



**HAL**  
open science

## Sensibilités des modèles de carbonatation vis-à-vis de leur capacité à propager des incertitudes

Ndrianary Rakotovao Ravahatra, Thomas de Larrard, Frederic Duprat, Emilio Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs

### ► To cite this version:

Ndrianary Rakotovao Ravahatra, Thomas de Larrard, Frederic Duprat, Emilio Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs. Sensibilités des modèles de carbonatation vis-à-vis de leur capacité à propager des incertitudes. 8èmes Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures, Apr 2014, Aix-en-Provence, France. hal-01100768

**HAL Id: hal-01100768**

**<https://hal.science/hal-01100768v1>**

Submitted on 7 Jan 2015

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Sensibilités des modèles de carbonatation vis-à-vis de leur capacité à propager des incertitudes

Ndriary Rakotovo Ravahatra<sup>\*,\*\*</sup>— T. de Larrard<sup>\*</sup>— F. Duprat<sup>\*</sup> — E. Bastidas-Arteaga<sup>\*\*</sup>— F. Schoefs<sup>\*\*</sup>

*\* Laboratoire Matériau et Durabilité des Constructions, UPS/INSA-Toulouse, 135 avenue de Rangueil, 31077 Toulouse cedex 4, France*

*\*\* LUNAM, Université de Nantes, Institut de Génie Civil et de Mécanique (GeM), UMR CNRS 6183, 2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes cedex 3, France*

---

*RÉSUMÉ. Cette étude se concentre sur la prise en compte des incertitudes dans les modèles simplifiés de carbonatation du béton. Afin de réaliser une comparaison pertinente des modèles recensés, une homogénéisation des notations est proposée dans le présent document. Les indicateurs de sensibilité utilisés sont l'élasticité, le coefficient de corrélation linéaire de Pearson, et l'influence des variations des paramètres d'entrée sur la moyenne et l'écart-type de la réponse. Trois bétons ont été étudiés. Les résultats montrent que les paramètres prédominants restent les mêmes au cours du temps. Les avantages et insuffisances de chacun des indicateurs ont été mis en évidence.*

*ABSTRACT. This work focuses on handling uncertainties in predicting corrosion onset induced by concrete carbonation when using simplified models. In order to achieve a relevant comparison, a notations homogenization is proposed for these models in this paper. The sensitivity indicators used are the elasticity, the linear Pearson's correlation coefficient, and the influence of input variations on the mean and standard deviation of the response. Three different concrete were considered. Results show that prominent parameters remain the same along time. Lacks and advantages of each indicator have been highlighted.*

*MOTS-CLÉS : Incertitude, maintenance, modélisation, sensibilité, carbonatation, béton*

*KEYWORDS: Uncertainty, Maintenance, Modelling, Sensitivity, Carbonation, Concrete*

---

## 1. Introduction

La dépassivation des armatures est le point de départ de la corrosion des aciers. La conception d'une politique de maintenance préventive par rapport à la corrosion implique donc une prévision de ce phénomène. L'avancement de la carbonatation est l'un des facteurs qui conduisent à cette dégradation. La participation du gestionnaire d'ouvrage dans la conception de la stratégie de maintenance est indispensable, les outils à mettre en œuvre doivent donc être accessibles à ces acteurs d'où l'utilisation de modèles simplifiés. La prise en compte des incertitudes est importante pour optimiser les approches adoptées. Une étude de sensibilité est nécessaire pour cette démarche afin de quantifier l'importance relative de chaque paramètre mais aussi afin d'avoir une première estimation de la capacité des modèles à propager des incertitudes. Dans la présente étude, une synthèse des modèles simplifiés de carbonatations a été réalisée. Ensuite une étude de sensibilité des paramètres a été effectuée. Les indicateurs utilisés sont : l'élasticité, le coefficient de corrélation linéaire de Pearson, l'incidence sur la moyenne et l'écart-type de la réponse.

## 2. Synthèse des modèles simplifiés de carbonatation

Ces modèles simplifiés s'appuient sur l'hypothèse d'une variation linéaire de la pression de dioxyde de carbone depuis la surface du béton, où cette pression est égale à la pression extérieure jusqu'au point de progression où cette pression est supposée nulle, du fait de la consommation supposée instantanée du dioxyde de carbone par la dissolution des hydrates. De ce fait, le front de dissolution des hydrates s'apparente à un front raide. Ces modèles font intervenir des facteurs empiriques. D'une façon très générale, ces modèles s'expriment sous la forme :

$$x_c(t) = k_E k_C k_P D_{CO_2} \quad [1]$$

Avec  $x_c(t)$  (m) l'épaisseur carbonatée après une durée  $t$ (s) d'exposition,  $k_E$  le facteur empirique de prise en compte des conditions d'exposition,  $k_C$  le facteur empirique de prise en compte des conditions de cure,  $k_P$  le facteur intégrant les différentes conditions qui influent sur la diffusion du dioxyde de carbone dans le réseau poreux du béton. On peut encore écrire dans certains cas :

$$k_P = k_{P,M} k_{P,E} \quad [2]$$

en distinguant dans  $k_P$  la part  $k_{P,M}$  associée au matériau (porosité, concentration des hydrates) et la part  $k_{P,E}$  associée à l'environnement (pression de  $CO_2$ , degré de saturation).  $D_{CO_2}$ (m<sup>2</sup>/s) est le coefficient de diffusion du dioxyde carbone. Pour chaque type de modèle, ce sont les valeurs de  $k_P$ ,  $k_E$ , et  $k_C$  qui varient. Les paramètres d'entrée sont synthétisés dans le Tableau 1. Avec :  $P_{CO_2}$  la pression de dioxyde de carbone,  $T$  la température,  $HR$  l'humidité relative,  $\varphi$  la porosité,  $S_r$  le

