



**HAL**  
open science

## **Sûreté de Fonctionnement et Génie Civil -Pour des infrastructures durables**

Barbat Jérôme, Lofficial Cédric

### ► **To cite this version:**

Barbat Jérôme, Lofficial Cédric. Sûreté de Fonctionnement et Génie Civil -Pour des infrastructures durables. Congrès Lambda Mu 23 “ Innovations et maîtrise des risques pour un avenir durable ” - 23e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2022, Paris Saclay, France. <hal-03966574>

**HAL Id: hal-03966574**

**<https://hal.science/hal-03966574v1>**

Submitted on 31 Jan 2023

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

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



HAL Authorization

# Sûreté de Fonctionnement et Génie Civil – Pour des infrastructures durables

## Dependability and Civil Engineering – For sustainable infrastructures

BARBAT Jérôme  
SECTOR

7 Avenue Didier Daurat, 31700 Blagnac  
jerome.barbat@sector-group.net

LOFFICIAL Cédric  
SECTOR

7 Avenue Didier Daurat, 31700 Blagnac  
cedric.lofficial@sector-group.net

**Résumé** — Certains accidents récents (exemple : ruine du pont de Gênes) mettent en lumière des lacunes dans la spécification et la démonstration de la fiabilité des ouvrages de Génie Civil (GC) alors qu'il est possible, au même titre que l'électronique ou encore la mécanique, d'évaluer de manière probabiliste la ruine d'un ouvrage en considérant un certain nombre de caractéristiques intrinsèques (paramètres clés).

Au travers de ses différents projets intégrant un périmètre « Génie Civil », SECTOR intègre désormais dans sa méthodologie de Sûreté de Fonctionnement (SdF) une approche permettant d'intégrer la probabilité de ruine du GC ainsi que l'identification et le suivi de l'ensemble des paramètres de dimensionnement et de réalisation ayant une influence sur la durabilité de celui-ci. Cette publication donne les grands principes de cette démarche méthodologique et les règles associées.

**Mots-clés** — *Génie Civil, Infrastructures, Durabilité, Fiabilité, Sûreté de Fonctionnement*

**Abstract**— Some recent accidents (e.g. ruin of the Genoa bridge) highlight shortcomings in the specification and demonstration of the reliability of civil engineering works when it is possible, in the same way as electronics or mechanics, to evaluate in a probabilistic way the ruin of a structure by considering a certain number of intrinsic characteristics (key parameters).

Through its various projects integrating a "Civil Engineering" perimeter, SECTOR now integrates into its Dependability methodology an approach allowing to integrate the probability of ruin of the infrastructures as well as the identification and the follow-up of all the key parameters having an influence on the durability. This publication gives the main principles of this methodological approach and the associated rules.

**Keywords** — *Civil Engineering, Infrastructures, Sustainability, Reliability, Dependability*

---

### I. INTRODUCTION

Dans un contexte industriel aux exigences croissantes en termes de fiabilité et durabilité de ses ouvrages, les approches de Sûreté de Fonctionnement quantifiées sont d'usage pour les systèmes complexes à dominante mécanique, électronique ou

non-électronique (hydraulique, pneumatique, etc.). Cependant, nous avons effectué le constat que, d'expérience, les exigences de nos clients se focalisent davantage sur ces systèmes en ayant tendance à occulter les infrastructures de Génie Civil les supportant. A titre d'exemple, il est d'usage d'être amené à démontrer la fiabilité quantitative (ex : Fréquence Annuelle d'Occurrence) d'un pont roulant vis-à-vis du risque de chute de charge mais le périmètre s'arrête très souvent aux points d'ancrage sur le Génie Civil, ce dernier étant non considéré dans les études de SdF.

Pourtant, les textes normatifs de dimensionnement d'ouvrages de Génie Civil permettent de faire le lien entre les paramètres intrinsèques de ceux-ci et une probabilité de ruine. Ainsi, il est possible de définir dès la phase d'avant-projet un objectif quantitatif de fiabilité du Génie Civil dont il sera possible de démontrer l'atteinte au travers d'études de Sûreté de Fonctionnement et d'intégrer le résultat obtenu dans une démonstration globale de tenue d'objectifs SdF du système complet, incluant l'ouvrage de Génie Civil.

