



HAL
open science

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

Thomas de Larrard, Frederic Duprat, E Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs

► To cite this version:

Thomas de Larrard, Frederic Duprat, E Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs. Carbonatation sous température variable: effet du réchauffement climatique sur la fiabilité des structures en Béton Armé. 8^{èmes} Journées Fiabilité des Matériaux et des Structures, Apr 2014, Aix-en-Provence, France. hal-01100765

HAL Id: hal-01100765

<https://hal.science/hal-01100765v1>

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.

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

T. de Larrard¹, F. Duprat¹, E. Bastidas-Arteaga², F. Schoefs²

¹ Université de Toulouse III, LMDC UPS-INSA (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions). mail : thomas.de-larrard@insa-toulouse.fr

² LUNAM Université, Université de Nantes – Ecole Centrale de Nantes, GeM.

RÉSUMÉ. Cette étude a pour objectif de quantifier l'impact du réchauffement climatique sur la durabilité des structures en béton armé exposées à un risque de corrosion des armatures initiée par la carbonatation du matériau cimentaire. Différents scénarii d'évolution du climat sont envisagés, pour quelques villes françaises, et la comparaison entre eux se fait sur la base de l'indice de fiabilité d'une même structure soumise à ces scénarii. La détermination de l'indice de fiabilité requiert la mise en œuvre de méthodes probabilistes nécessitant de nombreux appels à un code de simulation numérique, d'où le besoin de développer un outil numérique adapté. A la lumière de cette étude il apparaît que le scénario de réchauffement climatique (évolution du CO₂, de l'humidité et de la température) a un impact significatif sur la sûreté de l'ouvrage.

ABSTRACT. This study aims at quantifying the effect of global warming on the durability of concrete structures exposed to a risk of corrosion induced by carbonation. Various climate evolution scenarios being available, the purpose is to develop a numerical model for carbonation under variable conditions of temperature, relative humidity and CO₂ pressure, suitable for probabilistic approach, so that the scenarios can be compared through the reliability index of a concrete structure exposed to atmospheric carbonation in several cities in France, and following different global warming scenarios. It appears that global warming and global evolution of relative humidity have a significant impact on structural safety.

MOTS-CLÉS : carbonatation, béton armé, réchauffement climatique, indice de fiabilité.

KEY WORDS: carbonation, reinforced concrete, global warming, reliability index.

1. Introduction

La conception des structures du génie civil repose sur des procédures et des modèles intégrant le chargement, les propriétés des matériaux, la géométrie, l'exposition à un environnement agressif, etc. Une incertitude affecte de manière aléatoire les paramètres régissant la conception des ouvrages, de sorte que les approches probabilistes permettent d'évaluer le risque structural et la fiabilité des ouvrages dans la mesure où elles intègrent une représentation probabilisée des variables. Une des mesures les plus couramment répandues de la fiabilité structurale est l'indice de fiabilité de Hasofer-Lind, noté β (Hasofer & Lind 1971). Cet indice est défini dans l'espace normalisé de variables gaussiennes centrées réduites et indépendantes ; l'indice est la distance minimale entre l'origine du repère et la surface de défaillance, définissant ainsi le point de fonctionnement P^* . Le but de cette étude est d'exploiter l'indice de fiabilité pour comparer et quantifier les effets des différents scénarii de réchauffement climatique sur la fiabilité des structures en béton armé exposées à un risque de carbonatation. La carbonatation est une évolution chimique des matériaux cimentaires, induite par le transfert réactif du CO_2 dans le milieu poreux. En effet, le dioxyde de carbone atmosphérique réagit avec les hydrates du ciment, dissout la portlandite et forme de la calcite. La principale conséquence dommageable de ce processus chimique est la diminution significative du pH de la solution interstitielle, et la dépassivation des aciers d'armatures, rendant possible leur corrosion. La cinétique de cette dégradation dépend de la température, de la pression partielle de CO_2 atmosphérique et de l'humidité relative, tous paramètres dépendant du temps et indexés aux évolutions climatiques. Pour entreprendre une approche probabiliste, il a donc fallu développer un modèle éléments finis (EF) adapté de carbonatation, tenant compte des variations de température et des variations climatiques. Le modèle est présenté brièvement dans cet article et a été exploité pour calculer un indice de fiabilité pour plusieurs scénarii climatiques.

