



énergie atomique • énergies alternatives

Carbonatation des matériaux cimentaires en conditions insaturées

Stéphane POYET

CEA Saclay

Laboratoire d'Étude du Comportement des Bétons et Argiles

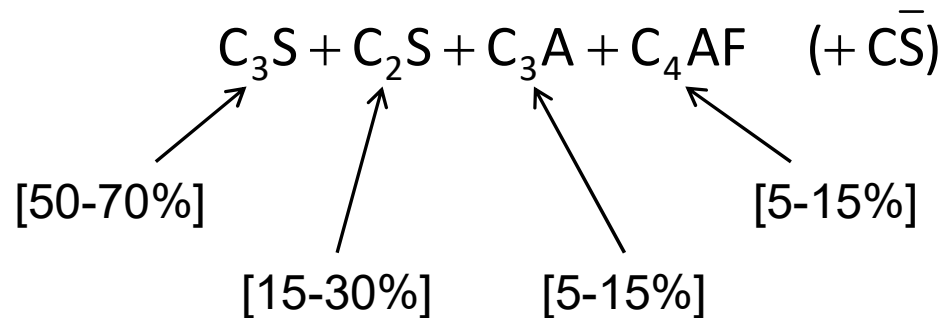
Carbonatation des matériaux cimentaires



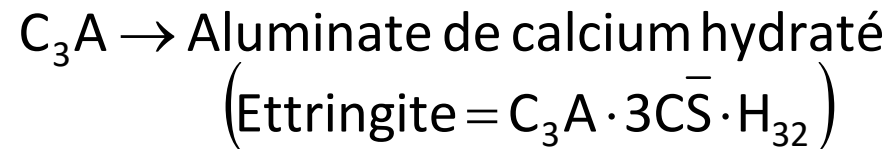
energie atomique • énergies alternatives

□ Rappels (rapides) sur l'hydratation

- CEM I anhydre : clinker + gypse (~5%)



- Réaction avec l'eau (hydratation)



- Formation d'un solide poreux (calcium)
+ solution interstitielle à l'équilibre (pH ~ 13,5)

Carbonatation des matériaux cimentaires

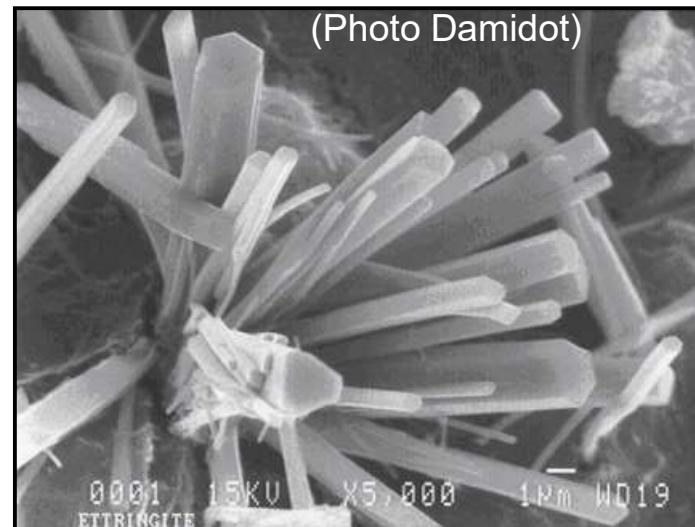
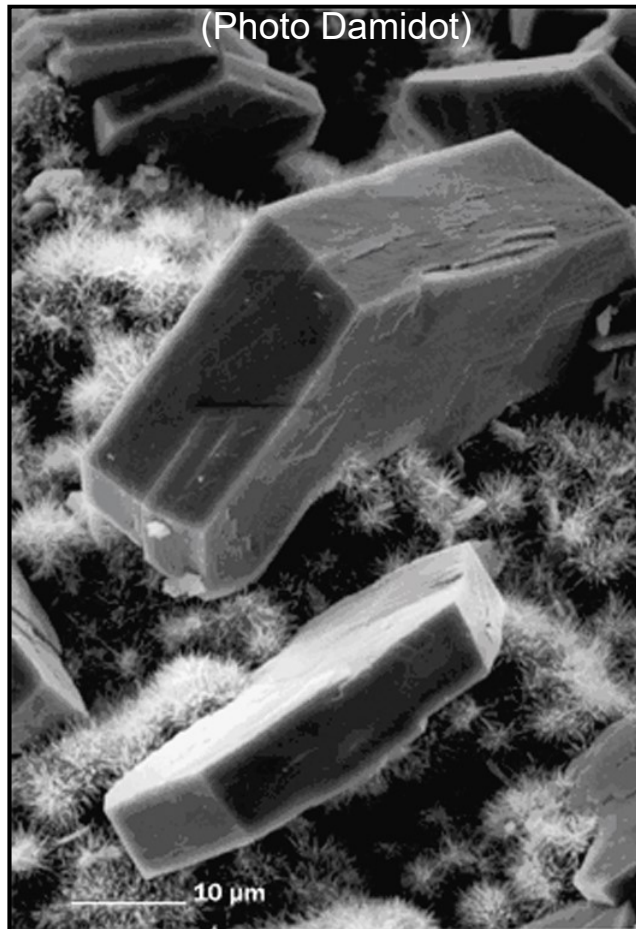
□ Rappels (rapides) sur l'hydratation

cea

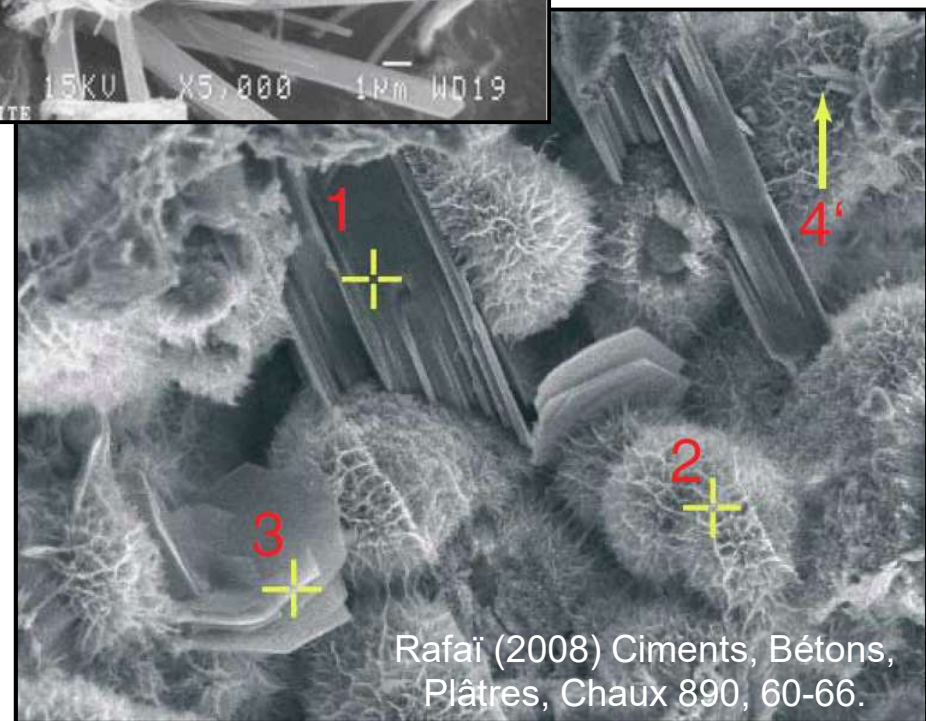
energie atomique • énergies alternatives

Nonat (2008)

La durabilité des bétons
(chap. 2), Presses ENPC.



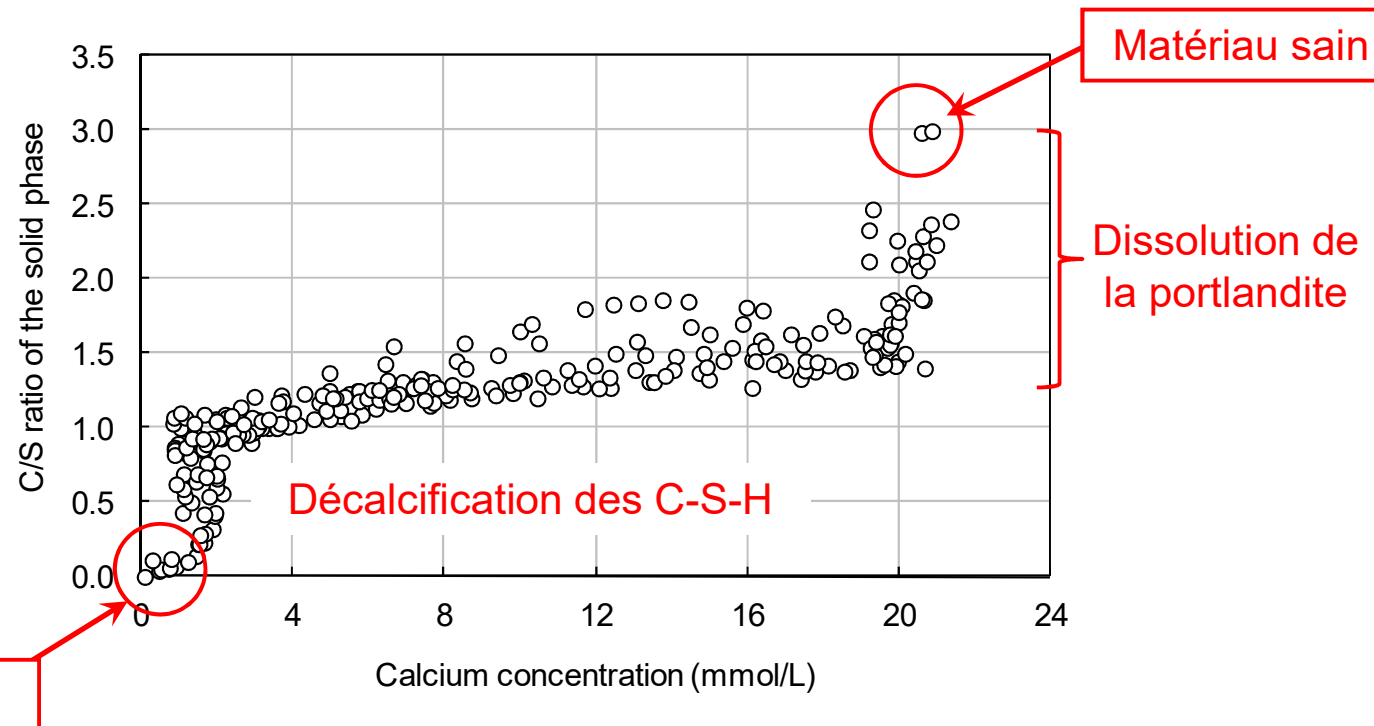
1. Portlandite (CH)
2. C-S-H
3. Aluminate
4. Ettringite



Carbonatation des matériaux cimentaires

❑ Rappels (rapides) sur l'hydratation

- Equilibre calcium solide-solution interstitielle (absence d'alcalins)
- Température comprise entre 20 et 30°C



Compilation des résultats de Flint & Wells (1934), Roller & Erwin (1940), Taylor (1950), Kalousek (1952), Greenberg & Chang (1965), Fujii & Kondo (1981), Chen et al. (2004).

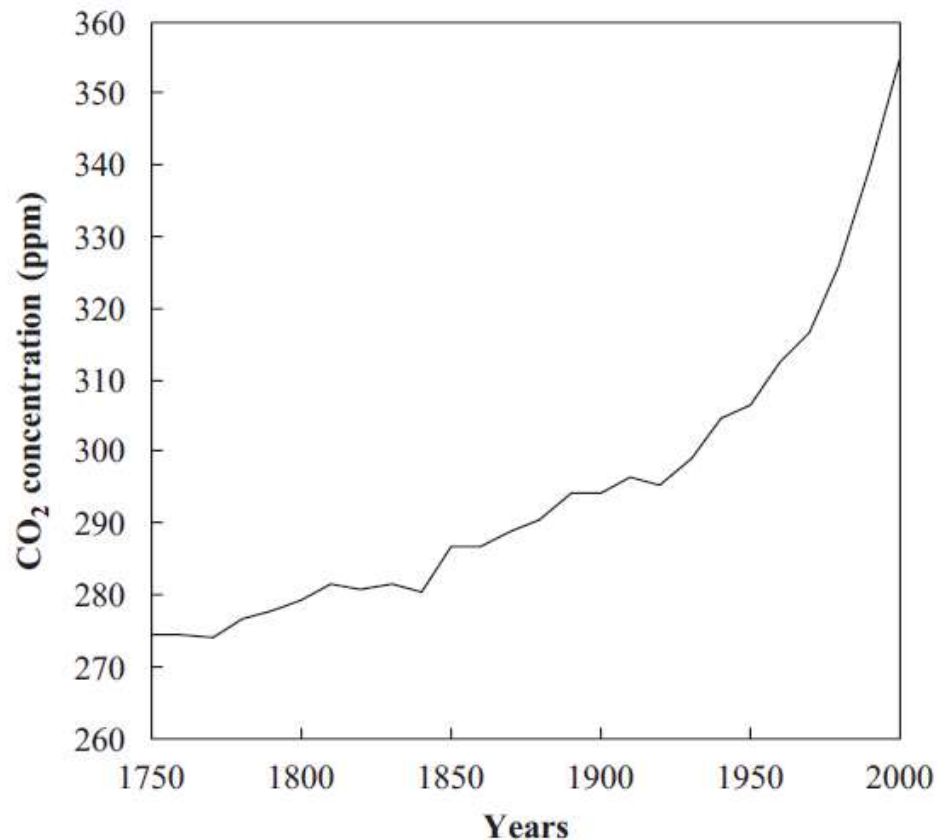
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

☐ Interaction béton-environnement

- Contact du matériau cimentaire avec l'environnement
- Présence de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (0,035%)



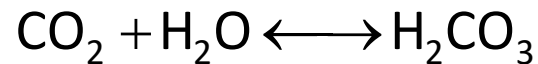
Yoon et al. (2002)
Atmospheric Environment
41(34), 7274-7285.

Carbonatation des matériaux cimentaires



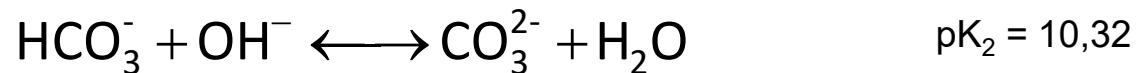
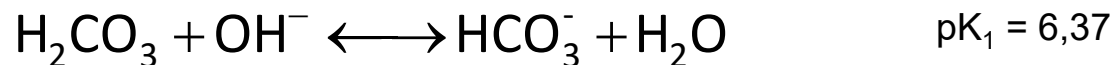
☐ Interaction béton-environnement

- Pénétration du CO_2 dans le matériau par diffusion gazeuse
- « Contact » entre la solution interstitielle et le CO_2
- Dissolution du $\text{CO}_2(\text{g})$ dans la solution



$$[\text{H}_2\text{CO}_3] = H \cdot p_{\text{CO}_2} \quad \text{Loi de Henry}$$

- Dissociation de l'acide H_2CO_3

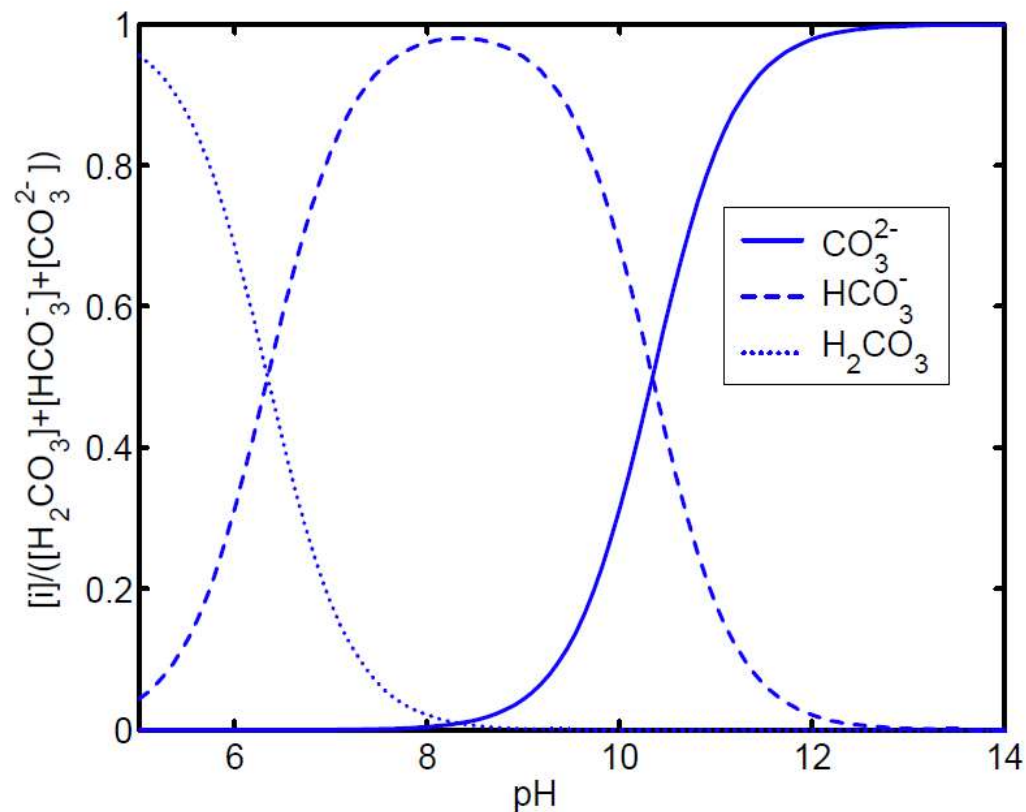


Carbonatation des matériaux cimentaires



☐ Interaction béton-environnement

- Dissociation du diacide $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow$ dépend du pH
- Forme CO_3^{2-} majoritaire à pH élevé



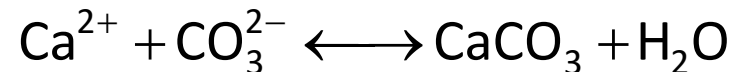
Thiéry (2005) Thèse de doctorat de l'ENPC.

Carbonatation des matériaux cimentaires

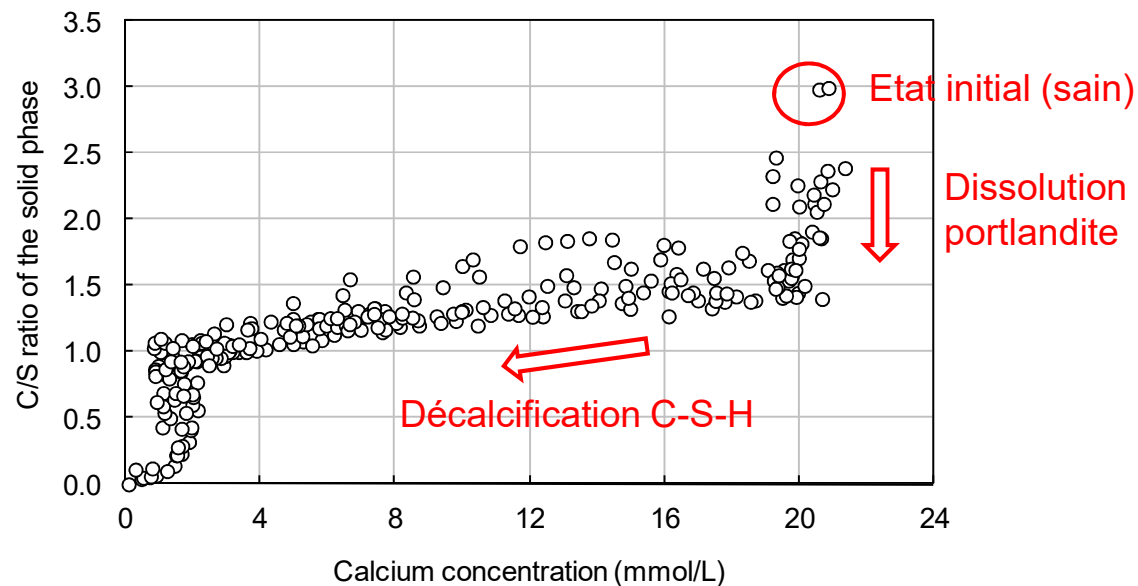


☐ Interaction béton-environnement

- Mise en présence de CO_3^{2-} et de Ca^{2+}
 - précipitation de carbonate de calcium



- Consommation des ions calcium
 - déficit en calcium dans la solution
 - dissolution des hydrates (portlandite dans un premier temps)

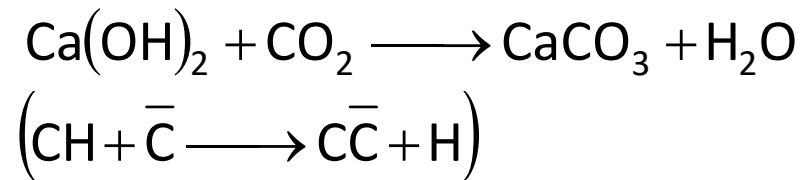
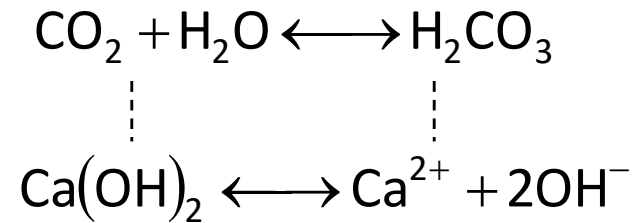


Carbonatation des matériaux cimentaires



☐ Carbonatation des hydrates

➤ Carbonatation de la portlandite (écriture simplifiée)



➤ Carbonatation des sulfo-aluminates

- Formation de carbonate + libération sulfates & aluminates
- Faibles quantités...

Carbonatation des matériaux cimentaires

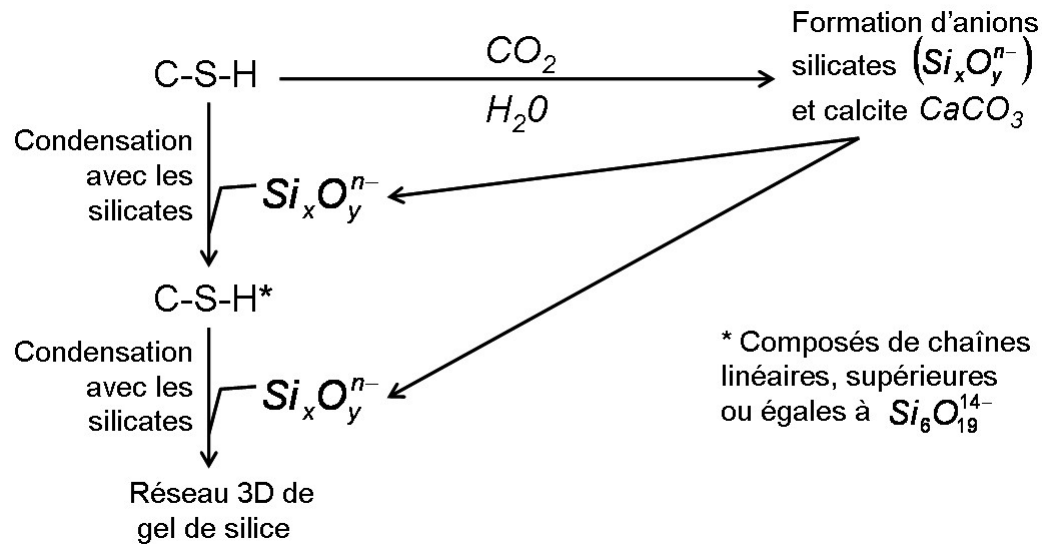


energie atomique • énergies alternatives

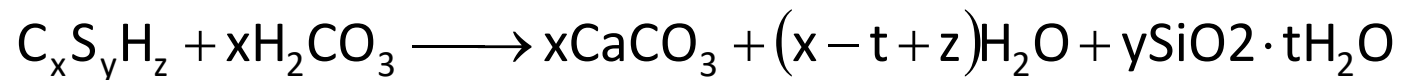
☐ Carbonatation des hydrates

➤ Carbonatation des C-S-H

- Polymérisation des C-S-H, baisse du rapport C/S



Dunster (1989)
Advances in Cement
Research 2(7), 99-106.