Dans les faits, l'approche méthodologique visant à démontrer la tenue d'exigences de Sûreté de Fonctionnement d'ouvrages de Génie Civil spécifiés au préalable (incluant la probabilité de ruine introduite ci-dessus) ne diffère pas grandement de l'approche utilisée pour des systèmes plus classiques. En effet, elle repose sur les étapes suivantes :

- Une Analyse Fonctionnelle permettant notamment d'établir l'environnement dans lequel se trouve l'infrastructure (classes d'expositions, normes type Eurocodes, réglementation, etc.) ;
- Une Analyse Préliminaire des Risques identifiant les agresseurs du Génie Civil, les Evènements Redoutés et les barrières assurant la réduction des risques ;
- Une AMDEC sur les composants de l'ouvrage identifiant certains paramètres contributeurs aux ER ;

- Une liste de paramètres clés issue de l'AMDEC, fonction de la nature de l'ouvrage et de la norme utilisée :
  - Classe de résistance du béton ;
  - Formulation du béton ;
  - Nuance d'acier des ferraillements ;
  - Etc.
- Suivi des paramètres clés en conception et réalisation pour s'assurer de la conformité de l'infrastructure au requis ;
- Détermination de l'atteinte d'une probabilité de défaillance en fonction des paramètres clés.

De plus, un ensemble de contrôle (IL) et de supervision (DSL) permet d'assurer, en complément, le respect de l'exigence sur la probabilité de ruine du Génie Civil en fonction de ces paramètres.

Les principales règles méthodologiques, normatives et calculatoires sont détaillées dans les chapitres suivants au travers d'un exemple concret.

## II. RÉFÉRENTIEL NORMATIF ET SPÉCIFICATOIRE

### A. Introduction aux Eurocodes

Comme pour les systèmes complexes faisant intervenir des parties mécaniques statiques ou dynamiques (exemple : moyens de levage, machines spéciales, bâtis mécaniques...), les infrastructures de Génie Civil sont soumis à des textes réglementaires et normatifs qui constituent l'état de l'art.

On peut à ce titre citer les Eurocodes qui sont des normes fixées par la communauté Européenne visant à déterminer le dimensionnement et la justification d'ouvrages de Génie Civil.

Les Eurocodes assurent la conformité des constructions réalisées en Europe en prenant en compte différents critères comme : la résistance mécanique, la stabilité, la sécurité en cas d'incendie, la durabilité... Les Eurocodes doivent devenir le moyen de construction principal des ouvrages de Génies Civil réalisés sur le continent.

Les Eurocodes sont répartis en 10 familles :

- Eurocode 0 : Base de calcul des structures (1990)
- Eurocode 1 : Action sur les structures (1991)
- Eurocode 2 : Calcul des structures en béton (1992)
- Eurocode 3 : Calcul des structures en acier (1993)
- Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier béton (1994)
- Eurocode 5 : Conception et calcul des structures en bois (1995)
- Eurocode 6 : Calcul des ouvrages en maçonnerie (1996)
- Eurocode 7 : Calcul géotechnique (1997)
- Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes (1998)
- Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium (1999)

### B. Généralités de l'Eurocode 0

L'Eurocode 0 précise qu'une structure doit être conçue et réalisée de sorte que, pendant sa durée de vie escomptée, elle résiste à toute les actions et influences susceptibles d'intervenir pendant son exécution et son utilisation [1]. Une structure doit être conçue et dimensionnée pour avoir :

- Une résistance structurale ;
- Une aptitude au service ;
- Une durabilité.

L'Eurocode 0, précise que la fiabilité pour les structures doit être obtenue :

- Par un dimensionnement conforme aux Eurocodes ;
- Par des mesures appropriées en matière d'exécution et de gestion de la qualité [1].

Ainsi, il est possible d'atteindre la fiabilité exigée par des combinaisons appropriées des mesures principales suivantes :

- Un ensemble de mesures de protection, prévention et d'inspection ;
- Des mesures relatives aux calculs de dimensionnement.