degré de saturation,  $R_c$  la résistance en compression du béton,  $[composé]$  la concentration du composé dans le béton,  $n$  le paramètre de vieillissement,  $t_0$  un temps de référence,  $k_e$  un paramètre environnemental,  $k_c$  un paramètre de prise en compte des conditions de cure du béton,  $k_t$  le paramètre d'essai de mesure du coefficient de diffusion du  $CO_2$ ,  $C_2$  et  $C_1$  les quantités de calcium venant respectivement des  $CSH$  et des autres hydrates,  $a$  la quantité de matériau carbonatable,  $\beta$  et  $m$  sont des paramètres de calage.

Classes	Symboles	Modèles							
		Ying-Yu [YIN 87]	Papadakis [PAP 91]	Bakker [BAK 93]	CEB code [CEB 97]	DURACRETE [DUR 00]	Miragliotta [MIR 00]	Oxand [PET 01]	Hyvert [HYV 09]
Env.	$P_{CO_2}$	×	×	×	×	×	×	×	×
	$T$								×
	$HR$		×	×	×	×		×	×
Matériau	$\varphi$	×	×	×	×	×	×		
	$S_r$	×		×			×		
	$R_c$							×	
	$[CSH]$		×				×		×
	$[CH]$		×	×			×		×
	$[AFt]$						×		×
	$[AFm]$						×		×
	$[C_3S]$		×				×		
	$[C_2S]$		×				×		
	$[C_3A]$								
	$[C_4AF]$		×				×		
$D_{CO_2}$	$D_{Yu}^*$	$D_{Pa}^{**}$	×	$k_t D(t_0/t)^n$	$k_t D(t_0/t)^n$	×		×	
$t_0$				×	×				
$k_E$	1	1	1	$k_e$	$k_e$	1	$\gamma^2$	$k_e$	
$k_C$	1	1	1	$k_c$	$k_c$	1	1	$k_c$	

**Tableau 1.** Paramètres d'entrée des modèles simplifiés de carbonatation

$$*D_{Yu} = e^{(105,66\varphi - 0,877)}$$

$$**D_{Pa} = 1,64 \times 10^{-6} \varphi^{1,8} (1 - HR)^{2,2}$$

Les expressions  $k_{P,M}$  et  $k_{P,E}$  de sont détaillées dans le Tableau 2.

Modèles	$k_{p,E}$	$k_{p,M}$
Ying-Yu	$2P_{CO_2}/(C_{abs}\rho)$	1
Papadakis	$C_0$	$2([CH]+3[CSH]+3[C_3S]+2[C_2S])^{-1}$
Bakker	$C_0$	$2([CH])^{-1}$
CEB code	$C_0$	$2/a$
DURACRETE	$C_0$	$2/a$
Miragliotta	$C_0$	$\frac{2(1-S_r)}{(1-\varphi)([CH] + 3[CSH] + 3[C_3S] + 2[C_2S] + 4[C_4AF] + 3[C_3A])}$
Oxand	$(-3,8533HR + 3,4833HR + 0,2)^2$	$\left(\frac{365}{2,1\sqrt{R_c}} - 0,06\right)^2$
Hyvert	$P_{CO_2}/(RT)$	$f_p^{-1} \left( [C1] + \frac{C2}{m+1} \left( \frac{P_{CO_2}}{P_{atm}} \right)^m \right)^{-1} \left( 1 + \beta [C2] \left( \frac{P_{CO_2}}{P_{atm}} \right)^m \right)^{-1}$

Tableau 2. Expressions de  $k_{p,E}$  et  $k_{p,M}$ 

### 3. Les indicateurs pour l'étude de sensibilité

Les modèles simplifiés de carbonatation peuvent s'écrire comme suit :

$$Y = f(t, \mathbf{Z}) \quad [3]$$

$\mathbf{Y}$  est la réponse du modèle.  $\mathbf{Z} = \{z_1, \dots, z_n\}$  est un vecteur aléatoire dans lequel chaque composante  $z_i$  est un paramètre d'entrée du modèle. Pour les modèles simplifiés de carbonatation, la réponse a une seule composante : la profondeur de carbonatation à l'instant  $t$ . Les indicateurs utilisés dans cette étude sont : l'élasticité, le coefficient de corrélation linéaire de Pearson, l'impact de la variation en entrée sur la moyenne et l'écart-type de la réponse.

#### 3.1 Elasticité

L'élasticité est une évaluation de la variation d'une réponse (ici  $\mathbf{Y}$ ) suite à la perturbation d'un paramètre d'entrée  $z_i$  avec les autres paramètres fixés à leur valeur moyenne ([LEM 09]). Dans le cas d'un modèle de dégradation, il s'agit de l'effet sur le ou les paramètres de sortie suite à une variation d'un paramètre d'entrée (par exemple la porosité). L'élasticité s'estime à partir d'un calcul entièrement déterministe. Il est égal à :

$$e_i = \frac{\Delta f(t, \mathbf{Z})}{\Delta z_i} \quad [4]$$

Avec  $\Delta z_i$  la variation en % de l'entrée  $z_i$  et  $\Delta f(t, \mathbf{Z})$  celle de la réponse. Une valeur infinie signifie que le modèle est très sensible par rapport à la variation du paramètre étudié, tandis qu'une valeur proche de 0 dénote une faible sensibilité. Une valeur égale à 1 signifie qu'une variation de  $z_i$  provoque la même variation sur  $y_j$  ce qui est le cas d'un modèle linéaire.

