

Maîtrise des risques

Application aux ouvrages d'art



Page laissée blanche intentionnellement

Guide méthodologique
Maîtrise des risques
Application aux ouvrages d'art



Ont participé à la rédaction de ce guide :

Groupe de rédaction :

- Pascal Charles, Sétra
- Jean-Marc Coudesfeytes, Sétra
- Denis Davi, CETE Méditerranée
- Vincent Fardeau, Sétra
- Thierry Kretz, Sétra
- Joël Raoul, Sétra
- Thierry Saez, Sétra
- Yannick Tardivel, Sétra

Groupe de relecture et de validation :

- Pierre-Marie Audouin-Dubreuil, ATSTD
- Christian Binet
- Christian Crémona, Sétra
- Bruno Godart, LCPC
- Jean-Claude Hippolyte, Sétra
- Évelyne Humbert, CGEDD
- Jacques Resplendino, DIR Méditerranée
- Patrice Schmitt, SNCF
- Jean-Marc Tarrieu, Sétra
- Pierre Trouillet, DGITM/DIT

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Avant-propos | 7 |
| 1 - Introduction | 9 |
| 1.1 - Contexte de l'analyse de risques | 9 |
| 1.2 - Risque et analyse de risques | 9 |
| 1.3 - Aléa – vulnérabilité – gravité des conséquences | 10 |
| 1.3.1 - L'aléa | 10 |
| 1.3.2 - La vulnérabilité | 11 |
| 1.3.3 - La gravité des conséquences | 12 |
| 1.3.4 - Combinaison des facteurs du risque | 13 |
| 1.4 - Maîtriser le risque | 14 |
| 2 - Méthodologie d'analyse de risques | 15 |
| 2.1 - Introduction | 15 |
| 2.2 - Les différentes étapes | 15 |
| 2.3 - Description détaillée des différentes étapes | 17 |
| 2.3.1 - Étape 1 – Définition de l'objectif de l'analyse de risques | 17 |
| 2.3.2 - Étape 2 – Définition du système | 18 |
| 2.3.3 - Étape 3 – Analyse de risques simplifiée | 18 |
| 2.3.4 - Étape 4 – Sélection des risques | 23 |
| 2.3.5 - Étape 5 – Analyse détaillée | 23 |
| 2.3.6 - Étape 6 – Traitement du risque | 27 |
| 3 - Grille simplifiée d'analyse des aléas | 29 |
| 3.1 - Généralités | 29 |
| 3.2 - Aléas internes exogènes à l'ouvrage | 30 |
| 3.2.1 - Corrosion des armatures passives | 30 |
| 3.2.2 - Corrosion des aciers de précontrainte intérieure | 30 |
| 3.2.3 - Corrosion des aciers de précontrainte extérieure | 31 |
| 3.2.4 - Corrosion des aciers de charpente pour une ossature métallique | 32 |
| 3.2.5 - Fatigue des aciers de charpente pour une ossature métallique | 33 |
| 3.2.6 - Réactions de gonflement interne | 33 |
| 3.2.7 - Corrosion d'un élément de l'ouvrage | 33 |
| 3.3 - Aléas internes endogènes | 34 |
| 3.3.1 - Défaut de qualité des matériaux | 34 |
| 3.3.2 - Défaut de conception/dimensionnement | 34 |
| 3.3.3 - Erreurs de réalisation | 34 |
| 3.4 - Aléas externes d'origine naturelle | 35 |
| 3.4.1 - Séisme | 35 |
| 3.4.2 - Avalanche sur ouvrage | 35 |



| | |
|---|-----------|
| 3.4.3 - Affouillement des fondations | 35 |
| 3.4.4 - Chute de blocs, rochers sur ouvrage | 35 |
| 3.4.5 - Événement géotechnique | 36 |
| 3.4.6 - Événement hydraulique | 36 |
| 3.4.7 - Effet de la foudre | 36 |
| 3.4.8 - Effet du vent | 37 |
| 3.4.9 - Zones naturelles | 37 |
| 3.4.10 - Réchauffement climatique | 37 |
| 3.4.11 - Verglas | 37 |
| 3.5 - Aléas externes d'origine humaine | 37 |
| 3.5.1 - Incendie sur ou sous ouvrage | 37 |
| 3.5.2 - Choc de poids lourd sur pile ou sur tablier | 38 |
| 3.5.3 - Choc de bateau | 38 |
| 3.5.4 - Chocs divers | 38 |
| 3.5.5 - Accidents divers | 39 |
| 3.5.6 - Effet dynamique des piétons sur une passerelle | 39 |
| 3.5.7 - Actions malveillantes | 39 |
| 3.5.8 - Exploitation de l'ouvrage | 39 |
| 3.5.9 - Changement d'usage de l'ouvrage | 40 |
| 3.5.10 - Conditions d'entretien | 40 |
| 4 - Vulnérabilité des ouvrages : éléments d'appréciation | 41 |
| 4.1 - Généralités | 41 |
| 4.2 - Vulnérabilité locale à l'aléa | 42 |
| 4.2.1 - Vulnérabilité vis-à-vis des aléas internes à l'ouvrage | 42 |
| 4.2.2 - Vulnérabilité vis-à-vis des aléas internes liés à la construction | 45 |
| 4.2.3 - Vulnérabilité vis-à-vis des aléas externes d'origine naturelle | 45 |
| 4.2.4 - Vulnérabilité vis-à-vis des aléas externes d'origine humaine | 48 |
| 4.3 - Vulnérabilité globale aux aléas | 49 |
| 5 - Importance des conséquences | 53 |
| 5.1 - Position du problème | 53 |
| 5.2 - Principe de l'évaluation | 54 |
| 5.2.1 - Évaluation sommaire | 54 |
| 5.2.2 - Évaluation détaillée | 54 |
| 5.3 - Quantification des conséquences sur les ponts routiers en situation normale | 55 |
| 5.3.1 - Principes généraux | 55 |
| 5.3.2 - Importance de la voie portée | 56 |
| 5.3.3 - Niveau de trafic | 56 |
| 5.3.4 - Valeur patrimoniale de l'ouvrage | 56 |
| 5.3.5 - Conséquences sur le niveau de service | 56 |
| 5.3.6 - Évaluation de l'indice socio-économique | 57 |
| 5.4 - Quantification des conséquences sur les ponts routiers après un séisme | 58 |

| | |
|---|-----------|
| 6 - Robustesse des ouvrages | 61 |
| 6.1 - Le concept de robustesse | 61 |
| 6.1.1 - Généralités | 61 |
| 6.2 - État de l'art | 63 |
| 6.2.1 - Causes d'effondrement des ouvrages | 63 |
| 6.2.2 - Typologie du patrimoine en France | 64 |
| 6.2.3 - Prise en compte de la robustesse sur les ouvrages actuels | 66 |
| 6.3 - Détermination de la robustesse des structures | 66 |
| 6.3.1 - Introduction | 66 |
| 6.3.2 - Présentation de l'analyse à mener | 67 |
| 6.3.3 - Méthodologie | 67 |
| 6.3.4 - Aspects probabilistes | 71 |
| 7 - Applications de l'analyse de risques simplifiée | 73 |
| 7.1 - Application à trois projets d'ouvrage neuf | 73 |
| 7.1.1 - Introduction | 73 |
| 7.1.2 - Projet du viaduc de Lezennes | 73 |
| 7.1.3 - Projet du pont de la rivière Saint-Étienne à la Réunion | 75 |
| 7.1.4 - Projet du pont de la Tardoire sur la RN141 | 77 |
| 7.1.5 - Bilan sur l'application de la méthode | 79 |
| 7.2 - Application de l'analyse de risques aux VIPP | 79 |
| 7.2.1 - Problématique | 79 |
| 7.2.2 - Identification des aléas | 80 |
| 7.2.3 - Étude de la vulnérabilité | 83 |
| 7.2.4 - Évaluation des conséquences | 85 |
| 7.2.5 - Évaluation des risques | 85 |
| 7.3 - Application à la gestion des ouvrages | 88 |
| Bibliographie | 91 |



Avant-propos



L'objet de ce document est de présenter les principes généraux de maîtrise des risques et de les appliquer de façon opérationnelle à des ouvrages d'art, qu'ils soient neufs ou existants.

Les analyses de risques sont aujourd'hui pratiquées dans de nombreux domaines pour lesquels les conséquences sont souvent nettement plus importantes que pour les ouvrages d'art : aéronautique, installations industrielles à enjeux importants (chimique, nucléaire...). Les phénomènes mis en jeu dans ces domaines sont nettement plus complexes qu'ils ne le sont pour les ouvrages d'art. En conséquence, les analyses de risques font l'objet d'une théorie et d'une codification complexe et détaillée, mettant en jeu plusieurs étapes importantes (analyse fonctionnelle, arbres de défaillance...). Dans ces domaines, les analyses de risques sont de plus pratiquées depuis longtemps, et sont maintenant bien intégrées aux processus industriels.

Pour les ouvrages d'art, l'analyse de risques peut se simplifier car les objets en jeu sont plus simples, et aussi parce que le temps passé à produire des analyses de risques conformes aux habitudes en vigueur dans ces domaines pourrait conduire à un surcroît très important de temps passé, déjà rare (surtout pour ce qui concerne la gestion des ouvrages existants) mais aussi pouvant réduire le temps accordé aux études techniques ce qui fait perdre l'intérêt, en termes de sécurité globale de l'ouvrage, d'une telle procédure.

Tout ce qui est présenté dans les chapitres suivants ne suit donc pas rigoureusement ce qui est mis en œuvre dans ces différents domaines, mais simplifie considérablement l'analyse pour le cas particulier des ouvrages d'art, en conservant tout de même le vocabulaire et les principes théoriques des analyses de risques, afin de conserver le fil conducteur méthodologique des pratiques existantes éprouvées.

Bien entendu, les pratiques actuelles pour la construction des ouvrages d'art en France intègrent de manière implicite une certaine forme d'analyse de risques. Les règlements, l'état de l'art, les recommandations d'organismes compétents et l'expérience acquise permettent d'éviter de nombreux risques réputés probables. De même, les nombreuses méthodes de gestion des ouvrages d'art (IQOA, ITSEOA, méthode départementale, VSC) vont dans le sens de la maîtrise des risques sur les ouvrages existants. Néanmoins, ces méthodes sont généralement davantage basées sur l'état des ouvrages et la connaissance des aléas passés que sur les risques à venir. Il y a donc un réel besoin de formaliser tout ce qui est fait, de généraliser à d'autres domaines et d'anticiper les risques de demain, notamment ceux liés au réchauffement climatique, à la volonté de construire des infrastructures dans un souci de développement durable, ainsi qu'au vieillissement du parc d'ouvrages d'art.

Le présent guide est organisé en sept chapitres. Le premier chapitre présente les différents concepts de l'analyse de risques, et en particulier ceux développés plus précisément dans ce guide. Le deuxième chapitre présente la méthodologie globale d'analyse de risques proposée pour les ouvrages d'art, qui combine les notions d'aléa, de vulnérabilité et d'importance des conséquences (ou enjeu).

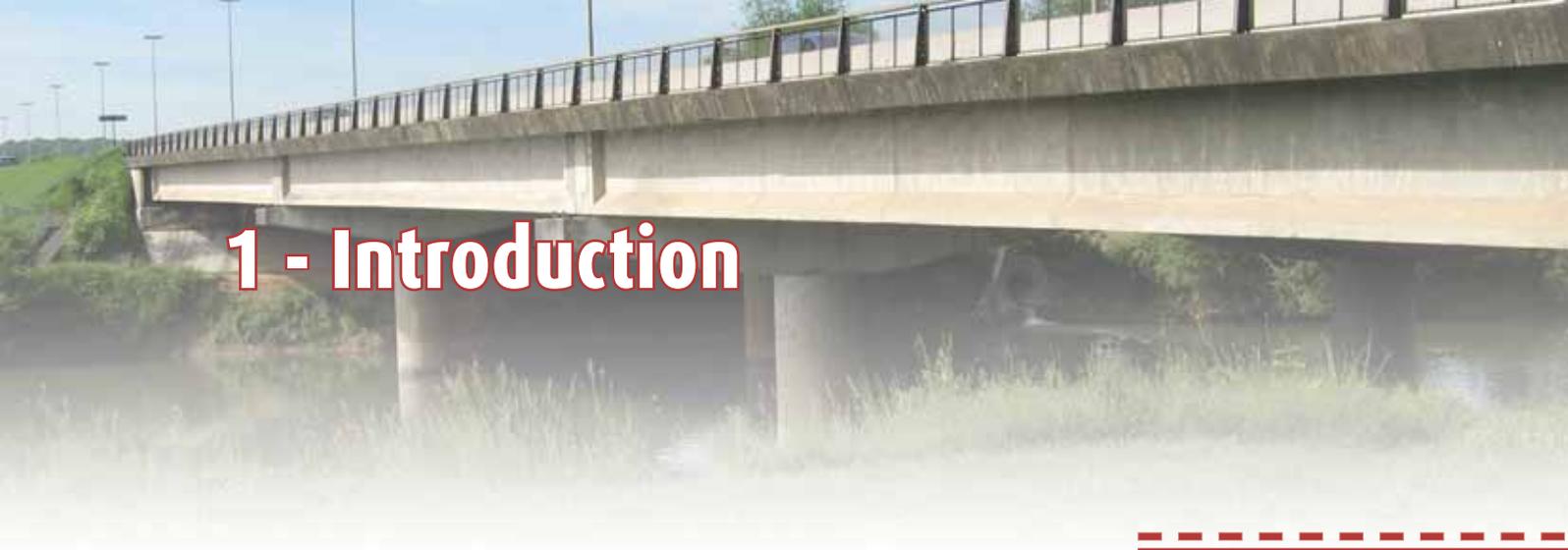
Le chapitre 3 présente une grille simplifiée d'analyse des aléas, dans le cadre d'une analyse simplifiée des risques, et renvoie vers d'autres documents pour la quantification détaillée des aléas. Le chapitre 4 est consacré à l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages, selon une approche simplifiée. Le chapitre 5 donne différents moyens, plus ou moins détaillés, pour évaluer l'importance des conséquences et l'enjeu.

Si les chapitres 3, 4 et 5 sont plus consacrés à l'évaluation simplifiée des risques, le chapitre 6 développe très largement le concept de robustesse des ouvrages qui s'évalue de la même manière que la vulnérabilité « détaillée » des ouvrages. Le chapitre 7 conclut le guide sur la présentation de divers exemples d'application de la méthode d'analyse de risques simplifiée appliquée à trois projets d'ouvrage, et à l'étude d'une famille d'ouvrages (VIPP).

Pour résumer, le présent guide offre donc au lecteur une méthodologie complète d'analyse de risques, et des outils opérationnels pour l'évaluation simplifiée des risques (première étape de l'analyse) appliquée aux ouvrages d'art. Il donne les grands principes de l'analyse détaillée des risques, mais renvoie vers d'autres documents lorsqu'ils existent, ou à une analyse au cas par cas qui sort du cadre du guide. En particulier, il complète une série de documents spécifiques diffusés ou en cours de diffusion par le Sétra sur l'analyse de risques simplifiée appliquée aux ouvrages sensibles (VIPP, buses métalliques, ouvrages affouillables, murs en terre armée). Ce guide est complété par une fiche MS-Excel© mettant en œuvre les principes de l'analyse de risques simplifiée et téléchargeable sur la plate-forme Ouvrages d'Art « PILES » du Sétra : <http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/>.







1 - Introduction

1.1 - Contexte de l'analyse de risques

Les théories classiques de l'analyse de risques et de la maîtrise des risques se généralisent de plus en plus sur les ouvrages de génie civil pour tenir compte de phénomènes qui sont difficiles à évaluer, incertains, en général très pénalisants pour les structures mais dont la probabilité d'occurrence est faible ou extrêmement faible. L'analyse de risques apparaît comme la méthode la plus structurée pour appliquer le principe de précaution et plus généralement les principes du développement durable sur un projet d'infrastructure.

Les analyses de risques sont aussi un outil performant pour réaliser certains choix stratégiques lorsque les moyens ne sont pas extensibles, par exemple pour la gestion d'un parc d'ouvrages existants ou la remise à niveau d'une famille d'ouvrages par rapport à un risque particulier. L'analyse de risques permet aussi de définir une stratégie de suivi et d'inspection d'ouvrage en fonction du niveau de risque, ou encore de hiérarchiser les ouvrages pour un éventuel renforcement ou une réparation. Dans ce sens, l'analyse de risques à elle seule ne suffit pas. Elle doit précéder la décision dans le cadre d'un processus global de maîtrise des risques.

Analyser les risques, puis les maîtriser ne signifie pas nécessairement les réduire à zéro. C'est souvent très difficile à réaliser, et extrêmement coûteux. De plus, il est bien connu que le risque zéro n'existe pas. En revanche, être conscient des risques qui existent et avoir pris des dispositions pour en réduire leurs impacts potentiels font partie des bonnes pratiques.

Comme cela a été évoqué dans l'avant-propos, l'objet de ce document n'est pas de réinventer toutes les règles de maîtrise des risques qui existent déjà, mais plutôt de formaliser et généraliser la démarche. Il donne une méthode pour analyser tous les risques de manière exhaustive. Pour la conception des ouvrages neufs, le respect des Eurocodes et des règles de l'art cherche déjà à minimiser les risques et on s'intéresse alors aux risques moins connus. Pour les ouvrages anciens, non nécessairement dimensionnés avec les règles modernes, l'analyse de risques prend tout son sens.

1.2 - Risque et analyse de risques

De nombreux ouvrages donnent une définition du risque. Une des définitions du risque peut être la suivante : « *Le risque est un danger éventuel, plus ou moins prévisible, qui peut affecter l'issue d'un projet* ». On voit apparaître dans cette définition trois caractéristiques du risque :

- il est incertain, c'est-à-dire que les actions ou scénarios pris en compte dans l'analyse ne se réaliseront pas forcément durant la vie de l'ouvrage. L'analyse de risques fait donc intervenir des probabilités d'occurrence ;
- il est plus ou moins prévisible, c'est-à-dire qu'il est difficile à prévoir. La connaissance des actions et scénarios est partielle, bien définie dans certains cas (séisme, par exemple) lorsque des études très poussées ont été réalisées, mais moins bien connu dans beaucoup d'autres cas ;
- il présente un danger, c'est-à-dire que la manifestation de l'action ou du scénario présente des conséquences désagréables voire graves, en termes de sécurité, d'économie, d'environnement, de fonctionnement pour le gestionnaire, l'utilisateur, etc. Ainsi, l'effondrement de l'ouvrage, s'il paraît le risque le plus important, n'est cependant pas le seul à appréhender. Le risque pour la sécurité des usagers, l'économie globale d'un projet sur le long terme et l'environnement sont aussi très importants.

La norme ISO 13824:2009 [1] précise que « *le risque est la combinaison de la probabilité ou fréquence d'occurrence*

d'un événement et la magnitude de ses conséquences. Du point de vue de la théorie de la décision, c'est la valeur attendue des conséquences indésirables, c'est-à-dire la somme de tous les produits des conséquences d'un événement et leurs probabilités ».

Si les deux notions d'aléas et de conséquences apparaissent dans tous les documents traitant de l'analyse de risques, le passage entre les deux nécessite une spécialisation par domaine. Pour les ouvrages d'art, on introduit la notion de vulnérabilité qui traduit le comportement direct d'une structure vis-à-vis d'un aléa, ce qui permet d'établir les conséquences d'un aléa et d'évaluer le risque global. La vulnérabilité est ainsi propre à un ouvrage d'art alors que l'aléa est en partie extérieur à celui-ci, bien que certains aléas se manifestent au cœur même de la structure (par exemple, corrosion due à des agents agressifs extérieurs).

La norme ISO GUIDE 73:2009 [2] sur le management du risque précise que l'analyse de risques est un processus mis en œuvre pour comprendre la nature d'un risque et pour déterminer le niveau de risque. Dans ces conditions, la norme ISO 13824:2009 [1] précise qu'il s'agit d'un « *processus global d'établissement du contexte structurel, la définition du système, l'identification des aléas et des conséquences, l'estimation du risque et l'évaluation des différentes alternatives de traitement du risque* ».

1.3 - Aléa – vulnérabilité – gravité des conséquences

Comme mentionné précédemment, pour produire une analyse de risques sur un ouvrage d'art, trois facteurs sont à évaluer et à renseigner de la manière la plus complète possible. Ces facteurs sont l'**aléa**, la **vulnérabilité** et la **gravité des conséquences**, appelée aussi l'**enjeu**.

1.3.1 - L'aléa

L'aléa est le phénomène qui est à l'origine du risque, qui peut se produire ou non au cours de la vie de l'ouvrage. La norme ISO GUIDE 73:2009 [2] parle de « *source de risque* ». Il est très important de noter que l'aléa est « incertain ». Lorsque des facteurs susceptibles d'entraîner à plus ou moins long terme des désordres dans l'ouvrage sont bien connus, ce ne sont plus des aléas mais des facteurs de risques modifiant d'autres aléas. Par exemple, une éventuelle augmentation de trafic à terme sur une infrastructure routière est un aléa, alors que la constatation de l'augmentation de trafic (du moment que l'on parvient à la quantifier même approximativement) n'est pas un aléa, mais une réalité.

L'aléa est ainsi la possible manifestation :

- d'un endommagement interne (provoqué par des charges de fatigue, corrosion des armatures provoquée par des agents agressifs, réactions de gonflement internes liées à la nature des matériaux et à des agents extérieurs, etc.) ;
- d'un défaut interne initial (défauts de conception ou de construction entraînant une rupture interne, matériaux défectueux...) pouvant se révéler ultérieurement dans la vie de l'ouvrage ;
- d'un phénomène externe d'origine naturelle (séismes, avalanches, chutes de blocs, foudre, événements climatiques extrêmes, crues, glissements de terrain, inondations, chaleur intense, changement climatique) ;
- d'un phénomène externe d'origine humaine (incendie, explosion industrielle, choc de véhicule, bateau, train ou avion, effet vibratoire d'une foule, surcharge exceptionnelle, vandalisme, évolution des besoins d'une infrastructure).

Un aléa est en toute rigueur caractérisé par sa probabilité d'occurrence pendant une période de référence (on parle aussi de période de retour de l'événement qui peut être décennale, centennale ou plus) et l'intensité de sa manifestation (magnitude pour les séismes, températures atteintes ou flux thermiques pour un incendie, vitesse, hauteur et consistance de la neige pour une avalanche, masse et vitesse pour la chute d'un bloc, intensité de la foudre, dimension d'une fissure initiale pour un défaut interne, avancée du front de carbonatation dans le béton...). Lorsque la probabilité d'occurrence n'est pas connue, on peut néanmoins faire une analyse statistique sur les accidents antérieurs pour l'évaluer sommairement. Il est souvent utile d'associer plusieurs probabilités d'occurrence à plusieurs intensités de phénomène.

Les aléas internes relatifs à un endommagement des matériaux sont plus complexes à évaluer. Ils ont une probabilité d'occurrence qui augmente avec le temps et surtout, ils dépendent d'autres facteurs plus ou moins bien connus :

- facteurs externes environnementaux : environnement marin, environnement neigeux (gel/dégel, sels de déverglaçage) ;
- facteurs externes humains : exploitation intense de l'ouvrage (nombre de passage de poids lourds, fréquence d'utilisation de sels de déverglaçage), passage de convois exceptionnels ;

- facteurs internes liés à des défauts initiaux : mauvaise conception ou réalisation ;
- facteurs internes liés à une mauvaise connaissance des caractéristiques des matériaux (réactions internes, retrait fluage du béton....) ;
- facteurs internes liés, pour des ouvrages très anciens, à la méconnaissance des phénomènes ou aux pratiques antérieures : absence de chape d'étanchéité, non prise en compte des pertes de précontraintes, des effets du gradient thermique.

Pour ces aléas, il n'est pas toujours possible de raisonner en termes de probabilité/magnitude par manque d'information sur les processus en cours. Dans de nombreux cas, il peut être utile de quantifier l'aléa par un indice de niveau « qualitatif » prenant en compte à la fois la probabilité et la magnitude du phénomène. Il faut dans ce cas calibrer l'indice en question sur des cas connus, et ce processus fait nécessairement appel à des experts. À titre d'exemple, le niveau de l'aléa « corrosion des armatures » d'une poutre est lié à la concentration des agents agressifs, que ce soient les chlorures, les sels de déverglaçage... Il sera quantifié en différents niveaux selon les valeurs des paramètres précédents. On parlera alors de niveaux d'intensité d'aléa.

On peut avoir pour les ouvrages existants des informations supplémentaires liées à l'état de l'ouvrage : présente-t-il des désordres qui mettent en évidence une mauvaise conception/réalisation, une absence d'entretien, un vieillissement accéléré ? Il faut bien noter que l'on s'intéresse dans ce cas à l'état de l'ouvrage uniquement parce qu'il traduit l'existence d'un phénomène externe à celui-ci, provoquant sa dégradation. On s'intéressera à nouveau à l'état de l'ouvrage dans le paragraphe suivant mais cette fois pour évaluer sa vulnérabilité à l'aléa. Dans ce dernier cas, c'est l'état des parties structurelles de l'ouvrage qui importe, alors que dans le premier cas, ce sont toutes les dégradations, y compris sur des parties non structurelles, qui révèlent, par exemple, l'existence d'agents agressifs.

Un exemple de synthèse de différents aléas affectant un pont sont représentés sur la figure 1-1.

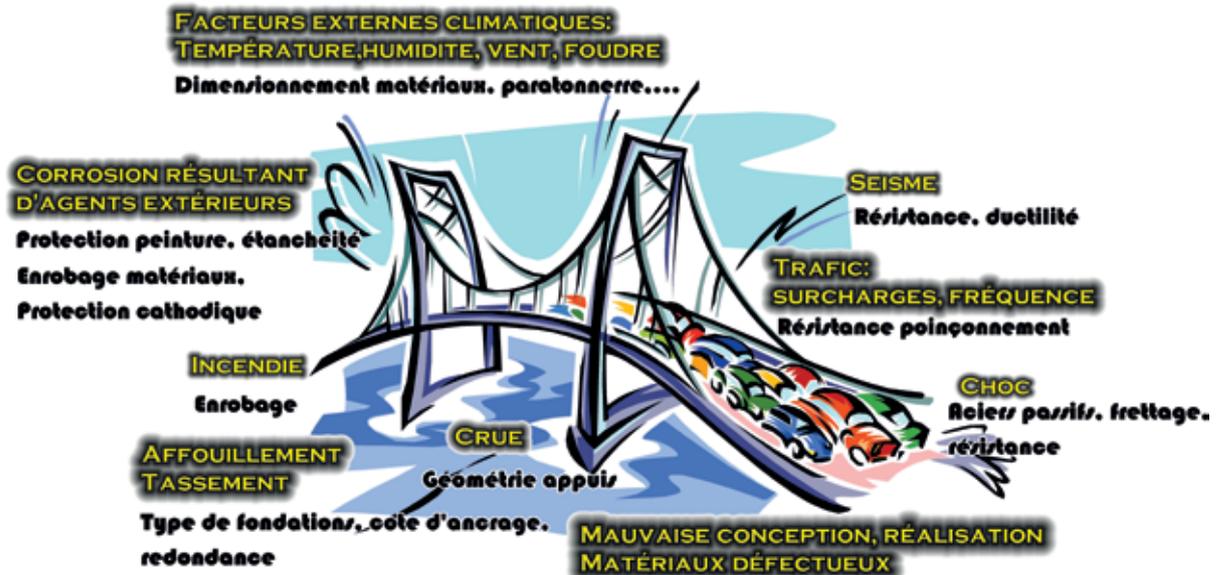


Figure 1-1 : représentation schématique des aléas sur un ouvrage d'art (Source : Sétra)

1.3.2 - La vulnérabilité

La vulnérabilité (sous-entendu d'un ouvrage) est la sensibilité d'un ouvrage vis-à-vis de l'aléa. Cette vulnérabilité dépend de l'aléa proprement dit, mais aussi de l'ouvrage, car les ouvrages sont plus ou moins sensibles aux différents aléas. Par exemple, un ouvrage métallique léger est peu vulnérable au séisme, mais très vulnérable à l'incendie. Inversement, un pont en béton précontraint, dont les câbles sont très enrobés dans le béton sera plus vulnérable au séisme, mais moins à l'incendie.

La norme ISO GUIDE 73:2009 [2] souligne qu'il s'agit « de propriétés intrinsèques entraînant une sensibilité à une source de risque pouvant induire un événement avec une conséquence ». La vulnérabilité est donc une notion qui dépend de l'aléa concerné, mais qui doit aussi être intrinsèque et déterminée vis-à-vis d'un ensemble d'aléas inconnus. Cette vulnérabilité intrinsèque est la capacité d'une structure à encaisser un certain nombre d'efforts très variés.