### C. Exigences de fiabilité de base

En s'appuyant sur l'Eurocode 0, la probabilité de défaillance  $P_f$  d'une structure est liée à l'indice de fiabilité  $\beta$  :

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (1)$$

Où  $\Phi$  est la fonction de distribution cumulée de la distribution Normale standard. La relation entre  $P_f$  et  $\beta$  est donnée dans le tableau 1 ci-dessous :

TABLE I. RELATION ENTRE  $P_f$  ET INDICE DE FIABILITE  $\beta$  [1]

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta$	1,28	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

La probabilité  $P_f$  peut être exprimée par une fonction de performance  $g$  :

$$P_f = \text{Prob}(g \leq 0) \quad (2)$$

Avec :

- $g = R$  (Résistance) –  $E$  (Effet des actions)
- Si  $g \leq 0$  : structure considérée comme défaillante
- Si  $g > 0$  : structure considérée comme fiable

Ce qui donne :

$$P_f = \text{Prob}(E \leq R) \quad (3)$$

L'indice de fiabilité  $\beta$  permet ainsi de dimensionner les coefficients partiels en lien avec la résistance et les effets des actions sur la structure.

Les coefficients partiels permettent de dimensionner les matériaux du Génie Civil (béton, acier) mais également de prendre en compte les actions (charges variables, permanentes) sur la structure.

#### D. Classes de conséquences (CC) et classes de fiabilité (RC)

Des classes de conséquences (CC) sont établies dans le tableau II ci-dessous en tenant compte des conséquences de la défaillance ou du mauvais fonctionnement de la structure.

TABLE II. CLASSES DE CONSÉQUENCES CC [1]

Classe de conséquences	Description	Exemples de bâtiments et de travaux de génie civil
CC3	Conséquence <b>élevée</b> en termes de perte de vie humaine, ou conséquences économiques, sociales ou d'environnement <b>très importantes</b>	Tribunes, bâtiments publics où les conséquences de la défaillance seraient élevées (par exemple salle de concert)
CC2	Conséquence <b>moyenne</b> en termes de perte de vie humaine, conséquences économiques, sociales ou d'environnement <b>considérables</b>	Bâtiments résidentiels et de bureaux, bâtiments publics où les conséquences de la défaillance seraient moyennes (par exemple bâtiment de bureaux)
CC1	Conséquence <b>faible</b> en termes de perte de vie humaine, et conséquences économiques, sociales ou d'environnement <b>faibles ou négligeables</b>	Bâtiments agricoles normalement innocus (par exemple, bâtiments de stockage), serres

Trois classes de fiabilité RC1, RC2 et RC3 sont définies dans le tableau III ci-dessous en utilisant le concept d'indice de fiabilité  $\beta$ . Elles sont associées aux trois classes de conséquences CC1, CC2 et CC3.

TABLE III. CLASSES DE FIABILITÉ RC [1]

Classe de fiabilité	Valeurs minimales pour $\beta$	
	Durée de référence 1 an	Durée de référence 50 ans
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Le choix de la classe de fiabilité (RC) et donc de l'indice de fiabilité  $\beta$  à prendre en compte dans le dimensionnement des structures du Génie Civil permet de satisfaire les exigences en terme de fiabilité du système.

#### E. Supervision de projet (DSL) et Contrôle pendant l'exécution (IL)

Enfin, en lien avec la classe de fiabilité, il existe trois niveaux de supervision de projet choisis en fonction de l'importance de la structure dans le tableau IV ci-dessous :

TABLE IV. NIVEAUX DE SUPERVISION [1]

Niveaux de supervision de projet	Caractéristiques	Exigences minimales recommandées pour le contrôle des calculs, des plans et des spécifications
DSL3 lié à RC3	Supervision élargie	Contrôle par tierce partie : Contrôle réalisé par un organisme différent de celui qui a préparé le projet
DSL2 lié à RC2	Supervision normale	Contrôle réalisé par des personnes différentes de celles initialement responsables et en conformité avec la procédure de l'organisme.
DSL1 lié à RC1	Supervision normale	Auto-contrôle : Contrôle réalisé par la personne qui a préparé le projet

En lien également avec la classe de fiabilité, trois niveaux de contrôle sont mis en place lors de l'exécution de la structure dans le tableau V ci-dessous :

TABLE V. NIVEAUX DE CONTRÔLE [1]

Niveaux de contrôle	Caractéristiques	Exigences
IL3 Lié à RC3	Contrôle étendu	Contrôle par tierce partie
IL2 Lié à RC2	Contrôle normal	Contrôle conforme aux procédures de l'organisme
IL1 Lié à RC1	Contrôle normal	Auto-contrôle

L'ajout de l'ensemble des contrôles (IL) et supervision (DSL) en lien avec cette classe de fiabilité (RC), qui s'apparentent à des notions de « Sûreté Pratique » complémentaires à la « Sûreté Théorique » donnée par les coefficients de dimensionnement, permettent de justifier l'atteinte du niveau de fiabilité souhaité sur la structure du Génie Civil et donc de répondre aux exigences de probabilité de défaillance visés.