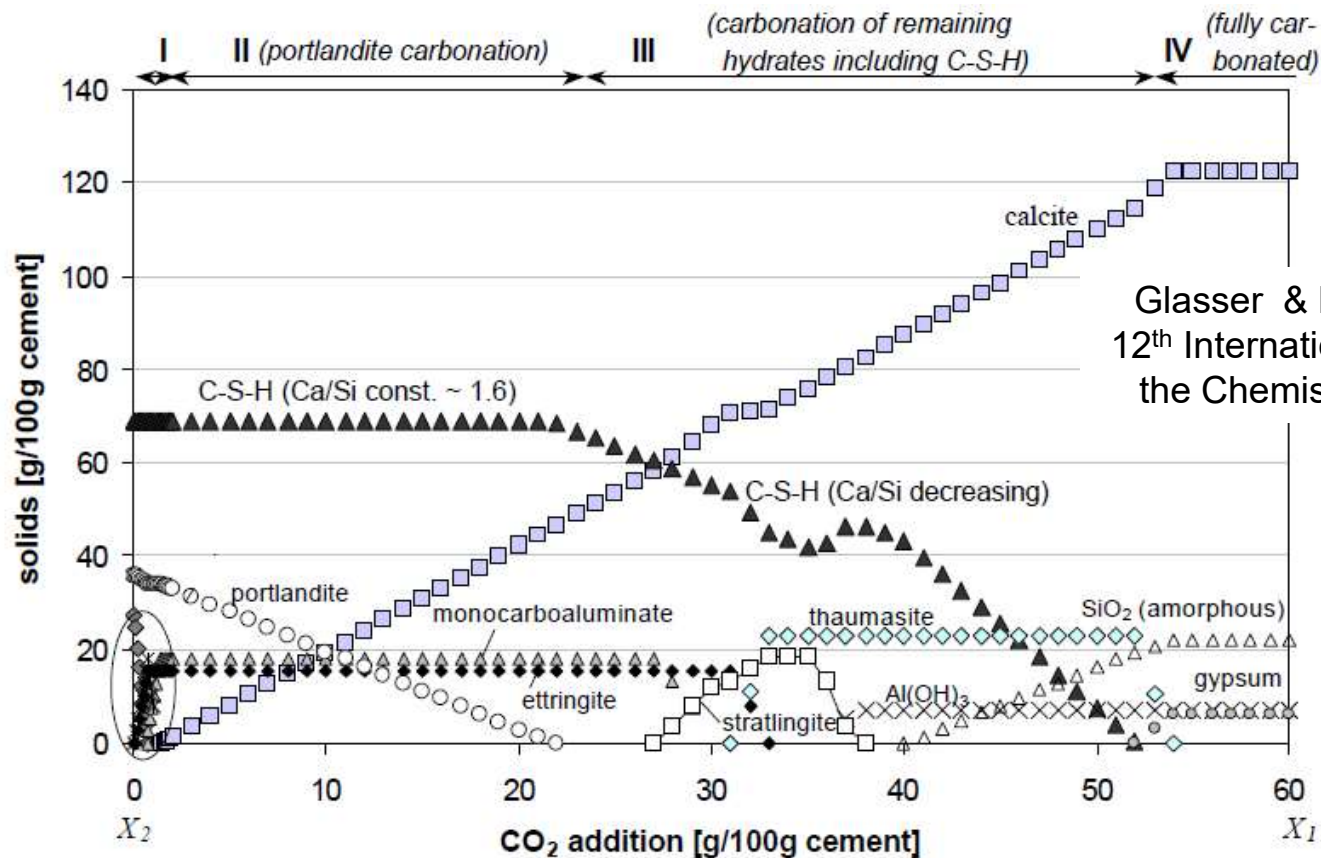
Carbonation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

Carbonation des hydrates

- Modélisation thermo de la carbonation
 - évolution minéralogique à l'équilibre



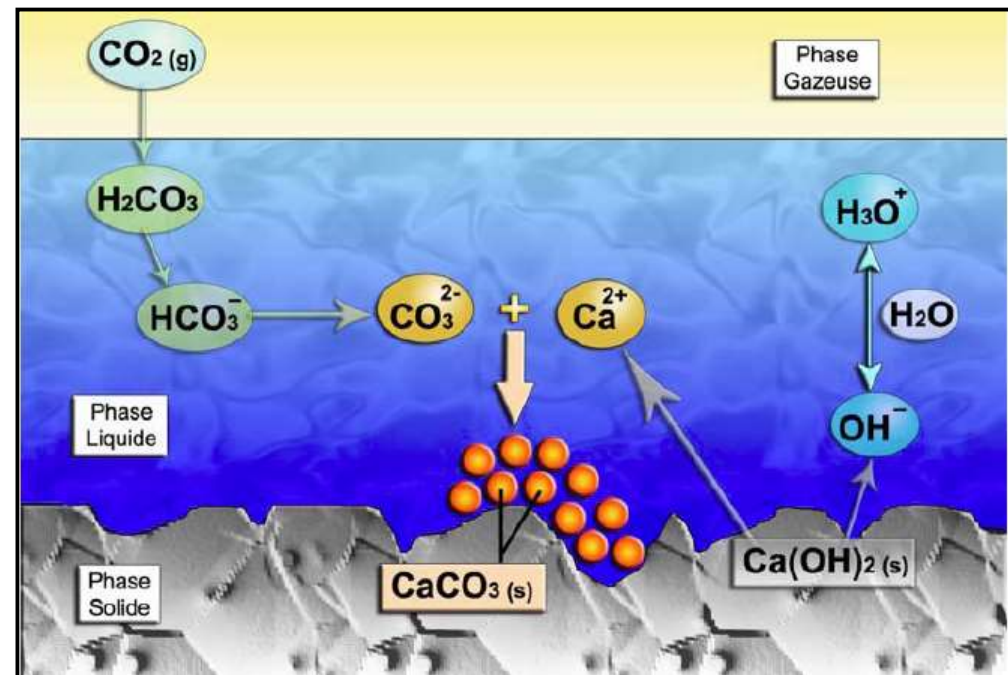
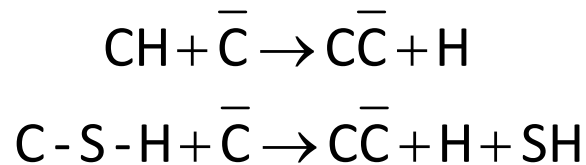
Glasser & Matschei (2007)
12th International Congress on
the Chemistry of Cements.

Carbonatation des matériaux cimentaires



□ Récapitulatif

- Dissolution du $\text{CO}_2(\text{g})$ dans la solution interstitielle
- Réaction (en solution) avec les ions Ca^{2+}
- Précipitation de carbonate de calcium
- Dissolution des hydrates (équilibre calcium)



Thiéry (2005) Thèse de doctorat de l'ENPC.

Carbonatation des matériaux cimentaires



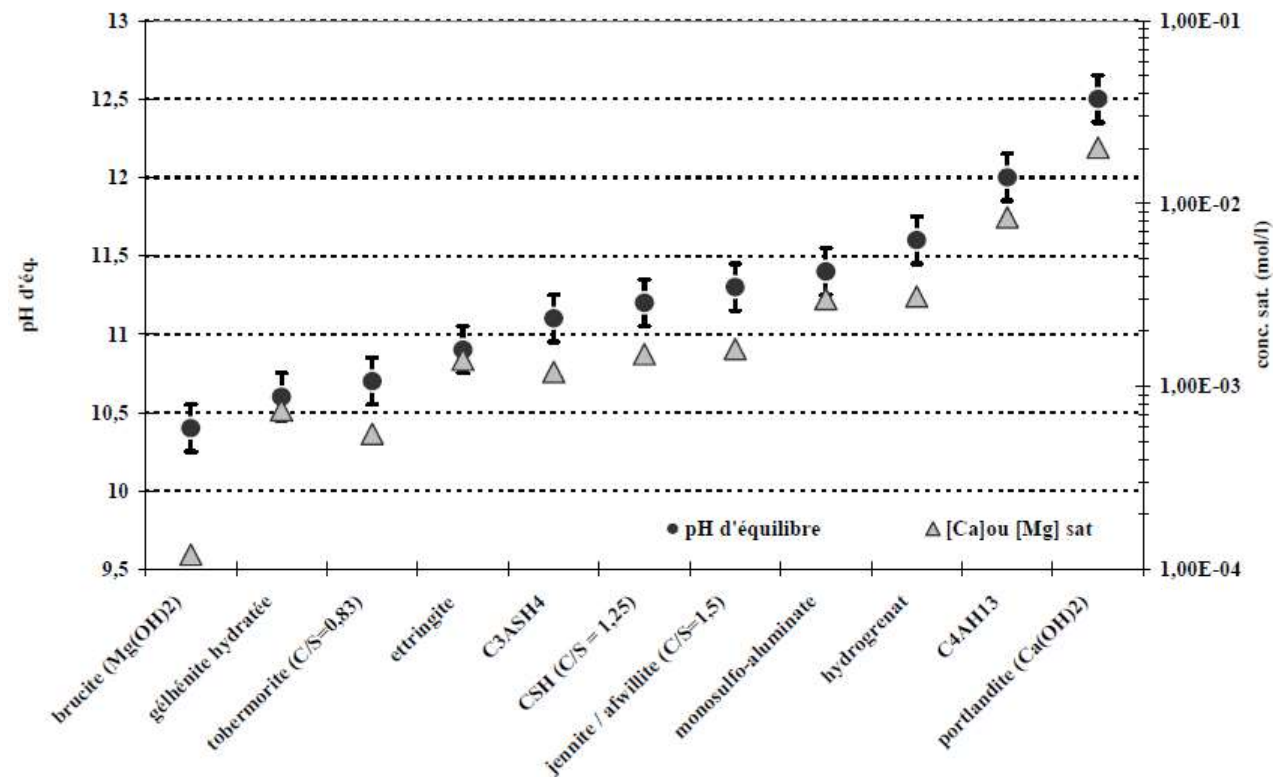
energie atomique • énergies alternatives

□ Conséquences de la carbonatation

➤ Dissolution des hydrates

→ baisse du pH de la solution interstitielle

→ pH à l'équilibre avec le carbonate de calcium ~8,2 (à 25°C)



Bourbon (2002) Rapport
Andra C RP AMAT 01.33.

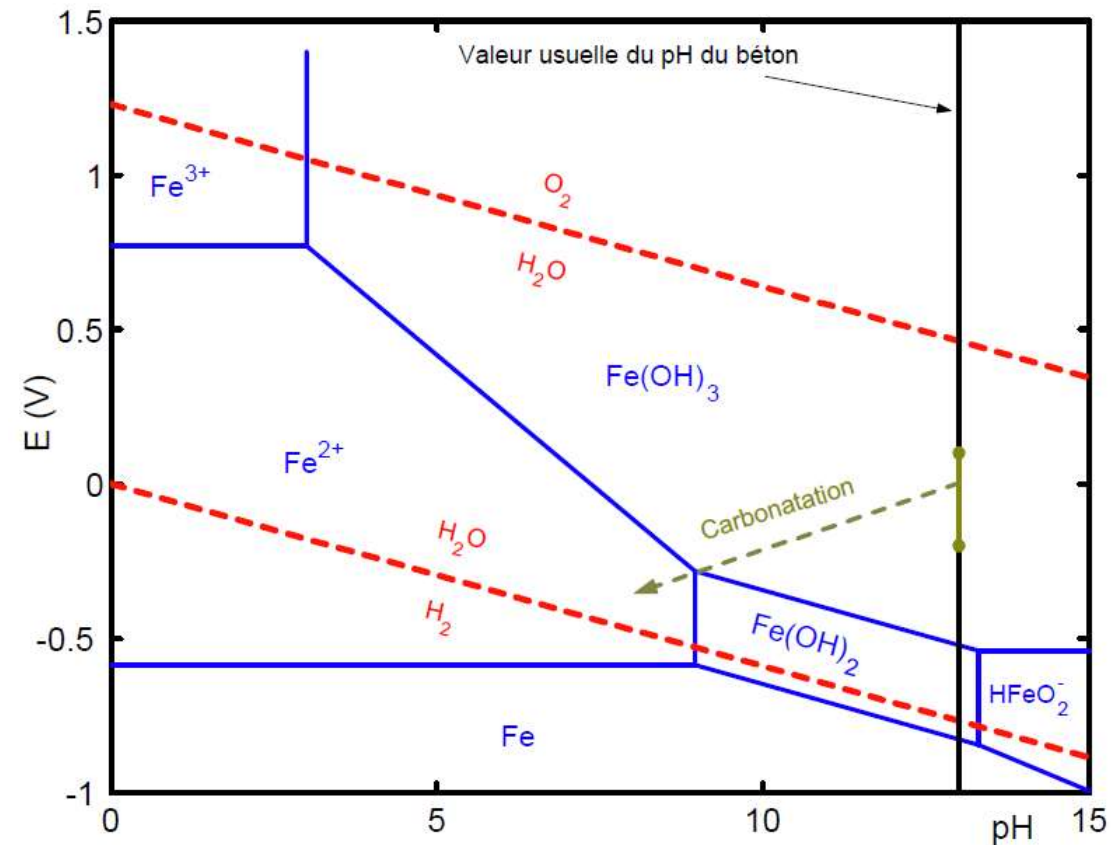
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Conséquences de la carbonatation

- Baisse du pH → dépassivation des armatures



Thiéry (2005) Thèse de doctorat de l'ENPC.

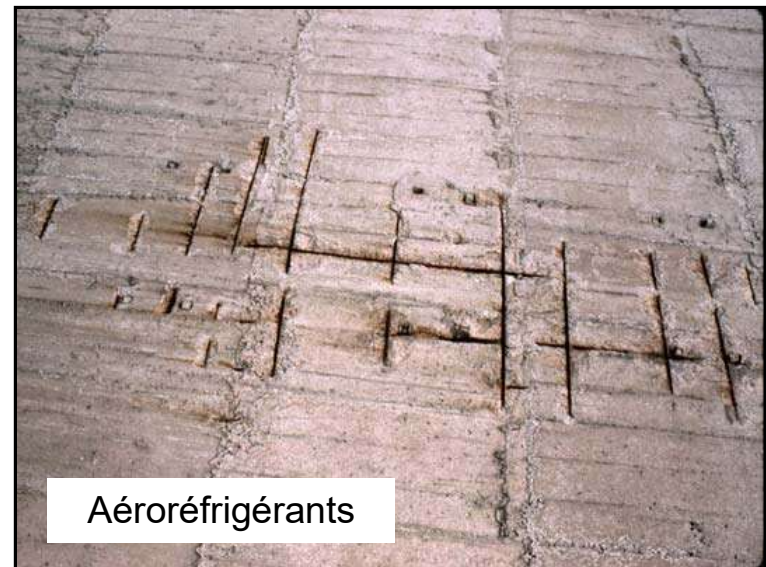
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

- ❑ Conséquences de la carbonatation
 - Corrosion généralisée

www.concretecorrosion.net



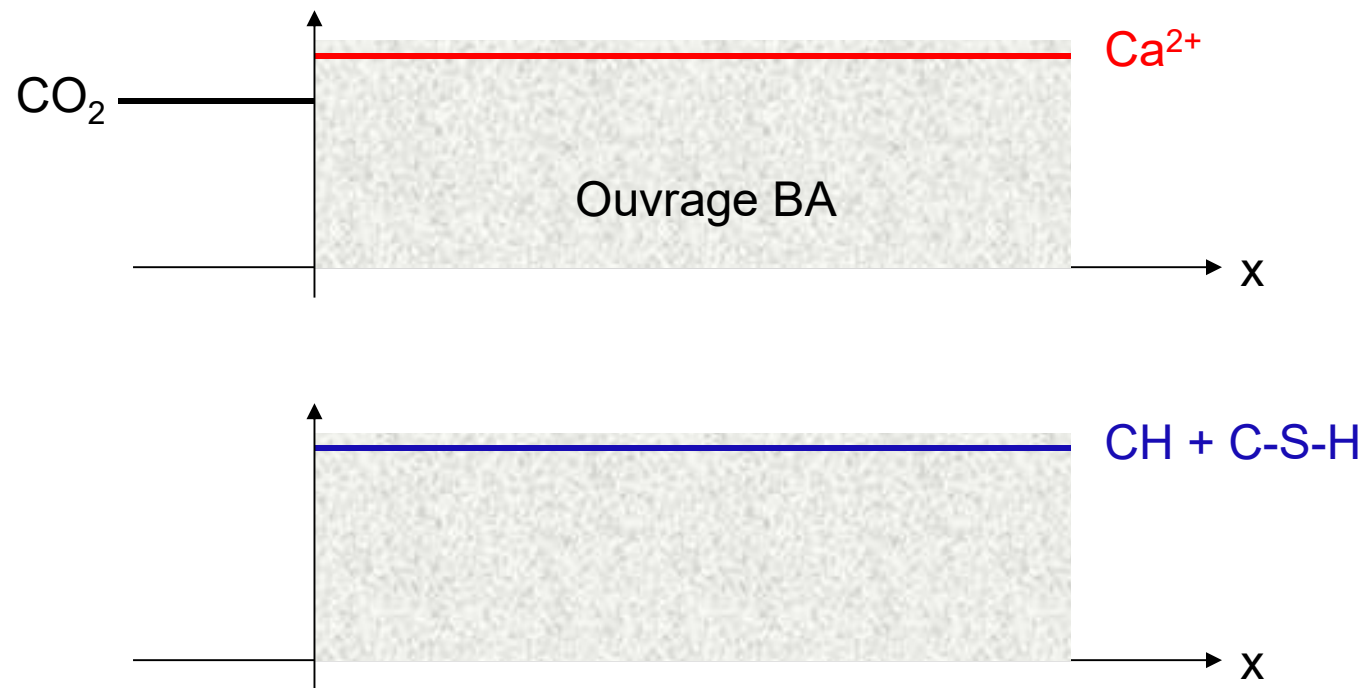
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Cinétique de la carbonatation

➤ Etat initial (équilibre)



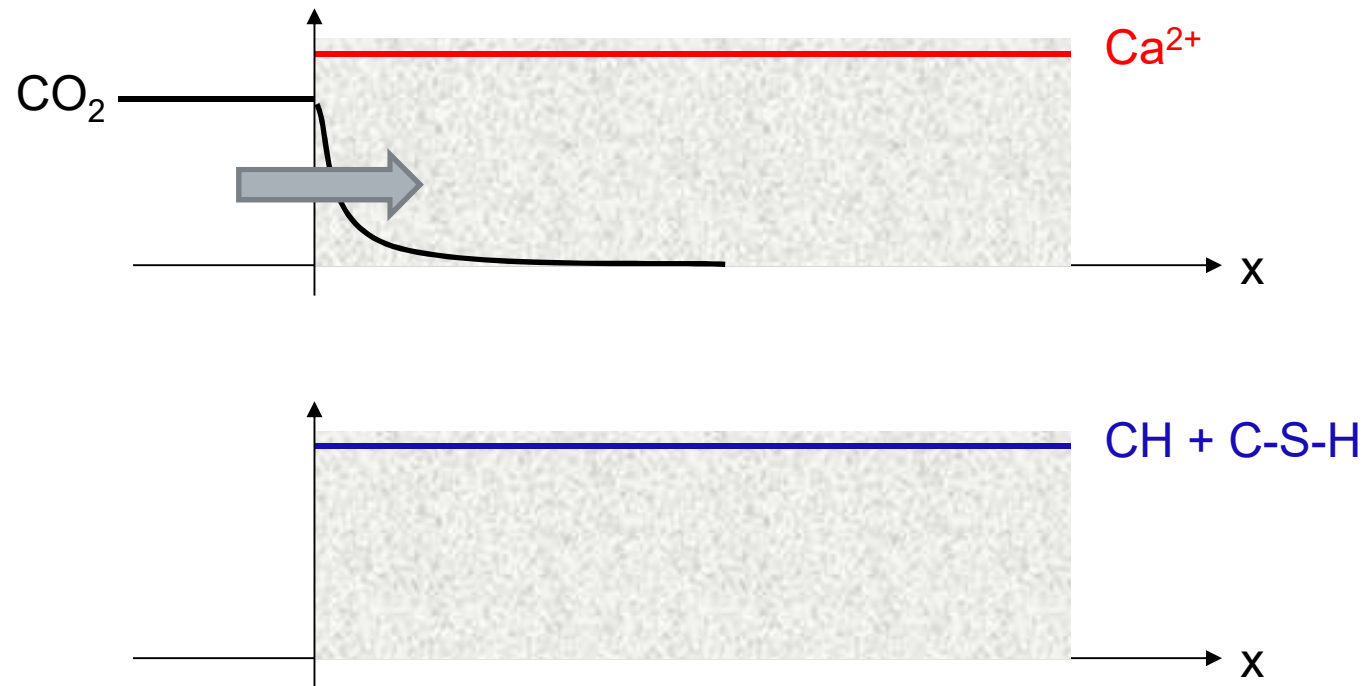
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Cinétique de la carbonatation

- Pénétration du CO_2 par diffusion gazeuse



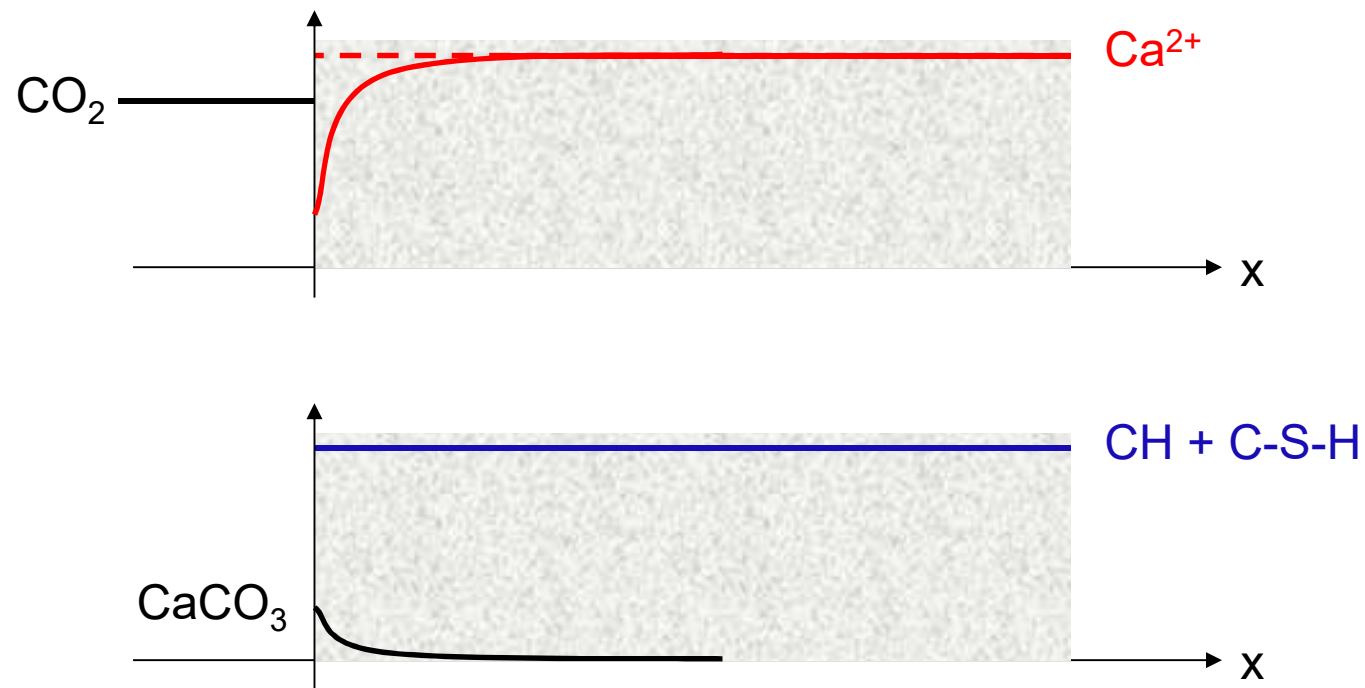
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Cinétique de la carbonatation

- Réaction du CO_2 et des ions Ca^{2+} → précipitation de CaCO_3



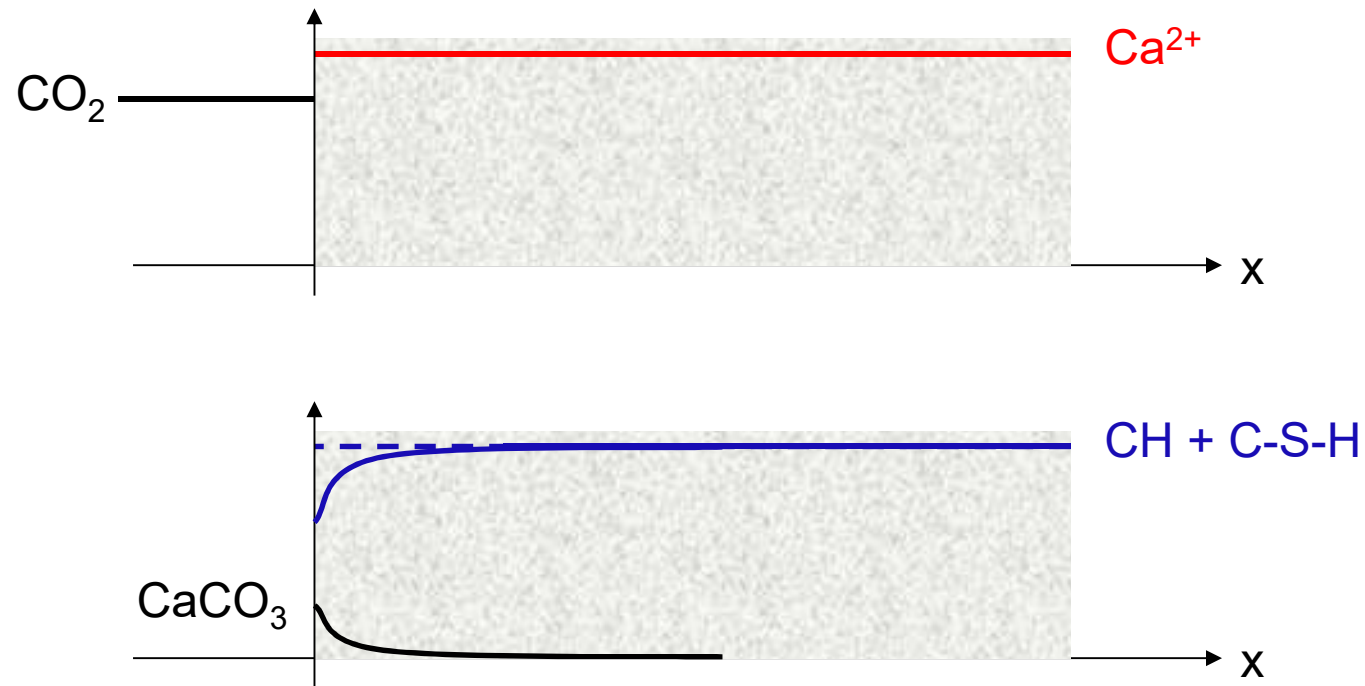
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Cinétique de la carbonatation

- Dissolution des hydrates → équilibre solide-solution



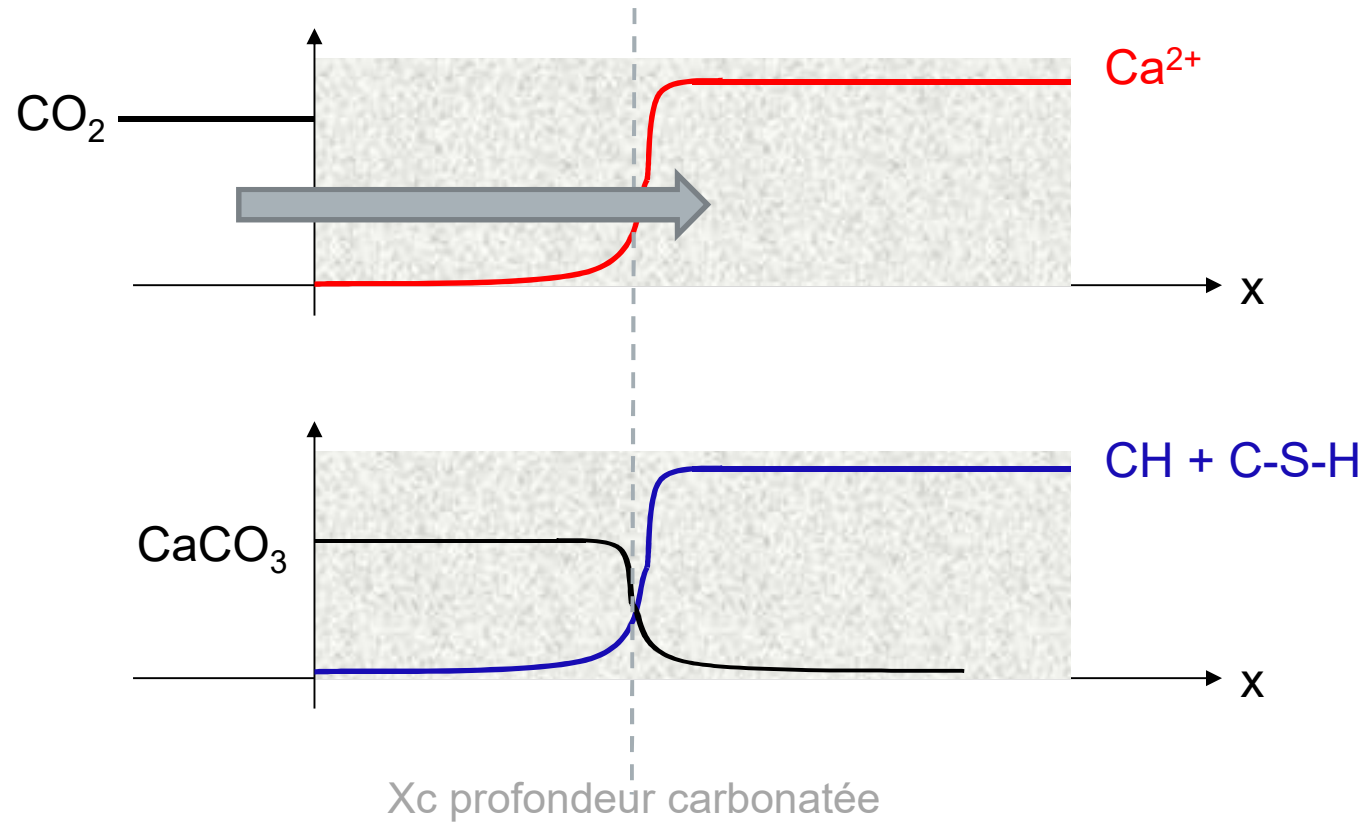
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Cinétique de la carbonatation

