



HAL
open science

Méthodologie de sélection de modèles simplifiés de carbonatation du béton pour la maintenance des ouvrages

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

► **To cite this version:**

Ndrianary Rakotovao Ravahatra, Frederic Duprat, Thomas de Larrard, Emilio Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs. Méthodologie de sélection de modèles simplifiés de carbonatation du béton pour la maintenance des ouvrages. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. ⟨hal-01167692⟩

HAL Id: hal-01167692

<https://hal.science/hal-01167692v1>

Submitted on 24 Jun 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.



HAL Authorization

Méthodologie de sélection de modèles simplifiés de carbonatation pour la maintenance des ouvrages

N. Rakotovao^{1,2}, T. De Larrard¹, F. Duprat¹, E. Bastidas-Arteaga², F. Schoefs²

¹ Université de Toulouse, INSA, LMDC UPS-INSA, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex 4

² Université de Nantes, GeM, UMR CNRS 6183, 2 rue de la Houssinière, 44322 Nantes Cedex 3

RÉSUMÉ. La présente étude entre dans le cadre du projet ANR-EvaDéOS dont l'objectif est de fournir aux gestionnaires d'ouvrages en béton une stratégie de maintenance préventive vis-à-vis de la corrosion des armatures, en tenant compte des aspects physico-chimiques, ainsi que des contraintes et moyens techniques et financiers des gestionnaires. L'utilisation de modèles prédictifs est donc indispensable. Il est nécessaire d'orienter le gestionnaire d'ouvrage sur le choix du modèle le plus approprié pour sa structure compte tenu de ses moyens et de ses contraintes de gestion. La sélection d'un modèle se fait non seulement sur sa qualité de prévision, qui constitue le bénéfice tiré de son utilisation, mais aussi sur la possibilité d'en obtenir aisément les paramètres d'entrée, c'est-à-dire sur les moyens qu'il faut mettre en œuvre pour obtenir chaque paramètre, qui contribuent à son coût. La méthodologie proposée est ainsi construite sur un schéma global coût/bénéfice. Deux cas d'ouvrages ont été analysés dans ce travail, et les résultats mettent en évidence l'influence de la disponibilité des données, du type de structure, mais aussi des moyens envisagés pour l'obtention des données.

ABSTRACT. This study is part of the ANR-EvaDeOS project whose objective is to provide building managers with a preventive maintenance strategy against the corrosion of steel reinforcement, by taking into account the physical and chemical aspects as well as technical and financial resources. The use of predictive models is essential. It is necessary to guide the manager on the choice of the most appropriate model given management constraints. The selection of a model is not only based on its predictive performance, which is the profit from its use, but also the possibility to easily obtain the input parameters, that is to say, the means that it must be implemented for each parameter, which contribute to its cost. The proposed methodology is thus built on a global cost / benefit approach. The cases of two existing structures were analyzed in this work, and the results show the influence of the availability of data, the structure type, but also the means envisaged to acquire the data.

MOTS-CLÉS : Incertitudes, Modèles simplifiés, Hiérarchisation, Carbonatation, Béton armé.

KEY WORDS : Uncertainty, Simplified models, Ordering, Carbonation, Reinforced concrete,

1. Introduction

Un des objectifs du projet ANR-EvaDéOS (EVALuation non destructive des ouvrages pour la prévision des Dégradations et l'Optimisation de leur Suivi), dans le cadre duquel a été menée la présente étude, est d'aider le gestionnaire d'ouvrage à sélectionner le modèle prévisionnel de dégradation le plus approprié à ses moyens, à ses contraintes et aux données dont il dispose. Il convient par ailleurs d'intégrer à la démarche les incertitudes inhérentes aux données.

La sélection d'un modèle se fait non seulement sur sa qualité de prévision, qui constitue le principal bénéfice tiré de son utilisation, mais aussi sur la possibilité d'en obtenir aisément les paramètres d'entrée, c'est-à-dire sur les moyens qu'il faut mettre en œuvre pour obtenir chaque paramètre et qui contribuent au coût d'utilisation du modèle. La méthodologie proposée est ainsi construite sur un schéma global coût/bénéfice. La notion de coût d'obtention d'un paramètre, introduite dans la méthodologie, traduit ici une quantification de la difficulté d'obtention du paramètre et non un coût financier. Le coût d'un modèle est alors déduit des coûts d'obtention de ses paramètres d'entrée. Plus l'estimation d'un paramètre est complexe, du fait du nombre d'étapes nécessaires dans le calcul ou dans l'investigation expérimentale, plus son coût est élevé. Parallèlement, la robustesse d'obtention du paramètre est réduite, et on imagine facilement qu'un risque d'estimation erronée peut découler d'une trop grande complexité dans les étapes à suivre. On peut attendre en revanche que la prévision du modèle soit améliorée par une estimation détaillée de ses paramètres. Le gain apporté par l'estimation des paramètres dans la qualité de prévision du modèle peut ainsi se traduire en termes de bénéfice à son utilisation.