La vulnérabilité dépend de plusieurs aspects : la conception de l'ouvrage, mais aussi l'état réel de l'ouvrage pour un ouvrage existant. En effet, l'ouvrage peut être très peu vulnérable sur le papier, mais son état réel fait craindre que cette sécurité soit très relative.

Lorsque l'ouvrage est très peu vulnérable, il est dans la majorité des cas relativement robuste. Si la notion de robustesse est globalement l'inverse de la notion de vulnérabilité, elle présente quelques subtilités par rapport à la vulnérabilité. Un ouvrage est robuste lorsque des aléas « faibles » en importance n'entraînent pas des conséquences disproportionnées. Un ouvrage robuste peut donc parfaitement être vulnérable à des aléas très importants. En revanche, un ouvrage qui n'est pas vulnérable est robuste. L'exigence de robustesse est donc un minimum (on est dans la situation d'un aléa fréquent et de conséquences importantes) alors que l'exigence d'invulnérabilité n'est pas indispensable, et doit dépendre du risque global. La robustesse fait l'objet d'un chapitre spécifique de ce document (chapitre 6). Néanmoins, l'évaluation de la robustesse d'une structure se réalise par les mêmes outils que l'évaluation de sa vulnérabilité.

La vulnérabilité peut s'évaluer suivant deux aspects : la vulnérabilité locale qui concerne le comportement des éléments de structure directement en contact avec l'aléa, et la vulnérabilité globale qui prend en compte la contribution d'autres éléments de structure, pas directement exposés à l'aléa, mais pouvant reprendre une partie des efforts suite à la rupture de l'élément en contact avec l'aléa, et à la redistribution des efforts qui suit.

La figure 1-1 précise, pour chaque aléa, quelques éléments qui contribuent à la vulnérabilité ou non de l'ouvrage à l'aléa.

1.3.3 - La gravité des conséquences

Les **conséquences**, ou encore l'**enjeu**, ou l'**importance** comptabilisent les dommages directs à la fin de l'événement exceptionnel sur les ouvrages (et les coûts de réparation associés) et les vies humaines. Ceci inclut également les perturbations économiques et sociales qui résident essentiellement dans les pertes d'exploitation de l'infrastructure routière ou des installations et équipements desservis, mais aussi les atteintes à l'environnement. Enfin, les aspects médiatiques ne doivent pas être occultés. En toute rigueur, l'enjeu ne peut être déterminé complètement que dans un cadre plus vaste, incluant l'itinéraire entier et l'activité socio-économique qui en dépend.

Les conséquences font à la fois intervenir l'ouvrage via les conséquences de la réalisation de l'aléa (résultat du processus d'évaluation de la vulnérabilité) mais aussi l'enjeu intrinsèque de l'ouvrage pour la collectivité.

Plusieurs types de conséquences peuvent intervenir :

- effondrement de tout ou partie de la structure : c'est la conséquence la plus importante et la plus grave qui a des conséquences humaines, financières, écologiques... ;
- sécurité des usagers : autant l'effondrement complet de la structure est rare, autant les évolutions pouvant mettre en péril la sécurité des usagers sont plus fréquentes : déformations importantes entraînant une dégradation des caractéristiques géométriques de la route nécessaire à la sécurité des usagers, baisse de performance des équipements de sécurité, chute de morceaux de béton ou d'éléments métalliques (par exemple, chute de corniches métalliques ou écrans) pouvant avoir des conséquences catastrophiques bien que l'intégrité structurelle de l'ouvrage ne soit pas mise en jeu ;
- perte d'aptitude au service de l'infrastructure : l'ouvrage ne s'effondre pas mais il est inutilisable sur une certaine durée, ce qui a des conséquences importantes sur l'activité socio-économique d'une région ;
- coût total du projet sur sa durée de vie attendue du fait d'aléas de chantier, d'une inadaptation aux besoins ultérieurs...

L'enjeu de l'ouvrage dépend quant à lui de sa position et de son utilisation :

- trafic sur l'ouvrage, pourcentage de poids lourds qui donne une indication des perturbations socio-économiques pouvant résulter de la perte de service ;
- taille de l'ouvrage et importance financière des travaux de remise en service ;
- possibilité d'itinéraires alternatifs qui complète l'évaluation de l'impact socio-économique.

La difficulté de l'évaluation des enjeux consiste à comparer ces différents éléments entre eux, et aussi entre les ouvrages. D'un point de vue éthique, il paraît ainsi difficile de comparer des pertes en vie humaine aux conséquences socio-économiques de la rupture d'un itinéraire. Pour pallier ce problème, on peut utiliser dans l'analyse de risques un indicateur qualitatif prenant en compte ces différents éléments. L'indicateur doit être suffisamment précis si l'on veut que l'évaluation de la gravité des conséquences soit discriminante pour les ouvrages.

1.3.4 - Combinaison des facteurs du risque

Au final, les trois facteurs du risque se combinent pour donner un niveau de risque global de la structure. Cependant, les aléas sont souvent multiples et dépendent de facteurs plus ou moins bien connus (aléas secondaires). La réponse de l'ouvrage (sa vulnérabilité) dépend aussi de divers facteurs. Plusieurs réponses à un même aléa sont possibles et donc plusieurs conséquences sont possibles.

Pour croiser tous ces facteurs, et lorsque la connaissance des phénomènes est suffisamment importante, on utilise la notion de scénario : un scénario est une description qualitative d'une série d'événements liés à des aléas, produisant un certain type de comportement de la structure (qui dépend de facteurs) et des conséquences associées (qui peuvent aussi dépendre de facteurs).

On peut évaluer un niveau de risque par scénario envisagé. Le risque global découle ainsi de l'ensemble des risques individuels correspondant aux différents scénarios envisagés (somme des risques correspondant à plusieurs aléas distincts, le risque correspondant à un aléa particulier étant l'enveloppe des niveaux de risques associés aux différents scénarios de réalisation de l'aléa).

La figure 1-2 explicite la combinaison des différents facteurs du risque à l'aide de scénarios plausibles permettant d'évaluer un niveau de risque pour le scénario et pour la structure.

Ce principe consistant à établir des scénarios et à les tester sur l'ouvrage ne peut se placer que dans le cadre d'une analyse relativement détaillée des risques sur un ouvrage d'art, puisque l'on n'échappe pas à l'évaluation du comportement mécanique de la structure dans le scénario envisagé, ce qui implique un minimum de calculs. Dans le cas de l'analyse simplifiée présentée ultérieurement dans le guide, on simplifiera beaucoup cette partie de l'analyse.

Il est à noter que l'analyse de risques peut être complète (tous les aléas sont envisagés) ou partielle (un seul type d'aléa est envisagé) pour restreindre l'analyse lorsqu'une famille d'ouvrages est, par exemple, particulièrement sensible à un aléa, ou pour traiter un aléa spécifique (incendie, affouillement) sans compliquer l'analyse avec les autres aléas possibles.

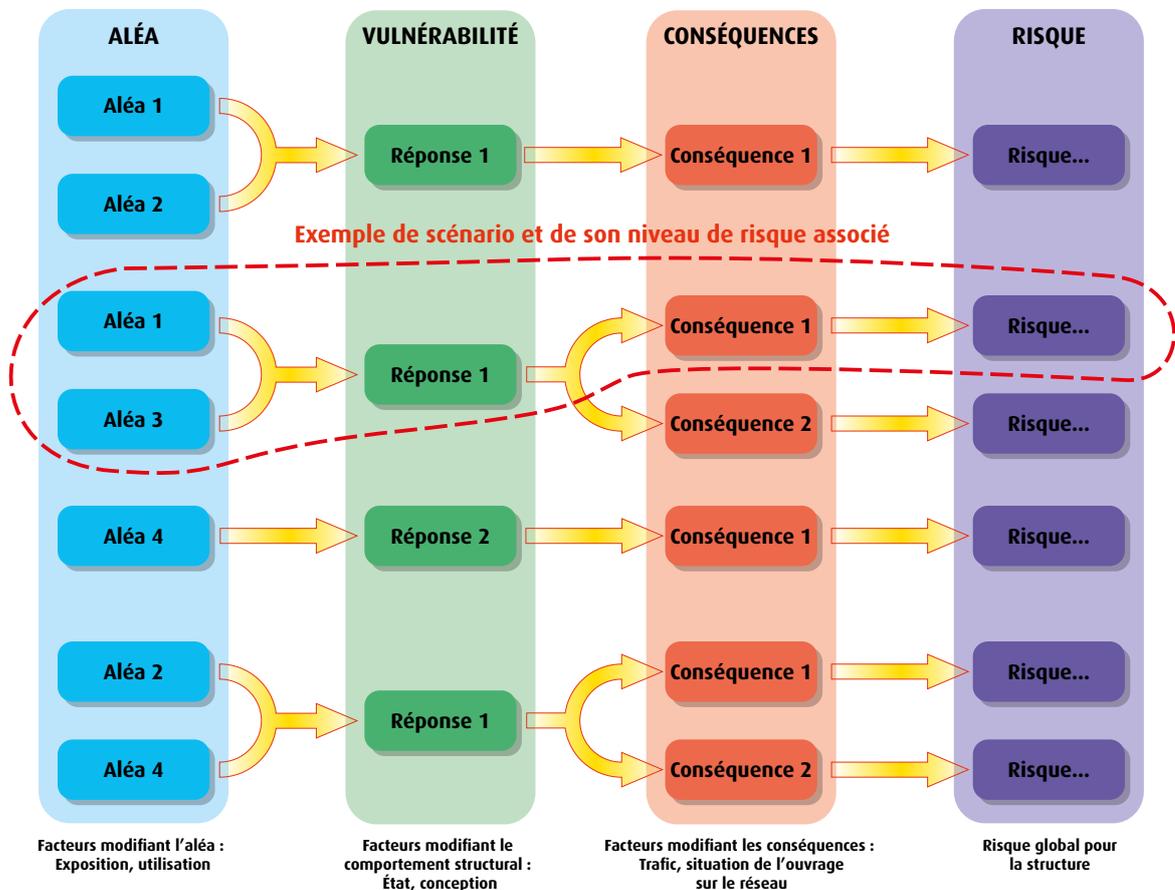


Figure 1-2 : exemples de scénarios et détermination du niveau de risque

1.4 - Maîtriser le risque

Les différents concepts de l'analyse de risques présentée précédemment sont purement descriptifs et basés sur l'observation des différents risques pouvant survenir sur une structure. L'étape suivante est nécessairement décisionnelle, puisque l'analyse de risques est conduite dans le but d'évaluer un ouvrage pour éventuellement prendre des mesures. Cette étape est appelée « maîtrise des risques » et inclut l'analyse de risques et le traitement des risques évalués.

La maîtrise du risque ne signifie pas nécessairement que la structure doit supporter tous les aléas en se comportant de manière réversible, c'est-à-dire sans s'endommager. Il est habituel d'accepter un certain niveau d'endommagement sous les actions accidentelles d'intensité très forte, pour ne pas surdimensionner inutilement l'ouvrage.

La capacité de la structure à résister à l'aléa doit dépendre de la probabilité d'occurrence, et en particulier de la période de retour de l'événement. Si celle-ci est faible, l'aléa est fréquent et la structure devra y résister sans s'endommager, c'est-à-dire en restant dans son domaine de comportement élastique. Si la période est élevée, l'aléa est rare ou très rare, et on pourra considérer le comportement ultime, c'est-à-dire accepter des fissurations et déformations plastiques résiduelles. Si l'aléa est extrêmement rare, on ne le prend généralement pas en compte. Ainsi, la maîtrise du risque passe nécessairement par la connaissance scientifique du phénomène et par la connaissance de sa probabilité d'occurrence (en termes d'un nombre moyen d'événement par an, ou à l'aide d'un indicateur qualitatif adapté).

La conséquence logique de l'analyse de risques est la prise de mesures, qui ont en général un coût plus ou moins important et une efficacité plus ou moins avérée. L'analyse de risques doit donc également permettre une analyse de type « coûts-bénéfices » de façon à sélectionner les mesures qui ont le plus d'impact sur la baisse du niveau de risque, pour le coût le plus raisonnable.

2 - Méthodologie d'analyse de risques

2.1 - Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie générale d'analyse de risques proposée pour les ouvrages d'art. Comme cela a été dit dans le chapitre précédent, la méthode repose principalement sur l'évaluation du trio aléa-vulnérabilité-gravité des conséquences.

Cette évaluation peut se faire de manière qualitative, ou plus quantitative selon les cas. Il est conseillé de procéder en deux étapes, en réalisant dans un premier temps systématiquement une analyse de risques simplifiée, principalement **qualitative**, et en approfondissant et quantifiant certains points lorsque cette première analyse ne permet pas de conclure. L'analyse de risques détaillée qui résulte de cet approfondissement peut être **semi-quantitative** ou **quantitative** en fonction des moyens disponibles, des enjeux, de l'ampleur de l'étude, et aussi de la connaissance des phénomènes physiques.

2.2 - Les différentes étapes

La méthodologie de l'analyse de risques comporte un certain nombre d'étapes :

Étape 1 – Définition de l'objectif de l'analyse de risques.

Étape 2 – Définition du système : recueil de données existantes.

Étape 3 – Analyse de risques simplifiée :

- identification et évaluation simplifiée des aléas ;
- évaluation simplifiée de la vulnérabilité aux aléas ;
- évaluation simplifiée de l'importance des conséquences ;
- évaluation du risque à l'aide de matrices de risques.

Étape 4 – Sélection des risques : parmi l'ensemble des niveaux de risques, associés aux différents aléas et scénarios, on sélectionne les aléas pour lesquels le niveau de risque est élevé ou moyen (quand l'analyse simplifiée est trop superficielle).

Étape 5 (*si nécessaire*) – Analyse détaillée des risques

- évaluation détaillée des aléas ;
- choix et description des scénarios ;
- évaluation détaillée de la vulnérabilité par l'étude des scénarios ;
- évaluation détaillée de l'importance des conséquences ;
- évaluation quantitative du risque.

Étape 6 – Traitement du risque : établir les conclusions de l'analyse de risques, décider des actions à mener.

La figure 2-1 récapitule la méthodologie sur un organigramme détaillé, ainsi que les mesures à prendre ou non en fonction du niveau de risque.

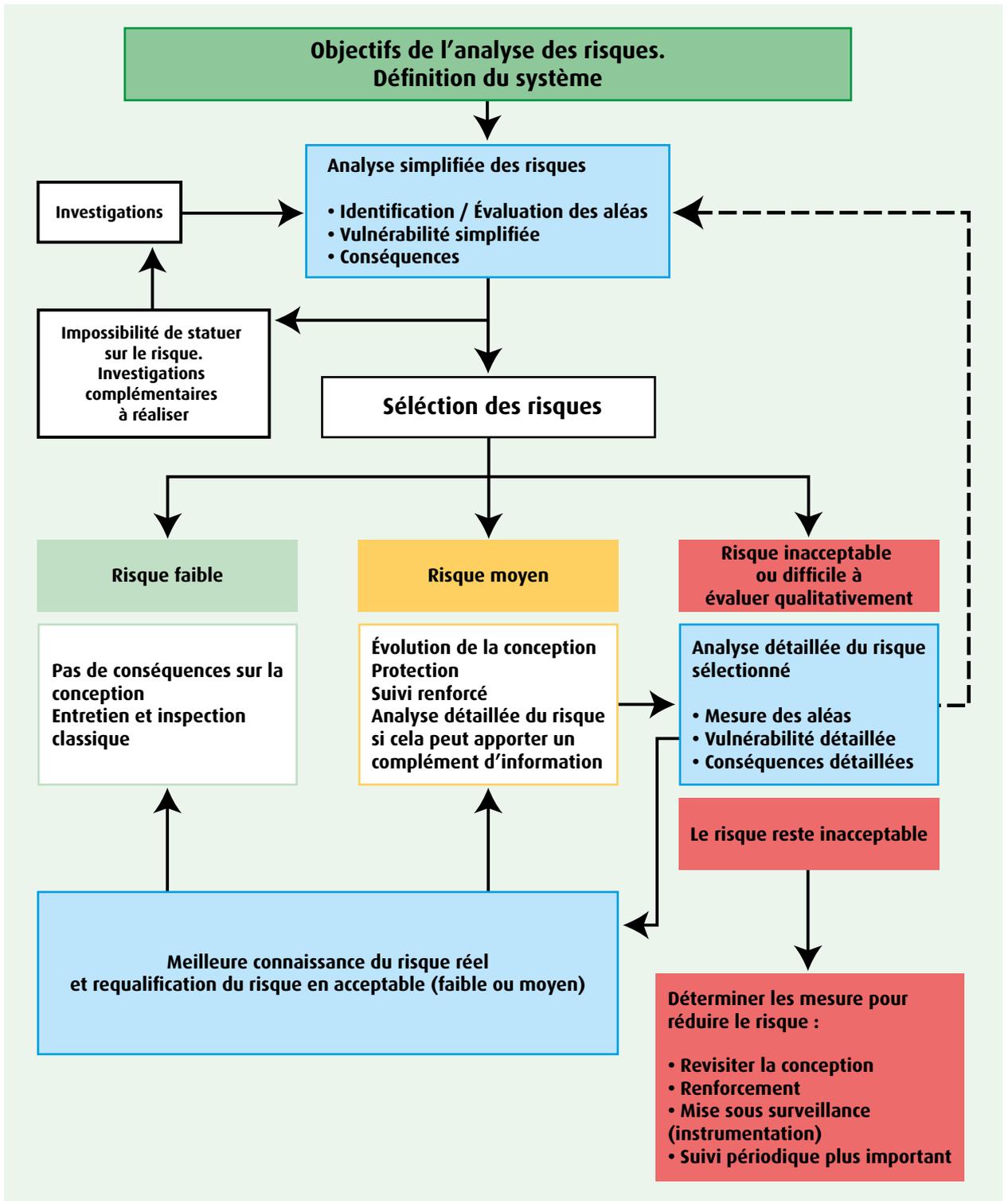


Figure 2-1 : organigramme de la méthodologie

2.3 - Description détaillée des différentes étapes

2.3.1 - Étape 1 – Définition de l'objectif de l'analyse de risques

Avant de procéder à une analyse de risques sur un ouvrage d'art neuf ou existant, il convient de préciser l'intérêt et le rôle de cette analyse. Il n'est pas nécessaire de pratiquer systématiquement une analyse de risques pour tous les ouvrages à tous les stades de leur vie. Il faut aussi préciser ce que l'on attend de l'analyse de risques. Il y a en effet un aspect décisionnel qui est une conclusion logique de l'analyse de risques (la décision pouvant être de ne rien faire, mais par choix délibéré et réfléchi et non par omission). Il va de soi qu'un maître d'ouvrage ou un gestionnaire qui fait réaliser une analyse de risques est prêt à éventuellement mettre les moyens (même limités comme la surveillance) si l'analyse de risques révèle des dangers importants.

On peut citer les différents cas de figure suivants pouvant nécessiter une analyse de risques :

- **Analyse de risques comme base de la conception et du dimensionnement des structures, des exigences de niveau de qualité (supervision du projet et qualité d'exécution) et du choix des matériaux**

Les codes de calcul internationaux, y compris les Eurocodes, prescrivent une série de critères de dimensionnement pour les structures. Ces critères sont en général basés sur des objectifs de fiabilité des structures, qui sont prédéterminés par l'évaluation du risque de dépasser les états limites que l'on se fixe. Ainsi, l'application même des Eurocodes suppose que l'on se soit déjà placé dans une analyse de risques. Celle-ci apparaît de manière plus ou moins évidente dans les Eurocodes sur les charges et sur les matériaux, mais de manière claire et précise dans l'Eurocode 0 [3] et dans les Eurocodes 1, partie 1-7 [4] sur les actions accidentelles, et 8 pour les actions dues au séisme. Ainsi, pour le dimensionnement des ouvrages neufs, l'application des critères donnés dans les Eurocodes suppose de fait la réalisation d'une analyse de risques implicite. Le présent document ne vise pas ce point précis supposé acquis sur des ouvrages neufs.

La structure doit conserver les performances attendues pendant toute sa durée de vie et les Eurocodes renvoient aux normes européennes d'exécution et de matériaux pour atteindre cet objectif. L'analyse de risques permet d'orienter les choix correspondants, par exemple sur les performances de durabilité des bétons.

Certains cas de figure peuvent présenter des difficultés de conception générale, dans la mesure où la structure étudiée se trouve soumise à des types d'aléas différents, impliquant des choix parfois divergeants. Ainsi, un ouvrage situé aux Antilles se verra exposé aux risques sismique et cyclonique. Si la légèreté est à rechercher vis-à-vis du premier aléa, elle peut en revanche s'avérer néfaste vis-à-vis du second. L'application des Eurocodes permettra aux différentes conceptions d'atteindre un niveau de protection réglementaire, mais une vulnérabilité et une marge de sécurité différente pour chacun des aléas. L'analyse et la hiérarchisation des risques peut alors orienter et justifier des choix de conceptions pertinents.

- **Analyse de risques pour les structures exceptionnelles**

Pour les structures exceptionnelles, par exemple des méga-projets ou des structures très innovantes ou audacieuses, une analyse de risques doit être effectuée car les Eurocodes ne s'appliquent pas (ou ne sont pas suffisants) pour de telles structures. En effet, pour ces structures, les aléas pouvant survenir sont en général plus nombreux et plus importants que pour des ouvrages plus classiques, et les conséquences sont toujours nettement plus importantes.

- **Analyse de risques pour des événements extraordinaires**

Les Eurocodes couvrent un certain nombre d'aléas et d'événements. Les charges appliquées sur les structures, les effets thermiques, le vent... sont pris en compte. En revanche, d'autres événements moins fréquents comme l'incendie (sur les ponts, car le sujet est traité pour les bâtiments), les actions accidentelles comme la chute de blocs, la foudre sont partiellement voire pas du tout pris en compte. Pour ces événements aux conséquences très fortes mais à la probabilité d'occurrence très faible, une analyse de risques peut être effectuée.

- **Analyse de risques pour optimiser la gestion des ouvrages**

Une bonne gestion des ouvrages doit permettre de déceler au moindre coût les déficiences actuelles, mais également les déficiences futures pouvant être évitées à moindre coût par des mesures d'entretien préventif. L'analyse de risques permet de définir une stratégie d'inspection et d'entretien de l'ouvrage, en ciblant l'inspection sur les parties les plus vulnérables aux aléas internes, en visant plus spécialement les défauts internes initiaux en début de vie et les défauts internes par endommagement à partir du milieu de vie.

- **Analyse de risques pour les ouvrages anciens**

Les ouvrages anciens sont, par définition, dans un état moins bon que celui dans lequel ils étaient lors de leur mise en service. Ils peuvent être atteints de pathologies ou de défauts structurels connus. Dans ce cas, se pose la question du



maintien de la circulation, avec ou sans restriction. Le principe de précaution maximale consistant à fermer l'ouvrage jusqu'à sa réparation ou son remplacement, quelle que soit la nature du désordre, ne peut pas s'appliquer. L'analyse de risques est dans ce cas intéressante, car elle donne des outils au gestionnaire de l'ouvrage pour prendre sa décision. Ce domaine couvre donc principalement les ouvrages atteints de désordres connus.

• Analyse de risques pour l'évolution des besoins et de l'environnement

Dans les cas précédents, le risque principal visé est la résistance avant effondrement, ou l'aptitude au service. Néanmoins, pour un ouvrage neuf, on peut aussi envisager des risques sur l'évolution des besoins ou de l'environnement, à prendre en compte dès la conception sur le long terme, ou sur un ouvrage récent pour le plus long terme. Les préoccupations visées ici rejoignent celles sur le développement durable. On cherche à éviter les situations fréquemment rencontrées pour lesquelles l'évolution des besoins et de l'environnement n'avaient pas été anticipées.

On peut donner quelques exemples :

- augmentation de trafic prévisible. Les conséquences sont nombreuses sur les ouvrages. Prendre en compte dès la conception le fait que la voie portée ou la voie franchie puisse être élargie doit être une préoccupation. Cela ne veut pas dire qu'il faille dimensionner l'ouvrage dès le début pour un élargissement mais, par exemple, prendre un minimum de mesures conservatoires si le risque d'élargissement est avéré. Dans cet ordre d'idée, les Eurocodes proposent des classes de trafics. Les choix qui sont faits dépendent de situations à venir basées sur des études de trafic à court ou moyen terme. L'évolution à long terme, surtout quand on dimensionne l'ouvrage pour 100 ans, peut être déterminante et modifier les choix ;
- évolution du trafic vers des modes de transports alternatifs (passage de transports en commun, type tramway, sur l'ouvrage) ;
- évolution de la configuration du profil en travers à long terme ou liée à des mesures d'exploitation provisoires (travaux, embouteillages, etc.) par mise en place de dispositifs de retenue amovibles ;
- prise en compte du coût global et des impacts environnementaux liés sur l'ensemble du cycle de vie des ouvrages dès la phase de conception, intégrant les opérations de maintenance et de fin de service ;
- évolution de l'environnement :
 - prise en compte du réchauffement climatique pour les contraintes thermiques appliquées à un ouvrage ;
 - prise en compte des conséquences du réchauffement climatique pour les événements météorologiques exceptionnels : inondations, crues, tempêtes...

2.3.2 - Étape 2 - Définition du système

Il convient de décrire précisément le système étudié, c'est-à-dire l'ouvrage considéré. On attend des données précises sur la conception de l'ouvrage, les matériaux utilisés, l'exécution des travaux, l'état initial (bilan du point zéro à la réception), mais aussi son histoire : inspections et auscultations réalisées, travaux d'entretien effectués.

Il convient de décrire également l'environnement et l'usage de l'ouvrage considéré : conditions d'exposition, d'exploitation (trafic de poids lourds, fréquence des salages, etc.).

Il va de soi que pour réaliser l'analyse simplifiée des risques, l'exhaustivité des données n'est pas nécessaire (en pratique, pour la gestion d'un patrimoine existant cela devient vite impossible). Il faut donc sélectionner celles qui peuvent être trouvées rapidement et qui permettent l'analyse ultérieure en fonction des aléas que l'on veut évaluer. On peut dans un premier temps récupérer les données qui paraissent essentielles, et démarrer l'analyse de risques qui fera apparaître les autres données essentielles à récupérer.

Pour l'analyse détaillée, le dossier d'ouvrage et tous les éléments disponibles sur l'ouvrage (jusqu'aux plans d'exécution) sont nécessaires.

2.3.3 - Étape 3 - Analyse de risques simplifiée

Les deux étapes précédentes ont pour but de fixer le cadre de l'analyse de risques, les conclusions souhaitées et la détermination de toutes les données existantes ou à rechercher pour effectuer l'analyse de risques. L'étape 3 fait directement entrer dans l'analyse de risques. Elle se scinde en quatre étapes :

- identification et évaluation simplifiée des aléas ;
- évaluation simplifiée de la vulnérabilité aux aléas ;
- évaluation simplifiée de l'importance des conséquences ;

- évaluation du risque à l'aide de matrices de risques.

L'évaluation qui est menée ici est qualitative au sens où on ne chiffre pas précisément les différents éléments, mais on les classe par niveaux, dans plusieurs catégories bien spécifiques. L'usage de matrices de risques se trouve très bien adapté à cette évaluation par catégories.

Pour chaque aléa, il convient de choisir un nombre de catégories possibles. Suivant la connaissance que l'on a du risque, on peut utiliser trois catégories (correspondant à des niveaux faibles, moyens ou élevés) ou cinq catégories lorsqu'on a un raffinement supplémentaire.

Pour croiser l'aléa, la vulnérabilité et les conséquences à l'aide de matrices de risques, il est nécessaire d'avoir pour chacun de ces items le même nombre de catégories (pour obtenir des matrices carrées), ce qui n'est pas toujours évident. Quoi qu'il en soit, il faut revenir au final à trois niveaux de risques.

L'intérêt d'évaluer l'aléa, la vulnérabilité et les conséquences selon cinq catégories est que ce raffinement permet une meilleure appréciation, notamment pour les ouvrages à la limite entre deux catégories. Par ailleurs, une fois les différentes décisions prises en fonction du niveau de risque, il peut être utile de hiérarchiser les interventions. En partant sur un schéma à cinq catégories, on peut aboutir au final à au moins cinq catégories de risque, voire plus encore si on le souhaite. Le paragraphe 3.3.4 contient des éléments permettant d'illustrer ces différents points.

Les paragraphes 3.3.1, 3.3.2 et 3.3.3 donnent une méthode pour évaluer les trois items cités précédemment, ainsi que le moyen de revenir à trois ou cinq catégories. Le paragraphe 3.3.5 donne la méthode pour croiser ces catégories de façon à déterminer le risque global.