2. Effets du réchauffement climatique

Sur la base des évolutions récentes, plusieurs études ont estimé que la concentration atmosphérique de CO_2 pourrait augmenter de 379 ppm en 2005 à plus de 1000 ppm aux alentours de 2100 (IPCC 2007). Ainsi, la gestion sur le long terme des structures BA (Béton Armé) devrait intégrer cette augmentation de la concentration en CO_2 et du réchauffement climatique de manière plus globale. Cette augmentation est complexe à estimer parce qu'elle dépend de nombreux facteurs technologiques, sociaux et politiques. Ces facteurs ont été pris en compte par l'International Panel on Climate Change (IPCC 2007) qui a défini quatre familles de scénarii de réchauffement climatique (A1, A2, B1 et B2). Ces scénarii correspondent à des évolutions de croissance démographique, de développement économique, de basculement vers des énergies propres, etc. Le scénario A1 décrit un monde avec une croissance économique très importante, une population qui augmente significativement jusqu'au milieu du siècle avant de décroître, et

l'apparition rapide de nouvelles technologies à rendement optimisé. Cette famille de scénarii est elle-même divisée en 3 groupes selon la nature des énergies utilisées : des énergies fossiles (A1F1), des énergies non-fossiles (A1T) ou un équilibre entre les deux (A1B). Le scénario A2 décrit un monde hétérogène avec une augmentation constante de la population. Le développement économique y est divers selon les régions du monde et locales, et les évolutions technologiques sont plus lentes et inégales. Le scénario B1 est analogue au scénario A1 en ce qui concerne les évolutions démographiques, mais avec une évolution rapide des structures économiques orientées vers les services et l'information, une réduction de la production de matériaux et l'apparition d'énergies propres et efficaces. Le scénario B2 décrit un monde avec des développements locaux des infrastructures économiques et sociales, avec une croissance raisonnée de la population et une variété des évolutions technologiques. Les projections à partir de 2000 de la concentration de CO₂ dans l'air pour les scénarii A1B, A2 et B1 ont été simulées grâce au logiciel MAGICC (Model for Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change) (Wigley et al. 1996). Parmi ceux-ci, le scénario A2 est donc le plus pessimiste quant à la production de CO₂. L'effet du réchauffement climatique dépend des caractéristiques géographiques et météorologiques de l'endroit considéré pour l'étude. Ce travail concentre particulièrement l'étude sur les villes françaises de Nantes et de Toulouse. Nantes est située à 50 km de la côte Atlantique, avec un climat océanique tempéré, caractérisé par des hivers peu rigoureux et pluvieux et des étés doux. Toulouse est une ville du sud de la France avec un climat sous influences continentales, océaniques et méditerranéennes : étés très chauds et secs, automnes ensoleillés, hivers cléments et printemps pluvieux. Les évolutions climatiques à Nantes et Toulouse ont été estimées à partir des données simulées par le modèle ARPEGE V4 CERFACS (Déqué et al. 1994). Globalement la tendance est à une augmentation de la température et une diminution de l'humidité. Des résultats supplémentaires seront présentés dans la dernière partie de cet article sur les villes de Paris (climat continental intermédiaire), Marseille (climat méditerranéen chaud et sec), Strasbourg (climat continental « nordique ») et Clermont-Ferrand (dans les montagnes du Massif Central). Les principales évolutions climatiques sont synthétisées dans la Tableau 1.

	Mar	Par	Tou	Str	Cle	Nan
T	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	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

Tableau 1. Température et Humidité Relative moyennes entre 2001 et 2010 (en °C et % respectivement) et variation moyenne de ces quantités entre 2001 et 2100 selon les différents scénarii pour les villes de Marseille, Paris, Toulouse, Strasbourg, Clermont-Fd et Nantes.