- Pour une échéance quelconque



Le temps de diffusion du CO_2 augmente avec la profondeur carbonatée

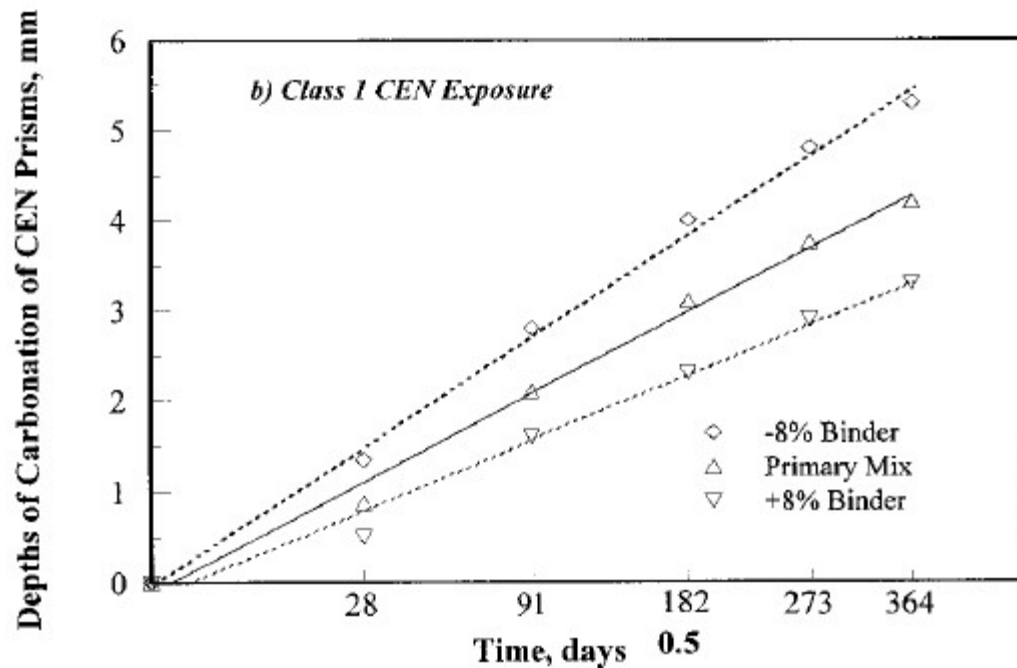
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Cinétique de la carbonatation

- La cinétique de la carbonatation dépend de :
 - la diffusion du CO₂
 - dissolution des hydrates / précipitation du carbonate



Expérimentalement évolution en fonction de la racine carrée du temps
→ Pilotage par la diffusion

$$X_c(t) = k\sqrt{t}$$

Jones et al. (2000)
Materials and Structures
33, 135-142.

Carbonatation des matériaux cimentaires

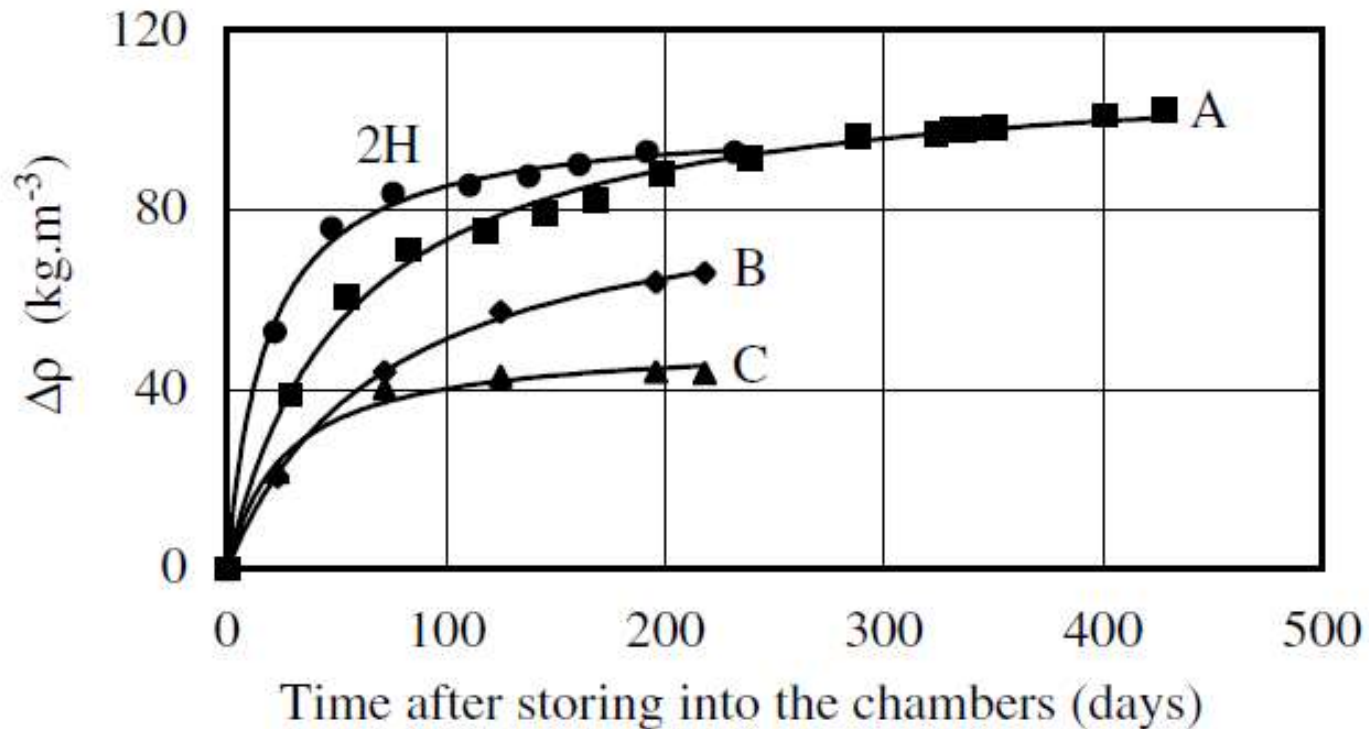


energie atomique • énergies alternatives

□ Conséquences de la carbonatation

- Prise de masse au cours de la carbonatation

Jerga (2004)
Construction and Building
Materials 18, 645-652.



Prise de masse → fixation du CO_2 par la précipitation du carbonate de calcium

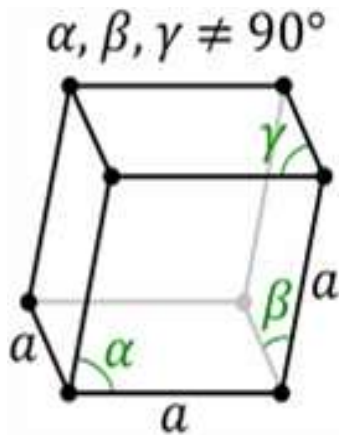
Carbonatation des matériaux cimentaires

❑ Conséquences de la carbonatation

- Précipitation de CaCO_3
- Trois formes polymorphiques

Cole & Kroone (1959)
Nature 4866, 57.

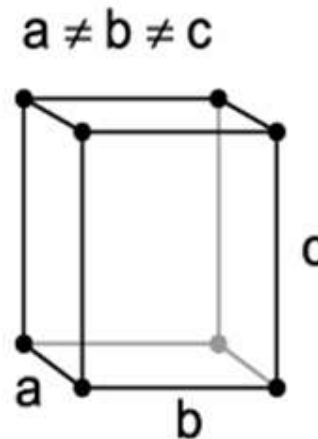
Calcite
(rhomboédrique)



$$a = 4,989$$
$$b = 17,062$$

35 cm³/mol

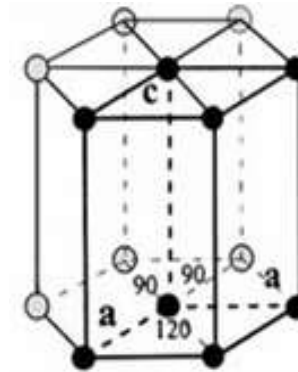
Aragonite
(orthorhombique)



$$a = 4,959$$
$$b = 7,968$$
$$c = 5,741$$

34 cm³/mol

Vatérite
(hexagonal)



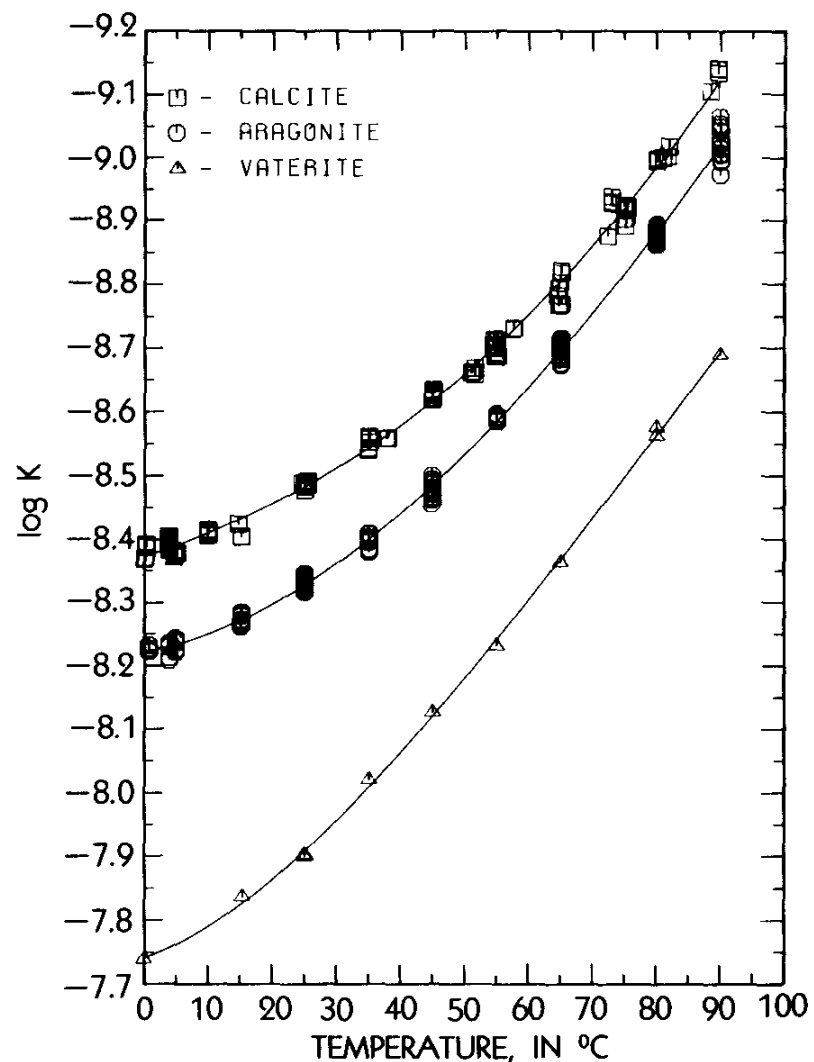
$$a = 7,135$$
$$c = 16,98$$

38 cm³/mol

Carbonatation des matériaux cimentaires

□ Polymorphes de carbonate de calcium

- La calcite est le carbonate stable
- La vaterite n'est pratiquement pas présente dans la nature

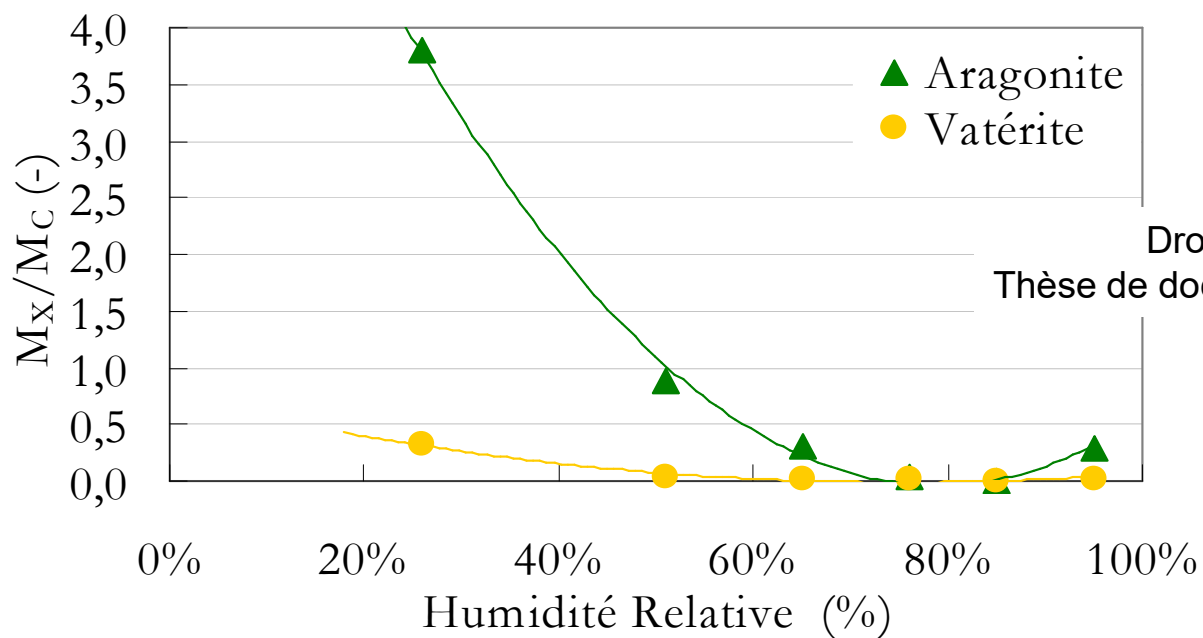


Plummer & Busenberg (1982)
Geochimica & Cosmochimica
Acta 46(6), 1011-1040.

Carbonatation des matériaux cimentaires

□ Abondance polymorphique

- Pâte de CEM I (e/c = 0,4) carbonatée à 80°C (50% CO₂)
- Rapport des quantités Aragonite/Calcite & Vatérite/Calcite
- Aragonite et vatérite sont plus abondants à faible HR



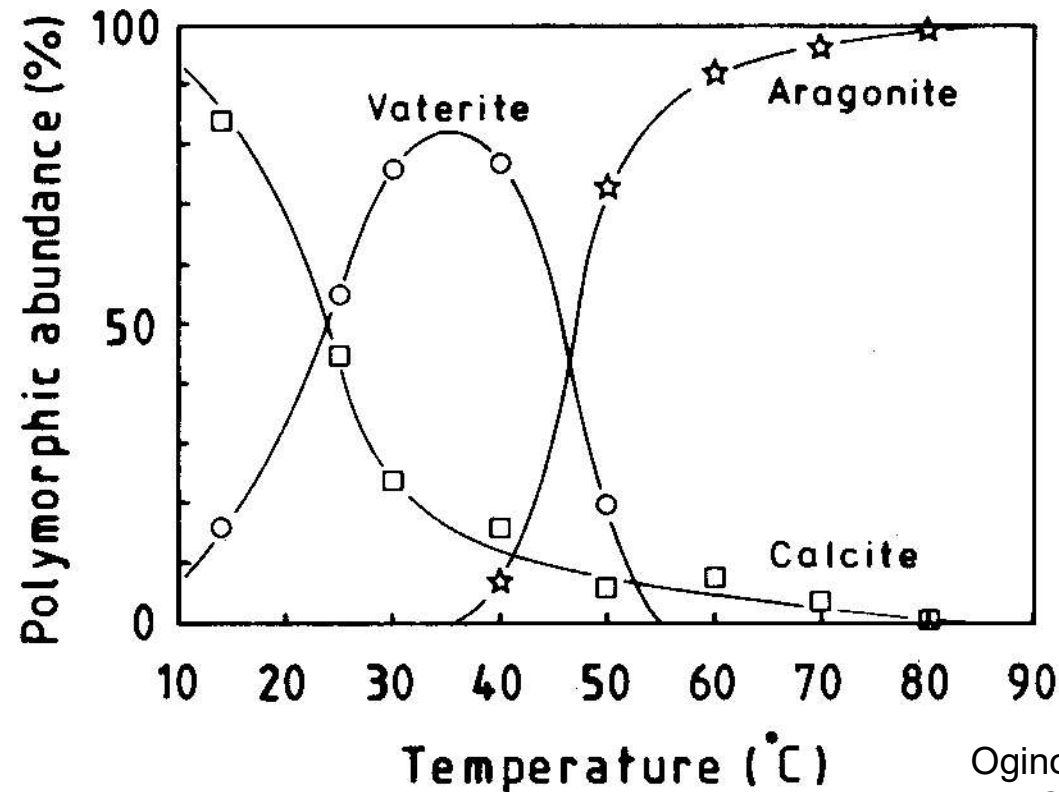
Drouet (2010)
Thèse de doctorat ENS Cachan.

Carbonatation des matériaux cimentaires



□ Abondance polymorphique

- Influence de la minéralogie (C-S-H)
- Influence de la température (essais en solution, état métastable)



Ogino et al. (1987) *Geochimica and Cosmochimica Acta* 51(10), 2757-2767.

Carbonatation des matériaux cimentaires



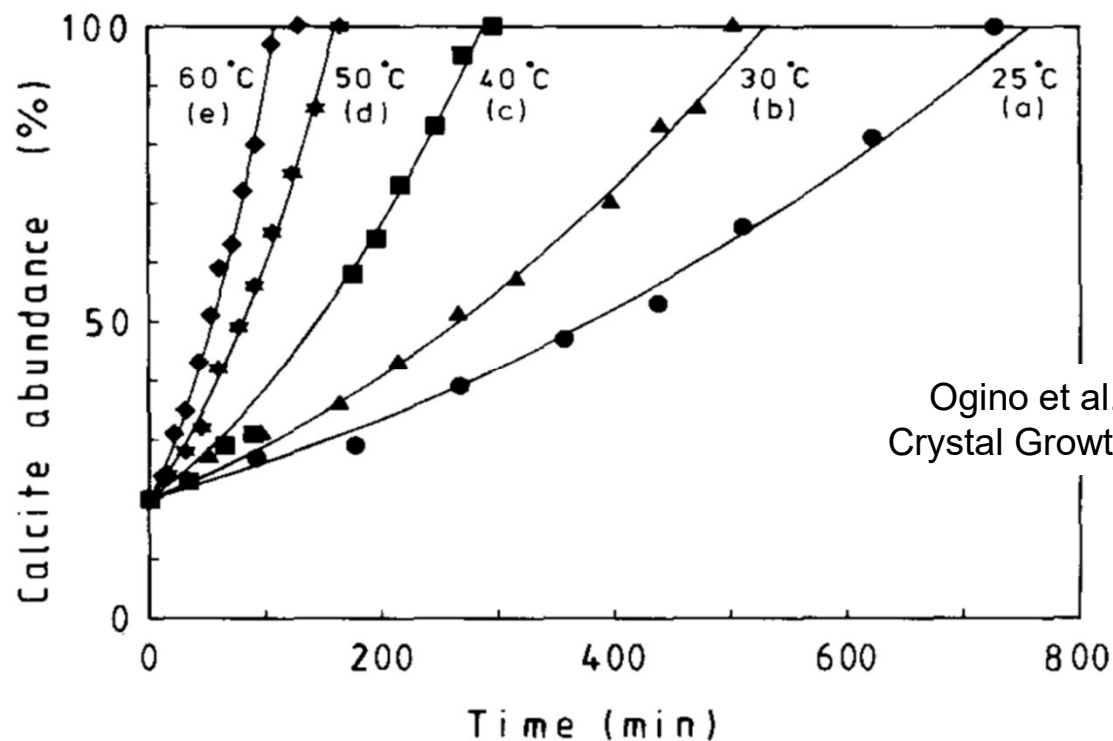
energie atomique • énergies alternatives

□ Abondance polymorphique

➤ Transformation polymorphique (essais en solution)

○ Vatérite → calcite

○ Aragonite → calcite



Ogino et al. (1990) Journal of Crystal Growth 100(1-2), 921-928.

➤ Influence de l'état hydrique

→ inhibition de la transformation polymorphique à faible HR

Carbonatation des matériaux cimentaires



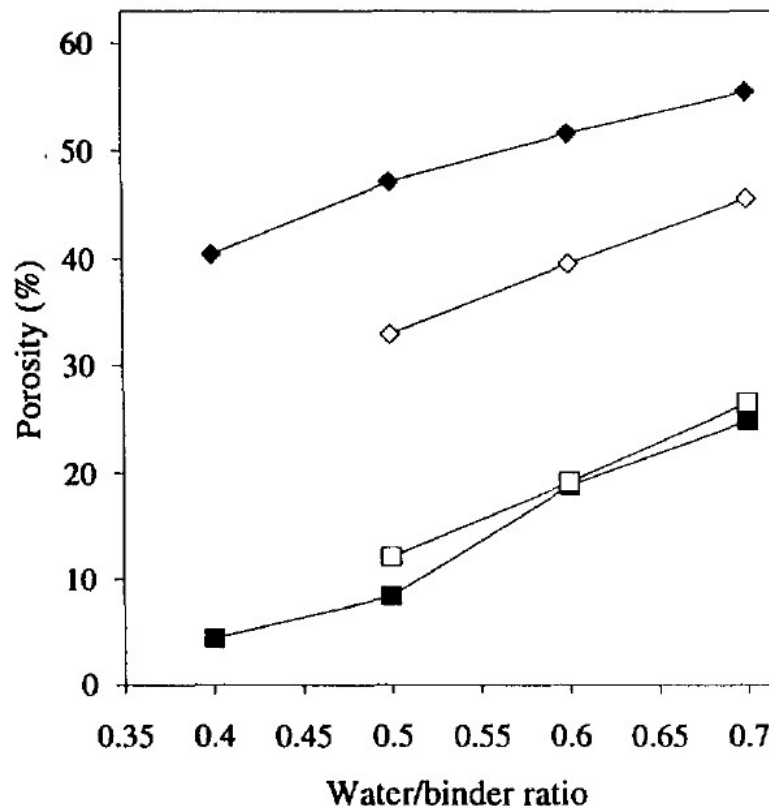
energie atomique • énergies alternatives

□ Conséquences de la carbonatation

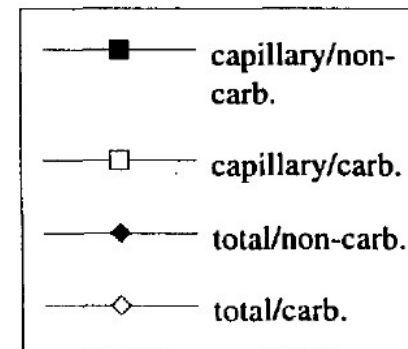
➤ Précipitation de carbonate de calcium

- Volume molaire compris entre 34 et 38 cm³/mol
- Volume molaire de la portlandite 33 cm³/mol

Carbonatation → colmatage de la porosité



Pâtes de CEM I



Ngala & Page (1997)
Cement and Concrete
Research 27(7), 995-1007.

Carbonatation des matériaux cimentaires

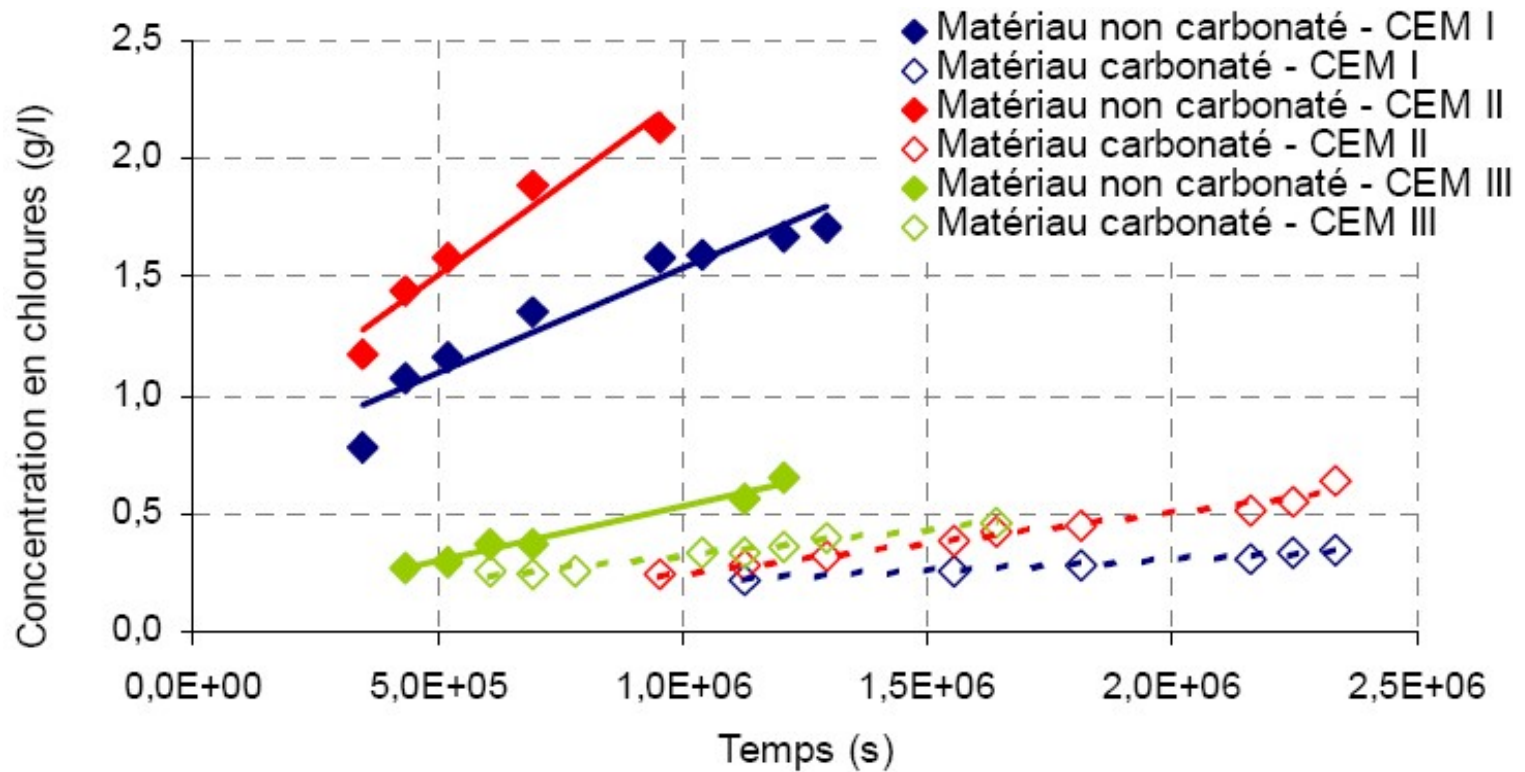


energie atomique • énergies alternatives

□ Conséquences de la carbonatation

➤ Colmatage de la porosité

→ baisse des propriétés de transport



Hyvert (2009) Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse.

