

8<sup>èmes</sup> Journées  
Fiabilité des  
MATÉRIAUX & DES STRUCTURES  
Aix-en-Provence,  
9 et 10 avril 2014



ECOSYSTEMES CONTINENTAUX  
ECCOREV  
ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



## Carbonatation sous température variable : effet du réchauffement climatique sur la fiabilité des structures en Béton Armé

T. de Larrard

F. Duprat

E. Bastidas-Arteaga

F. Schoefs



# Carbonatation sous température variable : effet du réchauffement climatique sur la fiabilité des structures en Béton Armé

8<sup>èmes</sup> Journées Fiabilité des Matériaux & des Structures  
T.7 : *Inspection, maintenance, réparation sous incertitude*

T. de Larrard, F. Duprat, E. Bastidas-Arteaga, F. Schoefs

*Laboratoire de Mécanique et Durabilité des Constructions, Toulouse  
Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique, Nantes*



9-10 avril 2014



# Introduction : contexte et objectifs

## Scenarii envisagés

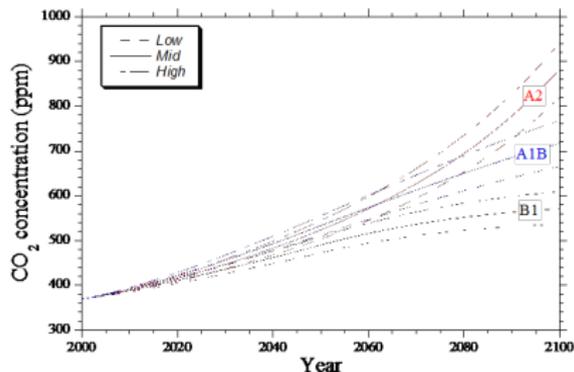
- Proposés par l'IPCC (2007)
- 3 scenarii basés sur :
  - croissance démographique
  - développement économique
  - énergies "propres"
- Projection à 100 ans pour :
  - $CO_2$  atmosphérique
  - humidité relative
  - température
- Impact sur le risque de corrosion
- Comparaison sur la base d'un indice de fiabilité relatif à la carbonatation



# Introduction : contexte et objectifs

## Scenarii envisagés

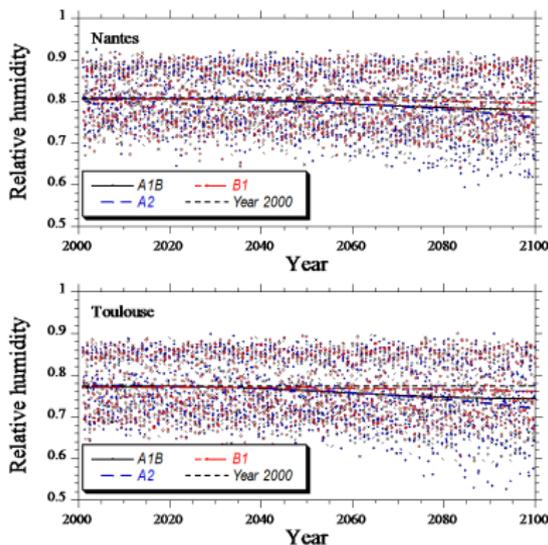
- Proposés par l'IPCC (2007)
- 3 scenarii basés sur :
  - croissance démographique
  - développement économique
  - énergies "propres"
- Projection à 100 ans pour :
  - $CO_2$  atmosphérique
  - humidité relative
  - température
- Impact sur le risque de corrosion
- Comparaison sur la base d'un indice de fiabilité relatif à la carbonatation



# Introduction : contexte et objectifs

## Scenarii envisagés

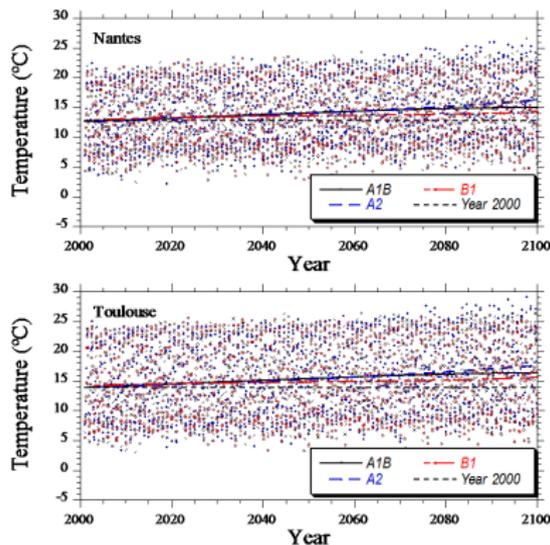
- Proposés par l'IPCC (2007)
- 3 scenarii basés sur :
  - croissance démographique
  - développement économique
  - énergies "propres"
- Projection à 100 ans pour :
  - $CO_2$  atmosphérique
  - humidité relative
  - température
- Impact sur le risque de corrosion
- Comparaison sur la base d'un indice de fiabilité relatif à la carbonatation