2.3.3.1 - Identification et évaluation des aléas

Les aléas doivent être identifiés et listés de la manière la plus exhaustive possible. On peut les classer en plusieurs catégories :

1. Aléas internes liés à des causes exogènes : ce sont les différentes agressions provenant du milieu extérieur de l'ouvrage qui entraînent des réactions au cœur de celui-ci.
2. Aléas internes liés à des causes endogènes : cela recouvre toutes les erreurs qui ont pu se produire pendant la phase de conception ou de réalisation, et qui pénalisent la durée de vie de l'ouvrage.
3. Aléas externes d'origine naturelle : ce sont les différentes agressions provenant de l'environnement naturel qui touchent directement la stabilité de l'ouvrage, en exerçant des actions ou en modifiant des conditions d'appui.
4. Aléas externes d'origine humaine : cela recouvre les agressions extérieures liées à l'activité humaine et impactant directement la stabilité de l'ouvrage.

L'intérêt de ce mode de classement est de permettre de limiter les possibilités d'oubli de certains aléas. Néanmoins, l'expérience acquise depuis de nombreuses années montre que la majorité des aléas existants sont bien connus. Le chapitre 3 présente la liste des aléas connus actuellement et ayant déjà eu des conséquences sur des ouvrages. Cette liste, relativement complète, n'est pas exhaustive. On peut avoir sur tel ou tel cas particulier d'autres aléas, mais qui sont limités à une configuration très particulière.

À ce stade de l'analyse, on recommande une analyse des aléas qualitative, basée sur des indicateurs qualitatifs tels que décrits dans le chapitre 1, appelés « niveaux d'aléas ».

Lorsque l'aléa dépend de plusieurs paramètres, relativement bien connus et suffisamment nombreux, une évaluation assez fine du niveau d'aléa peut être obtenue. On peut mettre au point un système de notation, en cotant chaque paramètre, qui permet l'établissement d'une note finale et donc d'une catégorie d'aléa. Avec un système de notation détaillé, on peut aisément classer en trois ou cinq catégories suivant les résultats attendus.



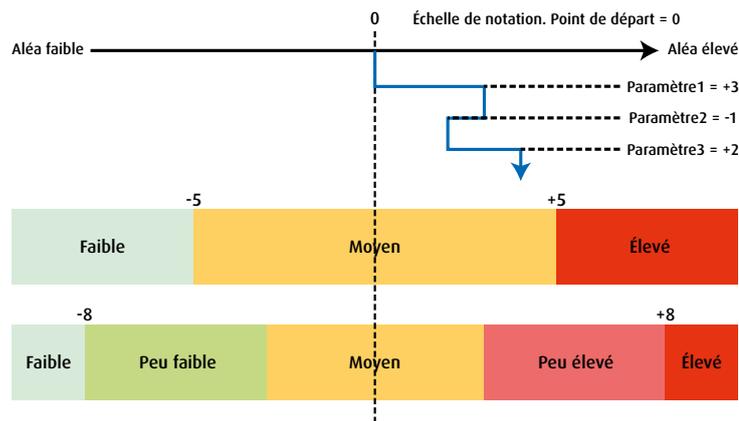


Figure 2-2 : évaluation simplifiée de l'aléa

Lorsque l'aléa est très mal connu, et dépend de peu de paramètres, l'établissement d'un système de notation n'a guère d'intérêt et l'utilisation de cinq catégories apporte un raffinement qui ne correspond pas à la réalité. Il est préférable dans ce cas d'en rester à trois catégories (faible, moyen et élevé). On classe l'ouvrage dans l'une de ces catégories de manière intuitive ou en faisant appel au jugement d'expert.

Le chapitre 3 présente une proposition de système d'évaluation basé sur une notation de différents paramètres permettant une note globale, et l'affectation du niveau d'aléa à une catégorie pour l'ouvrage et l'aléa sélectionné. La figure 2-2 illustre cette méthode sur un exemple.

L'évaluation telle que proposée dans le chapitre 3 permet, pour chaque aléa, d'établir une notation chiffrée et de sélectionner une catégorie selon la proposition représentée dans la figure 2-2. Il est bien évident que ce système peut être modifié suivant les objectifs de l'analyse, le parc d'ouvrages à tester, le maître d'ouvrage, etc.

2.3.3.2 - Évaluation de la vulnérabilité

Pour l'évaluation de la vulnérabilité d'un ouvrage selon une approche simplifiée, il est utile de distinguer la vulnérabilité « locale » à l'aléa et la vulnérabilité « globale » de l'ouvrage.

La vulnérabilité locale à l'aléa tient compte de toutes les dispositions prévues dans la conception et le dimensionnement de la structure pour s'opposer à l'aléa dans la zone où il se produit. On intègre dans l'expression « vulnérabilité locale » toutes les dispositions de protection prévues au niveau local (enrobage, peinture, inox, frettage), ainsi que les dispositions de calcul locales (aciers passifs, détails de fatigue). Lorsque l'aléa est directement une action statique ou dynamique appliquée à l'ouvrage, on tient compte à ce stade, si l'information est disponible, du dimensionnement de l'ouvrage vis-à-vis de cette action sans faire de calculs (par simple analyse du dossier d'ouvrage et des hypothèses de dimensionnement).

La vulnérabilité globale va au-delà de la vulnérabilité locale et tient compte du comportement global de la structure. On admet l'existence de dégradations locales, ou de parties non justifiées d'un point de vue réglementaire, et on vérifie (qualitativement) la portance globale de l'ouvrage par simple analyse des cheminements alternatifs possibles pour les efforts, des redistributions d'efforts, etc. On tient compte avantagement de toutes les sources de ductilité possible, ou à l'inverse on pénalise l'ouvrage en cas de risques de ruptures fragiles.

Le mode de détermination du niveau de vulnérabilité diffère quelque peu de celle retenue pour l'aléa. On attribue une note pour la vulnérabilité locale, qui dépend de paramètres, et une note pour la vulnérabilité globale qui dépend d'autres paramètres. La détermination du niveau de vulnérabilité de l'ouvrage donne lieu à l'utilisation d'une matrice, croisant vulnérabilité locale et vulnérabilité globale, selon le principe décrit dans le tableau 2-1.

| Vulnérabilité | Globale faible | Globale moyenne | Globale élevée |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Locale faible | Vulnérabilité faible | Vulnérabilité faible | Vulnérabilité moyenne |
| Locale moyenne | Vulnérabilité faible | Vulnérabilité moyenne | Vulnérabilité élevée |
| Locale élevée | Vulnérabilité moyenne | Vulnérabilité élevée | Vulnérabilité élevée |

Tableau 2-1 : évaluation simplifiée de la vulnérabilité, classification en trois catégories

Le chapitre 4 présente un certain nombre de critères pour évaluer la vulnérabilité locale et globale, avec un système de notation associé. Ici encore, on peut adapter le système de notation aux cas particuliers que l'on traite. L'intérêt de ce système de notation est que l'on peut classer les ouvrages en trois ou cinq catégories à partir de la même évaluation, en fonction du nombre de catégories que l'on s'est fixé pour l'aléa.

2.3.3.3 - Évaluation de l'importance des conséquences

On utilise le même type de méthode que pour la détermination de l'aléa et de la vulnérabilité. On détermine une note qualifiant l'importance des conséquences et une catégorie associée (parmi trois ou cinq catégories) en fonction du même système que précédemment. Le chapitre 5 donne des éléments pour aboutir à cette classification.

On se reportera au paragraphe 3 du chapitre 5 qui permet de déterminer un indice ISE, ainsi que trois catégories de niveau d'importance des conséquences en fonction de l'indicateur. On peut aisément obtenir cinq catégories d'importance en redéfinissant les différents seuils du tableau.

Si l'on veut une méthode plus simple encore, il peut être possible de fixer directement l'enjeu de l'ouvrage parmi les trois catégories. L'appréciation doit alors être directement donnée par le gestionnaire de l'ouvrage.

2.3.3.4 - Évaluation du risque

Une fois que les trois éléments aléa - vulnérabilité - conséquences ont été classés par catégories, on recourt à des matrices de risques permettant de déterminer le risque global. Une matrice de risques est un outil permettant de classer et de visualiser des risques en définissant des catégories de conséquences et d'aléas [2]. Étant donné que l'on a trois items, il faudrait en toute rigueur faire apparaître une matrice en 3D, peu pratique. On contourne la difficulté en réalisant des matrices de danger croisant dans un premier temps **aléa** et **vulnérabilité** pour obtenir le niveau de **criticité** sur l'ouvrage (on emploie aussi le terme de **danger**), et des matrices de risques croisant criticités et conséquences pour déduire le niveau de **risque**. Lorsque l'on choisit trois catégories, les matrices de criticité et de risques à prendre en compte sont représentées sur le tableau 2-2.

| | | Niveau de vulnérabilité | | |
|---------------|--------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| | | Faible | Moyenne | Élevée |
| Niveau d'aléa | Faible | Criticité faible | Criticité faible | Criticité moyenne |
| | Moyen | Criticité faible | Criticité moyenne | Criticité élevée |
| | Élevé | Criticité moyenne | Criticité élevée | Criticité élevée |

a) Croisement Aléa × Vulnérabilité = Danger

| | | Niveau de conséquence | | |
|---------------------|--------|-----------------------|---------------|--------------|
| | | Faible | Moyenne | Élevée |
| Niveau de criticité | Faible | Risque faible | Risque faible | Risque moyen |
| | Moyen | Risque faible | Risque moyen | Risque élevé |
| | Élevé | Risque moyen | Risque élevé | Risque élevé |

b) Croisement Criticité × Conséquences

Tableau 2-2 : matrices de criticité et de risques

Dans une classification en cinq catégories, l'éventail des possibilités est plus large et l'on peut calibrer différemment les niveaux pour être plus ou moins sévère (figure 2-5). C'est sans doute ici que peut intervenir le niveau de sensibilité du maître d'ouvrage par rapport au risque. Dans tous les cas, le choix des matrices est à l'appréciation de celui qui réalise l'analyse de risques et des conséquences qu'il en attend. Ceci veut dire que ces choix supposent une calibration préalable, étape très importante. En l'absence de consignes particulières du maître d'ouvrage, on recommande l'utilisation de la matrice de criticité et de la matrice de risques donnée dans le tableau 2-3.

On voit dans ces deux approches à trois ou cinq catégories que l'on doit au final choisir parmi trois niveaux de risques permettant la décision.

| | | Niveau de vulnérabilité | | | | |
|---------------|---|-------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Niveau d'aléa | 1 | C 1 | C 1 | C 2 | C 2 | C 3 |
| | 2 | C 1 | C 2 | C 2 | C 3 | C 4 |
| | 3 | C 2 | C 2 | C 3 | C 4 | C 4 |
| | 4 | C 2 | C 3 | C 4 | C 4 | C 5 |
| | 5 | C 3 | C 4 | C 4 | C 5 | C 5 |

| | | Niveau de conséquence | | | | |
|---------------------|---|-----------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Niveau de criticité | 1 | R 1 | R 1 | R 1 | R 2 | R 2 |
| | 2 | R 1 | R 1 | R 2 | R 2 | R 2 |
| | 3 | R 1 | R 2 | R 2 | R 2 | R 3 |
| | 4 | R 2 | R 2 | R 2 | R 3 | R 3 |
| | 5 | R 2 | R 2 | R 3 | R 3 | R 3 |

Tableau 2-3 : matrices de criticité et de risques dans le cas de cinq catégories

Lorsqu'on a dépassé le stade décisionnel, et que l'on veut établir un programme de renforcement ou de mise sous surveillance sur plusieurs années, compte-tenu des moyens disponibles, il est souvent utile de hiérarchiser les ouvrages. Les trois niveaux de risques présentés ci-dessus ne suffisent donc pas. On peut dans ce cas modifier les matrices de risques permettant un meilleur raffinement des niveaux de risques, et une hiérarchisation plus aisée. On donne deux exemples correspondant au choix initial avec trois catégories d'aléas ou cinq dans le tableau 2-4.

| | | Niveau de conséquence | | | | |
|---------------------|---|-----------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Niveau de criticité | 1 | R 1 | R 2 | R 3 | R 4 | R 5 |
| | 2 | R 2 | R 3 | R 4 | R 5 | R 6 |
| | 3 | R 3 | R 4 | R 5 | R 6 | R 7 |
| | 4 | R 4 | R 5 | R 6 | R 7 | R 8 |
| | 5 | R 5 | R 6 | R 7 | R 8 | R 9 |

| | | Niveau de conséquence | | |
|---------------------|---|-----------------------|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Niveau de criticité | 1 | R 1 | R 2 | R 3 |
| | 2 | R 2 | R 3 | R 4 |
| | 3 | R 3 | R 4 | R 5 |

Tableau 2-4 : matrices de risques pour l'établissement d'une hiérarchisation parmi les ouvrages

2.3.3.5 - Évaluation de l'ouvrage vis-à-vis des risques

Pour chaque ouvrage, on peut évaluer chacun des risques et établir une carte des risques pour l'ouvrage. Il est alors possible, à partir de cette carte des risques, d'établir le niveau de risque global de l'ouvrage, faisant intervenir l'ensemble des risques possibles. On fait dans ce cas la somme des différents niveaux de risques issus de l'analyse précédente. Lorsque les différents risques ne peuvent pas être simplement comparés les uns aux autres parce que les conséquences sont radicalement différentes, il est possible de les pondérer pour mettre un poids plus important aux risques qui ont comme conséquence l'effondrement par rapport à ceux qui n'ont que des conséquences économiques (l'analyse simplifiée ne permet pas de distinguer ces différentes conséquences). Cet exercice est cependant difficile, surtout lorsque l'on traite de nombreux risques. En revanche, il prend tout son sens lorsque deux ou trois risques principaux ont été sélectionnés.

L'établissement de la carte des risques par ouvrage présente un intérêt pour visualiser d'un seul coup d'œil le risque lié à l'ouvrage. Le niveau de risque total, résultant de la somme des risques individuels a aussi un intérêt. Il permet d'orienter la décision vers des actions concrètes lorsqu'un ouvrage présente des risques moyens pour tous les risques analysés, ce qui montre une faiblesse généralisée de l'ouvrage, mais pas de danger immédiat important. On présente sur le tableau 2-5 un exemple d'une cartographie des risques obtenue pour plusieurs ouvrages.

L'observation de cette cartographie montre, par exemple, que l'ouvrage OA 2, qui ne fait apparaître aucun risque important, est autant digne d'intérêt que l'ouvrage OA 3, qui présente deux risques importants, mais qui a une note globale de risque plus faible que l'ouvrage OA 2. Elle permet ainsi d'orienter le traitement des risques en mettant en évidence des pistes d'investigations (on peut ainsi imaginer orienter le traitement tantôt en direction de vulnérabilités locales élevées, tantôt vers une vulnérabilité globale importante).

| | OA 1 | OA 2 | OA 3 | OA 4 | OA 5 |
|--------------|------|------|------|------|------|
| Risque 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| Risque 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 |
| Risque 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Risque 4 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Risque 5 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| Risque 6 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Risque 7 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Risque 8 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 |
| Risque 9 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| Risque 10 | 2 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| Risque total | 21 | 18 | 16 | 25 | 12 |

Tableau 2-5 : cartographie des risques sur plusieurs ouvrages

2.3.4 - Étape 4 - Sélection des risques

À l'issue de l'analyse simplifiée, la matrice de risques permet de définir pour chaque ouvrage et pour chaque aléa un niveau de risque qui est soit acceptable (ou faible), soit moyen, soit inacceptable (ou élevé).

Lorsque le risque est acceptable, l'analyse s'arrête, mais l'ouvrage doit bien évidemment suivre la procédure classique de suivi et d'inspection des ouvrages. L'intérêt du raffinement dont il est question à la fin du paragraphe précédent, est de permettre d'être encore plus optimal dans la stratégie de gestion d'une population d'ouvrages et de pouvoir adapter la fréquence au niveau de risque considéré.

Lorsque le risque est élevé, il faut réaliser une analyse de risques détaillée pour mieux quantifier son importance (ce qui peut conduire à requalifier le risque), et surtout en vue du traitement du risque, pour une utilisation optimale des moyens.

Lorsque le risque est moyen, on peut soit arrêter l'analyse à ce stade et prendre des mesures intermédiaires, plus poussées que pour un ouvrage à risque faible, soit s'engager dans une étude détaillée lorsque l'on juge que celle-ci devrait permettre de mieux évaluer le risque (c'est le cas si le risque a été jugé moyen faute d'une meilleure connaissance du processus de manifestation de l'aléa). Le choix du niveau de détail (semi-quantitatif ou quantitatif) peut se faire en fonction de la connaissance des phénomènes ou des moyens disponibles.

La stratégie présentée ci-dessus considère les différents risques intervenant sur un ouvrage particulier. Cependant, il est bien évident que la conclusion globale pour l'ouvrage doit dépendre des différents risques envisagés. Si, par exemple, un ouvrage présente un ou deux risques de niveau élevé, des analyses plus détaillées vont être nécessaires, et au final des interventions lourdes ou une surveillance forte vont éventuellement se mettre en place. Dans ce cas, les autres risques moyens ne vont pas être traités de la même manière que si l'ouvrage ne présentait aucun risque élevé.

2.3.5 - Étape 5 - Analyse détaillée

Lorsque l'analyse détaillée d'un risque particulier d'un ouvrage est nécessaire, il faut reprendre l'analyse en essayant de mieux quantifier les différents items aléa - vulnérabilité - conséquences.

Le point qui peut le plus facilement être détaillé est la vulnérabilité de l'ouvrage. Cela passe par la réalisation d'un modèle de calcul de l'ouvrage, mais cette étape est de toute façon réalisée dans le cadre d'un ouvrage neuf. Pour un ouvrage ancien, on a tout intérêt à réaliser aussi un tel modèle lorsque l'analyse simplifiée conduit à la nécessité de prévoir soit une surveillance lourde, soit même des renforcements, car l'analyse détaillée de la vulnérabilité peut modifier radicalement les conclusions (surtout quand l'analyse simplifiée de la vulnérabilité est réalisée selon une approche intuitive du comportement). L'analyse détaillée de la vulnérabilité doit alors s'appuyer sur un modèle de calcul permettant de tenir compte au mieux de l'état réel de l'ouvrage, établi à partir du dossier d'ouvrage et des investigations jugées nécessaires (contrôles non destructifs, carottages, instrumentations, etc.).

L'analyse détaillée de l'aléa est parfois impossible quand les phénomènes étudiés ne sont pas assez précisément connus, comme les phénomènes d'affouillement ou de corrosion (bien que pour ces derniers des modèles existent, mais relèvent plus de la recherche). Pour des accidents (chocs de poids lourds, incendie) ou certaines catastrophes naturelles (séismes), des statistiques existent et permettent d'établir une probabilité d'occurrence d'un événement donné, ce qui constitue une bonne quantification de l'aléa. Bien entendu, ceci n'a d'intérêt que si ce raffinement apporte quelque chose de concret et si l'action associée à la probabilité d'occurrence est bien définie. Dans la plupart des cas, l'évaluation du niveau d'aléa reste qualitatif.

Enfin, l'analyse de la gravité des conséquences peut être menée de manière détaillée lorsque l'on a des données chiffrées précises sur l'ouvrage : surface, trafic, période de congestion, coût, place dans l'itinéraire. On peut, à partir d'un tableau multicritère, définir un niveau de conséquence chiffré mais restant qualitatif. On peut passer à un stade encore plus précis en réalisant des analyses socio-économiques détaillées, du même genre que celles que l'on mène lorsqu'on veut évaluer la rentabilité économique de la construction d'une infrastructure, mais ce genre d'exercice est souvent très long à mener.

Ainsi, dans la majorité des cas, l'analyse détaillée des risques revient à une analyse détaillée de la vulnérabilité avec une évaluation plus complète des conséquences, prenant en compte de nombreux critères, mais restant qualitative. L'analyse détaillée des aléas ne se fait que lorsque les données sont suffisamment nombreuses.

Néanmoins, il n'est pas gênant de pouvoir bien quantifier certains aspects (comme la vulnérabilité) et pas d'autres (comme l'aléa). En effet, l'analyse simplifiée a permis au minimum de classer les aléas, par exemple, dans trois



catégories. On peut donc assigner à chacune de ces catégories une note spécifique. De plus, les chapitres 3 et 5 montrent que pour l'aléa et les conséquences, une notation basée sur des éléments qualitatifs est possible et est proposée. On adopte alors directement la note issue de l'analyse simplifiée comme quantification de l'aléa. Au final, il est toujours possible de réaliser une analyse détaillée sur la base de la notation utilisée dans l'analyse simplifiée. Néanmoins, si on ne s'en tient qu'à ce niveau, on voit bien que l'analyse détaillée ne va pas apporter d'éléments supplémentaires et qu'elle devient inutile. L'analyse détaillée des risques suppose donc que l'on détermine plus précisément, avec un minimum de calculs, une quantification de l'un au moins des items aléa – vulnérabilité – conséquences (au mieux les trois).

2.3.5.1 - Évaluation détaillée des aléas

Plusieurs méthodes existent pour déterminer les probabilités d'occurrence, correspondant à différentes intensités de l'aléa :

- analyse statistique des événements passés (par exemple, statistiques de chocs de camion, d'incendie, mais aussi tremblements de terre, avalanches) ;
- jugement d'expert (pour les phénomènes naturels difficiles à appréhender : affouillement) ;
- analyse scientifique du phénomène (fatigue de l'acier, séisme par analyse du contexte géologique) ;
- investigations sur ouvrage (mesure de la profondeur de carbonatation, relevé des fissures de fatigue sur un ouvrage métallique, taille des fissures sur un ouvrage en béton).

À ce stade, on peut juger que les éléments disponibles sont insuffisants pour pouvoir déterminer le risque encouru. On procède alors à des investigations complémentaires afin de mieux définir tel ou tel aspect.

Le chapitre 3 a permis d'identifier les différents risques pouvant survenir sur un ouvrage d'art, mais aussi de les évaluer au moins qualitativement. Pour certains aléas, une quantification est possible, et les documents qui la permettent sont cités dans le chapitre 3 lorsqu'ils existent. On renvoie donc le lecteur à la lecture de ce chapitre pour trouver, aléa par aléa, d'éventuels compléments d'information permettant son analyse détaillée.

2.3.5.2 - Choix et description des scénarios

Pour l'évaluation détaillée de la vulnérabilité, on a vu précédemment qu'il fallait imaginer un certain nombre de scénarios et tester l'ouvrage avec ces derniers par des moyens adaptés (incluant des calculs de structure).

La liste des aléas étant souvent très grande, et se démultipliant en actions nombreuses pouvant toucher différents endroits de la structure, il est souvent impossible de tout regarder. Il faut dans ce cas sélectionner un certain nombre de scénarios qui sont jugés les plus représentatifs. La pertinence du choix des scénarios est essentielle pour une analyse de risques la plus pertinente possible.

2.3.5.3 - Évaluation détaillée de la vulnérabilité

Cette phase consiste à tester l'ouvrage vis-à-vis de ces aléas, définis à l'aide des scénarios élaborés dans la phase précédente et à déterminer comment celui-ci réagit.

La manière dont on évalue la résistance de la structure vis-à-vis de ces scénarios varie suivant le niveau d'analyse que l'on utilise. Une simple évaluation par un jugement d'expert peut suffire dans le cas de l'analyse simplifiée, ou des calculs simplistes élastiques. En revanche, lorsqu'on procède à un niveau d'analyse très détaillé, des calculs plus poussés peuvent être nécessaires, tout en restant dans le cadre d'une modélisation élastique ou éventuellement dans les cas extrêmes élasto-plastiques, non linéaires, dynamiques, etc. Cela dépend bien entendu de la structure, et il faut que ce type d'analyse, très lourde, présente un intérêt en termes de connaissance des risques les plus importants.

Lorsque l'aléa est interne à la structure, il est parfois difficile d'imaginer des scénarios plausibles. Deux alternatives sont alors possibles : tester un ensemble de ruptures possibles et voir comment l'ouvrage se comporte, ou alors évaluer le ratio entre la résistance structurelle dépendant de sa conception d'origine, mais évaluée avec les critères actuels et les sollicitations réglementaires actuelles. Plus ce ratio est élevé, moins la structure est vulnérable et capable d'encaisser soit des surcharges importantes, soit une disparition de l'un des ses éléments structurels.

On examine également la capacité de la structure à prévenir qu'elle s'approche de la défaillance, et la vitesse à laquelle la dégradation évolue. Grâce à cette analyse, il est possible de décider des mesures compensatoires, par exemple le renforcement des zones de rupture fragile (brutale) et/ou la surveillance renforcée ou la haute surveillance de l'ouvrage.

Dans le cas où l'analyse de risques porte sur l'évolution des besoins, ce n'est plus la résistance de la structure que l'on

évalue, mais l'étendue des modifications à prendre en compte pour qu'elle réponde au nouveau besoin. Néanmoins, la démarche est similaire, puisque l'on étudie des scénarios d'évolution de besoin, et que l'on détermine soit de manière simplifiée, soit de manière détaillée, les renforcements éventuels à réaliser.

2.3.5.4 - Évaluation détaillée de la gravité des conséquences

L'évaluation de la gravité des conséquences est une phase importante mais difficile de l'analyse, car il y a des enjeux de nature diverse qui se pondèrent de manière différente. Néanmoins, l'analyse détaillée doit prendre en compte les éléments suivants :

- coût de reconstruction partielle/totale, coût d'un ouvrage provisoire si nécessaire, coût d'agence divers ;
- dégâts humains occasionnés par l'effondrement d'un ouvrage ou par des dégradations locales ;
- coût pour l'activité socio-économique de la région en cas de perte d'un ouvrage ;
- conséquences morales ou médiatiques ;
- impact environnemental.

Les trois premiers points peuvent s'évaluer au travers d'indicateurs simples comme la surface totale de l'ouvrage, la surface de la travée la plus longue (qui peut donner une idée des conséquences humaines de l'effondrement d'un ouvrage), la hauteur de l'ouvrage, le trafic total et le trafic poids lourds sur l'ouvrage (qui donne une idée des conséquences humaines de l'effondrement et aussi des conséquences socio-économiques pour la région). Les indices de danger calculés pour déterminer la classe de retenue des barrières sont un bon exemple d'indicateurs simples permettant d'évaluer les conséquences.

Le coût pour l'activité socio-économique va dépendre aussi très fortement des capacités de redistribution du trafic sur d'autres itinéraires. C'est dans ce cas nettement plus difficile à évaluer quantitativement, et cela doit se faire dans une démarche globale à l'échelle de l'itinéraire. Néanmoins, sur des ouvrages neufs, les études d'opportunité qui sont réalisées donnent souvent des moyens pour ces évaluations.

Au final, une vraie analyse détaillée des conséquences est un exercice qu'il convient de réserver à des cas particuliers. L'analyse semi-quantitative présentée au chapitre 5 peut se révéler suffisante.

2.3.5.5 - Évaluation détaillée du risque

Le risque tel que défini au début de ce document est souvent mesuré par le produit de l'aléa (sa probabilité), de la vulnérabilité (qui va dépendre de la structure mais aussi de l'intensité de l'aléa) et de la gravité des conséquences. Il y a une mesure de risque pour chaque scénario, ainsi qu'expliqué au paragraphe 3.4 du chapitre 1.

Une fois que l'on a quantifié l'aléa, la vulnérabilité et l'importance des conséquences, le niveau de risque s'évalue aisément pour chacun des scénarios prédéfinis. Le niveau de risque global pour l'ouvrage est alors la somme des niveaux de risques correspondant à chaque aléa, et le niveau de risque d'un aléa particulier est l'enveloppe des niveaux de risques correspondant à chaque scénario dans lequel cet aléa intervient.

On peut écrire mathématiquement le risque individuel sous la forme $\text{Risque}_{\text{aléa } i} = \max_{\text{scénario } j} (A_i \times V_{ij} \times E_{ij})$ où A, V et E sont respectivement l'aléa, la vulnérabilité et la conséquence (ou enjeu). Le risque global s'écrit comme la somme, éventuellement pondérée, des différents risques : $\text{Risque} = \sum_{\text{aléa } i} \max_{\text{scénario } j} (A_i \times V_{ij} \times E_{ij})$.

Ceci signifie que si l'ouvrage est soumis à de nombreux aléas, et y réagit mal, le risque global est plus élevé et dépend du nombre d'aléas (somme des risques associés aux aléas). En revanche, le risque associé à un aléa ne dépend bien entendu pas du nombre de scénarios mais de celui qui a le niveau de risque le plus élevé (on prend alors le maximum du risque associé aux scénarios).

Une fois ceci réalisé, il faut vérifier a posteriori la pertinence des scénarios choisis. Lorsque le scénario produisant le risque le plus important est trop isolé et s'écarte trop de la moyenne des niveaux de risques de chacun des scénarios, il est probable que le choix des scénarios ne soit pas le plus pertinent.