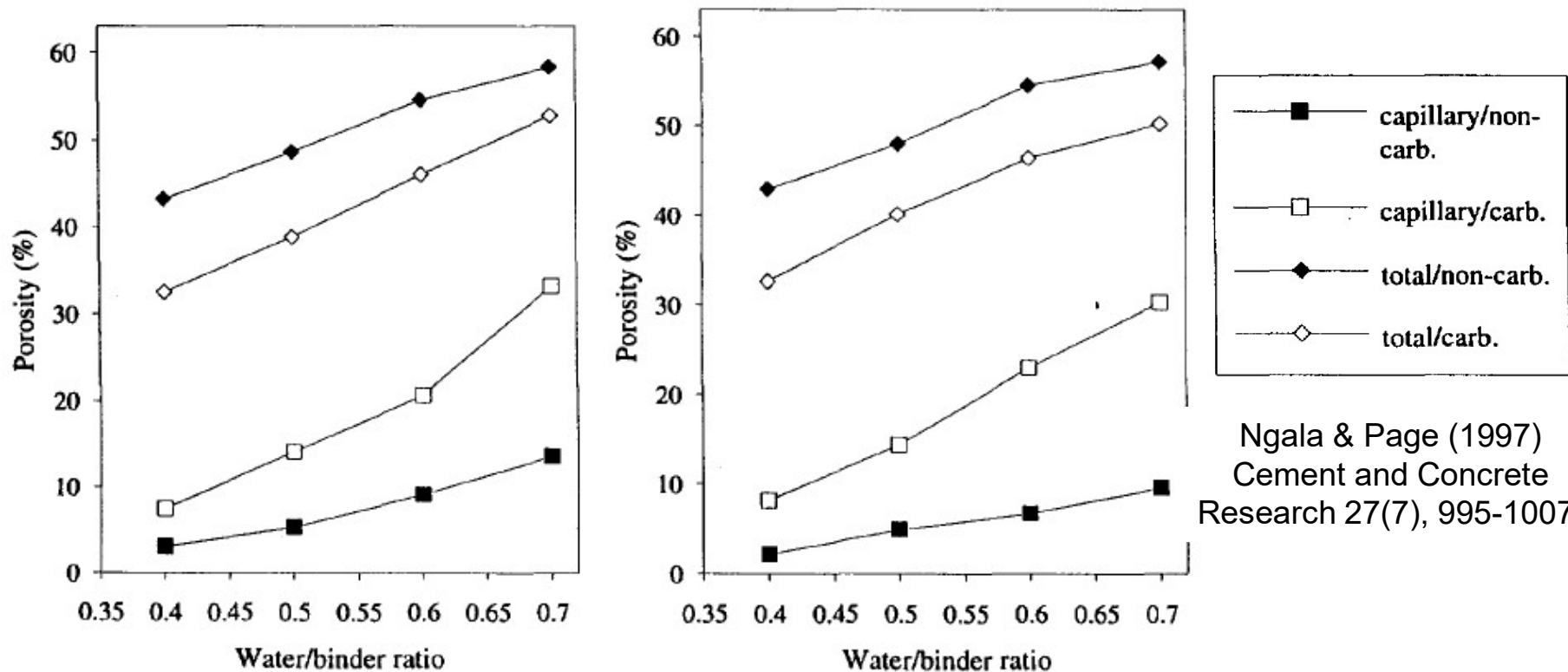
Carbonatation des matériaux cimentaires

□ Conséquences de la carbonatation

- Effet des additions (30% cendres volantes & 65% laitier)
- Baisse de la porosité totale
- Mais augmentation de la porosité capillaire



energie atomique • énergies alternatives



Ngala & Page (1997)
Cement and Concrete
Research 27(7), 995-1007.

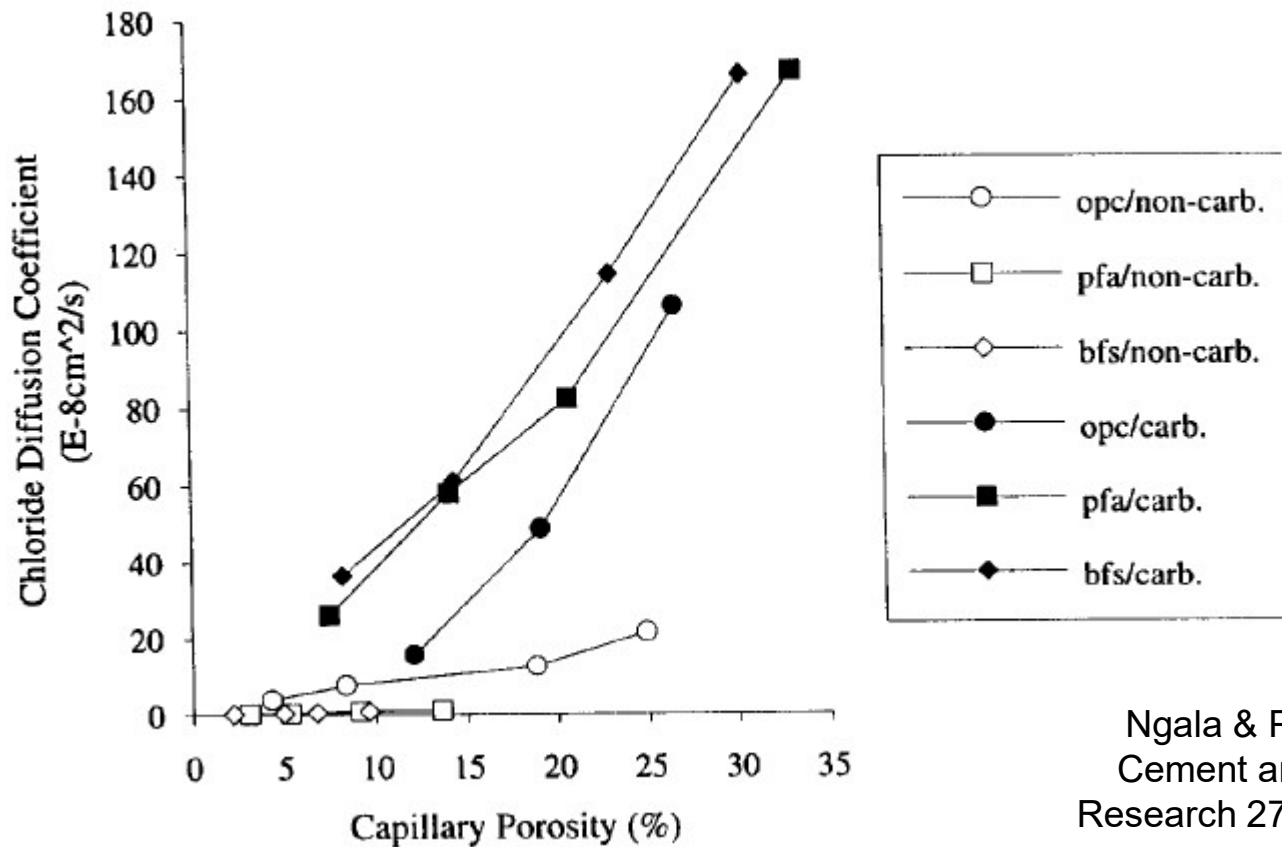
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Conséquences de la carbonatation

- Augmentation de la porosité capillaire
- ➔ Augmentation des propriétés de transport



Ngala & Page (1997)
Cement and Concrete
Research 27(7), 995-1007.

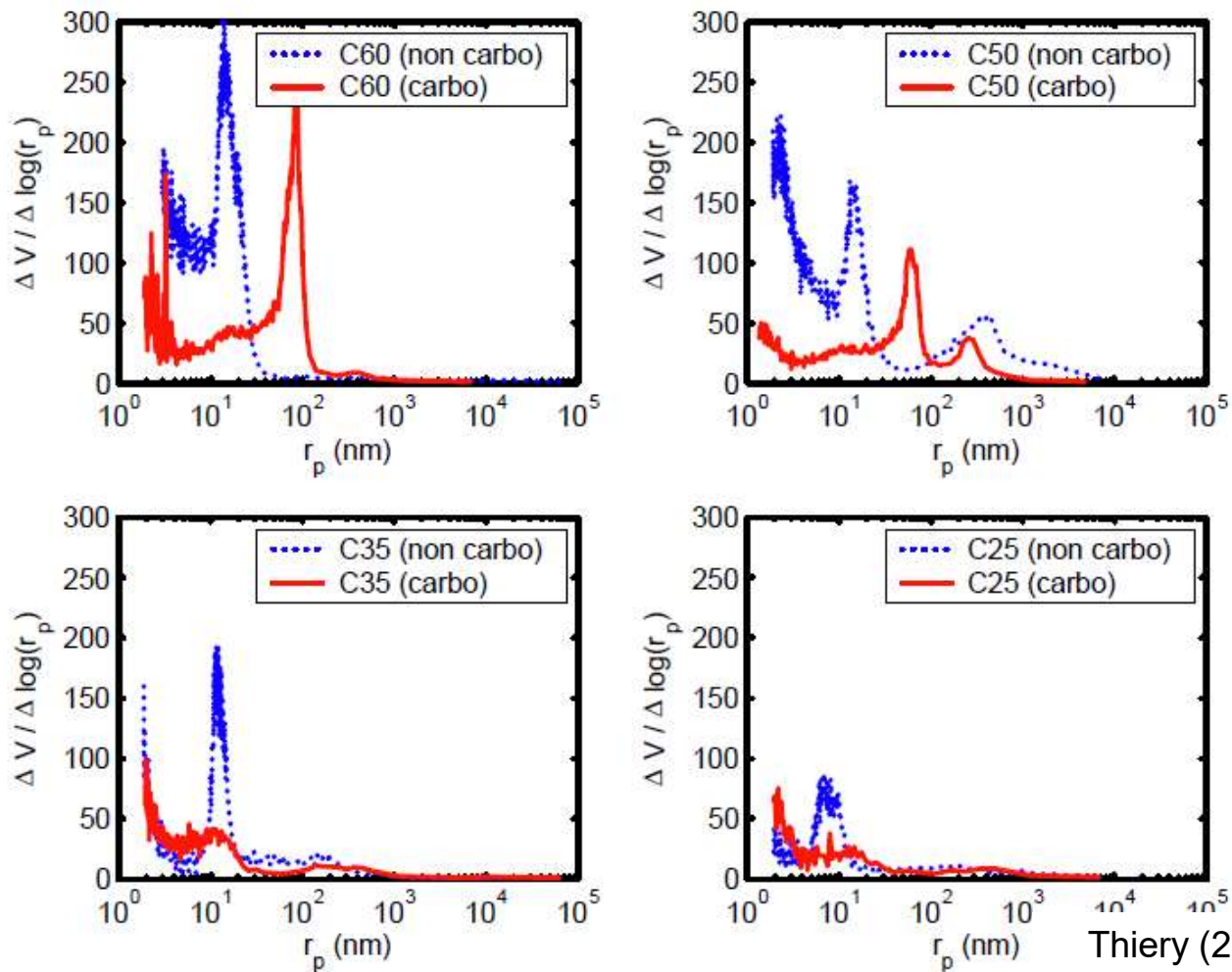
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Conséquences de la carbonatation

- Ouverture de la porosité dans certains cas



Thiery (2005) Thèse de doctorat de l'ENPC.

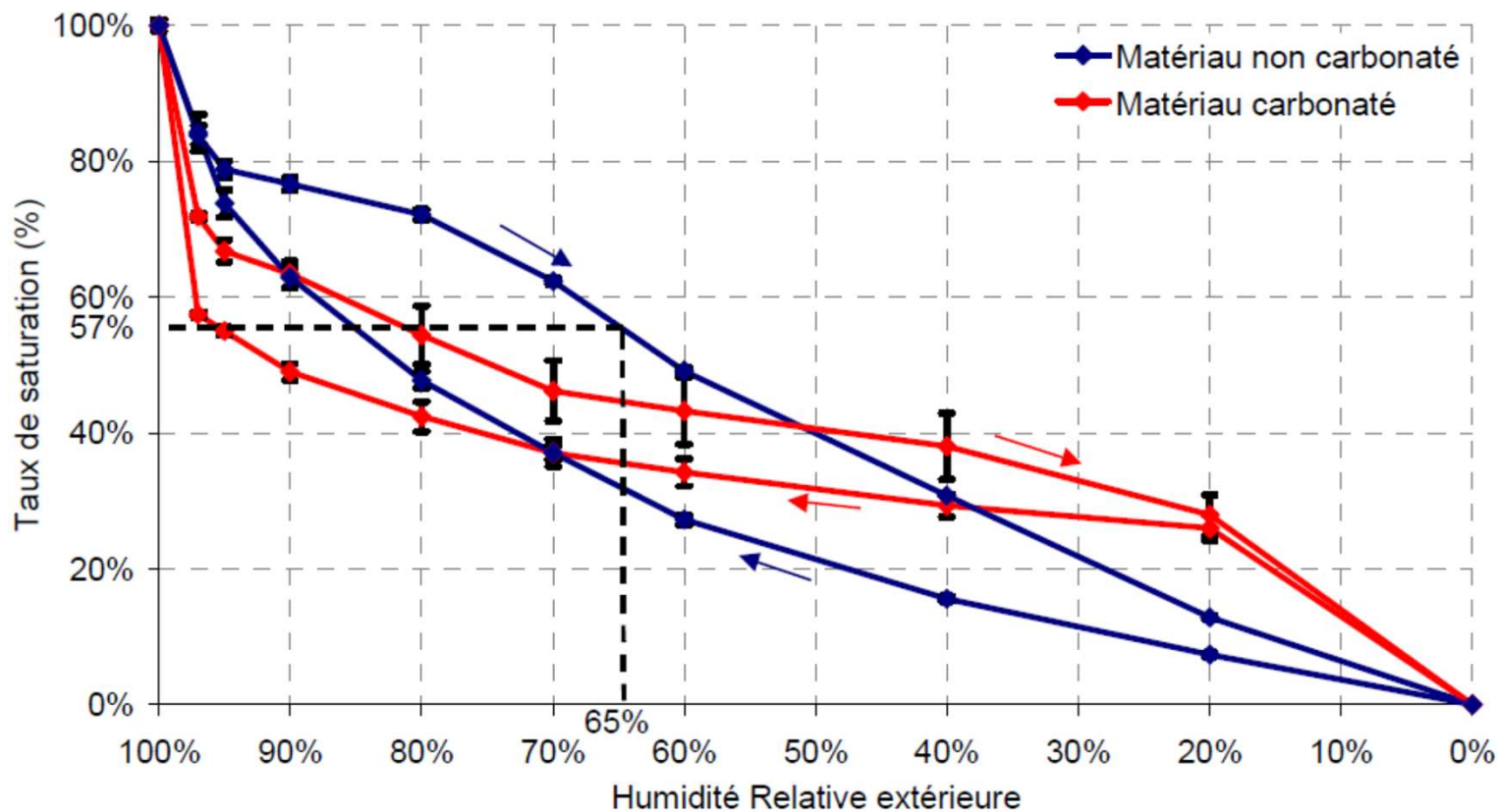
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Conséquences de la carbonatation

- Modification de la microstructure → impact sur les isothermes

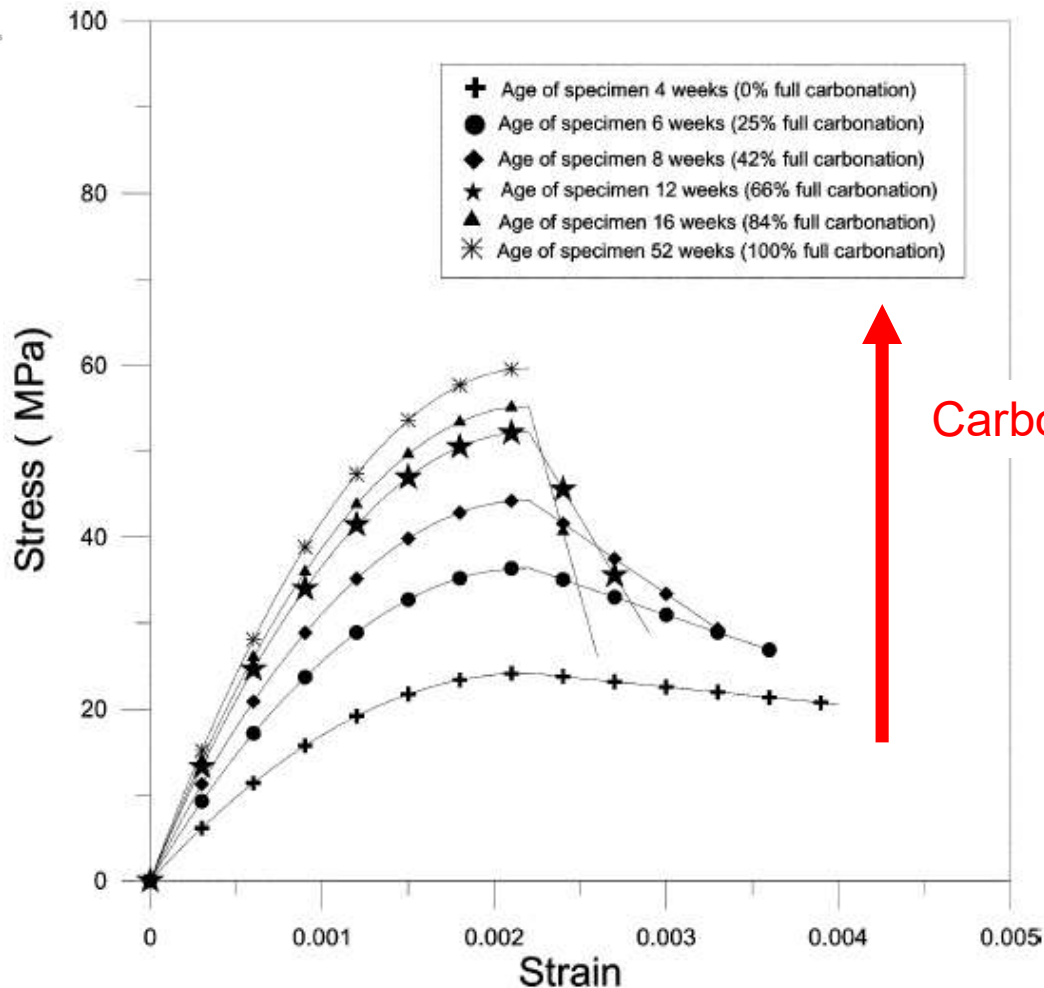


Hyvert (2009) Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse.

Carbonatation des matériaux cimentaires

□ Conséquences de la carbonatation

➤ Modification du comportement mécanique



Carbonatation

Colmatage → augmentation
module + résistance
Modification de la partie post-
pic ?

Chang & Chen (2005)
ACI Materials Journal
102(5), 315-321.

Fig. 7—Stress-strain relationship of carbonated concrete.

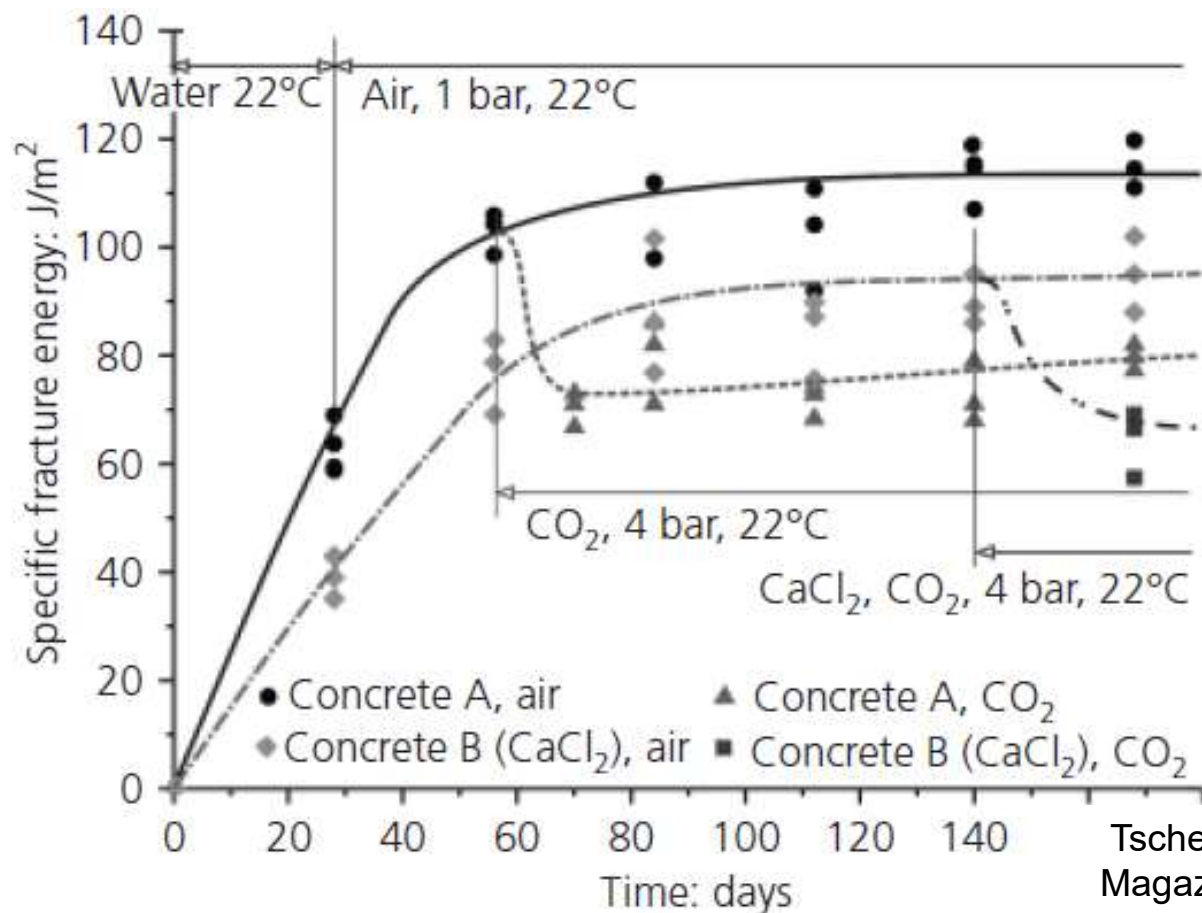
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Conséquences de la carbonatation

- Baisse de l'énergie de fissuration (fragilisation)



Tschegg et al. (2011)
Magazine of Concrete
Research 63(1), 21-30.