L'application au modèle DuraCrete donne les résultats de la Figure 1 pour les bétons C45, C35 et C25. Les valeurs de paramètres sont reportées dans Tableau 3. Les courbes relatives aux paramètres  $k_e$ ,  $k_c$ , et  $k_t$  sont confondues puisqu'ils interviennent de la même manière dans l'expression générale du modèle :

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{k_e k_c k_t [CO_2]}{R_{carb}}} \quad [5]$$

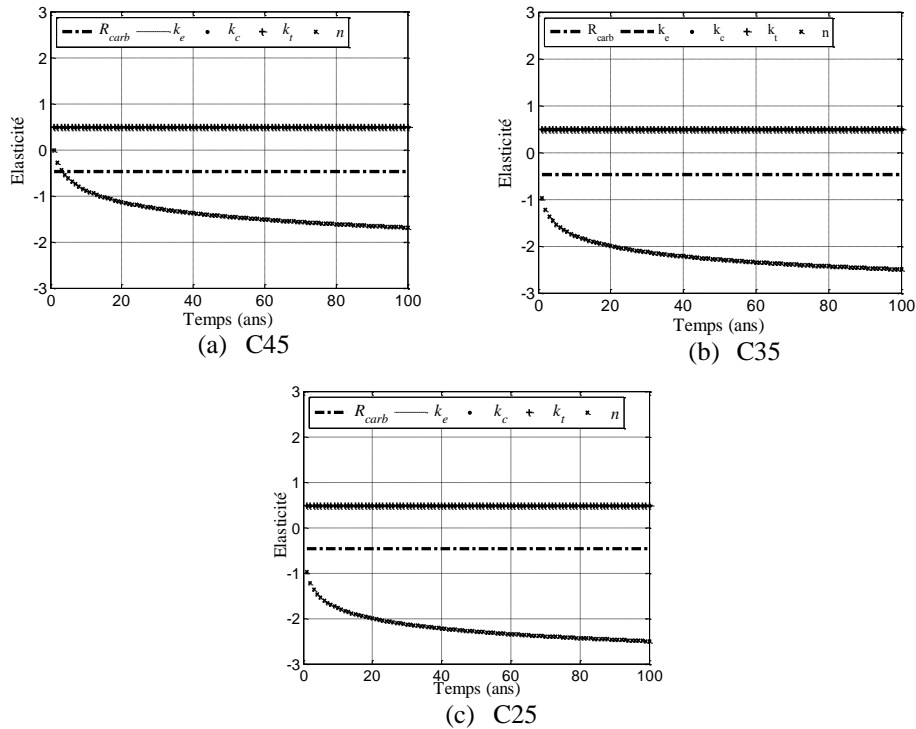
Leur influence est la même pendant toute la durée de vie de l'ouvrage. De plus les valeurs sont positives ce qui implique que l'augmentation de ces paramètres favorise la carbonatation. Cela est physiquement cohérent sachant que  $k_e$  est un paramètre environnemental,  $k_c$ , le paramètre qui évalue les effets de la qualité du cure et  $k_t$  est un paramètre de mesure de la diffusion.  $R_{carb}$  a une influence constante dans le temps et de valeur négative. Ce paramètre tient compte de la quantité de matériaux carbonatables dans le béton. Plus ces matériaux sont en quantité importantes plus la cinétique d'avancement de l'épaisseur carbonatée sera lente. Ce qui explique la valeur négative.  $n$  a une influence croissante dans le temps. Il s'agit d'un paramètre de vieillissement d'où la croissance de l'influence en fonction du temps. Le changement de matériau est perçu uniquement par ce paramètre pour l'élasticité. Il prend en compte l'évolution du coefficient de diffusion qui est fonction de la micro structure. On constate que l'influence de  $n$  est plus importante dans les bétons de plus faible qualité (C35 et C25). Le bon béton (C45), avec une porosité relativement fermée présente déjà une certaine résistance à la carbonatation, l'influence du vieillissement du matériau est donc plus réduite. Pour les autres matériaux, la micro structure est plus ouverte et donc moins résistant à la pénétration de l'air ( $CO_2$ ). L'influence du vieillissement du matériau qui réduit la porosité est donc légèrement supérieure pour les bétons C35 et C25 par rapport au bon béton C45.

### 3.2 Coefficient de corrélation de Pearson

Le coefficient de Pearson  $\rho_{cor}$  permet d'évaluer la corrélation linéaire entre deux variables aléatoires. Il est égal au rapport de la covariance des deux variables par le produit de leurs écarts type. L'influence en fonction du temps du paramètre  $z_i$  sur  $y_j$  à l'instant  $t$  est alors évaluée par le coefficient de corrélation de Pearson :

$$\rho_{cor}(t) = \frac{\sum(z_i - \bar{z}_i)(y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum(z_i - \bar{z}_i)^2(y_j - \bar{y})^2}} \quad [6]$$

Sa valeur est comprise entre -1 et 1. Un résultat proche de 1 en valeur absolue indique une forte corrélation linéaire entre les deux paramètres tandis qu'un résultat avoisinant la valeur nulle indique une faible corrélation linéaire. Un signe négatif signifie que les deux variables évoluent suivant des sens opposés.