3. Modélisation du séchage et de la carbonatation

3.1. Equations de conservation de la masse et simulations Eléments Finis

Nous présentons brièvement dans cette section le modèle développé pour décrire les phénomènes couplés de séchage et de carbonatation dans le béton, qui est une version simplifiée du modèle initialement proposé par Bary & Sellier (2004). Cette version est détaillée dans de Larrard et al. (2013). Ce modèle repose sur l'hypothèse que les principaux phénomènes régissant la carbonatation sont la migration de l'eau à travers la porosité connectée et la diffusion du CO₂ sous forme gazeuse, ainsi que ses interactions avec les phases hydratées initialement présentes dans le matériau pour former de la calcite. En conséquence, le processus chimique est décrit par deux équations de conservation de la masse couplées, l'une écrite pour l'eau et l'autre pour le dioxyde de carbone. Ces équations s'appuient notamment sur les relations de van Genuchten (1980), faisant apparaître un paramètre m décrivant les isothermes de désorption. On y fait également apparaître notamment la perméabilité intrinsèque du matériau K , et la porosité ϕ . Parmi les paramètres influents de la modélisation du transfert réactif du CO₂ se trouve le coefficient de diffusion en phase gazeuse ; la cinétique de diffusion est pondérée par un coefficient de réduction fonction de la saturation des pores. Le couplage entre ces équations apparaît à travers le degré de saturation et à travers les termes sources de formation d'eau (l'eau libérée par les hydrates lors de leur dissolution), et de dissolution du CO₂ pour la formation de la calcite. Ces deux termes sources sont exprimés à partir du taux molaire de formation de calcite, lui-même exprimé à partir du taux molaire de dissolution de la portlandite, et de celui des autres hydrates (CSH, ettringite, aluminates, etc.). Les cinétiques de dissolution/précipitation ont en effet été considérées distinctes pour la portlandite par rapport aux autres hydrates en raison de l'instabilité chimique de cette espèce, et donc de sa plus grande réactivité (Bary & Sellier 2004). La principale simplification de ce modèle par rapport aux versions antérieures concerne l'estimation de la concentration en calcium. En effet, dans les précédentes publications afférentes, une équation de conservation était écrite et résolue pour le calcium, couplée aux autres équations, pour décrire le transfert réactif du calcium en solution dans la porosité du béton. Dans l'approche présentée ici, on suppose que la cinétique de diffusion du calcium est négligeable, de sorte que les réactions de dissolution des hydrates et de formation de calcite relèvent d'un équilibre chimique local. Cela revient à supposer la cinétique de diffusion du calcium lente devant le processus global de carbonatation.

Le modèle a été implanté dans le code EF Cast3M et les équations résolues successivement et itérativement sur un schéma numérique totalement implicite. Le modèle a été testé et validé par comparaison avec des résultats expérimentaux et numériques antérieurs (Bary & Sellier, 2004). Les détails de l'implémentation du modèle et de sa validation sont donnés dans de Larrard et al. (2013). Pour les simulations présentées ici, le matériau considéré est un béton de CEM I avec un rapport eau/ciment de 0,42. Un certain nombre des paramètres relatifs aux modèles

de séchage (la perméabilité intrinsèque K et le paramètre m du modèle de désorption de van Genuchten) ou de carbonatation (le coefficient de diffusion du CO_2), ou relatifs aux propriétés du matériau (la porosité initiale de la pâte de ciment ϕ) ou à la géométrie considérée pour l'étude (l'épaisseur d'enrobage, notée e et correspondant à l'épaisseur de béton entre l'armature et la face du béton exposée à l'environnement extérieur agressif) sont choisis comme les variables aléatoires d'entrée des simulations probabilistes. Ces paramètres seront présentés de façon plus détaillée dans la section consacrée aux simulations probabilistes. Le béton est supposé avoir une saturation initiale homogène et correspondant à celle de l'an 2000 (point de départ des scénarii de réchauffement climatique). Dans la mesure où le pH n'est pas accessible directement via les simulations numériques, le front de carbonatation est estimé à partir du profil de portlandite. Il a été décidé de considérer que le front se situait au seuil de 2/3 de la portlandite initiale dissoute. Ce modèle, quoique simplifié, permet l'obtention de profils de calcite et de portlandite satisfaisants, tout en restant compatible avec une démarche probabiliste.

3.2. Prise en compte des variations de température

Le modèle présenté précédemment a dû être modifié pour tenir compte des variations de température induites par le réchauffement climatique. Dans la mesure où l'on s'intéresse ici à une évolution globale de la température et pas à des variations à de courtes échelles temporelles, il a été supposé que l'effet du gradient de température dans l'épaisseur d'enrobage de béton considérée ici était négligeable devant la variation de la température moyenne sur les échelles de temps considéré. En effet, les simulations de carbonatation atmosphériques sont réalisées sur pas de temps de 20 ou 30 jours, période sur laquelle les variations quotidiennes de températures sont moyennées sur l'enrobage (cinétique de transfert de chaleur très rapide devant celle des transferts réactifs de H_2O et CO_2). De fait, la température dans l'enrobage est supposée constante au cours du pas de temps et égale à la température extérieure moyenne sur cette période. Cela revient à supposer que la cinétique des transferts de chaleur est largement supérieure à celle des transferts réactifs de l'eau et du CO_2 . Cette hypothèse est corroborée par Yuan & Jiang (2011). Notons ici que les autres conditions aux limites climatiques (humidité relative extérieure et pression partielle de CO_2 dans l'atmosphère) sont disponibles avec un pas de temps quotidien mais appliquée au système avec une valeur moyenne sur chaque pas de temps. L'influence de la température apparaît dans le modèle à chaque fois avec une thermo-activation modélisée par une loi d'Arrhénius. La démarche est analogue à celle présentée dans de Larrard et al. (2012). Les phénomènes suivants sont considérés impactés par la température :