Deux cas d'ouvrage ont été étudiés dans ce travail. Pour le premier, un document d'ouvrage complet est disponible, ce qui réduit les moyens à mettre en œuvre pour l'obtention des paramètres, et pour le second le document d'ouvrage est très peu renseigné. Les résultats obtenus montrent comment la disponibilité d'informations influe sur la sélection du modèle potentiellement le plus efficient.

2. Modèles et analyse de sensibilité

Parmi les modèles de carbonatation du béton existants, relativement nombreux dans la littérature, les modèles simplifiés ont été retenus dans le cadre de cette étude. Ces modèles sont couramment utilisés en pratique quotidienne d'ingénierie, et plus susceptibles d'être employés par le gestionnaire d'ouvrage. Ce dernier n'est en effet pas forcément en capacité, de part sa formation, sa disponibilité et/ou les moyens dont il dispose, de mettre en œuvre des modèles nécessitant des approches numériques comme la méthode des éléments finis. Une revue des modèles simplifiés de carbonatation est proposée dans [RAK 15], modèles utilisés dans le présent travail, à savoir :

- Le modèle de Papadakis (Pa) [PAP 91] ;
- Le modèle de Ying-Yu (Yi) [YIN 87] ;
- Le modèle DuraCrete (Du) [DUR 00] ;
- Le modèle CEB (CE) [CEB 00] ;
- Le modèle de Miragliotta (Mi) [MIR 00] ;
- Le modèle d'Oxand (Ox) [PET 01] ;
- Le modèle de Hyvert (Hy) [HYV 09].

Parallèlement une analyse de sensibilité des modèles vis-à-vis de leurs paramètres d'entrée a été conduite afin de mieux appréhender les effets des incertitudes qui les affectent sur la prévision de ces modèles. L'analyse est basée sur les indicateurs suivants :

- Le coefficient d'élasticité (variation relative de la réponse du modèle rapportée à la variation relative d'un paramètre d'entrée) ;
- Le coefficient de Pearson (corrélation linéaire entre la réponse du modèle et un paramètre d'entrée lorsqu'il varie aléatoirement) ;
- Le facteur de biais (variation, lorsque les paramètres sont fixés un par un à leur valeur moyenne, de la moyenne de la réponse du modèle par rapport à la valeur moyenne obtenue lorsque tous les paramètres varient aléatoirement) ;

- L'écart-type de la réponse du modèle, lorsque les paramètres varient aléatoirement un par un.

3. Ouvrages étudiés

Dans le domaine de la maintenance préventive nécessitant l'utilisation de modèles prédictifs, le gestionnaire d'ouvrage doit être renseigné sur le coût d'obtention des paramètres d'entrée des modèles, mais aussi sur la qualité des informations fournies par le modèle une fois les paramètres obtenus. La hiérarchisation proposée dans ce travail est dépendante de la structure étudiée et des données disponibles. Deux ouvrages étudiés dans le cadre du projet ANR-EVADEOS sont analysés dans ce travail. Les deux structures sont exposées aux mêmes conditions environnementales mais les informations disponibles pour chacune d'elle ne sont pas les mêmes. Un dossier d'ouvrage complet est disponible pour la structure A, tandis que ce dossier contient très peu d'information pour l'ouvrage B. Ces cas d'ouvrages sont assez représentatifs de la situation des ouvrages réels. Les dossiers d'ouvrages sont présentés dans le Tableau 1. Les modèles de carbonatation sont sensibles aux propriétés de transfert des bétons. Ainsi trois types de béton ont été supposés constitutifs des ouvrages, de classe respective C45, C35 et C25.