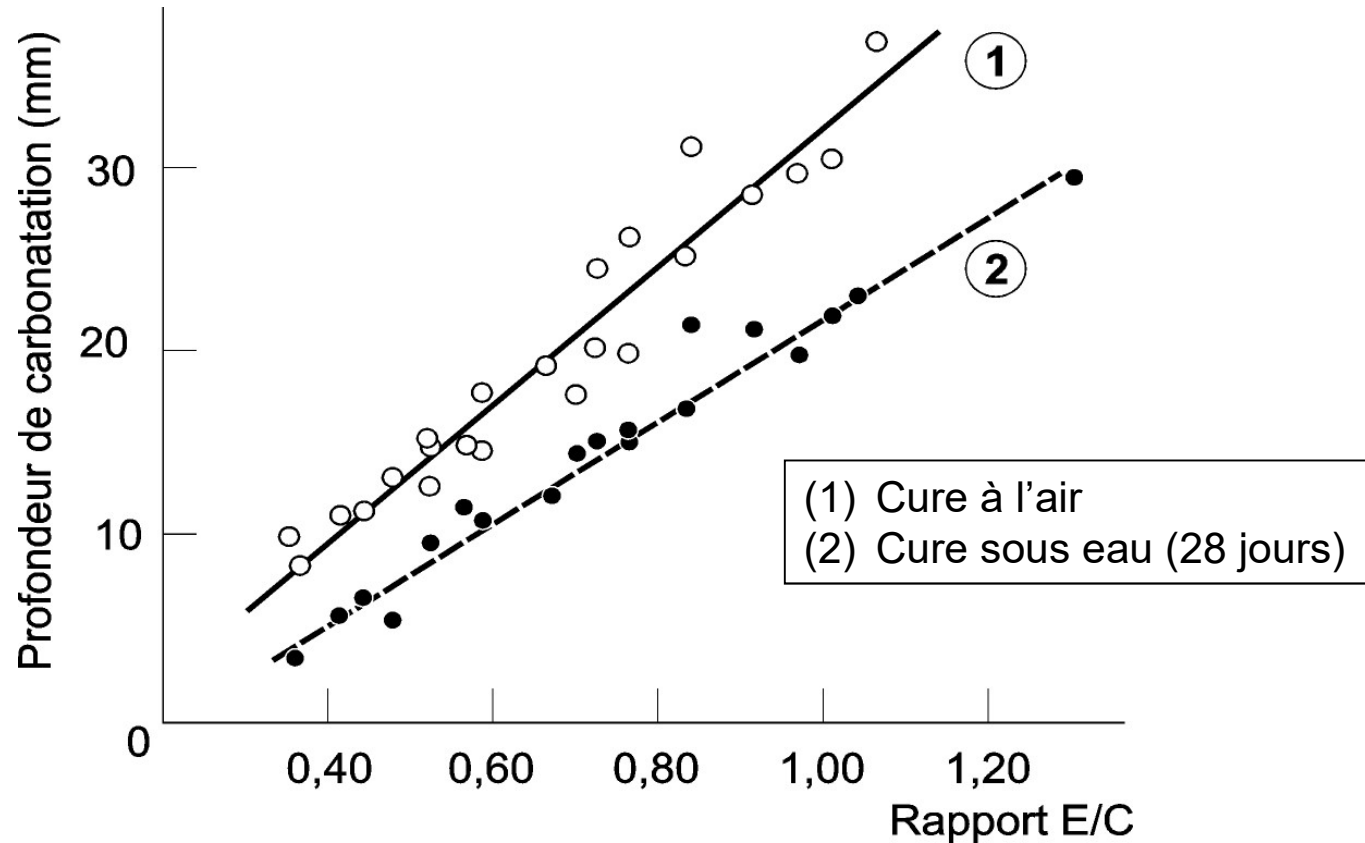
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

☐ Influence de la formulation

- Carbonatation naturelle (6 ans), CEM I, 20°C, HR~50%



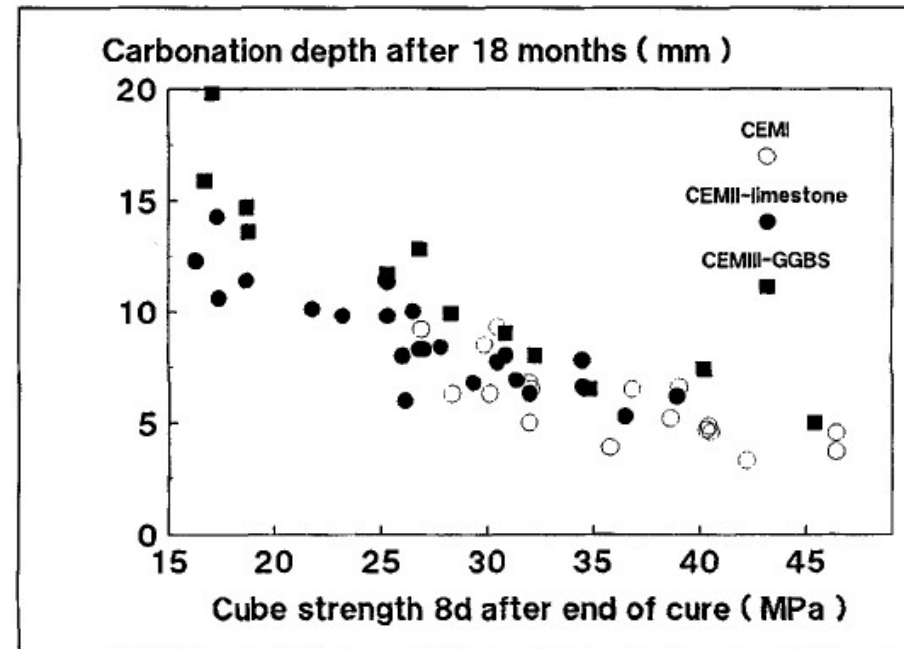
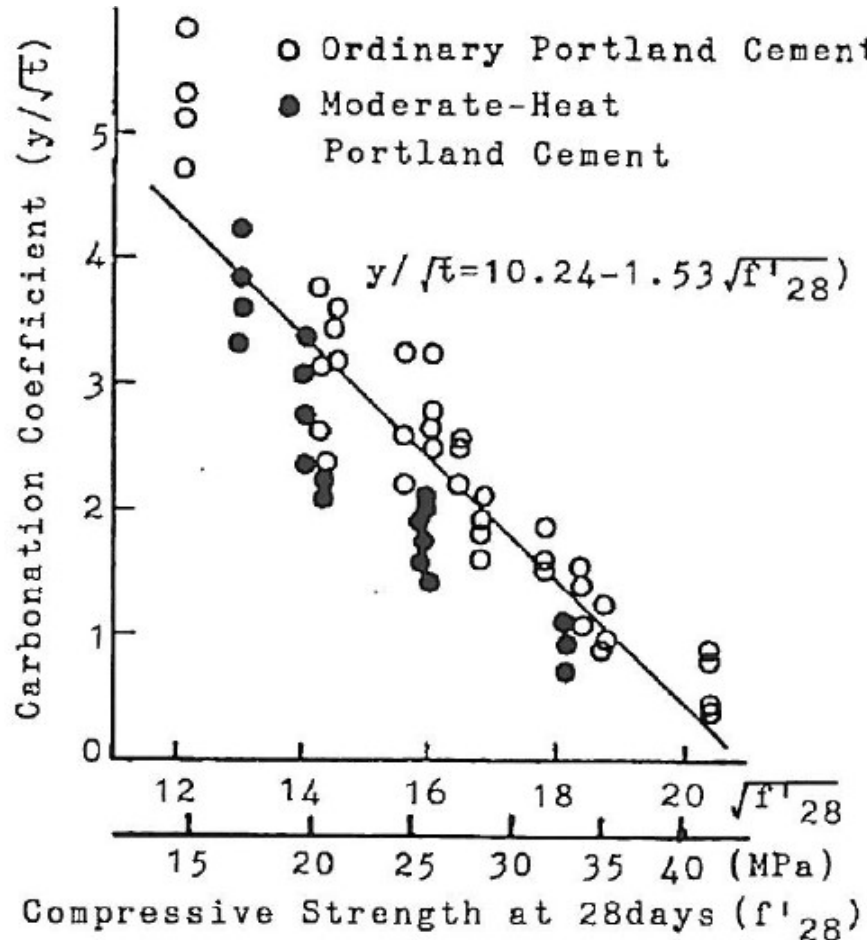
Baron (1987) « Le béton et l'eau »
Conseil International de la langue
française.

Carbonation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

- Influence de la formulation
 - Relation résistance-carbonatation



Parrott (1996) Materials and Structures 29, 164-173.

Kokubu & Nagatki (1989)
3rd International Conference on Fly Ash, Slag & Natural Pozzolans in Concrete.

Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

☐ Influence de la formulation

- Influence du rapport e/c

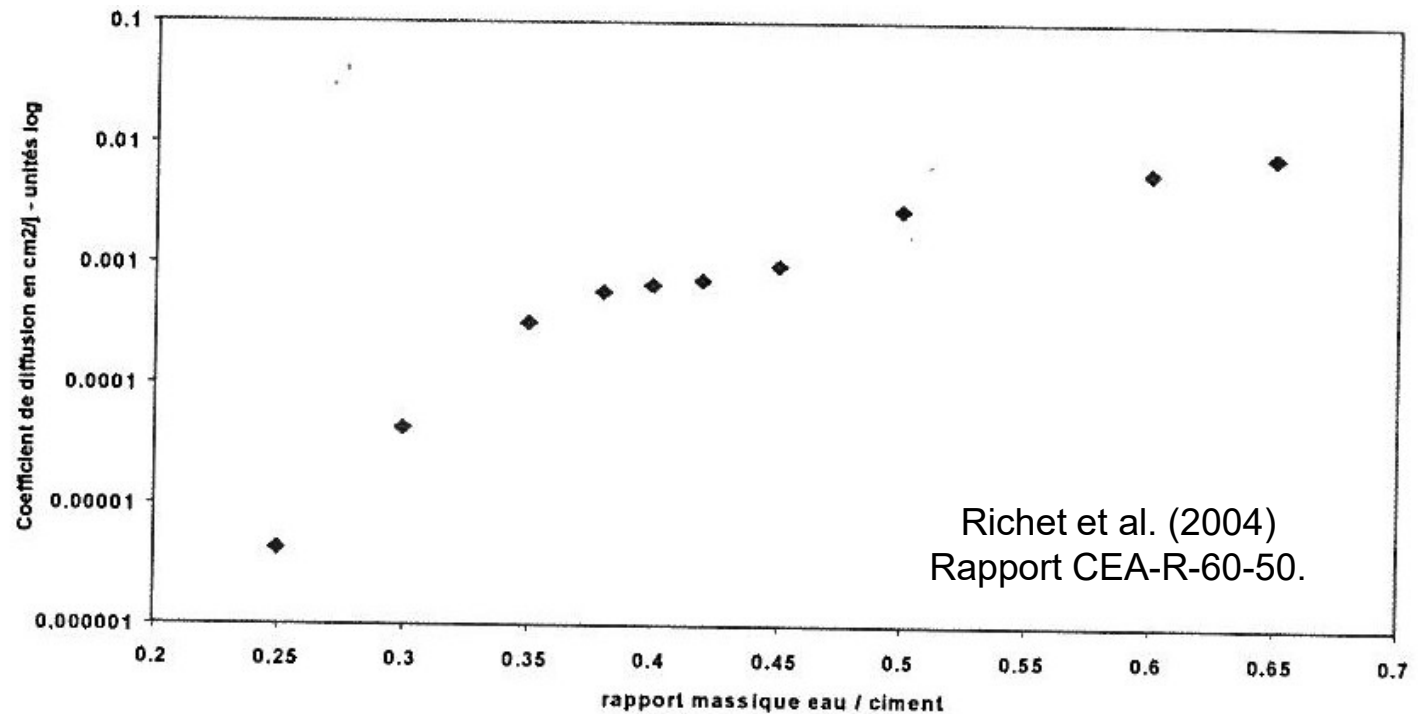


Figure 4.16
Coefficients de diffusion effectifs relatifs au césium obtenus pour des pâtes pures à base de CEM I à différents rapports eau / ciment

Carbonatation des matériaux cimentaires

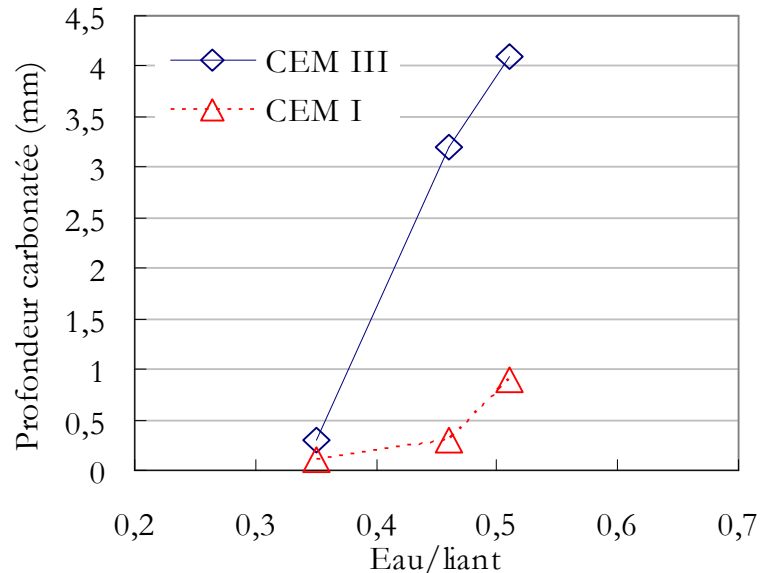


energie atomique • énergies alternatives

☐ Influence de la formulation

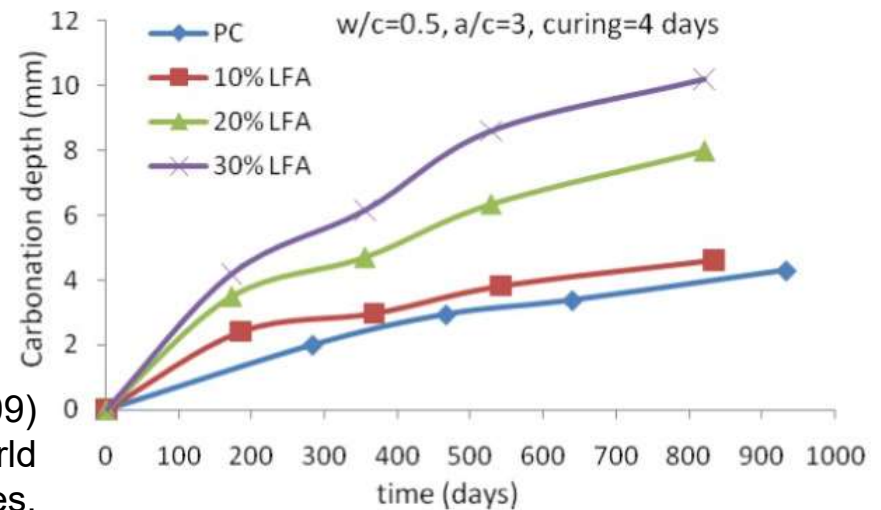
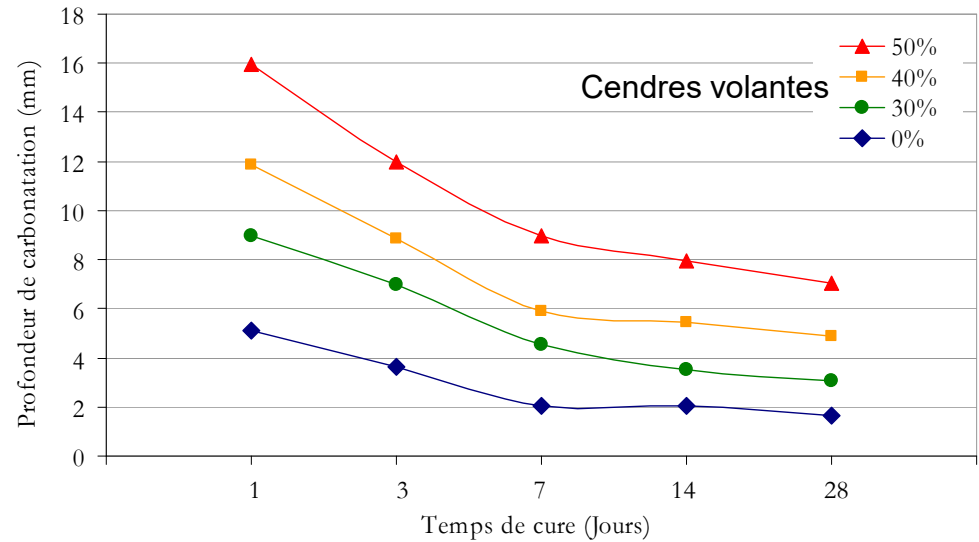
➤ Impact des additions

Ounoughi et al. (2000)
Journées Durabilité LCPC.



Bahador & Arezoo (2009)
34th Conference on our World
in Concrete & Structures.

Burden (2006) PhD Thesis,
University of New Brunswick.



Carbonatation des matériaux cimentaires



☐ Influence de la formulation

- Additions pouzzolaniques
- baisse des propriétés de transport (diffusion gazeuse)
- diminution de la quantité de portlandite (augmentation C-S-H)

Pâte	Compo	e/c	Porosité	[CH]	[C-S-H]	Perméa
CEM I	Clinker	0,40	37,9%	5,6	5,1	$2,1 \times 10^{-22}$
CEM V	56% clinker 22% cendres 22% laitier	0,40	38,9%	2,1	7,0	$0,7 \times 10^{-22}$
Bas-pH	37% clinker 30% cendres 33% fumées de silice	0,40	41,3%	0,0	7,4	$0,25 \times 10^{-22}$

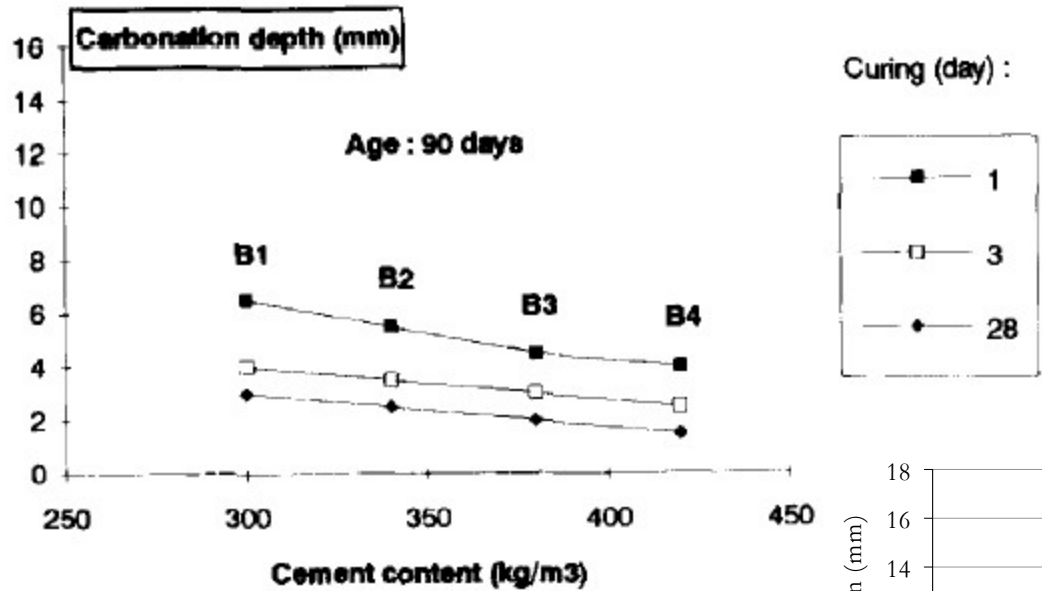
Baisse du pouvoir tampon (CH) >> baisse des propriétés de transport

Carbonatation des matériaux cimentaires



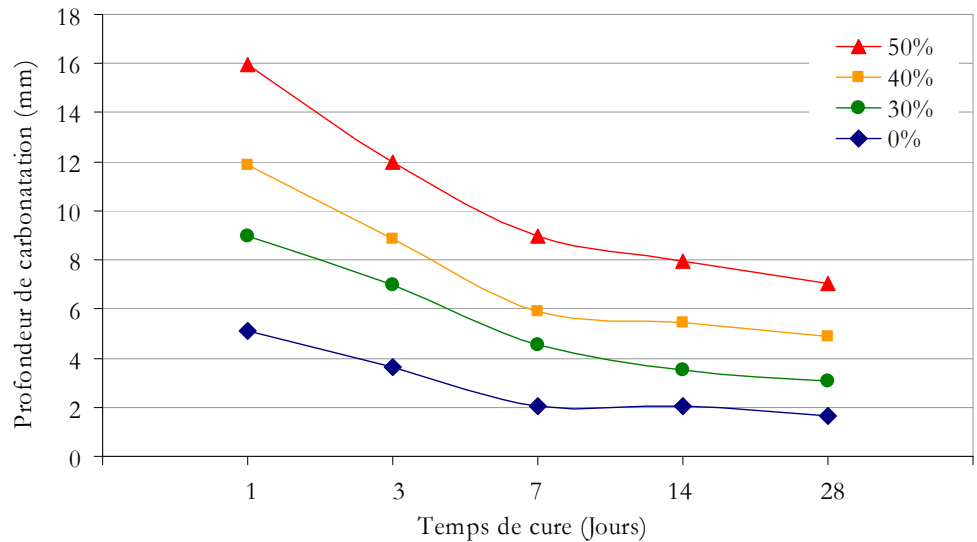
- Influence de la cure
 - Impact des additions

energie atomique • energies alternatives



Balayssac et al. (1995)
Construction and Building Materials
9(2), 91-95. .

Burden (2006) PhD Thesis,
University of New Brunswick.



Carbonatation des matériaux cimentaires

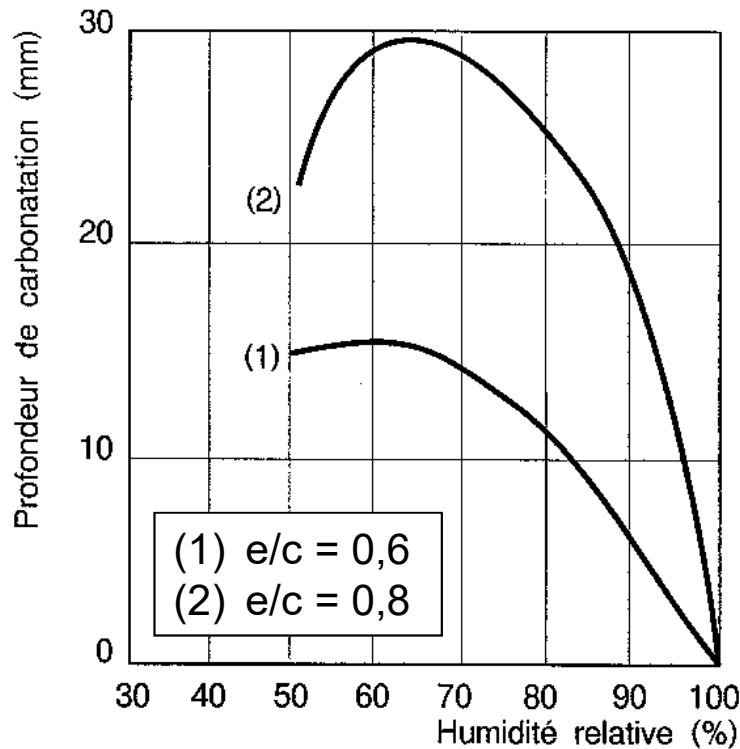


energie atomique • énergies alternatives

☐ Influence des conditions environnementales

- HR optimale (~60%) → compromis chimie en solution & transport

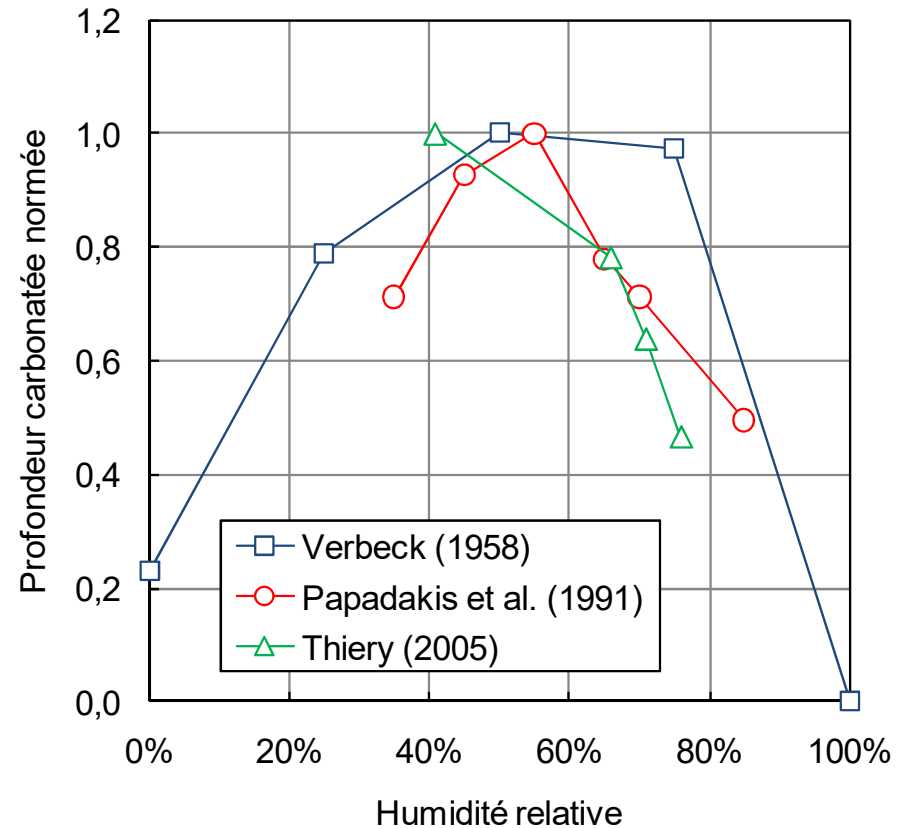
Carbonatation naturelle



Wierig (1984)

RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Exposure.