- le coefficient de diffusion du CO_2 , avec une énergie d'activation de 39 kJ/mol (Saetta et al. 1993) ;
- la solubilité rétrograde des hydrates : plus la température est élevée, moins les hydrates sont solubles (Dickson et al. 2004), se traduisant par une énergie d'activation de -440 kJ/mol (Papadakis et al. 1991) ;

- la loi de Henry traduisant l'équilibre entre le CO₂ sous phases liquides et gazeuses, avec une énergie d'activation de 19,95 kJ/mol (Fogg & Sangster 2003) ;
- la viscosité dynamique de l'eau, décroissante avec la température, ce qui se traduit par une énergie d'activation de -15,7 kJ/mol (Reinhardt & Jooss 2003) ;
- les isothermes de sorption/désorption (Poyet & Charles 2009), avec une énergie d'activation dépendant elle-même de la température.

4. Détermination de l'indice de fiabilité

La détermination de l'indice d'Hasofer-Lind relève d'un problème d'optimisation sous contrainte. La fonction à minimiser est la distance euclidienne dans l'espace standardisé sous la contrainte $G(u)=0$, où G est la fonction de défaillance, définissant le domaine de défaillance, telle qu'une valeur négative de la fonction définit le domaine de sécurité et une valeur positive le domaine de défaillance. Cette fonction définit donc un état limite, et doit être continue, au moins aux alentours du point de conception (caractérisé parce qu'il donne la distance minimale entre le domaine de défaillance et l'origine de l'espace standardisé). Dans cette étude, l'indice de fiabilité est calculé à partir de l'algorithme du gradient projeté (Duprat et al. 2010). En pratique, lorsque la fonction d'état limite est calculée par des simulations EF, les expressions analytiques des dérivées partielles ne sont pas disponibles. Par souci de simplicité, on a recours à la méthode des différences finies pour le calcul du vecteur gradient. L'erreur de troncature résultant des termes négligés dans le développement en série de Taylor de la fonction $G(x)$ peut être réduite en utilisant une petite perturbation. Néanmoins, la taille de la perturbation doit être choisie en conformité avec les inexactitudes de calculs acceptées dans les procédures de résolution (seuil de convergence) et les erreurs d'arrondis numériques inévitables qui affectent la réponse de la méthode des éléments finis. Par conséquent, une procédure particulière est utilisée pour le choix de la perturbation dans l'estimation du vecteur gradient. Cette procédure prend en compte la précision numérique globale du modèle EF, afin d'éviter que la convergence de l'algorithme de projection du gradient n'échoue en raison d'une valeur de perturbation inappropriée. En outre, l'algorithme permet d'éviter des recours inutiles au modèle EF en mettant à jour les composantes du vecteur gradient.

L'idée de base de cette étude est de comparer l'influence des scénarii de réchauffement climatique à l'aune des effets sur l'estimation de l'indice de fiabilité. Ainsi, on considère le matériau présenté dans la partie 3 de cette étude et, pour chaque scénario, on utilise l'algorithme du gradient projeté pour estimer l'indice de fiabilité d'Hasofer-Lind pour un état limite correspondant à la dissolution de la portlandite autour de l'armature. Ainsi, l'effet du scénario de réchauffement climatique pourra être quantifié à travers les valeurs obtenues pour l'indice de fiabilité. La première étape consiste à définir la fonction de défaillance. Dans la mesure où le phénomène considéré est la carbonatation du béton, laquelle induit la corrosion des armatures, la fonction d'état limite est basée sur le seuil de portlandite

