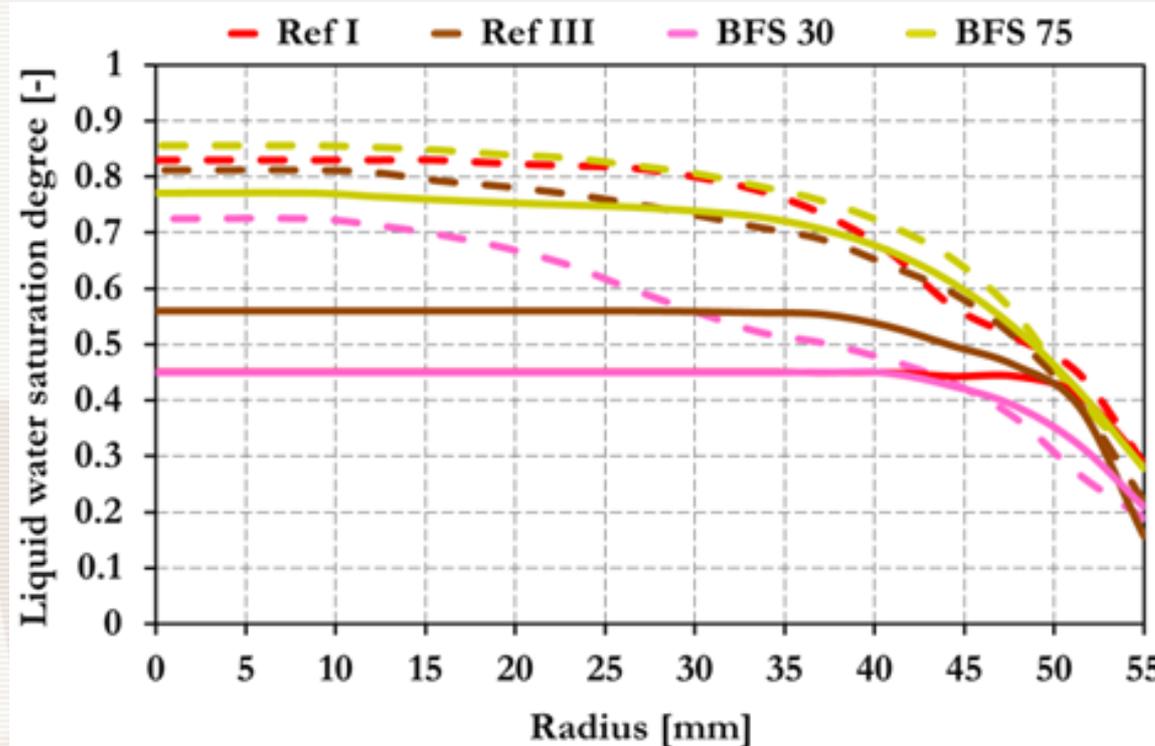


- Profils de porosité et de teneur en Portlandite calculés à partir des profils d'avancement d'hydratation et des porosités et teneurs mesurées pour une hydratation « complète ».

- $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ plus faible pour les « Ecobétons »

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- Profils de degré de saturation en eau S à 28 jours (- - -) et à long terme (__)



- Profils de S déduits des profils de h , des profils d'avancement et des isothermes de désorption.
- S plus élevé pour les « Ecobétons » que pour la référence au CEMI ...

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- **Risque de carbonatation : définition d'un « potentiel de carbonatation »**

$$\text{On a : } X_C = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}[CO_2]}{n_c}} \sqrt{t}$$

$$D_{CO_2} = D_{Air,CO_2} \phi (1 - S) F \quad \text{avec : } \begin{array}{l} D_{Air,CO_2} : \text{coefficient de CO}_2 \text{ dans l'air} \\ \phi : \text{porosité} \\ S : \text{degré de saturation en eau} \\ F : \text{facteur de forme (tortuosité, etc.)} \end{array}$$

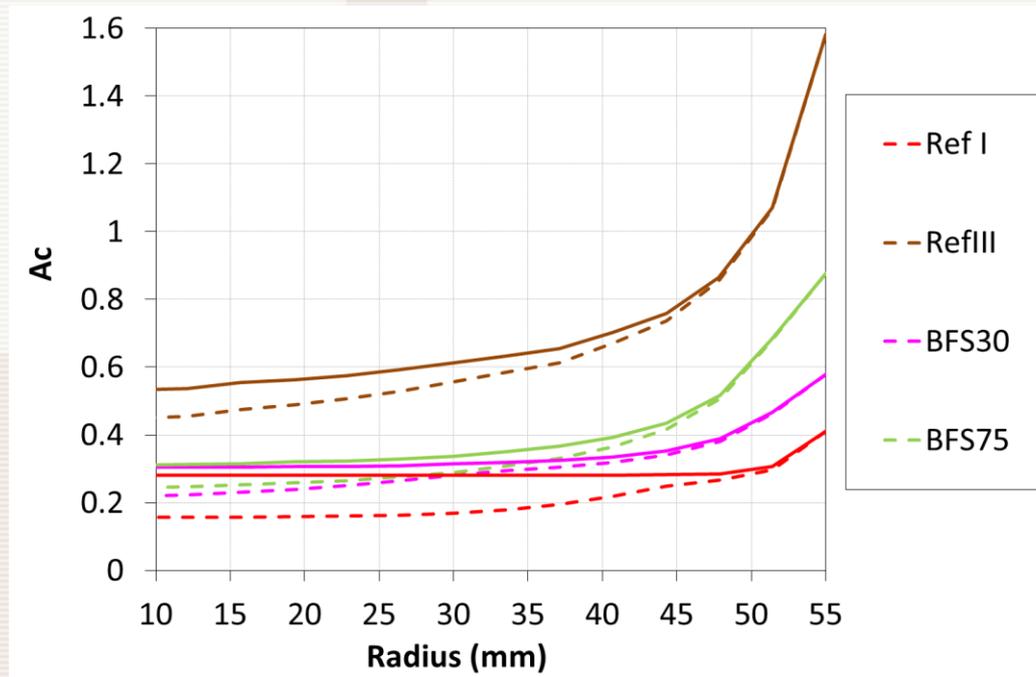
$$n_c \leftarrow [Ca(OH)_2] \text{ (teneur en Portlandite)}$$

On obtient un « potentiel de carbonatation » regroupant les paramètres clés :

$$A_c = \sqrt{\frac{\phi(1 - S)}{[Ca(OH)_2]}}$$

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- Profil du « potentiel de carbonatation » A_c à 28 jours (---) et à long terme (__)



- Risque de carbonatation plus élevé pour L30 et L75 dans le 20 premiers mm que pour RefI
- Risque beaucoup plus élevé pour RefIII.

