

# Optimisation du projet de réhabilitation par l'ajustement des coefficients partiels

Alaa Chateauneuf<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> CIDECO, 28 Place Henri Dunant, CRBC, TSA 50400, 63001 Clermont-Ferrand Cedex 1

<sup>2</sup> Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand.

**RESUME** La réhabilitation des structures existantes s'inscrit pleinement dans la stratégie du développement durable et de préservation du patrimoine bâti. Dans ce contexte, l'évaluation de l'état d'intégrité et de l'aptitude au service doit tirer profit de la connaissance de l'état réel de la structure existante, en termes de matériaux, géométrie, conditions d'exploitation et état de dégradation. Les informations recueillies sur la structure permettent de réduire le niveau d'incertitudes, initialement considérées lors de la conception. Il est par conséquent possible d'ajuster les coefficients partiels, en fonction du degré de connaissance, afin de permettre l'optimisation des projets de réhabilitation. Cet article présente les bases scientifiques de la méthodologie d'ajustement à employer dans le cadre de l'approche semi-fiabiliste. Deux exemples pratiques permettent d'illustrer la mise en œuvre de la méthodologie, et les gains qui en résultent en termes de capacité portante des bâtiments et ouvrages.

**Mots-clefs** réhabilitation, coefficients partiels, fiabilité, structures existantes

## I. INTRODUCTION

L'évaluation et la réhabilitation des structures et ouvrages constitue un enjeu majeur de notre société, compte tenu de l'âge et de l'état vieillissant du parc bâti, d'une part, et des exigences du développement durable dans les projets de réhabilitation, d'autre part. L'emploi des normes en vigueur conduit à des évaluations trop conservatives et débouchent sur des actions de réhabilitation coûteuses, qui peuvent aller parfois jusqu'à la démolition et la reconstruction d'une partie ou de la totalité du bâtiment. L'approche fiabiliste permet une évaluation plus réaliste des performances effectives et de la sécurité des structures existantes, en tenant compte des incertitudes sur les charges, les résistances des matériaux et les modèles de calcul.

Alors que les normes actuelles sont principalement dédiées aux nouvelles constructions, les structures existantes ont des spécificités qu'il convient de prendre en compte dans les projets de réhabilitation :

- l'augmentation du niveau de fiabilité nécessite des coûts élevés pour la réhabilitation ;
- la durée de service résiduelle est différente de celle prescrite par la durée de projet lors de la conception initiale ;
- les informations sur les conditions d'état sont accessibles pour une structure existante, au moyen d'actions d'inspection, d'expérimentation et de surveillance ;

- le capital de fiabilité, initialement prévu lors de la conception, est partiellement consommée par les phénomènes de dégradation.

Ces spécificités rendent difficile l'application des règles de conception aux structures existantes, et nécessitent par conséquent une approche adaptée.

Par ailleurs, les niveaux de fiabilité dans les codes de calcul en vigueur ont été basés sur la continuité par rapport aux normes et pratiques antérieures. Pour les structures existantes, la spécification du niveau de fiabilité doit prendre en compte les critères d'acceptabilité du risque, en plus des autres considérations socio-économiques et environnementales. L'ajustement de la fiabilité cible, et par conséquent des facteurs partiels, peut être effectué à l'aide des trois approches suivantes (Chateaufort et al. 12) :

- Méthode implicite : cette approche consiste à définir la fiabilité cible pour respecter l'homogénéité par rapport à la pratique courante et aux codes et règlements antérieurs, et par l'analyse des structures existantes considérées acceptables.
- Jugement d'experts : cette approche est basée sur l'acceptabilité du risque, déterminée par l'analyse des niveaux acceptables des taux de mortalité, des dommages à l'environnement et des pertes économiques.
- Optimisation du bilan coûts-bénéfices : cette approche découle d'une formulation mathématique rationnelle, qui consiste à maximiser la fonction d'utilité de la structure, définie par la différence entre les bénéfices obtenus de l'exploitation et les pertes socio-économiques attendus.

Dans la pratique, le choix d'une fiabilité cible découle de la synthèse de ces trois approches, compte tenu des difficultés de formulation du critère de décision, notamment lorsqu'il s'agit de pertes en vies humaines.

La norme ISO 13822:2010 (ISO 13822) indique la possibilité de préciser les niveaux de fiabilité cibles pour les structures existantes en optimisant le coût total lié à une durée de service escomptée. Par ailleurs, il n'est pas rentable de spécifier les objectifs de fiabilité pour les structures et ouvrages existants au même niveau que celui des nouvelles constructions (Diamantidis et Bazzuro 07, Steenberg et Vrouwenvelder 10, Sýkora et al. 17).

Selon la norme ISO 2394:2015 (ISO 2394), le niveau de fiabilité cible pour les structures existantes diminue par rapport aux nouvelles structures, car il nécessite plus d'efforts pour augmenter le niveau de fiabilité des structures existantes. Le code modèle du comité mixte de fiabilité des structures (JCSS 00, JCSS 01) formule des recommandations similaires. Dans ce code modèle, les indices de fiabilité cibles sont également liés aux coûts et conséquences des mesures de sécurité, mais pour une période de référence d'un an.

Des recommandations sur les niveaux de fiabilité cibles sont également fournies dans plusieurs normes (Diamantidis et Bazzuro 07). Par exemple, la norme suisse SIA 269 (SIA 269) et la norme néerlandaise NEN 8700:2009 (NEN 8700) sur les règles de base pour l'évaluation des structures existantes fournissent des valeurs de l'indice de fiabilité pour la durée de vie résiduelle (prise comme période de référence), en considérant à la fois une stratégie de réhabilitation optimale et un niveau minimum en dessous duquel la structure est considérée non fiable et doit être réhabilitée.

L'ISO 2394:2015 donne également des niveaux de fiabilité pour la durée de service en différenciant les coûts des mesures de sécurité.

## II. FIABILITE DES STRUCTURES

La conception et l'évaluation des structures doivent permettre de garantir un niveau de fiabilité convenable, compte tenu des différents types d'incertitudes sur les matériaux, les charges, les dimensions, les conditions aux limites et les conditions d'exploitation. Il est convenu de répartir ces incertitudes en deux catégories :

- Incertitudes aléatoires, qui sont liées à la variabilité intrinsèque des phénomènes considérés, et ne sont donc pas réductibles ;
- Incertitudes épistémiques, qui sont liées au degré de connaissance et aux imprécisions associées aux données et modèles probabilistes, mécaniques et physicochimiques.

L'analyse de la fiabilité des structures a pour objectif de prendre en compte ces incertitudes dans la démarche de conception et d'évaluation.

### A. Analyse de fiabilité

La fiabilité est définie par l'aptitude d'un système à assurer la fonction pour laquelle il est destiné, pendant une durée donnée. L'analyse de la fiabilité consiste en l'évaluation de la probabilité de défaillance, vis-à-vis de l'état limite considéré (Lemaire, 15). Elle permet ensuite de déterminer les valeurs de calcul et d'en déduire les coefficients partiels permettant de garantir la fiabilité cible.