### III. ETUDES ET DEMONSTRATIONS SDF D'OUVRAGES DE GENIE CIVIL

Dans le cadre de cette publication, il sera pris pour exemple l'étude de Sûreté de Fonctionnement d'un ouvrage (infrastructure) de Génie Civil situé en extérieur et en bord de mer, dont la fonction principale est de supporter des moyens de manutention de type « Ponts Roulants » dont la chute de charge est un Evènement Redouté majeur. Le « système complet » sera donc considéré comme étant la somme « pont roulant + ouvrage de Génie civil le supportant ».

#### A. Analyse Fonctionnelle

L'Analyse Fonctionnelle permet notamment d'établir l'environnement dans lequel se trouve l'infrastructure (classes d'expositions, normes type Eurocodes, réglementation, etc.).

A ce titre, elle va permettre d'identifier d'ores et déjà de nombreux paramètres qui vont influencer le dimensionnement de l'ouvrage de Génie Civil.

Il convient au préalable d'identifier l'ensemble des conditions d'environnement du projet afin de déterminer les effets sur la durabilité de l'ouvrage et mettre en place des dispositions dans le dimensionnement pour maintenir le niveau de fiabilité et protéger l'ensemble des matériaux.

Le premier critère s'appelle la « Classe » de l'ouvrage. Chaque classe présentée dans le tableau VI ci-dessous est associée à une durée d'utilisation prescrite de l'ouvrage. Cette durée correspond au temps pendant lequel la structure doit pouvoir être utilisée comme convenu, en faisant l'objet de maintenance mais sans effectuer de réparations majeures.

TABLE VI. CLASSE DE L'OUVRAGE [1]

Classe	Durée d'utilisation de projet prescrite (années)	Exemple
1	[1-5]	Structures temporaires
2	[25]	Éléments structuraux remplaçables, par exemple : poutres de roulement, appareils d'appui
3	[50]	Structures de bâtiments et autres structures courantes
4	[100]	Structures monumentales, de ponts et d'autres ouvrages de génie civil

L'identification des milieux extérieurs à l'ouvrage de Génie Civil étudié, via l'outil d'Analyse Fonctionnelle Externe (ex : Diagramme Pieuvre), va permettre d'identifier d'éventuelles contraintes supplémentaires de dimensionnement du Génie Civil pour s'assurer de la durabilité de celui-ci dans le temps. Ces contraintes se caractérisent par des critères spécifiques de dimensionnement appelés « classes d'exposition » classés par catégorie allant de 1 à 3 ou 4, sur le même modèle que la classe d'utilisation introduite précédemment. On peut notamment citer les classes d'exposition suivantes :

- XF : Intensité du gel et du salage (XF1 à XF4)
- XC : Corrosion induite par carbonations (XC1 à XC4)

- XD : Corrosion induite par les chlorures (sel) (XD1 à XD3)
- XS : Corrosion induite par les chlorures (eau de mer) (XS1 à XS3)
- XA : Attaques chimiques (XA1 à XA3)

Ces classes d'expositions permettent de choisir à l'aide des Eurocodes une classe indicative de résistance (à la compression) des bétons afin d'assurer la durabilité de l'ouvrage dans le tableau VII ci-dessous :

TABLE VII. CLASSES INDICATIVES DE RÉSISTANCE [1]

Classes d'exposition selon le Tableau 4.1										
Corrosion										
Classe indicative de résistance	Corrosion induite par carbonatation				Corrosion induite par les chlorures			Corrosion induite par les chlorures de l'eau de mer		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
	C20	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37		C30/45
Dommages au béton										
Classe indicative de résistance	Aucun risque	Attaque par gel et dégel			Attaque chimique					
	X0	XF1	XF2	XF3	XA1	XA2	XA3			
	C12/15	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37			C35/45		

D'autres classes existent mais ne seront pas développées dans cet article, notamment les classes structurales (S1 à S6) qui permettent de définir et d'optimiser l'épaisseur d'enrobage des aciers se trouvant dans le béton (cette épaisseur assure une protection pour les armatures contre la corrosion).