Couplage séchage / hydratation des « Ecobétons »

- Forte influence du séchage sur l'hydratation dans le cas des Ecobétons et plus généralement pour les bétons à faible dosage en clinker.
- Enrobage moins « durable » pour ces bétons si durée de cure insuffisante.
- Comportement réel des Ecobétons ?
 - > Investigation expérimentale

Etude expérimentale de la carbonatation des « Ecobétons »

Etude expérimentale de la carbonatation des « Ecobétons »

- Programme expérimental

→ Carbonatation accélérée (XP P18-458) :

Préconditionnement : 14 jours à 45°C

Conditions : T=20°C, HR=65%, [CO₂]=50%



→ Autres propriétés :

- Porosité accessible à l'eau (protocole AFPC-AFREM)
- Teneur en Portlandite (par ATG sur pâtes)
- Isothermes de désorption (mesurées sur pâtes)

Etude expérimentale de la carbonatation des « Ecobétons »

- 2 modes de conservation :

Après démoulage à l'âge de 24 heures

« Air »

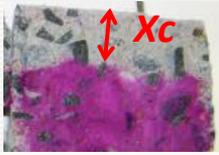
Conservation à 20°C et 50% HR
pendant 27 jours

« Eau »

Conservation sous eau à ~ 20°C
pendant 27 jours

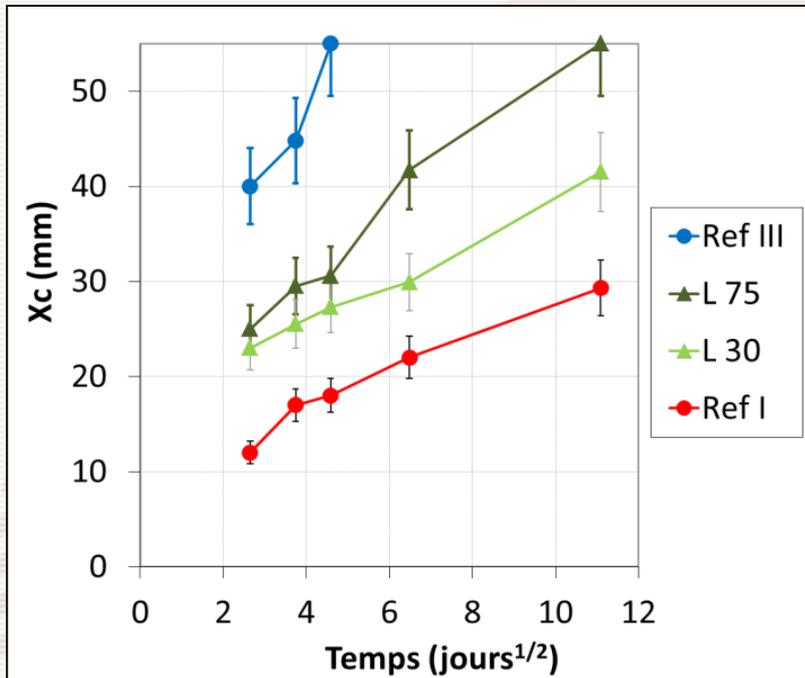
Essais de **carbonatation accélérée** à l'âge de 28 jours

Etude expérimentale de la carbonatation des « Ecobétons »

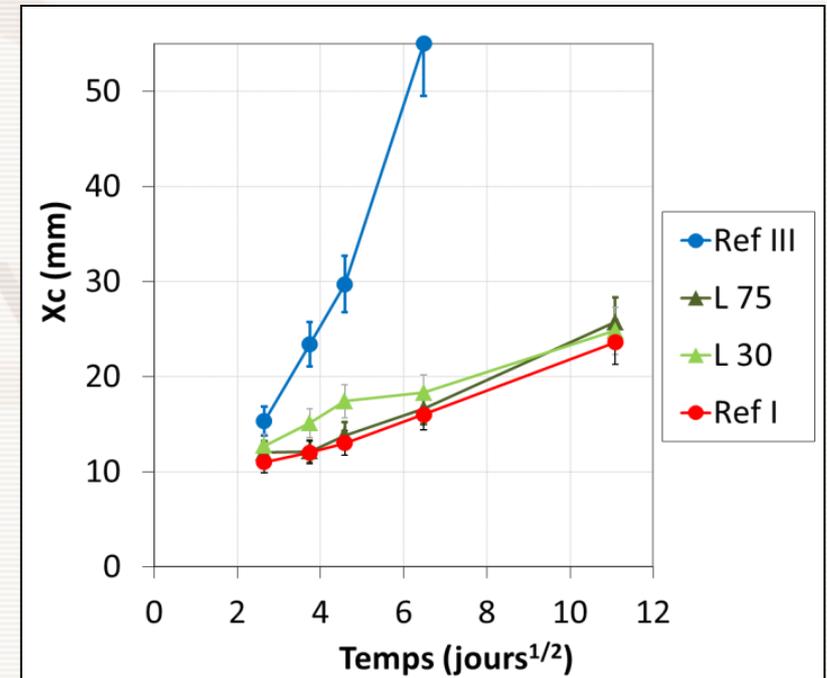


Carbonatation accélérée (âge = 28 jours)

Conservation « Air »



Conservation « Eau »

