



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



LES SUPERSTRUCTURES DU BÂTIMENT CONCEPTS DE ROBUSTESSE ET DE RISQUE DANS LES CONSTRUCTIONS

Novembre/ 2021



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : C6007 V1

Concepts de robustesse et de risque dans les constructions

Date de publication :
10 août 2021

Cet article est issu de : **Construction et travaux publics | Les superstructures du bâtiment**

par **Jean-Armand CALGARO**

Mots-clés
risque | Réglementation |
robustesse | Eurocodes

Résumé Concernant les « Eurocodes structuraux », le concept de robustesse est apparu tardivement dans la réglementation européenne en se rapprochant de celui de risque. Le présent article a pour but d'expliquer en quoi ces deux concepts sont complémentaires.

Keywords
risk | Regulations | robustness
| Eurocodes

Abstract Concerning "Structural Eurocodes", the robustness concept appeared rather recently in European standards, in connection with the concept of risk. This paper explains why includes the association of both concepts.

Pour toute question :
Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Document téléchargé le : **03/11/2021**
Pour le compte : **7200106152 - éditions ti // céline BLONBOU // 2.59.188.28**

Par mail :
infos.clients@teching.com
Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Concepts de robustesse et de risque dans les constructions

par **Jean-Armand CALGARO**

*Ingénieur Général honoraire des Ponts et Chaussées
Professeur honoraire au CHEC et à l'ENPC*

Note de l'éditeur

Le contenu du présent article est essentiellement issu de la norme NF EN 1990 actuelle (version de 2007), communément appelée Eurocode 0. Cette norme est actuellement en cours de révision et, bien que la nouvelle génération des Eurocodes ne soit pas encore officielle, certains développements tiennent compte de la future version de cette norme EN 1990 (notée souvent et en avance NF EN 1990) puisqu'elle représente la base des autres Eurocodes structuraux. Notons que les grands principes restent les mêmes, même si la lecture des nouveaux textes sera un peu moins aisée. Afin de faciliter la compréhension de cet article, nous avons repris ici quelques dessins et tableaux de différents Eurocodes.

1. Généralités	C 6 007 - 2
1.1 Situation de projet accidentelle	— 2
1.2 Danger potentiel.....	— 2
1.3 Action accidentelle.....	— 2
1.4 Effondrement progressif	— 2
2. Quelques définitions	— 7
3. Règles générales	— 7
4. Le risque en Génie Civil	— 9
4.1 Principales définitions de la norme NF EN 1991 (version actuelle).....	— 10
4.2 Analyse de risque d'une structure.....	— 10
4.3 Risques pour les structures de bâtiments.....	— 11
4.4 Risques pour les ouvrages d'art	— 12
4.4.1 Cas des ponts routiers.....	— 12
4.4.2 Cas des ponts ferroviaires.....	— 12
4.4.3 Cas des ponts en site maritime ou fluvial.....	— 13
4.5 Les explosions.....	— 13
5. Conclusion	— 14
6. Glossaire	— 16
Pour en savoir plus	Doc. C 6 007

Toute structure (ou tout élément de structure) doit être conçue de telle manière que, pendant sa durée de vie prévue (ou sa durée d'utilisation), elle puisse, par exemple :

- supporter, avec un degré de sécurité convenable, toutes les actions et déformations susceptibles d'intervenir durant sa construction et son exploitation ;
- **maintenir, en cas d'action accidentelle ou de défauts susceptibles d'entraîner une rupture locale, une marge de sécurité suffisante contre la possibilité d'un effondrement de proche en proche ;**
- maintenir une résistance et une stabilité suffisantes en cas d'incendie ;
- présenter un comportement satisfaisant en exploitation normale ;
- présenter une durabilité convenable vis-à-vis des actions biologiques, chimiques, etc.

On voit ainsi apparaître la notion de robustesse (second alinéa). Selon le dictionnaire de la langue française, « robuste » est un adjectif issu sur latin *robustus*, de *robur*, force. En première définition, ce qui est robuste est solidement constitué, capable de fournir un effort physique important et de résister à la fatigue. Ou encore, ce qui est robuste est capable de résister aux causes d'agressions ou d'altérations (on parle ainsi d'une robuste constitution).

Dans le domaine des ouvrages de génie civil, la robustesse est l'aptitude d'une structure « à supporter des événements indésirables non prévus sans être endommagée dans une mesure disproportionnée par rapport à la cause d'origine ». La notion de robustesse a été introduite dans les Eurocodes de manière progressive car sa définition et ses règles d'application furent fort délicates à insérer dans une norme internationale, même si le concept semble simple et évident

1. Généralités

Selon le futur Eurocode 0 ou la nouvelle norme française NF EN 1990 en préparation, une structure doit être conçue pour offrir un degré de robustesse approprié de telle sorte que, durant sa durée de vie de projet, elle soit capable de résister à des événements imprévus et indésirables sans subir de dommages d'ampleur excessive par rapport à leur origine. Ainsi, un effondrement local n'entraînant pas un effondrement progressif de l'ensemble de la structure est un exemple d'endommagement non disproportionné par rapport à sa cause initiale (figure 1). Dans le cas contraire, et afin d'illustrer cette notion d'effondrement progressif, signalons que ce type de ruine est quelquefois qualifié d'effet « domino ».

Parmi les **exemples** malheureusement célèbres d'un tel phénomène, rappelons que c'est ainsi qu'a été décrite la ruine du World Trade Center de New York suite à l'attentat du 11 septembre 2001.

La notion de robustesse est donc plus ou moins liée aux notions de risque ou d'actions accidentelles. Rappelons, en premier lieu, quelques définitions qu'il convient de connaître car elles sont intimement liées au concept de robustesse.

1.1 Situation de projet accidentelle

Il s'agit d'une situation de projet impliquant des conditions exceptionnelles au niveau de la structure ou de son exposition, par exemple un incendie, une explosion, un choc ou une défaillance localisée (figure 2).

1.2 Danger potentiel

Dans le cadre des normes NF EN 1990 à NF EN 1999 (ou Eurocode 0 à Eurocode 9), un danger potentiel est un événement grave et inhabituel, par exemple une action anormale, une influence anormale de l'environnement, une résistance insuffisante ou un écart excessif par rapport aux dimensions prévues.

À titre d'**exemple**, les affouillements autour d'appuis de ponts présentent souvent un caractère de danger potentiel. Le pont Wilson de Tours qui s'est effondré progressivement entre le 9 avril et le 3 mai 1978, en est une célèbre illustration (figure 3).

Selon la définition de la norme NF EN 1990 actuelle, certains phénomènes naturels peuvent être considérés comme des dangers potentiels : il s'agit par exemple des effets climatiques (vent ou neige) associés à un centre de pression atmosphérique. Les effets du vent sont susceptibles de se traduire par des orages, des cyclones ou des tornades plus ou moins intenses (figure 4). Dans certaines parties du Monde, ces phénomènes n'étant pas rares, ils

peuvent être considérés comme des actions accidentelles nécessitant alors des dispositifs de protection appropriés.

1.3 Action accidentelle

Selon la norme NF EN 1990, une action accidentelle (A) est une action, habituellement de courte durée mais de grandeur significative, qui a peu de chances d'intervenir sur une structure donnée au cours de sa durée de vie de projet (figure 5). Dans de nombreux cas, une action accidentelle est susceptible d'avoir de graves conséquences si des mesures appropriées ne sont pas prises.

1.4 Effondrement progressif

L'effondrement progressif n'a pas été défini dans la norme NF EN 1990 actuelle, mais sa signification est claire : il s'agit d'une suite de défaillances en chaîne consécutives à un endommagement d'une partie relativement limitée de la structure. L'endommagement résultant de l'effondrement progressif de la structure est ainsi disproportionné par rapport à l'endommagement l'ayant provoqué.

Exemple

Même si d'autres effondrements progressifs s'étaient produits bien avant, un exemple célèbre est fourni par une explosion dans un appartement de l'immeuble « Ronan Point » à Londres en 1968 (figure 6). Le sinistre, dû au gaz, s'est produit au 18^e étage de cette tour qui en comportait 22, entraînant l'effondrement des planchers d'angle sur toute la hauteur de la construction.

Ce type de catastrophe relève à la fois de l'accident (la cause) et de la robustesse (effet de ruine en chaîne).