2.3.5.6 - Comparaison à des seuils

Lorsque l'on réalise une analyse de risques détaillée, et que l'on a quantifié l'aléa (probabilité associée à une magnitude, ou note chiffrée à partir de l'analyse qualitative), la vulnérabilité (effet de cette magnitude sur l'ouvrage, par une note chiffrée) et l'enjeu (importance des conséquences avec une échelle adaptée), alors il est aisé de faire le produit des trois (lorsque les trois facteurs peuvent s'estimer indépendamment) et d'orienter la décision en fonction du résultat obtenu. On fait apparaître les trois cas suivants :

- $\text{aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times \text{Conséquences} < r_1$: le risque est acceptable sans aucune mesure. Cela correspond soit à un aléa très peu probable, soit à des conséquences faibles, soit à une vulnérabilité d'ouvrage faible (ouvrage très robuste), soit à une combinaison de deux ou trois situations. Aucune mesure particulière n'est à prendre dans ce cas ;
- $\text{aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times \text{Conséquences} > r_2$: le risque est inacceptable. Il est nécessaire de prendre des mesures, par exemple de renforcer l'ouvrage ou son suivi dans le cas d'un ouvrage ancien, ou revisiter la conception pour un ouvrage neuf (cf. organigramme) ;
- $r_1 < \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times \text{Conséquences} < r_2$: on est dans la zone de risque moyen. On peut demander des investigations complémentaires encore plus précises, ou prendre des mesures portant sur la surveillance ou la conception (cf. organigramme).

La figure 2-3 illustre la notion de seuil qui correspond, dans l'espace à trois dimensions (aléa – vulnérabilité – conséquences) à une surface iso-risque.

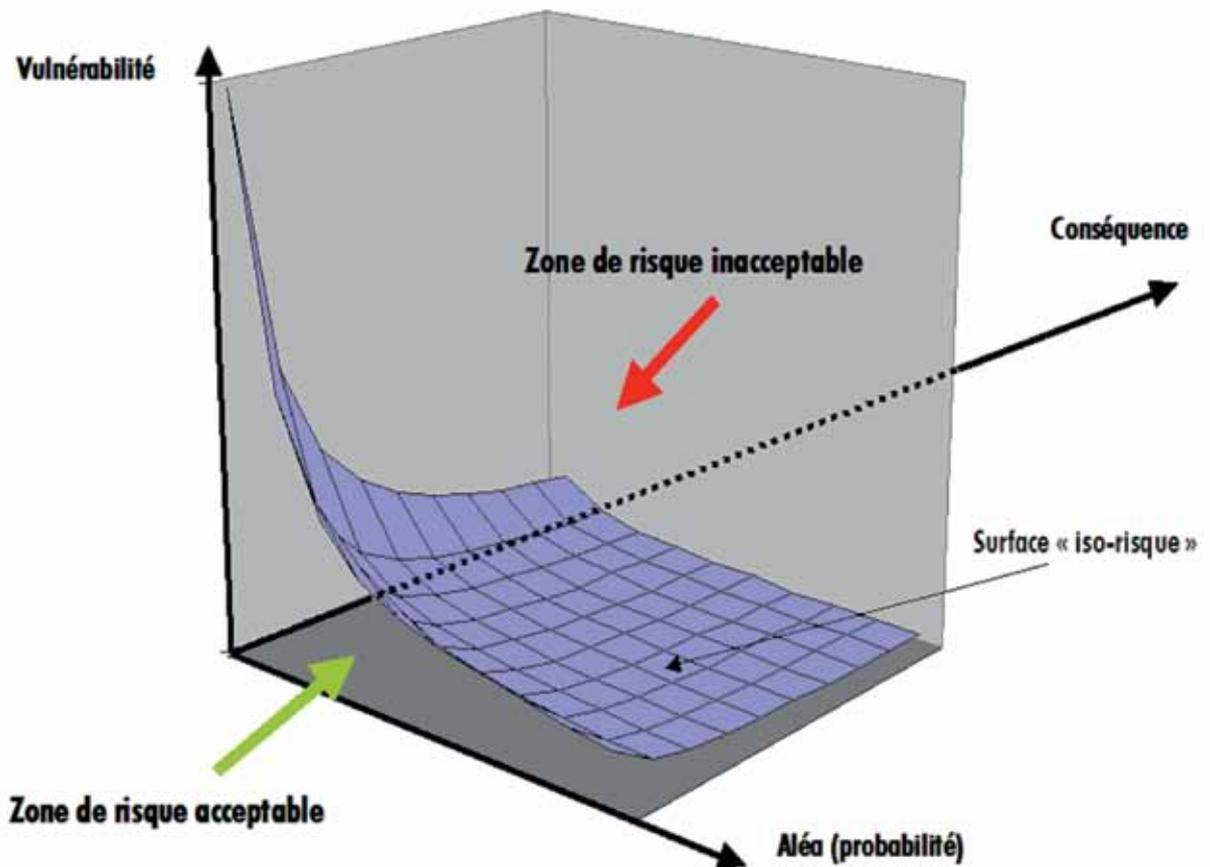


Figure 2-3 : illustration des seuils de risque correspondant à des surfaces « iso-risque » dans l'espace Aléa – Vulnérabilité – Conséquences

2.3.5.7 - Calibration des seuils

La difficulté évidente d'une telle analyse est de calibrer les valeurs de r_1 ou r_2 . Autant pour l'analyse simplifiée le présent guide a présenté une méthode de calibration via la matrice de danger et de risques, et les notations proposées pour l'aléa, la vulnérabilité et les conséquences, autant pour une analyse détaillée, il est impossible d'aller plus loin. En effet, on a vu que suivant les cas, on pouvait détailler plus particulièrement l'un des trois items (aléa – vulnérabilité – conséquences), deux items ou les trois. Lorsqu'on modifie ce niveau de détail, on peut aussi modifier l'échelle (quand on passe, par exemple, d'un niveau d'aléa à une probabilité). Les seuils doivent donc être adaptés en fonction de la méthode choisie pour quantifier.

Si aucune indication n'est donnée par le maître d'ouvrage, et si l'on n'a aucune idée du résultat des choix que l'on va faire, on peut procéder de la manière suivante :

1. Choisir deux situations extrêmes, l'une correspondant au risque le plus faible (valeur la plus faible pour l'aléa, la vulnérabilité et les conséquences), l'autre au risque le plus élevé (valeurs les plus élevées).
2. On définit ainsi une plage entre deux valeurs r_{\min} et r_{\max} . On doit alors définir des valeurs pour r_1 et r_2 . Le moyen le plus simple est de définir trois couples de valeurs (a_1, a_2) , (v_1, v_2) et (e_1, e_2) qui correspondent pour chaque item (a = aléa, v = vulnérabilité et e = conséquences) aux seuils de passage entre un niveau faible et un niveau moyen (indice 1) et entre un niveau moyen et un niveau élevé (indice 2), ce qui est déjà plus facile à faire. On peut alors partir sur une valeur de $r_1 = a_1 \times v_1 \times e_1$ et $r_2 = a_2 \times v_2 \times e_2$.
3. On se donne quelques cas de figure connus dont on sait a priori s'ils se placent dans la catégorie à risque faible, moyen ou élevé, et on teste la méthode et les seuils précédemment définis.
4. En fonction des résultats, on corrige soit la manière dont on fait la quantification, soit les seuils de façon à ce que les configurations connues soient dans la bonne catégorie.

Cette façon de faire est cependant assez délicate, c'est pour cela qu'il ne faut la réaliser que sur les aléas qui ont été sélectionnés et surtout pas sur tous les aléas.

La façon de calibrer les seuils peut aussi être dépendante du gestionnaire de l'ouvrage, de sa sensibilité par rapport aux risques possibles et de ses moyens. Par exemple, il peut sur un parc d'ouvrages imposer que 10 % au maximum des ouvrages soient dans la zone de risque élevé. Cette méthode est cependant dangereuse car le risque réel ne doit pas dépendre des résultats sur un parc d'ouvrages. En revanche, cette méthode peut s'avérer pertinente pour sélectionner, parmi les ouvrages à risque, ceux qui nécessitent une intervention plus rapide.

2.3.6 - Étape 6 - Traitement du risque

Cette étape est la plus difficile en termes de responsabilités puisqu'il s'agit de tirer des conclusions de l'analyse de risques précédemment effectuée.

2.3.6.1 - Gérer le risque

Après avoir déterminé soit qualitativement, soit quantitativement qu'une action devait être entreprise (parce que le risque est jugé inacceptable), le traitement du risque doit être entrepris.

Les conséquences financières du risque peuvent être partagées ou transférées, en général via l'assurance. Cela se fait classiquement pour des maîtres d'ouvrages privés, mais pas pour l'État ou des collectivités locales qui restent leur propre assureur.

La gestion d'un risque inacceptable est une lourde responsabilité. Il est conseillé de réunir un comité technique rassemblant les meilleures expertises disponibles et de prendre les décisions collégalement.

2.3.6.2 - Éviter le risque (en jouant sur l'aléa)

On joue sur la cause même du risque (l'aléa), par exemple en ne construisant pas l'ouvrage ou en empêchant l'activité qui provoque le risque (ne pas faire circuler de transports de matières dangereuses sous un pont, mettre une poutre gabarit sur autoroute pour éviter les chocs sur tablier, mettre un paratonnerre à proximité pour éviter la foudre, etc.).

2.3.6.3 - Réduire le risque (en jouant sur l'aléa et la vulnérabilité)

Pour un ouvrage neuf, plusieurs moyens existent pour réduire le risque :

- ré-examiner les hypothèses et les données en les complétant ou en procédant à des études complémentaires. En général, une mauvaise connaissance des aléas fait que l'on a tendance à surestimer soit leur probabilité d'occurrence, soit leur intensité. Lorsqu'on les connaît mieux, leur probabilité et leur intensité sont mieux maîtrisées et en général plus faibles ;
- revisiter la conception de l'ouvrage, lorsque l'aléa est suffisamment bien connu : on redimensionne l'ouvrage vis-à-vis de cet aléa ;
- revisiter la conception de l'ouvrage, lorsque l'aléa est moins bien connu : on augmente la robustesse de l'ouvrage en ajoutant des éléments redondants ou en assurant une ductilité des zones vulnérables permettant une redistribution des efforts, ou encore en surdimensionnant l'ouvrage ;
- dimensionner des dispositifs de protection (ou d'isolation) en intercalant entre le générateur de risque et la structure une protection adaptée : protection anti-incendie, glissière en béton armé devant une pile de pont pour le risque de choc, etc ;

- modifier le programme de suivi de l'ouvrage en fonction des risques : fréquence des inspections, niveau de détail de celles-ci, etc ;
- mettre en place des dispositifs de surveillance permettant de prévenir d'une évolution pathologique et de prendre des mesures conservatoires à temps (appuis provisoires...);
- réduire les sollicitations de l'ouvrage (pour un ouvrage existant) : restriction de circulation, limitation du tonnage...

2.3.6.4 - Réduire le risque (en jouant sur les conséquences)

Lorsque les moyens évoqués plus hauts ne permettent pas de réduire l'aléa ou la vulnérabilité, on doit envisager des mesures de réduction des conséquences.

Ces mesures peuvent se traduire par :

- la mise au point d'un système de fermeture de l'ouvrage pour empêcher les usagers d'aller dessus ou dessous lorsque la probabilité de l'aléa augmente (exemples : incendie par forte chaleur, arrivée d'un cyclone, risque d'avalanche élevé, crues importantes laissant craindre des affouillements) ;
- la réduction du nombre de véhicules présents simultanément sur l'ouvrage, jusqu'à la fermeture totale à certaines heures, la restriction du tonnage, du nombre de voies ;
- la mise sous haute surveillance de l'ouvrage, au sens de l'ITSEOA : il s'agit d'installer une instrumentation permanente pour détecter d'éventuelles ruptures internes annonciatrices d'une évolution vers la ruine, d'assurer le suivi en temps réel de cette instrumentation et de prévoir des procédures d'alerte des forces de l'ordre pour fermer l'ouvrage dans un délai donné.

En pratique, on combine généralement des mesures de réduction de la vulnérabilité et des mesures de réduction des conséquences. Par exemple, pour le pont d'Aquitaine, le comité technique avait préconisé simultanément le renforcement provisoire de la suspension et la mise sous haute surveillance.

2.3.6.5 - Choix parmi les mesures à prendre

Bien souvent, l'éventail des mesures pouvant être prises pour réduire le risque sur un ouvrage peut être assez large. L'application de toutes les mesures de manière simultanée présente un coût souvent prohibitif. Certaines mesures sont mêmes redondantes avec d'autres.

L'analyse de type « coûts-bénéfices » est dans ce cas un très bon outil pour évaluer les différentes stratégies de réduction du risque d'un ouvrage.

Pour chaque mesure envisagée, on évalue le gain en termes de risque (risque sans la mesure – risque avec la mesure) et le coût de la mesure. Les mesures les plus intéressantes sont celles qui présentent le ratio gain en termes de risque/coût le plus élevé, du moment bien sûr que l'on aboutit à un minimum de gain en termes de risque. Il est souvent utile de combiner des ensembles de mesures et d'évaluer leur performance.

Inversement, on peut aussi se donner un niveau de risque à atteindre et évaluer la combinaison de mesures permettant d'atteindre ce risque cible au moindre coût.

Quoiqu'il en soit, lorsque le risque est inacceptable, les mesures de renforcement et de modification de la conception peuvent être soit lourdes pour rendre le risque acceptable, soit plus légères pour rendre le risque moyen et associées alors à des mesures de surveillance pour rendre le risque acceptable.

3 - Grille simplifiée d'analyse des aléas

3.1 - Généralités

Ce chapitre présente une grille d'analyse des différents aléas pouvant affecter un ouvrage d'art, et lorsque c'est possible, des moyens permettant d'évaluer sommairement le niveau associé aux différents aléas.

Pour chaque aléa, on indique lorsque cela est possible comment donner une note chiffrée caractérisant le niveau d'aléa en fonction d'un certain nombre de critères à remplir qui conduisent à une note chiffrée, ce qui permet de déduire une catégorie pour l'aléa (niveau élevé, moyen ou faible, en fonction de la note obtenue par rapport aux notes extrêmes possibles). Dans de nombreux cas, il est difficile de chiffrer l'importance des critères. Le lecteur doit alors évaluer lui-même le niveau d'aléa en fonction de la réponse qu'il donne à chacun des critères proposés (s'il répond oui à tous les critères, le niveau d'aléa est sans doute élevé, mais s'il répond non, le niveau d'aléa est faible). Les notations proposées dans les paragraphes à venir sur la base de la figure 3-1 sont données à titre indicatif, selon les réponses possibles à un critère donné. S'agissant d'une analyse simplifiée, seul un nombre restreint de niveaux de réponses est envisagé. Quelques exemples illustrent les possibilités d'évaluation envisageables.

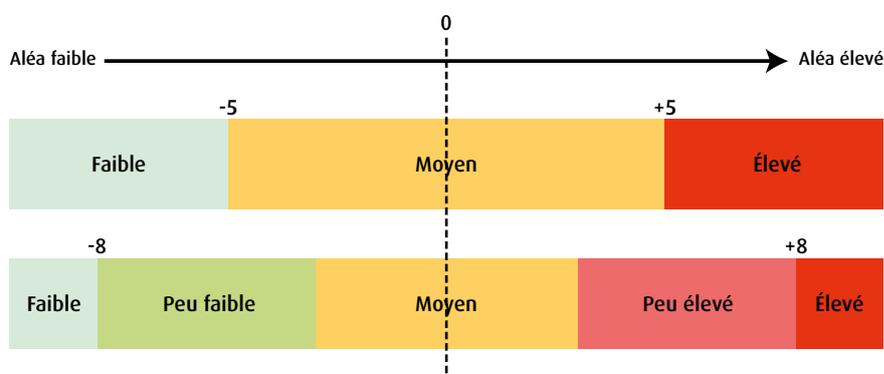


Figure 3-1 : évaluation simplifiée du niveau d'aléa

On pourra toutefois développer certains critères si nécessaire afin de prendre en compte des situations spécifiques mais en veillant à garder une cohérence dans l'évaluation globale de l'aléa. Le niveau de l'aléa considéré étant déterminé à l'issue de l'évaluation de l'ensemble des critères qui le régissent, il convient en effet de conserver une cohésion de notation sur les différents critères.

Les niveaux et maxima de notations peuvent varier d'un critère à l'autre afin de tenir compte de leur importance relative. Ainsi, un critère particulier induisant à lui seul un niveau d'aléa élevé devra conserver son caractère discriminatoire, même si les autres critères orientent ce même aléa à la baisse. Dans d'autres cas, seule la conjonction de plusieurs critères conduira à un niveau d'aléa élevé, il sera donc préférable d'équilibrer le poids de chacun d'entre eux. Dans tous les cas, il convient d'apprécier les liens pouvant exister entre critères, afin de proposer une notation cohérente apte à refléter la réalité d'une situation donnée.

3.2 - Aléas internes exogènes à l'ouvrage

On regroupe dans cette catégorie les aléas dont la manifestation du désordre est interne à la structure mais qui sont liés à des sollicitations diverses provenant de l'extérieur, environnementales la plupart du temps.

3.2.1 - Corrosion des armatures passives

L'évaluation du niveau d'intensité de cet aléa concerne davantage les ouvrages anciens. En effet, on peut considérer que le respect des Eurocodes (Eurocode 2 [5]) et de la norme sur le béton (NF EN 206-1 [6]) garantit d'avoir pris des mesures suffisantes pour réduire le risque de corrosion à une valeur acceptable, sous réserve d'une exécution de bonne qualité.

Zone géographique

- Environnement marin : +5
- Environnement littoral : +3
- Possibilité de gel sévère : +2
- Environnement neutre : -5

Conditions locales

- Zone de marnage : +3
- Zone humide peu ventilée ou à humidité très élevée (tropicale) : +2
- Zone constamment émergée : +1
- Humidité atmosphérique habituelle de la zone – Pluviosité : -3 (faible) / 0 (moyenne) / +3 (forte)
- Zone industrielle avec agents chimiques : +2
- Zone urbaine (augmente la probabilité de carbonatation du béton) : +1
- Zone sans agent agressif : -2

Exploitation de l'ouvrage

- Fréquence des sels de déverglaçage : entre -3 et +5 suivant la fréquence du salage

Exemple : on pourra se référer à la carte de salage donnée par le guide LCPC « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » [24] :

- absence de salage (-3)
- fréquence faible : < 10 jours salage/an (0)
- fréquence moyenne : entre 10 et 30 jours/an (+3)
- fréquence élevée : > 30 jours/an (+5)

- Importance du trafic – Critère en termes de véhicules-jour : -1 (faible) / 0 (moyenne) / +1 (élevée)

3.2.2 - Corrosion des aciers de précontrainte intérieure

L'évaluation du niveau d'intensité de cet aléa concerne davantage les ouvrages anciens. En effet, on peut considérer que le respect des Eurocodes (Eurocode 2 [5]), de la norme sur le béton (NF-EN 206-1 [6]), des agréments techniques européens et de la circulaire de 2001 sur la précontrainte extérieure garantit d'avoir pris des mesures suffisantes pour réduire le risque de corrosion à une valeur acceptable.

Qualité du coulis d'injection

- Facteurs chimiques – Présence de chlorures, sulfates, sulfures (concerne les ouvrages anciens en raison de l'interdiction des ciments au laitier pour les coulis) : +5
- Carbonatation ou porosité importante du coulis : entre +1 et +3

Exemple : diminution de la protection des câbles imputable à :

- une porosité significative ou un début carbonatation (+1)
- une porosité importante ou un front de carbonatation ayant atteint les câbles (+3)

Qualité de la mise en œuvre de l'injection

- Pas de contrôle fiable pendant les travaux : +3
- Vérifications des zones injectées par gammagraphie : entre -3 et +5

Exemple : contrôle gammagraphique (par échantillonnage) mettant en évidence :

- une bonne injection (-3)
- quelques lacunes d'injection (+1)
- d'importantes lacunes d'injection (+3)
- des ruptures de fils (+5)

Gaine métallique de précontrainte

- Traitement particulier au plomb des gaines métalliques (ouvrages anciens, risque de phénomène de pile) : +1

État de l'ouvrage

- Zones de tracé de précontrainte longitudinale : entre -3 et +5

Exemple : examen du tracé des câbles avec :

- absence de fissuration (-3)
- fissuration selon tracé et absence d'efflorescence ou efflorescence non active (+1)
- fissuration selon tracé et présence d'efflorescences actives (+3)
- fissuration selon tracé et traces de corrosion (+5)

- Zones de tracé de précontrainte transversale : entre -3 et +5

Exemple : examen du tracé des câbles avec :

- absence de venue d'eau (-3)
- venues locales temporaires (+1)
- stagnation d'eau et/ou dégradation du béton (+3)
- traces de corrosion (+5)

- Zones d'ancrage des câbles : entre -3 et +3

Exemple : examen des zones d'ancrage en extrados ou about d'ouvrage, avec :

- absence de venues d'eau et bon aspect visuel des ancrages (-3)
- venues d'eau sans corrosion apparente (+1)
- venues d'eau avec traces de corrosion (+3)

3.2.3 - Corrosion des aciers de précontrainte extérieure

L'évaluation du niveau d'intensité de cet aléa concerne davantage les ouvrages anciens. En effet, on peut considérer que le respect des Eurocodes (Eurocode 2 [5]), de la norme sur le béton (NF-EN 206-1 [6]), des agréments techniques européens et de la circulaire de 2001 sur la précontrainte extérieure garantit d'avoir pris des mesures suffisantes pour réduire le risque de corrosion à une valeur acceptable.

Qualité du coulis d'injection

- Type de coulis (cire/ciment) et date d'injection : entre -3 et +3

Exemple :

- injection à la cire pétrolière (-3)
- injection au coulis de ciment après la prise en compte des prescriptions de 1973 (0)
- injection au coulis de ciment avant les prescriptions de 1973 (+3)

- Présence de chlorures, sulfates, sulfures (concerne les ouvrages anciens en raison de l'interdiction des ciments au laitier pour les coulis) : +5

- Carbonatation ou porosité importante du coulis : entre +1 et +3

Exemple : diminution de la protection des câbles imputable à :

- une porosité significative ou un début carbonatation (+1)
- une porosité importante ou un front de carbonatation ayant atteint les câbles (+3)

Qualité de la mise en œuvre de l'injection

- Pas de contrôle fiable pendant les travaux : +3
- Détection de vide dans les gaines : entre -3 et +5

Exemple : investigations étendues sur le câblage ayant mis en évidence :

- une absence de vide par sondage au marteau (-3)
- une ou plusieurs détections de vide par sondage au marteau (+3)
- une détection de vide à la sonde capacitive (+5)

État de l'ouvrage

- Déformation (type hélicoïdale) des gaines : entre -1 et +3

Exemple : relevé de géométrie des câbles avec :

- absence de déformation suspecte (-1)
- déformation de gaine susceptible de traduire la rupture d'un toron (+3)

- Présence d'exsudat ou traces de corrosion au niveau des événements : entre -3 et +5

Exemple : examen visuel des événements avec :

- une absence d'exsudat (-3)
- des traces d'exsudat de type « pâte blanche » (+3)
- des traces de corrosion des aciers de précontrainte à nu au niveau de l'événement (+5)

3.2.4 - Corrosion des aciers de charpente pour une ossature métallique

Zone géographique

- Environnement marin : +5
- Environnement littoral : +3
- Environnement neutre : -5
- Possibilité de gel sévère : +2

Conditions locales

- Zone de marnage : +3
- Zone humide peu ventilée ou à humidité très élevée (tropicale) : +2
- Zone constamment émergée : +1
- Humidité atmosphérique habituelle de la zone – Pluviosité : -3 (faible) / 0 (moyenne) / +3 (forte)
- Zone industrielle avec agents chimiques : +2
- Zone urbaine (augmente la probabilité de carbonatation du béton) : +1
- Zone sans agent agressif : -2

Exploitation de l'ouvrage

- Fréquence des sels de déverglaçage : entre -3 et +5 suivant la fréquence du salage

Exemple : on pourra se référer à la carte de salage donnée par le guide LCPC « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » :

- absence de salage (-3)
- fréquence faible : < 10 jours salage/an (0)
- fréquence moyenne : entre 10 et 30 jours/an (+3)
- fréquence élevée : > 30 jours/an (+5)

- Importance du trafic – Critère en termes de véhicules-jour : -1 (faible) / 0 (moyenne) / +1 (élevée)

3.2.5 - Fatigue des aciers de charpente pour une ossature métallique

Exploitation de l'ouvrage

- Importance du trafic – Critères en termes de véhicules-jour : -3 (faible) / 0 (moy) / +3 (élevée)
- Âge de l'ouvrage (traduisant le nombre total de véhicules lourds ayant emprunté l'ouvrage) : entre -12 et +12

Exemple : cotation en fonction de l'âge de la structure métallique :

- de 0 à 20 ans (-12)
- entre 21 et 40 ans (-9)
- entre 41 et 60 ans (0)
- entre 61 et 80 ans (+6)
- entre 81 et 100 ans (+9)
- plus de 100 ans (+12)

- Rapport charges variables/poids propre : -3 (faible) / 0 (moyen) / +3 (élevé)

3.2.6 - Réactions de gonflement interne

L'alcali-réaction, de même que la réaction sulfatique, provoque un gonflement du béton, une fissuration et une perte des caractéristiques mécaniques.

Matériaux

- Respect des recommandations LCPC (permet de s'affranchir des autres critères matériaux) : -12
- Emploi de ciments exothermiques ou surdosage en ciment : +3
- Teneur élevée en alcalin du ciment : +3
- Granulats potentiellement réactifs : +3

Mise en œuvre

- Massivité importante d'éléments d'ouvrages (sans mesure spécifique vis-à-vis d'une élévation de température importante dans le béton) : +3
- Température extérieure lors du bétonnage (mise en œuvre en période estivale) : +3
- Humidité de la zone (ou pluviosité) : -3 (faible) / 0 (moyenne) / +3 (élevée)

État de l'ouvrage

- Maillage de fissures pouvant traduire une pathologie spécifique : entre -6 et +18

Exemple : à l'occasion de visites IQOA ou d'inspections périodiques détaillées :

- absence de maillage de fissure (-6)
- relevé de maillage régulier de fissures (+12)
- relevé de maillage régulier et évolutif de fissures (+18)

3.2.7 - Corrosion d'un élément de l'ouvrage

Élément structurel utile pour le fonctionnement mécanique

- Appareils d'appui métalliques : blocage possible
- Rotule métallique : transmission d'un moment parasite

Élément utile pour le fonctionnement de l'ouvrage et pouvant avoir une influence sur la sécurité

- Joint de chaussée
- Corniches

Mêmes facteurs que pour la corrosion des armatures passives (voir paragraphe 2.1).

3.3 - Aléas internes endogènes

Cette catégorie regroupe les aléas qui ont des conséquences au cœur de la structure et qui proviennent de la structure même. Cela concerne principalement les aléas liés à des défauts de conception ou de réalisation.