dissoute caractéristique du front de carbonatation. Ainsi, si plus de 67 % de la portlandite initiale a été dissoute, l'échantillon étudié est considéré comme défaillant. De fait, la fonction de défaillance est définie à partir de la fraction volumique de portlandite à l'enrobage, entre la fin des simulations (100 ans) et l'état initial. Notons que le choix du seuil de portlandite va affecter l'indice de fiabilité, mais dans la mesure où il s'agit de la même valeur de seuil pour toutes les situations, la comparaison des scénarii de réchauffement climatique reste pertinente, quel que soit le seuil retenu. Il a été décidé ici de mener cette étude avec 5 variables aléatoires. La première est l'enrobage. Il s'agit d'une variable correspondant à un aléa structural global, lié à une variabilité induite par le procédé de construction. La seconde variable aléatoire est la porosité initiale de la pâte de ciment. Cette variable a une influence significative sur la cinétique des processus de diffusion. Deux autres variables correspondent au phénomène de séchage : la perméabilité intrinsèque K_0 et le paramètre m du modèle de van Genuchten décrivant les isothermes de désorption. La dernière variable aléatoire est le coefficient de diffusion du CO_2 . Ces quatre dernières variables sont des propriétés du matériau. Leur variabilité représente l'aléa naturel et la variabilité spatiale des caractéristiques du matériau, même pour une formulation de béton donnée. Ces cinq paramètres apparaissent de façon indépendante dans les équations du modèle, si bien que nous les considérerons non-corrélés (ce qui est éventuellement discutable d'un point de vue physique). Les valeurs moyennes de ces variables ont été prises égales respectivement à 2 cm pour l'enrobage, 30% pour la porosité de la pâte de ciment, $1,8 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ pour la perméabilité intrinsèque, $1,9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le coefficient de diffusion du CO_2 , 0,532 pour le paramètre m de van Genuchten. Ces valeurs sont analogues à celles de Larrard et al. (2013) pour la validation du modèle. Par commodité, il a été choisi de représenter leur variabilité par une loi normale, caractérisée pour toutes les variables par un coefficient de variation de 5 %, ce qui est de l'ordre de grandeur de la variabilité observée pour une formulation analogue (de Larrard et al. 2010). Il est à noter que ce coefficient de variation relativement faible est caractéristique de ce que l'on retrouve sur un béton dont la mise en œuvre est particulièrement surveillée. On peut trouver des coefficients de variations plus importants pour des chantiers dont la mise en œuvre ou la fabrication du béton sont moins régulières. Ce qui importait dans le cadre de cette étude était l'impact du scénario climatique sur la variation de l'indice de fiabilité. Un coefficient de variation plus important aurait amené à des indices de fiabilité plus faibles, mais seule la variation relative nous intéresse dans le cadre de la présente étude.

5. Résultats et discussion

Avant d'analyser les résultats, rappelons que l'indice de fiabilité a été calculé pour 3 scénarii, notés A1B, A2 et B1. Schématiquement, le scénario A1B est celui pour lequel l'élévation de la température est la plus significative, de même que la décroissance de l'humidité relative. Le scénario B1 prédit une élévation de température sensiblement moindre, idem que la décroissance de l'humidité. Le scénario A2 est intermédiaire entre les précédents. Pour chaque scénario, 3

évolutions de la pression partielle de CO₂ sont considérées : une haute, une médiane et une basse. Enfin, ces 9 cas ont été appliqués aux climats de Nantes et de Toulouse. Les résultats des calculs de l'indice de fiabilité sont recensés dans le Tableau 2.

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

Tableau 2. Indice de fiabilité en cas de réchauffement climatique à Nantes et Toulouse.

La première conclusion à tirer de ces résultats est que l'intervalle de variation de l'indice de fiabilité est très large (de 1,87 à 16,03). Notons que d'un point de vue statistique un indice de fiabilité supérieur à 8 n'a pas de réelle signification, dans la mesure où cela place le point de fonctionnement dans des queues de distribution rendant vide de sens les valeurs estimées. Toutefois, dans la mesure où on se trouve ici dans un exercice quelque peu artificiel (ne serait-ce que considérer la même formulation pour deux types de conditions extérieures aussi différentes n'est pas réaliste), nous affichons les valeurs calculées, en appelant à la plus grande prudence quant à leur utilisation. Puisque l'on a considéré des variables aléatoires réparties suivant des lois normales avec un coefficient de variation relativement faible, et que, donc, on a considéré le même matériau pour les conditions froides et humides de Nantes, et chaudes et sèches de Toulouse, il est « normal » de constater une grande disparité dans les états de sécurité des cas considérés, ce qui se traduit par la largeur de l'intervalle pour les indices de fiabilité calculés. Le climat Toulousain induit une carbonatation relativement rapide en raison de la température globalement élevée, sachant que la carbonatation est un phénomène thermoactivé. En outre, l'humidité relative dans le climat nantais reste majoritairement dans l'intervalle 80-85%, ce qui correspond à l'effet « pessimum » sur la diffusion : quand l'humidité relative est trop importante, il n'y a pas assez de phase gazeuse dans les pores pour que la diffusion gazeuse du CO₂ puisse être effective. Attention toutefois à considérer que cette « sécurité naturelle » liée à l'humidité n'apparaît ici que parce que seul le phénomène de carbonatation a été pris en compte dans le calcul de l'indice de fiabilité, mais l'effet contraire serait observé si l'on considérait le processus de corrosion (pour lequel l'humidité est un critère très favorable). La seconde conclusion découle des observations de chaque ville et chaque scénario, et de la comparaison des 3 évolutions de CO₂. Trivialement, plus la pression partielle de dioxyde de carbone est élevée, plus l'indice de fiabilité est faible, ce qui est parfaitement « physique » dans la mesure où les conditions de pression extérieure créent un gradient, moteur des processus diffusifs. Ce qui importe ici est de constater que passer de l'estimation haute ou basse de la pression a moins d'influence sur l'indice de fiabilité que le scénario lui-même. Ainsi, β est 25% plus important pour Toulouse-A2-Basse que pour Toulouse-A2-Haute, mais il est 99%