Un autre **exemple** remarquable est celui de l'effondrement partiel de l'aérogare 2E de l'aéroport Roissy-Charles-de-Gaulle (2006) (figure 7). En réalité, la structure était de conception « fragile » et cette fragilité avait été détectée bien avant les travaux de construction proprement dits. S'agit-il d'un accident ou d'un manque de robustesse ou encore d'une erreur de conception ?

Dans certaines régions du Monde, le risque sismique est d'un niveau élevé : on ne peut donc pas véritablement parler d'action accidentelle, sauf qu'un séisme n'est jamais une action quantifiable, mis à part quelques cas particuliers (installations sensibles, centrales nucléaires etc.) où la protection civile reste importante (figures 8.a et 8.b).

À noter que, dans le cas d'un séisme (3 composantes de déplacement), il peut également se produire une liquéfaction locale de certains sols, un autre phénomène de type catastrophique susceptible de se combiner aux effets sismiques proprement dits.



Figure 1 – Exemple de bâtiment ayant subi un endommagement local sans effondrement progressif (origine BRE)

À retenir

- La robustesse est l'aptitude d'une structure « à supporter des événements indésirables non prévus sans être endommagée dans une mesure disproportionnée par rapport à la cause d'origine »
- Exemples de situations de projet accidentelles
- Incendie ou explosion dans un bâtiment

À retenir (suite)

- Choc violent sur une pile de pont ou affouillement sous un de ses appuis
- Action climatique intense ou séisme important
- Effondrement progressif d'un bâtiment causé par l'endommagement d'une de ses parties



Figure 2 – Incendie dans un bâtiment à Paris



Figure 3 – Exemple d'affouillement au pont Wilson de Tours (photo JAC)



Figure 4 – Exemples de cyclone et de tornade (Météo)



Figure 5 – Choc de véhicule lourd sur une pile de pont ayant entraîné l'effondrement de l'ouvrage (Photo JAC). Depuis cette époque, un renforcement des appuis a été réglementé

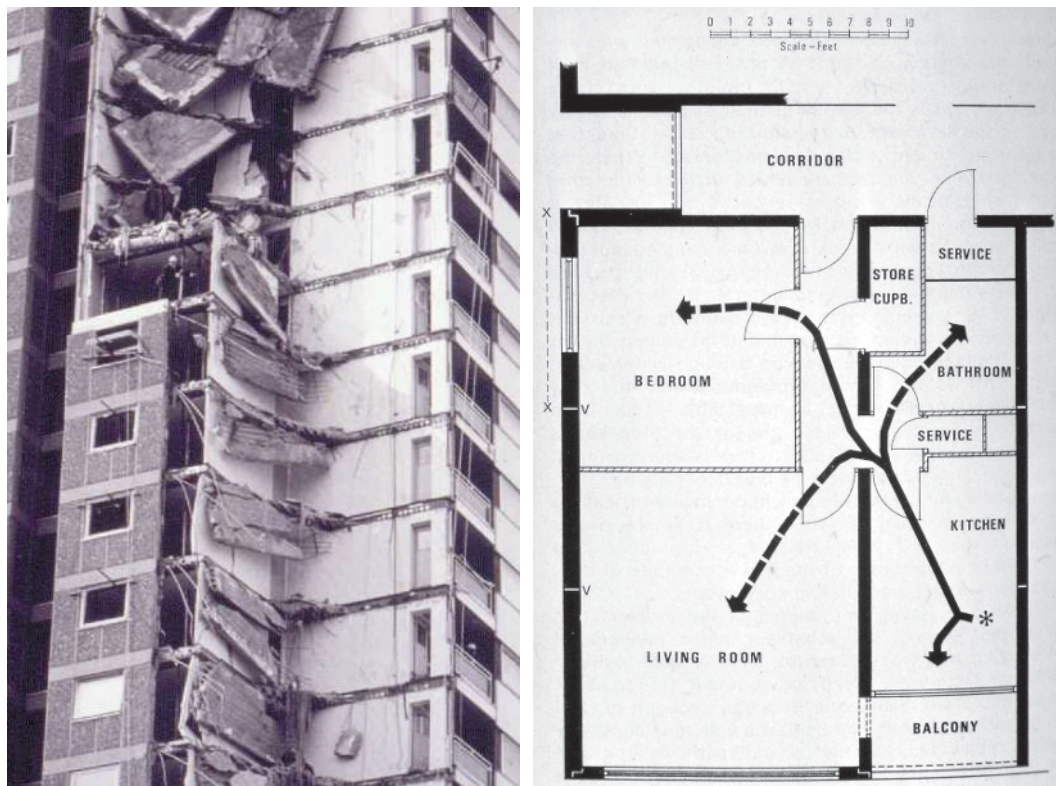


Figure 6 - Explosion de Ronan Point à Londres en mai 1968 (orig. BRE). Une explosion de gaz dans un appartement a provoqué l'effondrement d'une partie de l'édifice

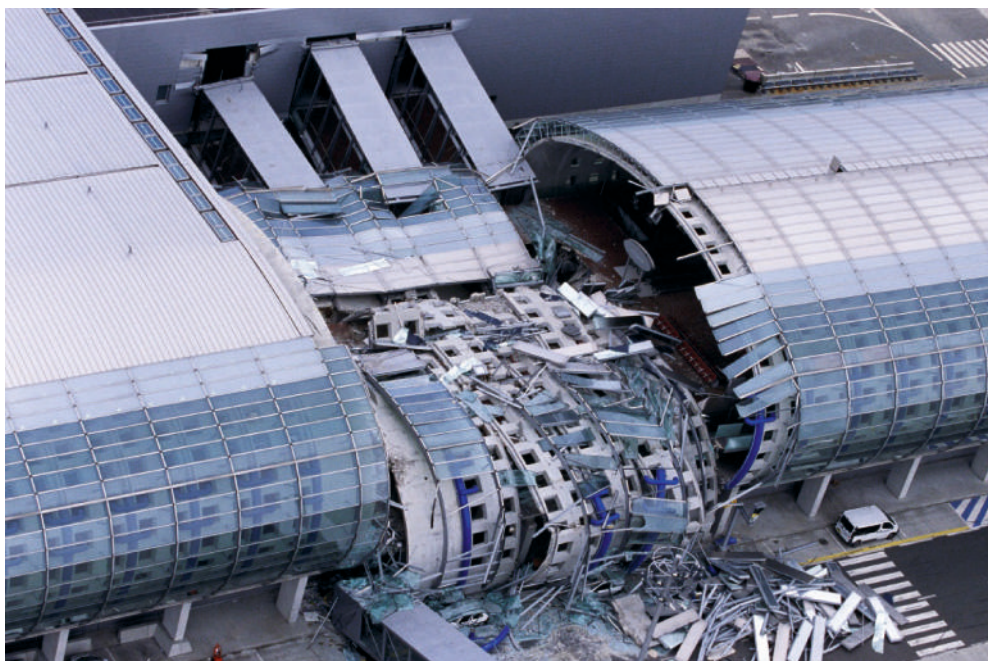


Figure 7 - Effondrement d'une partie du terminal 2E de l'aéroport Charles-de-Gaulle (ancienne structure - photo mission d'expertise)