La probabilité de défaillance est définie par l'expression :

$$P_f = \text{Prob}[G(E, R) = E - R \leq 0] \quad (1)$$

où  $P_f$  est la probabilité de défaillance,  $G(E, R)$  est la fonction d'état limite,  $E$  est l'effet des actions,  $R$  est la résistance, et  $\text{Prob}[\cdot]$  est l'opérateur de probabilité. Dans les méthodes du premier ordre FORM (Madsen et al. 86, Ditlevsen 96), la probabilité de défaillance est évaluée en fonction de l'indice de fiabilité par :  $P_f = \Phi(-\beta)$ , où  $\beta$  est l'indice de fiabilité. Dans le cas des variables normales indépendantes, cet indice est défini par :

$$\beta = \frac{m_R - m_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (2)$$

où  $m_R$ ,  $m_E$ ,  $\sigma_R$  et  $\sigma_E$  sont respectivement les moyennes et les écarts-types de la résistance et de l'effet des actions. La figure 1 illustre les différents points intervenant dans le calcul de la fiabilité : 1) point moyen  $C_m$ , correspondant à la moyenne des variables, 2) point caractéristique  $C_k$ , permettant de définir des valeurs représentatives qui tiennent compte des dispersions, et 3) point de calcul  $C_d$ , qui peut être interprété comme le point de défaillance le plus probable. Les coefficients partiels sont ainsi déterminés par le rapport entre les valeurs caractéristiques et les valeurs de calcul, ou inversement, selon le rôle mécanique des variables.

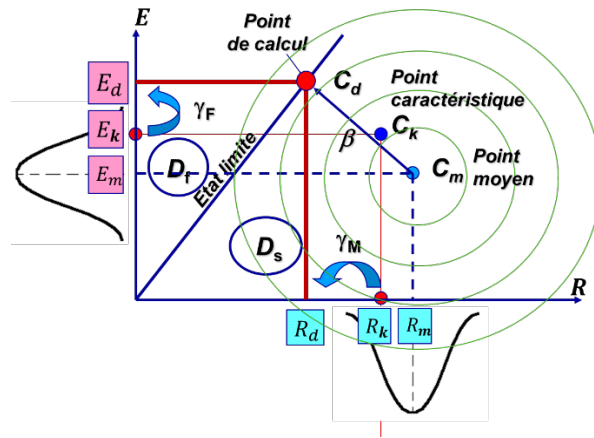


FIGURE 1. Approche fiabiliste et grandeurs d'intérêt

B. Règle de dimensionnement

La règle de dimensionnement selon le formalisme semi-probabiliste prend la forme suivante :

$$E_d = E\{X_{d,i}; a_{d,j}\} \leq R_d = R\{X_{d,i}; a_{d,j}\} \tag{3}$$

où  $E\{\}$  et  $R\{\}$  sont respectivement l'effet des actions et la résistance, pour lesquels les valeurs de calcul sont notés  $E_d$  et  $R_d$ ;  $X_{d,i}$  sont les valeurs de calcul des variables de base et  $a_{d,j}$  sont les paramètres de dimensionnement. Cette expression s'écrit en fonction des coefficients partiels par :

$$E_d = E\{\gamma_{X_i} X_{k,i}; a_{d,j}\} \leq R_d = R\left\{\frac{X_{k,i}}{\gamma_{X_i}}; a_{d,j}\right\} \tag{4}$$

Dans cette règle de dimensionnement, les coefficients partiels doivent être calibrés pour satisfaire l'objectif de fiabilité pour l'ensemble du domaine d'application de la norme. L'étendue de ce domaine conduit à un dimensionnement conservatif dans la très grande majorité des situations, et ne peut donc pas tenir compte de la spécificité de la structure à évaluer.

III. EXIGENCES REGLEMENTAIRES

L'Eurocode 0 (NE EN 1990) précise les exigences en termes de fiabilité cible, qui doit être considérée pour la calibration des coefficients partiels à utiliser dans les autres Eurocodes des actions et des matériaux. L'Eurocode 0 définit trois classes de conséquence, indiquées dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Classes de conséquence dans l'Eurocode 0

Classe de conséquence	Conséquence en termes de perte de vie humaine	Conséquence économique, sociale ou environnementale
CC1	Elevée	Très importante
CC2	Moyenne	Considérable
CC3	Faible	Faible ou négligeable

Pour chaque classe de conséquence, une classe de fiabilité est associée, dont les valeurs minimales recommandées pour l'indice de fiabilité associé à l'état limite ultime sont définies dans le tableau 2 pour une durée d'utilisation de projet (i.e. durée de référence) de 1 et 50 ans.

**TABLEAU 2.** Classes de fiabilité dans l'Eurocode 0

Classe de fiabilité	Valeurs minimales de l'indice de fiabilité	
	Durée de référence de 1 an $\beta_1$	Durée de référence de 50 ans $\beta_{50}$
RC1	4,2	3,3
RC2	4,7	3,8
RC3	5,2	4,3

L'Eurocode 0 précise que ces objectifs de fiabilité supposent que la détérioration pendant la durée d'utilisation de projet n'abaisse pas ses performances au-dessous de celles escomptées, compte tenu de l'environnement et du niveau de maintenance. Ce degré de détérioration peut être estimé par les calculs, les essais et le retour d'expérience.

D'autres niveaux de fiabilité sont préconisés pour l'état limite de service ( $\beta_{50} = 1,5$  pour les phénomènes irréversibles) et pour l'état limite de fatigue ( $\beta_{50} = 1,5$  à  $3,8$ , selon l'évolution du phénomène et les moyens d'inspection et de surveillance). La durée d'utilisation de projet peut également varier de 10 ans pour les structures provisoires, à 50 ans pour les bâtiments et structures courantes ; elle atteint 100 ans, voire plus, pour les ouvrages de génie civil et les structures monumentales.

L'équivalence entre les deux durées de référence est obtenue par la relation entre les probabilités d'un système en série :  $\Phi(-\beta_n) = [\Phi(-\beta_1)]^n$ . Cette équivalence est purement théorique puisqu'elle ne prend pas en compte les phénomènes suivants :

- corrélation entre les variables, entre les différentes années de la durée de vie ; en réalité, les variables intrinsèques à la structure (géométrie, matériaux et conditions aux limites) sont intrinsèques à la structure, et par conséquent, leur corrélation est quasi-parfaite dans le temps, contrairement aux variables de chargement qui sont faiblement corrélées, voire totalement indépendantes, d'une année à l'autre ;
- dégradation des éléments de la structure au cours du temps, qui a un impact sensible sur la relation entre la fiabilité à 1 an et à 50 ans.

En toute rigueur, il ne faut pas considérer qu'il y a équivalence stricte entre les niveaux de fiabilité réels pour les deux durées de référence, mais simplement une correspondance « notionnelle » des fiabilités cibles.

Les objectifs de fiabilité spécifiés par le comité mixte de fiabilité des structures (JCSS 00) sont indiqués dans le tableau 3, pour la période de référence, en fonction des conséquences et des coûts des mesures de sécurité. La période de référence est habituellement prise égale à 50 ans pour les bâtiments et 100 ans pour les ouvrages d'art.

**TABLEAU 3.** Probabilités de défaillance admissibles dans le cadre de la réhabilitation

Coût des mesures de sécurité	Conséquences de la défaillance		
	Mineures	Modérées	Fortes
Elevé	$10^{-3}$	$5 \times 10^{-4}$	$10^{-4}$
Normal	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$5 \times 10^{-6}$
Faible	$10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$10^{-6}$

Dans ce tableau, la plage de fiabilité varie de  $\beta = 3,09$  (i.e.  $P_f = 10^{-3}$ ) à  $\beta = 4,75$  (i.e.  $P_f = 10^{-6}$ ). Lorsqu'il s'agit de conséquences irréversibles, il n'est pas possible d'admettre une probabilité de défaillance supérieure à  $10^{-3}$ .