# Introduction : contexte et objectifs

## Scenarii envisagés

- Proposés par l'IPCC (2007)
- 3 scenarii basés sur :
  - croissance démographique
  - développement économique
  - énergies "propres"
- Projection à 100 ans pour :
  - $CO_2$  atmosphérique
  - humidité relative
  - température
- Impact sur le risque de corrosion
- Comparaison sur la base d'un indice de fiabilité relatif à la carbonatation



# Synthèse des évolutions climatiques

Moyenne entre 2001 et 2010 & variation entre 2001 et 2100

- Étude pour 6 villes françaises : Nantes, Toulouse, Clermont-Ferrand, Marseille, Paris et Strasbourg

	<b>Mar.</b>	<b>Par.</b>	<b>Tou.</b>	<b>Str.</b>	<b>Cle.</b>	<b>Nan.</b>
$T_{moy}$	14,75	13,04	14,08	11,53	11,66	12,76
$\Delta T(A2)$	+3,04	+3,59	+3,23	+3,63	+3,43	+3,22
$\Delta T(A1B)$	+2,21	+2,56	+2,29	+2,58	+2,39	+2,23
$\Delta T(B1)$	+1,16	+1,33	+1,18	+1,40	+1,28	+1,14
$HR_{moy}$	68,78	74,22	77,36	77,02	75,44	80,65
$\Delta HR(A2)$	-2,61	-4,92	-4,79	-4,64	-4,59	-3,96
$\Delta HR(A1B)$	-1,10	-3,44	-2,79	-2,87	-2,33	-2,75
$\Delta HR(B1)$	-0,21	-1,14	-0,93	-1,11	-0,79	-0,59

# Sommaire

- 1 **Modélisation de la carbonatation sous variations climatiques**
  - Modèle numérique simplifié de carbonatation
  - Prise en compte des variations de température
- 2 **Effet du réchauffement climatique sur l'indice de fiabilité**
  - Détermination de l'indice de fiabilité
  - Comparaison entre les scenarii et les localisations



# Sommaire

- 1 **Modélisation de la carbonatation sous variations climatiques**
  - Modèle numérique simplifié de carbonatation
  - Prise en compte des variations de température
- 2 **Effet du réchauffement climatique sur l'indice de fiabilité**
  - Détermination de l'indice de fiabilité
  - Comparaison entre les scénarii et les localisations

# Équations de conservation

Bary & Sellier (2004), Bary & Mügler (2006), de Larrard et al. (2013)

## Équations couplées

- Conservation de la masse d'eau

$$\frac{\partial (\rho_l \phi S_r)}{\partial t} = \text{div} \left( K(\phi) \frac{\rho_l}{\eta} k_r(S_r) \text{grad}(P_l) \right) + W_{H_2O}$$

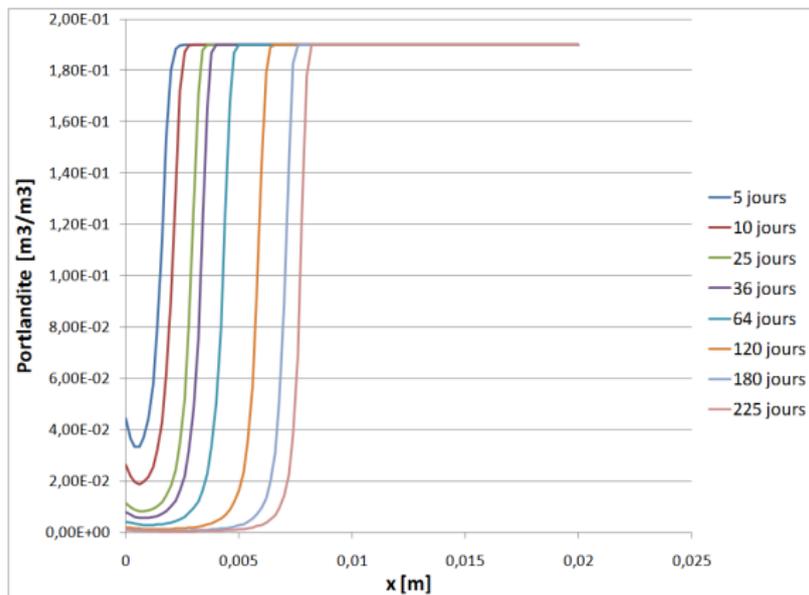
- Conservation de la masse de  $CO_2$

$$\frac{\partial \left( (1 - S_r) \phi P_{\bar{c}} \right)}{\partial t} = \text{div} \left( f(\phi, S_r) D_{\bar{c}} \text{grad}(P_{\bar{c}}) \right) + W_{CO_2}$$