plus important pour Toulouse-A1B-Haute que pour Toulouse-A2-Haute. Cet effet est également observable à Nantes, quoique moins significativement (seulement 2% de différence entre Nantes-A2-Haute et Nantes-A2-Basse), ce qui peut s'expliquer par les très hautes valeurs de l'indice de fiabilité (ce qui signifie que le point de fonctionnement est dans les queues de distributions pour tous les paramètres d'entrée). La principale information est que l'indice de fiabilité évolue très significativement avec le scénario considéré : +264% pour Toulouse en considérant B1 au lieu de A2 (estimation haute du CO₂), et +28% pour Toulouse dans la même situation. Là encore, l'augmentation plus faible du β pour Nantes que pour Toulouse est due aux valeurs très élevées de l'indice de fiabilité pour Nantes et le fait que, dans les queues de distributions, une « petite » variation de β correspond à un changement significatif du sens physique. Pour conclure sur la comparaison des scénarii, il apparaît que plus la température augmente et plus l'humidité relative décroît, plus l'indice de fiabilité est faible. D'un point de vue physique, les explications de cette tendance sont les mêmes que celles expliquant les différences observées entre Nantes et Toulouse. Le point important ici est la quantification de l'impact de ces scénarii, qui est significatif : par exemple, pour Toulouse, selon le scénario optimiste B1 l'indice de fiabilité varie entre 6,8 et 7, ce qui correspond à un domaine de sécurité satisfaisant ; mais si on suit le scénario A2, l'indice de fiabilité tombe entre 1,9 et 2,3, impliquant un risque de carbonatation-dépassement-corrosion à surveiller attentivement.

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

Tableau 3. *Indice de fiabilité pour les différents scénarii de réchauffement climatique (les valeurs marquées d'un astérisque n'ont pas de sens mathématique) pour CO₂ médian.*

Nous pouvons élargir l'étude à plusieurs autres localités en France, correspondant à des climats différents. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 3 en reprenant les indices calculés pour Nantes et Toulouse, et en y adjoignant les résultats pour Clermont-Ferrand, Marseille, Strasbourg et Paris. Pour ces calculs, seul le scénario intermédiaire de pression de CO₂ a été retenu. Comme précédemment, on y trouve pour certaines villes des valeurs d'indice de fiabilité très élevée, statistiquement non représentatives. Toutefois, ces valeurs permettent d'établir une gradation dans l'effet du climat (différent selon les localisations) sur la fiabilité par rapport à la carbonatation atmosphérique. On notera également pour Marseille des indices de fiabilité négatif. Cela n'a aucun sens mathématique, il faut lire dans ces cas-là $\beta=0$. Physiquement, cela signifie que le point moyen est dans le domaine de défaillance. Les valeurs algébriques calculées ici permettent de voir à quel point Marseille est « loin » dans le domaine de défaillance. Rappelons ici que l'on s'est placé dans une situation parfaitement artificielle dans la mesure où l'on a

considéré la même formulation de béton pour toutes ces localités, indépendamment des conditions d'exposition. On retrouve les conditions présentées précédemment, à savoir que les villes connaissant un climat chaud, telles que Marseille ou Toulouse, voient globalement une carbonatation plus rapide, ce qui se traduit par un β plus faible. De même, l'effet de la saturation est observable entre Nantes et Paris, où l'écart de température n'est pas très significatif (cf. Tableau 1), mais il l'est sur l'humidité relative. Il ressort de cette étude que la variation de la pression partielle de CO₂, selon que l'on se place dans une estimation haute, basse ou médiane, est le facteur le moins influent sur la variation de l'indice de fiabilité, devant la variation de la température et celle de l'humidité relative. Les variations d'humidité ont un effet aussi significatif que celles de la température sur le β dans la mesure où une saturation importante inhibe le processus de carbonatation. En revanche, les cinétiques de séchages sont importantes devant celles de la carbonatation, de sorte qu'on s'est intéressé ici principalement à l'évolution tendancielle de l'humidité. Les effets de cycles rapides sur les cinétiques de dégradation sont en cours d'étude et feront l'objet de communications ultérieures.