Carbonatation accélérée



Compilation des résultats de Verbeck (1958), Papadakis (1991) & Thiery (2005)

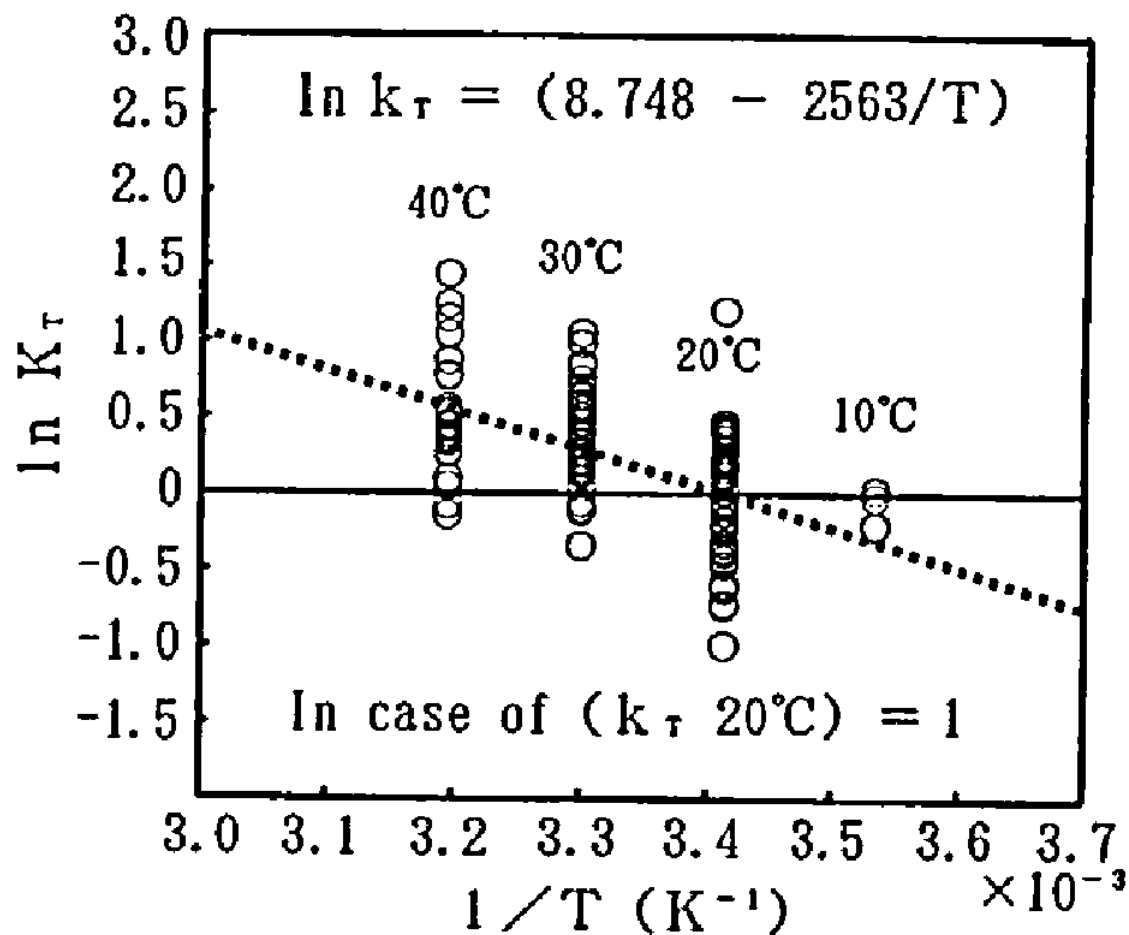
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Influence des conditions environnementales

- Impact de la température
- Compilation de résultats tirés de la biblio (20-40°C, 80% HR) & (20-30°C, 60% HR)



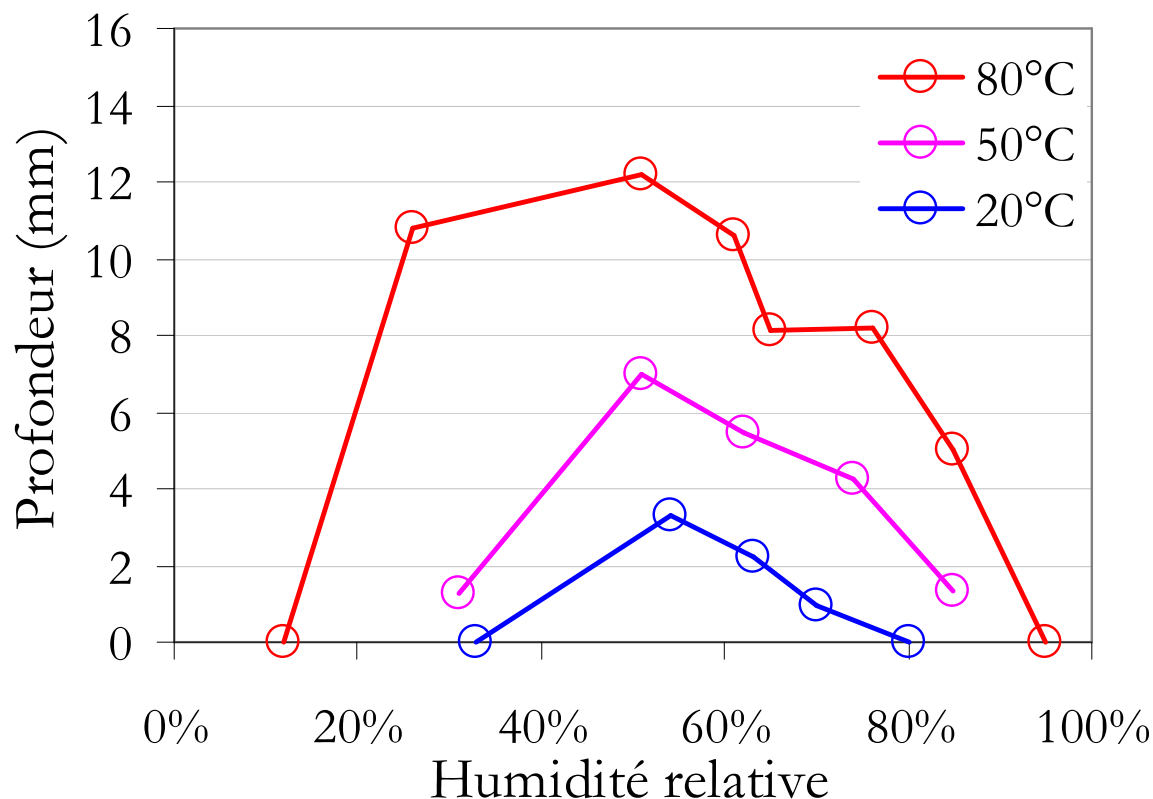
Uomoto & Takada (1993)
Concrete Library of JSCE
21, 31-44.

Carbonatation des matériaux cimentaires



□ Influence des conditions environnementales

- Impact de la température
- Essais de carbonatation accélérée (50% CO₂), pâte CEM I e/c = 0,4
- Echantillons préalablement équilibrés à l'HR d'essai
- Mesure de la profondeur carbonatée après 7 jours



Drouet (2010), Thèse de doctorat de l'ENS Cachan

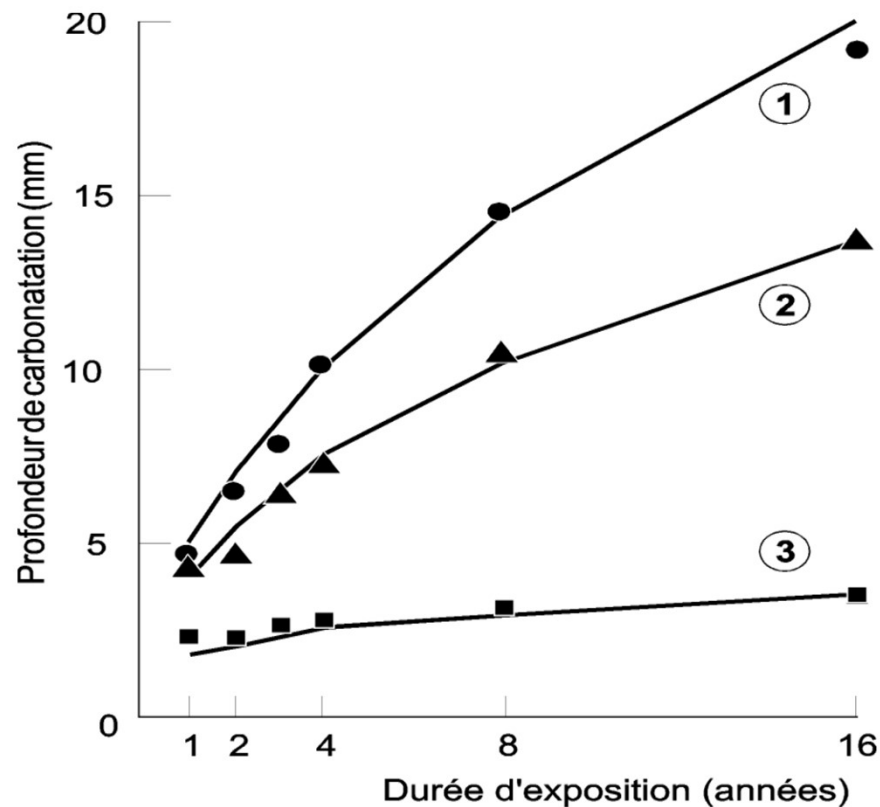
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Cinétique de la carbonatation

➤ Phénomène lent



- (1) Int - 20°C HR~65%
- (2) Ext - 7°C, HR~77%
- (3) Ext - 7°C, HR~77%
+ exposition à la pluie

Wierig (1984)
RILEM Seminar on the Durability of Concrete
Structures under Normal Exposure.

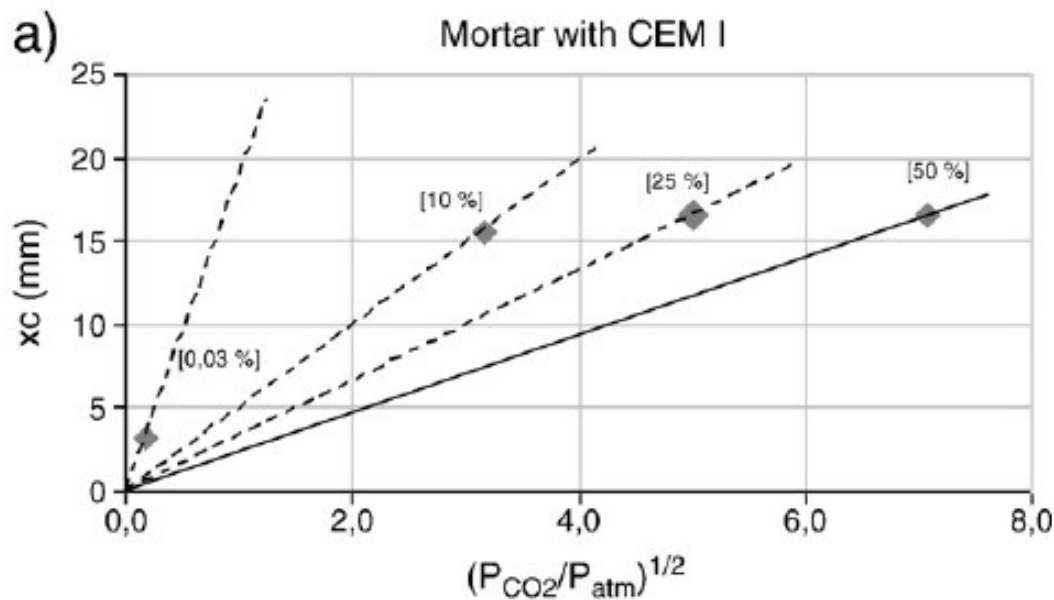
Carbonatation des matériaux cimentaires



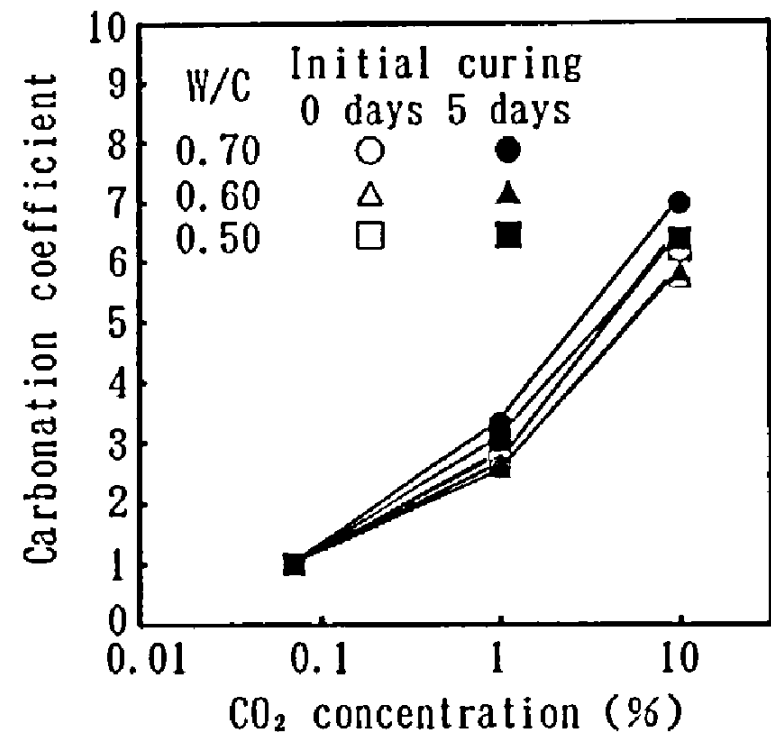
energie atomique • énergies alternatives

□ Caractérisation de la carbonatation

- Phénomène lent à l'état naturel
- Réalisation d'essais accélérés en laboratoire
 - préconditionnement (séchage partiel)
 - augmentation de la p_{CO_2}



Hyvert et al. (2010)
Cement and Concrete Research
40(11), 1582-1589.



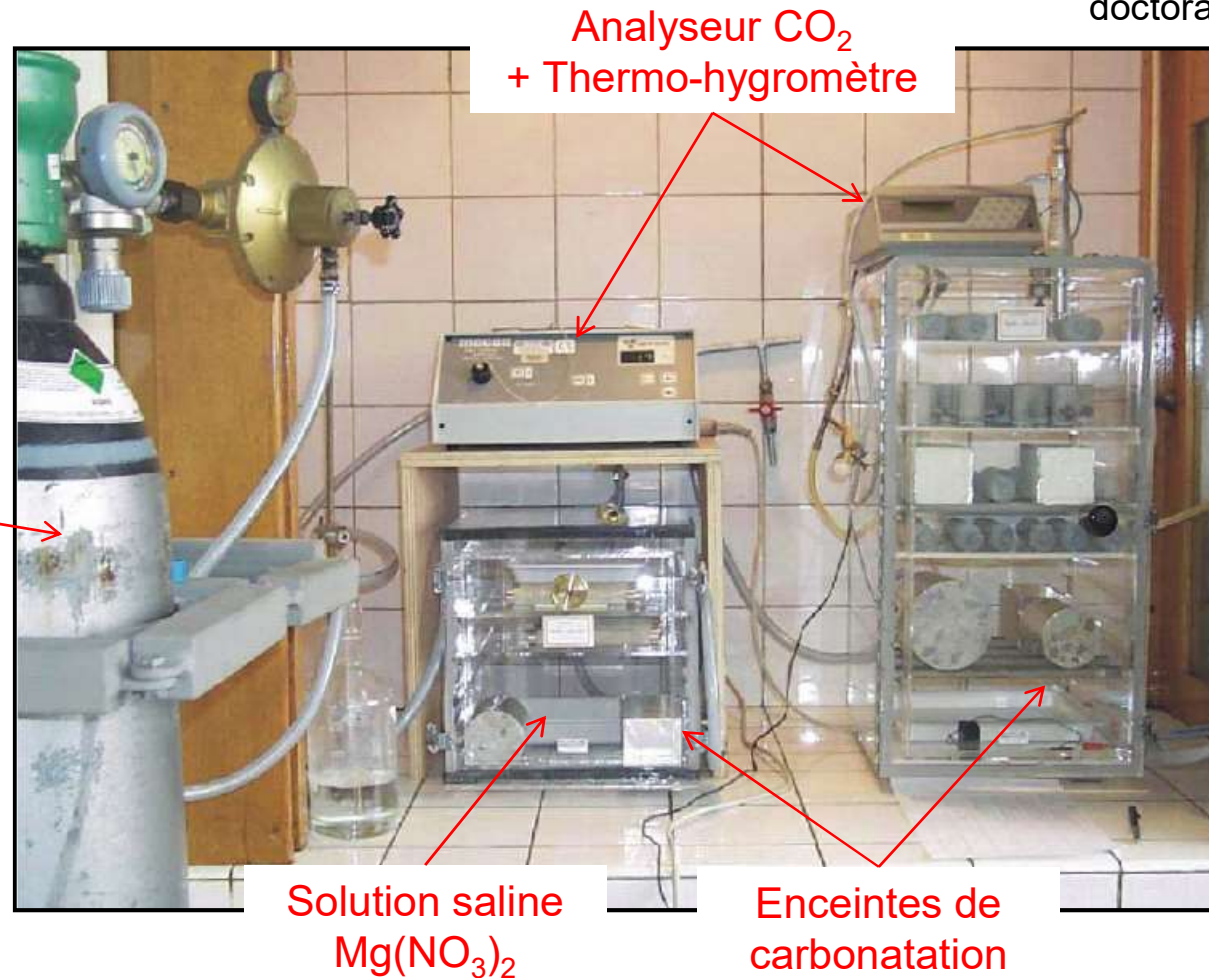
Uomoto & Takada (1993)
Concrete Library of JSCE 21, 31-44.

Carbonatation des matériaux cimentaires

❑ Caractérisation de la carbonatation

➤ Exemple de dispositifs de carbonatation accélérée

Thiery (2005) Thèse de doctorat de l'ENPC.



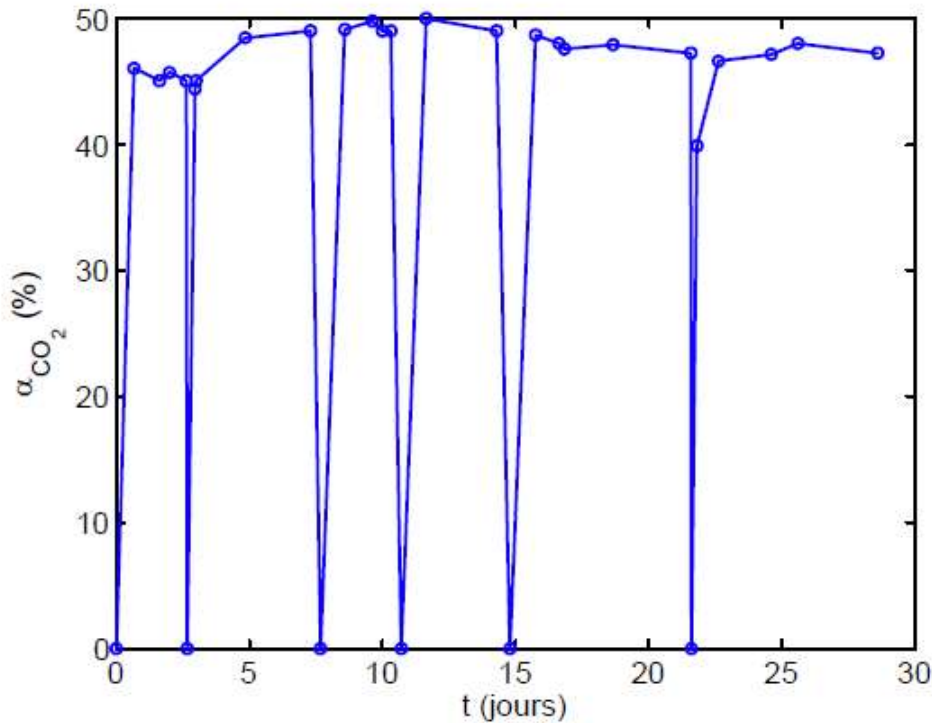
Carbonatation des matériaux cimentaires

□ Caractérisation de la carbonatation

➤ Performances du dispositif



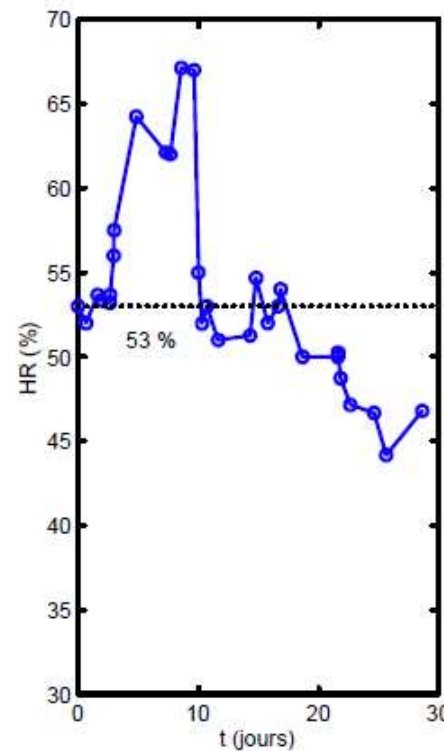
energie atomique • énergies alternatives



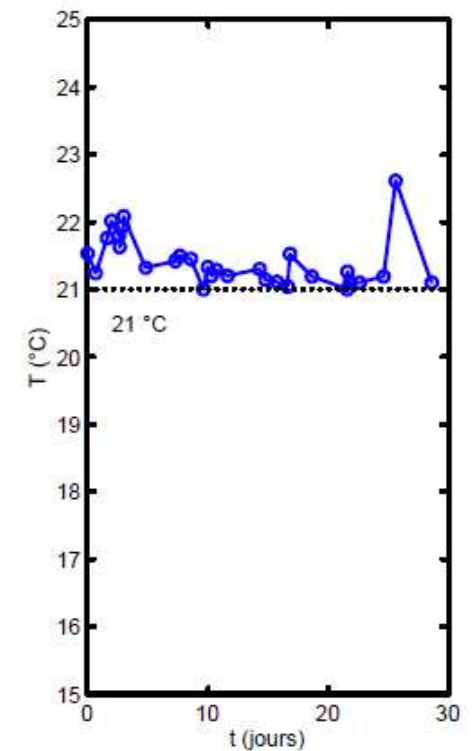
Pression partielle du CO₂

Thiery (2005) Thèse de doctorat de l'ENPC.

Humidité relative



Température



Carbonatation des matériaux cimentaires

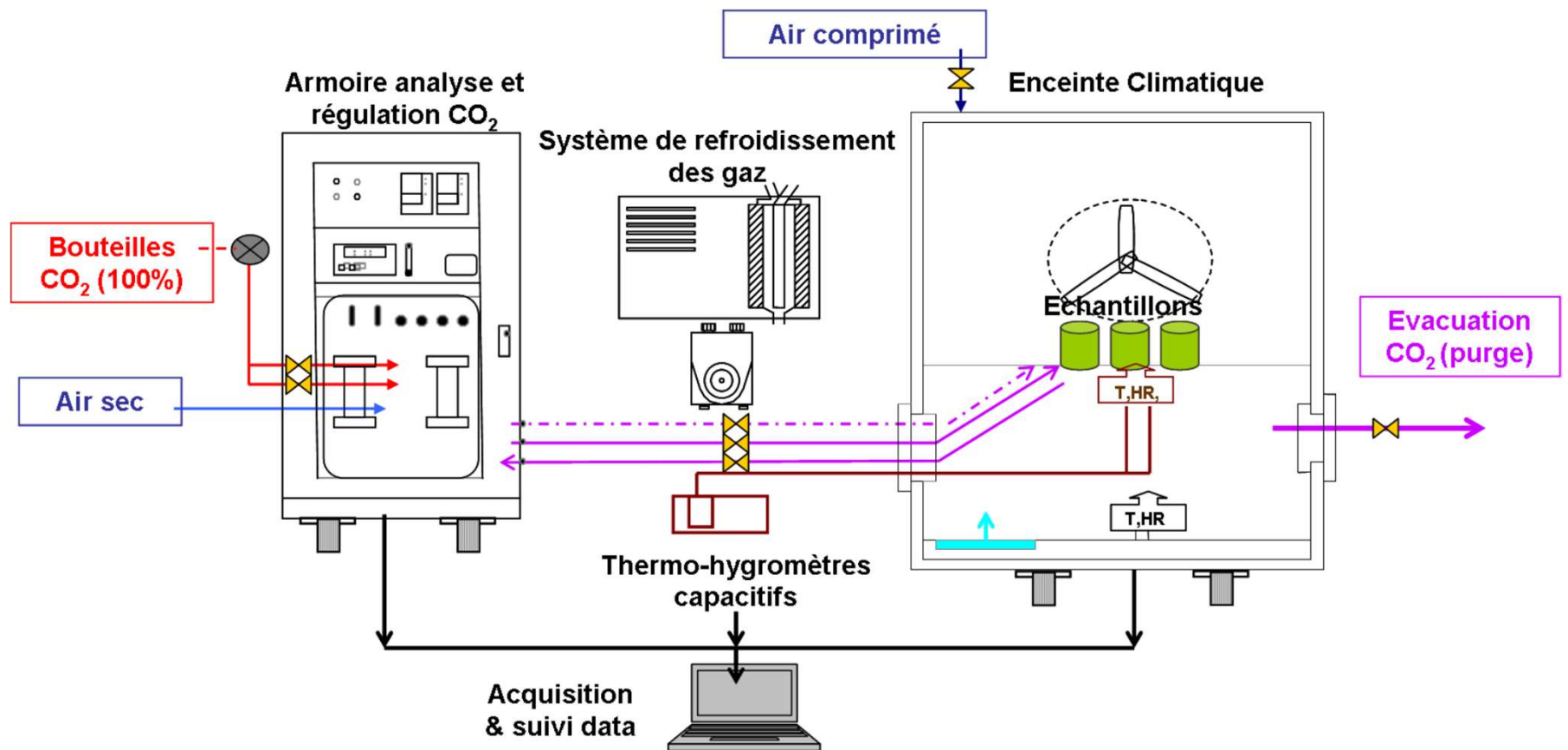


energie atomique • énergies alternatives

❑ Caractérisation de la carbonatation

➤ Dispositif alternatif

Drouet (2010) Thèse de doctorat de l'ENS Cachan.



Carbonatation des matériaux cimentaires

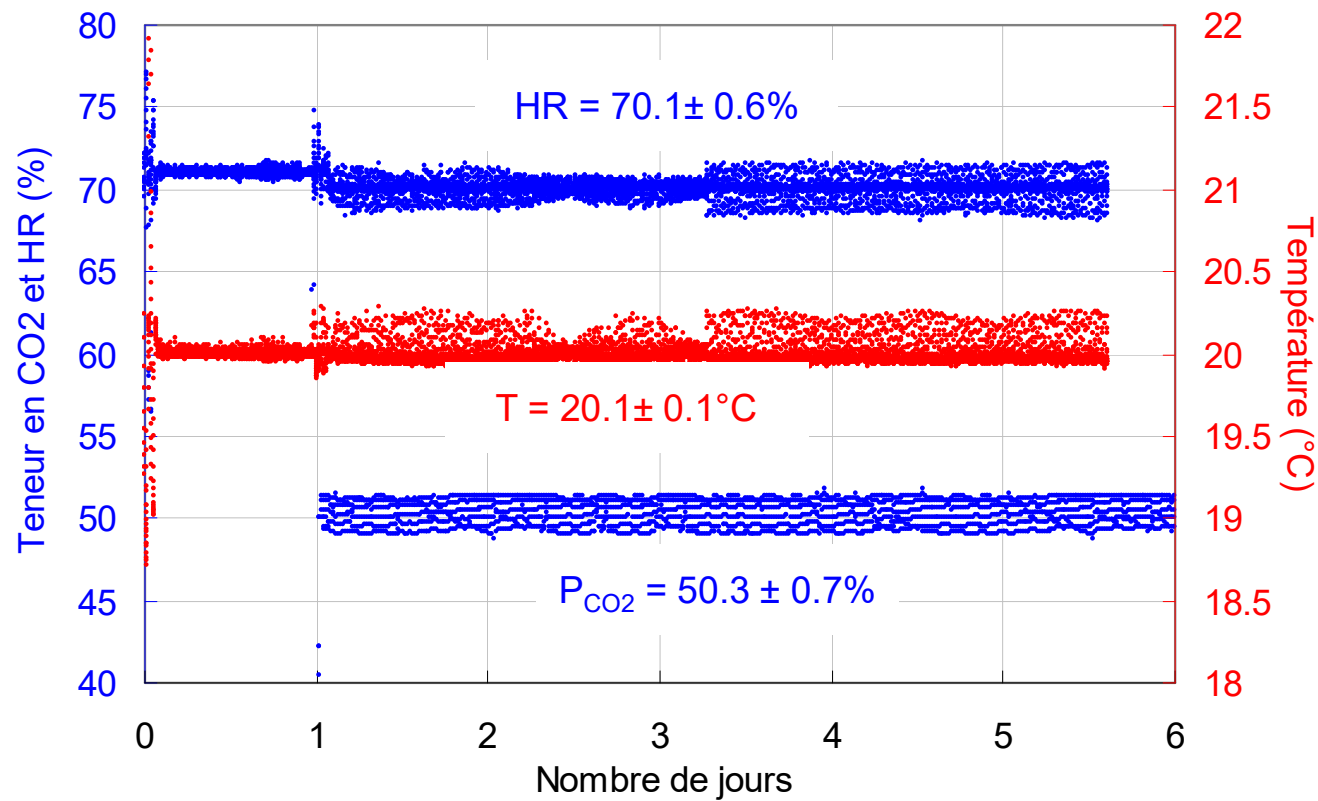


energie atomique • énergies alternatives

□ Caractérisation de la carbonatation

➤ Performances du dispositif

Drouet (2010) Thèse de doctorat de l'ENS Cachan.