Tableau 1 Documents d'ouvrage pour la structure A et B

Données	Dossier d'ouvrage	
	Structure A	Structure B
<i>Ouvrage</i>		
Date de construction	Renseignée	Renseignée
Plan de l'ouvrage	Disponible	Disponible
Plan de ferrailage	Disponible	Disponible
Note de calcul	Disponible	Non disponible
<i>Béton</i>		
Type de béton	Renseigné	Renseigné
Proportion des granulats	Renseignée	Non renseignée
Teneur en ciment	Renseignée	Non renseignée
<i>e/c</i>	Renseigné	Non renseigné
Durée de cure (k_c)	Renseigné	Non renseigné
R_c	Renseigné avec rapport d'essai de conformité	Renseigné
<i>Ciment</i>		
Type	Renseigné	Non renseigné
Composition	Détaillée (Fiche technique)	Non renseignée

4. Coût d'un paramètre et coût des modèles

Lorsqu'un paramètre d'entrée de modèle n'est pas directement fourni comme information disponible dans le dossier d'ouvrage, il convient de l'estimer. L'estimation d'un paramètre d'entrée peut alors relever soit d'un avis d'expert, soit d'une inspection sur ouvrage. L'avis d'expert consiste à utiliser les informations disponibles pour en déduire le paramètre d'entrée par calcul, à l'aide éventuellement de modèles complémentaires, par raisonnement et/ou par comparaison à une situation similaire connue. L'estimation par inspection sur ouvrage se base sur des mesures de propriétés physiques du matériau, obtenues par contrôle non destructif ou après extraction d'éprouvettes de l'ouvrage. Ces propriétés permettent ensuite d'estimer le paramètre d'entrée recherché. Un niveau de complexité peut donc être associé à chaque type d'estimation selon le nombre et la difficulté des étapes suivies pour l'obtention d'un paramètre. Les niveaux de complexité sont proposés dans le Tableau 2.

Le coût d'un paramètre est ici une quantification de l'investissement non pécuniaire nécessaire à son obtention : investissement intellectuel, investissement en temps. Ainsi, le coût d'un paramètre donné dépend du niveau de complexité associé à son obtention. Il est supposé que le coût par inspection est plus élevé que celui d'un avis d'expert pour le même niveau de complexité. L'estimation d'un paramètre est aussi caractérisée par sa précision (dispersion possible autour de l'estimation) et sa robustesse (sensibilité de l'estimation aux écarts

possibles résultant du processus d'obtention). La précision et la robustesse subissent généralement une tendance opposée avec le niveau de complexité : un processus d'obtention complexe apporte de la précision, mais également un risque de perte de robustesse. Le Tableau 3 présente la valeur des coûts, du niveau de précision, et du niveau de risque par rapport à la perte de robustesse selon le type d'estimation d'un paramètre. Lors d'une estimation par inspection on peut considérer que la variation de coût avec le niveau de complexité est plus importante que si une estimation par avis d'expert est menée. Le niveau de précision est le même pour une estimation par avis d'expert pour un niveau de complexité 4, et une estimation par inspection pour un niveau de complexité 1. Cela illustre le fait qu'une estimation par inspection offre un meilleur résultat qu'une estimation par avis d'expert.

Tableau 2 Niveaux de complexité pour l'estimation des paramètres d'entrée des modèles

Niveau de complexité	Paramètre obtenu par	
	Avis d'expert	Inspection
1	Disponible dans le dossier d'ouvrage ou supposable facilement.	Donnée déjà disponible par ailleurs (ex : données météo)
2	Indisponible dans le dossier d'ouvrage, utilisation de relations empiriques impliquant des paramètres de niveau 1, niveau d'expertise moyen.	Utilisation de contrôles destructifs ou non destructifs quasi-directs.
3	Indisponible dans le dossier d'ouvrage, utilisation de modèles simplifiés impliquant des paramètres de niveau 1 ou 2, investissement bibliographique, bon niveau d'expertise.	Utilisation de contrôles destructifs ou non destructifs indirects (par exemple fusion de données), de modèles d'inversion
4	Indisponible dans le dossier d'ouvrage, utilisation de modèles physiques impliquant des paramètres de niveau 1, 2 ou 3, important investissement bibliographique, niveau d'expertise élevé.	Utilisation de contrôles destructifs uniquement, essais complexes et/ou multiples, exploitation par modèles

Tableau 3 Coût (C), niveau de précision (P), et niveau de risque de perte de robustesse (NPR)

Niveau de complexité	Paramètre obtenu par					
	Avis d'expert			Inspection		
	C	P	NPR	C	P	NPR
1	1	1	1	2	4	1
2	2	2	2	4	6	2
3	4	3	3	8	8	3
4	8	4	4	16	10	4

Les paramètres d'entrée des différents modèles simplifiés de carbonatation collectés dans cette étude sont portés dans Tableau .

