
Durée de vie des produits de construction

Evaluation de la qualité des données

Aurélie Talon* — Daniel Boissier* — Julien Hans **

* Laboratoire Génie Civil / Polytech' Clermont-Ferrand
Campus Universitaire des Cézeaux, 24 avenue des Landais, BP 206, 63174 Aubière
Cedex

atalon@cust.univ-bpclermont.fr, dboissier@cust.univ-bpclermont.fr

** CSTB – Département Développement Durable, Division Environnement,
Produits et Ouvrages Durables

24 rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin d'Hères

julien.hans@cstb.fr

RÉSUMÉ. L'évaluation de la durée de vie des produits de construction en service est une préoccupation forte actuellement. Il existe différents types de données de durée de vie et différentes méthodes permettant de les traiter. Les évaluations de durée de vie sont généralement hétérogènes pour trois raisons : la source d'information, la correspondance entre les données et le cas étudié et l'entropie de l'information. Nous proposons d'utiliser la complémentarité de ces données afin d'obtenir une durée de vie consensuelle et un indicateur de la qualité du résultat obtenu. Notre approche repose sur la détermination des scénarii de dégradation pouvant affecter le produit de construction étudié, l'évaluation de la qualité des données, l'unification et l'agrégation des données de durée de vie et de probabilité d'occurrence. Nous illustrons notre démarche sur un exemple courant de mur en béton armé revêtu d'un complexe isolant.

ABSTRACT. The service life assessment of building components is currently a major concern. Various types of data of service life and various methods for processing them are available. The service life assessments are generally heterogeneous for three reasons: the source of information, the correspondence between data and studied case and the entropy of information. We propose to use the complementarity of data in order to obtain a consensual service life and an indicator of the quality of the obtained result. Our approach rests on the determination of the degradation scenarios being able to affect the studied building components, the evaluation of the quality of data, the unification and aggregation of data of service life and of probability of occurrence. We illustrate our methodology on the basic case of a reinforced concrete wall covered with an insulating complex.

MOTS-CLÉS : Agrégation des données, bâtiment, durée de vie, probabilité d'occurrence, scénarii de dégradation, unification des données.

KEYWORDS: aggregation of data, building, degradation scenarios, probability of occurrence, service life, unification of data.

1. Introduction

Dans le domaine de la construction, garantir une durée de vie des produits de construction consiste à maintenir ses performances attendues pendant une durée définie lors de sa conception en intégrant ou non des opérations de maintenance. L'objectif d'un concepteur est alors d'optimiser son produit, en termes de matériau et de fonctionnalité, afin que sa durée de vie réelle en service soit la plus proche possible de la durée de vie de conception, tout en restant supérieure. La durée de vie réelle est définie selon la norme ISO 15686 (ISO, 2006) comme « le laps de temps après mise en œuvre pendant lequel un bâtiment ou un de ses composants atteint ou dépasse des exigences de performance ». Il est donc essentiel en phase de conception de pouvoir évaluer cette durée de vie. Cette connaissance de la durée de vie et des durées des phénomènes de dégradation d'un produit permettent aussi en phase de vie en œuvre de planifier les opérations d'inspection, de maintenance et de réparation.

Il existe différents types de données de durées de vie (résultats d'essai de vieillissement, statistiques, bases de données, déclarations expertes, etc.) et plusieurs méthodes de traitement de ces données permettant d'obtenir des évaluations de produits de construction dans un environnement spécifique à l'étude :

- méthodes probabilistes (Siemes *et al.*, 1985),
- méthodes basées sur des dires d'expert (Bouchon—Meunier *et al.*, 2003),
- méthodes basées sur des statistiques, telle que celle appliquée aux lois de survie des chaussées (Rèche, 2004),
- méthodes basées sur la comparaison de tests en exposition de longue et de courte durées (Jernberg *et al.*, 2004),
- méthodes possibilistes, telle que la fusion des données (Lair, 2000),
- méthode des facteurs décrite dans la norme ISO 15686 (ISO, 2006).

Les durées de vie obtenues par ces méthodes ne sont généralement pas transposables pour l'évaluation de la durée de vie d'autres produits dans un environnement différent du cas d'étude et l'on ne connaît pas la qualité du résultat obtenu. Cette qualité, ou confiance que l'on peut accorder au résultat, dépend de trois paramètres : la source de l'information, la correspondance entre les données disponibles et le cas étudié, et l'informativité des données (entropie de Shannon).