En synthèse, l'Analyse Fonctionnelle d'un ouvrage de Génie Civil s'attache principalement à identifier avec précision et exhaustivité les caractéristiques d'environnement dans lequel va évoluer l'ouvrage en vue de définir les bons niveaux de critères de dimensionnement de celui-ci pour un niveau de fiabilité donné en amont (spécification).

### B. Analyse Préliminaire des Risques

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) va permettre d'identifier les scénarios possibles amenant à la ruine de l'ouvrage de Génie Civil.

Contrairement aux études SdF de systèmes complexes, les principaux Evènements Redoutés sont moins issus d'une APR de type « fonctionnelle » que d'une APR de type « menace / agressions ».

En effet, les scénarios d'Evènement Redoutés aboutissent tous à la même conséquence qui est la ruine du Génie Civil, la principale difficulté résidant dans l'identification de tous les chemins d'agressions potentiels qui peuvent amener à cet ER.

Parfois, c'est la combinaison de plusieurs facteurs d'agressions qui peuvent aboutir à l'ER, ce qui complexifie encore un peu plus l'analyse. Néanmoins, l'accumulation de plusieurs dangers est prise en compte en dimensionnement via l'Eurocode 1 et les coefficients  $\psi$  [2] permettant de tenir compte du cumul de neige, vent, glace, températures extrêmes...

Quelques exemples de scénarios d'agressions pour un ouvrage de Génie Civil en bord de mer sont donnée ci-après pour illustrer les précédents propos :

- **Réaction sulfatique interne** : Présence d'un environnement humide, d'une température élevée et une nature défavorable du ciment (aluminates, alcalins, sulfates) entraînant le gonflement du béton à cœur et l'apparition de fissures fragilisant l'ouvrage et remettant en cause son niveau de probabilité de ruine.
- **Contact avec l'eau de mer** : Plusieurs scénarios associés à ce danger peuvent apparaître, comme par exemple l'apparition d'un phénomène de corrosion des armatures en cas de présence de fissures dans le béton, en cas de carbonatation du béton d'enrobage ou encore par pénétration des ions chlorures dans l'enrobage.
- **Amplitude thermique et présence d'eau** : L'intrusion d'eau au cœur du béton associé à une variation conséquente de température (gel/dégel) peut entraîner un gonflement et des fissures du béton.
- **Réaction alcali-granulat** : Présence d'eau et concentration en alcalins supérieur à un seuil critique entraînant l'apparition de fissures.

Outre les mesures de dimensionnement (voir critères présentés dans le chapitre précédent Analyse Fonctionnelle), des mesures de contrôle et de surveillance peuvent être prévus pour assurer le maintien de la fiabilité dans le temps :

- Contrôles visuels de présence de fissures dans le béton d'enrobage ;
- Mise en place de capteur de déformation dans la structure bétonnée ;
- Instrumentation du béton pour analyser sa vie dans le temps afin de comparer l'évolution des structures aux modèles théoriques.
- Mise en place d'éprouvettes d'échantillon de Génie Civil pour effectuer des tests périodiques d'écrasement afin de surveiller les caractéristiques mécaniques intrinsèques du béton.

### C. AMDEC

L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) va venir compléter les conclusions de l'APR par son approche systématique et exhaustive de l'ensemble des composants de l'ouvrage étudié.

En effet, l'APR a permis d'identifier les scénarios pouvant aboutir à une ruine du Génie Civil mais nous avons vu précédemment que certains sont le fruit de mécanismes complexes faisant intervenir plusieurs agressions simultanées.

L'analyse AMDEC va donc apporter une vision plus « microscopique » en établissant les modes de défaillances « unitaires » de chacun des composants constitutifs de l'ouvrage de Génie Civil afin de s'assurer que ceux-ci présentent un niveau de Gravité et/ou d'Occurrence acceptable grâce aux différentes mesures de dimensionnement ou de maintenance qui sont prises en considération sur l'ouvrage.