3.3.1 - Défaut de qualité des matériaux

- Béton provenant d'une centrale certifiée NF BPE : -3 / non certifiée : +6
- Armatures passives en acier certifiées AFCAB : -3 / non certifiées : +6
- Précontrainte non certifiée ASQPE : +12
- Absence d'agrément technique du système de précontrainte : +6
- Non-certification NF des aciers de charpente : +12

3.3.2 - Défaut de conception/dimensionnement

Dimensionnement

- Modélisation complexe : +3
- Aptitude et performances du logiciel de calcul : -6 (optimales) / -3 (passables) / +6 (mauvaises)
- Prise en compte de phénomènes complexes : +3
- Vérification à la main : -3
- Vérification par un autre logiciel : -3

Conception

- Structure mal adaptée à son environnement : +3
- Ancrages de précontrainte et environnement des ancrages : de +3 à +6 selon les conséquences possibles
- Densité d'aciers et possibilités de bétonnage : de +3 à +6 selon les conséquences possibles
- Longueur de recouvrement des aciers trop faible : de +3 à +6 selon les conséquences possibles
- Appareils d'appui – Blocage, déformations ou dilatations gênées : +3
- Défauts des dispositions constructives diverses : entre +3 et +6 selon les conséquences possibles. Exemples :
 - Défauts sur système d'étanchéité : +3
 - Défauts sur équipements utiles pour la sécurité (joints de chaussée – dispositifs de retenue) : +3
 - Défauts sur autres équipements (corniches, évacuation des eaux, etc.) : +3
 - Défauts sur implantation et protection des PPHM sur ouvrages : +3

3.3.3 - Erreurs de réalisation

- Nature et qualité des contrôles : entre -6 et +6

Exemple :

- contrôles étendus et de bonne qualité (-6)
- contrôles restreints ou peu rigoureux (+3)
- défaillance ou inadéquation du système de contrôle (+6)

- Absence de savoir-faire des entreprises intervenantes : +3
- Qualité des différents intervenants (manque de rigueur, inexpérience, etc.) : +3
- Qualité de la mise en œuvre du béton : entre +3 et +6 selon les conséquences possibles
- Qualité de la mise en œuvre des aciers : entre +3 et +6 selon les conséquences possibles
- Qualité d'exécution des assemblages soudés : entre +3 et +6 selon les conséquences possibles
- Qualité de la mise en œuvre des équipements : entre +3 et +6 selon les conséquences possibles

3.4 - Aléas externes d'origine naturelle

3.4.1 - Séisme

Zone géographique

- Position dans le nouveau zonage : entre -9 et +9

Exemple :

- zone 1 (-9)
- zone 2 (-6)
- zone 3 (0)
- zone 4 (+6)
- zone 5 (+9)

- Classe de sols : +3
- Présence de sols liquéfiables : +3
- Chutes de bloc possibles : +3

3.4.2 - Avalanche sur ouvrage

Zone géographique

- Localisation géographique par rapport aux couloirs d'avalanche répertoriés : entre -6 et +6
- Importance du bassin versant : +3
- Caractéristiques d'enneigement de la région : entre -6 et +6

3.4.3 - Affouillement des fondations

Caractéristiques du cours d'eau

- Vitesse d'écoulement du cours d'eau : -6 (faible) / 0 (modérée) / +3 (importante)
- Fréquence des crues : +3

Caractéristiques des sols

- Sensibilité du type de sol vis-à-vis des affouillements : -6 (faible) / 0 (modérée) / +6 (élevée)
- Extractions de matériaux rencontrés : +3

Retour d'expérience

- Antécédents des événements affouillements : +3 (rares ou peu importants) / +6 (significatifs)

Caractéristiques de l'ouvrage

- Forme des piles ne favorisant pas l'écoulement : +3
- Dimension des piles importante : +3

3.4.4 - Chute de blocs, rochers sur ouvrage

Topographie

- Relief surplombant la chaussée : +3

Caractéristiques locales mécaniques

- Instabilité de blocs rocheux et pente vers l'ouvrage : entre -6 et +6

Exemple :

- aucun risque (-6)
- rochers décrochés et pente faible ou risque de décrochement et pente importante (+3)
- rochers décrochés et pente supérieure à 30 % (+6)

3.4.5 - Événement géotechnique

Tassement important des sols (général ou différentiel)

- Qualité de la reconnaissance géotechnique (nombre et type de sondages) : entre -6 et +3
- Hétérogénéité – Homogénéité du sol : entre -3 et +3
- Surface d'emprise de la fondation : +3
- Remaniement des sols à proximité et postérieur à la construction de l'ouvrage : +3

Affaissement, éboulement

- Localisation géographique : +3
- Nature du sous-sol (présence de gypse) : +3
- Présences de vides karstiques, de carrières minières : entre 0 et +9

Exemple :

- aucun risque (0)
- vides localisés, non évolutifs (+3)
- localisation incertaine et/ou instabilité possible (+6)

Glissement de terrain

- Pentes naturelles : +3
- Nature des sols (composition, granulométrie, etc.) : +3
- Densité et type de végétation : +3
- Antécédents historiques : entre 0 et +6

Exemple :

- pas d'antécédent (0)
- événement peu fréquent ou de faible intensité (+3)
- événement relativement fréquent et/ou intensité élevée (+6)

Poussée latérale des terres

- Murs de grande hauteur : +3
- Combinaison possible poussée terre + poussée eau : +3

3.4.6 - Événement hydraulique

Crue, inondation

- Zone inondable : -6 (faible) / 0 (modérée) / +6 (élevée)
- Configuration hydrogéologique : +3

Poussée hydrodynamique sur un ouvrage suite à une crue

- Taille du bassin versant : +3
- Configuration locale du cours d'eau : +3
- Possibilité d'embâcles : +3

3.4.7 - Effet de la foudre

Effet de la foudre

- Zone géographique : entre -6 et +3

Exemple :

- très faible fréquence d'événement (-6)
- fréquence faible ou modérée (+3)
- fréquence élevée (+6)

- Conditions de site : +6

- Conditions géométriques de l'infrastructure (hauts pylônes, etc.) : +6
- Hauteur de l'ouvrage par rapport à l'environnement : entre -3 et +3

Exemple :

- ouvrage encaissé (-3)
- altitude identique à celle de l'environnement proche (+3)
- ouvrage surplombant (+3)

3.4.8 - Effet du vent

Effet du vent

- Possibilité de tempêtes, cyclones : entre -6 et +12

Exemple : possibilité de se reporter à l'Eurocode 1 « NF EN 1991-1-4 » et son annexe nationale

- peu ou pas d'occurrence (-6)
- tempête de fréquence faible et/ou d'intensité modérée (0)
- tempête de fréquence et/ou d'intensité modérée à élevée (+6)
- cyclone (+12)

- Conditions d'exposition : +3 (défavorables) / +6 (très défavorables)
- Durée de construction ou de vie envisagée plus longue : +6

3.4.9 - Zones naturelles

Écosystème

- Présences d'oiseaux : entre -2 et +2
- Présence de zones écologiques (Natura 2000), etc. : entre -2 et +2
- Faune et flore : entre -2 et +2
- Risques environnementaux résultant de l'ouvrage : entre 0 et +8

3.4.10 - Réchauffement climatique

Montée des eaux

- Zone potentiellement en crue : -6 (non) / 0 (oui)
- Zone soumise à un régime de conditions difficiles (littoral, etc.) : +6

Sols

- Zone pouvant être affectée par un assèchement des sols : +6
- Zone karstique pouvant être affectée par une modification du régime de cours d'eau souterrains : +6

3.4.11 - Verglas

Verglas

- Situation en zone de gel intense : -6 (gel faible ou modéré) / 0 (intense)

3.5 - Aléas externes d'origine humaine

3.5.1 - Incendie sur ou sous ouvrage

Exploitation sur/sous l'ouvrage

- Trafic poids lourds sous l'ouvrage : -6 (faible) / 0 (modéré) / +3 (élevé)
- Transport de matières dangereuses : +3
- Présence d'une industrie à proximité : +3
- Caractéristiques accidentogènes au droit de l'ouvrage : +3



3.5.2 - Choc de poids lourd sur pile ou sur tablier

Exploitation sous l'ouvrage

- Trafic de la voie franchie : -3 (faible) / 0 (modéré) / +3 (élevé)
- Pourcentage de PL : -3 (faible) / 0 (modéré) / +3 (élevé)
- Masse moyenne des PL : -2 (faible)
- Vitesse moyenne des PL : -2 (faible)

Site et ouvrage

- Géométrie locale : entre -6 et +6

Exemple :

- proximité entre pile et voies + absence de dispositif de retenue (+6)
- proximité entre pile et voies avec DR peu ou pas adapté (risque de déversement, etc.) (0)
- éloignement suffisant entre pile et voie et/ou DR spécifique (-6)

- Zone accidentogène : virage, échangeur, deux voies ou plus (problème de dépassements) : +4
- Hauteur libre sous l'ouvrage : entre -6 et +6

Exemple :

- ouvrage en sous-gabarit ou de hauteur libre inférieure aux ouvrages de l'itinéraire et susceptible de choc (+6)
- ouvrage au gabarit réglementaire, ni exposé ni protégé spécifiquement au risque de choc (0)
- ouvrage en sur-gabarit ou encadré par des ouvrages de hauteur libre inférieure, sans insertion intermédiaire (-6)

- Présence de poutre gabarit : -4

3.5.3 - Choc de bateau

Exploitation sous l'ouvrage

- Trafic maritime : entre -3 et +3
- Tonnage moyen des bateaux : +4 (élevé)
- Ouvrage situé dans une zone de restriction de vitesse : -2

Site et ouvrage

- Proximité du gabarit fluvial/maritime du tablier ou des piles : entre -18 et +6

Exemple :

- proximité entre pile ou tablier et gabarit (+6)
- sur-gabarit important et impossibilité d'accès aux appuis (-18)
- autre (0)

- Géométrie particulière (couloir fluvial en virage, obstacles à éviter nécessitant des changements de direction, navigation rendue difficile) : +4

3.5.4 - Chocs divers

Chocs d'avion (tourisme, militaire, gros porteur)

- Proximité aéroport : -6 (éloigné) / 0 (proche) / +3 (proximité immédiate)
- Situation dans l'axe de pistes : +3

Choc de train (piles + tablier)

- Voir méthodologie UIC (Union Internationale des Chemins de fer)

3.5.5 - Accidents divers

Explosion

- Itinéraire de transports de matières dangereuses ou explosives : entre -3 (non) / 0 (occasionnel) / +6 (spécifique)
- Proximité d'industrie chimique ou pétrolière (classement Seveso, etc.) : entre -3 et +6

Exemple :

- proximité immédiate avec risque d'effets mécaniques et/ou thermiques en cas d'accident (+6)
- situation dans un périmètre proche mais avec effets induits réduits (0)
- absence d'industrie dangereuse proche (-3)

3.5.6 - Effet dynamique des piétons sur une passerelle

Effet dynamique

- Trafic sur la passerelle : -6 (faible) / 0 (modéré) / +6 (élevé même occasionnellement ou scolaire)
- Niveau de confort : -6 (acceptable) / 0 (pas acceptable)

3.5.7 - Actions malveillantes

Terrorisme

- Ouvrage très médiatique ou fortement circulé : entre -6 et +4

Exemple :

- ouvrage commun, supportant un trafic normal (-6)
- ouvrage commun situé sur un itinéraire stratégique ou fortement circulé (0)
- ouvrage emblématique situé sur un itinéraire stratégique ou fortement circulé (+4)

Dégradations : vandalisme, vol

- Facilité de dégradation : -2 (accès facile et discret) / 0 (absence de protection particulière) / +2 (accès difficile ou protégé)
- Surfaces planes très visibles (tags), présence de câbles ou haubans : +2
- Matériaux de valeur : +2

Divers

- Installation de SDF : +2
- Suicides : +2
- Zones d'acrobatie : +2

3.5.8 - Exploitation de l'ouvrage

Surcharge d'un ouvrage ou positionnement des charges non prévu

- Véhicule hors norme (poids lourd, engin agricole ou TP, grue, etc.) : +3
- Transport exceptionnel : entre -6 et +6

Exemple :

- itinéraire interdit ou inadapté aux convois exceptionnels (profil en travers, en plan, etc.) (-6)
- itinéraire peu adapté mais emprunté occasionnellement par les convois exceptionnels (0)
- itinéraire emprunté régulièrement, qu'il soit classé itinéraire de TE ou pas (+6)

- Desserte d'une industrie spécifique (chaudronnerie, sucrerie, etc.) : +3
- Configuration de congestion particulière : +3
- Lieu de stockage de matériaux : +3

Interventions

- Rechargement de chaussée : +3
- Réparations : +3

3.5.9 - Changement d'usage de l'ouvrage

Changement d'usage

- Élargissement par ajout d'une ou plusieurs voies : entre -2 et +6

Exemple :

- élargissement improbable compte tenu des caractéristiques de l'itinéraire (-2)
- élargissement peu probable mais envisageable compte tenu des caractéristiques de l'itinéraire ou de la situation de l'ouvrage (-2)
- demande d'élargissement très plausible compte tenu de la situation de l'ouvrage (+6)

- Augmentation du trafic (remise en cause de la classe de trafic – coef. alpha Q –, des charges locales et des caractéristiques de trafic pour la fatigue) : entre -2 et +6
- Extension de la durée de vie : entre -2 et +6

3.5.10 - Conditions d'entretien

Gestion

- Ouvrage soumis à l'ITSEOA [7] ou système de surveillance équivalent : entre -3 et +3

Exemple :

- système de surveillance adapté (-3)
- système de surveillance rudimentaire ou peu adapté (0)
- système de surveillance inadapté ou inexistant (+3)

- Mise en œuvre du système de surveillance

Exemple :

- mise en œuvre satisfaisante (-3)
- lacune dans la mise en œuvre (0)
- mise en œuvre défailante (+3)

- Réalisation des opérations d'entretien courant : entre -2 et +2
- Réalisation des opérations d'entretien spécialisé : entre -4 et +4

4 - Vulnérabilité des ouvrages : éléments d'appréciation

4.1 - Généralités

Le présent chapitre a pour but de donner des éléments pour mener une approche simplifiée, mais quantitative, de la vulnérabilité des ouvrages.

Les deux paragraphes qui suivent donnent les moyens de quantifier la vulnérabilité locale et la vulnérabilité globale telles que définies au chapitre 2 (Étape 3, analyse simplifiée). Des indicateurs sont donnés aléa par aléa pour l'évaluation de la vulnérabilité locale, qui tient compte des caractéristiques particulières de l'aléa. D'autres indicateurs sont fournis par l'évaluation de la vulnérabilité globale, qui tient davantage compte du type de structure que de l'aléa. Il est à noter que l'évaluation de la vulnérabilité globale revient d'une certaine manière à évaluer la robustesse de l'ouvrage. On reste cependant ici à un stade purement qualitatif. L'évaluation plus précise de la robustesse de l'ouvrage fait l'objet du chapitre 6 et se place plutôt dans le cadre d'une analyse détaillée des risques. En effet, ce chapitre permet de déterminer une certaine quantification de la robustesse et fait appel à des calculs plus ou moins sophistiqués.

Dans le présent chapitre, on réalise plutôt une évaluation sans calcul. L'évaluation simplifiée de la vulnérabilité globale suppose en contrepartie qu'elle soit réalisée par des ingénieurs confirmés, ayant des bonnes notions mécaniques de circulation des efforts et de bonnes bases du comportement des structures. Bien qu'elle soit qualitative, l'évaluation de la vulnérabilité s'effectue au travers d'une notation qui dépend de paramètres. De manière analogue à la notation du niveau d'aléa, la figure 4-1 résume la manière de réaliser cette notation pour la vulnérabilité locale.

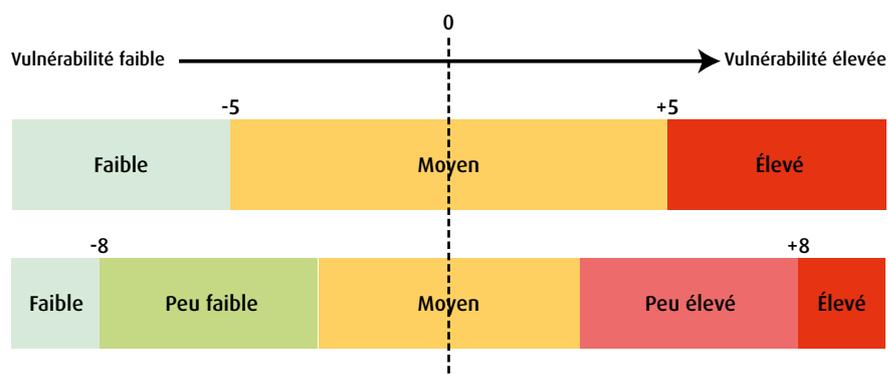


Figure 4-1 : évaluation simplifiée de la vulnérabilité locale

Le niveau global de vulnérabilité est la résultante des notes de vulnérabilité locale et de vulnérabilité globale.

En fonction des résultats de l'évaluation de la vulnérabilité globale, on détermine l'aptitude de l'ouvrage à reprendre des efforts suite à l'apparition de désordres pouvant, par exemple, se traduire par une rupture localisée. Ainsi, à partir de ce résultat, on décidera de majorer les résultats de l'analyse de vulnérabilité locale, de les minorer ou encore de ne pas les modifier.

En définitive, il s'agit donc de croiser dans une matrice les **vulnérabilités locale** et **globale** pour déduire le **niveau global de vulnérabilité** de l'ouvrage (la vulnérabilité locale de la matrice se rapportant à l'aléa considéré). Le tableau 4-1 reprend pour mémoire le tableau 2-1 du paragraphe 3.3.2.

| Vulnérabilité | Globale faible | Globale moyenne | Globale élevée |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Locale faible | Vulnérabilité faible | Vulnérabilité faible | Vulnérabilité moyenne |
| Locale moyenne | Vulnérabilité faible | Vulnérabilité moyenne | Vulnérabilité élevée |
| Locale élevée | Vulnérabilité moyenne | Vulnérabilité élevée | Vulnérabilité élevée |

Croisement Vulnérabilité locale x Vulnérabilité globale = Niveau global de vulnérabilité

Tableau 4-1 : matrice de détermination du niveau global de vulnérabilité

4.2 - Vulnérabilité locale à l'aléa

On donne ci-dessous des éléments pour avoir une approche quantitative simplifiée de la vulnérabilité des ouvrages par rapport aux divers aléas évoqués dans le chapitre précédent. Pour chacun des aléas, on dresse la liste des éléments à renseigner permettant de quantifier la vulnérabilité locale de l'ouvrage vis-à-vis de l'aléa. Chaque critère retenu se voit attribuer une note, traduisant son influence. Une certaine confusion peut apparaître entre l'aléa et la vulnérabilité à l'aléa, en particulier pour les aléas internes à l'ouvrage :

- la probabilité de l'aléa est la probabilité des conditions d'apparition de l'aléa (exposition de la structure aux chlorures pour la corrosion des armatures) ;
- en supposant les conditions d'apparition de l'aléa réunies (exposition de l'ouvrage aux chlorures ou à un taux élevé de gaz carbonique, pour la corrosion des armatures), la vulnérabilité à l'aléa est la mesure des conséquences locales sur la structure (en termes de corrosion effective des armatures).

Cette distinction est parfois subtile et arbitraire. Ainsi, lorsque des signes de corrosion sont manifestes (par exemple, des traces de rouille), il est certain que la probabilité de l'aléa est élevée (puisqu'il est manifeste) et que la structure est localement vulnérable (puisqu'il y a corrosion). Nous avons donc été amené à être redondant dans certains cas, entre les critères de probabilité de l'aléa présentés au chapitre 3 et les critères de vulnérabilité présentés ci-dessous.

Le total des notes attribuées aux différents critères détermine le niveau de vulnérabilité locale de l'ouvrage vis-à-vis de l'aléa considéré : élevé, moyen ou faible.

4.2.1 - Vulnérabilité vis-à-vis des aléas internes à l'ouvrage

4.2.1.1 - Corrosion des armatures passives

Éléments pour évaluer la vulnérabilité directe de la structure :

Nature des matériaux

- Armatures en acier inox : entre -12 et -4 suivant la nature et l'usage de l'acier employé

Exemple :

- emploi d'armatures inox de désignation connue et adaptée à l'usage, incluant une mise en œuvre spécifique (-12)
- emploi d'acier inox non spécifiquement adapté à l'usage et/ou mis en œuvre sans précaution particulière (-4)

- Qualité du béton (classes de bétons, rapport E/C, comparaison avec les exigences de l'EC2/EN 206) : entre -4 et +4, en fonction du respect des exigences de l'EC2/EN 206 [5-6]

Dispositions constructives

- Conformité de l'enrobage à l'EC2 : entre -3 et +3

Exemple :

- par tranche de 5 mm en moins (+1)
- par tranche de 5 mm en plus (-1)

Protection vis-à-vis de l'eau

- Étanchéité absente ou dégradée : entre +2 et +4

Exemple :

- dégradation ponctuelle sans stagnation d'eau (+2)
- dégradation étendue ou avec stagnation d'eau (+4)

- Traitement spécifique des zones de recouvrement et des remontées non satisfaisant : +2
- Conception du système d'évacuation des eaux (pentes, avaloirs, débits, etc.) : entre +2 et +4

Exemple :

- défauts ponctuels ou avec de faibles incidences (+2)
- avec incidences significatives (+4)

Désordres et vieillissement

- Âge de l'ouvrage : entre 0 et +5 (+1 par tranche de 20 ans)
- Présence d'une fissuration du béton : entre +2 et +4

Exemple :

- ouverture entre 0,2 et 0,3 mm (+2)
- ouverture supérieure à 0,3 mm (+4)

- Traces de corrosion : entre +6 et +12

Exemple :

- traces d'initiation de corrosion (+6)
- traces de corrosion avancée (+12)

4.2.1.2 - Corrosion de la précontrainte intérieure**Nature des matériaux**

- Qualité du béton (classes de bétons, rapport E/C, comparaison avec les exigences de l'EC2/EN 206) : entre -4 et +4, en fonction du respect des exigences de l'EC2/EN 206 [5-6]
- Nature des gaines de précontrainte : +2

Dispositions constructives

- Conformité de l'enrobage à l'EC2 : entre -3 et +3

Protection vis-à-vis de l'eau

- Étanchéité absente ou dégradée : entre +2 et +4
- Traitement spécifique des zones de recouvrement et des remontées non satisfaisant : +2
- Conception du système d'évacuation des eaux (pentes, avaloirs, débits, etc.) : entre +2 et +4

Désordres et vieillissement

- Âge de l'ouvrage : entre 0 et +5 (+1 par tranche de 20 ans)
- Présence d'une fissuration du béton : entre +2 et +15 (notamment en présence de fissures perpendiculaires aux câbles en service normal)

4.2.1.3 - Corrosion de la précontrainte extérieure**Matériaux**

- Nature des gaines de précontrainte : +2
- Type de coulis de ciment : entre -3 et +3
- Type de câble sensible à la corrosion : +6

Désordres et vieillissement

- Âge de l'ouvrage : entre 0 et +5 (+1 par tranche de 20 ans)



4.2.1.4 - Corrosion des aciers de charpente pour une ossature métallique

Matériaux

- Qualité des aciers : entre -3 et +3

Exemple :

- aciers certifiés NF (-3)
- aciers non certifiés NF mais disposant de résultats d'essais probants (0)
- aciers non certifiés NF ou ne disposant pas de résultats d'essais probants (+3)

- Qualité du système de protection anticorrosion : entre -3 et +3
- État du système de protection anticorrosion : entre -3 et +3

Protection vis-à-vis de l'eau

- Étanchéité absente ou dégradée : entre +2 et +4
- Conception du système d'évacuation des eaux (pentes, avaloirs, débits, etc.) : entre +2 et +4

4.2.1.5 - Fatigue des aciers de charpente pour une ossature métallique

Conception

- Traitement apporté au détail de fatigue : entre -3 et +3
- Position des détails de fatigue dans les zones très sollicitées : +3
- Marge de dimensionnement par rapport à la fatigue : entre -3 et +3

Exemple :

- fatigue non dimensionnante (-3)
- fatigue dimensionnante (+3)

Désordres et vieillissement

- Ancienneté de la dernière inspection détaillée : entre 0 et +6
- Fissures de fatigue relevées lors de la dernière inspection détaillée : entre -3 et +6

Exemple :

- pas de fissure relevée (-3)
- initiation de fissures (+3)
- fissures évolutives ou significatives (+6)

4.2.1.6 - Réactions de gonflement interne

Conception

- Présence d'éléments massifs avec risque d'élévation importante de la température : entre -3 et +3

Protection vis-à-vis de l'eau

- Conception du système d'évacuation des eaux (flancs de poutre, abouts, murs...) : entre +2 et +4

Désordres et vieillissement

- Maillage de fissures évolutives relevé lors de la dernière inspection détaillée : entre -3 et +9

Exemple :

- pas de maillage de fissures relevé (-3)
- maillage local de fissures, avec peu ou pas d'évolution (+3)
- maillage de fissures étendu et/ou évolutif (+9)

4.2.1.7 - Corrosion d'un élément structurel

Nature des matériaux

- Armatures en acier inox : entre -12 et -4 suivant la nature et l'usage de l'acier employé
- Qualité du béton (classes de bétons, rapport E/C, comparaison avec les exigences de l'EC2/EN 206) : entre -4 et +4, en fonction du respect des exigences de l'EC2/EN 206 [5-6]

Dispositions constructives

- Conformité de l'enrobage à l'EC2 : entre -3 et +3

Protection vis-à-vis de l'eau

- Étanchéité absente ou dégradée : entre +2 et +4
- Traitement spécifique des zones de recouvrement et des remontées non satisfaisant : +2
- Conception du système d'évacuation des eaux (pentes, avaloirs, débits, etc.) : entre +2 et +4

Désordres et vieillissement

- Âge de l'ouvrage : entre 0 et +5 (+1 par tranche de 20 ans)
- Présence d'une fissuration du béton : entre +2 et +4
- Traces de corrosion : entre +6 et +12

4.2.2 - Vulnérabilité vis-à-vis des aléas internes liés à la construction

4.2.2.1 - Défaut de qualité des matériaux

Éléments pour évaluer la vulnérabilité directe de la structure :

Matériaux

- Marges entre la résistance réelle du béton et la résistance nécessaire : -3
- Système de contrôle des matériaux : entre -3 et +6

4.2.2.2 - Erreurs de conception/dimensionnement

Conception

- Système de contrôle des études : entre -3 et +6
- Difficulté, complexité du modèle de structure : +3
- Pertinence des modélisations : entre -2 et +2
- Exhaustivité du référentiel documentaire (règles + état de l'art) : entre -2 et +2
- Complexité du site (géotechnique, exposition aux aléas) : +3
- Qualité et compétence des intervenants : entre -2 et +2

4.2.2.3 - Erreurs de réalisation

Mise en œuvre

- Difficulté de réalisation des travaux (implantation, planning, etc.) : +3
- Complexité des plans coffrage/ferraillage : +3
- Qualité et compétence des intervenants : entre -3 et +3

Contrôles

- Système de contrôle du chantier (interne, externe, extérieur) : entre -3 et +6

4.2.3 - Vulnérabilité vis-à-vis des aléas externes d'origine naturelle

4.2.3.1 - Séisme

Pour traiter ce sujet, on s'orientera vers la méthode d'évaluation sommaire qualitative SISMOA. De manière générale, on pourra se reporter au guide Sétra sur l'évaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages d'art [8].

4.2.3.2 - Avalanche sur ouvrage

Implantation

- Orientation des piles par rapport à la direction de l'avalanche : entre 0 et +6

Conception

- Prise en compte dans le dimensionnement : entre -12 et +3
- Profil du tablier aérodynamique : -2



- Portée/hauteur du tablier : entre -3 (petites portées, tablier fin) et +3 (grandes portées, tablier épais)
- Résistance des appuis par rapport à une force transversale : entre -3 (type barrettes larges) et +3 (type pieux fins)

4.2.3.3 - Affouillement des fondations

Conception

- Forme des piles vis-à-vis de l'écoulement des eaux : entre -3 et +3
- Type de fondations : entre -3 (profondes) et +3 (superficielles)
- Dispositif spécifique de protection (enrochement, etc.) : -6

Implantation

- Qualité des sols : entre -3 et +3
- Extractions dans la zone : +4

Désordres

- Ancienneté de la dernière visite plongeur : entre 0 et +6

4.2.3.4 - Chute de blocs, rochers sur ouvrage

Conception

- Type de tablier : entre -3 et +6

Exemple :

- dalle BA, poutrelles enrobées, pont cadre (-3)
- dalle ou caisson BP (0)
- bipoutre mixte, PRAD, VIPP (+3)
- dalle orthotrope, pont à haubans ou suspendu (+6)

- Épaisseur de la dalle du tablier : entre -3 (pont dalle BA) et +3 (épaisseur minimale de 24 cm)
- Dispositif spécifique de protection adapté : -6

4.2.3.5 - Événement géotechnique

Fondations

- Fondations superficielles : +6
- Fondations profondes « flottantes » : +3
- Fondations profondes sur substratum : -3
- Redondance dans le système de fondation : -3
- Large emprise de la fondation permettant des reports : -3

4.2.3.6 - Événement hydraulique

Poussée hydrodynamique

- Importance de la surface en contact avec l'écoulement, par rapport à la surface résistante : entre -3 et +3
- Prise en compte dans les calculs de dimensionnement, incluant une marge de sécurité confortable : entre -9 et +3.