Ville	Toulouse	Toulouse	Nantes
Scénario	A2	A1B	A1B
Estimation CO ₂	Haute	Médiane	Médiane
Enrobage	+56,4 %	+9,8 %	+1,2·10 ⁻⁶ %
Porosité	-17,1 %	-3,2 %	-2,6·10 ⁻⁶ %
Perméabilité	-5,5 %	-1,8 %	-0,6·10 ⁻⁶ %
Diffusion	-19,9 %	-6,1 %	-1,7·10 ⁻⁶ %
Isotherme	-19,7 %	-6,2 %	-2,3·10 ⁻⁶ %

Tableau 4. Modification relative de la fonction de défaillance pour une augmentation de 5 % par rapport à la valeur moyenne d'un paramètre d'entrée pour différents scénarii.

Terminons cette étude par quelques mots sur les coordonnées du point de conception dans l'espace standardisé. Il ressort en effet que le point de conception est atteint pour un enrobage décalé de -2 à -15 écarts-types selon le scénario et la ville considérés, tandis que les autres variables aléatoires se situent à 0,2 à 2 écarts-types. Cela indique simplement que parmi les paramètres considérés pour l'étude probabiliste, le plus influent relativement à la fiabilité de l'ouvrage est l'épaisseur d'enrobage, et que les autres variables ont un effet dont l'influence est d'un ordre de grandeur analogue. On peut rapporter ces résultats à ceux que l'on obtiendrait avec une approche déterministe de type élasticité. Pour cela, on a considéré une simulation de référence (tous les paramètres d'entrée sont pris égaux à leur valeur moyenne), puis, pour chaque paramètre d'entrée, en laissant les autres à leur valeur moyenne, une simulation a été menée en augmentant ce paramètre de 5 %. On peut alors quantifier l'impact de cette variation du paramètre d'entrée sur la fonction de défaillance. Les résultats de cette approche sont présentés dans le Tableau 4. On y observe que l'effet sur la fonction de défaillance est très visible pour les cas à indice de fiabilité faible (pour la ville de Toulouse en l'occurrence), et non significatif si l'indice de fiabilité est important (pour Nantes), puisqu'alors il faut un écart important par rapport à la position moyenne pour s'approcher du domaine de

défaillance. Ainsi, lorsqu'on est proche de la défaillance, c'est l'enrobage qui a l'effet le plus significatif sur la dépassivation, ce qui est conforme aux observations précédentes. Pour le cas d'un indice de fiabilité élevé, cette approche déterministe ne permet pas de conclure puisqu'on est trop loin du point de conception pour que ce type d'approche (qui ne s'extrapole que pour un fonctionnement linéaire du processus, ce qui n'est pas le cas ici) définisse un paramètre influent.

6. Conclusions et perspectives

Dans la présente étude, nous avons proposé un modèle simplifié de carbonatation sous conditions variables de température, humidité relative et pression partielle de CO₂. Ce modèle a été développé dans le but de calculer l'indice de fiabilité de structures en béton armé exposées à un risque de corrosion des armatures induite par carbonatation de la pâte de ciment. Nous avons calculé l'indice de fiabilité correspondant pour plusieurs villes en France, correspondant à différents types de climat distincts (océanique, continental, méditerranéen, etc.), suivant plusieurs scénarii de réchauffement climatique et d'évolution de la pression atmosphérique en CO₂ pour 100 ans. Cette étude a montré que le réchauffement climatique et l'évolution de l'humidité relative ont un impact significatif sur la fiabilité des structures BA. L'indice de fiabilité correspondant peut pratiquement être divisé par 3 selon le scénario suivi. Ce résultat souligne la nécessité de suivre et de prendre en compte les évolutions climatiques autant que possible, que ce soit pour la température, l'humidité relative et la pression partielle de CO₂ dans l'atmosphère. Cette étude a aussi montré, en première approche, que le paramètre conditionnant le plus significativement la sûreté des structures restait l'épaisseur d'enrobage, davantage que les propriétés de transfert du matériau (porosité, perméabilité, coefficient de diffusion, isotherme de désorption). Notons que ces résultats recourent les recommandations proposées par le CSIRO (Wang et al. 2010), organisme australien qui a étudié l'impact des scénarii de réchauffement climatique sur les structures BA (mais en dehors d'un cadre fiabiliste et en utilisant un modèle d'ingénierie au lieu d'un modèle EF). Les recommandations portent également sur l'épaisseur d'enrobage dans un premier lieu et sur les propriétés diffusives du matériau (notamment la porosité). Ce travail nécessite des approfondissements, notamment concernant les lois de distribution retenues pour la variabilité des propriétés des matériaux et des structures. En outre, il faudrait prendre en compte les corrélations entre les propriétés matériaux intervenant dans les simulations des processus couplés de dégradation. Une étude plus approfondie devrait être menée sur l'influence du choix d'une valeur pour le seuil de dissolution de la portlandite définissant la position du front de carbonatation, ainsi que la relation entre ce seuil et l'initiation effective de la corrosion.