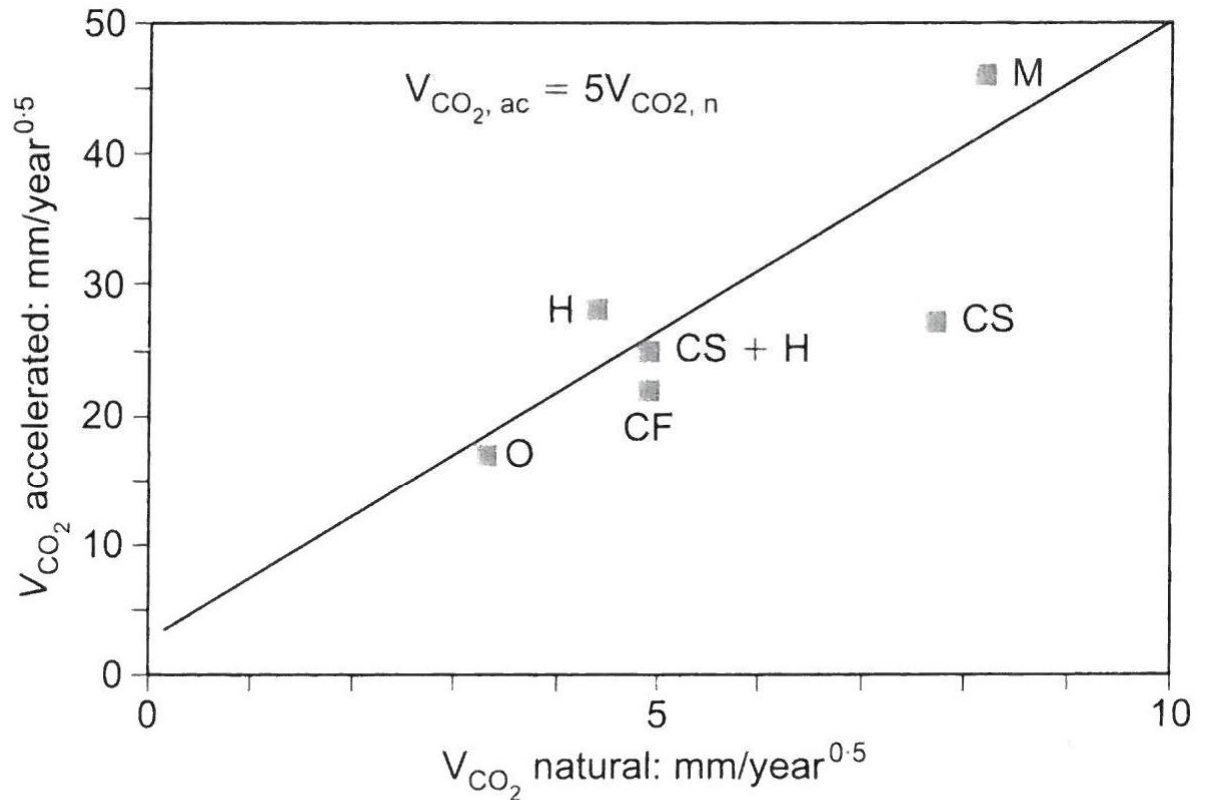
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Caractérisation de la carbonatation

- Accélération par augmentation de la p_{CO_2}



Sanjuan et al. (2003)
Advances in Cement
Research 15(4), 171-180.

Fig. 11. Relationship between natural and accelerated carbonation rates at 5% CO_2

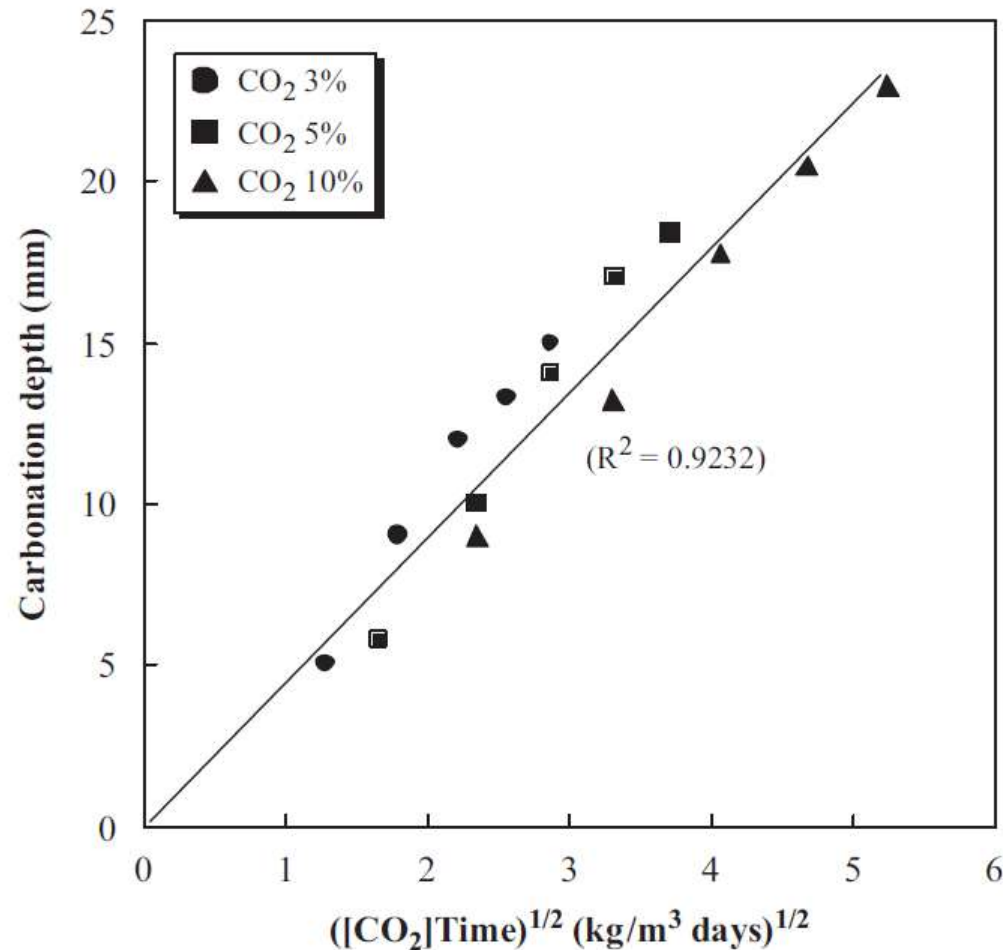
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Caractérisation de la carbonatation

- Accélération par augmentation de la p_{CO_2}



Yoon et al. (2008)
Atmospheric Environment
41(34), 7274-7285.

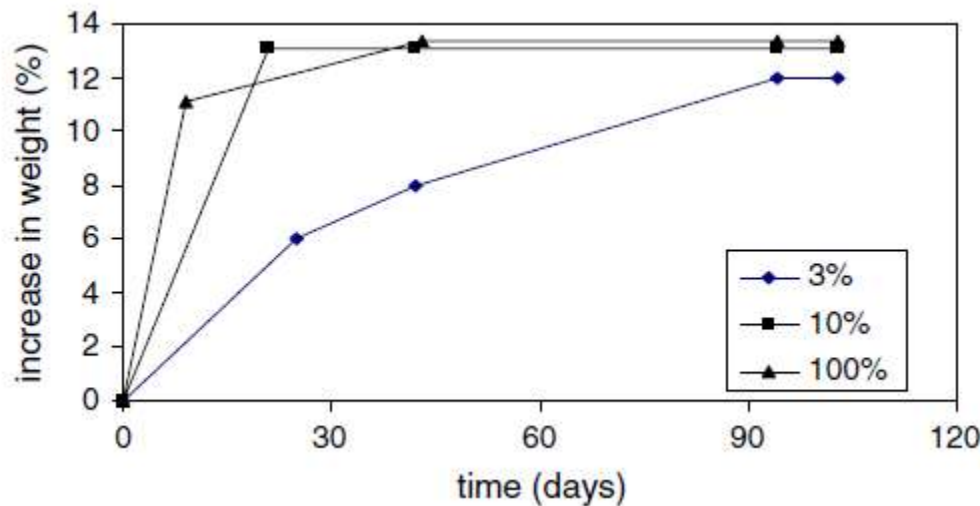
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

Caractérisation de la carbonatation

- Accélération par augmentation de la p_{CO_2}
- Représentativité de l'essai accéléré



Castellote et al. (2009)
Materials and Structures 42(4), 515-525.

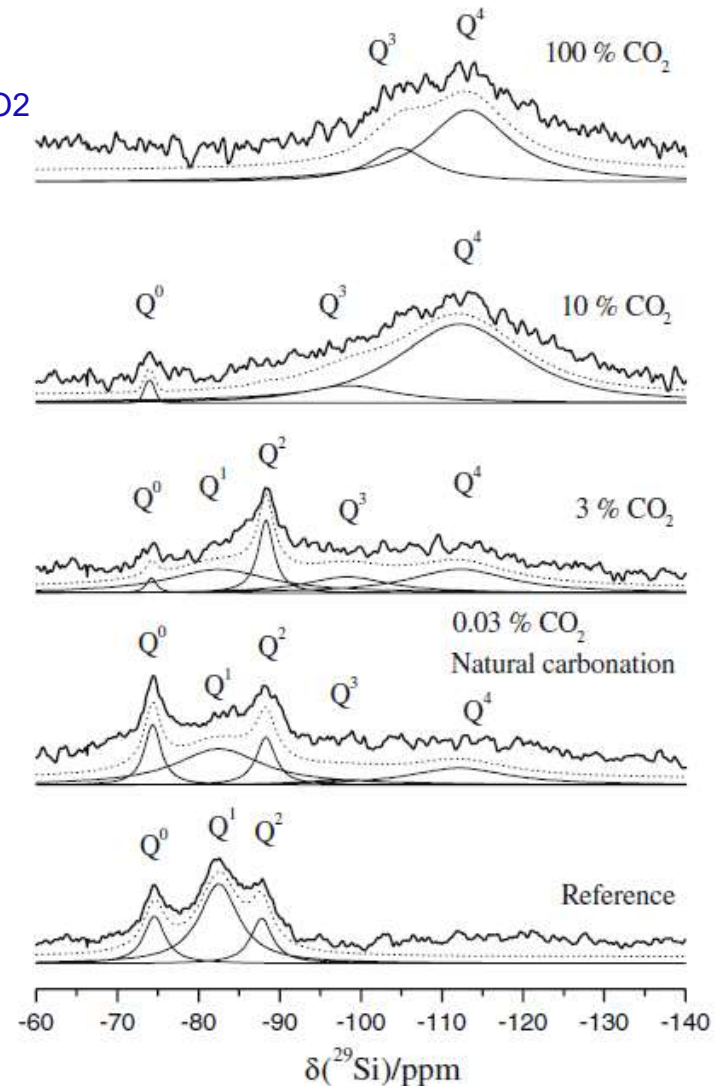


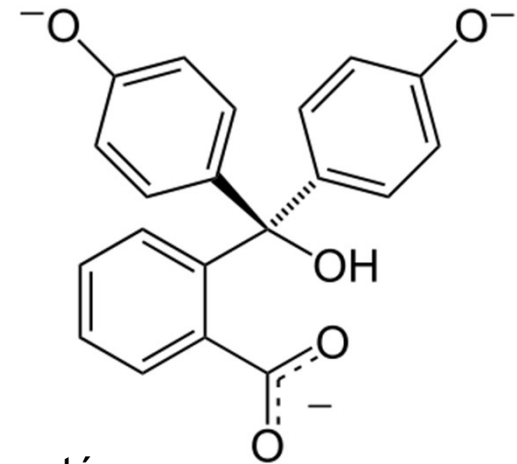
Fig. 2 ²⁹Si M.A.S.-N.M.R spectra for the five samples analysed

Carbonatation des matériaux cimentaires



❑ Caractérisation de la carbonatation

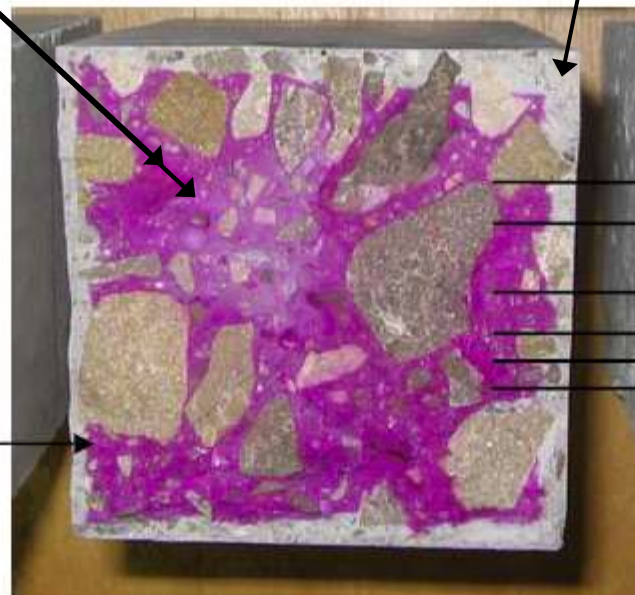
- Détermination de la profondeur carbonatée
- Utilisation d'un indicateur coloré (pH)
- Solution diluée de phénolphtaléine (1% phénol → 70% éthanol + 30% eau)
- Plage de virage : 8-10



Zone saine (pH > 12,5)

Zone carbonatée

Front de carbonatation



Zones de mesure

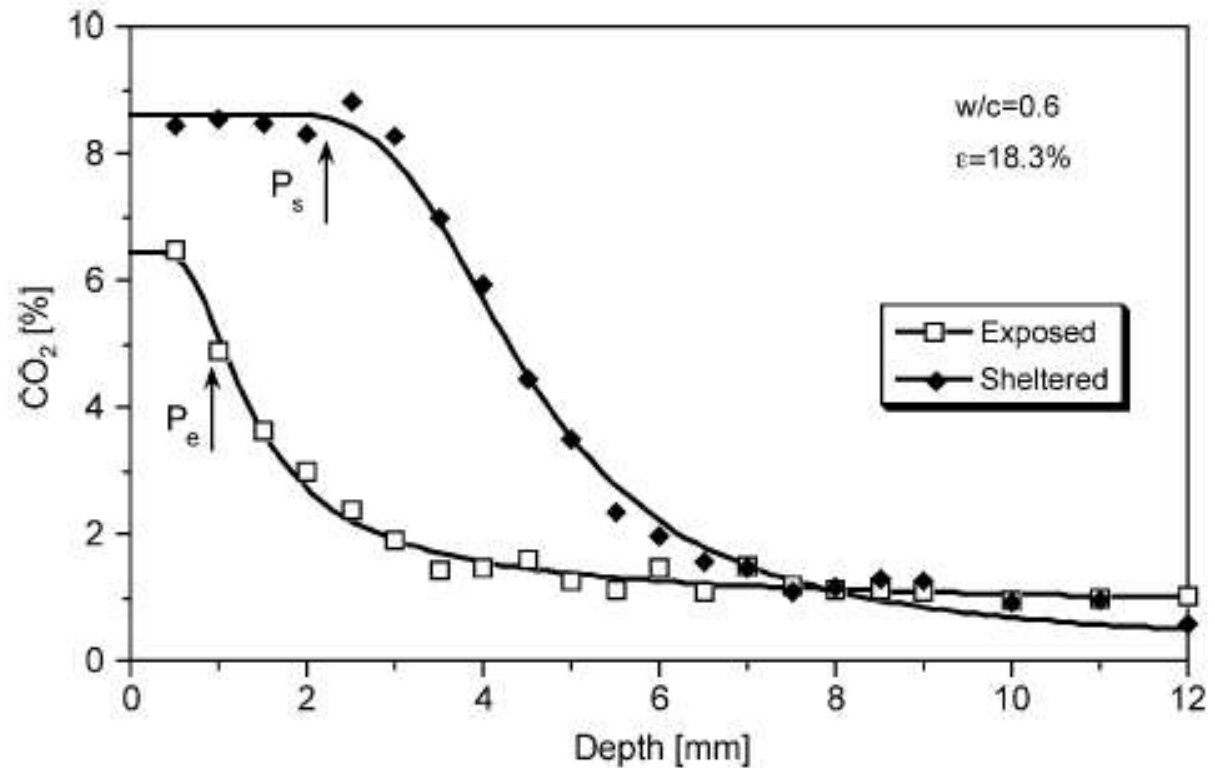
Roziere (2007) Thèse de doctorat de l'Université de Nantes.

Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

- Caractérisation de la carbonatation
 - Utilisation de la phénolphtaléine



Houst & Wittmann (2002)
Cement and Concrete
Research 32(12), 1923-1930.

Fig. 5. Depth of carbonate profile after 40.5 months of outdoor exposition of a mortar with w/c = 0.6.

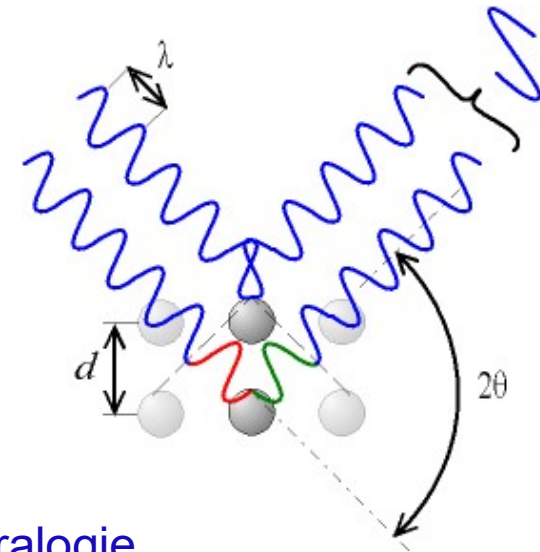
Carbonatation des matériaux cimentaires



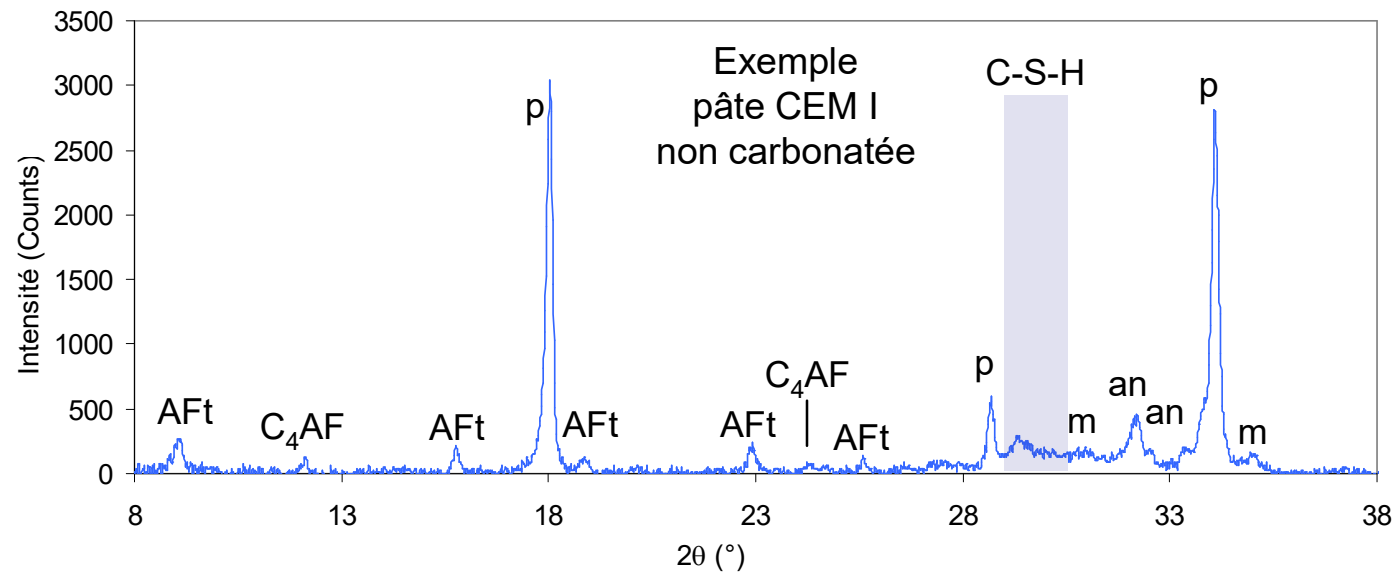
❑ Caractérisation de la carbonatation

- Diffraction des rayons X
- Utile sur la matière cristallisée
- Chaque cristal émet un signal propre

Loi de Bragg $2d\sin(\theta) = n\lambda$



- La DRX permet la caractérisation de la minéralogie



Drouet (2010)
Thèse de doctorat
de l'ENS Cachan.

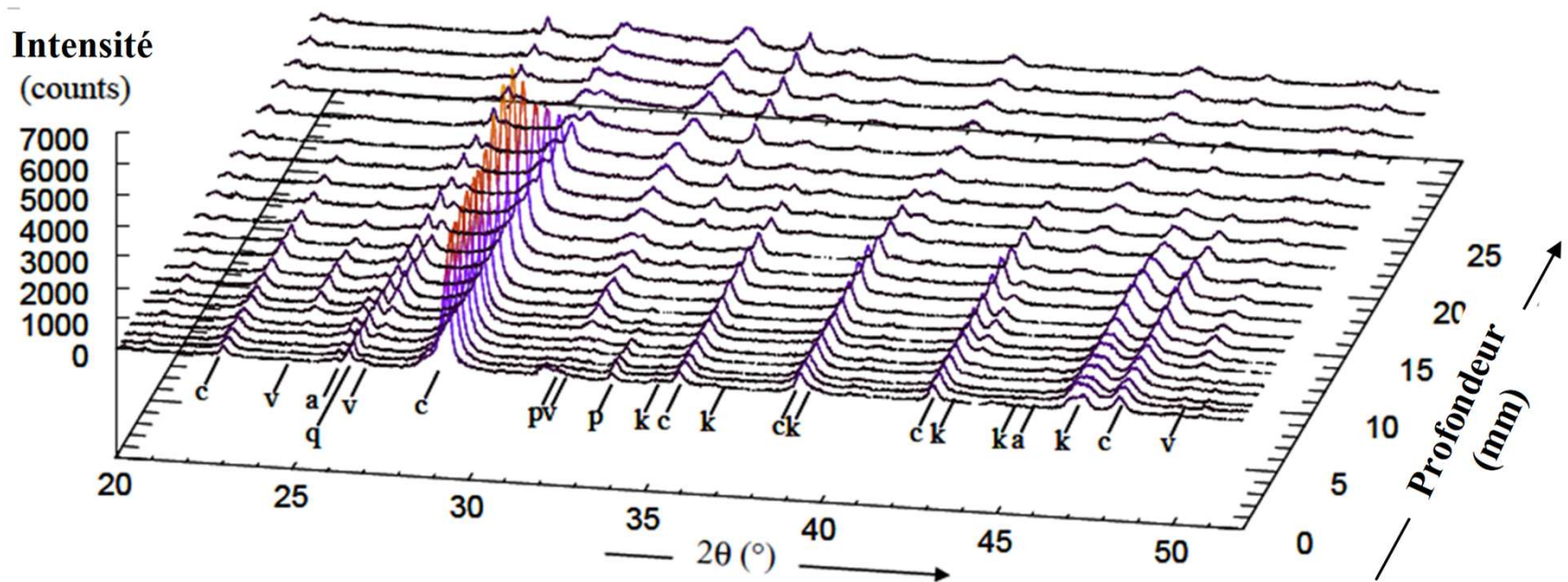
Carbonatation des matériaux cimentaires



❑ Caractérisation de la carbonatation

- Diffraction des rayons X
- Découpe ou grignotage
- ➔ évolution des diffractogrammes en fonction de la profondeur

- Caractérisation fine de la carbonatation et de l'évolution minéralogique



Drouet (2010)
Thèse de doctorat
de l'ENS Cachan.

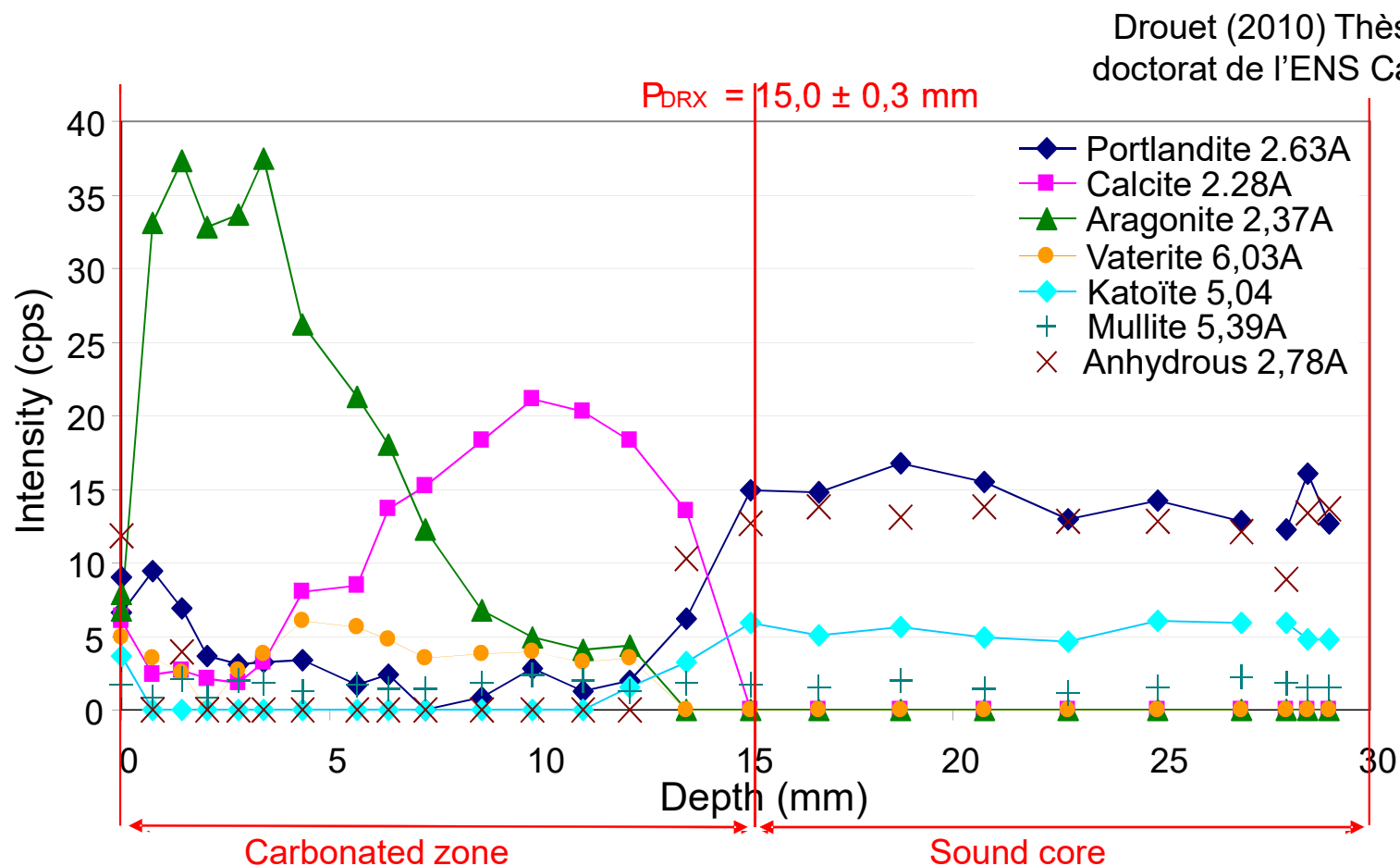
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Caractérisation de la carbonatation

- Suivi des hauteurs des pics
- Caractérisation fine de la carbonatation et de l'évolution minéralogique



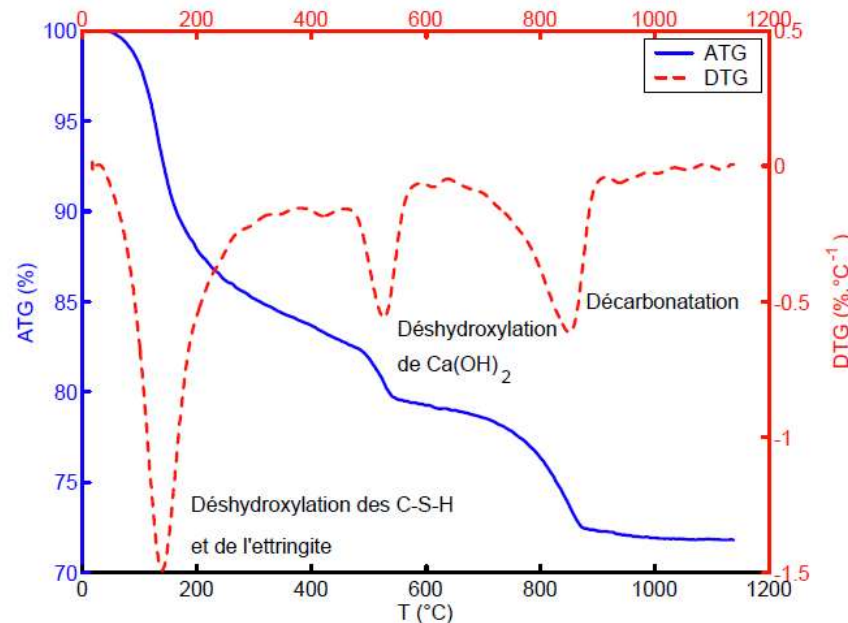
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

❑ Caractérisation de la carbonatation

- Analyse Thermo-Gravimétrique (ATG)
- ➔ rampe de température ($\sim 10^\circ\text{C}/\text{min}$) + pesée en continu
- Domaines de décomposition de phases



Thiery (2005)
Thèse de doctorat
de l'ENPC.