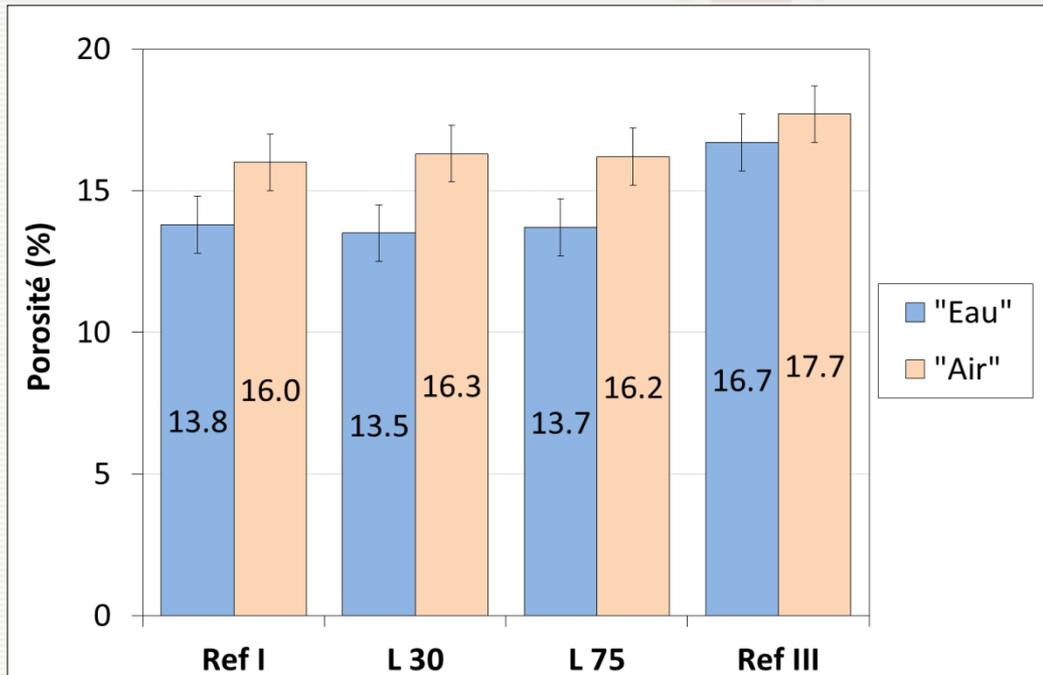


→ Influence de la conservation

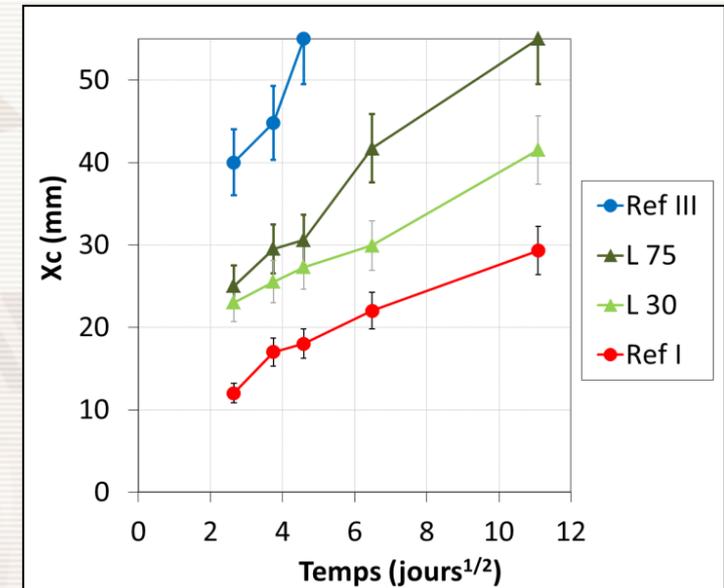
→ Influence de la composition

Etude expérimentale de la carbonatation des « Ecobétons »

Porosité accessible à l'eau (à 28 jours)



Carbonatation « Air »



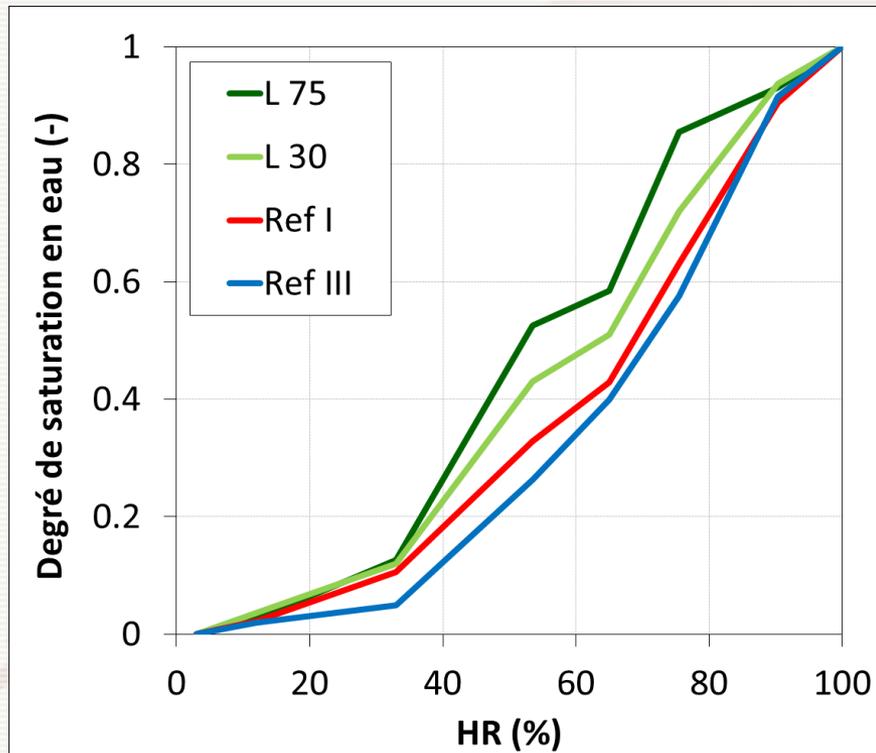
→ Porosité "Eau" < Porosité "Air"

→ Pour une même conservation, porosité proche (sauf pour Ref III)

→ Porosité ≠ indicateur de durabilité vis-à-vis de la carbonatation

Etude expérimentale de la carbonatation des « Ecobétons »

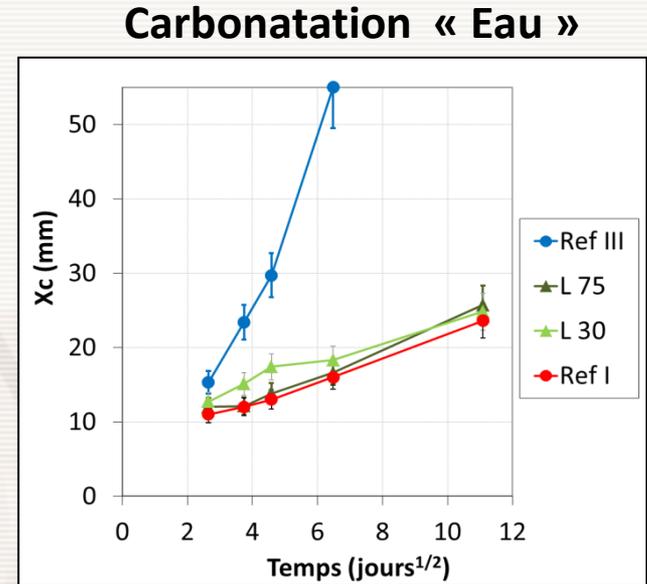
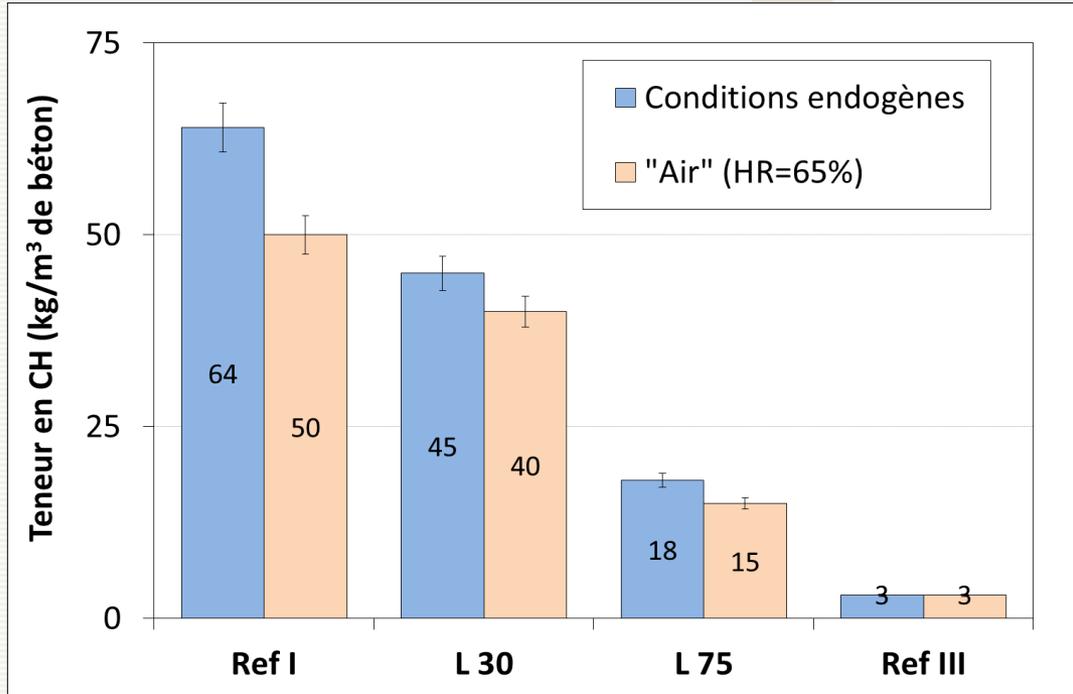
Isotherme de désorption de la vapeur d'eau (pâtes)