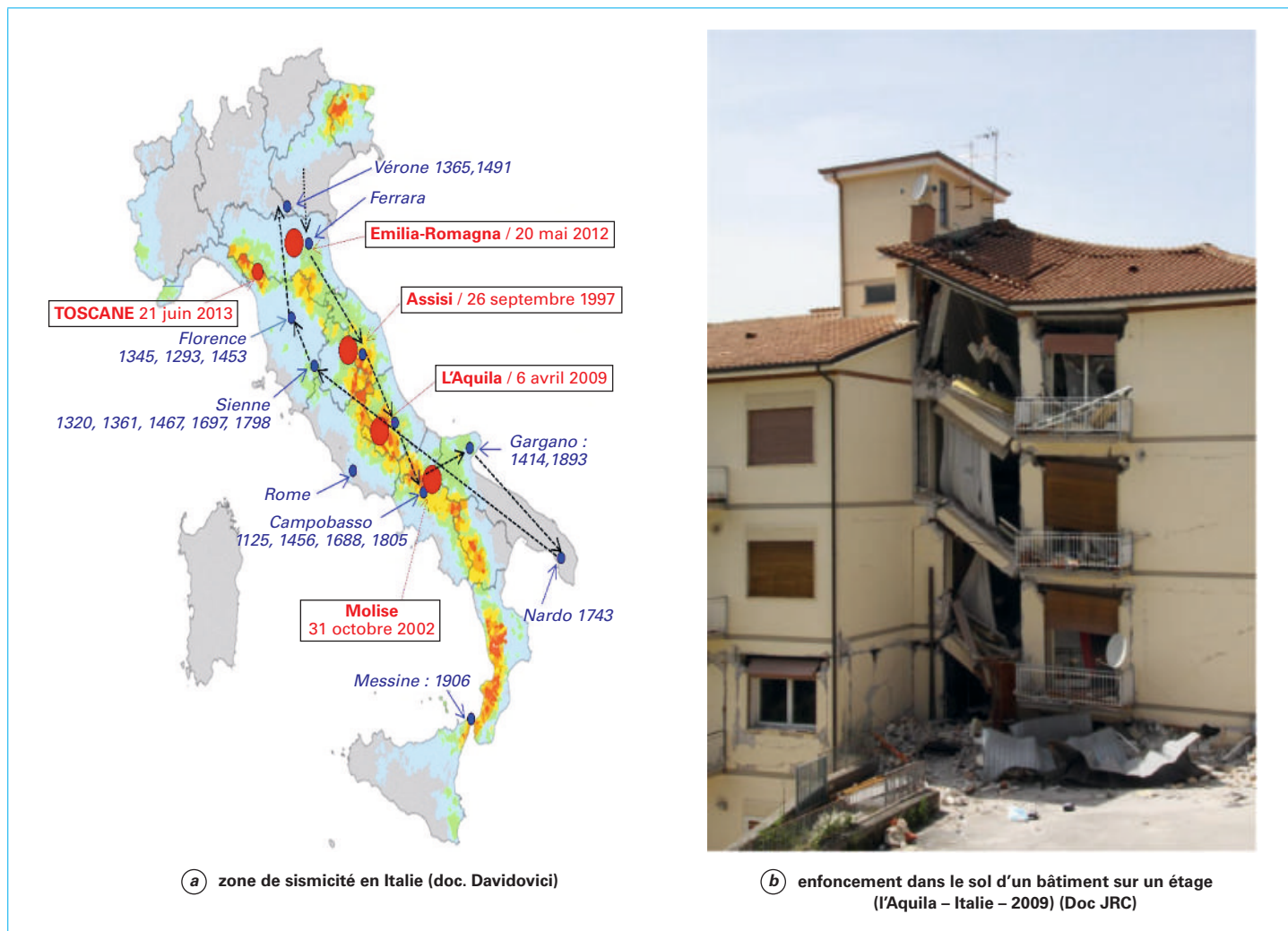


Figure 8 - Illustration du risque sismique en Italie

2. Quelques définitions

Dans la version actuelle des Eurocodes, quelques définitions importantes sont proposées (NF EN 1990 et NF EN 1991-1-7) :

- situation de projet accidentelle : une situation de projet impliquant des conditions exceptionnelles au niveau de la structure ou de son exposition, par exemple, un incendie, une explosion, un choc ou une défaillance localisée ;
- danger potentiel : dans le cadre des EN 1990 à EN 1999, un événement grave et inhabituel, une influence anormale de l'environnement, une résistance insuffisante ou un écart excessif par rapport aux dimensions prévues ;
- élément-clef : élément d'une structure dont dépend la stabilité du reste de la structure ;
- défaillance locale : la partie d'une structure supposée s'être effondrée ou avoir été sérieusement endommagée suite à un événement accidentel ;
- risque défini dans la norme (NF EN 1991-1-7) : une mesure de la combinaison (en général le produit) de la probabilité ou fréquence de la survenance d'un certain danger et de l'ampleur de ses conséquences.

Ces définitions cadrent avec les exemples précédemment cités. Mais certaines situations combinent plusieurs aspects : erreurs de projets, erreurs d'exécution, non prise en compte de phénomènes répétitifs (indépendamment de leur fréquence). Cela signifie qu'il faut rester prudent avant de classer un phénomène dans une catégorie. Quoi qu'il en soit, un effondrement progressif de grande ampleur reste le signe d'une conception structurale inappropriée.

3. Règles générales

La sécurité vis-à-vis d'un danger est assurée pourvu que le danger soit contrôlé par des mesures appropriées ou que le risque soit limité à une valeur « acceptable ». Notons que la sécurité totale ou absolue n'existe pas (définition de la SIA - 1989). La sécurité est évidemment un concept qualitatif : sa définition concerne plusieurs groupes de personnes ou d'intervenants : le personnel d'exécution, les usagers de la structure, les personnes situées au voisinage de la structure, etc.

Un grand oubli dans la version actuelle des Eurocodes : la solidité, la robustesse et, bien évidemment, la durabilité des structures en cours de construction ou juste avant leur mise en service.

Tableau 1 – Qualification des classes de conséquences (issu du Tableau 4.1 de la future version de l’EN 1990)

Classes de conséquences	Qualification indicative des conséquences	
	Perte de vies humaines ou dommages corporels	Conséquences économiques, sociales ou environnementales
CC4 – Maximale	Extrême	Énormes
CC3 – Élevée	Élevée	Très importantes
CC2 – Normale	Moyenne	Considérables
CC1 – Faible	Faible	Réduites
CC0 – Minimale	Très faible	Négligeables

La classe de conséquences est établie sur la base de la plus grave de ces deux colonnes.

Pour la plupart des structures nouvelles, un calcul conforme aux Eurocodes (et sous couvert d’une exécution de qualité) procure un niveau de robustesse adéquat sans qu’il soit nécessaire de prendre des mesures de calcul supplémentaires visant à renforcer la robustesse structurale. Mais des mesures de calcul supplémentaires peuvent être nécessaires pour renforcer la robustesse des bâtiments et des ponts.

Les classes de conséquence d’une structure dépendent des risques de perte de vies humaines et des conséquences économiques, sociales et environnementales. Elles sont indiquées dans le tableau 1 issu de la future version de l’EN 1990.

À noter que le terme CC (Classe de Conséquences) fut adopté dès l’origine des Eurocodes pour éviter d’introduire, au départ, la notion de classe de risque.

Pour renforcer la robustesse d’une structure, trois des classes de conséquences précédentes ont été retenues. Les méthodes de calcul associées à chacun d’entre elles sont indiquées dans le tableau 2.

Des règles de calcul prescriptives sont données dans les autres Eurocodes vis-à-vis de certains risques particuliers.

Selon la future version de la norme NF EN 1990, l’objectif du renforcement de la robustesse est, soit de prévoir toute conséquence disproportionnée résultant d’évènements dangereux, soit de fournir une résistance supplémentaire afin de réduire la vraisemblance et l’ampleur d’un tel évènement. Il est à noter que la notion de robustesse est d’origine britannique suite à des destructions dues à des mouvements politiques.

Certains calculs moins généraux sont développés dans les autres Eurocodes structuraux, c’est-à-dire les normes NF EN 1991 à NF EN 1999.

Les stratégies de calcul pour les actions accidentelles identifiées et le renforcement de la robustesse sont fournis dans le tableau 3.

Ce tableau appelle les commentaires suivants.

- création de chemins de charge alternatifs :
 - il s’agit de fournir à la structure une ductilité, une capacité de déformation et une redondance suffisante ;
 - ou d’appliquer des règles de calcul prescriptives, par exemple pour les liaisons ;
- éléments principaux : fournir une résistance accrue pour certains éléments structuraux ;
- segmentation : il s’agit de séparer la structure en parties distinctes au moyen d’un ou plusieurs éléments structuraux plus faibles, c’est-à-dire de faire en sorte que chaque partie puisse s’effondrer indépendamment sans affecter la sécurité des autres parties.

Les stratégies de calcul pour la robustesse ne sont pas mutuellement exclusives et elles peuvent être utilisées seules ou en combinaison.