- La perte de masse permet la quantification des phases



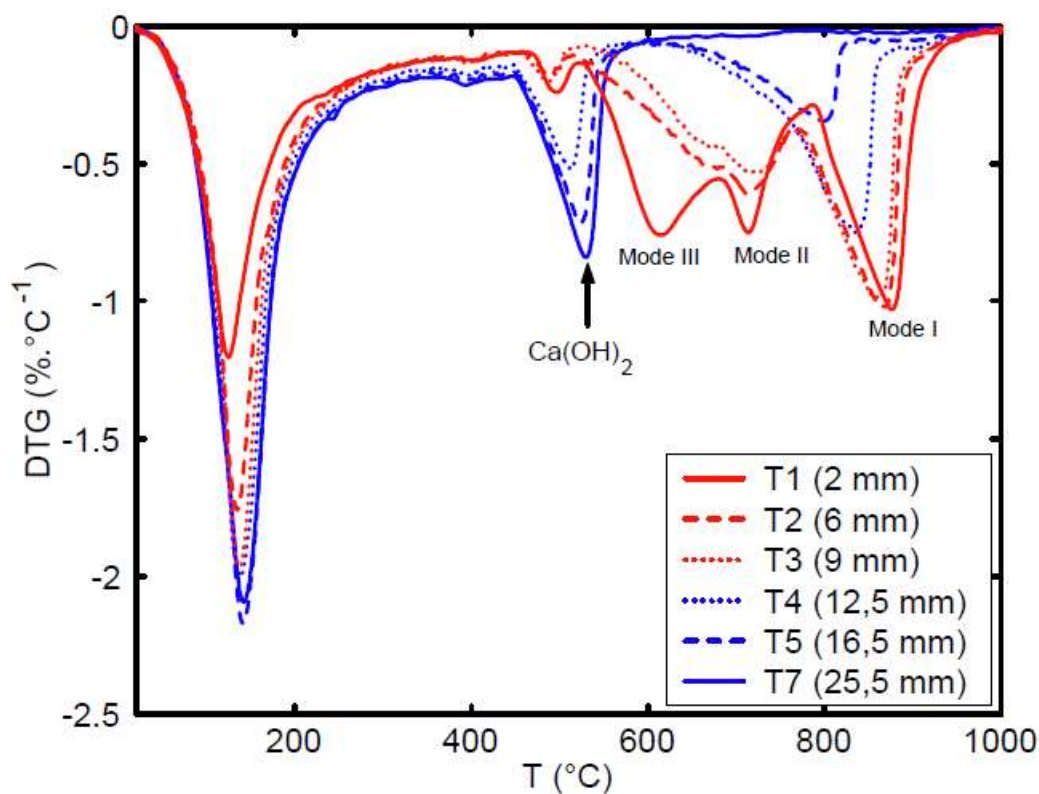
Carbonatation des matériaux cimentaires



□ Caractérisation de la carbonatation

- Décarbonation de CaCO_3
- Présence de 3 modes de décomposition
- à rapprocher des trois polymorphes (calcite, vaterite, aragonite)

Thiery (2005)
Thèse de doctorat
de l'ENPC.



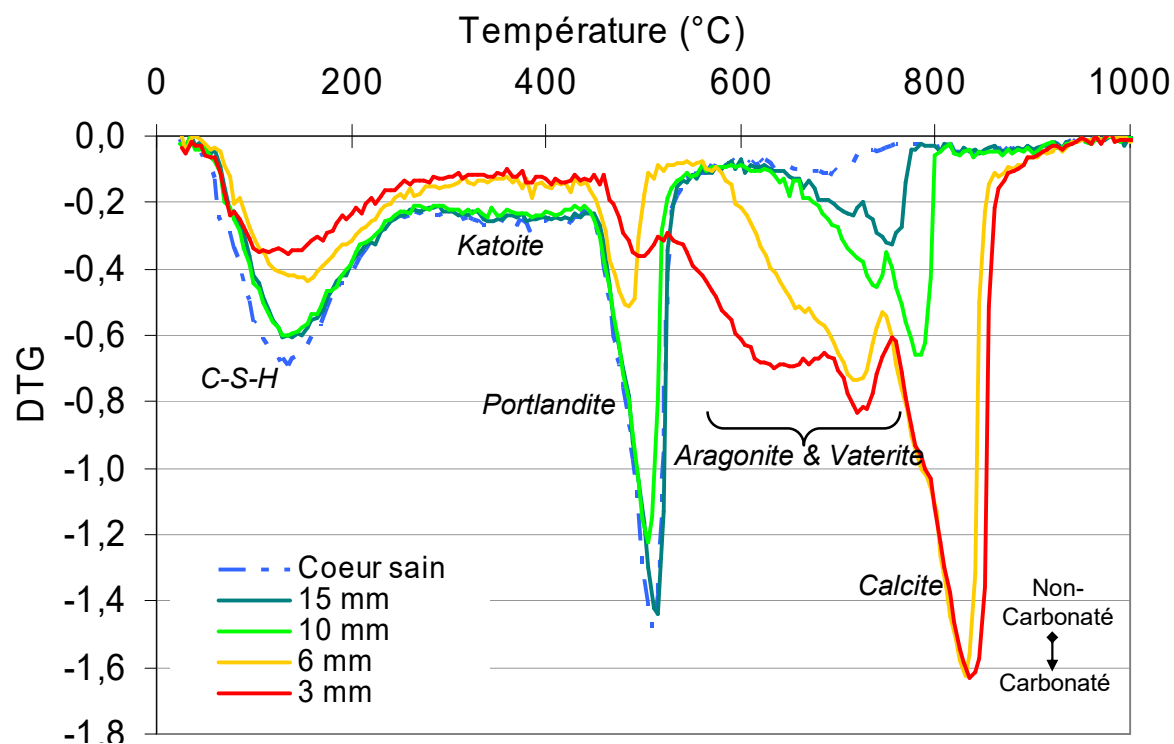
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

□ Caractérisation de la carbonatation

- Exemple d'évolution des thermogrammes dans la zone carbonatée
- Pâte de CEM I (e/c=0,4) carbonatée à 80°C, 65% HR & 50% CO₂



Drouet (2010)
Thèse de doctorat
de l'ENS Cachan.

Carbonatation des matériaux cimentaires

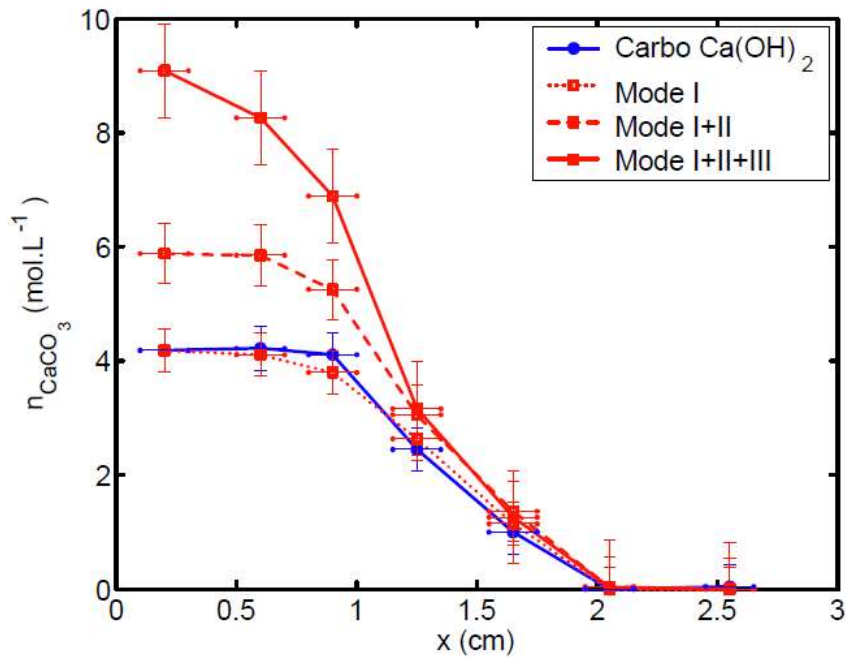
Caractérisation de la carbonatation

- Utilisation de l'ATG pour la quantification des phases (portlandite et carbonate de calcium)

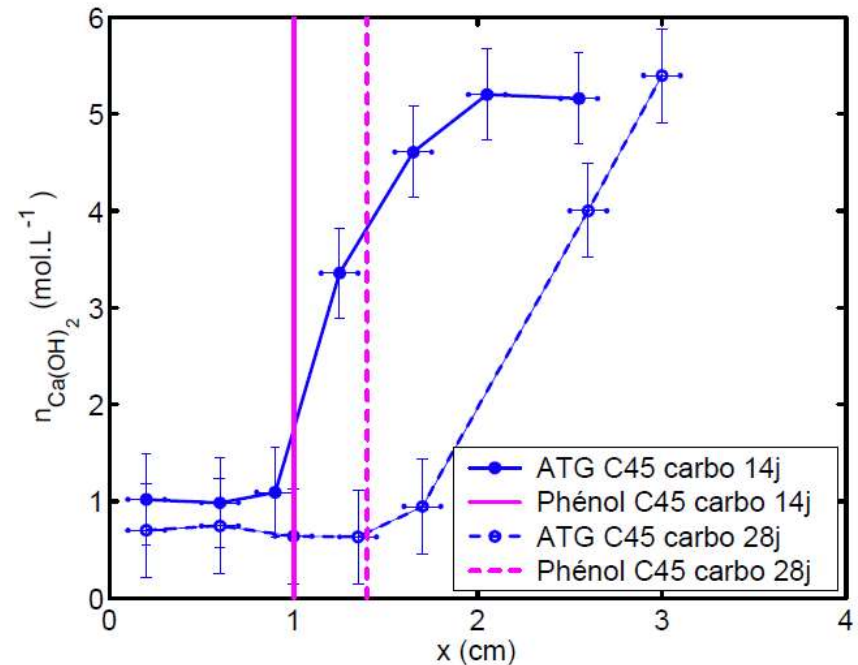


energie atomique • énergies alternatives

Profil de teneur en CaCO_3
(après 14 j de carbo accélérée)



Profil de teneur en Ca(OH)_2
(après 14 et 28 j de carbo accélérée)



Thiery (2005) Thèse de
doctorat de l'ENPC.

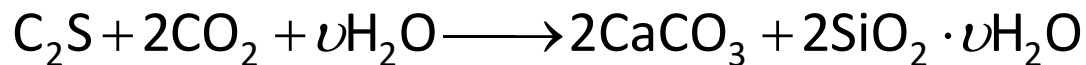
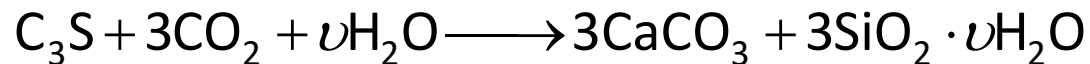
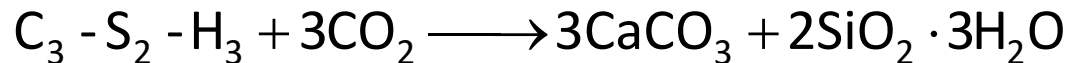
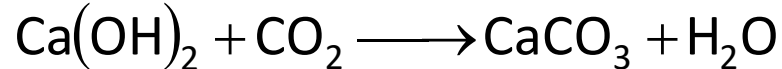
Carbonatation des matériaux cimentaires



□ Modèle de Papadakis

Papadakis et al. (1991)
ACI Materials Journal 88(4), 363-373

- Modèle analytique (simple)
- Hypothèses de base :
 - La diffusion (dans l'épaisseur carbonatée) est limitante
 - Les réactions de dissolution/précipitation sont immédiates
 - CH, C-S-H, C₂S & C₃S sont les seuls espèces carbonatées



Carbonatation des matériaux cimentaires



□ Modèle de Papadakis

➤ Modèle analytique (simple)

$$X_c(t) = k\sqrt{t}$$

Papadakis et al. (1991)
ACI Materials Journal 88(4), 363-373

➤ Coefficient de cinétique (k)

Coefficient de diffusion
dans le matériau carbonaté

Concentration en
 CO_2 dans l'air

$$k = \sqrt{\frac{2D_{\text{CO}_2}^{e,c} [\text{CO}_2]^0}{[\text{CH}]^0 + 3[\text{CSH}]^0 + 3[\text{C}_3\text{S}]^0 + 2[\text{C}_2\text{S}]^0}}$$

Concentration des phases carbonatables

Carbonatation des matériaux cimentaires



□ Modèle de Papadakis

- Paramètre clé = coefficient de diffusion du matériau carbonaté (en fonction de l'HR extérieure)

Papadakis et al. (1991)
ACI Materials Journal 88(2),
186-196.

$$D_{CO_2}^{e,C} = 1,64 \cdot 10^{-6} \phi^{1,8} \left(1 - \frac{HR}{100} \right)^{2,2}$$

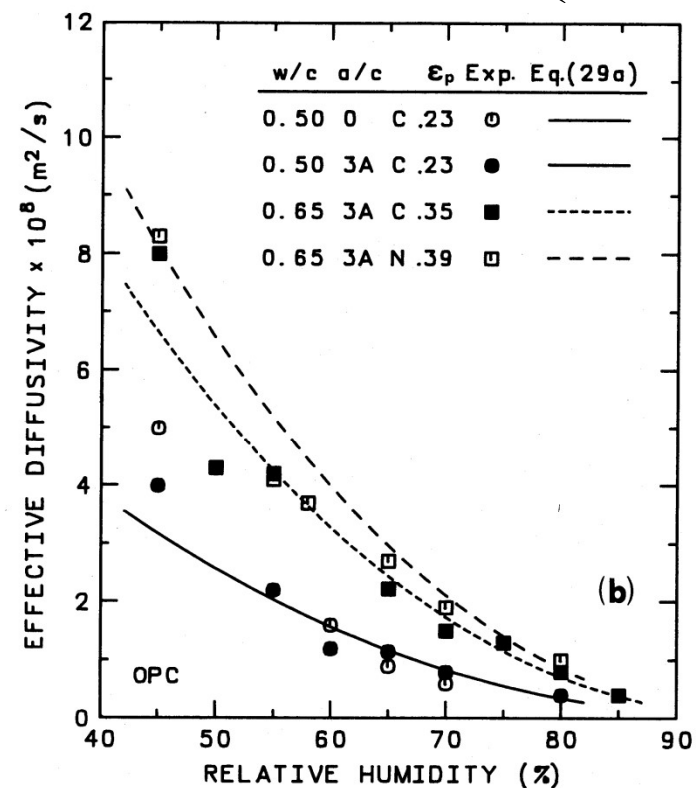
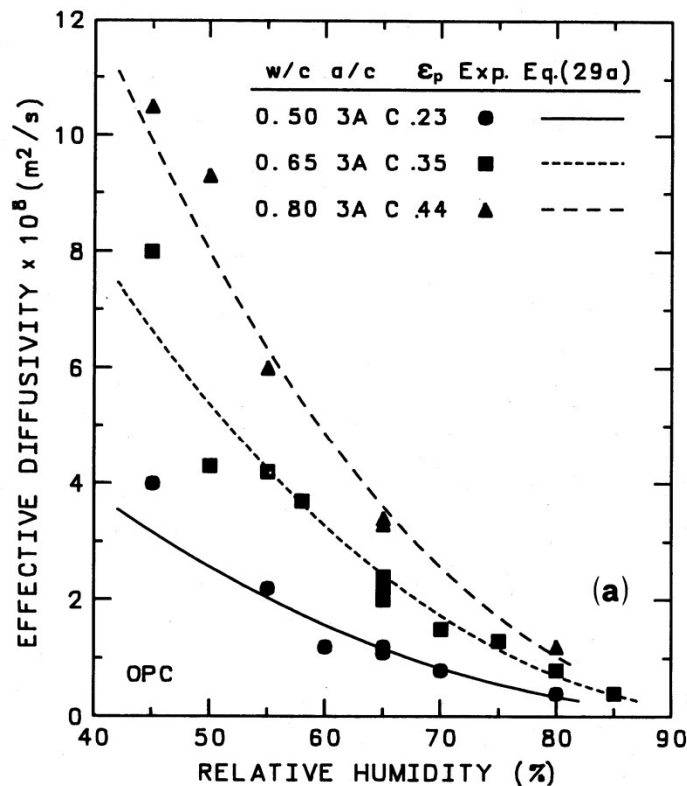


Fig. 9—Dependence of effective diffusivity of CO₂ in concrete on relative humidity, water-cement ratio, presence of aggregates and carbonation (C = carbonated, N = noncarbonated)

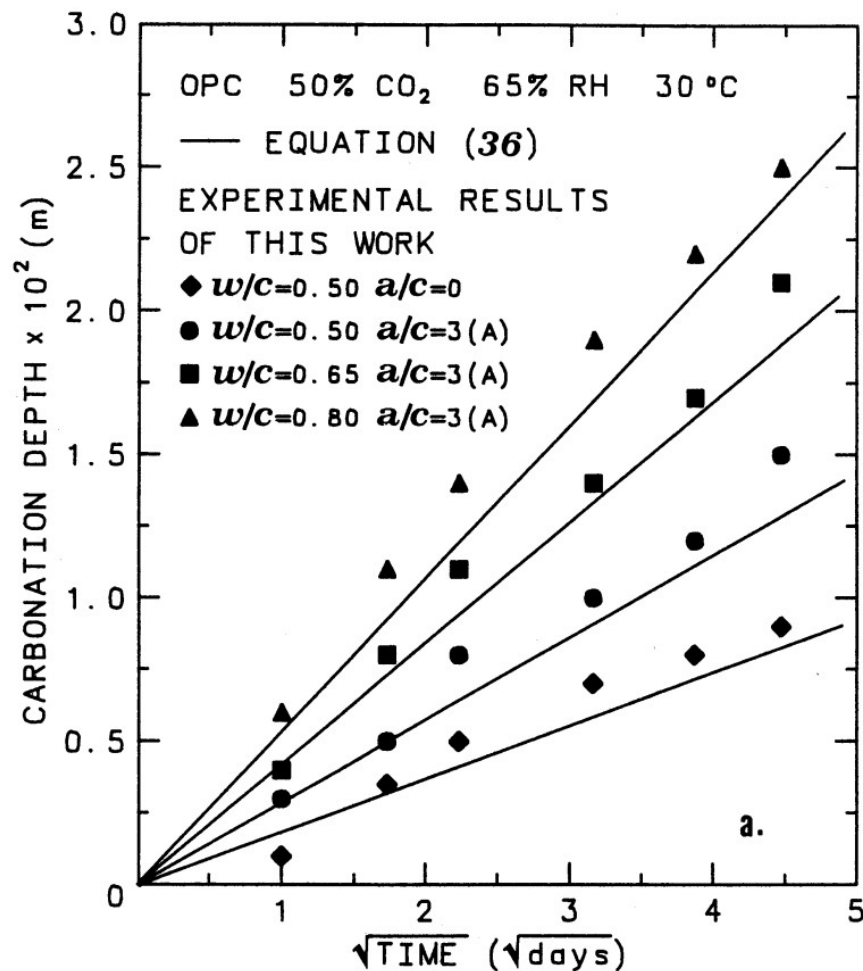
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • energies alternatives

□ Modèle de Papadakis

- Bonne confrontation modèle/expériences en conditions maintenues



Papadakis et al. (1991)
ACI Materials Journal 88(4), 363-373

Carbonatation des matériaux cimentaires



□ Modèle de Papadakis

- Modèle physique très simple
- Prend en compte l'influence de la formulation des bétons (concentration des phases carbonatables)
- Permet de décrire la carbonatation naturelle et les essais accélérés (concentration en CO_2)
- Prend en compte l'influence de l'environnement (à travers la connaissance de l'évolution du coefficient de diffusion en fonction de l'HR extérieure)

- Mais ne permet pas de prendre en compte les variations environnementales (HR et T)

Carbonatation des matériaux cimentaires



☐ Modèle de Bakker

- Modèle analytique
- Prise en compte des cycles de réhumidification/séchage

$$X_c(t) = A \sum_{i=1}^n \sqrt{t_{di} - \left(\frac{X_{i-1}}{B}\right)^2}$$

Bakker (1993) CEMIJ BV
Laboratorium report.

Coefficient de diffusion effectif

Concentration en CO₂ dans l'air

$$A = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}^{e,c} [CO_2]^0}{a}}$$

Concentration des phases carbonatables

Diffusivité hydrique du béton

Différence de concentration en eau

$$B = \sqrt{\frac{2D_v^c \Delta C_v}{b}}$$

Concentration en eau évaporable

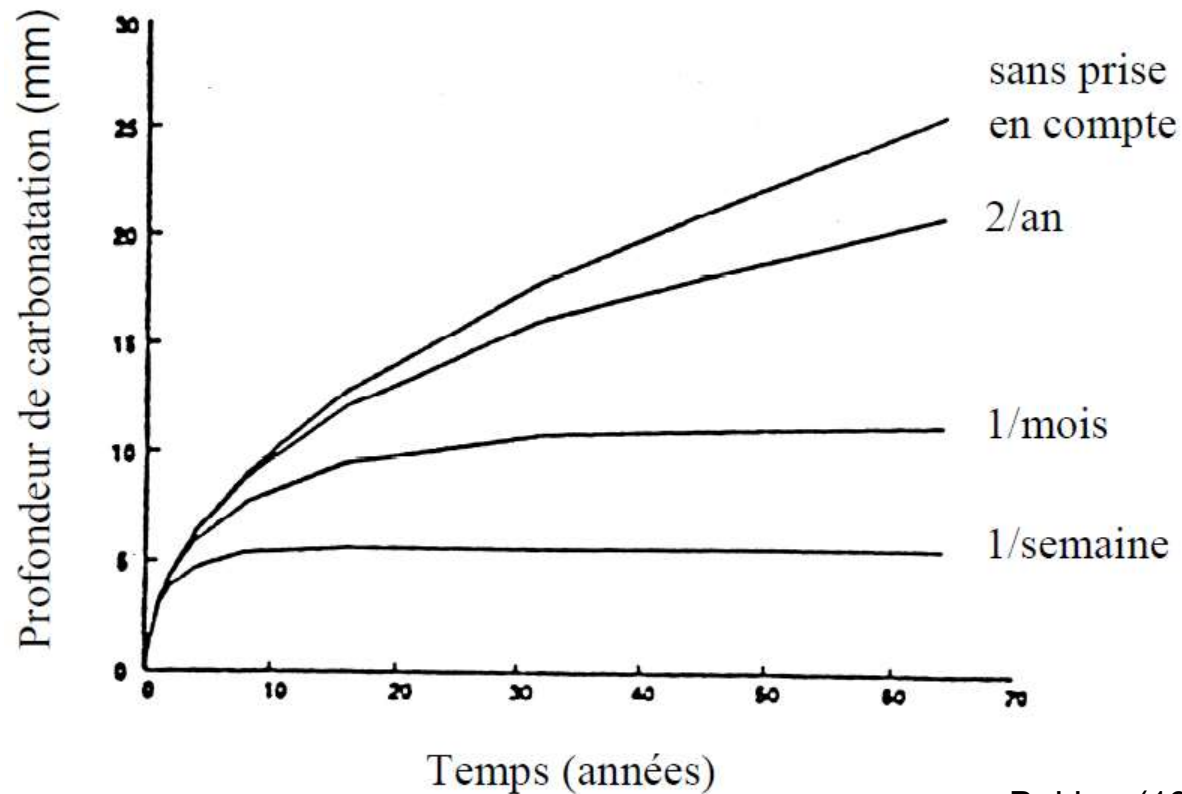
Carbonatation des matériaux cimentaires



energie atomique • énergies alternatives

☐ Modèle de Bakker

- Exemple de restitution du modèle en fonction la fréquence des cycles de réhumidification



Bakker (1993) CEMIJ BV
Laboratorium report.