- Pâtes testés après **3 mois de cure** sous eau
- Pour RH > 40%, S plus élevé pour bétons au laitier (microstructure plus fine)
- S élevé \Rightarrow D_{CO_2} faible

Etude expérimentale de la carbonatation des « Ecobétons »

ATG (pâtes âgées de 28 jours)



- Influence de la conservation sur la teneur en CH
- Influence de la composition
- Teneur en CH \neq indicateur de durabilité vis-à-vis de la carbonatation

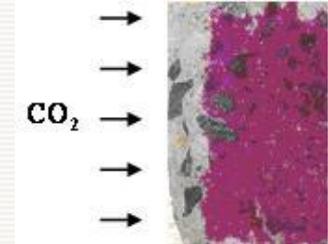
Etude expérimentale de la carbonatation des « Ecobétons »

Potentiel de carbonatation

$$X_c(t) \# \frac{\sqrt{D_{CO_2} [CO_2]}}{\sqrt{[Ca(OH)_2]}} \sqrt{t}$$

$\phi(1-S)$

D_{CO_2} : coefficient de diffusion
 $[CO_2]$: concentration en CO_2 extérieure
 ϕ : porosité
 S : degré de saturation en eau
 CH : teneur en Portlandite



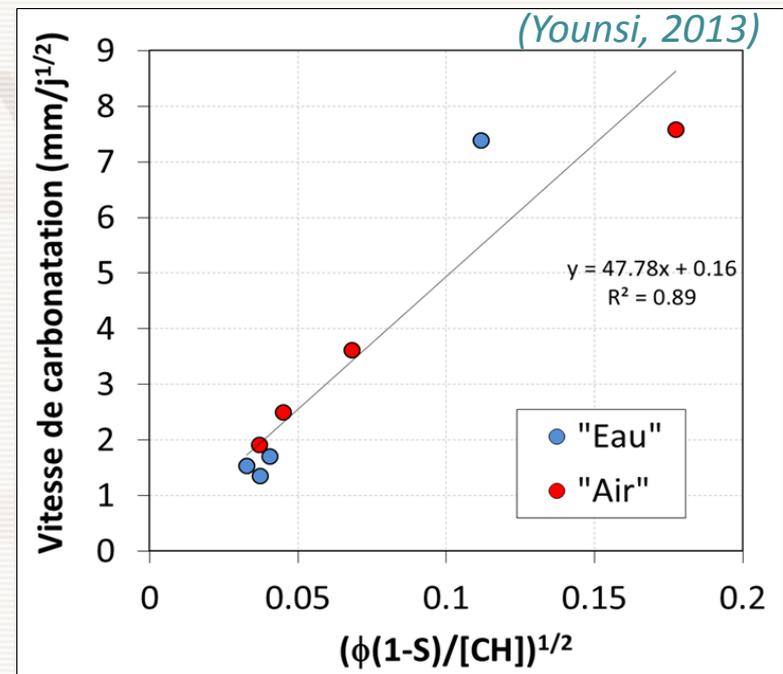
3 paramètres clés :

→ Porosité (ϕ)

→ Teneur en CH

→ **Degré de saturation en eau (S)**

$$\frac{dX_c(t)}{d\sqrt{t}} \# \sqrt{\frac{\Phi(1-S)}{[Ca(OH)_2]}}$$



Etude expérimentale de la carbonatation des « Ecobétons »

Equivalence de performance des Ecobétons et des bétons « EN 206 » vis à vis de la carbonatation ?

→ **Méthode pour l'approche performantielle (béton de référence ?)**

Indicateur de durabilité :

Porosité et teneur en CH **seuls** ≠ **indicateurs** pour la carbonatation.

Carbonatation accélérée représentative de la carbonatation naturelle ?

Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Principe des essais de carbonatation accélérée :

Comment accélérer la diffusion du CO_2 ?

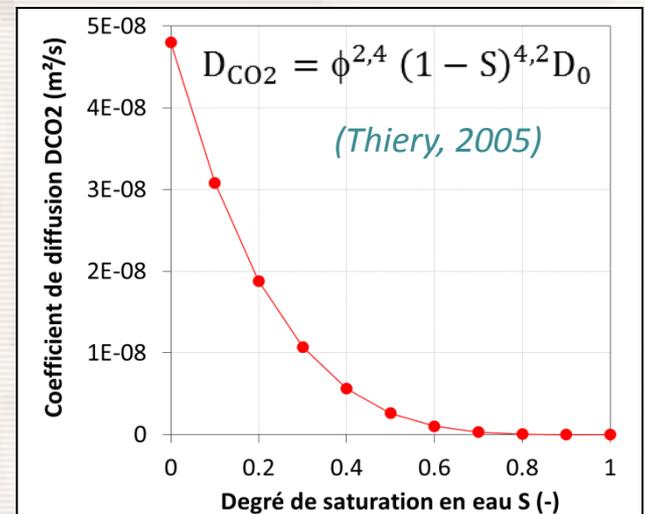
→ Gradient de $[\text{CO}_2]$ élevé

Exemple : $[\text{CO}_2]_{\text{ext}} = 50\%$ (norme P18-458)

→ Etuvage préalable $\Rightarrow S \downarrow \Rightarrow D_{\text{CO}_2} \uparrow$

Exemple: étuvage à 45°C pendant 14 jours

(norme P18-458)



Etude de l'essai de carbonatation accélérée

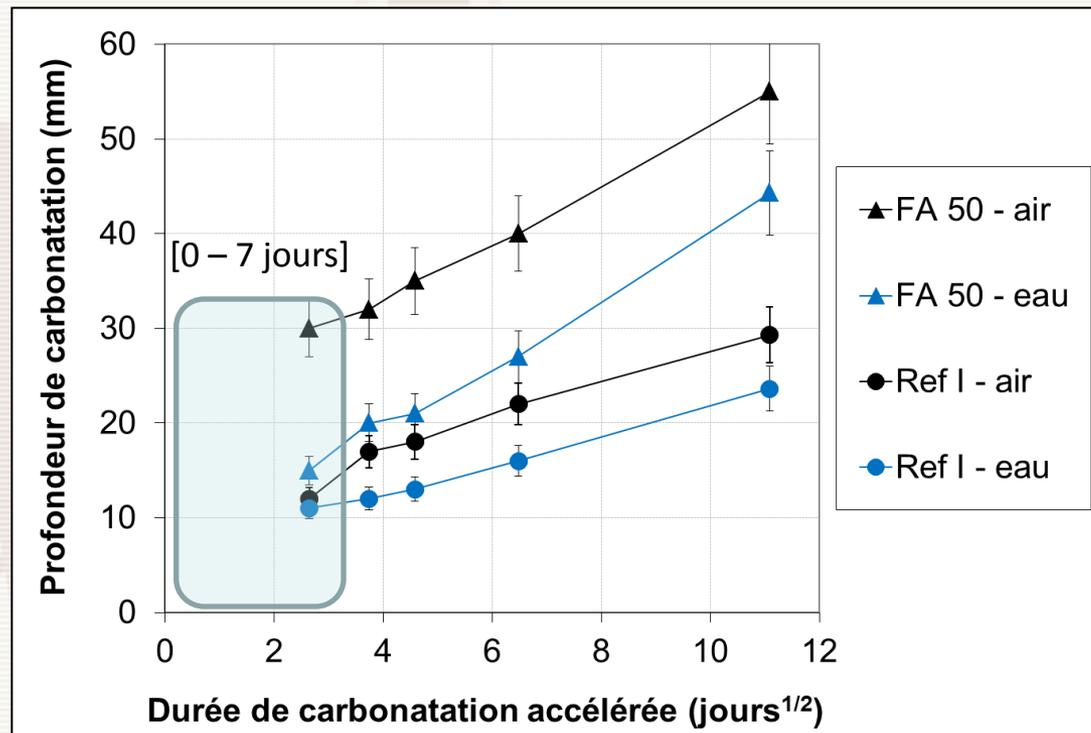
Aucun consensus dans la littérature sur le protocole de carbonatation accéléré