Crue

- Légèreté des éléments (vis-à-vis d'une poussée d'Archimède) : entre -2 et +2
- Poids de l'ouvrage : entre -2 et +2
- Gabarit ouvrage par rapport au niveau prévisible des crues : entre -3 et +3
- Nombre d'appuis en rivière : entre 0 et +3
- Sensibilité à la venue d'eau chargée en éléments : +2 pour les ouvrages en béton

4.2.3.7 - Effet de la foudre

Type de structure

- Pont à haubans : +9 (propagation de la foudre dans les câbles et incendie de ceux-ci)
- Ponts métalliques non reliés à la terre : +6

- Ponts métalliques reliés à la terre : +3
- Ponts béton : -3

Dispositif spécifique

- Présence de paratonnerre : -3

4.2.3.8 - Effet du vent

Dimensionnement

- Évaluation des effets du vent conforme à l'EC1, partie 1-4 : entre -6 et +3 (calcul réglementaire) suivant les cas
- Conditions locales particulières non prises en compte par l'EC1 : entre +3 et +6

Conception

- Grande hauteur de tablier : +3
- Présence d'écrans : +3
- Si présence de haubans : longueur de ceux-ci, présence ou non d'amortisseurs, d'éléments transversaux de liaison des haubans, interdistance des haubans (si proches, interactions possibles) : entre 0 et +6

4.2.3.9 - Zones naturelles

Conception

- Conception et dimensionnement des éléments de recueil des eaux de chaussées : entre -6 et +6
- Prise en compte des contraintes spécifiques liées à la zone naturelle dans la conception de l'ouvrage : entre 0 et +12

4.2.3.10 - Réchauffement climatique

Conception

- Prise en compte d'événement hydraulique si l'ouvrage est en zone inondable : entre -6 et +6
- Marges de dimensionnement pour les joints de chaussées (souffle disponible) : entre -3 et +3
- Prise en compte d'un assèchement des sols en zone argileuse : entre -3 et +3

Exemple :

- non prise en compte spécifique dans le cas de fondations superficielles (+3)
- cas de fondations profondes (0)
- prise en compte (-3)

4.2.3.11 - Verglas

Conception

- Ouvrage avec dalle orthotrope : +6
- Épaisseur de la dalle béton du tablier (inertie thermique) : entre -3 et +3

Exploitation

- Dispositif spécifique de détection et de prévention : entre -3 et +3

4.2.4 - Vulnérabilité vis-à-vis des aléas externes d'origine humaine

4.2.4.1 - Incendie sur ouvrage

Le sujet de l'incendie sur les ouvrages d'art est relativement vaste. Il est ainsi traité en détail au sein d'un autre guide du Sétra intitulé « Comportement au feu des ouvrages d'art » [10].

4.2.4.2 - Choc de poids lourd sur pile ou sur tablier

Ce sujet est relativement bien traité dans le guide « Application des Eurocodes 0 et 1 aux ponts routiers » qui reprend en partie les indications de l'Eurocode 1, partie 1-7 [4], mais donne des éléments supplémentaires pour adapter les valeurs indicatives correspondant à une moyenne donnée dans l'Eurocode à des cas plus spécifiques (ouvrages à enjeu, trafic poids lourds plus élevé que la moyenne).



4.2.4.3 - Choc de bateau

Les chocs de bateau sur les ouvrages d'art sont traités dans l'Eurocode 1, partie 1-7 (Actions accidentelles) [4]. Néanmoins, l'annexe nationale française de cet Eurocode recommande la plus grande prudence dans l'application des efforts indiqués, et précise qu'une analyse doit être menée sur le projet particulier pour spécifier le type de bateau à prendre en compte. Le guide « Eurocodes 0 et 1 : application aux ponts routiers et passerelles » [11] donne quelques éléments qualitatifs.

On peut citer les éléments qualitatifs suivants :

- proximité gabarit fluvial – piles ou tablier
- protection ou non (duc d'albe)
- massivité des piles

4.2.4.4 - Chocs divers

Conception

- Dispositions constructives permettant une certaine ductilité : entre -2 et +2
- Importance du ferrailage -2 (dense > 120 kg/m³) à +2 (peu dense < 60 kg/m³)
- Épaisseur de béton supplémentaire par rapport à l'enrobage minimal : -2
- Redondance, hyperstaticité : entre -6 et +6

4.2.4.5 - Accidents divers

Conception

- Présence de marge de dimensionnement : entre -3 et +3
- Structure robuste : entre -3 et +3
- Redondance, hyperstaticité : entre -6 et +6

4.2.4.6 - Effet dynamique des piétons sur une passerelle

Conception

- Souplesse de la structure : entre -3 et +6

Exemple :

- grande portée, structure métallique (+6)
- portée intermédiaire (+3)
- petite portée, structure béton (-3)

- Présence d'amortisseurs : -6
- Masse par unité de surface : entre -3 (si > 1 500 kg/m²) et +6 (si < 300 kg/m²)
- Couplage/découplage des modes propres de vibrations : entre -6 et 0

4.2.4.7 - Actions malveillantes

Conception

- Mesures préventives vis-à-vis du vol de matériaux : -2
- Matériaux inflammables : +4
- Système de protection des zones dangereuses ou sensibles : entre -3 et +3
- Systèmes spécifiques de protection des ouvrages à fort enjeu : entre -3 et +3

4.2.4.8 - Exploitation de l'ouvrage

Conception

- Marges de dimensionnement : entre -3 et +3
- Dispositif préventif vis-à-vis de la circulation de charges non autorisées sur l'ouvrage : -3

4.2.4.9 - Changement d'usage de l'ouvrage

Conception

- Marges de dimensionnement : entre -2 et +3

- Structure évolutive (surlargeur, possibilité d'équipements supplémentaires, etc.) : entre -2 et +3
- Conception facilitant la réalisation de réparations, les interventions sur structure : -3

4.2.4.10 - Conditions de surveillance et d'entretien

Conception

- Accessibilité des éléments de structure : entre -2 et +2
- Système de suivi ou de surveillance intégré à l'ouvrage : -2

Gestion

- Compétence des intervenants : entre -3 et +9
- Système de surveillance en place (visite, inspection détaillée, suivi et exploitation des rapports, etc.) : entre -3 et +9

4.3 - Vulnérabilité globale aux aléas

La vulnérabilité globale de la structure vis-à-vis des différents aléas possibles dépend surtout du comportement global de la structure. Il peut aussi dépendre de l'aléa proprement dit lorsque la localisation de celui-ci est bien déterminée, et touche seulement une partie bien définie de la structure.

Pour évaluer la vulnérabilité globale, on part d'une note nulle, et pour chacun des critères donnés dans le tableau ci-dessous, lorsqu'ils sont pertinents pour le type de structure considéré, on modifie ce coefficient positivement ou négativement.

Si la note résultant est comprise en -5 et +5, l'ouvrage ne présente pas de capacité supplémentaire particulière à reprendre des efforts suite à une rupture localisée. À l'inverse, il ne présente pas de risques de conséquences disproportionnées par rapport aux aléas (il est robuste). Les résultats de l'analyse locale de la vulnérabilité ne sont pas modifiés.

Lorsque la note est supérieure à +5, la vulnérabilité globale sera considérée comme élevée : l'ouvrage est très sensible aux aléas et ne présente aucune capacité d'adaptation.

Lorsque la note est inférieure à -5, la vulnérabilité globale sera considérée comme faible : l'ouvrage est robuste et peut subir un certain nombre de désordres locaux. Les tableaux 4-2 à 4-7 donnent des éléments pour quantifier la vulnérabilité globale.

| Facteurs connus modifiant la vulnérabilité | Quantification de la vulnérabilité |
|---|---|
| Cas dimensionnant pour les armatures passives : ELU ou ELS ? (si ELS, la justification vis-à-vis d'un ELU accidentel est d'autant plus facile à assurer) | Dimensionnement selon ELU si fissuration non préjudiciable ou exposition XC3 (+2) Dimensionnement selon ELS si fissuration préjudiciable ou exposition XS-XD (-2) |
| Marges de dimensionnement | Surdimensionnement (-2) ou optimisation extrême (+2) |
| Pour un ouvrage existant, facteurs de sécurité par rapport aux règles actuelles | Par calcul simplifié des sections les plus sollicitées : sollicitations réglementaires actuelles / résistance avec méthodes actuelles : position par rapport à 1 (-2 si inférieur à 0,85 ou +2 si supérieur à 1,15 ou non recalculé) |
| Modèle de calcul initial | Modèle de calcul simplifié de manière sécuritaire (-3) ou modèle aux éléments finis très précis permettant une optimisation extrême (+3) |

Tableau 4-2 : influence du dimensionnement sur la vulnérabilité

| Facteurs connus modifiant la vulnérabilité | Quantification de la vulnérabilité |
|---|--|
| Redistributions transversales | Redistribution transversale élastique possible (-10), plastique (-5) ou non (0) |
| Redistributions longitudinales | Redistribution longitudinale élastique possible (-6), plastique (-3) ou non (0) |
| Possibilité de rupture en chaîne | Possibilité de rupture en chaîne (stabilité d'un élément nécessaire à l'élément adjacent, etc.) (+10) ou non (+0) |
| Présence de petits éléments conditionnant la stabilité générale | Exemple : tirant, sans redondance, nécessaire à la reprise du poids propre (+10), on ne travaillant qu'en cas de surcharges (+4) |
| Redondance des éléments clés | À définir |
| Capacité de la structure à perdre un appui | À définir |
| Contreventement | À définir |

Tableau 4-3 : influence de la redondance sur la vulnérabilité

| Facteurs connus modifiant la vulnérabilité | Quantification de la vulnérabilité |
|--|--|
| Comportement ductile/fragile | Nombreuses armatures passives dans toutes les directions (-2), seulement certaines (-1) ou aucune (0 à +2) Précontrainte sans armature passive (+3) ou avec armatures passives (+1) Structure métallique dimensionnée par la résistance de l'acier plutôt que par les instabilités (classe 1 ou 2 plutôt que classe 3 ou 4). |
| Formation possible de rotules plastiques et dispositions constructives associées | Ductilité des aciers > minimum (-1), pas de recouvrements dans les zones critiques (M sollicitant / M résistant maximal) (-1), espacement des cadres pas trop important, minimum d'acier de confinement du béton, section pas trop comprimée (+2 pour BP, -2 pour BA) |
| Résistance à l'effort tranchant pour les ponts béton | Avec cadres d'effort tranchant (-2), avec le critère de non fissuration en tranchant (+8) ou avec le critère armatures longitudinales seules (+3) |

Tableau 4-4 : influence de la ductilité sur la vulnérabilité

| Facteurs connus modifiant la vulnérabilité | Quantification de la vulnérabilité |
|--|---|
| État général de l'ouvrage | Suivant l'état de l'ouvrage, de très bon à très mauvais (-5 à +5) |

Tableau 4-5 : influence de l'état structural sur la vulnérabilité

| Facteurs connus modifiant la vulnérabilité | Quantification de la vulnérabilité |
|--|------------------------------------|
| Vulnérabilité de l'ouvrage par les appuis | À définir |
| Résistance du sol d'ancrage des fondations, dimensionnement des fondations | À définir |

Tableau 4-6 : influence des fondations sur la vulnérabilité

| Facteurs connus modifiant la vulnérabilité | Quantification de la vulnérabilité |
|---|---|
| Ponts à câbles (ponts suspendus et ponts à haubans) | Dimensionnement avec deux haubans ou suspente en moins (-7), avec un seul (-1) ou rien (+5) Dimensionnement des haubans (par rapport à 0,45 FR) : +3 si au-dessus et -3 si en dessous Câble porteur d'un pont suspendu surdimensionné (par rapport à un coefficient de 2,5, y compris ses ancrages) : si coeff ≥ 3 (-5), si coeff ≤ 2 (+5) État des câbles dégradé (+15) |
| Hauteur/ouverture des arcs | À définir |
| Type d'appareil d'appui | À définir |

Tableau 4-7 : influence d'autres facteurs sur la vulnérabilité

Si la vulnérabilité globale est élevée, le niveau global de vulnérabilité de l'ouvrage sera égal au niveau de vulnérabilité locale majoré d'une catégorie. Inversement, lorsque la vulnérabilité globale est faible, le niveau global de vulnérabilité de l'ouvrage sera égal au niveau de vulnérabilité locale minoré d'une catégorie (cf. paragraphe 1 de ce chapitre, tableau 4-1).





5 - Importance des conséquences

5.1 - Position du problème

L'évaluation des conséquences ou des enjeux est un exercice difficile car on doit prendre en compte des facteurs humains, qui doivent être bien entendu la priorité, mais aussi des facteurs socio-économiques, secondaires par rapport aux facteurs humains, mais importants pour les maîtres d'ouvrages et les gestionnaires, et une quantité importante d'autres types de conséquences.

L'évaluation des pertes humaines et des blessés résultants d'une défaillance d'un ouvrage d'art est peu habituelle pour les ingénieurs en charge de la conception et de la gestion des ouvrages, et fortement dépendante de facteurs subjectifs. On préférera donc raisonner en termes de surface utile, trafic, congestion, hauteur d'ouvrage pour qualifier l'importance des dégâts humains.

L'évaluation des impacts socio-économiques se rapproche finalement beaucoup de l'évaluation de la rentabilité socio-économique des projets routiers (sauf que l'on évalue le coût de la perte d'un ouvrage plutôt que le gain de la création d'un ouvrage, mais le problème est fondamentalement presque le même). On renvoie sur ce point le lecteur à la littérature spécialisée sur le sujet, en citant néanmoins le rapport de Marcel Boiteux de juin 2001, intitulé « Transport : choix des investissements et coût des nuisances », qui donne notamment des éléments sur la valeur du temps dans les projets et la valeur de la vie humaine. Néanmoins, une telle évaluation très précise dépasse largement le cadre du présent document. Sans une quantification extrême de l'importance socio-économique, un certain nombre de critères qualitatifs sont accessibles pour évaluer grossièrement l'importance de l'ouvrage (desserte d'une activité industrielle, itinéraires alternatifs, durée de reconstruction de l'ouvrage, etc.).

5.2 - Principe de l'évaluation

L'évaluation de l'importance des conséquences peut donc se faire soit très sommairement, soit de manière plus détaillée mais sans entrer nécessairement dans le niveau de détail extrême cité plus haut.

5.2.1 - Évaluation sommaire

Cette évaluation peut se faire de manière qualitative en distinguant plusieurs niveaux de gravité des conséquences. Le tableau de l'EC1, partie 1-7 [4] donne quelques éléments de base pour la mener (tableau 5.1).

| | | | | | |
|--|---------|--------|-------|------|-------|
| Très élevée | x | | | | |
| Élevée | x | | | | |
| Moyenne | | x | | | |
| Faible | | | x | | |
| Très faible | | | | x | |
| é Conséquence/ Probabilité è | 0,00001 | 0,0001 | 0,001 | 0,01 | > 0,1 |
| Les « x » représentent des exemples de niveaux maximaux de risques acceptables | | | | | |

Explication : la sévérité d'une défaillance potentielle est identifiée pour chaque scénario de danger potentiel et classée comme très élevée, élevée, moyenne, faible et très faible. Ces classes peuvent être définies comme suit :

Très élevée : l'effondrement soudain de la structure se produit avec un fort risque de pertes de vies humaines et de blessures aux individus.

Élevée : défaillance d'une ou de plusieurs parties de la structure avec un risque fort d'effondrement partiel et un risque certain de blessures et de perturbations causées aux usagers et au public.

Moyenne : défaillance d'une partie de la structure. L'effondrement total ou partiel de la structure est improbable. Faible risque de blessures et de perturbations causées aux usagers et au public.

Faible : dommage localisé.

Très faible : dommage localisé de faible importance.

Tableau 5-1 : nive-aux de conséquences selon l'EC1

Atkins, pour le compte de l'Highways Agency (UK), propose une évaluation en conséquences humaines et financières (tableau 5-2) [12].

| Classes de conséquences | Blessures/Décès | Pertes économiques |
|-------------------------|--------------------|--------------------|
| Mineure | Blessures mineures | Moins de £ 20 000 |
| Modérée | Blessures majeures | Jusqu'à £ 100 000 |
| Majeure | Décès isolé | Jusqu'à £ 1 M |
| Sévère | Moins de 10 morts | Jusqu'à £ 10 M |
| Très sévère | Plus de 10 morts | Jusqu'à £ 100 M |

Tableau 5-2 : niveaux de conséquences selon Atkins

Globalement, il n'est pas très difficile de trouver des critères simples pour classer les différents ouvrages d'un parc d'ouvrages en trois catégories. Cette classification ne peut pas être proposée ici de manière générale, car cela dépend fortement du patrimoine géré par chaque maître d'ouvrage et de sa sensibilité. Dès que l'on veut un peu mieux décrire les conséquences, on passe à une analyse détaillée telle que présentée dans les paragraphes suivants.

5.2.2 - Évaluation détaillée

Pour obtenir une évaluation plus fiable de toutes les conséquences, il est nécessaire d'évaluer, même qualitativement, les différents points suivants et d'en déduire une conséquence globale.

Coût de reconstruction partiel/total

- à partir du coût de l'ouvrage actualisé ;
- à partir de ratios de tablier seul, plus éventuellement un ou deux appuis ;

Coût humain

- à partir du trafic sur l'ouvrage et sous l'ouvrage ;
- à partir de la fréquence des situations de congestion ;
- à partir de la surface totale/surface effondrée (quand on peut l'estimer).

Coût pour l'activité socio-économique de la région en cas de perte d'un ouvrage

- étude des itinéraires alternatifs et de leur niveau de débit ;
- distance supplémentaire à parcourir ;
- possibilité d'insérer un ouvrage provisoire et coût de location de celui-ci.

Impact moral ou médiatique (difficile à chiffrer...)

- ouvrage ancien historique, éventuellement classé ;
- ouvrage particulièrement exceptionnel participant à l'image de la France (exemple : viaduc de Millau, pont de Normandie dont l'effondrement aurait un impact fort sur la compétitivité des entreprises françaises à l'étranger) ;
- mauvaise publicité pour le maître d'ouvrage dans la presse, impact médiatique fort.

Impact environnemental (difficile aussi à chiffrer vraiment)

- coût environnemental lié à l'évacuation et au retraitement de la structure effondrée ;
- coût environnemental lié à la reconstruction ;
- coût environnemental lié à la pollution induite par les déviations ;
- coût environnemental lié à l'effondrement de l'ouvrage (matériaux de construction dans des cours d'eau, pollution liée à la présence de camions sur l'ouvrage au moment de l'effondrement, conduites diverses dans l'ouvrage, etc.).

Cette description des différents points à renseigner et la pondération de tous ces éléments est un exercice très délicat, qui ne peut pas se faire dans l'absolu et dépend fortement du patrimoine d'un gestionnaire, de sa sensibilité par rapport aux différents critères.

Dans tous les cas, il est donc utile de donner des éléments au maître d'ouvrage/gestionnaire pour qu'il classe les différents ouvrages de son patrimoine selon une valeur d'importance, mais en lui laissant la responsabilité de ce classement.

On ne donnera donc pas d'outil tout fait, mais deux exemples de détermination de l'importance des ouvrages dans deux cas très différents d'analyse des conséquences. Ceci fait l'objet des deux paragraphes suivants.

5.3 - Quantification des conséquences sur les ponts routiers en situation normale

5.3.1 - Principes généraux

Les désordres qui menacent l'ouvrage peuvent avoir des conséquences sur sa durabilité (niveau de service) et/ou sur la sécurité offerte au public (risque de ruine).

Pour les ponts routiers, il a été retenu une méthode simplifiée d'évaluation de la gravité des conséquences qui repose essentiellement sur des critères socio-économiques représentatifs :

- critère A : de l'importance de l'itinéraire porté par l'ouvrage,
- critère B : du trafic de la voie portée,
- critère C : de la valeur patrimoniale de l'ouvrage,
- critère D : des conséquences d'une réduction du niveau de service.

Cette méthode fait partie intégrante du système de gestion des ouvrages d'art du réseau routier national LAGORA [13]. Les conséquences humaines sont jugées au même degré d'inadmissibilité pour l'ensemble du patrimoine. Elles ne permettent pas de discriminer les ouvrages. En revanche, leur probabilité est prise en compte en fonction de l'importance du trafic et de la surface du tablier sur une échelle de notation de 1 à 5.

La méthode proposée est adaptée aux ouvrages du réseau routier national qui se situent tous sur des axes routiers ou autoroutiers structurants. Elle permet, par le biais d'une grille d'analyse, d'affecter à chaque ouvrage un niveau de conséquence relatif à partir de la valeur stratégique de l'itinéraire porté par l'ouvrage, des valeurs de trafics, de la configuration du franchissement et des caractéristiques fonctionnelles de l'ouvrage.

Cette évaluation est estimée en donnant aux quatre critères (A, B, C et D) un même poids. Elle est chiffrée par l'attribution d'un indice socio-économique ISE défini tel que :

$$ISE = A + B + C + D$$

5.3.2 - Importance de la voie portée

Le premier critère **(A)** représente la valeur stratégique de l'itinéraire porté par l'ouvrage. Il relève de la hiérarchisation du réseau routier national et conduit à distinguer :

- les itinéraires très stratégiques (A = 4) ;
- les itinéraires stratégiques (A = 2 ou 3) ;
- les autres itinéraires (A = 1).

La valeur stratégique de l'itinéraire est déterminée par le gestionnaire en considérant, par exemple pour les itinéraires très stratégiques (A = 4) :

- les grands axes autoroutiers ;
- les tronçons urbains à forts enjeux stratégiques ;
- les itinéraires de convois exceptionnels très fréquentés ;
- les itinéraires de desserte d'un site d'importance stratégique : centrale électrique, hôpital régional (CHR, CHU), aéroport international, etc.

Les itinéraires stratégiques comprennent notamment les autres axes autoroutiers, les tronçons interurbains à enjeux moins importants (A = 2 ou 3). Enfin, les autres itinéraires sont ceux qui présentent une importance stratégique secondaire (A = 1). La valeur stratégique de l'itinéraire peut être augmentée pour tenir compte de l'environnement proche de l'ouvrage et des conséquences de sa ruine. Dans ce cas, le critère A doit être augmenté d'un point dans l'éventualité où l'ouvrage présente des enjeux stratégiques particuliers.

À titre d'exemple, il s'agit :

- d'un ouvrage supportant un réseau (gaz, électricité) d'intérêt national ;
- d'un ouvrage franchissant une ligne TGV ou une autoroute ;
- d'un ouvrage intégré à un échangeur routier stratégique.

5.3.3 - Niveau de trafic

Ce deuxième critère **(B)** indique le volume du trafic routier supporté par l'ouvrage, où quatre seuils de trafic ont été considérés : 15 k, 35 k, 60 k et 80 k. Variant de 1 à 5, le calibrage de ce critère tient compte de la distribution du trafic par tronçons d'itinéraires.

5.3.4 - Valeur patrimoniale de l'ouvrage

Ce troisième critère **(C)** témoigne de la valeur patrimoniale de l'ouvrage. Estimée à partir de sa surface utile, cette valeur représente l'importance des coûts de la reconstruction ou des réparations pour garantir un niveau de service homogène à l'ensemble du patrimoine national. Variant de 1 à 5, le calibrage de ce critère tient compte de la distribution du patrimoine national.

5.3.5 - Conséquences sur le niveau de service

Ce quatrième critère **(D)** caractérise l'impact éventuel sur le niveau de service pendant des travaux de réparation ou de remplacement de l'ouvrage (traitement de la vulnérabilité). Il donne également une estimation de l'impact induit par une réduction de la capacité portante ou de la limitation des trafics autorisés (réduction des aléas).

Pour déterminer la valeur de ce critère, on distingue les ouvrages à tablier unique pour lesquels une déviation est nécessaire en cas de travaux de réparation ou de remplacement, et les franchissements à tabliers séparés pour lesquels un basculement de circulation sur l'autre tablier est envisageable. Dans le premier cas, il est peu probable qu'un itinéraire de substitution existe et permette une déviation sans trop de conséquences sur le trafic (allongement de parcours, gêne) et sur l'activité économique (commerces). La conservation de l'ouvrage revêt une importance stratégique. C'est au gestionnaire d'apprécier les possibilités existantes de déviation et d'évaluer les conséquences

très fortes (D = 5) ou fortes (D = 4) de la déviation. Dans le second cas, il convient d'examiner les possibilités de basculement de circulation sur l'autre tablier du franchissement. Pour ce faire, nous faisons référence à la circulaire du 29 août 1991 relative au profil en travers des OA. Selon la largeur roulable du tablier sur lequel est effectué le basculement de circulation, le profil en travers réduit peut être de :

- 2 + 2 voies pour une largeur roulable supérieure à 14 mètres ;
- 2 + 1 voies pour une largeur roulable comprise entre 11 et 14 mètres ;
- 1 + 1 voies pour une largeur roulable inférieure à 11 mètres.

Le critère **(D)** tient compte de la capacité d'écoulement du trafic selon le profil en travers réduit que l'on peut envisager, et varie de 1 à 3.

5.3.6 - Évaluation de l'indice socio-économique

La valeur socio-économique est déterminée par l'expression $ISE = A + B + C + D$ selon les tableaux 5-3 à 5-6. L'indicateur socio-économique, ainsi évalué, permet de définir des niveaux de conséquences selon le tableau 5-7.

| Itinéraire | Très stratégique | Stratégique | Autre |
|---|------------------|-------------|-------|
| A = | 4 | 3 ou 2 | 1 |
| Si impact particulier de l'ouvrage, A = | 5 | 4 ou 3 | 2 |

Tableau 5-3 : système de notation pour le critère A de l'indice socio-économique

| Trafic journalier moyen | TMJA > 80 k | 60 k < TMJA < 80 k | 35 k < TMJA < 60 k | 15 k < TMJA < 35 k | TMJA < 15 k |
|-------------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| B = | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |

Tableau 5-4 : système de notation pour le critère B de l'indice socio-économique

| Surface utile tablier | S > 5 000 m ² | 2 000 m ² < S < 5 000 m ² | 1 000 m ² < S < 2 000 m ² | 500 < S < 1 000 m ² | S < 500 m ² |
|-----------------------|--------------------------|---|---|--------------------------------|------------------------|
| C = | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |

Tableau 5-5 : système de notation pour le critère C de l'indice socio-économique

| Franchissement à tablier unique, conséquences d'une déviation | très fortes | fortes |
|---|-------------|--------|
| D = | 5 | 4 |

| Franchissement à tabliers séparés, conséquences sur l'exploitation | Largeur roulable d'un tablier | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|-----------------|----------|------------------|-----------------|----------|-----------|-----------------|----------|
| | LR ≥ 14 m | | | 11 m ≤ LR < 14 m | | | LR ≤ 11 m | | |
| | T ≥ 60 k | 35 k ≤ T < 60 k | T < 35 k | T ≥ 35 k | 20 k ≤ T < 35 k | T < 20 k | T ≥ 20 k | 10 k ≤ T < 20 k | T < 10 k |
| D = | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 |

Tableau 5-6 : système de notation pour le critère D de l'indice socio-économique

| Niveaux de conséquences | Indicateur socio-économique |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1 normaux | ISE ≤ 8 |
| 2 élevés | 8 < ISE ≤ 14 |
| 3 très élevés | 14 < ISE |

Tableau 5-7 : niveaux de conséquences basés sur l'indice socio-économique ISE

5.4 - Quantification des conséquences sur les ponts routiers après un séisme

Vis-à-vis de la quantification des conséquences sur les ponts routiers, les situations de crise sismiques impactent non seulement la structure des ouvrages mais, en général, étendent également leurs conséquences à l'échelle d'une région. Le rôle de l'ouvrage et de l'itinéraire qu'il porte dans le transport structurant de cette région est donc à considérer. Le guide SISMOA [8] fournit de nombreux éléments spécifiques à la gestion de crise en cas de séisme majeur (tableaux 5-8 et 5-9). De nombreux autres critères portant sur l'importance des ouvrages de manière absolue sont renseignés.