La figure 9 représente les limites de dommages structuraux tolérables dans une structure si un élément porteur, ici un poteau, vient à disparaître, c’est-à-dire s’il n’est plus capable d’assurer sa fonction porteuse. Au sens de la future version de l’EN 990, la zone A ne doit pas représenter plus de 15 % de l’aire du plancher

Tableau 2 – Méthodes de calcul indicatives visant à renforcer la robustesse (issu du Tableau E.2 de la future version de l’EN 1990)

Classes de conséquences	Méthodes de calcul
CC3	Lorsqu’elles sont spécifiées par l’autorité compétente ou, à défaut, convenues pour un projet spécifique par les parties concernées, satisfaire aux exigences de la CC2 convenablement adaptées et prendre en considération : a) les éventuels événements de défaillance initiaux ; b) la propagation de la défaillance ; c) les conséquences qui en résultent ; d) les risques, le cas échéant.
CC2	Lorsqu’elles sont spécifiées par l’autorité compétente ou, à défaut, convenues pour un projet spécifique par les parties concernées : a) pour les bâtiments : utilisation de règles de calcul prescriptives pour les liaisons horizontales afin de fournir l’intégrité et la ductilité nécessaires ; ou b) pour les bâtiments : utilisation de règles de calcul prescriptives pour les liaisons horizontales et verticales afin de fournir l’intégrité et la ductilité et les chemins de charge alternatifs nécessaires ; ou c) calcul de certains éléments structuraux de sorte à en faire des « éléments principaux » ; et/ou d) segmentation.
CC1	Il n’est pas nécessaire d’appliquer des méthodes de calcul visant à renforcer la robustesse.

Tableau 3 – Stratégies de calcul pour les actions accidentelles identifiées et le renforcement de la robustesse (issu du Tableau E.1 de la future version de l’EN 1990)

Calculs pour les actions accidentelles (EN 1991) Calcul explicite de la structure (par exemple, contre les explosions, les chocs)		Calculs pour le renforcement de la robustesse (EN 1990) Stratégies fondées sur la limitation de l’étendue des dommages		
Calcul de la structure en vue de résister à l’action*	Prévention ou réduction de l’action Par exemple mesures de protection, contrôle des événements	Chemins de charge alternatifs Soit en fournissant une capacité de déformation et une ductilité adéquate, soit en respectant des règles de calcul prescriptives	Principaux éléments C’est-à-dire le calcul des éléments pour résister à l’action théorique ou aux actions théoriques	Segmentation C’est-à-dire en séparation des plusieurs parties

*Le calcul structural contre les actions accidentelles identifiées peut intégrer des éléments spécifiquement conçus, qui déferlent partiellement ou totalement à condition que leur défaillance n’entraîne pas un nouvel effondrement structural comme convenu avec les autorités (pour les stratégies et méthodes visant à limiter l’étendue des dommages).

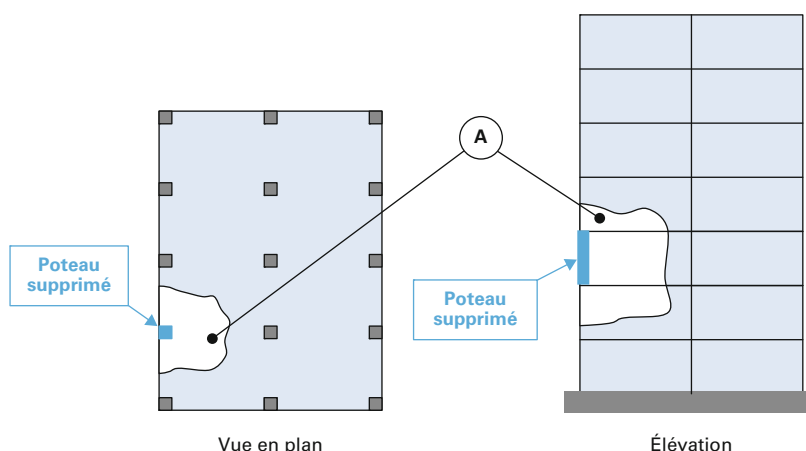


Figure 9 – Exemple de limite tolérable de dommages structuraux en l’absence d’un élément porteur dans un bâtiment à ossature (issu de la figure E.1 de la future version de l’EN 1990)

ou 100 m², selon la valeur la plus faible, dans chacun des deux étages adjacents.

Un **exemple** « plutôt académique » de robustesse renforcée pour un bâtiment est donné à la figure 10. Il montre ce que certains calculs ont schématisé selon ce format.

Toutefois, cet exemple n’a qu’un aspect artificiel. Une bombe lancée sur une construction ne peut avoir que des effets néfastes. Remarquons que, pendant plusieurs années, les centrales nucléaires françaises étaient calculées pour être capables de résister à l’impact d’un moteur d’avion « de petite taille » : cela prouve qu’un certain risque de ce type était pris en compte. De nos jours, les attaques militaires sur des sites stratégiques sont de plus en plus spectaculaires mais, dans ce domaine, la robustesse n’a pas fait de grandes avancées malgré les avancées de la technologie de l’armement.

Par **exemple**, certains drones sont susceptibles de transporter une quinzaine de tonnes d’explosifs.

À retenir

- Présentation des règles générales pour assurer la sécurité des personnes
- Introduction de classes de conséquences selon l’importance de la construction
- Des méthodes de calcul sont proposées pour chaque classe de conséquences
- Des stratégies de calcul sont définies pour résister aux actions accidentelles
- Des propositions sont formulées pour renforcer la robustesse d’un ouvrage

4. Le risque en Génie Civil

Dans le cas des bâtiments, le risque est un aspect majeur de la notion de robustesse. Le risque et les incertitudes sont probablement les sujets principaux qu’un gouvernement doit comprendre

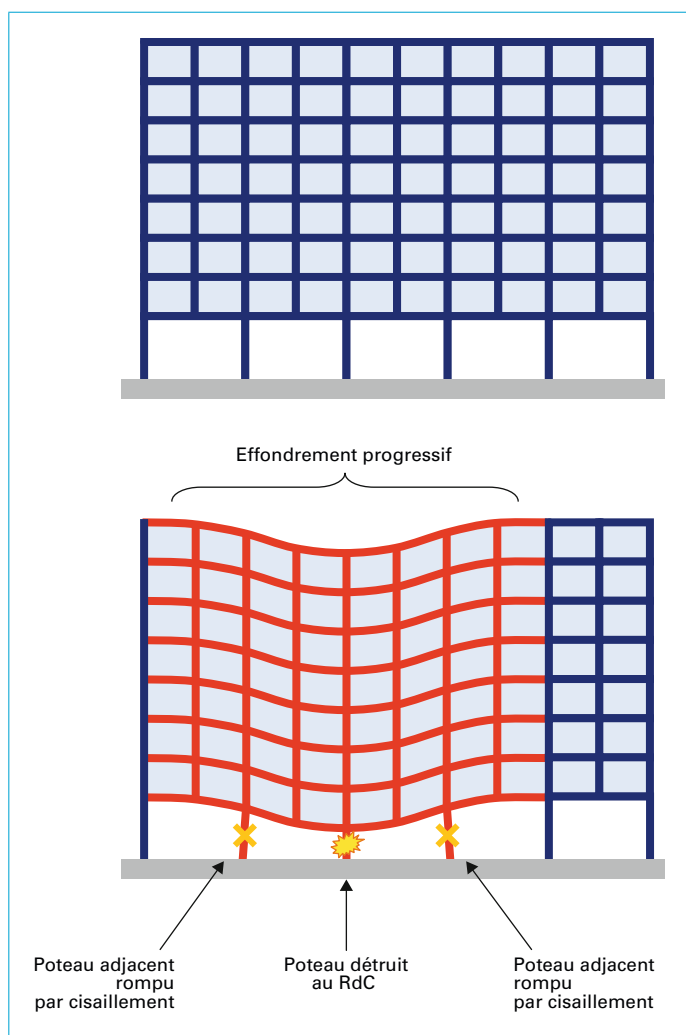


Figure 10 – Exemple de calcul théorique de la tenue d’une structure après enlèvement d’un poteau, avec redistribution des efforts

pour adopter des décisions rationnelles. Le risque est une action, ou la nature d’un état ou d’une action comme un séisme, un incendie ou une attaque terroriste, pouvant engendrer des dégâts considérables.

La population accepte mal la notion de risque dans les bâtiments. De nombreux chercheurs ont travaillé sur des modèles, mais pour ce qui concerne le vandalisme et les attaques malveillantes, les résultats obtenus n’ont pas été directement utilisables. À noter que les normes française ou européennes ne traitent pas des incendies dus, par exemple, à des camions situés sur ou en-dessous d’un pont, ou dans un tunnel. Et pourtant des incidents dus au feu sont comparables, chaque année en France, en nombre, aux chocs sur les piles de ponts.

L’incendie du pont Mathilde à Rouen, le 29 octobre 2012, est un **exemple** qui a frappé les esprits par son intensité et ses conséquences.