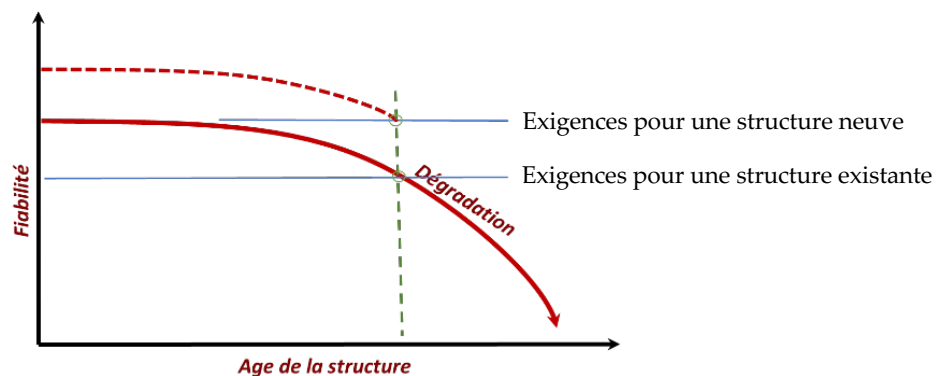
L'ISO 13822:2010 spécifie également des probabilités cibles en fonction du mode et des conséquences de la défaillance, qui pour l'état limite ultime se situent respectivement à  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  et  $10^{-5}$  pour des conséquences faibles, moyennes et élevées, et pour l'état limite de service, à  $10^{-2}$  dans le cas irréversible et à 0,50 pour le cas réversible ; ces probabilités sont données pour la durée de service résiduelle.

#### IV. ADAPTATIONS REGLEMENTAIRES POUR LA REHABILITATION

##### A. Objectifs de fiabilité pour une structure existante

Plusieurs raisons incitent à spécifier des objectifs pour la réhabilitation, différents de ceux adoptés pour la conception des structures neuves :

1. Les structures existantes ont subi des dégradations « normales », tout au long de leur durée d'exploitation (figure 2). Il paraît donc incohérent d'exiger aux structures existantes, un niveau de performance identique à celui des structures neuves qui n'ont pas subi de dégradation. Cette constance de la cible, quel que soit l'âge de la structure, conduit à un règlement non-homogène. La cohérence du règlement implique un niveau de fiabilité de la structure neuve plus élevé que celui de cette même structure lorsqu'elle devienne âgée, pour tenir compte de la marge consommée par le vieillissement. Autrement dit, le fait d'exiger le même niveau de fiabilité pour les structures neuves et existantes, signifie que la fiabilité de la structure existante était plus élevée lorsqu'elle était neuve que celle des structures nouvellement construites.



**FIGURE 2.** Exigences de fiabilité pour une structure neuve et vieillissante

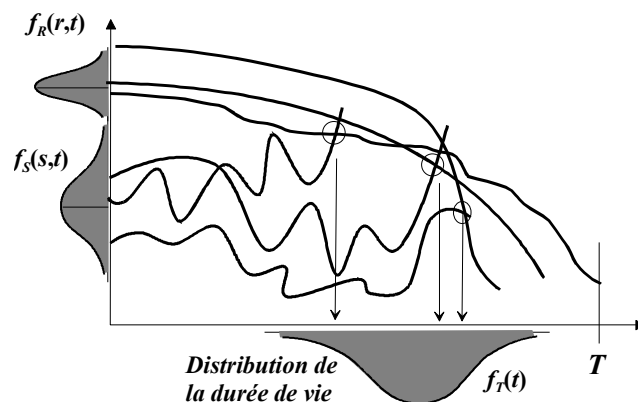
2. La connaissance de la structure existante peut être complètement maîtrisée, puisqu'il est possible d'effectuer des mesures de la géométrie et des propriétés mécaniques et physico-chimiques, lors des campagnes d'inspection et de diagnostic, en plus des possibilités d'expérimentations en laboratoire sur des échantillons prélevés de la structure.

3. La durée de vie résiduelle est plus faible pour les structures existantes, et l'utilité de l'investissement est plus faible par rapport à la durée d'exploitation envisagée. La balance économique implique nécessairement des budgets restreints en fonction de la durée du projet à considérer lors de la réhabilitation.
4. Il y a un risque de déclassement de la majorité des structures existantes lorsqu'on applique les règles pour les structures neuves, à cause de l'évolution des normes, conduisant à des pertes économiques insupportables. Les règles de l'époque de construction diffèrent de celles en vigueur lors de l'évaluation ou de la réhabilitation, ce qui nécessite des adaptations argumentées et de meilleures considérations des risques effectifs. Cette situation est souvent rencontrée lors du calcul des charges climatiques (neige et vent) et des actions sismiques.
5. La nécessité de préserver un grand nombre de structures existantes pour des raisons économiques, culturelles et historiques. La valeur patrimoniale des structures existantes justifie des adaptations de la fiabilité et des analyses spécifiques du risque, sans lesquelles l'exploitation du patrimoine bâti ne sera pas envisageable.

#### B. Prise en compte de la dégradation

La dégradation des structures et ouvrages est inhérente aux propriétés physico-chimiques des matériaux et aux conditions d'exploitation, y compris l'environnement climatique et géotechnique. Les phénomènes de dégradation impactent le niveau de performance, en dépit des tâches d'entretien et de maintenance. Lors de la phase de conception, l'objectif de fiabilité pour les structures neuves comprend des provisions permettant de tenir compte de la réduction des performances suite aux dégradations.

La figure 3 illustre les trajectoires aléatoires des charges et des résistances, dont le croisement des trajectoires permet de déterminer la distribution de la durée de vie. Le vieillissement de la structure conduit à la diminution de son niveau de fiabilité avec l'âge de la structure. Les règles de calcul, notamment les Eurocodes, spécifient le niveau de fiabilité des structures neuves, permettant de maintenir une fiabilité satisfaisante en fin de durée de projet (i.e. 50 ou 100 ans), sous des conditions de dégradations « normales ». En l'absence d'actions de maintenance et de réhabilitation, la probabilité de défaillance augmente de façon monotone avec l'âge de la structure.



**FIGURE 3.** Distribution de la durée de vie à partir des trajectoires aléatoires des variables

Du point de vue de l'acceptabilité des risques, il convient d'admettre une augmentation « raisonnable » du risque pour une structure ancienne. Ce niveau de risque doit toutefois rester en-dessous de celui permettant la protection de la vie humaine.

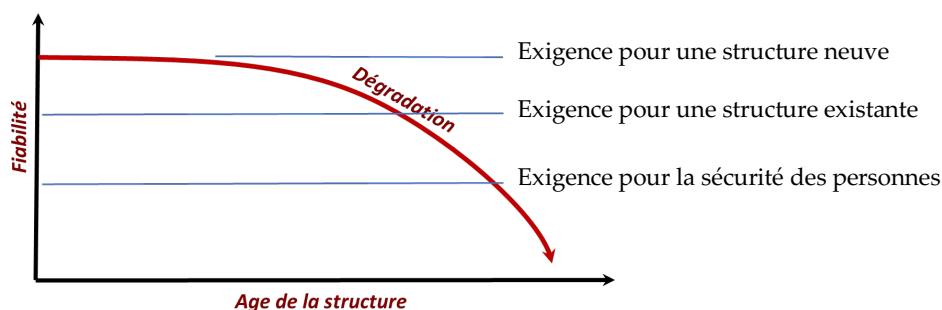
### C. Maîtrise des incertitudes

Les incertitudes sont plus faibles pour les structures existantes, pour les raisons suivantes :

- Capacité de mener des investigations in-situ :
  - possibilité de mesurer la géométrie ;
  - possibilité d'évaluer les propriétés des matériaux ;
  - possibilité de réaliser des essais de chargement ;
- Réduction des incertitudes des modèles :
  - incertitudes du modèle de calcul pouvant être réduites ;
  - incertitudes des modèles statistiques pouvant être réduites ;
  - modèles de charge pouvant être évalués pour le cas spécifique de l'ouvrage ;
- Capacité de faire une surveillance de la structure :
  - instrumentation possible des paramètres structuraux ;
  - mise à jour des conditions d'exploitation et possibilité d'envoi d'alertes.