Dans ce contexte, nous proposons une méthodologie (détaillée au paragraphe 2) permettant d'évaluer la durée de vie de tout produit de construction, dans un environnement de service donné, à partir des données multi-sources et multi-échelles (échelles géométrique, phénoménologique, fonctionnelle et temporelle – *cf.* (Talon, 2006b)) existantes.

REMARQUE. — Pour être pleinement cohérent avec la définition de la durée de vie de l'ISO 15686, les dégradations physiques du produit doivent être reliées à ses performances fonctionnelles. Bien que cette liaison fasse partie intégrante de nos recherches, nous nous focaliserons ici sur les aspects de durée et de probabilité d'occurrence des scénarii sans intégrer explicitement cette notion de performance.

2. Présentation de la méthodologie

La méthodologie que nous proposons comprend cinq phases principales, comme schématisé à la figure 1.

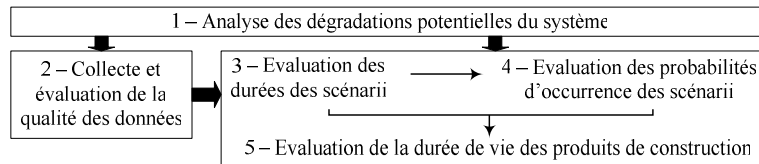


Figure 1. Principe de l'évaluation de la durée de vie des produits de construction

2.1. Phase 1 – Analyse des dégradations du système

Elle consiste à déterminer l'ensemble des scénarii de dégradation (enchaînements de phénomènes) pouvant affecter le fonctionnement du système (produit et son environnement) ainsi que leurs causes et conséquences. Cette analyse systémique est basée sur la description structurelle du produit, l'identification de l'environnement sollicitant ce produit, la détermination des fonctions assurées par celui-ci et l'application d'une Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE).

L'AMDE du mur en béton armé défini par sa structure à la figure 2 et ses dimensions au tableau 1 (Talon, 2006a) nous a permis d'identifier cinq scénarii génériques : scénario de chute de morceaux de béton, scénario de faïençage du béton, scénario de salissure du béton, scénario d'efflorescence du béton et scénario d'écrasement du complexe isolant. Pour simplifier l'illustration de cette publication nous détaillons par la suite uniquement le scénario générique de chute de morceaux présenté à la figure 3.

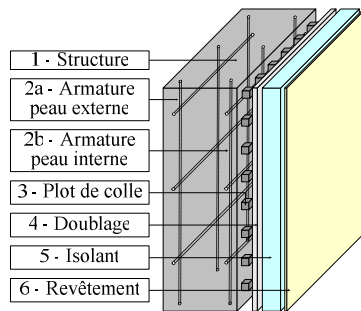


Figure 2. Structure d'un mur en béton

N°	Matériau	Dimensions
1	Béton	B25, ép. 20 cm
2a-b	Acier	Treillis Ø 8, maille carrée 20 cm, e = 2,5 cm
3	Ciment, sable, résine époxy	ép. 2 cm
4	Plâtre	BA13
5	Polystyrène	ép. 5 cm
6	Acrylique	ép. 2 mm

Tableau 1. Dimensions considérées

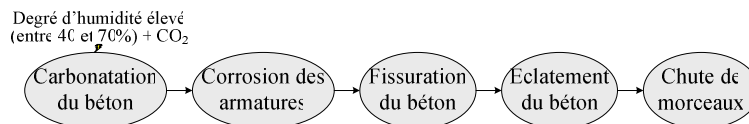


Figure 3. Scénario générique de chute de morceaux du mur en béton

Ce scénario générique se décline en quatre scénarii « élémentaires » selon que l'épaisseur d'enrobage des armatures est suffisante ou insuffisante et / ou qu'il y a présence ou non de ségrégation du béton. Ces deux phénomènes influent sur les durées des phénomènes de carbonatation, de corrosion et de chute de morceaux.

2.2. Phase 2 – Collecte et évaluation des données

Pendant cette phase, nous recherchons l'ensemble des informations de durées de vie et de probabilités d'occurrence des scénarii disponibles et associons un indicateur de qualité à chaque donnée collectée ; l'évaluation de la qualité des données est détaillée au paragraphe 3.