Dans l’actuelle norme NF EN 1991-2, on s’intéresse principalement aux questions de chocs de véhicules sur des ouvrages routiers ou ferroviaires, sur des piles de ponts en site fluvial ou maritime ou aux accidents dus aux explosions, en particulier dans les tunnels.

En matière de chocs sur les ponts routiers, ont été abordés les chocs sur les piles et les tabliers.

4.1 Principales définitions de la norme NF EN 1991 (version actuelle)

■ Critères d’acceptation de risque

Ce sont les limites acceptables quant aux probabilités de certaines conséquences d’un événement non souhaitable, exprimées en termes de fréquences annuelles. Ces critères sont normalement déterminés par les autorités pour refléter le niveau de risque considéré comme acceptable par la population et la société.

■ Analyse de risque

Il s’agit d’une approche systématique permettant de décrire et/ou de calculer les risques. L’analyse de risque implique l’identification des événements non souhaitables et celle de leurs causes, de leurs probabilités et de leurs conséquences.

■ Evaluation de risque

Elle concerne la comparaison des résultats d’une analyse de risque avec les critères d’acceptation du risque et d’autres critères décisionnels.

■ Gestion du risque

Ce sont des mesures prises par une organisation afin d’atteindre et maintenir un niveau de sécurité conforme à des objectifs définis.

■ Événement non souhaitable

Il est relatif à un événement ou à un état susceptible de blesser des personnes ou de causer des dommages environnementaux ou matériels.

4.2 Analyse de risque d’une structure

Les bases d’une analyse de risque correspondent à la nécessité de décrire complètement le sujet, son contexte et ses objectifs. Il est nécessaire de définir de façon suffisamment détaillée toutes les circonstances techniques, environnementales, organisationnelles et humaines qui se rapportent à l’activité considérée et au problème analysé. Il convient d’indiquer toutes les présuppositions, hypothèses et simplifications faites en relation avec l’analyse de risque.

L’analyse de risque comporte une partie descriptive (l’analyse qualitative) et elle peut, le cas échéant et si c’est possible, comporter également une partie numérique (l’analyse quantitative).

■ Dans la partie **qualitative** de l’analyse de risque, il convient d’identifier tous les dangers potentiels et les scénarios de danger correspondants. L’identification des dangers potentiels et des scénarios de danger potentiel est une étape déterminante d’une analyse de risque. Elle exige un examen et une compréhension détaillés du système. C’est la raison pour laquelle diverses techniques ont été mises au point pour aider à exécuter cette partie de l’analyse (par exemple : PHA, HAZOP, arbre de défaillances, arbre d’événements, arbre de décisions, réseau des causes, etc.).

■ Dans l’analyse de risque d’une structure, les conditions suivantes peuvent par exemple constituer des **facteurs de danger** :

- des valeurs élevées des actions ordinaires ;
- de faibles valeurs des résistances, peut-être dues à des erreurs ou à une détérioration imprévue ;
- des conditions de sol et des conditions environnementales différentes de celles supposées dans le projet individuel ;

- des situations accidentelles telles qu'incendie, explosion, inondation (y compris l'affouillement), choc ou séisme ;
- des situations accidentelles non spécifiées.

■ Il convient de prendre en compte les paramètres suivants lors de la **définition des scénarios de danger potentiel** :

- les actions variables, attendues ou connues, qui s'exercent sur la structure ;
- l'environnement dans lequel se situe la structure ;
- le régime de surveillance, proposé ou connu, de la structure ;
- la conception de la structure, les détails d'exécution, les matériaux utilisés, et les points possibles de plus grande vulnérabilité aux dommages ou aux détériorations ;
- les conséquences du scénario de danger potentiel identifié, par type et importance de dommage.

Il convient d'identifier l'utilisation principale qui sera faite de la structure afin de déterminer les conséquences pour la sécurité au cas où la structure ne supporterait pas l'événement dangereux principal ainsi que les actions susceptibles de l'accompagner.

Pour les pratiques futures, c'est-à-dire selon la classification du tableau 1, les structures présentant un risque sous actions accidentelles sont au nombre de trois (CC1, CC2, CC3).

Soulignons que les conséquences sont telles pour la classe CC4 qu'elle n'est pas couverte par les Eurocodes, alors que celles de la classe CC0 sont tellement peu notables qu'elle peut être ignorée.

4.3 Risques pour les structures de bâtiments

Quelle que soit l'origine des dangers, notons que les méthodes de calcul pour déterminer la résistance d'un bâtiment ont été définies en s'appuyant sur des renforcements locaux.

■ Pour la classe CC1, rien n'est prévu de particulier.

■ Par contre, pour la classe CC2, certaines dispositions sont à adopter. Dans l'Eurocode EN 1997-1-4 actuel, un tableau est suggéré relatif à la conception vis-à-vis d'une défaillance locale dans les bâtiments en raison d'une cause non spécifiée. Ce tableau comportait, à l'origine, quatre catégories mais les catégories 2 et 3 ont été fusionnées.

Une méthode de résistance améliorée dans un bâtiment quelle que soit l'origine des dangers a été définie en s'appuyant sur un renforcement des liaisons pour la classe bâtiments de volume limité. Pour un bâtiment de classe CC2, la procédure pourrait être plus sophistiquée (figure 11).

■ Pour une classe de niveau un peu supérieur, on a proposé d'adopter les dispositions des figures 9 et 10.

■ Pour les constructions de la classe CC3, la procédure est plus compliquée (figure 12) :

- **étape 1** : identification et modélisation des dangers accidentels pertinents. Calcul de la probabilité d'occurrence de différents dangers d'intensités variables ;
- **étape 2** : évaluation des endommagements structuraux consécutifs aux différents dangers. Évaluation de la probabilité de différents états d'endommagement avec les conséquences correspondantes pour des dangers donnés ;