## V. ACCAAPTABILITE DU RISQUE FINANCIER ET HUMAIN

La spécification des exigences de fiabilité pour une structure existante doit respecter deux critères (figure 4) : la rentabilité financière du projet de réhabilitation, permettant de favoriser la réhabilitation par rapport à la démolition/reconstruction, d'une part, et de l'acceptabilité du risque vis-à-vis des pertes en vie humaine, permettant d'assurer la sécurité des personnes indépendamment de l'âge de la structure, d'autre part.



**FIGURE 4.** Exigences de fiabilité selon les critères financier et humain

### A. Critère d'optimisation financière de la réhabilitation

Pour déterminer le niveau de fiabilité optimal d'une structure existante, nous cherchons à minimiser l'espérance du coût total en fonction de la situation considérée (Vrouwenvelder 14) :

- **Evaluation** : en l'absence d'interventions spécifiques, le seul risque financier est celui du coût de défaillance ; dans ce cas, l'espérance du coût total est exprimée par :

$$E[C_T(t_{ref}, d_0)] = C_f P_f(t_{ref}, d_0) \quad (5)$$

où  $C_T(\cdot)$  est le coût total,  $C_f$  est le coût des conséquences de la défaillance,  $P_f(\cdot)$  est la probabilité de défaillance,  $t_{ref}$  est la période de référence,  $d_0$  est le vecteur des paramètres de conception initiale, et  $E[\cdot]$  est l'opérateur d'espérance mathématique.

- **Réhabilitation** : les coûts engagés lors des projets de réhabilitation peuvent être décomposés en une partie indépendante du dimensionnement  $C_0$  et en une partie liée au choix du nouveau paramètre de conception  $C_R(d)$  ; dans ce cas, l'espérance du coût total s'écrit :

$$E[C_T(t_{ref}, d)] = C_0 + C_R(d) + C_f P_f(t_{ref}, d) \quad (6)$$

Les études menées par Steenbergen et Vrouwenvelder (Steenbergen et al., 10) sur l'application de ces fonctions, ont conduit à proposer une réduction de l'indice de fiabilité de 0,5 pour la réhabilitation et de 1,5 pour l'évaluation. Cela dit, pour la classe CC2, l'indice de fiabilité est ramené à 3,3 pour le projet de réhabilitation et à 2,3 lorsqu'il s'agit d'évaluation.

Il est important de noter que ces indices doivent tenir compte de la dégradation de la structure, pour permettre de garantir l'objectif de fiabilité tout au long de la période de référence  $t_{ref}$ .

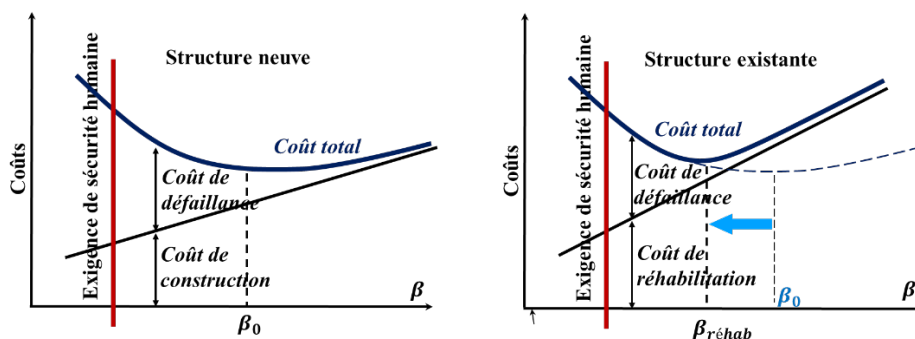


FIGURE 5. Coût total pour une structure neuve et existante

### B. Sécurité des personnes

De nombreux travaux scientifiques ont été menés sur l'acceptabilité du risque, selon les activités socio-économiques. Une première référence peut être obtenue par la probabilité associée à la mortalité naturelle, qui s'élève à  $10^{-6}/h$ . Pour tenir compte des activités humaines, le « risque de base » est défini par « la grandeur du risque de décès qu'il est impossible d'éviter au cours de la vie dans la société ». Ce risque est estimé à  $10^{-4}/an$  et correspond à environ 1/3 du risque des divers accidents (véhicules, chutes, incendies, homicide, ...). En conséquence, la probabilité de défaillance de  $10^{-4}/an$  peut être considérée comme acceptable et celle de  $10^{-6}/an$  est négligeable.

La norme canadienne (CSA, 14) définit les objectifs de fiabilité des ouvrages, en fonction des conséquences de la défaillance, comme le montre le tableau 4.

**TABLEAU 4. Objectifs de fiabilité en fonction des conséquences**

Classe de fiabilité	Conséquence de la défaillance	Objectif de probabilité annuelle
Classe 1	Dommages importants à la vie humaine et/ou à l'environnement	$10^{-5}/\text{an}$
Classe 2	Faibles dommages à la vie humaine et/ou à l'environnement	$10^{-3}/\text{an}$
Service	Altération et/ou perturbation, sans conséquence notable	$10^{-1}/\text{an}$

Lorsqu'il s'agit de vie humaine, deux niveaux de perception du risque sont à considérer :

- **Risque individuel** : il correspond au « risque de base » (risque de décès en vivant normalement dans la société), évalué pour les pays développés à  $10^{-4}/\text{an}$  (ISO2394). D'une manière plus générale, les travaux dans la littérature suggèrent des valeurs plus faibles pour les structures :  $10^{-6}/\text{an}$  pour la classe CC2 et  $10^{-5}/\text{an}$  pour la classe CC3. La norme suisse (SIA269) fixe l'objectif d'évaluation à  $10^{-5}/\text{an}$  pour le risque individuel.
- **Risque collectif** : ce risque correspond au décès collectif d'un groupe de personnes, étant donné que l'acceptabilité diminue avec l'augmentation du nombre de décès ; l'ISO 31000 (ISO 31000, 10) spécifie cette probabilité en fonction du nombre de personnes mises en danger  $N$ , à l'aide de l'expression :  $P_f \leq A N^{-\alpha}$ , avec les paramètres  $\alpha = 2$  et  $A = 0,01$  ou  $0,10$  définis selon la criticité. L'ISO 2394 propose une formulation similaire, qui tient compte du nombre de décès par rapport au nombre de personnes mises en danger :

$$P_f(N) \leq \frac{A \cdot N^{-\alpha}}{\Pr(N|F)} \quad (7)$$

avec  $\Pr(N|F)$  la probabilité du nombre de décès en cas de défaillance  $F$ .