Tableau 4 Paramètres d'entrée des modèles simplifiés

Paramètres	Pa	Yi	Du	CE	Mi	Ox	Hy
R_{carb} : résistance à la carbonatation			×	×			
k_c : facteur de cure			×	×			×
k_t : facteur de test			×				
n : exposant de vieillissement			×	×			
HR : humidité relative	×	×	×	×	×	×	×
R_c : résistance en compression						×	
α : degré d'hydratation	×	×			×		×
S_r : taux de saturation		×			×		
ϕ : porosité	×	×		×	×		×
ρ : densité		×					
T : température							×
c : quantité de ciment	×	×		×	×		×

Le Tableau 5 présente valeurs des coûts, du niveau de précision et du niveau de risque par rapport à la perte de robustesse pour les paramètres d'entrée des modèles.

Le coût C_M d'un modèle est égal à la somme des coûts de ses N_p paramètres d'entrée :

$$C_M = \sum_{N_p} C_i \quad [1]$$

Diverses hypothèses peuvent être envisagées pour l'obtention des paramètres d'entrée. Sous l'hypothèse H_k , les paramètres de niveau de complexité supérieur à k sont estimés par avis d'expert, tandis que ceux de niveau de complexité inférieur sont estimés par inspection, lorsqu'ils peuvent l'être (Tableau).

En guise d'exemple, le coût de chaque modèle collecté dans ce travail selon chaque hypothèse est présenté dans la Figure 1 et pour la structure A et B. On constate sans surprise que le coût de chaque modèle augmente avec le nombre de paramètres inspectés pour les deux structures. D'autre part, lorsque peu de paramètres peuvent être obtenus par inspection, le coût reste limité, comme dans le cas du modèle CEB pour la structure A, alors que le coût est accru pour les modèles présentant un nombre élevé de paramètres mesurables tel que le modèle de Ying-Yu. Lorsque le coût n'augmente pas lors du passage de l'hypothèse H_{k-1} à l'hypothèse H_k , cela signifie que tous les paramètres du modèle estimables par inspection ont déjà été estimés sous l'hypothèse H_{k-1} . Les modèles CEB et DuraCrete ne sont pas utilisables dans le cas de la structure B car certains paramètres ne sont pas connus sans document d'ouvrage complet, sans pouvoir par ailleurs être déduits de mesures.

Tableau 5 Coût, précision et niveau de risque de perte de robustesse pour les paramètres d'entrée des modèles simplifiés de carbonatation

Para- mètre	Structure A						Structure B					
	Avis d'expert			Inspection			Avis d'expert			Inspection		
	C	P	NPR	C	P	NPR	C	P	NPR	C	P	NPR
R_{carb}	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
k_c	2	2	2	-	-	-	8	4	4	-	-	-
k_t	2	2	2	4	6	2	-	-	-	4	6	2
n	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HR	1	1	1	2	4	1	1	1	1	2	4	1
R_c	1	1	1	4	6	2	1	1	1	4	6	2
α	2	2	2	16	10	4	8	4	4	16	10	4
S_r	3	3	3	8	8	3	8	4	4	8	8	3
ϕ	2	2	2	8	8	3	4	3	3	8	8	3
ρ	2	2	2	8	8	3	4	4	4	8	8	3
T	1	1	1	2	4	1	1	1	1	2	4	1
c	1	1	1	16	10	4	8	4	4	16	10	4

Tableau 6 Hypothèses pour l'obtention des paramètres d'entrée

Hypothèses	Niveau de complexité (voir Tableau 2)			
	1	2	3	4
H1	Avis d'expert	Avis d'expert	Avis d'expert	Avis d'expert
H2	Inspection	Avis d'expert	Avis d'expert	Avis d'expert
H3	Inspection	Inspection	Avis d'expert	Avis d'expert
H4	Inspection	Inspection	Inspection	Avis d'expert
H5	Inspection	Inspection	Inspection	Inspection