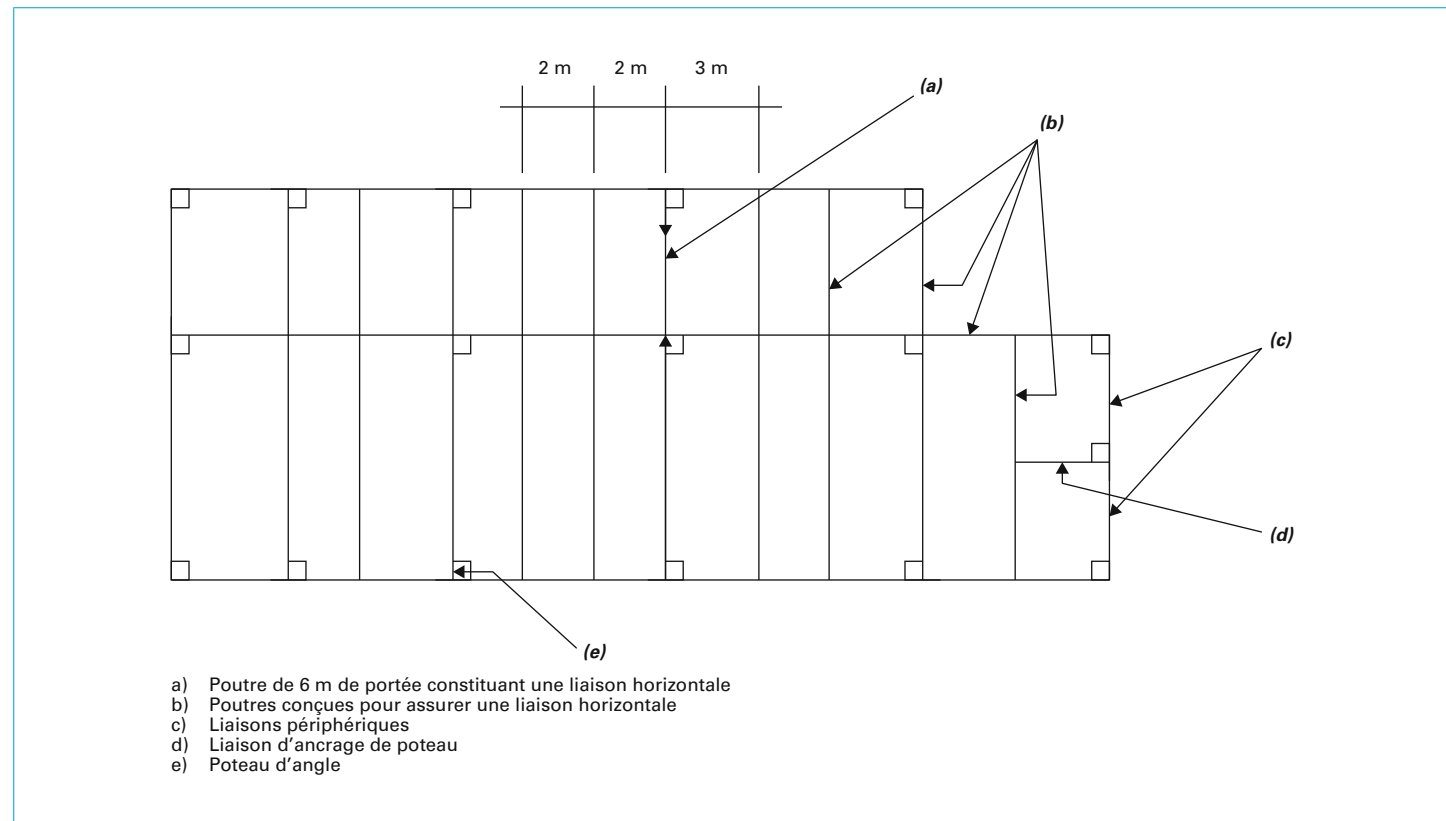


Figure 11 – Classe de conséquences 2b selon l'ancienne classification britannique : liaisons horizontales, ancrage des planchers suspendus aux murs + stabilité du bâtiment en cas de défaillance locale

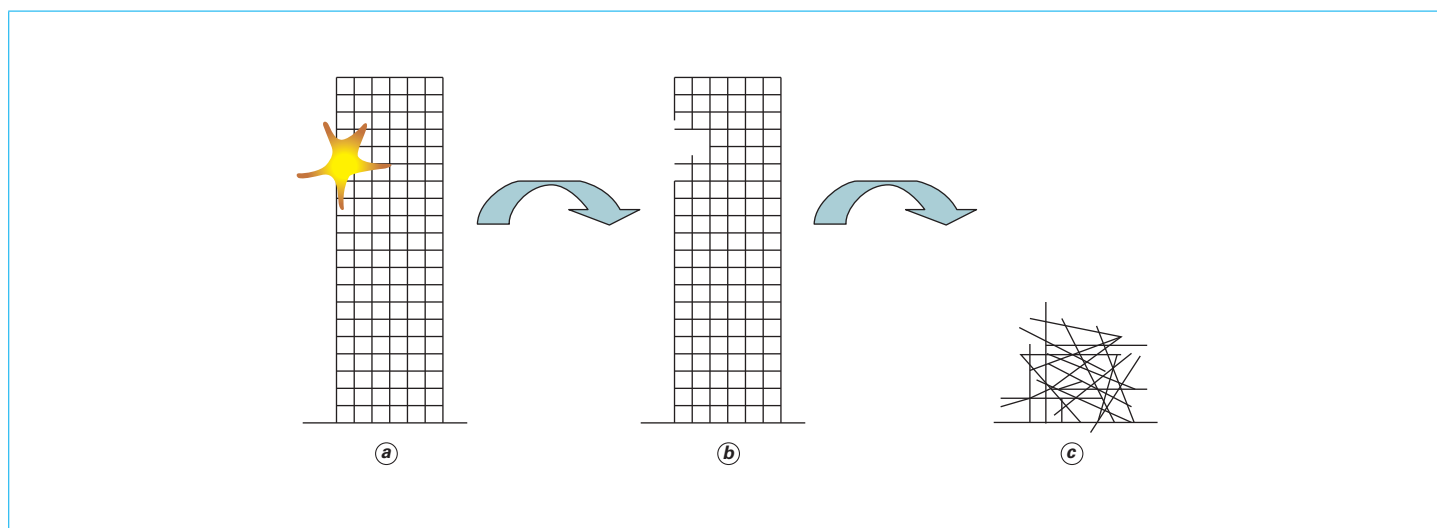


Figure 12 – Démarche pour une construction de type CC3

– **étape 3** : évaluation de la performance de la structure endommagée. Évaluation de la probabilité de performance diminuée de la structure endommagée avec les conséquences correspondantes.

4.4 Risques pour les ouvrages d’art

4.4.1 Cas des ponts routiers

Le risque le plus fréquent est le choc d’un véhicule lourd sur des appuis de ponts routiers plutôt fragiles. La norme NF EN 1991 suggère, sur la base d’expérimentations, d’introduire les forces transmises aux piles (frontales et latérales) et aux tabliers s’ils ne sont pas de hauteur suffisante (figure 13).

4.4.2 Cas des ponts ferroviaires

En matière de ponts ferroviaires, on distingue des chocs dus à des déraillements pouvant affecter deux classes techniques, notées A et B. La classe A comprend des structures franchissant des voies de circulation en service, occupées en permanence ou à usage de lieux de rassemblement intermittents de personnes ou de plus d’un étage. La classe B concerne des structures massives franchissant des voies de circulation en service telles que des ponts routiers ou bâtiments à un seul étage qui ne sont pas occupés en permanence ou ne servent pas de lieux de rassemblement intermittents de personnes. La distance « s » à la ligne médiane la plus proche conditionne la résistance des éléments des éléments structuraux. Lorsque « s » est compris entre 3 et 5 m, la force frontale suggérée contre une pile de pont est 4 kN. Cette valeur correspond au déraillement d’un train de faible vitesse, dans une zone proche des gares. Cette force serait bien plus importante lors du déraillement d’un TGV à pleine vitesse sur une pile de pont de dimensions courantes.

Rappelons, sans entrer dans les détails, le principe des voies ferrées par la figure 14.

Les situations accidentelles codifiées sont représentées en figure 15.

Il convient de noter qu’un efforts de freinage brusque n’est pas une situation accidentelle. Elle est réduite à peu près à l’effet de deux locomotives qui accélèrent, soit une force de 1 000 kN sur une longueur de 30 m environ. Un effort de freinage de 6 000 kN correspond simplement à 20 kN/m fois 300 m.



Figure 13 – Choc de poids lourd sur une pile de pont (Photo SIA)