A titre d'exemple, nous pouvons citer les couples « composants / modes de défaillances » suivants qui doivent être considérés dans l'étude AMDEC :

- Rupture des armatures métalliques ;

- Fissuration du béton d'enrobage ;
- Rupture des ancrages ;
- Arrachement des fixations des gardes corps ;
- Rupture de micropieux ;
- Etc.

Dans la majorité des cas, la justification du respect des bonnes classes des différents critères de dimensionnement des Eurocodes combinés à un ensemble adapté de contrôles à l'approvisionnement et à la réception des ouvrages permet de garantir un niveau de criticité acceptable pour chaque défaillance prise une à une.

De par la nature de l'ouvrage, il est en effet difficile d'établir une batterie de tests fonctionnels complets comme ceux que l'on serait amené à établir classiquement dans le cas d'une qualification de système électronique, par exemple.

Ainsi, en vue de s'assurer de la qualité de l'ouvrage en l'absence de tests fonctionnels étendus, la démonstration de Sûreté de Fonctionnement repose sur l'identification des paramètres clés de l'ouvrage et leur suivi dans le temps à partir de l'AMDEC, ce dès la phase d'avant-projet.

#### D. Paramètres de Sûreté : identification et suivi

L'AMDEC ayant permis d'identifier l'ensemble des défaillances possibles de chaque constituant de l'ouvrage, une recherche approfondie des causes des défaillances critiques va permettre d'identifier des paramètres appelés « Paramètres de Sûreté » ou « Caractéristiques Clés », en anglais « Key Parameters » ou « Key Characteristics » selon les référentiels utilisés.

Ces paramètres sont, en quelque sorte, les garants de la fiabilité de l'ouvrage sur le long terme si leur application est respectée dans la réalisation de celui-ci.

Ces paramètres peuvent être des caractéristiques intrinsèques aux matériaux ou composants utilisés (Module d'Young, classe d'exposition du béton utilisé...), des caractéristiques géométriques (ex : épaisseur d'enrobage) mais également des caractéristiques d'implantation ou de fabrication comme par exemple les écartements des ferrillages ou encore la température du béton à la coulée.

A titre d'exemple, nous pouvons citer les paramètres clés suivants pour le béton [3] :

- Epaisseur d'enrobage pour les ouvrages en béton armé ;
- Classe de résistance du béton ;
- Formulation du béton (pour les différentes classes d'exposition et de résistance) ;
- Différentes conditions de bétonnage :
  - Température extérieure min/max
  - Température du béton,
  - Etc.

Cependant le béton n'est pas le seul garant de la fiabilité de l'ouvrage. Il convient en toute logique de considérer également tous les autres constituants dont certains paramètres peuvent influencer sur la fiabilité :

- Nuance d'acier du ferrailage ;
- Diamètre des barres de ferrailage ;
- Nuance d'acier d'ancrage ;
- Viscosité du produit de scellement ;
- Longueur d'ancrage ;
- Etc.

Une fois identifiés, ces paramètres doivent être suivis et la preuve de leur respect apportée dans le cadre de l'approvisionnement, la fabrication puis de la recette de l'ouvrage.

Les éléments de justification à apporter peuvent être :

- Les fiches produit ;
- Les certificats matière 3.1 ;
- Les PV de conformités de dimensionnement ;
- Les schémas et plans d'ensemble ou de détail ;
- Etc.

Enfin, chaque paramètre doit, si c'est pertinent, se voir assurer un moyen de suivi dans le temps pour s'assurer de son respect tout au long de la durée de vie de l'ouvrage. Cela peut se matérialiser par des contrôles visuels, des tests d'écrasement mécaniques sur éprouvettes représentatives avec analyse des données mécaniques associées, etc.

#### E. Démonstration finale de tenue du système complet

A l'issue des précédentes analyses, si l'ensemble des paramètres clés identifiés sont respectés alors cela signifie que l'ouvrage présente une probabilité de défaillance  $P_f$  conforme à celle spécifiée au travers de son l'indice de fiabilité  $\beta$  identifié en avant-projet.

Cette valeur de probabilité peut-être injectée dans des démonstrations probabilistes de niveau système, par exemple un arbre de défaillance relatif à un Evènement Redouté de type « Chute de charge » d'un pont roulant donc les chemins de roulement sont situés sur des corbeaux de l'ouvrage de Génie Civil précédemment étudié.