5. Efficacités des modèles : approche coût-bénéfice

5.1. Pondération des indicateurs de sensibilité

Il est à rappeler qu'en amont de cette étude, une analyse de sensibilité a été effectuée pour quantifier l'importance relative de chaque paramètre pour tous les modèles. Les résultats sont présentés dans [RAK 15]. Les indicateurs de sensibilité utilisés n'apportent pas le même niveau d'information :

- Le coefficient de corrélation de Pearson présente une faible contribution car il reflète la dépendance statistique linéaire et sa pertinence est donc liée à la linéarité du modèle ;
- Le coefficient d'élasticité et le facteur de biais contribuent de manière équivalente, mais il convient toutefois d'accorder davantage d'importance au coefficient d'élasticité qui rend compte de l'effet direct sur la réponse du modèle à la perturbation d'un paramètre d'entrée;

- L'écart-type traduit le plus visiblement l'effet de la variabilité d'un paramètre d'entrée sur la variabilité de la réponse du modèle, c'est donc ce dernier indicateur qui bénéficie de la plus forte pondération.

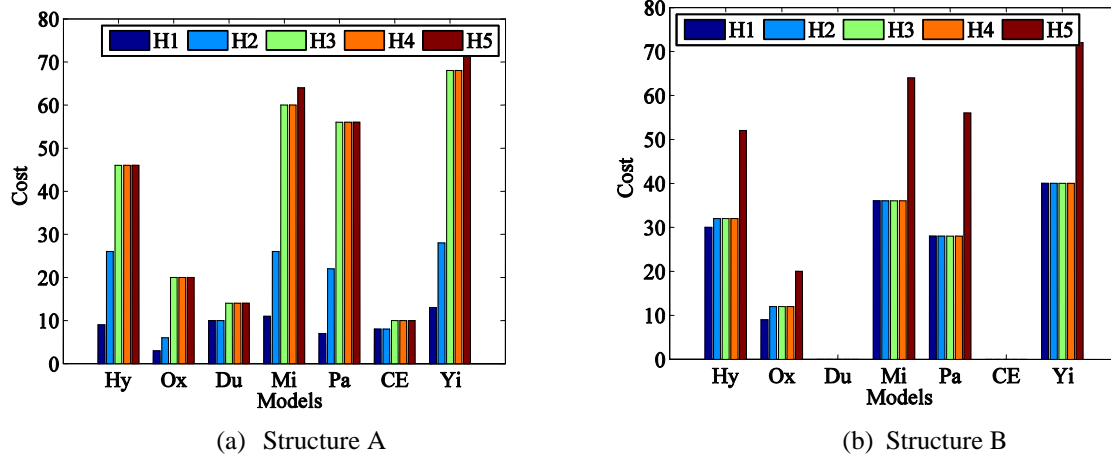


Figure 1 Coût des modèles selon des différentes hypothèses

Les pondérations présentées dans le Tableau tiennent compte des rôles respectifs des indicateurs.

Tableau 7 Pondération des indicateurs de sensibilité

Indicateur (S)	Pondération (ω_S)
Coefficient d'élasticité	0,3
Coefficient de Pearson	0,1
Facteur de biais	0,2
Ecart-type	0,4

Les quatre indicateurs sont utilisés simultanément pour quantifier le facteur d'importance d'un paramètre pour un modèle donné. Dans un premier temps, il est proposé d'attribuer une note $N_{S,i}$ à chacun des paramètres i du modèle considéré par rapport à chaque indicateur S :

$$N_{S,i} = \frac{|S_i|}{\sum_{N_p} |S_j|} \quad [2]$$

Le facteur d'importance du paramètre est alors la somme pondérée de ses notes par rapport à tous les indicateurs utilisés :

$$F_i = \sum_{N_S} N_{S,i} \omega_S \quad [3]$$

5.2. Hiérarchisation

L'obtention des paramètres, quel que soit le type d'estimation considéré, constitue un gain dans l'utilisation d'un modèle donné. Ce gain est lié à la précision d'obtention du paramètre mais également au risque de perte de robustesse associé au processus d'obtention. Ainsi, la détermination du gain apporté par l'obtention d'un paramètre s'exprime par :

$$G_i = \frac{P_i}{NPR_i} \quad [4]$$

Le bénéfice associé à l'utilisation d'un modèle résulte alors du gain apporté par l'obtention des paramètres, ainsi que de l'importance qu'ils présentent dans la réponse du modèle :