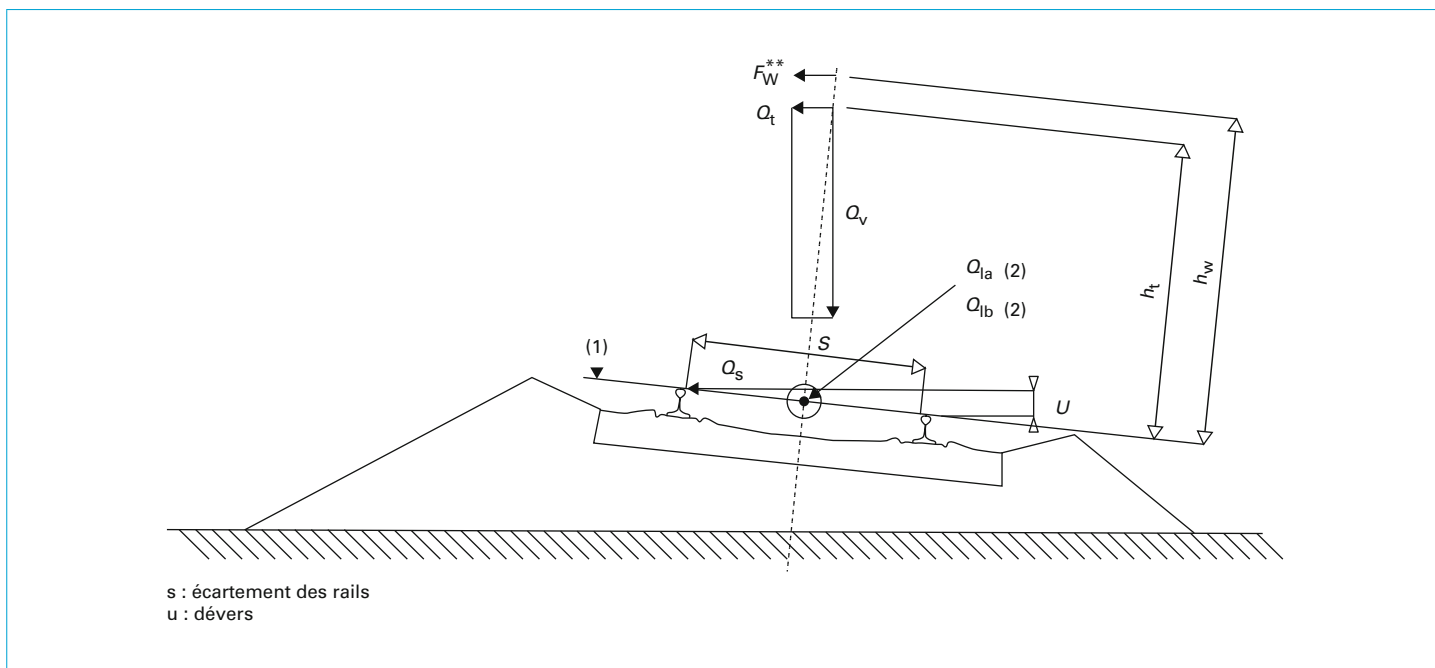


Figure 14 – Conception d'une voie ferrée

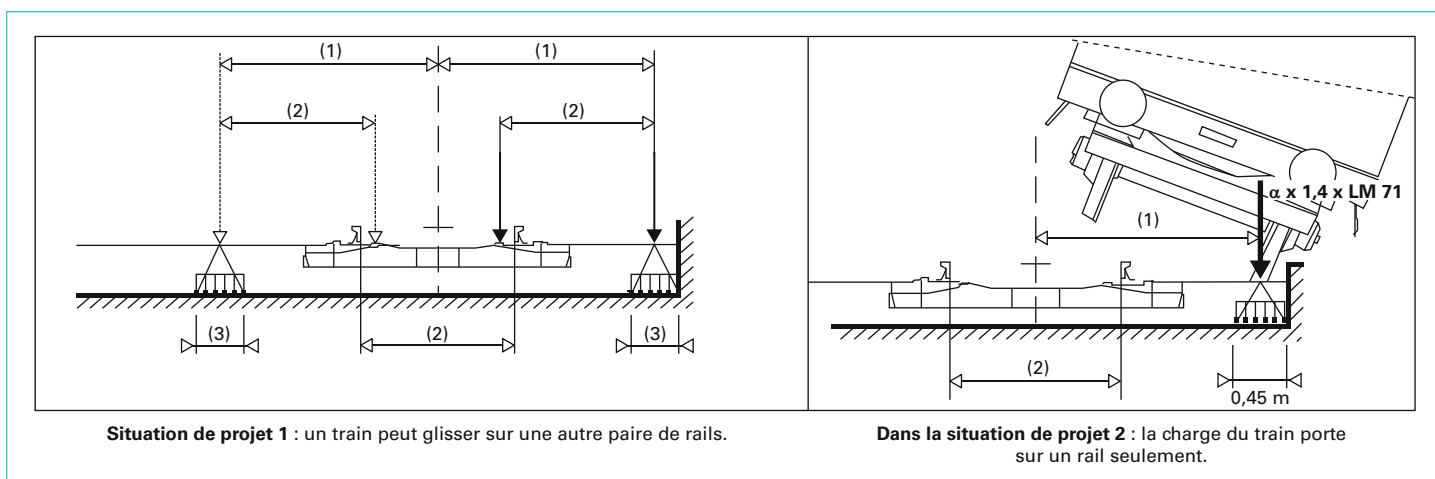


Figure 15 – Situations de projet accidentelles normalisées (état actuel)

4.4.3 Cas des ponts en site maritime ou fluvial

Diverses actions accidentelles peuvent intervenir sur des ponts en site maritime ou fluvial.

Un **exemple** en est donné à la figure 16 pour le Pont des Arts à Paris dû notamment à des chocs successifs sur les piles, celles-ci n'étant pas alignées avec les autres ouvrages aval et amont. Il s'agit donc principalement de chocs de navires plus ou moins volumineux. L'Eurocode NF EN 1991-1-7 propose certaines dispositions de calcul.

Pour ce qui est des bateaux transporteurs de pleine mer, les classes de forces de chocs évoluent entre 25 000 à 230 000 kN, mais ces valeurs semblent actuellement dépassées.

4.5 Les explosions

En matière d'explosions, l'Eurocode NF EN 1991-1-7 indique que toutes les parties d'ouvrages et de bâtiments doivent être conçues pour résister à un effondrement progressif résultant d'une explosion intérieure. Il stipule qu'il ne traite pas des explosions extérieures liées notamment aux activités de guerre ou à des actions terroristes.

Les cas traités correspondent aux explosions de poussière dans les espaces clos, aux explosions de gaz naturel dans des locaux et aux explosions de gaz et de vapeur/air dans des tunnels routiers et ferroviaires.

Selon l'Eurocode 1991-1-7 actuel, les explosions doivent être prises en compte dans le calcul de toutes les parties des ouvrages de bâtiment et de génie civil où un gaz est brûlé ou régulé, ou



Figure 16 – Choc sur une pile du pont des Arts à Paris (Photo JAC). Ce pont a été reconstruit « à l'identique » entre 1981 et 1984

lorsqu'un matériau explosif, tel que des gaz explosifs ou des liquides formant des gaz explosifs ou des vapeurs explosives, y est stocké (par exemple des installations chimiques, des récipients, des soutes, des installations d'eaux usées, des conduites de transport d'énergie, des tunnels routiers ou ferroviaires). Les effets dus aux explosifs ne relèvent pas du domaine d'application de la norme. L'influence sur l'importance d'une explosion d'effets en cascade dans des locaux reliés les uns aux autres et remplis de poussières, de gaz ou de vapeurs explosifs ne relève pas non plus du domaine d'application de l'EN 1990.

Cas des explosions dans les tunnels routiers et ferroviaires

On distingue les déflagrations des détonations.

Une déflagration est liée à la propagation d'une zone de combustion à une vitesse inférieure à la vitesse du son dans le milieu initial.

Une détonation correspond à la propagation d'une zone de combustion à une vitesse supérieure à la vitesse du son dans le milieu initial.

Les explosions de poussières dans les espaces clos, récipients et soutes, ont été rendues inapplicables par la commission française des Eurocodes. Il faut reconnaître que la méthode proposée est très calculatoire sans possibilité de contrôle. Par contre, des modèles de détonation pour tunnels ferroviaires et routiers ont été acceptés. Avec les notations de la figure 17.

En cas de déflagration dans des tunnels routiers ou ferroviaires, la pression en fonction du temps peut être prise égale à celle de la figure 17.

En cas de déflagration dans des tunnels routiers ou ferroviaires, la pression en fonction du temps peut être prise égale selon la formule attachée au graphique de la figure 18. La pression en fonction du temps peut être prise égale à p_0 qui est la

pression de crête (100 kN/m² pour un fuel courant de gaz naturel liquéfié).

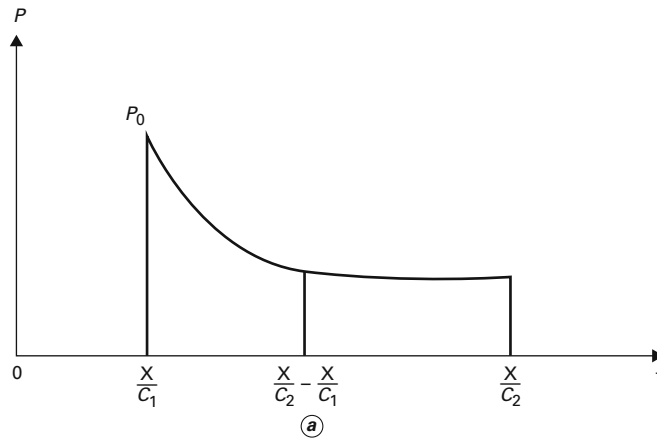
À retenir

- L'analyse de risque d'une structure comporte 4 étapes
- Définir les dangers potentiels et les scénarios de danger correspondants
- Déterminer la classe de conséquences de l'ouvrage
- Évaluer les dommages consécutifs aux dangers
- Évaluer la performance de la structure endommagée

5. Conclusion

Quelques risques ont été mentionnés dans le présent article, pour donner une idée de la notion de robustesse dans certains cas. Malheureusement, il n'est guère possible d'avoir une vue d'ensemble et certains types d'agressions ne sont pas mentionnés : agressions chimiques, biologiques etc. pouvant affecter les structures. Dans le domaine du génie civil, les agressions les plus brutales sont d'origine naturelle ou d'origine humaine. Les formules des Eurocodes sont remplacées, par les personnes compétentes qui emploient des logiciels très sophistiqués comme au JRC d'ISPRA en Italie.