Au moyen de l'analyse statistique, Tanner et Hingorani (Tanner et al. 10) ont élaboré une relation entre la surface affectée et le nombre de décès pour les classes CC2 et CC3, conduisant à un seuil minimum d'acceptabilité de :  $1,8 \times 10^{-4}/\text{an}$  pour CC2 et  $10^{-4}/\text{an}$  pour CC3.

### C. Période de référence et objectifs de fiabilité

Pour adapter le niveau de fiabilité des structures existantes, la durée de référence doit être choisies en fonction du type de conséquences :

- Dans le cas de pertes en vie humaine, la durée de référence est égale à 1 an, pour garantir une exposition homogène au risque (i.e. l'utilisateur qui accède à la structure en fin de vie, ne doit pas être exposé à plus de risque que celui qui y accède au début de la durée de référence) ;
- Dans le cas de pertes économiques, la durée de référence est égale à la durée d'exploitation visée, i.e. durée de référence du projet, pour permettre des considérations socio-économiques à long terme et des analyses de type coûts-bénéfices.

Le bulletin du Comité Européen du Béton *fib-80* « Partial factor methods for existing concrete structures » (CEB-Fib 16), présente une bonne synthèse des cibles proposées dans la littérature scientifique.

Du point de vue économique, trois niveaux de fiabilité peuvent être considérés :

- Indice de fiabilité pour la conception d'une structure neuve ;
- Indice de fiabilité pour la conception de la réhabilitation d'une structure existante ; une diminution de 0,5 est proposée ;
- Indice de fiabilité pour l'acceptation d'une structure ancienne ; une diminution de 1,5 est proposée.

## VI. FORMAT ACTUEL DES COEFFICIENTS PARTIELS

Les coefficients partiels sont définis pour garantir le niveau de fiabilité escompté. Ces coefficients sont indissociables des modèles des variables. Toute modification des modèles (loi, coefficient de variation, corrélations, période de retour, facteur d'importance, etc.) implique la modification des coefficients partiels associés.

### A. Résistance des matériaux

Les coefficients partiels des matériaux sont donnés dans le format suivant :

$$\gamma_M = \gamma_{Rd} \gamma_m = \gamma_{Rd1} \gamma_{Rd2} \gamma_m \quad (8)$$

où  $\gamma_m$  est le coefficient associé à la variabilité statistique du matériau, et  $\gamma_{Rd} = \gamma_{Rd1} \gamma_{Rd2}$  est associé aux autres sources d'incertitudes, avec  $\gamma_{Rd1}$  le coefficient associé aux incertitudes de modèle et  $\gamma_{Rd2}$  le coefficient associé aux incertitudes géométriques. Pour un indice de fiabilité cible  $\beta = 3,8$ , les coefficients partiels de résistance pour le béton armé sont calculés par :

**TABLEAU 5. Décomposition des coefficients partiels pour le béton armé**

Paramètre	Béton	Armatures
Coefficient de variation	$V_c = 0,15$	$V_s = 0,05$
Variabilités du matériau	$\gamma_c = 1,39$	$\gamma_s = 1,08$
Incertitudes de modèle	$\gamma_{Rd1} = 1,05$	$\gamma_{Rd1} = 1,025$
Incertitudes de géométrie	$\gamma_{Rd2} = 1,05$	$\gamma_{Rd2} = 1,05$
Incertitudes diverses	$\gamma_{Rd} = 1,05 \times 1,05 = 1,10$	$\gamma_{Rd} = 1,025 \times 1,05 = 1,08$
Coefficient partiel	$\gamma_c = 1,1 \times 1,39 = 1,50$	$\gamma_s = 1,08 \times 1,08 = 1,15$

### B. Charges permanentes

Les coefficients partiels des charges permanentes doivent également tenir compte des incertitudes sur les matériaux et produits eux-mêmes, d'une part, et sur le modèle employé pour l'évaluation des charges, d'autre part ; ce qui s'écrit :

$$\gamma_G = \gamma_{Ed,G} \gamma_g \quad (9)$$

avec  $\gamma_g$  est le coefficient associé à la variabilité statistique de la charge permanente, et  $\gamma_{Ed,G}$  le coefficient associé aux incertitudes du modèle de calcul. Pour la classe de fiabilité RC2, le coefficient partiel intrinsèque est égal à 1,13 pour le poids propre et à 1,27 pour les autres charges permanentes, et le coefficient du modèle est égal à 1,05. Ainsi le coefficient partiel des charges permanentes est obtenu par :  $\gamma_G = 1,05 \times 1,27 = 1,35$ .

### C. Charges d'exploitation

Les coefficients partiels des charges variables respectent le même format :

$$\gamma_E = \gamma_{Ed} \gamma_e \quad (10)$$

avec  $\gamma_e$  est le coefficient associé à la variabilité intrinsèque du chargement, et  $\gamma_{Ed}$  le coefficient associé aux incertitudes du modèle de calcul. La calibration du coefficient intrinsèque se base sur les notions de période de retour, égale à 50 ans pour les charges d'exploitation, de vent et de neige, et à 1000 ans pour le trafic. Les coefficients de variation des charges sont calculés pour un modèle de valeurs extrêmes, de type Gumbel, sur une période de référence de 5 ans pour les charges d'exploitation et de 1 an pour les autres charges. Pour les charges fonctions du temps (trafic, vent et neige), la composante dépendant du temps est séparée de celle invariante dans le temps. La charge est donc obtenue par le produit des deux termes.

## VII. AJUSTEMENT DES COEFFICIENTS PARTIELS

L'acceptabilité d'une structure existante dépend de deux critères : économie et protection de la vie humaine ; ce deuxième critère constitue le niveau minimum acceptable. La probabilité de défaillance de  $10^{-4}$ /an peut être considérée comme valeur plancher lorsqu'une activité humaine est mise en danger (i.e. CC2 et CC3). Dans le cas d'une activité collective, notamment en classe CC3, la valeur de  $10^{-5}$ /an peut être proposée.

### A. Structures neuves

Les niveaux de fiabilité cible et les coefficients partiels pour les structures neuves sont rappelés dans le tableau 6, conformément à l'Eurocode 0. Les coefficients partiels sont notés :  $\gamma_c$  pour la résistance du béton,  $\gamma_s$  pour la résistance de l'acier,  $\gamma_{pp}$  pour le poids propre,  $\gamma_G$  pour les charges permanentes,  $\gamma_Q$  pour les charges d'exploitation,  $\gamma_T$  pour le trafic,  $\gamma_W$  pour le vent et  $\gamma_S$  pour la neige.

**TABLEAU 6. Coefficients partiels pour les structures neuves**

Structure neuve	$\beta_{50}$	$P_{f,50}$	$\gamma_c$	$\gamma_s$	$\gamma_{pp}$	$\gamma_G$	$\gamma_Q$	$\gamma_T$	$\gamma_W$	$\gamma_S$
RC1	3,3	$5 \times 10^{-4}$	1,37	1,14	1,17	1,29	1,38	1,17	1,51	2,03
RC2	3,8	$7 \times 10^{-5}$	1,53	1,16	1,19	1,33	1,59	1,23	1,62	2,27
RC3	4,3	$9 \times 10^{-6}$	1,72	1,19	1,21	1,37	1,81	1,29	1,75	2,53

### B. Structures existantes

Les niveaux de fiabilité cible doivent être adaptés à chacune des deux situations :

- Evaluation des structures existantes : il s'agit de vérifier le niveau d'exigence pour justifier l'exploitation dans l'état actuel, sans modification du système structural.
- Réhabilitation des structures existantes : il s'agit de définir le niveau d'exigence pour les travaux de réhabilitation ou de renforcement des structures.