| | | | | | | |
|--|--|--|-------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| IOuvrage | IOA1 (court terme) | Victimes directes | | | I_{Vict_OA} | |
| | | Trafic (veh/j) | < 1 k : 0 | 1 k – 10 k : 2 | > 10 k : 4 | |
| | | Surface de tablier (m2) | < 200 : 0 | 200 – 4 000 : 1 | > 4 000 : 2 | |
| | | Fréquence embouteillages | Élevée : 2 | Moyenne : 1 | Nulle : 0 | |
| | | Voie franchie | | | | |
| | | Type de voirie | RD, frêt SNCF : 0 | RN, TER : 1 | Autoroute, TGV : 2 | |
| | | Trafic sous l'ouvrage | < 1 k : 0 | 1 k – 10 k : 0,5 | > 10 k : 1 | |
| | | Fréquence embouteillages sous l'ouvrage | Élevée : 2 | Moyenne : 1 | Nulle : 0 | |
| | | Organisation des secours | | | | I_{sec_OA} |
| | | Franchissement d'un itinéraire vital au sens des PIS | | Oui : 2 | Non : 0 | |
| | Desserte immédiate de centre vital (caserne pompier, hôpital, préfecture...) | | Oui : 3 | Non : 0 | | |
| | Possibilité de rétablissement à court terme pour véhicules de secours | | | | $I_{Rétab_OA}$ | |
| | Réparabilité (pont courant à typologie peu vulnérable) | | Oui : 2 | Non : 3 | | |
| | Possibilité de ponts de secours (< 40 m) | | Oui : 2 | Non : 3 | | |
| | Possibilité de déviation locale (échangeur, nœud urbain) | | Oui : 2 | Non : 3 | | |
| | | | | Σ | $I_{OA,1}$ | |
| | IOA,2 (long terme) | Rôle socio-économique voie franchie | | | | I_{Soc_OA} |
| | | Type voirie | VC : 0 | RD : 0.5 | RN, frêt, TER : 1 | Autoroute, TGV : 2 |
| | | Nombre de voies | 1 voie : 0 | 2 voies : 0.5 | 3 ou 4 voies : 1 | > 4 voies : 1,5 |
| | | Trafic (veh/j) | | < 1 k : 0 | 1 k – 10 k : 0,5 | > 10 k : 1 |
| Trafic PL | | | Faible : 0 | Normal : 0,5 | Élevé : 1 | |
| Rôle de desserte | | Village : 0 | Agglo. Pôle d'activités : 0,5 | Régional : 1 | National : 1,5 | |
| Réseaux franchis | | | | Oui : 1 | Non : 0 | |
| Possibilité de reconstruction de l'ouvrage | | | | I_{Rec_OA} | | |
| Durée de reconstruction | | | < 6 mois : -1 | 6 – 24 mois : 3 | > 2 ans : 7 | |
| Valeur intrinsèque de l'ouvrage | | | | I_{Val_OA} | | |
| Coût | < 1 M € : 1 | 1 M – 15 M € : 2 | 15 – 60 M € : 4 | > 60 M € : 8 | | |
| Valeur patrimoniale historique | | | Oui : 2 | Non : 0 | | |
| | | | Σ | $I_{OA,2}$ | | |

Tableau 5-8 : détermination de l'indice d'importance associée à l'ouvrage (séisme)

| | | | | | | |
|---|---|---|-----------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| Itinéraire | itin,1 (court terme) | Victimes directes | | | | I _{Vict_i} |
| | | Trafic (veh/j) | < 1 k : 0 | 1 k – 10 k : 2 | > 10 k : 4 | |
| | | Fréquence embouteillages | Élevée : 2 | Moyenne : 1 | Nulle : 0 | |
| | | Évacuation des populations | | | | I _{Evac_i} |
| | | Rôle identifié (PPRS) | | Oui : 10 | Non : 0 | |
| | | Organisation des secours | | | | I _{Sec_i} |
| | | Itinéraire vital au sens des PIS | | Oui : 7 | Non : 0 | |
| | | Rôle de desserte d'équipements stratégiques pour la sécurité civile (pompiers, base militaire, hôpitaux...) | | Oui : 7 | Non : 0 | |
| | | Réseaux vitaux portés | | | | I _{Res_i} |
| | | Eau | | Oui : 2 | Non : 0 | |
| | | Électricité | | Oui : 2 | Non : 0 | |
| | | Gaz | | Oui : 2 | Non : 0 | |
| | | Communication | | | | |
| | Itinéraires parallèles et rétablissement provisoire d'urgence | | | | I _{Para1_i} | |
| | Présence d'itinéraire parallèle à moins de 3 km | | Oui : 0 | Non : 6 | | |
| | Possibilité de rétablissement provisoire d'urgence en cas d'effondrement de ponts, chutes de blocs (durée < quelques jours) | | Oui : 0 | Non : 6 | | |
| | | | | | Σ | I _{itin,1} |
| | itin,2 (long terme) | Rôle socio-économique | | | | I _{Soc_i} |
| | | Type voirie | VC : 0 | RD : 1 | RN : 2 | |
| | | Nombre de voies/sens | | 1 voie : 0 | 2 voies : 1 | > 2 voies : 2 |
| Trafic (veh/j) | | < 1 k : 0 | 1 k – 10 k : 2 | > 10 k : 3 | | |
| Trafic PL | | Faible : 1 | Normal : 2 | Élevé : 3 | | |
| Rôle de desserte | | Village : 0 | Agglo. Pôle d'activités : 1 | Régional : 2 | National : 3 | |
| Réseaux portés | | Oui : 2 | Non : 0 | | | |
| Itinéraires parallèles suffisamment proches et redondants pour offrir le même niveau de service | | | | I _{Para2_i} | | |
| Perte de temps engendrée | | < 30 mn : 0 | 30 – 90 mn : 7 | | > 90 mn : 14 | |
| Facilité de renforcement par rapport à l'itinéraire parallèle | | | | I _{Coût_i} | | |
| Accessibilité (urbanisation, zone de montagne...) | | Inférieure (ou égale) : 0 | Supérieure : 2 | | | |
| Nombre OA L > 10 m, âge < 1995 par rapport à l'itinéraire parallèle | | Inférieure : 2 | Supérieure ou égale : 0 | | | |
| Nombre murs H > 6 m, âge < 1995 par rapport à l'itinéraire parallèle | | Inférieure : 2 | Supérieure ou égale : 0 | | | |
| Nombre tunnels, âge < 1995 par rapport à l'itinéraire parallèle | | Inférieure : 2 | Supérieure ou égale : 0 | | | |
| Risque effets induits (liq., blocs...) par rapport à l'itinéraire parallèle | | Inférieure : 2 | Supérieure ou égale : 0 | | | |
| Aspect environnemental | | | | I _{Env_i} | | |
| Embouteillage, émission CO2 prévisibles sur itinéraire parallèle | | Oui : 5 | Non : 0 | | | |
| Retombées pour le gestionnaire | | | | I _{Conc_i} | | |
| Coûts induits | | Faibles : 0 | Modérés : 1 | | Forts : 2 | |
| Retombées médiatiques | | Régionales : 0,5 | Nationales : 1 | | Internationales : 2 | |
| | | | | Σ | I _{itin,2} | |

Tableau 5-9 : détermination de l'indice d'importance associée à l'itinéraire (séisme)



6 - Robustesse des ouvrages

6.1 - Le concept de robustesse

6.1.1 - Généralités

Le concept de robustesse est mis en avant dans l'EC1, partie 1-7 [4] : « *Une défaillance locale due à une cause inconnue ne doit pas avoir de conséquences disproportionnées* ». On traite ici les **causes inconnues, ou mal connues et aléatoires**, en imaginant qu'elles ont des conséquences fortes sur des éléments locaux (leur disparition).

La notion de disproportion est difficile à évaluer. La première idée est de raisonner en termes de coûts. Lorsque le coût de l'élément critique représente moins d'un certain pourcentage, a priori faible (de 5 à 10 %, par exemple), du coût total de l'effondrement qu'il provoque (qui n'est pas le coût de l'ouvrage mais seulement de la partie effondrée et des parties adjacentes à démolir pour reconstruire), on peut dire que les conséquences sont disproportionnées. À noter qu'outre le coût de l'ouvrage lui-même, s'ajoute le coût humain, médiatique, social et économique (impact de la fermeture d'un ouvrage sans solution provisoire de coût abordable (pont de secours, etc.)).

Les causes sont reliées aux aléas présentés au début de ce document (aléas externes ou internes). On rappelle ci-dessous quelques exemples d'aléas internes ou externes pouvant conduire à une défaillance.

Parmi les causes externes, on peut signaler :

- malveillance, vandalisme ;
- terrorisme ;
- incendie (camion transportant ou non des matières dangereuses) ;
- explosion (transports de matières dangereuses, conduite de gaz...) ;
- chocs (véhicule, camion, grue...) ;
- chute d'éléments (liée à l'activité humaine ou à un événement naturel (chute de blocs)) ;
- événement naturel catastrophique exceptionnel dans une région (séisme, cyclone, crue, orage...).

Parmi les causes internes, on peut signaler :

- corrosion excessive (armatures de béton armé, torons de câbles de précontrainte...) ;
- fatigue des éléments métalliques ;
- malfaçon à la mise en œuvre non décelée (par exemple, soudure, boulonnage, recouvrement d'armatures, mauvaise injection de câbles de précontrainte...) ;
- qualité médiocre des matériaux (résistance plus faible que ce qui est requis, fragilité extrême sous certaines conditions de température...).

La robustesse peut ainsi traduire la capacité d'une structure à résister à des actions plus ou moins importantes malgré la perte d'un de ses éléments constitutifs principaux. Dans ce cas, il faut bien entendu évaluer une résistance réelle de la structure avant effondrement et non une résistance conventionnelle atteinte lorsqu'un élément n'est plus justifié purement réglementairement.

Les causes accidentelles et rares relativement bien définies et qui sont prises en compte par les Eurocodes (par exemple, le séisme, le feu ou les chocs) ne rentrent a priori pas dans cette catégorie, du moins pour les ouvrages neufs.

Ainsi, la robustesse d'une structure peut s'évaluer en supprimant certains de ses éléments constitutifs (faire décroître la résistance jusqu'à ce que celle-ci soit inférieure à l'action). La figure 6-1 résume les situations possibles.

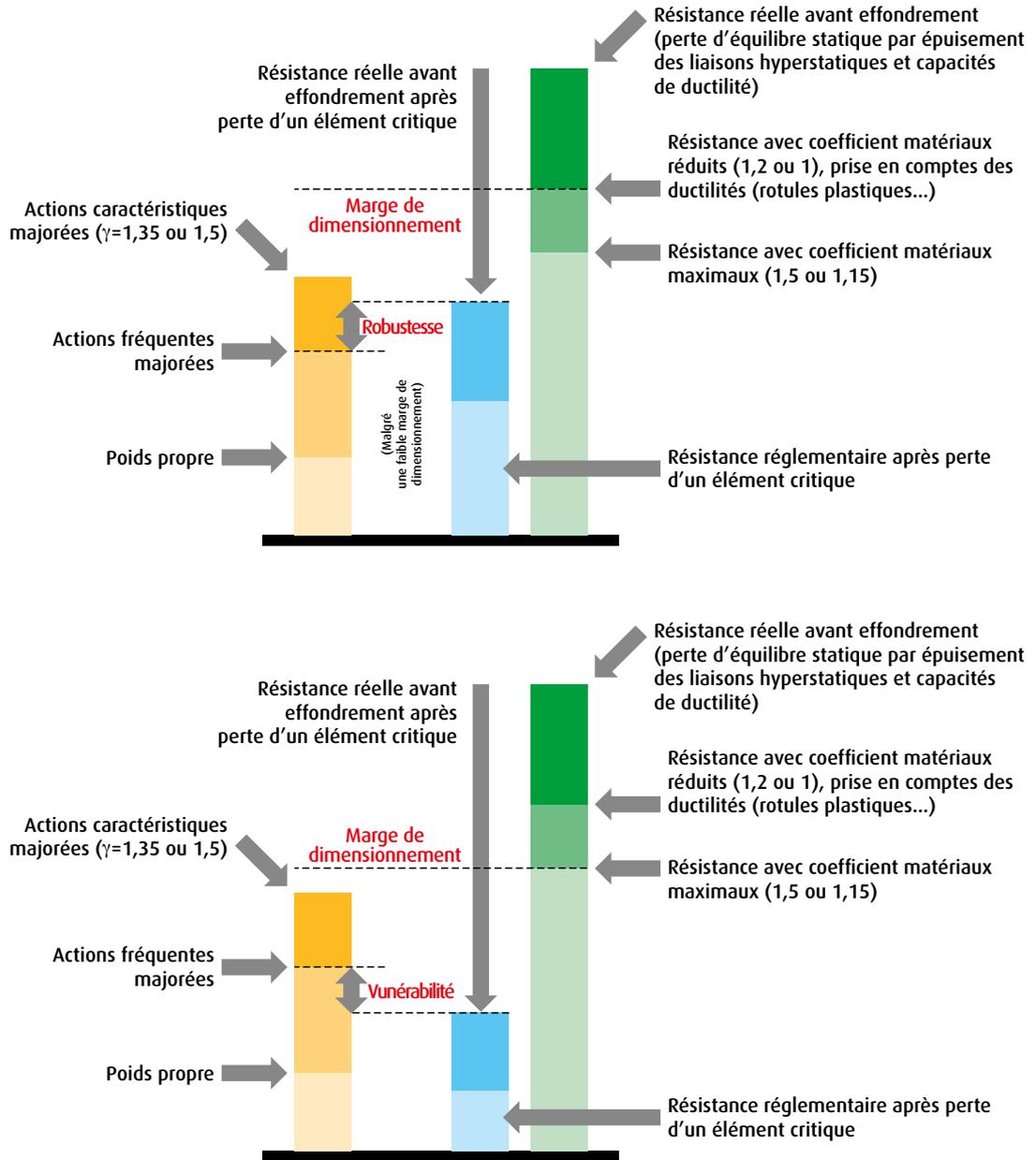


Figure 6-1 : typologie de la robustesse et de la vulnérabilité des ouvrages

L'évaluation de la robustesse pourrait se faire de manière qualitative ou quantitative. Néanmoins, l'évaluation qualitative a déjà été réalisée lorsqu'on évalue la vulnérabilité de l'ouvrage vis-à-vis des divers aléas (chapitres précédents). Ici, on va plus loin dans le raisonnement et on cherche à quantifier la robustesse (et de manière indirecte la vulnérabilité de l'ouvrage) dans le cadre d'une analyse détaillée, supposant un minimum de calculs mécaniques.

6.2 - État de l'art

6.2.1 - Causes d'effondrement des ouvrages

6.2.1.1 - Statistiques mondiales

En Angleterre, Atkins, pour le compte de l'Highways Agency, a réalisé un document intitulé « Risk Based Framework for the Design and Management of Bridges » qui présente non seulement une méthode d'analyse de risques similaire à celle évoquée dans le présent guide, mais qui donne aussi une statistique très intéressante des effondrements de ponts (connus) durant la période allant de 1847 à 2006, à l'échelle mondiale [12]. Quatre-vingts effondrements de ponts sont cités et sauf pour une dizaine d'entre eux, la cause semble bien identifiée. Ces effondrements concernent davantage les pays anglo-saxons. La cause majeure d'effondrement provient d'impacts de bateaux (36 effondrements), suivie par des effondrements en construction (10 cas cités), des affouillements (5 cas cités mais qui ne comprennent pas les deux cas survenus en France : pont de Tours et pont de la rivière Saint-Étienne en 2007). Les effondrements dus au séisme ne concernent que deux cas, mais ceci provient du fait que les pays anglo-saxons sont peu sismiques, exception faite de la Californie. Les cas d'effondrement dus à un séisme doivent être plus nombreux en Asie. Les impacts de train ont donné lieu à deux effondrements. Les autres cas sont liés à des causes d'effondrement peu fréquentes : incendie (2 cas), effets du vent (2 cas y compris le pont de Tacoma), effets de la corrosion (1 cas), erreurs de dimensionnement (1 cas auquel s'ajoute le pont de Minneapolis depuis), terrorisme (1 cas) et effets dynamiques divers (pont d'Angers).

On ne cite pas dans cette statistique les démolitions de ponts dues à des actes de guerre. On trouve également peu de statistiques sur les effondrements du fait de chocs de véhicules, sans doute car ils ont moins de retentissement médiatique (ouvrages de plus petite importance) que lorsqu'ils sont liés à des chocs de bateaux.

Il y a aussi de nombreux ouvrages sur lesquels des accidents ou des ruptures ont eu lieu, mais qui n'ont pas entraîné un effondrement complet de l'ouvrage. Ces exemples n'apparaissent pas dans cette statistique. Une liste plus complète sur la période 1950 – 2007 peut être trouvée dans la référence [14].

Au travers des différentes statistiques et des exemples du paragraphe suivant, il peut être noté qu'une conception robuste, si elle coûte plus cher à la construction, peut apporter une réelle amélioration et éviter certaines catastrophes. Les surcoûts d'une conception robuste sont, sur la plupart des ouvrages, très faibles. Ils deviennent plus importants sur des ouvrages plus exceptionnels, mais en restant raisonnables comparés à l'enjeu de l'ouvrage lui-même.

6.2.1.2 - Exemples récents

Pont de la rivière Saint-Étienne

Suite au cyclone Gamède ayant traversé l'île de la Réunion en mars 2007 et aux crues importantes qui ont accompagné ce cyclone, le sol sous l'une des piles de l'ouvrage s'est affouillé. Ceci a conduit à l'effondrement de la pile, entraînant l'effondrement des treize travées de l'ouvrage (alors que seulement une pile s'est effondré par affouillement). Cet exemple est intéressant en termes de robustesse puisque l'on voit bien que les conséquences sont disproportionnées par rapport à la cause. On peut admettre éventuellement deux travées effondrées de part et d'autre de la pile effondrée (il est illusoire d'espérer dimensionner des grands ouvrages avec une pile en moins, même sous poids propre seul), mais pas la ruine de l'ensemble de l'ouvrage. Cet exemple est intéressant à double titre, puisque les conséquences socio-économiques de la perte de cet ouvrage étaient très importantes, l'ouvrage étant quasiment le seul permettant une liaison stratégique, de plus très circulé les jours travaillés. Après sa rupture et avant la mise en œuvre d'une solution provisoire, les usagers étaient obligés de faire quasiment le tour de l'île. L'étude des itinéraires alternatifs est donc un point crucial dans l'élaboration du degré d'importance des ouvrages.

Pont de Minneapolis

L'effondrement de cet ouvrage a eu des répercussions médiatiques mondiales lors de l'été 2007. La cause semble maintenant bien identifiée. Elle est attribuée principalement au mauvais dimensionnement de deux goussets faisant la liaison entre les diagonales de l'ouvrage et les poutres supérieures. L'événement déclenchant a été la réalisation de travaux sur l'ouvrage, qui a conduit à une circulation routière désaxée et surtout au stockage de matériaux lourds a priori non prévu. L'absence de redondance de l'ouvrage et peut-être son état peu satisfaisant, a entraîné l'effondrement global. Cet exemple est éloquent sur ce qui pourrait être évité par des considérations simples sur la robustesse et l'entretien des ouvrages.



Pont de Koror (République des Palaos, Océanie)

Le pont de Koror est situé dans la république des Palaos dans les îles Carolines (Océanie). Cet ouvrage est un pont en béton précontraint à une travée de 241 m, encastré sur ses appuis et avec un système particulier à mi-travée permettant les dilatations longitudinales. Il s'est effondré par délamination du hourdis supérieur trop fortement comprimé à la suite d'une réparation qui avait eu lieu quelques mois auparavant, par ajout de précontrainte pour palier à une flèche très importante prise par l'ouvrage à mi-travée (de l'ordre de 1,40 m). La densité du ferrailage, notamment des torons très rapprochés et disposés sur plusieurs lits sans aciers verticaux, est à l'origine du phénomène de délamination du béton qui a entraîné la perte de stabilité d'un des fléaux, puis l'entraînement de l'autre fléau. Outre la compression importante qu'elle a générée dans le hourdis supérieur, la réparation par précontrainte additionnelle a eu pour effet d'empêcher les libres dilatations au centre, ce qui a entraîné des compressions additionnelles sous les effets thermiques (du fait des blocages sur appui), mais également de liaisonner les deux encorbellements, ce qui a entraîné la chute de l'autre encorbellement.

Pont de Laval au Québec

L'effondrement récent du pont de Laval au Québec est très intéressant puisqu'il est dû à un problème de dispositions constructives sur un élément de structure particulièrement sensible, à savoir un joint cantilever d'un pont dalle. On ne reviendra pas sur le problème de dispositions constructives, ainsi que tous les facteurs qui ont conduit à cet événement, mais plutôt au problème de faible robustesse des ponts présentant généralement un appui cantilever en travée.

En effet, dans ce type d'ouvrage, on a en général un schéma statique très faiblement hyperstatique, voire isostatique, des éléments réduits assurant la résistance (c'est au maximum la moitié de la hauteur, voire le tiers de la hauteur qui transmet l'effort tranchant, alors que c'est toute la hauteur qui le transmet dans les autres sections). C'est en outre une zone idéale pour abriter un certain nombre d'agents agressifs (eau en particulier), où ils peuvent être piégés contrairement aux autres zones où la section résistante est mieux protégée.

Les économies faites sur ce type d'ouvrage (réduction de la portée, possibilité de mettre un joint sur les grands ouvrages en travée, schéma de calcul simple) ne sont que très rarement intéressantes par rapport à la perte de robustesse qu'engendre cette conception.

6.2.2 - Typologie du patrimoine en France

Même si l'étude doit porter sur tous les types d'ouvrages, il est souhaitable de se focaliser en particulier sur les ouvrages a priori les moins robustes et réalisés en grand nombre. Pour cela, il faut disposer des éléments statistiques sur la répartition des ponts. Le tableau 6-1 donne la répartition des types d'ouvrages d'art rencontrés sur le territoire français. Cette étude a été réalisée en 2005 sur le réseau national avant la décentralisation qui a conduit à rétrocéder environ deux tiers des ouvrages aux collectivités locales. Ces statistiques sont donc relativement fiables pour donner une idée de la répartition des ouvrages en France. La répartition est établie en fonction du nombre d'ouvrages et par type en surface cumulée ce qui permet de prendre en compte l'importance des ouvrages en question du fait de leur surface.



| Types d'ouvrages | Nombre | Surface |
|--|--------|---------|
| Pont voûté en maçonnerie | 18,4 % | 6,4 % |
| Autre structure en maçonnerie | 0,0 % | 0,0 % |
| Cadre | 16,0 % | 6,3 % |
| Portique simple ou double | 10,3 % | 6,5 % |
| Pont dalle en béton armé | 10,7 % | 9,8 % |
| Poutres sous chaussée en béton armé | 4,5 % | 4,0 % |
| Bow-string en béton | 0,1 % | 0,1 % |
| Pont voûté en béton | 1,6 % | 1,2 % |
| Autre structure en béton armé ou non armé | 0,8 % | 0,5 % |
| Pont dalle ou dalle nervurée en béton précontraint | 14,3 % | 25,1 % |
| VIPP | 1,0 % | 3,2 % |
| PRAD | 1,5 % | 2,2 % |
| Poutres caissons en béton précontraint | 1,2 % | 11,5 % |
| Autres poutres sous chaussée ou nervures en béton précontraint | 1,2 % | 3,7 % |
| Autre structure en béton précontraint | 0,1 % | 0,3 % |
| Poutrelles enrobées | 1,6 % | 1,2 % |
| Poutres sous chaussée ou caisson en métal avec dalle participante | 2,1 % | 8,0 % |
| Autre structure mixte | 0,0 % | 0,0 % |
| Poutres sous chaussée/caisson en métal avec dalle orthotrope | 0,1 % | 0,3 % |
| Poutres sous chaussée/caisson en métal avec dalle non participante | 0,3 % | 0,7 % |
| Poutres latérales treillis en métal (+ bow-string) | 0,2 % | 0,4 % |
| Autre structure en métal | 0,2 % | 0,4 % |
| Buse béton | 5,7 % | 2,5 % |
| Buse métallique | 7,4 % | 2,7 % |
| Pont en arc | 0,1 % | 0,5 % |
| Pont suspendu (dont suspendu et haubané) | 0,0 % | 0,3 % |
| Pont à haubans | 0,0 % | 0,2 % |
| Pont à béquilles | 0,1 % | 0,5 % |
| Pont mobile | 0,0 % | 0,0 % |
| Pont provisoire (dont viaduc métallique démontable) | 0,1 % | 0,1 % |
| Autre structure non associée à une famille (matériau) | 0,4 % | 1,2 % |

Tableau 6-1 : typologie des ouvrages en France, en surfaces cumulées
(sources : IQQA 2005, 25 000 ouvrages environ)

Si on raisonne en surfaces cumulées, on voit apparaître une famille nombreuse d'ouvrages très robustes regroupant les cadres, portiques, dalles en béton armé, ponts voûtés en béton et ponts à poutrelles enrobées regroupant 25,6 % des ouvrages (figure 6-2). Les ponts dalles précontraints (avec ou sans nervures) représentent 28,8 % des ouvrages et sont aussi très robustes, avec la difficulté par rapport à la catégorie précédente d'être précontraints, ce qui fait qu'ils sont légèrement plus sensibles. Les ouvrages en maçonnerie, représentant 6,4 % des ouvrages, sont aussi très robustes. Ainsi, 60 % du patrimoine (les trois catégories précédentes) est suffisamment robuste pour ne pas nécessiter d'analyse spécifique. La robustesse s'obtient du fait que la capacité portante est bien distribuée et qu'il n'y a pas de zone de faiblesse.

Les ouvrages à poutres précontraintes ou non (poutres BA, PRAD et VIPP) représentent 9,4 % des ouvrages et sont plus sensibles puisque la capacité portante est concentrée en éléments ponctuels, et ces éléments sont plus faibles dans le sens transversal que longitudinal (ce qui accroît, par exemple, leur sensibilité aux chocs, contrairement aux dalles).

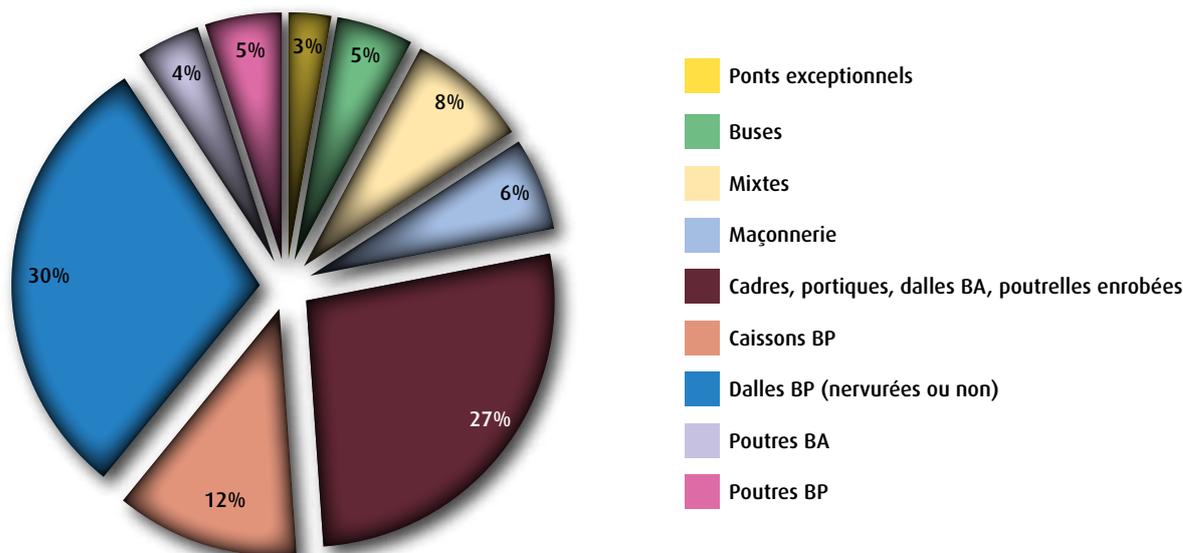


Figure 6-2 : typologie des ouvrages en France, en surfaces cumulées après regroupement par « catégories de robustesse »
(sources : IQOA 2005, 25 000 ouvrages environ)

Le reste des ouvrages est constitué :

- pour 12 % des ponts caissons en béton précontraint qui paraissent robustes mais dont toute la conception est liée au mode de construction et qui, a priori, s'accommodent très mal de situations pour lesquels ils n'ont pas été conçus ;
- pour 8 % des ponts mixtes (bipoutres ou caissons) qui peuvent être relativement vulnérables (bipoutres en particulier) ;
- pour 5 % des buses (béton ou métal) qui ne nécessitent pas d'analyse particulièrement détaillée de robustesse tant la géométrie est simple (les buses métalliques font l'objet d'une analyse de risques spécifique [15]) ;
- pour 3 % de structures plus exceptionnelles (ponts à haubans, suspendus, en arc, bow-strings, ponts orthotropes, ponts mobiles) dont l'étude de la robustesse est indispensable, mais doit se faire au cas par cas ;
- pour le reste, d'ouvrages ne rentrant dans aucune catégorie (moins de 2 %).

6.2.3 - Prise en compte de la robustesse sur les ouvrages actuels

Actuellement, la robustesse est prise en compte sur un certain nombre d'ouvrages sans nommer directement le mot robustesse ou redondance. Plusieurs exemples sont significatifs :

- dimensionnement des ponts à haubans avec un ou plusieurs haubans en moins ;
- dimensionnement en capacité pour le séisme, avec notamment l'exigence que les piles plastifient en flexion, avec une certaine ductilité, bien avant d'atteindre l'effort tranchant limite (qui entraîne une rupture fragile) ;
- chevêtre sur pilettes stable avec une pilette en moins dans le cas des chocs de poids lourds sur appuis de ponts ;
- dans certains cas, redondance de pièces essentielles (tirants) ;
- l'interdiction de faire fonctionner les fondations d'un ouvrage en traction sous charges quasi permanentes va dans le sens d'une certaine redondance (la perte de l'effet favorable du frottement du sol ne doit pas mener à des désordres sous charges permanentes, ce qui veut dire qu'un autre élément prend le relais du sol en cas de besoin) ;
- de manière indirecte, les vérifications de non fragilité de l'EC2 [5] (donc d'un minimum de ductilité) vont dans le sens de la robustesse.