$$B_M = \sum_{N_p} F_i G_i \quad [5]$$

La Figure 2 présente les bénéfices selon chaque hypothèse pour chaque modèle et chaque structure. Les modèles DuraCrete et CEB ne peuvent pas être utilisés pour la structure B car certains de leurs paramètres d'entrée (R_{carb} , n) requièrent des informations disponibles seulement dans un dossier d'ouvrage complet. On constate que le bénéfice augmente lorsque le nombre de paramètres estimés par inspection augmente, en particulier lors du passage de H1 à H2. Cependant, de H2 à H5 le changement est insignifiant. La perte de robustesse simultanée au gain de précision, lorsque les paramètres de niveau de complexité 2 à 4 sont estimés, est la raison de cette stagnation du bénéfice. Il s'agit d'une situation à la fois confortable, dans la mesure où l'on peut a priori se contenter d'un investissement expérimental relativement limité, mais également questionnable car il serait souhaitable qu'un investissement plus important se traduise par un meilleur bénéfice d'utilisation d'un modèle.

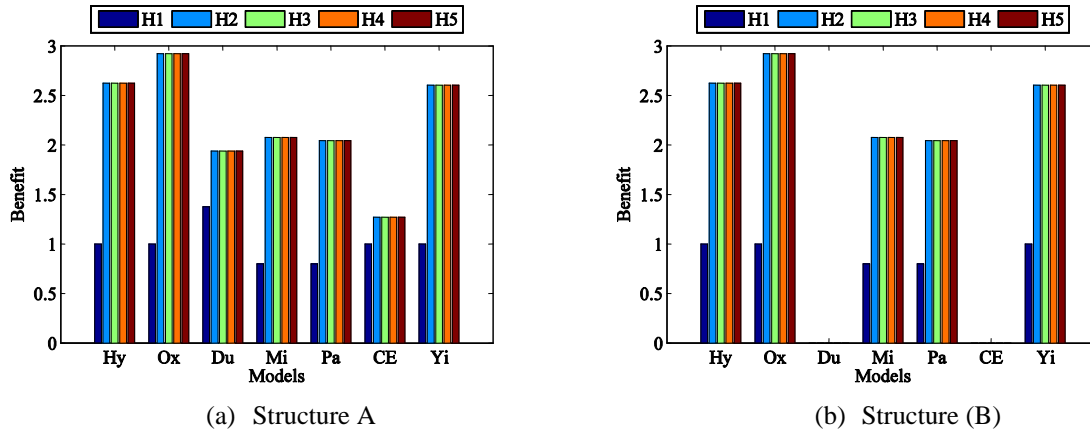


Figure 2 Bénéfice de chaque modèle pour chaque hypothèse

Pour apporter une réponse quantifiée à ce questionnement, nous proposons d'établir l'efficacité d'un modèle comme le rapport du surplus de bénéfice ΔB_M à l'écart de coût ΔC_M , lorsque l'on passe de l'hypothèse H1 à H5 :

$$E_M = \frac{\Delta B_M}{\Delta C_M} \quad [6]$$

L'efficacité traduit ainsi l'intérêt pour le gestionnaire d'investir davantage dans l'estimation des paramètres d'entrée d'un modèle eu égard au coût que cela engendre et compte tenu des incertitudes associées au processus d'obtention des paramètres, puisque l'efficacité intègre le risque de perte de robustesse. L'efficacité apparaît ainsi comme un moyen rationnel pour le gestionnaire de hiérarchiser les modèles, avant même d'avoir recours à leur utilisation.