- Conservation du calcium : équilibre chimique local

# Exemple de résultats numériques

## Profils de portlandite

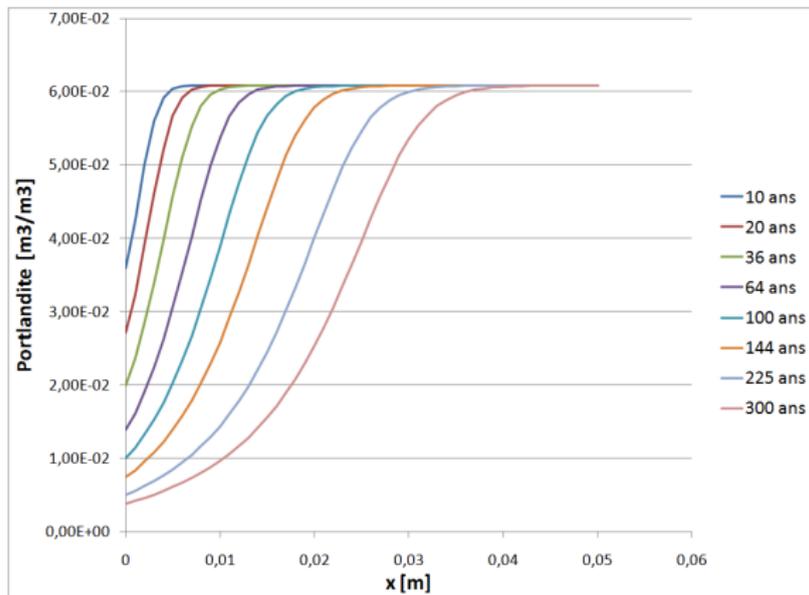


*Carbonatation accélérée*



# Exemple de résultats numériques

## Profils de portlandite



# Sommaire

- 1 **Modélisation de la carbonatation sous variations climatiques**
  - Modèle numérique simplifié de carbonatation
  - **Prise en compte des variations de température**
- 2 **Effet du réchauffement climatique sur l'indice de fiabilité**
  - Détermination de l'indice de fiabilité
  - Comparaison entre les scénarii et les localisations

# Thermo-activation des phénomènes physiques

## 1 – Diffusion, cinétique chimique, loi de Henry, viscosité

- Diffusion du  $CO_2$  :  $Q_D = 39$  kJ/mol (Saetta et al., 1993)

$$D_{CO_2}(T) = D_{CO_2}(T_{ref}) \times \exp\left(-\frac{Q_D}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

- Cinétique de dissolution :  $Q_p = -40$  kJ/mol (Papadakis et al., 1991)

$$\tilde{k}_p(T) = \tilde{k}_p(T_{ref}) \times \exp\left(-\frac{Q_p}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

- Loi de Henry :  $Q_H = 19,95$  kJ/mol (Fogg & Sangster, 2003)

$$k_H(T) = k_H(T_{ref}) \times \exp\left(-\frac{Q_H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

- Viscosité de l'eau :  $Q_\eta = 15,7$  kJ/mol (Reinhardt & Joss, 2003)

$$\eta(T) = \eta(T_{ref}) \times \exp\left(-\frac{Q_\eta}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