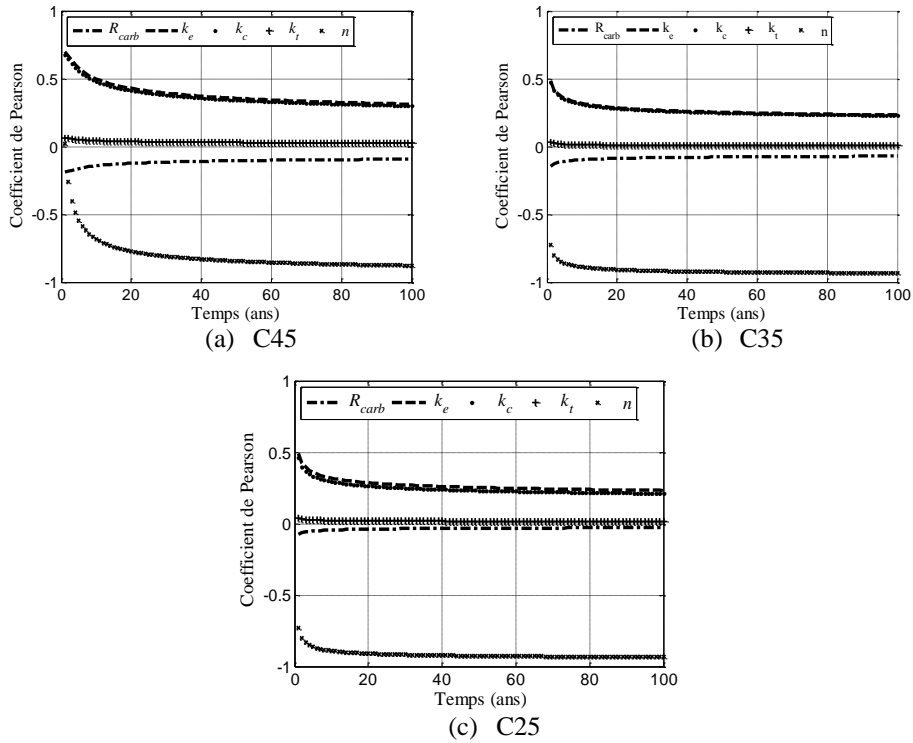
**Figure 1.** Evolution de l'élasticité des paramètres en fonction du temps pour le modèle DuraCrete appliqué au béton C45 (a), C35 (b) et C25 (c), respectivement

Dans le cadre d'une étude de sensibilité des paramètres d'un modèle, c'est le coefficient de Pearson entre le paramètre d'entrée étudié et le ou les paramètres de sortie retenus qui seront calculé.

La synthèse des résultats pour les trois bétons utilisés est montrée dans la Figure 2 pour le modèle DuraCrete. Les résultats par rapport au coefficient de corrélation de Pearson rejoignent globalement ceux de l'élasticité. Toutefois, l'effet de la variabilité commence à apparaître.

L'importance de leurs plages de variabilités respectives a mis en évidence l'écart des influences entre  $k_e$ ,  $k_c$  et  $k_t$ . Les deux premiers ont des influences proches car leurs plages de variations représentées par leurs coefficients de variations sont assez proches (27% et 26% respectivement cf. Tableau 3). D'autre part l'influence de  $k_e$  et  $k_c$  sont équivalentes puisque l'un considère l'exposition et l'autre la qualité du béton de peau qui est au contact de l'atmosphère. Cela explique aussi le fait que leur importance est plus marquée à court terme et se stabilise dans le temps. Pour le béton C25, l'influence  $k_e$  est légèrement supérieure à cause de la mauvaise qualité du béton qui laisse l'avantage aux conditions environnementales.  $k_t$  est un paramètre d'essai de mesure du coefficient de diffusion d'où son influence plus réduite.  $R_{carb}$

est fonction du type de ciment. Ainsi, bien que son influence ne soit pas la plus importante, elle diffère d'un béton à un autre.  $n$  est le paramètre le plus influent et on constate que cette influence est légèrement différente d'un matériau à l'autre.



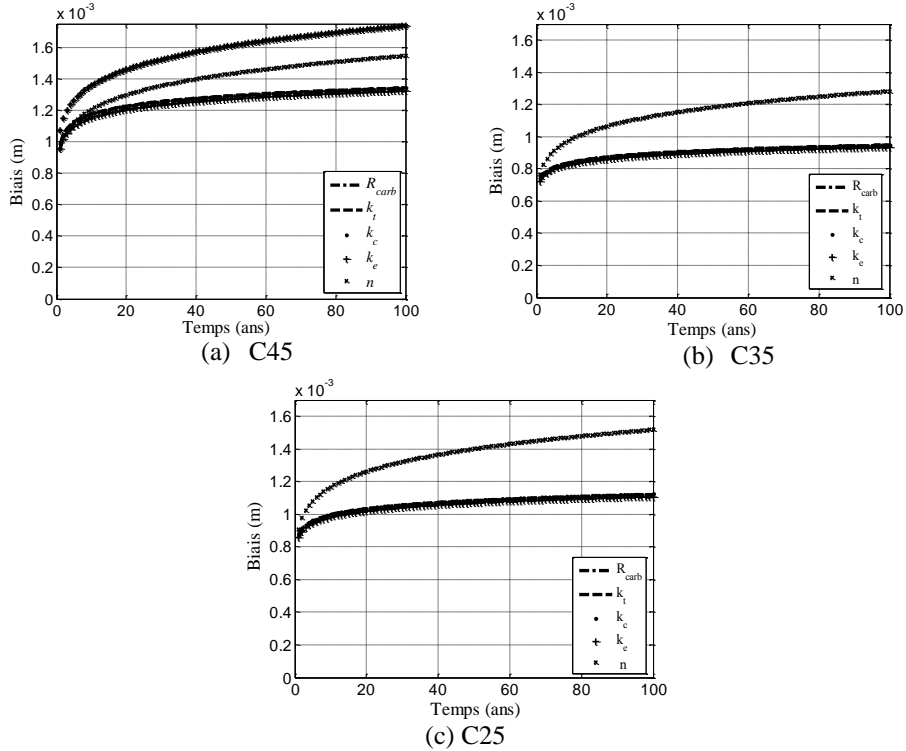
**Figure 2.** Evolution du coefficient de corrélation de linéaire de Pearson en fonction du temps pour le modèle DuraCrete appliqué au béton C45 (a), C35 (b) et C25 (c), respectivement