#### B.1. Objectif d'évaluation

Le tableau 7 fournit les indices de fiabilité et les coefficients partiels, ajustés à partir de la probabilité de défaillance calée à  $10^{-4}$ /an pour la classe RC2 (i.e.  $10^{-3}$ /an pour RC1 et  $10^{-5}$ /an pour RC3). Ce tableau constitue le minimum acceptable pour une structure, compte tenu du risque pour la vie humaine (i.e. en cohérence avec la notion de « risque de base »).

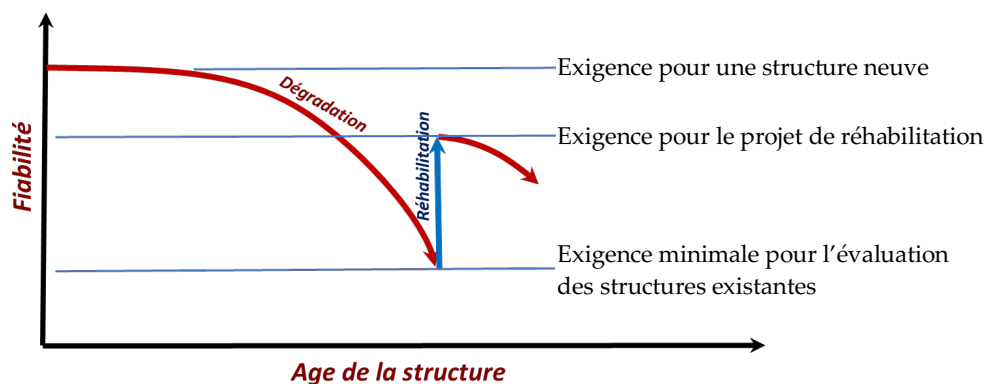
**TABLEAU 7. Coefficients partiels pour l'évaluation des structures**

$P_{f,1,cc2} = 10^{-4}/an$	$\beta_{50}$	$P_{f,50}$	$\gamma_c$	$\gamma_s$	$\gamma_{pp}$	$\gamma_G$	$\gamma_Q$	$\gamma_T$	$\gamma_W$	$\gamma_S$
RC1	1,6	$5 \times 10^{-2}$	1,05	1,06	1,11	1,17	0,87	1,00	1,22	1,45
RC2	2,6	$5 \times 10^{-3}$	1,17	1,10	1,14	1,24	1,13	1,09	1,37	1,74
RC3	3,3	$5 \times 10^{-4}$	1,28	1,13	1,17	1,29	1,38	1,16	1,51	2,03

Pour la classe RC2, les coefficients partiels ajustés se ramènent à 1,17 et 1,10 pour la résistance du béton et des aciers, respectivement, et à 1,24 et 1,13 pour les charges permanentes et d'exploitation, respectivement. Nous remarquons que la réduction des charges de calcul est très importante, notamment pour les charges d'exploitation.

#### B.2. Objectif de réhabilitation

Dans le cas des projets de réhabilitation d'une structure existante, les objectifs de fiabilité peuvent être inférieurs à ceux d'une structure neuve, pour des raisons économiques et de faisabilité des travaux. Toutefois, le niveau d'exigence doit laisser une marge suffisante pour tenir compte de la dégradation de la structure, ultérieurement aux travaux de réhabilitation.



**FIGURE 6. Exigences pour l'évaluation et la réhabilitation des structures existantes**

Le tableau 8 fournit les indices de fiabilité et les coefficients partiels, ajustés à partir de la probabilité de défaillance calée à  $10^{-5}/an$  pour la classe RC2 (i.e.  $10^{-4}/an$  pour RC1 et  $10^{-6}/an$  pour RC3). Ces valeurs correspondent aux préconisations de la norme suisse SIA 269.

**TABLEAU 8. Coefficients partiels pour la réhabilitation des structures**

$P_{f,1,CC2} = 10^{-5}/an$	$\beta_{50}$	$P_{f,50}$	$\gamma_c$	$\gamma_s$	$\gamma_{pp}$	$\gamma_G$	$\gamma_Q$	$\gamma_T$	$\gamma_W$	$\gamma_S$
RC1	2,6	$5 \times 10^{-3}$	1,20	1,10	1,15	1,25	1,15	1,10	1,40	1,75
RC2	3,3	$5 \times 10^{-4}$	1,30	1,10	1,17	1,30	1,40	1,15	1,50	2,00
RC3	3,9	$5 \times 10^{-5}$	1,40	1,15	1,20	1,35	1,60	1,25	1,65	2,30

Pour la classe RC2, les coefficients partiels ajustés se ramènent à 1,30 et 1,10 pour la résistance du béton et des aciers, respectivement, et à 1,30 et 1,40 pour les charges permanentes et d'exploitation, respectivement. Nous remarquons que la réduction des charges de calcul est considérable, notamment pour le poids propre des structures en béton armé, qui constitue la charge principale.

### C. Méthodologies d'évaluation des structures existantes

Pour l'évaluation des structures existantes, trois méthodes sont proposées pour permettre d'offrir à l'ingénierie un périmètre d'action qui dépend de la connaissance acquise sur la structure à évaluer :

- **Evaluation simplifiée**, correspondant à un niveau de connaissance minimal de l'état de la structure et des conditions d'exploitation. Ce niveau de connaissance doit permettre de confirmer que la structure est exempte de toute dégradation anormale qui réduit notablement sa capacité portante. Dans cette méthode, les coefficients partiels du tableau 8 peuvent être utilisés (i.e.  $\beta_{50} = 2,6, 3,3$  et  $3,9$  pour RC1, RC2 et RC3, respectivement).
- **Evaluation approfondie**, basée sur une connaissance précise de l'état de la structure, au moyen de diagnostics avec des auscultations destructives et non destructives, d'essais de résistance des matériaux et si nécessaire de la surveillance automatique du comportement et des conditions d'exploitation. Cette connaissance approfondie de l'état de la structure permet de maîtriser les incertitudes et les variabilités des paramètres structuraux. Il convient également de vérifier la validité des hypothèses des modèles statistiques et fiabilistes associés aux grandeurs d'intérêt, notamment les charges appliquées. Dans cette méthode, les coefficients partiels du tableau 7 peuvent être utilisés (i.e.  $\beta_{50} = 1,6, 2,6$  et  $3,3$  pour RC1, RC2 et RC3, respectivement).
- **Evaluation spécifique**, dans laquelle les coefficients partiels sont calculés pour un projet donné. Dans ce cas, la connaissance approfondie de l'état de la structure est exigée, au moyen de diagnostics avec des auscultations destructives et non destructives, d'essais de résistance des matériaux et si nécessaire de la surveillance automatique du comportement et des conditions d'exploitation. Cette connaissance approfondie de l'état de la structure permet d'évaluer et de maîtriser les incertitudes et les variabilités des paramètres structuraux. Les coefficients partiels sont calculés par les formules dans le tableau 9, sous

l'hypothèse de lois lognormales ; ces expressions permettent également d'obtenir les valeurs des coefficients à appliquer, comme celles dans les tableaux 7 et 8.