- [CO₂] de 1 à 50%...
- Préconditionnement par étuvage ou non...
- De fortes divergences de vue dans la communauté scientifique (projet de normalisation européenne qui a échoué...)

Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Objectifs

- Analyser l'essai de carbonatation accélérée selon la procédure de la norme française **P18-458** (AFNOR, 2008).
- Interpréter la **cinétique de carbonatation** en début d'essai.



(Younsi et al., 2011)

Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Programme expérimental

- **Campagne expérimentale** sur un **béton C30 (Ref I)**

2 modes de **conservation** après décoffrage à 1 jour :

→ « Eau » : 27 jours dans l'eau

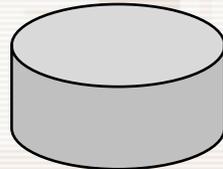
→ « Air » : 27 jours à l'air libre (20°C, 65% HR)

Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Programme expérimental

- Essai de carbonatation accélérée P18-458 (AFNOR, 2008)
 1. A l'âge de 28 jours : **étuvage à 45°C** (HR ~ 12%) pendant **14 jours**
 2. A 42 jours : mise en enceinte à $20\pm 2^\circ\text{C}$, $\text{HR}=65\pm 5\%$ et $[\text{CO}_2]=50\pm 5\%$
 3. A diverses échéances (0,5, 1, 3, 7, 14 jours) : mesure d'une **profondeur de carbonatation** par pulvérisation de phénolphtaléine

Disque $\phi 11 \times 5 \text{cm}$



Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Programme expérimental

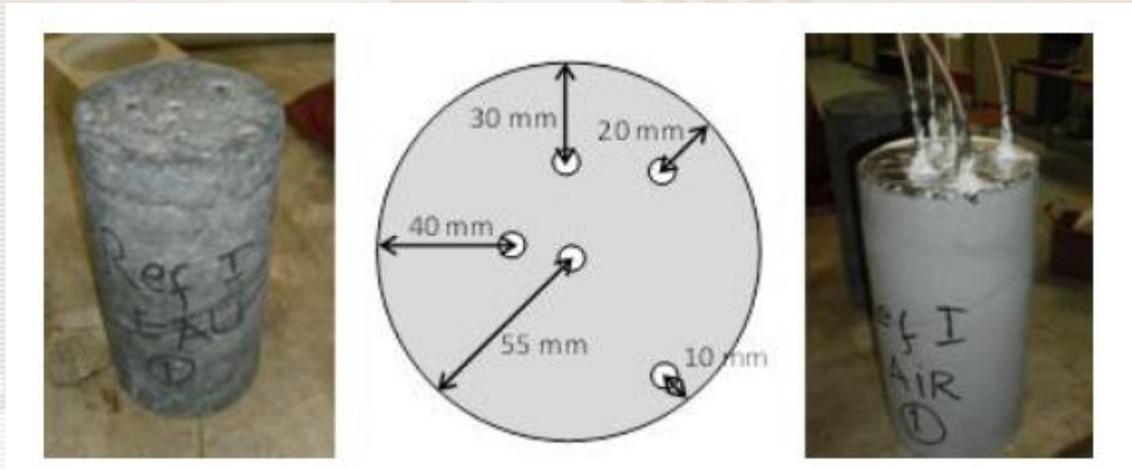
- Détermination de **profils de carbonatation** à une échéance donnée :
 1. Prélèvement d'échantillons à différentes profondeurs
 2. Broyage et tamisage ($< 315 \mu\text{m}$)
 3. Analyse Thermo - Gravimétrique $\Rightarrow [\text{Ca(OH)}_2]_{\text{échantillon}}$
 4. Analyse chimique par ICP-AES $\Rightarrow [\text{Al}_2\text{O}_3]_{\text{échantillon}}$ (*Villain et al., 2007*)
 5. Connaissant $[\text{Al}_2\text{O}_3]_{\text{ciment}} \Rightarrow [\text{Ca(OH)}_2]_{\text{ciment}}$

* spectrométrie par torche à plasma avec mesure d'émission atomique

Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Programme expérimental

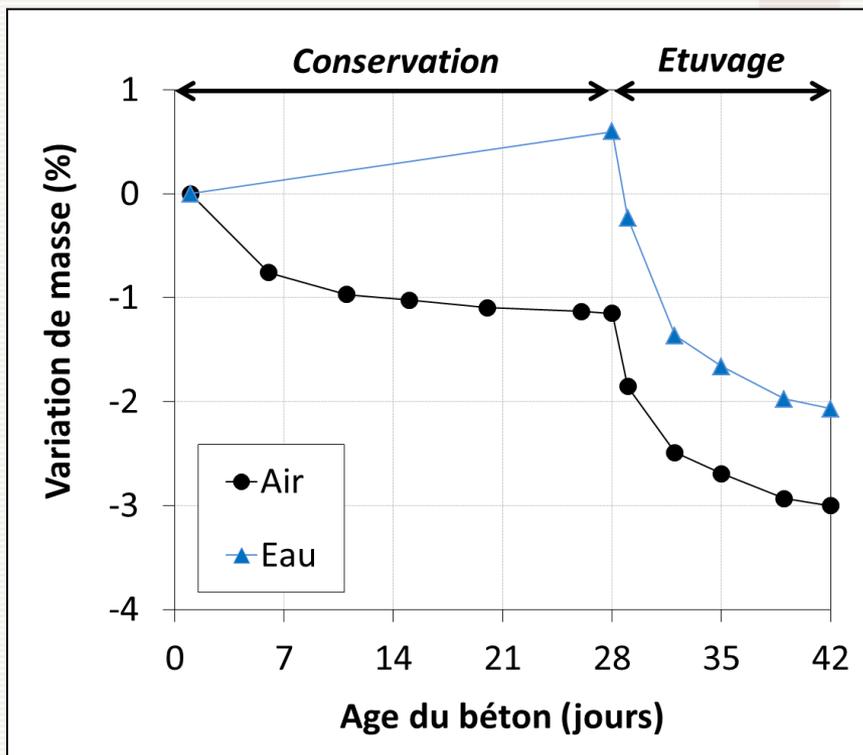
- Détermination de **profils de séchage (profils d'humidité relative h)**:
 1. **Perçage des échantillons à 1 jour (« Air ») ou 28 jours (Eau »)**
 2. **Sondes capacitives HR**