### 3.3 Effet sur la moyenne de la réponse

Cet indicateur donne une estimation de la variabilité imputable à chaque paramètre, cela en calculant le biais engendré lorsque l'on retire la variabilité du paramètre étudié. La moyenne globale  $E[f(t, \mathbf{Z})]$  de la réponse est d'abord calculée, ensuite, le paramètre  $z_i$  est fixé à sa valeur moyenne, et le vecteur des paramètres d'entrée  $\mathbf{Z}$  se réduit à  $Z_{i0}$ . L'influence du paramètre  $z_i$  est estimée par la valeur du biais entre la moyenne globale et la moyenne lorsque le paramètre est fixé à sa valeur moyenne, tel que :

$$b_{z_i} = E[f(t, \mathbf{Z})] - E[f(t, Z_{i0})] \quad (1)$$





**Figure 3.** Evolution des biais par rapport à la moyenne globale en fonction du temps pour le modèle DuraCrete appliqué au béton C45 (a), C35 (b) et C25 (c), respectivement

Les résultats sont présentés par la Figure 3 pour le modèle DuraCrete appliqué aux bétons C45, C35 et C25. Pour l'ensemble des trois bétons, on constate que le paramètre  $n$  se démarque des autres paramètres pour lesquelles les biais sont très proches voir confondus. On constate que cela est d'autant plus marqué que le béton est de mauvaise qualité. Contrairement à cela, on constate aussi une légère démarcation du paramètre  $R_{carb}$  pour le bon béton (C45). Cela est en accord avec les résultats des indicateurs précédents. La bonne qualité du béton le rend plus résistant à la pénétration du  $\text{CO}_2$  d'où une plus faible influence du paramètre de vieillissement tandis que pour les autres matériaux, c'est ce paramètre qui présente le plus d'influence sachant que le matériau lui-même est peu résistant.

### 3.4 Écart-type de la réponse

L'objectif est ici de voir l'incidence de la variabilité en entrée sur la variabilité de la réponse. Pour ce faire, on considère le paramètre étudié comme variable aléatoire, tandis que les autres paramètres sont fixés à leur valeur moyenne. Le vecteur des variables aléatoires se réduit donc à  $\mathbf{Z}_i$ . On obtient alors la réponse  $y(t, z_i)$ .

On mesure alors le poids du paramètre étudié à partir de l'écart-type de la réponse. L'influence du paramètre d'entrée  $z_i$  sera donc évaluée à l'instant  $t$  par :

$$\sigma_{z_i}(t) = \sqrt{E[(y(t, Z_i) - E[y(t, Z_i)])^2]}$$

Les résultats avec le modèle DuraCrete sont présentés dans la *Figure 4* pour les bétons C45, C35 et C25. Les résultats par rapport à l'écart-type de la réponse sont en accord avec les résultats des autres indicateurs. Le paramètre le plus influent est le facteur de vieillissement. Il est d'autant plus influent que le béton est de mauvaise qualité et que l'on avance dans le temps car les autres paramètres qui sont relatifs à la résistance à la carbonatation sont peu influents pour ces matériaux. Par rapport à la hiérarchie, les paramètres  $k_e$  et  $k_c$  dont les influences sont équivalentes viennent après  $n$ . Cependant, ils ne présentent pas le minimum d'impact sur la carbonatation puisqu'ils prennent en compte l'exposition et la qualité du béton de peau qui sont déterminants dans le démarrage et la continuité du phénomène. L'influence de ces paramètres se stabilise dans le temps.