**TABLEAU 9. Formules à utiliser pour le calcul des coefficients partiels (CEB-Fib 16)**

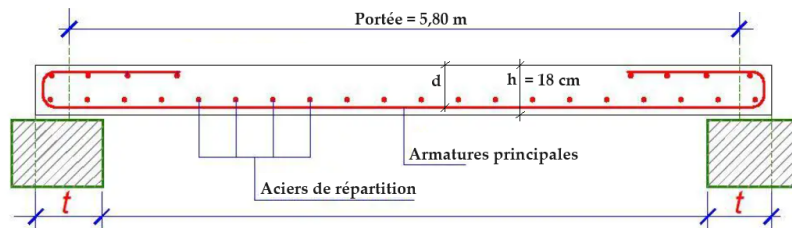
Grandeur	Coefficient partiel
Résistance du matériau	$\gamma_M = \frac{\exp(-1,645 V_{\theta R}) \exp(-1,645 V_m)}{\exp(-0,4 \alpha_R \beta V_{\theta R}) \exp(-\alpha_R \beta V_m)}$
Charges permanentes	$\gamma_G = \frac{\exp(-0,4 \alpha_E \beta V_{\theta E,G})}{\exp(1,645 V_{\theta E,G})} (1 - \alpha_E \beta V_G)$
Charges variables	$\gamma_Q = \frac{\exp(-0,4 \alpha_E \beta V_{\theta E})}{\exp(1,645 V_{\theta E})} \times \frac{1 - V_{E,50}(0,45 + 0,78 \ln(-\ln(\Phi(-\alpha_E \beta)))}{1 - V_{E,50}(0,45 + 0,78 \ln(-\ln(\text{Pr}))}$

Les paramètres de calcul sont :  $\beta$  l'indice de fiabilité cible,  $\alpha_R$  le facteur d'importance de la résistance,  $\alpha_E$  le facteur d'importance de l'effet de l'action,  $V_m$ ,  $V_G$  et  $V_{E,50}$  les coefficients de variation du matériau et des charges permanentes et d'exploitation, pour une durée de référence de 50 ans, respectivement, et  $V_{\theta R}$ ,  $V_{\theta E,G}$  et  $V_{\theta E}$  les coefficients de variation des modèles associés. Dans ces formules, l'indice de fiabilité cible est égal à 1,6, 2,6 et 3,3 pour les classes de fiabilité RC1, RC2 et RC3, respectivement.

## VIII. APPLICATION AUX PROJETS DE REHABILITATION

### A. Exemple 1 : évaluation d'une dalle en béton armé

Cette étude porte sur une dalle en béton armé, simplement appuyée. Sa portée est égale à 5,80 m et son épaisseur est de 18 cm. Les matériaux employés sont un béton C25/30 et un acier S500.



**FIGURE 7. Dalle en béton armé simplement appuyée**

Les charges permanentes sont égales à 1,50 kN/m<sup>2</sup> (chape, carrelage et cloisonnement), auxquelles s'ajoute le poids propre de la dalle. Les charges d'exploitation sont égales à 1,5 kN/m<sup>2</sup>. Les charges de calcul sont ainsi obtenues par :  $p_{Ed} = \gamma_G G + \gamma_Q Q$ , avec  $G = \rho_c h + g'$  ;  $\rho_c$  étant le poids volumique du béton armé,  $h$  l'épaisseur de la dalle et  $g'$  les autres charges permanentes. La règle d'évaluation de la tenue de la dalle en flexion est ainsi donnée par :

$$M_{Rd} = z_u \left( \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, d \right) \frac{f_{yk}}{\gamma_s} A_s \leq M_{Ed} = \frac{(\gamma_G G + \gamma_Q Q) L^2}{8}$$

Le programme d'investigations simplifiées consiste à :

- évaluer la dispersion spatiale de la résistance du béton à l'aide de mesures non destructives par scléromètre ; la réduction des incertitudes statistiques permet de ramener le coefficient du modèle à  $\gamma_m = 1,15$ , au lieu de 1,23, en corrélation avec les coefficients de variation de 0,10 et 0,15, respectivement (CEB-Fib 16) ;
- déterminer avec précision l'épaisseur de la dalle et la position des armatures à l'aide d'un géoradar ; le coefficient partiel associé à la géométrie peut ainsi être ramené à  $\gamma_{Rd2} = 1,0$ . Les coefficients partiels des matériaux sont ainsi obtenus par :

$$\gamma_c = 1,1 \times 1,0 \times 1,15 = 1,27$$

$$\gamma_s = 1,025 \times 1,0 \times 1,07 = 1,10$$

Concernant le modèle de chargement, l'étude de la dispersion des charges permet de réduire les coefficients partiels associés, conduisant au résultat suivant :

$$\gamma_G = 1,05 \times 1,22 = 1,28$$

$$\gamma_Q = 1,05 \times 1,36 = 1,43$$

Ces coefficients sont similaires à ceux fournis dans le tableau 8, pour la classe RC2.

La justification de la dalle avec ces coefficients permet d'admettre, soit une augmentation des charges d'exploitation de +73%, soit une dégradation de la section d'acier de -10%.

Par ailleurs, les investigations approfondies permettent de réduire les coefficients partiels à :  $\gamma_c = 1,15$ ,  $\gamma_s = 1,10$ ,  $\gamma_G = 1,20$  et  $\gamma_Q = 1,35$ . La justification de la dalle avec ces coefficients permet d'admettre, soit une augmentation des charges d'exploitation de +242%, soit une dégradation de la section d'acier de -17%.

### B. Exemple 2 : réhabilitation d'un bâtiment industriel

Le projet de réhabilitation d'un bâtiment industriel est considéré dans cet exemple. Le bâtiment, construit en 1936, comporte un rez-de-chaussée, deux étages et des combles, pour une surface totale de 6000 m<sup>2</sup>. Quelques plans d'origine et documents de bureaux d'études sont disponibles et indiquent un béton équivalent à la classe C25/30, des armatures de classe Fe300, et une surcharge d'exploitation de 1250 daN/m<sup>2</sup>.



**FIGURE 8.** Bâtiment industriel à réhabiliter

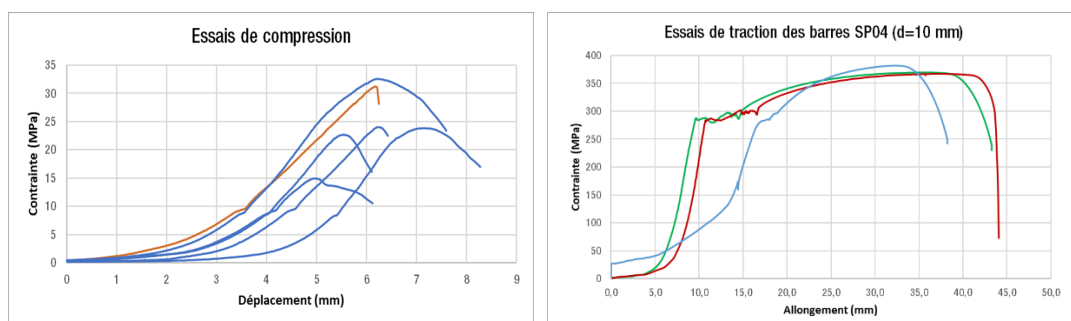
Trois niveaux d'investigations sont considérés :

1. Inspection visuelle des désordres et étude du dossier d'ouvrage ;
2. Auscultations non destructives, comprenant des relevés géométriques, des estimations de la qualité du béton par scléromètre et par ultrason, et reconnaissance de la répartition et des positions des armatures à l'aide d'un géoradar ;
3. Auscultations destructives, comprenant des carottages, des sondages et des prélèvements d'échantillons, en plus de l'identification du front de carbonatation du béton ; ces investigations sont accompagnées d'une modélisation approfondie de la structure.