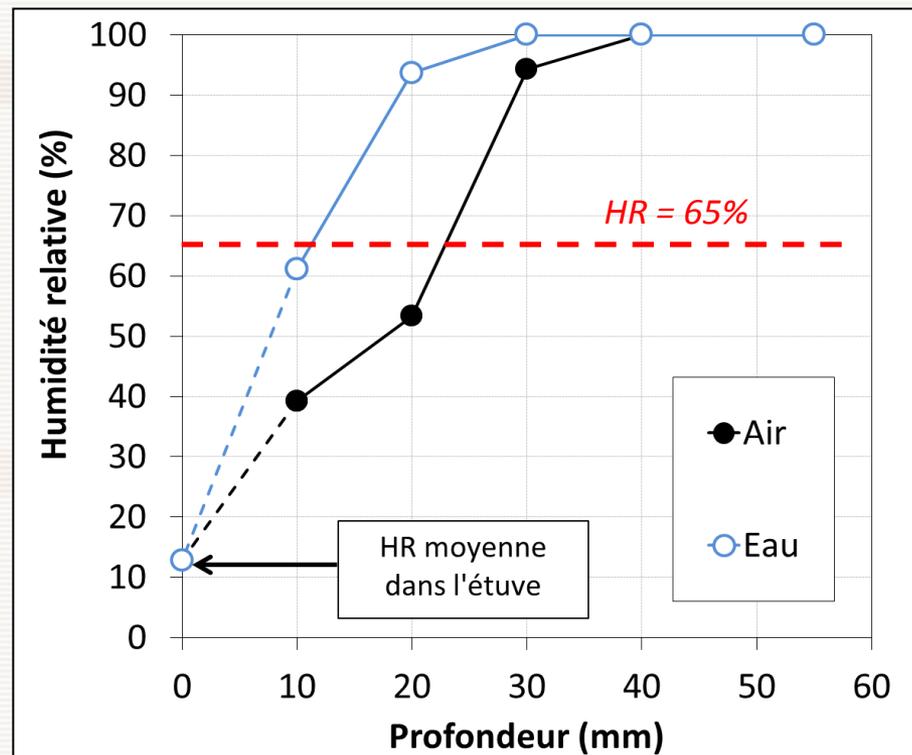
Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Résultats

Variation de masse avant et pendant l'étuvage



Profils de h après 14 jours en étuve :



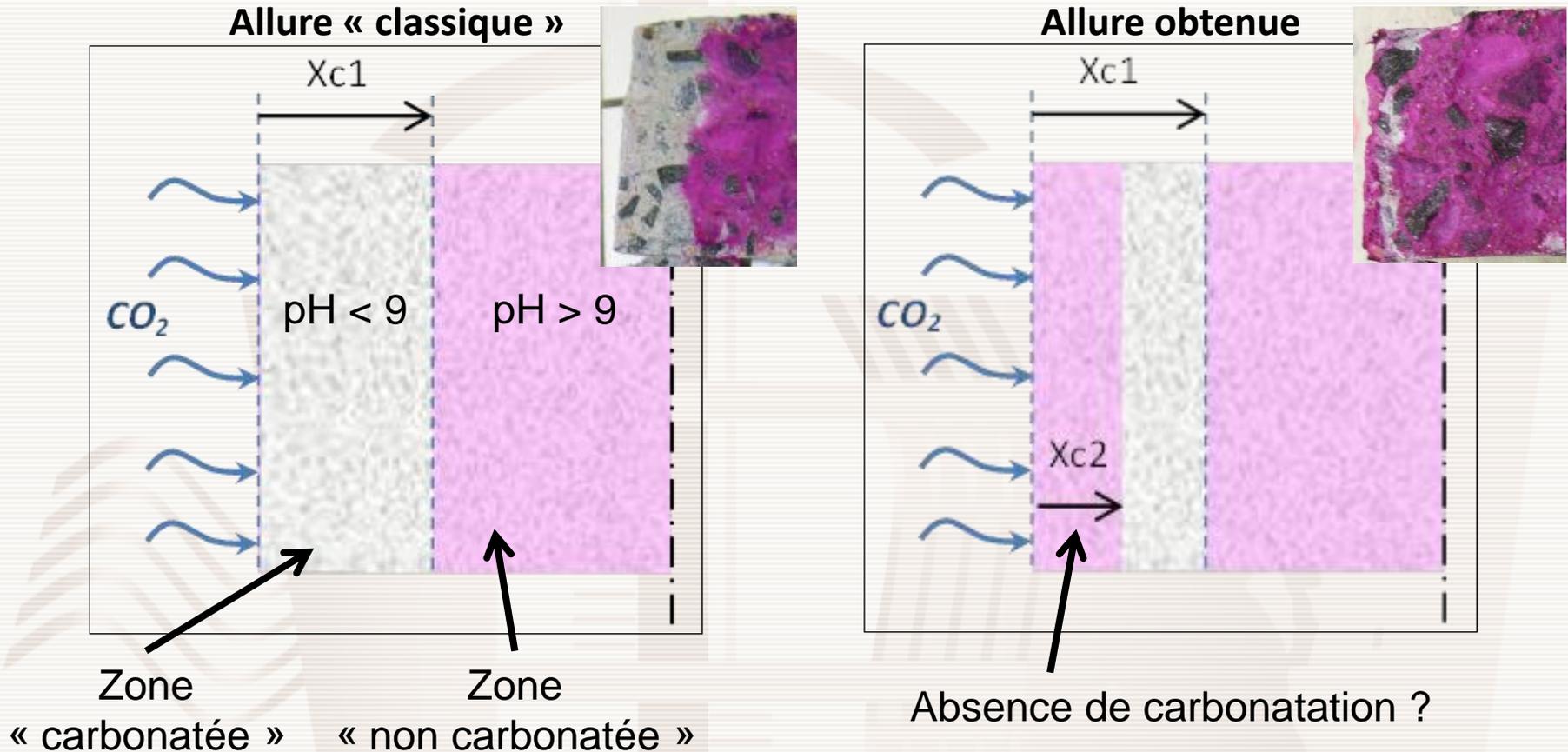
Fort déséquilibre hydrique : - entre peau et cœur