# Thermo-activation des phénomènes physiques

## 2 – Modification de l'isotherme de désorption

### Fonction d'Arrhenius sur la saturation

- D'après le modèle proposé par *Poyet & Charles (2009)*

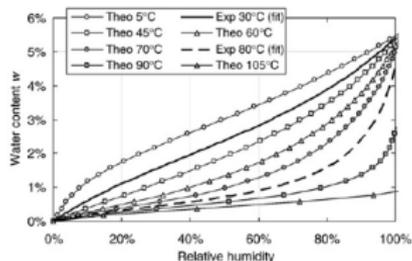
$$S_r(T) = S_r(T_{ref}) \times \exp\left(-\frac{Q_S(P_l, T)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right)$$

$$Q_S(P_l, T) = a_1 + \frac{a_2}{\left(a_3 + \frac{P_l}{P_m(T)}\right)^2}$$

$$P_m(T) = a_4 + a_5 (T - T_{ref})$$

- Calage sur les résultats expérimentaux de *Hundt & Kantelberg (1978)*

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = 42,7 \text{ kJ/mol} \\ a_2 = 64,6 \text{ kJ/mol} \\ a_3 = 1,31 \\ a_4 = -165 \text{ kPa} \\ a_5 = 2,2 \text{ kPa/K} \end{array} \right.$$



# Sommaire

- 1 **Modélisation de la carbonatation sous variations climatiques**
  - Modèle numérique simplifié de carbonatation
  - Prise en compte des variations de température
- 2 **Effet du réchauffement climatique sur l'indice de fiabilité**
  - Détermination de l'indice de fiabilité
  - Comparaison entre les scenarii et les localisations

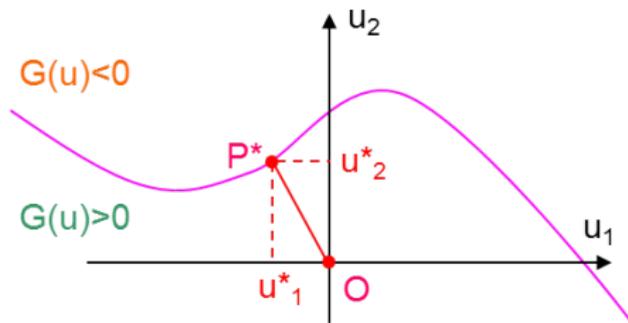


# Indice de fiabilité de Hasofer-Lind

## Définition

- Distance euclidienne minimale entre l'origine du repère standard et la surface d'état limite

$$\beta = \|\vec{u}^*\| = \min (\|\vec{u}\|)_{G(\vec{u})=0}$$



## L<sub>n</sub> Détermination

- Calculé avec l'algorithme du gradient projeté (Duprat et al., 2010)

# Application au problème de carbonatation

Estimation du risque de défaillance en corrosion à 100 ans

## Choix des variables aléatoires

- Distribution normale pour toutes les variables (coefficient de variation : 5 %)
- 1 variable "structurale" :
  - enrobage ( $\bar{e} = 2$  cm)
- 4 propriétés du matériau :
  - porosité initiale ( $\bar{\phi} = 9,6$  %)
  - perméabilité intrinsèque ( $\bar{K}_0 = 1,8 \times 10^{-22}$  m<sup>2</sup>)
  - coefficient de diffusion du  $CO_2$  ( $\bar{D}_{CO_2} = 1,9 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s)
  - coefficient de van Genuchten ( $\bar{m} = 0,532$ )

## Choix de la fonction de défaillance

- **Hypothèse** : initiation de la corrosion sur l'armature possible si 67 % de la portlandite initiale est dissoute

$$G(u) = V_p(u, e(u), t_{fin}) - 0,33 \times V_p(u, e(u), t_0)$$

# Application au problème de carbonatation

Estimation du risque de défaillance en corrosion à 100 ans

## Choix des variables aléatoires

- Distribution normale pour toutes les variables (coefficient de variation : 5 %)
- 1 variable "structurale" :
  - enrobage ( $\bar{e} = 2$  cm)
- 4 propriétés du matériau :
  - porosité initiale ( $\bar{\phi} = 9,6$  %)
  - perméabilité intrinsèque ( $\bar{K}_0 = 1,8 \times 10^{-22}$  m<sup>2</sup>)
  - coefficient de diffusion du  $CO_2$  ( $\bar{D}_{CO_2} = 1,9 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s)
  - coefficient de van Genuchten ( $\bar{m} = 0,532$ )

## Choix de la fonction de défaillance

- **Hypothèse** : initiation de la corrosion sur l'armature possible si 67 % de la portlandite initiale est dissoute

$$G(u) = V_p(u, e(u), t_{fin}) - 0,33 \times V_p(u, e(u), t_0)$$

# Sommaire

- 1 **Modélisation de la carbonatation sous variations climatiques**
  - Modèle numérique simplifié de carbonatation
  - Prise en compte des variations de température
- 2 **Effet du réchauffement climatique sur l'indice de fiabilité**
  - Détermination de l'indice de fiabilité
  - Comparaison entre les scenarii et les localisations