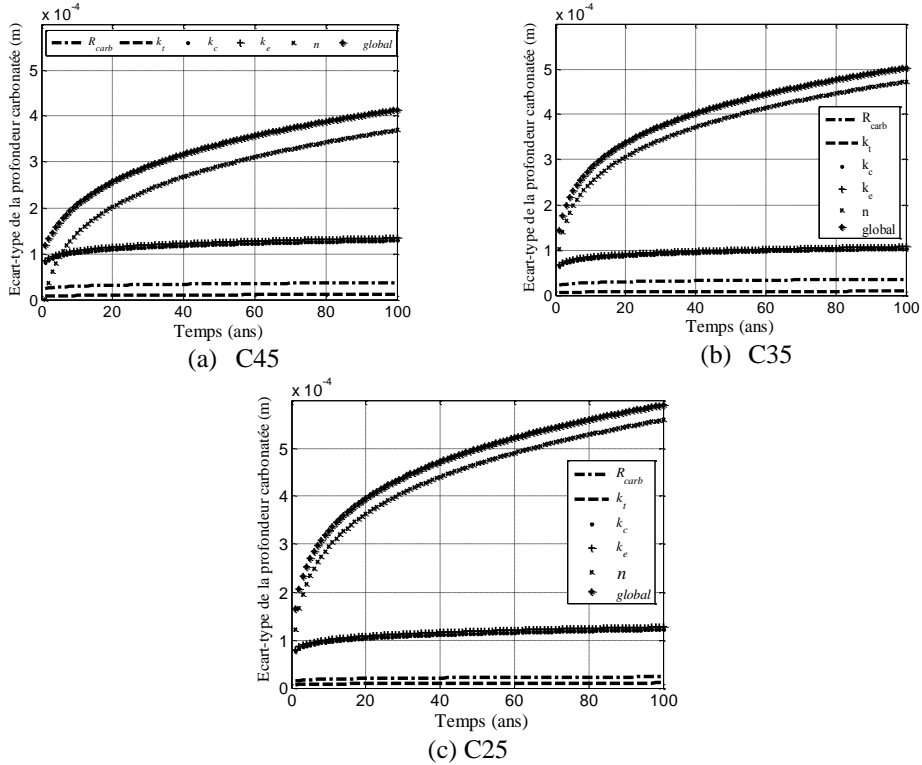
On constate très légèrement la diminution de l'influence de  $R_{carb}$  avec la diminution de la qualité du matériau puisque c'est un paramètre qui caractérise la résistance à la carbonatation du matériau. Enfin,  $k_t$  qui est un paramètre d'essai de mesure du coefficient diffusion est relativement le moins influent.

#### 4. Résultats et discussions

Le Tableau 3 présente les valeurs des paramètres d'entrées des modèles ainsi que leurs plages de variabilités. Les Tableau 4 et Tableau 5 présentent une synthèse des résultats à 50 ans pour l'ensemble des modèles recensés. L'évolution en fonction du temps n'est pas présentée car les résultats ont montré que pour l'élasticité et le coefficient de corrélation de Pearson, les valeurs sont les mêmes dans le temps. Pour les biais et écart-type de la réponse, on a constaté une croissance en fonction du temps, mais la hiérarchie d'importance des paramètres reste inchangée.

Enfin, l'échéance de 50 ans a été retenue car elle n'est pas éloignée de la durée de service cible des ouvrages en béton armé. La teneur en  $CO_2$  à la surface du béton a été maintenue constante sachant que les ouvrages étudiés sont supposés se trouver dans les conditions atmosphériques. Les paramètres relatifs à cette grandeur ( $[CO_2]$ ,  $P_{CO_2}$ ) n'apparaissent donc pas dans le tableau des résultats.

La difficulté à trouver des bases de données des paramètres d'entrée conduit à introduire la variabilité à partir de grandeurs dont des données sont disponibles.



**Figure 4.** Evolution des incidences sur l'écart-type de la réponse en fonction du temps pour le modèle DuraCrete appliqué au béton C45 (a), C35 (b) et C25 (c), respectivement

Tel est le cas de tout ce qui est teneur en hydrates ( $CSH$ ,  $CH$ ,  $Afm$ ,  $Aft$ ) ou anhydres ( $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ) ou en encore des différentes concentrations d'espèces chimiques ( $C1$ ,  $C2$ ). Pour ces paramètres, la variabilité a été introduite par le degré d'hydratation  $\alpha$  et le dosage en ciment  $c$ . Cela a contribué à réduire le nombre de variables aléatoires mais d'un autre côté, les interprétations sont plus globales, c'est à dire perdent en précisions par rapport à la description de la physicochimie. En effet, dans le processus de carbonatation, les hydrates ne sont pas carbonatés avec la même cinétique. On constate d'une manière générale que les paramètres les plus importants pour chaque modèle sont ceux relatifs au « chemin d'accès » du  $CO_2$  dans le matériau béton c'est à dire l'état général de la porosité. Trois paramètres se démarquent : l'humidité relative  $HR$  qui conditionne l'état de saturation des pores,  $k_c$  qui donne une information sur la qualité du béton de peau en tenant compte des conditions de cure, et enfin la porosité elle-même.

Ce sont ensuite les paramètres relatifs à la quantité de matériaux carbonatables qui suivent en importance. C'est à dire le degré d'hydratation et le dosage en ciment  $c$ . L'ordre d'importance entre ces deux paramètres dépend du type de matériau. L'avancée de l'hydratation réduit celle de la cinétique du front de carbonatation car

il y a d'avantage d'hydrates à carbonater à chaque profondeur atteinte. D'où prédominance de  $\alpha$  et en valeur négative par rapport à l'élasticité et le coefficient de Pearson pour ces matériaux.

L'élasticité offre une première estimation de la hiérarchie des paramètres. La variation de 10% retenue en entrée peut cependant cacher certaines tendances car cette variation n'est pas toujours réaliste pour tous les paramètres. La propagation de variabilité dans des intervalles réalistes donne une vision plus globale de la sensibilité.

Le coefficient de corrélation linéaire de Pearson permet un certain ajustement des résultats de l'élasticité. Les simulations dans des intervalles conformes aux conditions réelles mettent en évidence les tendances plus réalistes. La sensibilité par rapport au type de matériau commence à être visible. Cet indicateur n'est cependant pas adapté aux modèles présentant de fortes non linéarités par rapport à ses paramètres d'entrée. C'est le cas du modèle d'Oxand. De plus il s'agit d'une estimation statistique.