2.3. Phase 3 – Evaluation des durées des scénarii

Elle consiste à obtenir la durée de vie de chaque scénario considéré indépendamment les uns des autres. Pour nous, un scénario est indépendant s'il n'a pas de phénomènes en commun avec d'autres scénarii. Cette évaluation peut être réalisée de deux manières, soit :

- directement : unification des données provenant de différentes sources et relatives au scénario,
- indirectement : unification des données provenant de différentes sources et relatives aux phénomènes composant le scénario étudié, puis agrégation depuis le niveau du phénomène jusqu'à celui du scénario.

Ces démarches d'unification et d'agrégation des données sont détaillées respectivement aux paragraphes 4 et 5.

Les résultats de durées et d'indicateurs de qualité que nous avons obtenus pour les quatre scénarii explicités au paragraphe 2.1 sont regroupés dans le tableau 2. Les références des 62 données utilisées pour obtenir les durées regroupées dans les tableaux 2 et 4 sont détaillées dans (Talon, 2006a).

		Durée	Indicateur de qualité
Sc_1	Enrobage suffisant sans ségrégation du béton	[65 ; 109] ans	0,279
Sc_2	Enrobage insuffisant sans ségrégation du béton	[37 ; 72,5] ans	0,501
Sc_3	Enrobage suffisant + Ségrégation du béton	[47 ; 113] ans	0,279
Sc_4	Enrobage insuffisant + Ségrégation du béton	[19 ; 37,5] ans	0,512

Tableau 2. Exemple de durées des scénarii de chutes de morceaux

2.4. Phase 4 – Evaluation des probabilités d'occurrence des scénarii

Elle vise à affecter une probabilité d'occurrence à chacun des scénarii considéré indépendamment les uns des autres et identifiés lors de l'AMDE (phase 1 de la

méthodologie) afin de ne retenir pour la suite de l'étude que les scénarii qui ont le plus de chance de se réaliser. Ici aussi, il existe une démarche directe et une démarche indirecte pour l'obtention de ces probabilités d'occurrence ; ces deux démarches sont identiques à celles pour l'obtention des durées (cf. 2.3). Nous proposons également une méthode – détaillée dans (Talon, 2006a) – permettant de compenser le manque de données de probabilités, lorsqu'elles sont indisponibles ou de mauvaise qualité, afin d'avoir une estimation de ces probabilités d'occurrence.

Les résultats des probabilités d'occurrence et des indicateurs de qualité associés que nous avons obtenus pour les quatre scénarii cités précédemment sont regroupés dans le tableau 3. Ces probabilités d'occurrence ont été obtenues par la méthode d'estimation, citée précédemment, ce qui explique que nous leur avons affecté une faible valeur (0,25) d'indicateur de qualité pour signifier que la confiance que l'on peut leur accorder est faible.

		Probabilité	Indicateur de qualité
Sc ₁	Enrobage suffisant sans ségrégation du béton	0,220	0,25
Sc ₂	Enrobage insuffisant sans ségrégation du béton	0,397	0,25
Sc ₃	Enrobage suffisant + Ségrégation du béton	0,103	0,25
Sc ₄	Enrobage insuffisant + Ségrégation du béton	0,338	0,25

Tableau 3. Probabilités d'occurrence des scénarii de chutes de morceaux

2.5. Phase 5 – Evaluation de la durée de vie des produits de construction

Cette dernière phase permet d'obtenir la durée de vie consensuelle d'un produit de construction en service avec un indicateur de qualité en prenant en compte les durées de vie et les probabilités d'occurrence obtenues pour les scénarii indépendants obtenus à la phase 4 (cf. 2.4). Elle consiste dans un premier temps à unifier les durées des scénarii élémentaires correspondant à un même scénario générique. Dans un deuxième temps, la durée de vie du produit étudié correspond à la durée du scénario générique qui a la probabilité d'occurrence la plus élevée.

Les résultats de durée et de probabilité d'occurrence que nous obtenons pour les cinq scénarii génériques présentés au paragraphe 2.1 sont listés dans le tableau 4.