# Bilan des indices de fiabilité

Ville	CO <sub>2</sub>	A2	A1B	B1
Toulouse	Haute	1,87	3,73	6,80
Toulouse	Moyenne	2,09	3,90	6,91
Toulouse	Basse	2,33	4,07	7,02
Nantes	Haute	12,40	14,48	15,94
Nantes	Moyenne	12,51	14,55	15,99
Nantes	Basse	12,64	14,63	16,03

## Analyse

- 1 Effet du dioxyde de carbone
- 2 Effet de la localisation
- 3 Effet du scénario
- 4 Coordonnées du point de fonctionnement

- Plus d'effet à Toulouse qu'à Nantes
- Moins d'effet que le scénario :

$$T.A2.B \rightarrow T.A2.H \implies \beta + 25\%$$

$$T.A1B.H \rightarrow T.A2.H \implies \beta + 99\%$$

# Bilan des indices de fiabilité

Ville	A2	A1B	B1
Marseille	-6,44	-5,88	-4,13
Toulouse	2,09	3,90	6,91
Paris	1,70	3,68	6,91
Strasbourg	7,51	8,88	11,95
Nantes	12,51	14,55	15,99
Clermont	9,06	11,23	13,29

## Analyse

- 1 Effet du dioxyde de carbone
- 2 **Effet de la localisation**
- 3 Effet du scénario
- 4 Coordonnées du point de fonctionnement

- Large intervalle de  $\beta$
- Effet de la température
- Réduction de la diffusion pour  $0,80 \leq H_R \leq 0,85$

# Bilan des indices de fiabilité

Ville	A2	A1B	B1
Marseille	-6,44	-5,88	-4,13
Toulouse	2,09	3,90	6,91
Paris	1,70	3,68	6,91
Strasbourg	7,51	8,88	11,95
Nantes	12,51	14,55	15,99
Clermont	9,06	11,23	13,29

## Analyse

- 1 Effet du dioxyde de carbone
- 2 Effet de la localisation
- 3 **Effet du scénario**
- 4 Coordonnées du point de fonctionnement

- Effet significatif :

$$T.B1.H \rightarrow T.A2.H \implies \beta + 264\%$$

$$N.B1.H \rightarrow N.A2.H \implies \beta + 28\%$$

- Suffisant pour passer de "sécurité" à "risque"

# Bilan des indices de fiabilité

Ville	Toulouse	Toulouse	Nantes
Scenario	A2 – H	A1B – M	A1B – M
<b>Enrobage</b>	+56,4%	+9,8%	+1,2·10 <sup>-6</sup> %
<b>Porosité</b>	-17,1%	-3,2%	-2,6·10 <sup>-6</sup> %
<b>Perméabilité</b>	-5,5%	-1,8%	-0,6·10 <sup>-6</sup> %
<b>Diffusion</b>	-19,9%	-6,1%	-1,7·10 <sup>-6</sup> %
<b>Isotherme</b>	-19,7%	-6,2%	-2,3·10 <sup>-6</sup> %

## Analyse

- 1 Effet du dioxyde de carbone
- 2 Effet de la localisation
- 3 Effet du scenario
- 4 **Coordonnées du point de fonctionnement**

- Enrobage : de -2 à -15 écarts-types
- Paramètres matériaux : de 0,2 à 2 écarts-types
- Concordant avec calcul d'élasticité des paramètres

# Conclusions et perspectives

## Bilan

- Développement d'un modèle EF "simplifié" pour la carbonatation sous conditions atmosphériques variables
- Comparaison des scénarii de réchauffement climatique sur la base d'un indice de fiabilité défini par rapport à la carbonatation comme initiateur de corrosion :
  - Forte influence du scénario ( $CO_2$ ,  $H_R$ ,  $T$ )
  - Disparités selon le climat

## Perspectives

- Étude des lois de distributions pour les variables
- Étude de la corrélation entre les variables du problème
- Influence du seuil de portlandite définissant le front de carbonatation

# Conclusions et perspectives

## Bilan

- Développement d'un modèle EF "simplifié" pour la carbonatation sous conditions atmosphériques variables
- Comparaison des scénarii de réchauffement climatique sur la base d'un indice de fiabilité défini par rapport à la carbonatation comme initiateur de corrosion :
  - Forte influence du scénario ( $CO_2$ ,  $H_R$ ,  $T$ )
  - Disparités selon le climat

## Perspectives

- Étude des lois de distributions pour les variables
- Étude de la corrélation entre les variables du problème
- Influence du seuil de portlandite définissant le front de carbonatation