Les auscultations au géoradar permettent de confirmer l'homogénéité de l'épaisseur de la dalle, la régularité des armatures et la faible dispersion des enrobages. Les mesures au scléromètre donnent une estimation de la résistance caractéristique du béton égale à 20,4 MPa, ce qui est légèrement supérieure à celle estimée par ultrason, égale à 19 MPa. Les essais sur carottes donnent une résistance caractéristique de 21,6 MPa ; la classe de résistance C20/25 est ainsi proposée pour l'évaluation de la capacité portante. Les essais de traction permettent d'évaluer la résistance caractéristique des aciers à 247,6 MPa, soit une classe de résistance S235, contrairement à la classe Fe300 estimées par le bureau d'études.



**FIGURE 9.** Sondages destructifs des armatures inférieures et supérieures des poutres



**FIGURE 10.** Essais de compression du béton et de traction des aciers

Le tableau 10 indique les charges d'exploitation admissibles, en fonction du niveau d'investigation. Les différents cas correspondent aux degrés d'investigation, qui portent principalement sur la qualité des informations récoltées en termes de pathologies, de paramètres statistiques et de modèle de calcul. Concernant ce dernier, les mesures destructives et non destructives ont permis d'affiner les caractéristiques géométriques des poteaux par rapport aux plans disponibles, et d'évaluer par conséquent leur rigidité réelle, conduisant à la redistribution des efforts internes dans la structure. Les résultats montrent que la mise en œuvre d'investigations approfondies permet d'augmenter les charges admissibles de 12,5 kN/m<sup>2</sup> à 23,5 kN/m<sup>2</sup>, soit +88%. L'apport de l'ajustement des coefficients partiels est considérable dans ce projet de réhabilitation.

**TABLEAU 10. Charges d'exploitation admissibles selon le niveau d'investigation**

Type d'investigation	Observations/Actions	Ajustements	Charges d'exploitation
Aucune	Indications sur les plans d'origine	Aucun	12,5 kN/m <sup>2</sup>
Inspections visuelles	Absence de pathologies Très peu de corrosion	Calibration des coefficients pour $\beta = 3,8$	17,5 kN/m <sup>2</sup>
Auscultations non destructives	Relevés géométriques Evaluation du béton	$\gamma_G = 1,20$	18,0 kN/m <sup>2</sup>
Auscultations destructives	Essais en laboratoire	$\gamma_c = 1,30$ $\gamma_s = 1,10$	20,5 kN/m <sup>2</sup>
	Modèle de calcul (calcul de la rigidité effective des poteaux)	$\gamma_{Ed,G} = \gamma_{Ed} = 1,00$	23,5 kN/m <sup>2</sup>

## II. CONCLUSION

Cet article porte sur l'ajustement des coefficients partiels dans le cadre des projets de réhabilitation des structures. Cet ajustement doit tenir compte du niveau de connaissance sur les structures existantes et de la réduction des incertitudes, apportée par des investigations plus ou moins approfondies. Dans ce cas, l'acquisition de nouvelles informations sur la structure est rémunérée par le gain en termes de maîtrise des incertitudes et du choix optimisé des coefficients partiels.

L'évaluation des structures peut se faire selon trois niveaux d'investigation : simplifiée, approfondie et spécifique. Les objectifs de fiabilité sont ensuite définis en fonction du niveau d'investigation et de la classe de conséquence. Ainsi, l'ajustement des coefficients partiels permet de favoriser la réhabilitation des structures existantes et l'emploi des matériaux en place, et s'inscrit pleinement dans la stratégie de développement durable et de circuit court.

Les projets d'envergure peuvent également bénéficier d'une approche d'optimisation de types coûts-bénéfices, permettant d'affiner le choix des coefficients et de tenir compte des incertitudes de façon explicites à l'aide du calcul de fiabilité, afin de réduire considérablement les coûts de réhabilitation.

Toutefois, l'ajustement des coefficients partiels ne doit pas affecter le degré de conservatisme lorsqu'il s'agit de nouvelles situations sans retour d'expérience sur les matériaux et les charges,

d'une part, et lorsque les modèles de calcul sont très imprécis et peuvent s'écarter considérablement du comportement réel, d'autre part.

Plus généralement, l'application pratique des techniques d'ajustement des coefficients partiels nécessite des compétences avérées en fiabilité des structures, et doit par conséquent s'accompagner d'efforts pédagogiques en formation initiale et continue, permettant la mise à niveau des élèves et ingénieurs, pour éviter des erreurs de jugement et d'évaluation des incertitudes et des risques associés.

## REFERENCES

CEB-Fib (2016). Partial factor methods for existing concrete structures. *Fib bulletin 80, Fédération Internationale du Béton/Comité Européen du béton*.

A. Chateauneuf, Y. Aoues et R. Faddoul (2012). Méthodes d'évaluation de la sûreté des structures vieillissantes – Panorama et benchmarking. *Projet IMdR n° P10-2, Institut pour la Maîtrise des Risques*.

CSA (2014). Canadian Highway Bridge Design Code: Canadian Standards. *Canadian Standards Association*.

D. Diamantidis, P. Bazzurro (2007). Safety Acceptance Criteria for Existing Structures. *Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication, Stanford University, CA, USA*.

O. Ditlevsen and H.O. Madsen (1996). *Structural Reliability Methods. Wiley Chichester*.

ISO 13822 (2010). Bases du calcul des constructions — Évaluation des constructions existantes. *Organisation internationale de normalisation, AFNOR*.

ISO 2394 (2015). Principes généraux de la fiabilité des constructions. *Organisation internationale de normalisation, AFNOR*.

ISO 31000 (2010). Management du risque - Principes et lignes directrices. *Organisation internationale de normalisation, AFNOR*.

JCSS (2000). Probabilistic assessment of existing structures. *The Joint Committee on Structural Safety, RILEM Publications*.

JCSS (2001). JCSS Probabilistic Model Code. *The Joint Committee on Structural Safety (publication en ligne régulièrement mise à jour)*.

M. Lemaire, en collaboration avec A. Chateauneuf et J.C. Mitteau (2005). Fiabilité des structures : couplage mécano-fiabiliste statique. *Editions Hermès, Paris*.

H.O. Madsen, S. Krenk and N.C. Lind (1986). *Methods of Structural Safety. Prentice-Hall, Inc.*

NEN 8700 (2009). Basis of structural assessment of existing structures - Buildings - The minimum safety level. *Nederlands Normalisatie Instituut*.

NF EN 1990 (2003). Bases de calcul des structures. *Comité Européen de Normalisation CEN, AFNOR.*

SIA 269 (2011). Maintenance des structures porteuses. *Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes, Zurich.*

R. Steenbergen, A. Vrouwenvelder (2010). Safety philosophy for existing structures and partial factors for traffic loads on bridges. *Heron, 55-2.*

M. Sykora, M. Holicky, K. Jung and D. Diamantidis (2017). Target Reliability for Existing Structures Considering Economic and Societal Aspects. *Structures and Infrastructures Engineering, 13-1:181-194.*

P. Tanner et R. Hingorani (2010). Development of risk-based requirements for structural safety. *In Proceedings of the Joint IABSE – fib Conference Codes in Structural Engineering, Dubrovnik, 3-5 May.*

A. Vrouwenvelder (2014). Reliability based structural design. *Safety, Reliability and Risk Management – editors: Steenbergen & van Gelder, Taylor & Francis Group.*