Ainsi, une certaine forme d'homogénéité est garantie dans le traitement du système complet « pont roulant + Génie Civil » vis-à-vis des exigences de Sûreté de Fonctionnement.

#### IV. LIMITES DE L'APPROCHE PAR LES EUROCODES

Cependant, malgré notamment la possibilité de probabiliser la ruine du GC et de l'intégrer aux démonstrations probabilistes de survenue d'un ER d'un système plus vaste, de nombreuses limites apparaissent au niveau de cette approche par les Eurocodes.

Par exemple, certains projets sensibles peuvent présenter des enjeux importants et demander des niveaux de probabilité de défaillance inférieurs à  $10^{-7}$  qui sortent du cadre des classes de fiabilité (RC) définies dans les Eurocodes. Il n'existe à ce jour et à notre connaissance aucun modèle permettant de recalculer des valeurs de probabilité de rupture inférieure à ce seuil.

De plus, de nombreux facteurs peuvent influencer sur les caractéristiques mécaniques à long terme des ouvrages de Génie Civil et donc la probabilité de ruine, nécessitant de les

identifier avec précision dès le début du projet ce qui n'est pas toujours aisé pour des infrastructures dont la durée de vie spécifiée peut être égale voire supérieure à 100 ans dans certains cas de figures ! A ce titre, on peut par exemple citer :

- Evolutions des conditions climatiques (réchauffement, phénomènes exceptionnels plus intenses) sur le long terme ;
- Evolution des contraintes d'utilisation du système (profil de mission) ;
- Endommagements exceptionnels non prévus...

Enfin, comme pour toute valeur de probabilité de défaillance largement inférieure au seuil d'erreur humaine, nous pouvons toujours nous interroger sur la représentativité d'un tel niveau de fiabilité compte tenu de la prépondérance de l'intervention humaine dans les procédés de réalisation de tels ouvrages. En d'autres termes, le niveau de « Sûreté Théorique » proposé par exemple par les classes de fiabilité des Eurocodes considère un ouvrage « parfait » dans sa réalisation, occultant les nombreuses étapes du processus pouvant être sujettes à des erreurs humaines dont le niveau de probabilité d'occurrence est bien loin des niveaux de fiabilité théoriques basés sur les critères de dimensionnement de l'ouvrage. A ce titre, on peut par exemple citer les risques suivants :

- Erreurs humaines dans l'application du plan de ferrailage ;
- Erreur de relevé de température de coulée du béton ;
- Erreurs ou falsifications de certificats matières d'approvisionnement ;
- Erreurs dans les relevés géologiques de l'environnement de l'ouvrage...

## V. CONCLUSION

L'ensemble des limites présentées précédemment ne doit néanmoins pas remettre en question l'apport indéniable de cette approche par les Eurocodes qui permet d'apporter une vision globale dans la démonstration d'exigences de Sûreté de Fonctionnement d'un système constitué, au moins en partie ou en interface, d'un ouvrage de Génie Civil.

Très souvent parent pauvre des études de Sûreté de Fonctionnement au profit des sous-systèmes dits « complexes » à dominante électrique, électronique, hydraulique ou mécanique hors statique, l'ouvrage de Génie Civil n'en reste pas moins une interface quasi-systématique aux systèmes précités leur garantissant le support nécessaire à la réalisation de leurs fonctions principales.

En effet, même si l'apport des méthodes de Sûreté de Fonctionnement peut paraître de prime abord moindre que pour des systèmes complexes nécessitant la mise en évidence de redondances fonctionnelles ou autres mécanismes de surveillance et de repli garantissant la tenue d'exigences poussées de Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité ou Sûreté ; la rigueur, la systématique, la traçabilité et l'exhaustivité des méthodes de Sûreté de Fonctionnement permettent d'assurer l'identification et la surveillance de paramètres clés indispensables à la tenue dans le temps des ouvrages de Génie Civil, dont le passé à trop souvent montré les conséquences catastrophiques que peuvent avoir une ruine prématurée de ces ouvrages.

## REFERENCES

- [1] NF EN 1990, Bases de calcul des structures (2003)
- [2] XP ENV 1991-1, Bases de calcul et actions sur les structures (1996)
- [3] NF EN 1992-1-1, Calcul des structures en béton (2005)