- entre échantillon et enceinte de carbonatation

Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Résultats

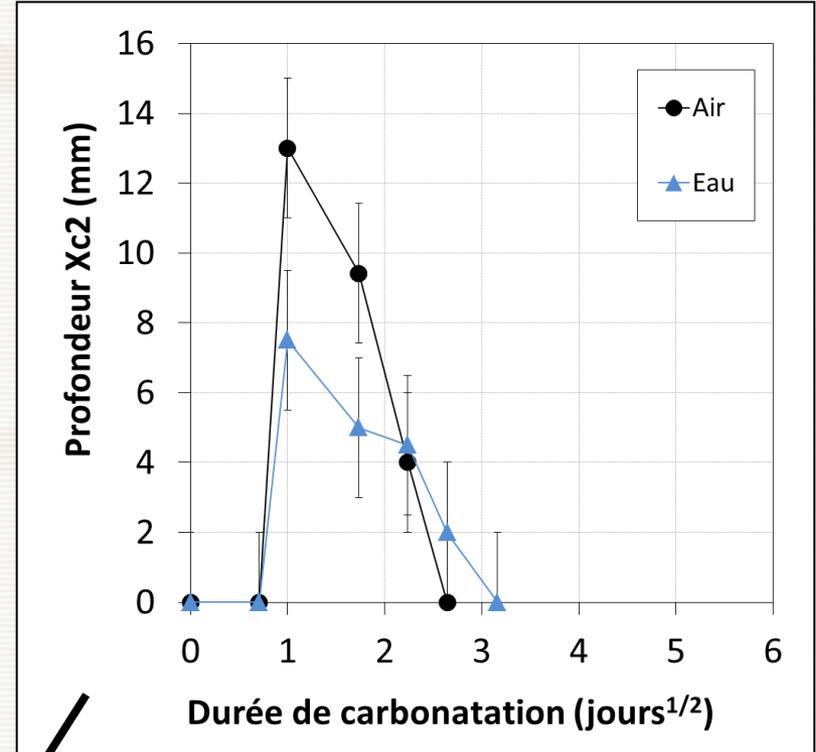
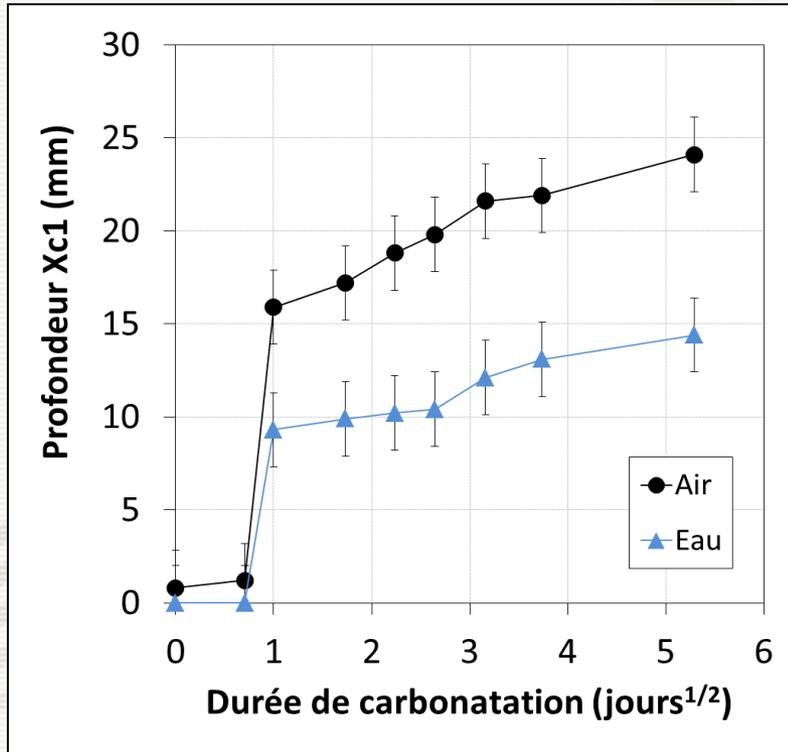
Allure des disques après fendage et pulvérisation de phénolphtaléine



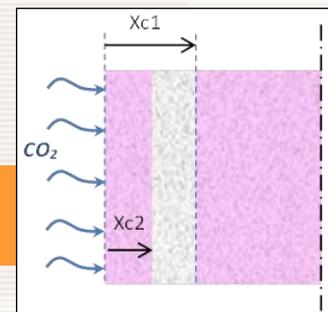
Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Résultats

Evolution des profondeurs Xc1 et Xc2



Carbonatation progressive de la zone Xc2 ?

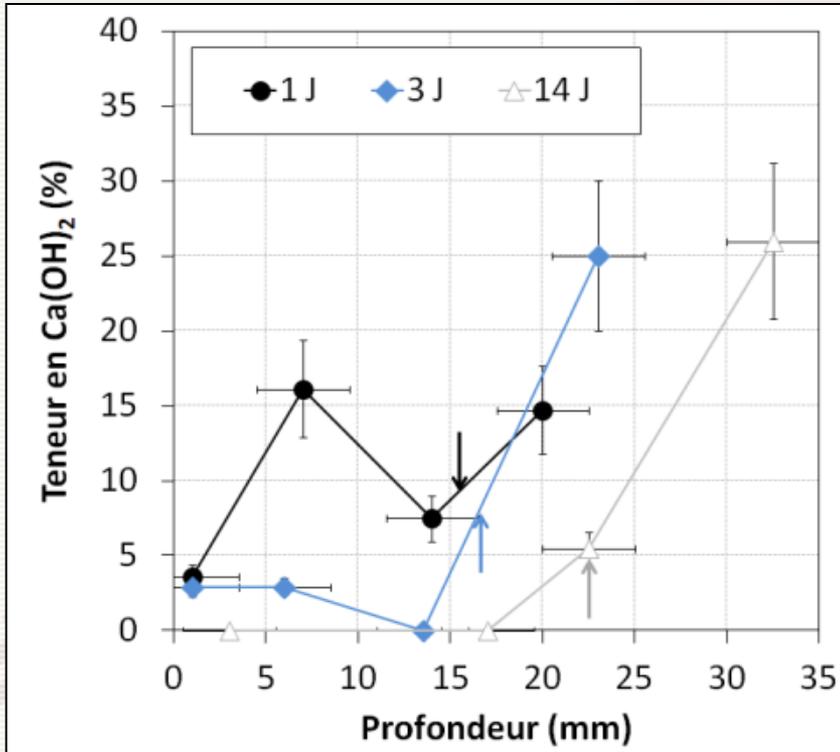


Etude de l'essai de carbonatation accélérée

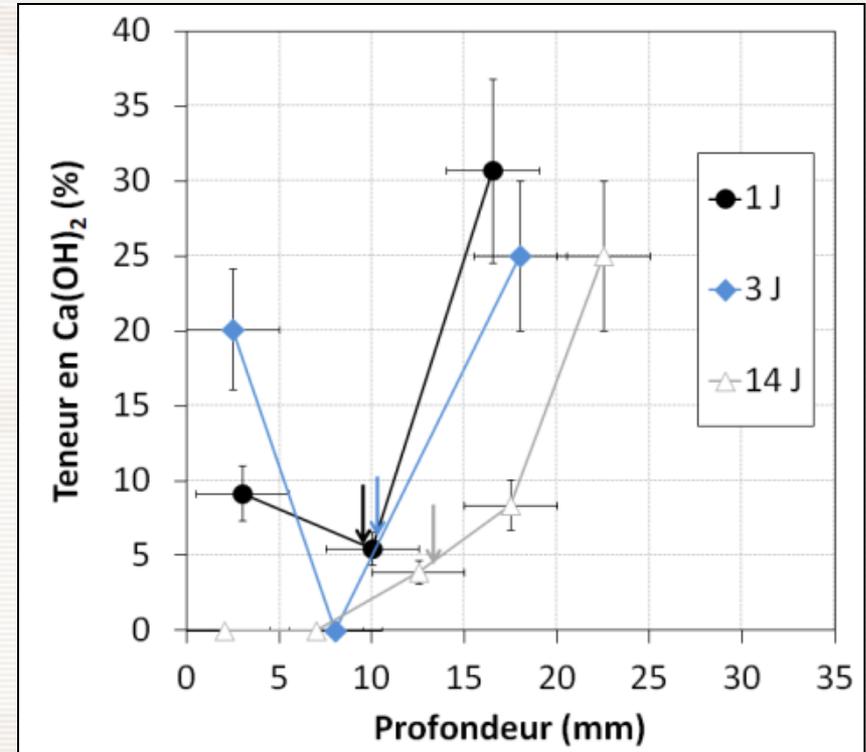
Résultats

Profil de teneur en Portlandite (% masse de ciment)