L'incidence sur la moyenne et l'écart-type de la réponse mettent mieux en évidence la sensibilité du modèle par rapport au type de matériau. En effet, la différence des résultats lorsque l'on passe d'un béton à l'autre est relativement mieux visible avec ces indicateurs. Enfin, ces deux indicateurs montrent une évolution des influences dans le temps mais sans pour autant que la hiérarchie d'importance des paramètres n'en soit perturbée. Il apparaît cependant que, parmi les indicateurs étudiés, l'écart-type de la réponse est l'indicateur qui apporte le plus d'informations sur les effets des variabilités.

## 5. Conclusion

Une homogénéisation de la notation des modèles simplifiés de carbonatation a été effectuée dans cette étude, ce qui a fait ressortir une forme générale commune. L'étude de sensibilité a révélé que les paramètres les plus influents sont ceux qui caractérisent l'état de la porosité du béton. C'est à dire  $k_c$  qui donne une information sur la qualité du béton de peau en tenant compte des conditions de cure, l'humidité relative  $HR$  à laquelle est liée le taux de saturation des pores, et enfin la porosité elle-même. C'est après que viennent l'importance des paramètres relatifs au type de matériau. La hiérarchie d'importance des paramètres est constante dans le temps. Il apparaît que l'indicateur le plus adapté pour visualiser l'effet des variabilités est l'impact sur l'écart-type de la réponse. En effet, le coefficient de Pearson est une estimation statistique et sa signification dépend de la linéarité du modèle. La moyenne et l'élasticité semblent être équivalentes, cependant l'élasticité peut être considérée comme plus importante car il s'agit d'une évaluation déterministe.

La suite de la présente étude consiste en une hiérarchisation des modèles en se basant sur ces études de sensibilités d'une part, et sur différentes combinaisons de techniques de mesure (ou d'estimation) des paramètres d'entrée d'autre part.

Paramètre	Unité	Moyenne	Coef. de var. (%)	Min.	Max.
<i>HR</i>	%	72,91	3	70,68	75,14
<i>R<sub>c</sub> - C45</i>	MPa	58	6	54,52	61,48
<i>R<sub>c</sub> - C35</i>		46,2	4	44,35	48,04
<i>R<sub>c</sub> - C25</i>		40,2	3	38,99	41,40
<i>k<sub>e</sub></i>	-	0,85	27	0,62	1,08
<i>k<sub>c</sub></i>	-	0,63	26	0,46	0,79
<i>k<sub>t</sub></i>	-	0,98	2	0,96	1,005
<i>n</i>	-	0,4	20	0,32	0,48
<i>R<sub>carb</sub> - 45</i>	10 <sup>10</sup> kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> /s)	2	7,5	1,9	2,1
<i>R<sub>carb</sub> - 35</i>		0,4	8,9	0,36	0,43
<i>R<sub>carb</sub> - 25</i>		0,28	5	0,271	0,3
<i>T</i>	K	284,04	6,7	282,55	285,53
<i>φ - C45</i>	-	0,118	5	0,112	0,124
<i>φ - C35</i>		0,127	1,6	0,124	0,129
<i>φ - C25</i>		0,14	8	0,129	0,151
<i>c - C45</i>	kg/m <sup>3</sup>	350	14	345	355
<i>c - C35</i>		350	13,6	345	355
<i>c - C25</i>		295	16	290	300
<i>α - C45</i>	-	0,81	3,9	0,778	0,842
<i>α - C35</i>		0,84	3,8	0,808	0,872
<i>α - C25</i>		0,89	0,4	0,858	0,922

Tableau 3. Valeurs des paramètres d'entrée

Béton		C45				C35				C25			
Indicateur		E	P	M	ET	E	P	M	ET	E	P	M	ET
DuraCrete	<i>R<sub>carb</sub></i>	-0,47	-0,11	1271,77	0,35	-0,47	-0,10	906,12	0,33	-0,47	-0,04	1071,85	0,22
	<i>k<sub>e</sub></i>	0,49	0,37	1292,90	1,25	0,49	0,25	917,32	1,00	0,49	0,25	1087,07	1,19
	<i>k<sub>c</sub></i>	0,49	0,35	1290,45	1,20	0,49	0,23	914,81	0,96	0,49	0,23	1084,45	1,14
	<i>k<sub>t</sub></i>	0,49	0,03	1269,20	0,11	0,49	0,03	903,86	0,08	0,49	0,02	1071,45	0,10
	<i>n</i>	-1,45	-0,84	1434,54	2,92	-2,28	-0,92	1184,48	3,96	-2,28	-0,92	1402,70	4,68
CEB	<i>R<sub>carb</sub></i>	-0,47	-0,04	0,47	0,22	-0,47	-0,66	230,99	6,06	-0,47	-0,04	0,53	0,25
	<i>k<sub>e</sub></i>	0,49	0,25	-5,05	1,20	0,49	0,15	-5,03	1,01	0,49	0,25	-5,42	1,36
	<i>k<sub>c</sub></i>	0,49	0,23	-4,82	1,15	0,49	0,16	-3,51	0,97	0,49	0,22	-6,10	1,30
	<i>n</i>	-2,28	-0,92	68,13	4,72	-2,28	-0,56	69,94	4,00	-2,28	-0,92	76,93	5,35
Oxand	<i>HR</i>	-1,76	-0,44	-103,39	5,30	-1,76	-0,92	102,05	21,05	-1,76	-0,96	-618,36	31,63
	<i>R<sub>c28</sub></i>	-11,52	-0,88	29,51	10,99	-3,24	-0,34	97,79	8,20	-2,31	-0,20	8,84	6,59
Papadakis	<i>HR</i>	-2,92	-0,78	0,58	1,67	-2,92	-0,95	0,33	1,66	-2,92	-0,68	0,47	2,49
	<i>α</i>	-0,12	-0,04	0,01	0,09	-0,14	-0,05	0,01	0,10	0,22	0,05	0,44	0,19
	<i>c</i>	-1,17	-0,16	0,23	0,33	-1,17	-0,18	0,20	0,33	-0,94	-0,14	0,38	0,47
	<i>φ</i>	1,39	0,61	-0,19	1,29	1,41	0,24	-0,03	0,42	1,19	0,72	-0,85	2,64