	Probabilité	Indicateur	Durée	Indicateur
Chute de morceaux	0,397	0,25	[80 ; 84] ans	0,362
Faiçonnage du béton	0,400	0,25	[23 ; 27] ans	0,299
Salissure du béton	0,700	0,25	[5 ; 15] ans	0,250
Efflorescence du béton	0,490	0,25	[23 ; 27] ans	0,250
Ecrasement du complexe isolant	0,397	0,25	[20 ; 43] ans	0,683

Tableau 4. Durées et probabilités d'occurrence du mur en béton

D'après les résultats du tableau 4, la durée de vie du mur en béton serait comprise entre 5 et 15 ans ; ce qui signifie que le mur n'assure plus sa fonction d'intégrité aux sollicitations de contact (micro-organismes, pluie...). Cependant, il

ne s'agit pas d'une défaillance « ultime » (telle que la ruine mécanique) et qu'une opération de maintenance (telle que le nettoyage du mur) ramènera « aisément » le mur à son niveau de performance initial.

REMARQUE. — Les résultats présentés dans ce deuxième paragraphe n'ont qu'une valeur d'exemple. L'analyse de sensibilité de la méthode d'estimation des probabilités d'occurrence est une perspective de la recherche présentée ici.

3. Evaluation de la qualité des données

C'est la connaissance de la qualité des données collectées qui donne une mesure de la confiance (nommée indicateur de qualité) que l'on peut accorder à la durée de vie obtenue par agrégation et unification de ces données collectées.

La qualité d'une donnée est inversement proportionnelle aux imperfections associées à cette donnée ; nous distinguons trois types d'imperfections :

- imperfection intrinsèque : elle intègre la fiabilité de la procédure d'obtention de cette donnée, la fiabilité de la source d'information, la censure (due à la durée et aux moyens d'observation), l'incomplétude ;

- imperfection liée à la représentation : elle correspond à la pertinence du modèle physique choisi pour représenter des résultats issus de statistiques ou d'essais de vieillissement ou de retour d'expérience... ;

- imperfection liée à l'utilisation : elle regroupe d'une part la correspondance entre la donnée collectée et le cas étudié et d'autre part l'informativité de la donnée. Par exemple, la durée de vie d'un mur en béton de composition courante dans un environnement urbain classique de la métropole française et la durée de vie d'une éprouvette en béton immergée dans un milieu salin n'auront ni la même correspondance géométrique (niveau produit pour la première et niveau matériau pour la seconde) ni la même correspondance de sollicitations (milieux environnants différents). L'informativité d'une donnée, mesurée par l'entropie de Shannon, représente le fait qu'une durée de vie donnée par une valeur ponctuelle présentera plus d'incertitude (il y a peu de chance que ce résultat soit réaliste) qu'une durée de vie donnée par un intervalle incluant cette valeur ponctuelle.

Afin de faciliter l'évaluation de la qualité des données (de durée de vie et de probabilité d'occurrence) et de rendre cette évaluation homogène pour toutes les données, nous proposons la grille d'évaluation détaillée dans (Talon, 2006a) et présentée au tableau 5. Le résultat de cette évaluation est une masse de croyance qui est égale à la moyenne des valeurs prises par l'ensemble des critères.

L'entropie du tableau 5 est calculée à partir de la formule
$$\frac{\sum_{x \in X} f_{mc}(x) \ln(f_{mc}(x))}{\ln(1/\Theta)}$$

où X représente l'intervalle de valeurs de la donnée (tel que [5 ; 10] ans pour l'évaluation de la durée), x une valeur de la donnée discrétisée (une date pour

l'évaluation de la durée), Θ le cadre de discernement (la période d'observation $[t_{\min}; t_{\max}]$ pour l'évaluation de la durée, et $f_{mc}(x)$ la fonction de masse de croyance associée à la valeur x , détaillée dans (Talon, 2006a).

Critères	Valeurs				Exemple
	1	2/3	1/3	0	
Modélisation	Théorie corroborée	Théorie non corroborée	Etude statistique	Non modélisée	1
Hypothèses de modélisation	Très faible	Faible	Forte	Très forte	1/3
Mode d'obtention	Plan d'expérience	Retour d'expérience	Estimation « éduquée »	Estimation « non éduquée »	1
Source	Référencée	Interne	Conférence	Isolée	1
Censure	Non censurée	Partiellement censurée	Censurée	Non prise en compte	0
Représentativité	Parfaite	Correcte	Faible	Pauvre	2/3
Correspondance vis-à-vis du cas étudié	Entière	Correcte	Faible	Pauvre	2/3
Entropie	Détaillée ci-après				0,34
	Masse de croyance (moyenne des valeurs des critères) :				0,63

Tableau 5. Grille d'évaluation de la qualité des données

L'exemple du tableau 5 correspond à l'évaluation d'une donnée collectée pour le phénomène de carbonatation (cf. figure 3) ; elle donne une durée de 27 ans pour l'atteinte du front de carbonatation à 25 mm avec une concentration en CO_2 de 2.10^{-9} mol/mm³ (Liang *et al.*, 2005). La valeur de la masse de croyance obtenue (0,63) est plutôt faible ce qui est principalement lié aux faits qu'il s'agit d'une durée donnée par une valeur ponctuelle et que les correspondances d'échelle géométrique et de sollicitations entre cette donnée et notre cas d'étude sont faibles.