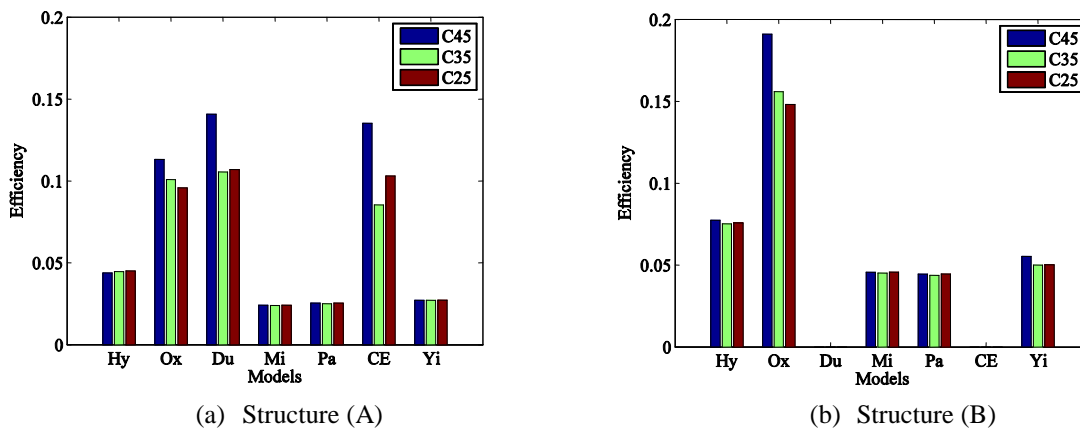


Figure 3 Efficacités de chaque modèle appliqué au béton C45, C35 et C25

Sur la Figure 3 est portée l'efficacité de chaque modèle pour la structure A et B et pour les bétons C45, C35 et C25. Pour la structure A, les modèles DuraCrete et CEB sont les plus efficaces et apparaissent alors comme étant les plus appropriés. En effet les paramètres d'entrée de ces modèles sont obtenus à partir du document d'ouvrage, lequel est riche pour la structure A. La hiérarchisation des modèles est la même pour tous les bétons.

On constate cependant que la valeur de l'efficacité est différente pour chaque matériau. Cela est dû à la différence de sensibilité de la réponse des modèles à l'égard des paramètres d'entrée lorsque l'on passe d'un matériau à l'autre.

Par rapport à la structure B, le modèle d'Oxand apparaît comme le plus approprié pour la stratégie de maintenance pour cette structure. Pour les modèles DuraCrete et CEB, l'efficacité ne peut être calculée car certains de leur paramètre d'entrée ($R_{carb, n}$) ne peuvent être estimés sans un document d'ouvrage complet. Pour les autres modèles, la valeur de l'efficacité pour la structure B est plus élevée que pour la structure A. Cela peut être attribué au fait que le bénéfice obtenu dans une estimation par avis d'expert pour un document d'ouvrage pauvre (hypothèse H2 pour la structure B) est faible. Ainsi l'efficacité de ces modèles lorsque l'on passe de H1 à H5 est élevée.

6. Conclusion

La sélection d'un modèle prévisionnel simplifié de carbonatation pour le gestionnaire d'ouvrage résulte de la combinaison de plusieurs critères : la qualité de la prévision, le coût d'obtention des paramètres d'entrée, l'incidence de l'incertitude des paramètres d'entrée sur la prévision et la robustesse du processus d'obtention des paramètres d'entrée. Par ailleurs, dans l'estimation des paramètres d'entrées, deux approches peuvent être considérées : l'estimation par avis d'expert, où les informations disponibles sont utilisées sans procéder à la production de nouvelles données, notamment expérimentales, et l'estimation par inspection sur ouvrage où une investigation expérimentale procure de nouvelles données servant à déterminer les paramètres d'entrées. La démarche déployée dans cette étude consiste à combiner les critères mentionnés ci-dessus par le calcul de l'efficacité des modèles, livrant la variation du bénéfice d'utilisation d'un modèle rapportée à la variation de son coût, lorsque l'estimation par inspection s'impose graduellement pour tous les paramètres pouvant être déduits de l'investigation expérimentale, devant l'estimation par avis d'expert. Selon que le gestionnaire dispose ou non d'informations préalables dans le dossier d'ouvrage, le modèle le plus efficace est différent. De même, il apparaît que le type de béton constitutif de l'ouvrage peut infléchir l'efficacité des modèles, du fait de leur sensibilité variable aux paramètres matériaux. Le complément naturel de la présente étude est l'étude de la capacité réelle de prévision des modèles, notamment sous l'effet d'une actualisation des paramètres d'entrée, qui est aussi l'objet des travaux du projet ANR-EvaDéOS.

7. Bibliographie

- [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 n° BE95-1347/R9, 2000, The European Union - BriteEuram III.
- [HYV] 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.
- [MIR 00] MIRAGLIOTTA R., « Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués - Prise en compte 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.
- [RAK 15] RAKOTOVAO N., DE LARRARD T., DUPRAT F., BASTIDAS-ARTEAGA E., SCHOEFS F. A methodology for selecting simplified concrete carbonation models based on sensitivity analysis and data availability », *Engineering Structures*, Under review.
- [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.