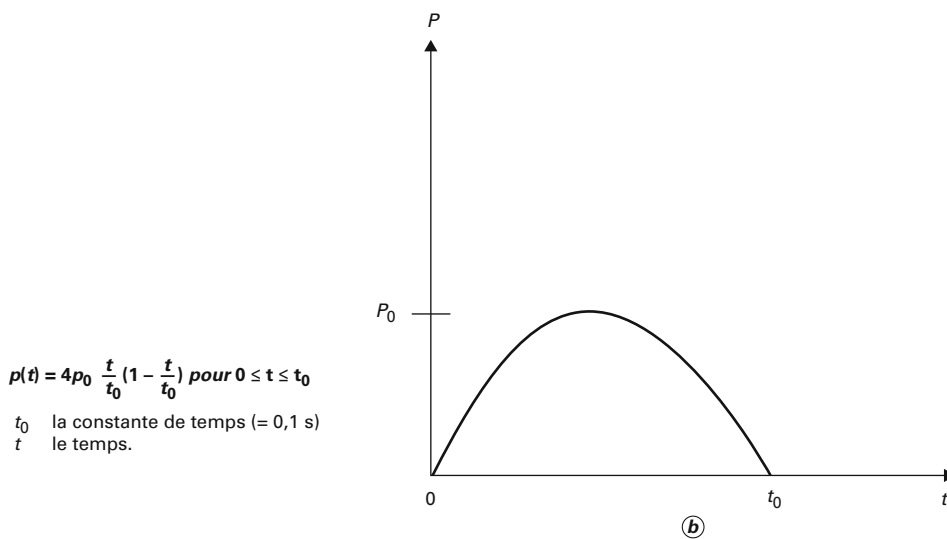
Rappelons finalement que la robustesse est « rassurante » pour les usagers des structures de génie civil, mais ne saurait neutraliser la peur du risque dont on évalue mal le niveau de crainte en raison de la grande variété de phénomènes naturels et artificiels.



$p(x, t) = 0$ en dehors de ces deux conditions où :

- P_0 est la pression de crête (2 000 kN/m² pour un fuel courant de gaz naturel liquéfié) ;
- C_1 la vitesse de propagation de l'onde d'impact (~ 1 800 m/s) ;
- C_2 la vitesse de propagation acoustique dans des gaz chauds (~ 800 m/s) ;
- t_0 la constante de temps (= 0,01 s) ;
- x la distance au foyer de l'explosion ;
- t le temps.

Figure 17 – Effets d'une détonation dans un tunnel



$p(t) = 4p_0 \frac{t}{t_0} (1 - \frac{t}{t_0})$ pour $0 \leq t \leq t_0$

- t_0 la constante de temps (= 0,1 s)
- t le temps.

Figure 18 – Effets d'une déflagration dans un tunnel

Certes, il y a des séismes, des tsunamis, des tornades mais ... il y a aussi les guerres, les attentats, les épidémies. Depuis l'Antiquité, les architectes étaient principalement préoccupés par la résistance des ouvrages. Comme grands ancêtres, on mentionne souvent Archimède, tué à Syracuse après avoir organisé une résistance de trois ans à la flotte romaine qui assiégeait la ville et aussi Gaspard Monge s'attachant, au 18^{ème} siècle, à des problèmes de remblais.

Mais les savants en calcul des probabilités ne donnèrent, par la suite, que des éléments de décision ; l'ingénieur ou l'entreprise doivent concentrer leur art sur la solidité, la robustesse, la durabilité et la sécurité d'exécution. On peut souhaiter que cet article donne une meilleure vue de ce qu'est la robustesse d'une construction et des risques qui sont couverts dans la mesure du possible. Un professeur de mathématiques me dit un jour que

nous ne connaissons jamais la « Vérité », mais tous nos efforts permettent, lors de chaque progrès, de mieux s'en approcher.

L'auteur remercie tous les experts et collègues européens qui, en élaborant les Eurocodes et leurs annexes nationales, ont fait progresser certaines idées permettant d'élaborer et de rédiger cet article. Tous ont publié un nombre considérable de livres et de documents qu'il serait impossible de mentionner *in extenso* dans les sources bibliographiques.

6. Glossaire

Action accidentelle : action, habituellement de courte durée mais de grandeur significative, qui a peu de chances d'intervenir sur une structure donnée au cours de sa vie de projet.

Classe de conséquences : classification des conséquences de tout ou partie de la structure.

Danger potentiel : dans le cadre des EN 1990 à EN 1999, un événement grave et inhabituel, par exemple une action anormale,

une influence anormale de l'environnement, une résistance insuffisante ou un écart excessif par rapport aux dimensions prévues.

Déflagration : propagation d'une zone de combustion à une vitesse inférieure à la vitesse du son dans le milieu initial

Détonation : propagation d'une zone de combustion à une vitesse supérieure à la vitesse du son dans son milieu initial.

Élément-clef : élément de structure dont dépend la stabilité du reste de la structure.

Risque : une mesure de la combinaison (en général le produit) de la probabilité ou fréquence de la survenance d'un certain danger et de l'ampleur des conséquences.

Robustesse : aptitude d'une structure à résister à des événements tels que des incendies, explosions, chocs ou conséquences d'une erreur humaine sans présenter des dégâts disproportionnés à la cause d'origine.

Situation de projet accidentelle : situation de projet impliquant des conditions exceptionnelles au niveau de la structure

Structure : assemblage de pièces conçu pour supporter des charges et assurer un degré suffisant de rigidité

Concepts de robustesse et de risque dans les constructions

par **Jean-Armand CALGARO**

*Ingénieur Général honoraire des Ponts et Chaussées
Professeur honoraire au CHEC et à l'ENPC*

Sources bibliographiques

- [1] CALGARO (J.-A.). – *Éléments de fiabilité des constructions – Introduction aux Eurocodes*. Éditions du Moniteur (2016).

À lire également dans nos bases

CALGARO (J.-A.). – *Normes du bâtiment et des travaux publics – Base fiabiliste des Eurocodes*. [C 60], (2021).

ROUSSEAU (A.). – *Foudre et protection des bâtiments – La physique*, [C 3 307], (2020).

LUKIC (M.). – *Construction Métallique – Vérification à la fatigue selon les Eurocodes*, [C 2 542], (2018).

PAUCHET (W.). – *Sécurité incendie des ERP – Dispositions concernant la construction*, [TBA 3 002], (2018).

ENGEL (P.). – *Mise aux normes sismiques des constructions*, [C 6 303], (2017).

Normes et standards

NF EN 1990	2003	AFNOR – Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures, AFNOR	EN 1991-1-7	2007	AFNOR – Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-7 : Actions générales – Actions accidentelles
NF EN 1990/NA	2011	AFNOR	NF EN 1991-2	2004	AFNOR – Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 2 : actions sur les ponts, dues au trafic
EN 1990	2020	AFNOR – Eurocode – Bases des calculs structuraux et géotechniques, en cours de révision			

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- > + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- > + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- > Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

OFFRE



Les superstructures du bâtiment

Les aspects à maîtriser pour concevoir les superstructures et choisir les mat&eacut;riaux de construction adapt&eacut;s

Ref : TIP253WEB

PRÉSENTATION

Les méthodes fiables et les principes de base des normes doivent être maîtrisés pour pouvoir appliquer les Eurocodes.

La connaissance des caractéristiques de matériaux de construction est indispensable pour un choix éclairé.

Le béton est l'un des composants de base de la construction et il offre aux maîtres d'oeuvre de multiples possibilités.

La construction métallique, la construction mixte, la construction bois... ont chacun leur Eurocode à connaître et à appliquer.

VOTRE COMMANDE :

Référence	Titre de l'ouvrage	Prix unitaire H.T	Qté	Prix total H.T
TIP253WEB	Les superstructures du bâtiment	1 670 €	1	1 670 €
Total H.T en €				1 670 €
T.V.A : 5,5%				91,85 €
Total TTC en €				1 761,85 €

VOS COORDONNÉES :

Civilité M. Mme

Prénom _____

Nom _____

Fonction _____

E-mail _____

Raison sociale _____

Adresse _____

Code postal _____

Ville _____

Pays _____

Date :

Signature et cachet obligatoire

CONDITIONS GÉNÉRALES DE VENTE

Conditions générales de vente détaillées sur simple demande ou sur www.technique-ingenieur.fr

Si vous n'êtes pas totalement satisfait, vous disposeriez d'un délai de 15 jours à compter de la réception de l'ouvrage pour le retourner à vos frais par voie postale. Livraison sous 30 jours maximum.