Tableau 4. Résultats à 50 ans pour tous les modèles avec les trois bétons C45, C35 et C25. E désigne l'élasticité, M l'incidence sur la moyenne de la réponse (10<sup>6</sup>) et ET l'incidence sur l'écart-type (10<sup>4</sup>)

Béton		C45				C35				C25			
Indicateur		E	P	M	ET	E	P	M	ET	E	P	M	ET
Miragliotta	HR	-2,92	-0,54	0,09	0,36	-2,92	-0,68	0,12	0,37	-2,92	-0,47	0,08	0,69
	$\alpha$	-0,11	-0,04	0,01	0,02	-0,13	-0,02	0,00	0,02	0,24	0,07	0,14	0,06
	$S_r$	-0,98	-0,58	-0,94	0,54	-0,98	-0,69	-1,01	0,40	-0,98	-0,49	-1,98	1,25
	$\varphi$	2,05	0,60	0,36	0,39	2,06	0,23	0,03	0,13	1,76	0,72	1,40	1,03
	c	-1,19	-0,12	0,06	0,07	-1,17	-0,12	0,04	0,07	-0,85	-0,09	0,11	0,14
Hyvert	HR	-4,29	-0,70	2,94	3,16	-4,29	-0,72	0,07	0,08	-4,29	-0,69	3,83	4,70
	T	-0,47	-0,10	0,03	0,06	-0,47	-0,05	0,00	0,00	-0,47	-0,11	0,03	0,09
	$k_c$	0,49	0,65	-11,25	2,95	0,49	0,68	-0,27	0,07	0,49	0,65	-16,92	4,39
	$\varphi$	0,68	0,17	-1,27	0,80	0,00	0,01	0,00	0,00	0,53	0,22	-2,98	1,49
	c	-1,30	-0,10	0,37	0,46	-0,66	-0,05	0,00	0,01	-1,13	-0,11	0,72	0,71
	$\alpha$	-1,20	-0,20	1,55	0,95	-0,56	-0,01	0,00	0,00	-1,05	-0,18	2,07	1,25
Ying-Yu	HR	-2,92	-0,68	0,07	0,34	-2,92	-0,63	0,08	0,35	-2,92	-0,68	0,11	0,47
	$\alpha$	-0,53	-0,15	-0,01	0,08	-0,52	-0,12	-0,01	0,08	-0,22	-0,09	0,01	0,04
	$S_r$	1,08	0,70	2,90	0,36	1,08	0,65	2,92	0,36	1,08	0,71	3,96	0,49
	$\varphi$	0,88	-0,16	-0,95	0,17	0,88	-0,38	-0,25	0,06	0,60	-0,17	-1,57	0,26
	c	-0,76	-0,08	0,01	0,04	-0,74	-0,08	0,01	0,04	-0,41	-0,06	0,01	0,04
	$M_y$	-0,91	-0,16	0,36	0,27	-0,91	-0,38	0,84	0,27	-0,91	-0,17	0,45	0,37

**Tableau 5.** Résultats à 50 ans pour tous les modèles avec les trois bétons C45, C35 et C25. E désigne l'élasticité, M l'incidence sur la moyenne de la réponse (106) et ET l'incidence sur l'écart-type (104) (suite)

## 6. Références

- [BAK 93] Bakker R., « Model to calculate the rate of carbonation in concrete under different climatic conditions », Technical report, 1993, CMLJ bvLaboratorium, Imuiden, The Netherlands.
- [CEB 97] CEB, « New approach to durability design : an example for a carbonation induced corrosion », Bulletin no 238, 1997, CEB.
- [DUR 00] DURACRETE, « DuraCrete - Final Technical Report - General Guidelines for Durability Design and Redesign », rapport no BE95-1347/R9, 2000, The European Union - BriteEuram III.
- [HYV 09] Hyvert N., « Application de l'approche probabiliste de la durabilité des produits préfabriqués en béton », Thèse de génie civil, Université de Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.
- [LEM 09] Lemaire M., « Structural Reliability », chapter Products of reliability analysis, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [MIR 00] Miragliotta R., « Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués - Prise en comptes des effets de paroi », PhD, Université de la Rochelle, 2000.
- [PAP 91] Papadakis V., Vayenas C., Fardis M., « Fundamental modelling and experimental investigation of concrete carbonation », ACI Materials Journal, vol. 4, no 88, 1991, p. 363-373.
- [PET 01] Petre-Lazar I., « Evaluation du comportement en service des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion des aciers », Thèse de génie civil, Université Laval, Québec, 2001.
- [YIN 87] Ying-Yu L., Qui-Dong W., « The mechanism of carbonation of mortars and the dependence of carbonation on pore structure », ACI-SP 100, Concrete Durability, 1987, p. 1915-1943.