Conservation « Air »



Conservation « Eau »



Confirmation des indications de la phénolphtaléine :

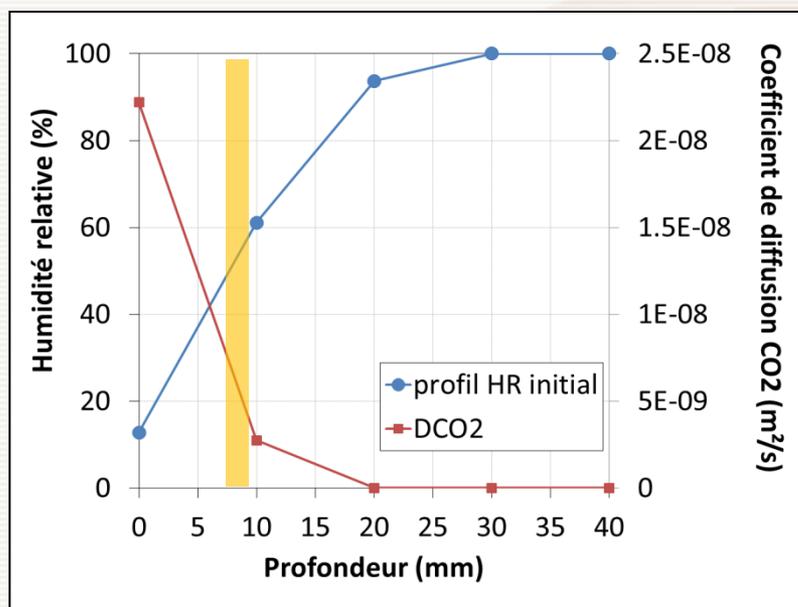
carbonatation moindre dans la zone Xc2

Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Résultats

Interprétation des résultats :

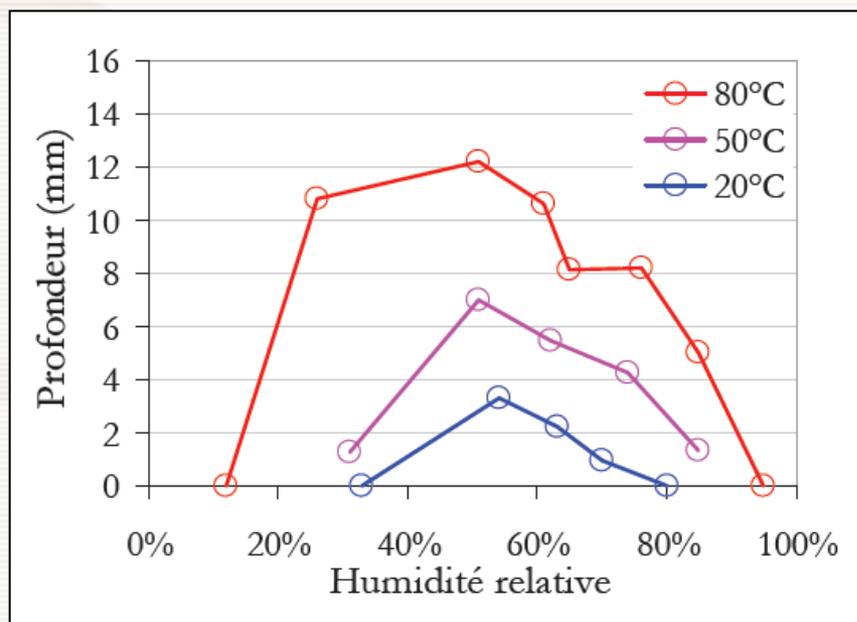
Diffusion du CO₂ :



Diffusion très rapide car **h (ou S)** très faible

Réaction de carbonatation :

(Drouet, 2010)



Absence de carbonatation car **h (ou S)** trop faible

Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Bilan

Essai de carbonatation accélérée selon la norme XP P18-458 :

- Après étuvage : **fort déséquilibre hydrique** entre le cœur et la peau des échantillons et entre HR ambiante et échantillon
- Phénolphaléine + ATG : **absence de carbonatation** dans les premiers cm (← matériau trop sec)

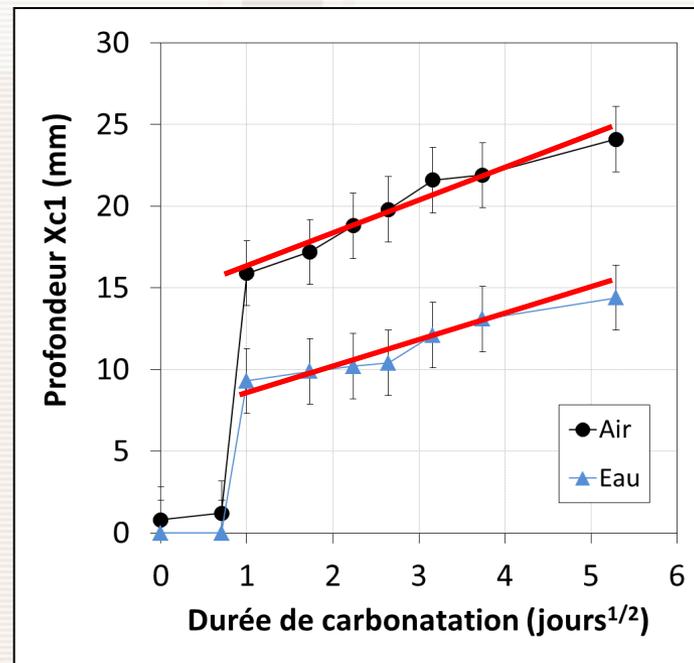
Etude de l'essai de carbonatation accélérée

Bilan

- **Pertinence** de la procédure actuelle ?
- **Revoir** la méthode de préconditionnement des échantillons ?

... ou exploiter **différemment** les essais ?

profondeur de carbonatation (mm) → vitesse de carbonatation ($\text{mm.j}^{-1/2}$)



Conclusion

Carbonatation des matériaux cimentaires

- Carbonatation = phénomène complexe car couplages entre transferts et chimie
- Phénomène étudié depuis longtemps (carbonatation de la chaux !) mais qui reste à mieux comprendre ...
 - Méthode d'évaluation du risque de carbonatation ?
 - Comportement à long terme des nouveaux matériaux ?
 - De nouvelles techniques expérimentales à explorer...

Références

- (Khohkar et al, 2010)
- (Projet ANR Ecobéton, 2010)
- (Younsi, 2011)
- (Habert et al, 2008)
- (Houst, 1992)
- (Delmi, 2004)
- (Han et al, 2012)
- (Wan et al, 2014)
- (Snyder, 2004)
- (Thiery, 2005)
- (Villain et al., 2007)
- (Villain et al, 2006)
- (Mensi, 1988)
- (Omikrine-Metalssi, 2006)
- (Granger, 1997)
- (Roelfstra, 1989)
- (Vénuat, 1978)
- (Drouet, 2010)