7. Remerciements.

Les auteurs souhaitent adresser leurs remerciements à Météo-France pour avoir fourni les projections de données climatiques utilisées dans cette étude, ainsi que Commissariat à

l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) pour son support financier et technique lors de l'implémentation du modèle numérique sous Cast3M.

8. Références

- Bary, B. & Sellier, A. 2004. Coupled moisture–carbon dioxide–calcium transfer model for carbonation of concrete. *Cement and Concrete Research*. 34: 1859–1872.
- de Larrard, T., Benboudjema, F., Colliat, J.B., Torrenti, J.M. & Deleruyelle, F. 2010. Concrete calcium leaching at variable temperature: Experimental data and numerical model inverse identification. *Computational Materials Science*. 49: 35-45.
- de Larrard, T., Poyet, S. Pierre, M., Benboudjema, F., Le Bescop, P., Colliat, J.B. & Torrenti, J.M. 2012. Modelling the influence of temperature on accelerated leaching in ammonium nitrate. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 16(3-4): 322-335.
- de Larrard, T., Bary, B., Adam, E. & Kloss, F. 2013. Influence of aggregate shapes on drying and carbonation phenomena in 3D concrete numerical samples. *Computational Materials Science*. 72: 1-14.
- Déqué, M., Dreveton, C., Braun, A. & Cariolle, D. 1994. The ARPEGE-IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics* 10: 249-266.
- Dickson, C.L., Brew, D.R.M. & Glasser, F.P. 2004. Solubilities of CaO-SiO₂-H₂O phases at 25, 55 and 85°C. *Advanced Cement Research*. 16:35–43.
- Duprat, F., Sellier, A., Nguyen, X.S. & Pons, G. 2010. The projection gradient algorithm with error control for structural reliability. *Engineering Structures*. 32: 3725–3733.
- Fogg, P. & Sangster J. 2003. Chemicals in the atmosphere: solubility, sources and reactivity. *John Wiley & Sons Ltd, West Sussex*.
- Hasofer, A.M. & Lind, N.C. 1971. An exact and invariant second moment code format. *Journal of Engineering Mechanics*. 100: 111-121.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Mainguy, M., Coussy, O. & Baroghel-Bouny, V. 2001. Role of air pressure in drying of weakly permeable materials. *J. Eng. Mech.-ASCE*. 127: 582-592.
- Papadakis, V.G., Vayenas; C.G. & Fardis, M.N..1991. Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete. *ACI Mater J*. 8(2):186–195.
- Poyet, S. & Charles, S. 2009. Temperature dependence of the sorption isotherms of cement-based materials: Heat of sorption and Clausius–Clapeyron formula. *Cement and Concrete Research*. 39: 1060–1067.
- Reinhardt, H.R. & Jooss, M. 2003. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. *Cement and Concrete Research*. 33: 981–985.
- Saetta, A.V., Schrefler, B.A. & Vitaliani, R.V. 1993. The carbonation of concrete and the mechanism of moisture, heat and carbon dioxide flow through porous materials. *Cement and Concrete Research*. 23(4):761–72.
- van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892–898.
- Wang, X., Nguyen, M., Stewart, M. G., Syme, M. & Leitch, A. 2010. Analysis of Climate Change Impacts on the Deterioration of Concrete Infrastructure – Synthesis Report. Published by CSIRO, Canberra. ISBN978 0 643 10364 1
- Wigley, T.M.L., Richels, R. & Edmonds, J.A. 1996. Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations. *Nature*. 379: 240–243.
- Yuan, Y. & Jiang, J. 2011. Prediction of temperature response in concrete in a natural climate environment. *Construction and Building Materials*. 25: 3159–3167.