4. Unification des données

L'unification des données est applicable aussi bien en évaluation des durées qu'en évaluation des probabilités d'occurrence. Nous la présentons ici en application à l'évaluation des durées. L'unification des données consiste à obtenir une donnée consensuelle et un indicateur de qualité alloué à cette donnée consensuelle lorsque l'on dispose de plusieurs données de sources différentes. L'unification des données est basée sur la théorie de la fusion des données (Shafer, 1976). Considérant deux données (sous-ensembles) et leurs masses de croyance, la fusion de ces données vise à déterminer d'une part les masses qui peuvent être attribuées à l'intersection de ces données et à l'ignorance et d'autre part à la valeur de leur consensus.

Lors d'une évaluation de durées (par exemple, la durée d'un phénomène pour des sollicitations fixées), en fusionnant l'ensemble des données disponibles, nous obtenons une courbe de consensus ; nous retenons la durée qui regroupe le maximum de consensus et déterminons la probabilité de Smets (indicateur de qualité) correspondant à cet intervalle résultat.

5. Agrégation des données

L'agrégation des données est également applicable aux durées et aux probabilités d'occurrence. Nous présentons ici son application en évaluation des durées. A un niveau fixé (tel que le niveau du scénario), l'agrégation des données consiste à obtenir une donnée consensuelle et un indicateur de qualité alloué à cette donnée consensuelle à partir de données collectées à un niveau inférieur (tel que le niveau du phénomène). La durée d'un scénario correspond à la somme des durées de ses phénomènes et l'indicateur de qualité correspond à la valeur minimale des indicateurs de qualité associés aux durées des phénomènes.

6. Conclusion

La méthodologie d'évaluation de la durée de vie des produits de construction en service que nous proposons consiste à évaluer les durées et les probabilités d'occurrence des scénarii génériques puis à retenir le scénario qui a le plus de chance de se réaliser. La durée de ce scénario correspond alors à la durée de vie du produit. Il nous paraît fondamental d'une part d'évaluer la qualité des données utilisées afin d'avoir un indicateur de qualité du résultat final nous permettant ainsi de juger de la confiance que l'on peut accorder au résultat obtenu et d'autre part d'avoir un outil efficace d'organisation et de partage des connaissances (www.duree-de-vie-batiment.fr).

7. Bibliographie

- Bouchon-Meunier B., Marsala C., Logique floue, principes, aide à la décision, Paris, Lavoisier, 2003.
- International Organization for Standardization, Building and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles (ISO/WD 15686-1.2) et Part 8: Reference service life and service-life estimation (ISO/DIS 15686-8), 2006.
- Jernberg P., Lacasse M., Haagenrud S.E., Sjostrom C., Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Building Materials and Components, Publication CIB n°295, 2004.
- Lair J., Evaluation de la durabilité des systèmes constructifs du bâtiment, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, LERMES et CSTB, 2000.
- Liang M-T., Jin W-L. Yang R-J., Huang N-M., « Predeterminate model of corrosion rate of steel in concrete », Concrete and Research, vol. 25, 2005, p. 1827-1833.
- Rèche M., Effet des travaux d'entretien sur les lois d'évolution des dégradations de chaussées, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, LGC et LCPC, 2004.
- Shafer G., A mathematical Theory of evidence, Chichester, Princeton University Press, 1976.
- Siemes A., Vrouwenvelder A., Van der beukel A., Stochastic modelling of building materials performance in durability, Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers, 1985.
- (a) Talon A., Evaluation des scénarii de dégradation des produits de construction, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, LGC et CSTB, 2006.
- (b) Talon A., Boissier D., Hans J., Capra B., « A Multi-Scale Approach for Service Life Evaluation », *Actes de l'European Symposium on Service Life and Serviceability of Concrete Structures 2006*, Helsinki, 12-14 juin 2006.