6.3 - Détermination de la robustesse des structures

6.3.1 - Introduction

La présente méthodologie a pour but de quantifier la robustesse (ou inversement la vulnérabilité) d'un ouvrage neuf. Cette méthodologie a un double intérêt puisqu'elle permet d'évaluer un ouvrage ou une famille d'ouvrages (pourvu que leur mode de conception et de dimensionnement soit un minimum standardisé) dans le cadre d'une analyse de risques, ou de comparer des solutions dans une étude préliminaire (cela représente un critère supplémentaire non pris en compte actuellement dans la comparaison des solutions).

L'analyse de la robustesse d'une structure est entachée d'incertitudes. Pour les calculs, ce sont [16] :

- La difficulté d'une bonne modélisation : contrairement aux calculs statiques classiques, on cherche ici à obtenir la résistance réelle de la structure, après qu'un certain nombre de redistributions et de plastifications ont eu lieu. Les effets dynamiques doivent être pris en compte, mais cela devient dans de nombreux cas très difficile si bien qu'une analyse pseudo-statique est souvent menée.
- La difficulté de connaître précisément certaines lois de comportement des matériaux, surtout quand celles-ci ont beaucoup d'influence sur la résistance de l'ouvrage (par exemple, pour le béton, rigidité, retrait et fluage alors que la résistance est mieux appréhendée). Des calculs en fourchette peuvent s'avérer nécessaires et peuvent faire apparaître l'intérêt d'effectuer des essais en laboratoires au-delà de ce qui est classiquement demandé sur les chantiers.
- L'anticipation de l'évolution de la structure dans le temps : lorsque le vieillissement des matériaux peut être appréhendé de manière relativement fiable, il faut en tenir compte dans l'analyse. De même, lorsque des inspections périodiques sont prévues, il faut tenir compte de la période des inspections dans l'évaluation de la robustesse.

6.3.2 - Présentation de l'analyse à mener

L'analyse de robustesse de niveau détaillé, qui se place dans le cadre d'une analyse de risques de niveau détaillé, fait appel à des calculs de structure suivant des scénarios prédéfinis. Ces calculs doivent être suffisamment détaillés, de type étude d'exécution au minimum (ce qui suppose d'avoir défini, au stade du projet, les différentes quantités de matériaux et notamment le ferrailage ce qui n'est pas toujours le cas). Inversement, ils peuvent être nettement plus perfectionnés en prenant en compte le comportement élasto-plastique des matériaux, non linéaire, des structures et les effets dynamiques.

Comme cela a été dit plus haut, l'évaluation de la robustesse et de la vulnérabilité suit à peu près les mêmes principes. En revanche, la robustesse représente une exigence minimale, alors que la vulnérabilité peut être adaptée à l'aléa et à l'enjeu. En d'autres termes, ce qui est à éviter est la disproportion entre la cause et l'effet. Par ailleurs, il n'y a pas d'obligation à ce que les ouvrages soient invulnérables à tous les aléas auxquels ils peuvent être soumis.

6.3.3 - Méthodologie

La méthodologie d'évaluation de la robustesse d'un ouvrage est donnée ci-après. Elle fait appel à un certain nombre d'étapes.

6.3.3.1 - Recueil des données

La première étape est de recueillir toutes les données susceptibles d'être nécessaires pour l'analyse.

Pour un ouvrage neuf non encore construit, il est nécessaire de recueillir :

- les plans et notes de calcul ;
- la description des matériaux ;
- les contrôles à effectuer pendant la phase de chantier ;
- le type de suivi et d'inspection prévue.

Lorsque l'ouvrage est construit, on doit en plus recueillir :

- le compte-rendu des travaux ;
- le point zéro de l'ouvrage ;
- le dossier d'ouvrage.

6.3.3.2 - Détermination de l'état structurel de l'ouvrage

Pour un ouvrage existant, il est également nécessaire de déterminer son état structurel. Les calculs de structure qui sont réalisés et les vérifications qui sont effectuées supposent que la structure de l'ouvrage est intègre. Lorsque l'ouvrage présente des dégradations, il est nécessaire d'introduire une sécurité supplémentaire dans le calcul pour ne pas surestimer la résistance réelle de l'ouvrage.

Le classement IQOA et les inspections détaillées, quand elles sont disponibles, sont un bon moyen de déterminer l'état structurel de l'ouvrage sans visite supplémentaire.



6.3.3.3 - Première analyse structurelle

Cette première analyse suppose une bonne expérience de l'ingénieur. Il s'agit d'identifier une vulnérabilité potentielle élevée à certains aléas de faible intensité (chocs, etc.), à la suppression ou au blocage d'éléments structurels particuliers.

Sélection

Les zones les plus critiques sont a priori :

- les zones d'application d'efforts concentrés (appareils d'appui, mais aussi assemblages ponctuels internes, par exemple, Roissy-terminal 2E...);
- les assemblages structurels non redondants (soudures), les éléments non redondants de petite dimension et leurs assemblages (par exemple, pont I35W à Minneapolis...);
- les câbles de précontrainte, les haubans.

Une démarche plus systématique doit également être menée sur les bases suivantes. Le but est de bien comprendre le cheminement des efforts, de distinguer les éléments qui transmettent la charge et ceux qui assurent le service, qui sont des sécurités supplémentaires, qui ont une autre fonction ou encore ne servent que dans des cas de charge très particuliers (rares a priori, par exemple, contreventement au vent fort, blocages sismiques, éléments assurant la stabilité pendant les phases de construction). On développera donc l'analyse des points suivants :

- hyperstaticité/isostaticité globale ou locale ;
- éléments essentiels assurant la stabilité, éléments constructifs ou faisant la liaison entre les éléments essentiels ;
- éléments essentiels assurant la stabilité globale, éléments assurant la stabilité des éléments essentiels ;
- éléments redondants (quand il y en a) ;
- présence d'éléments ductiles, fragiles (classes d'aciers, type de béton, confinement éventuel, instabilités possibles, classes des sections d'acier de charpente) ;
- les différents éléments de l'analyse simplifiée.

Même lorsque la présente analyse consiste à écrire des évidences, il est tout de même souhaitable qu'elle soit réalisée sérieusement et sans a priori de façon à ne pas passer à côté d'éléments importants.

Il faut ensuite lister les différents éléments sélectionnés et donner des indications sur leur taille, leur coût (approximatif, éventuellement en pourcentage du coût de la structure), la facilité d'inspection, leur facilité de renforcement.

Exemple : du plus petit (un boulon, un raidisseur, une armature, un câble, une diagonale, une poutre...) au plus gros (une pile de pont, une entretoise, un déviateur, une âme en béton, une semelle de poutre métallique, une âme, un morceau de dalle).

Regroupement

On regroupe les éléments par groupes proches ou de conception similaire, susceptibles d'être endommagés de la même manière par une action quelconque.

Commentaire : cette partie est assez délicate sur l'étendue du dommage et la notion de défaillance **locale**, mais elle est indispensable. Elle doit être réalisée par un ingénieur confirmé.

Exemples : âme d'un bipoutre et semelle, série de câbles de précontrainte extérieure passant par le même déviateur, travées adjacentes reposant sur un même appui.

Hiérarchisation

Pour chaque élément ou groupe d'éléments similaires, on analyse qualitativement sans calcul les conséquences de leur disparition, afin de trier entre ceux dont on est sûr qu'ils n'ont aucun impact sur la stabilité, ceux dont on est sûr qu'ils engendrent des désordres majeurs, et ceux dont l'évaluation de l'impact dépend d'un résultat de calcul.

Commentaire : la partie délicate consiste à déterminer les éléments les plus sensibles en faisant appel au jugement de l'ingénieur. En effet, on ne peut pas envisager toutes les ruptures possibles.

Il est à noter que l'expression « disparition de l'élément » doit s'entendre au sens large. Le blocage d'un élément a priori libre de se déplacer correspond à une disparition de l'élément qui assure le libre mouvement. Structurellement, cela se traduit par l'ajout d'un degré de liaison supplémentaire pouvant avoir des conséquences ailleurs. Exemples : blocage d'une rotule (qui devient encastree), blocage d'un appareil d'appui glissant...

Établissement de scénarios de rupture

Une fois l'analyse précédente effectuée, on établit les différents scénarios de rupture envisagés, dans l'ordre, à partir des résultats des étapes précédentes.

L'établissement de scénarios consiste à prendre les différentes ruptures et à les localiser dans des endroits spécifiques, a priori les plus probables ou les plus déterminants pour la structure.

Par exemple, à l'étape précédente, on a défini plusieurs ruptures : semelles de charpente, déviateur de pont en béton précontraint, appui... Il faut maintenant définir plus précisément le lieu exact de la rupture, car plusieurs situations sont possibles, et il n'est pas raisonnable de toutes les évaluer. On considère donc les scénarios qui sont les plus probables (par exemple, les zones situées près des détails de fatigue pour des aciers de charpente, les zones les plus sollicitées comme les sections sur appui ou les mi-travées) ou qui vont conduire à l'effet maximal, à condition que celui-ci soit réaliste (parmi les ruptures de déviateur possibles).

6.3.3.4 - Détermination de la vulnérabilité de l'ouvrage

Les calculs qui vont suivre sont relativement complexes à réaliser. Ils nécessitent soit un logiciel adapté à tous les types de phénomènes à considérer, soit une certaine habileté de l'ingénieur structure à modéliser simplement des phénomènes complexes sur un logiciel simple.

L'usage du logiciel ST1 du Sétra est particulièrement bien adapté à ce type de calcul grâce à son module de pseudo-programmation, et à la possibilité de réaliser des calculs itératifs en modifiant la géométrie et le chargement en fonction des résultats de l'itération précédente.

Pour les éléments qui semblent les plus critiques, on doit calculer l'ouvrage à l'ELU accidentel selon les principes suivants :

- coefficient matériaux correspondant à ceux de l'ELU accidentel : 1,2 pour béton et 1 pour acier (notamment les coefficients correspondant aux instabilités) ;
- ne pas prendre en compte les majorations de superstructures (rechargements de chaussées, caniveaux remplis, etc.) sauf lorsque la situation est avérée ;
- supposer la disparition (rupture) complète de l'élément ou du groupe concerné ;
- prendre une surcharge correspondant à **50 % des charges fréquentes**, placées pour produire approximativement l'effet le plus défavorable vis-à-vis de la localisation de la rupture (on suppose implicitement que la rupture d'un élément ne se produit pas au moment où l'ouvrage est le plus sollicité, ce qui est une hypothèse raisonnable sauf bien entendu si la rupture est la conséquence de cet excès de charge). Il n'y a cependant pas lieu d'optimiser de manière démesurée la position la plus défavorable de la surcharge routière car on se place dans ce calcul dans une hypothèse crédible ;
- vérifier toutes les instabilités possibles, avant d'autoriser les rotules plastiques ou plastifications étendues. Si une instabilité se produit avant plastification de la section, on peut, uniquement dans l'étude de la robustesse et à condition que l'on soit suffisamment éloigné de la charge critique, supposer le comportement élasto-plastique en remplaçant le moment plastique par le moment limite donné par l'Eurocode ;
- autoriser la formation de rotules plastiques ou de plastifications étendues (se référer au paragraphe précédent) ;
- autoriser éventuellement la rupture d'autres éléments de structure (ruptures secondaires) tant que l'équilibre statique est assuré et les déplacements admissibles ;
- prendre en compte le phasage de construction de l'ouvrage, bien que dans de nombreux cas les plastifications successives gommant les effets du phasage de construction ;
- dans le cas de structures en béton armé, prendre en compte sur certaines parties l'inertie fissurée des sections, basée sur une première analyse avec les charges quasi permanentes uniquement.

Si l'on veut être plus précis dans la modélisation, et si les outils le permettent, on peut ajouter les raffinements suivants :

- ajouter les effets du second ordre, de manière directe (si le logiciel le permet) ou par itérations ;
- prendre en compte une loi de comportement réel des sections : utiliser si possible les lois de type Moment/Courbure dans les modèles poutres, ou directement les lois matériaux dans les modèles aux éléments finis volumiques ;
- prendre en compte de manière réelle les effets dynamiques, si le logiciel de calcul le permet.

Après un calcul plus ou moins complexe et plus ou moins non linéaire suivant le degré de raffinement, et après plusieurs itérations de calcul si nécessaire, on peut statuer sur la stabilité ou non de la structure.



Si l'ouvrage est justifié (en termes de contraintes et de déformations avec des coefficients de sécurité matériaux de type « accidentel », mais sans autre rupture ni instabilité des autres éléments que celui endommagé, même après plastifications successives) :

- vérifier que les effets dynamiques des ruptures brutales des éléments ne modifient pas la conclusion : si les éléments les plus sollicités juste après rupture présentent peu de ductilité, on doit considérer l'ouvrage non justifié ou procéder à un calcul dynamique après rupture ;
- dans le cas de l'utilisation de plastifications, vérifier que les déformations maximales atteintes sont admissibles ;
- en cas de déformations importantes, mais acceptables, prendre en compte les effets du second ordre, forfaitairement ou réellement suivant leur importance ;
- refaire le calcul en prenant la totalité des charges fréquentes (ou le pourcentage des charges fréquentes jusqu'à ce que la structure ne puisse plus encaisser de charge supplémentaire).

Commentaire : les effets dynamiques peuvent être simplement pris en compte en multipliant par 2 le delta de contrainte entre la situation avant rupture et après rupture. Cette multiplication par 2 peut être réduite lorsque l'on plastifie certains éléments de la structure, mais que la structure reste hyperstatique, ou au moins isostatique.

Si l'ouvrage n'est pas justifié, réduire les surcharges appliquées (jusqu'à 0). Si l'ouvrage ne supporte pas son poids propre, l'analyse peut être arrêtée, l'ouvrage n'est pas robuste.

Cette partie est la plus difficile à appliquer car elle suppose des calculs nombreux pour toutes les phases successives de détérioration, ainsi qu'une prise en compte des effets dynamiques lors d'une rupture fragile. Il faudra bien évidemment prendre en compte les effets du second ordre (instabilités éventuelles).

Lorsque le critère de rupture de la structure est lié au développement d'une instabilité, il est possible d'aller au-delà, mais il faut dans ce cas envisager une suite après développement de l'instabilité (passage en équilibre « post-flambé » si celui-ci est viable). Cette partie est extrêmement délicate et doit être menée avec la plus grande prudence.

6.3.3.5 - Conclusion sur la robustesse

En fonction des résultats précédents, il convient de définir un niveau de robustesse obtenu en prenant l'enveloppe des différents scénarios de rupture envisagés (fonction de l'élément qui cède, ou fonction de l'augmentation de charge possible sans rupture d'élément), la manière dont la ruine se produit (succession de ruptures fragiles ou bonne ductilité jusqu'à rupture), et le niveau de charge que peut supporter la structure avant effondrement.

Si l'ouvrage supporte seulement son poids propre dans les différents scénarios envisagés, alors sa robustesse est faible. S'il supporte aussi la moitié des charges fréquentes, sa robustesse est moyenne. Enfin, s'il supporte les charges fréquentes, sa robustesse est élevée.

Si l'ouvrage ne résiste pas à son poids propre dans les différents scénarios envisagés, l'ouvrage n'est pas robuste.

Conclusion sur l'ouvrage dans un cadre plus global d'analyse de risques

L'exigence minimale de robustesse que l'on se fixe est une robustesse moyenne. Néanmoins, on peut descendre à une robustesse faible si l'ouvrage présente peu d'enjeu (étant donné qu'il est quand même correctement dimensionné) ou si le mode de rupture est ductile. Dans le cas d'ouvrages stratégiques, il est raisonnable d'imposer une robustesse élevée avec un mode de rupture ductile.

La notion de résistance est à adapter suivant l'importance de l'élément rompu par rapport aux conséquences. Si on envisage, par exemple, des ruptures de piles, il n'est pas raisonnable de demander que la structure résiste de manière intègre.

On peut fixer les exigences de résistance suivantes :

- si l'élément rompu a un coût inférieur à 5 % du coût total de la structure, celle-ci doit résister à l'événement ;
- si l'élément rompu a un coût supérieur et représente x % de la structure, alors la surface de tablier effondrée doit être limitée à x % de la surface totale. Il est possible d'accorder un poids plus important à certaines parties du tablier (au-dessus de voies circulées, d'un cours d'eau) en pondérant la surface en question.

6.3.3.6 - Amélioration de la robustesse

Si l'exigence de robustesse n'est pas satisfaite, la conception doit être repensée pour que :

- les conséquences soient en proportion de l'événement (pas d'effondrement en chaîne, maintien d'une partie de la structure réutilisable dans un projet de réparation/reconstruction) ;
- la rupture de l'élément considéré n'ait pas de conséquence sur le reste de la structure : redondance ou surdimensionnement de l'élément.

Il faut alors définir des mesures à prendre pour augmenter la robustesse. De nombreux exemples de méthodes simples existent : redondance, liaisons hyperstatiques de secours supplémentaires (par exemple ne fonctionnant pas en service normal, mais s'activant en cas de besoin), injection de ductilité (acier ductile, fusibles ductiles, etc.), augmentation des quantités...

On peut aussi définir les mesures à prendre en termes de suivi en fonction de la robustesse : très fort (soit en fréquence, soit en type d'investigation) en cas de niveau de robustesse faible et de ruptures fragiles successives, moins fort si la robustesse est faible mais que la ruine intervient après développement de nombreuses plastifications ductiles.

Toutes les stratégies sont possibles et à définir au cas par cas, en termes de fréquence des inspections détaillées, de niveau de détail de ces inspections, voire en instrumentation permanente (avec alerte en temps réel ou simple récupération d'informations et traitement à intervalles réguliers).

6.3.4 - Aspects probabilistes

La méthode décrite ci-dessus est déterministe au sens où l'on considère l'élément rompu après dépassement d'une limite conventionnelle, considérée connue et figée. En réalité, les limites résistantes ne sont pas les mêmes partout. Des approches probabilistes peuvent être menées mais sont plus délicates en termes de modélisation et de calcul [17].



7 - Applications de l'analyse de risques simplifiée

7.1 - Application à trois projets d'ouvrage neuf

7.1.1 - Introduction

La méthodologie d'analyse de risques simplifiée doit permettre au maître d'ouvrage d'identifier les aléas et les dangers les plus probables relatifs à l'ouvrage étudié. Cette méthode, applicable aussi bien à des ouvrages isolés que sur un patrimoine d'ouvrages, a été mise en œuvre sur trois viaducs en phase de projet⁽¹⁾. Dans le cas d'un projet d'ouvrage, la méthode doit permettre :

- l'identification des différents aléas ;
- la vérification de la conception de l'ouvrage, c'est-à-dire vérifier que pour un aléa fort, le risque est faible ou moyen. En effet si le risque est élevé, la vulnérabilité de l'ouvrage sera moyenne ou élevée vis-à-vis de cet aléa, ce qui correspond à une possible mauvaise conception de l'ouvrage ;
- une mise en lumière de dangers non soupçonnés.

Lors de l'application de la méthodologie à des projets d'ouvrage d'art neuf, les 31 aléas introduits dans le chapitre 3 peuvent s'avérer être sans objet, soit parce que l'aléa n'est pas présent sur le site, soit parce que la structure n'est pas compatible avec ce phénomène (corrosion des aciers de précontrainte sur un ouvrage métallique !). Dans ce cas, l'indication « sans objet » a été introduite sur les aléas ou sur les vulnérabilités correspondantes. Enfin, la grille d'analyse de risques simplifiée étant initialement développée et proposée pour des ouvrages existants, certaines valeurs d'indices ont volontairement été sous-évaluées (niveau faible) pour prendre en compte le fait que l'ouvrage en projet a été dimensionné et sera réalisé selon les règles de l'art.

7.1.2 - Projet du viaduc de Lezennes

Le viaduc de Lezennes; construit entre 2010 et 2011 au titre des aménagements d'accès au futur Grand stade de Lille, permet le franchissement d'un talweg et de trois bretelles routières ayant un fort trafic poids lourds et de matières dangereuses :

- sortie de la RN227 vers A1 (Paris) ;
- sortie de la RN227 vers A23 (Valenciennes) et A27 (Bruxelles) ;
- sortie de la RN227 vers la Cité scientifique de Villeneuve d'Ascq.

Étant donnée la longueur (200 m) et le tracé en plan fortement courbe, l'option caisson mixte acier-béton a été retenue pour cet ouvrage. Cette option permet de satisfaire aussi aux contraintes (phasage des travaux) liée au franchissement des bretelles routières. Ce viaduc est constitué de six travées continues de portées 28-32-40-40-36-28 m, soit une longueur totale de 205,50 m (abouts de 0,75 m inclus). La structure du tablier est composée d'un caisson métallique de 1,30 m de hauteur, connecté à un hourdis en béton armé de 8,65 m de largeur et d'épaisseur constante égale à 25 cm.

Les appuis sont fondés superficiellement sur la craie, sauf la culée C6 et la pile P4 qui sont fondées profondément sur pieux. L'ouvrage supporte une chaussée de 4,25 m (chaussée + surlargeur) correspondant à la desserte d'un parking. Le trafic sur l'ouvrage sera très faible sauf les soirs d'événement ayant lieu au stade (3 000 personnes). Le tablier est calculé et justifié selon les Eurocodes, à l'aide du logiciel OM3 du Sétra.

(1) Une fiche MS-Excel© a été spécialement élaborée pour ces études. Elle est téléchargeable sur la plate-forme Ouvrages d'Art « PILES » du Sétra : <http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/>

Les fondations sont justifiées selon le fascicule 62, titre V, comme le permet la note d'information n° 30 du Sétra de janvier 2008, sur les bases des sollicitations et descentes de charges données par les Eurocodes.

Cet ouvrage n'est a priori soumis à aucun risque naturel particulier, et sa conception en respect avec les Eurocodes lui assure une bonne protection concernant les différents aléas internes d'origine exogènes. Les résultats de l'analyse de risques sont donnés dans le tableau 7-1.

| | | ALÉAS | | VULNÉRABILITÉ | | CRITICITÉ | | CONSÉQUENCES | | RISQUES |
|---|--|------------|-------|---------------|--------|------------|--------|--------------|------------|---------|
| 1- DANGER LIÉ AUX ALÉAS INTERNES D'ORIGINE EXOGÈNES À L'OUVRAGE | Corrosion des armatures passives | faible | | faible | | faible | | Élevés | | faible |
| | Corrosion des aciers de précontrainte intérieure | sans objet | | sans objet | | sans objet | | | sans objet | |
| | Corrosion des aciers de précontrainte extérieure | sans objet | | sans objet | | sans objet | | | sans objet | |
| | Corrosion des aciers de charpente pour une ossature métallique | moyen | | faible | | faible | | | faible | |
| | Fatigue des aciers de charpente pour une ossature métallique | faible | | faible | | faible | | | faible | |
| | Réactions de gonflement interne du béton | faible | | moyen | | faible | | | faible | |
| | Corrosion d'un élément de l'ouvrage | moyen | | faible | | faible | | | faible | |
| 2- DANGER LIÉ AUX ALÉAS INTERNES D'ORIGINE ENDOGÈNES À L'OUVRAGE | Défaut de qualité des matériaux | faible | | faible | | faible | | | faible | |
| | Erreurs de conception/dimensionnement | moyen | | faible | | faible | | | faible | |
| | Erreurs de réalisation | faible | | faible | | faible | | | faible | |
| 3- DANGER LIÉ AUX ALÉAS EXTERNES D'ORIGINE NATURELLE | Séisme | faible | | faible | | faible | | | faible | |
| | Avalanche sur ouvrage | sans objet | | sans objet | | sans objet | | | sans objet | |
| | Affouillement des fondations | sans objet | | sans objet | | sans objet | | | sans objet | |
| | Chute de blocs, rochers sur ouvrage | sans objet | | sans objet | | sans objet | | sans objet | | |
| | Événements géotechniques | faible | + | moyen | = | faible | + | faible | | |
| | Événements hydrauliques | faible | | faible | | faible | | faible | | |
| | Effet de la foudre | faible | | moyen | | faible | | faible | | |
| | Effet du vent | faible | | faible | | faible | | faible | | |
| | Zones naturelles | faible | | faible | | faible | | faible | | |
| | Réchauffement climatique | faible | | faible | | faible | | faible | | |
| Verglas | faible | | moyen | | faible | | faible | | | |
| 4- DANGER LIÉ AUX ALÉAS EXTERNES D'ORIGINE HUMAINE | Incendie sur ouvrage | élevé | | élevé | | élevé | | élevé | | |
| | Choc de poids lourds sur pile ou sur tablier | moyen | | faible | | faible | | faible | | |
| | Choc de bateau | sans objet | | sans objet | | sans objet | | sans objet | | |
| | Chocs divers | sans objet | | sans objet | | sans objet | | sans objet | | |
| | Accidents divers | moyen | | moyen | | moyen | | moyen | | |
| | Effet dynamique des piétons sur une passerelle | sans objet | | sans objet | | sans objet | | sans objet | | |
| | Actions malveillantes | moyen | | moyen | | moyen | | moyen | | |
| | Exploitation de l'ouvrage | moyen | | moyen | | moyen | | moyen | | |
| | Changement d'usage de l'ouvrage | faible | | moyen | | faible | | faible | | |
| | Conditions de surveillance et d'entretien | faible | | faible | | faible | | faible | | |

Tableau 7-1 : grille d'analyse de risques pour le viaduc de Lezennes

L'analyse de risques fait ressortir les résultats suivants :

- le risque lié aux aléas internes (origines exogène et endogène) et aux aléas externes d'origine naturelle est de niveau faible ;
- le risque élevé lié à l'aléa « incendie sous ouvrage » est dû au franchissement par un tablier à ossature mixte de bretelles très circulées avec itinéraire de transport de matières dangereuses ;
- le risque lié aux accidents divers est de niveau moyen du fait de franchissement de voies itinéraires de transport de matières dangereuses et/ou explosives ;
- le risque lié aux actions malveillantes est de niveau moyen, du fait de la présence de surfaces planes très visibles au droit des culées. Ce type de culée provient d'un choix architectural original ;
- le risque lié à l'exploitation de l'ouvrage est de niveau moyen, du fait de la possible congestion du trafic au droit de l'ouvrage lors d'événements ayant lieu au stade.

Les aléas présentant un risque moyen correspondent à des aléas externes d'origines humaines.

7.1.3 - Projet du pont de la rivière Saint-Étienne à la Réunion

La RN1, qui franchit la rivière Saint-Étienne entre les villes de Saint-Louis et Saint-Pierre, constitue un des principaux axes structurants de l'île de la Réunion (27 000 véhicules/j.) qui permet de relier le Nord et le Sud par la façade ouest.

Le 26 février 2007, le passage du cyclone Gamède sur la Réunion s'est accompagné de fortes précipitations. Dans le contexte hydrogéologique du site d'implantation de l'ouvrage, cet épisode a conduit à l'effondrement total du pont aval sur la rivière Saint-Étienne, coupant ainsi la RN1 dans le sens Nord-Sud et provoquant une situation de crise dans la gestion des flux de transport réunionnais.

Des études pour la construction d'un ouvrage neuf pour remplacer l'OA aval détruit ont été engagées, aboutissant fin 2008 à un DCE lancé sur la base de deux solutions : une solution en béton précontraint et une solution en ossature mixte. C'est la solution bipoutre mixte, actuellement en cours de construction, qui a été retenue à l'issue de l'appel d'offres. Le présent test de la méthodologie porte quant à lui sur la solution d'ouvrage en béton précontraint construit par encorbellement successifs.

Parmi les différents aléas et contraintes recensés et pris en compte au cours des différentes phases du projet, ceux qui ont été à l'origine de l'effondrement du précédent ouvrage arrivent évidemment en première position. Il s'agit plus particulièrement des phénomènes hydrogéologiques suivants :

- caractère fortement affouillable des alluvions de la rivière autour des appuis et obstacles ;
- montée en crue extrêmement rapide de la rivière Saint-Étienne ;
- poussée hydrodynamique d'orientation fluctuante (crues torrentielles) associée à des vitesses d'écoulement très importantes (de l'ordre de 12 m/s, soit 43 km/h) et charriage de blocs de grandes dimensions ;
- abaissement progressif du lit (jusqu'à 5 m par événement hydraulique), aggravé par l'extraction de matériaux à l'amont de l'ouvrage.

Au-delà de ces aléas responsables de l'effondrement de l'ouvrage aval, d'autres contraintes ont également impacté assez fortement la conception du nouvel ouvrage. Il s'agit notamment des phénomènes et des aspects suivants :

- sismicité faible selon la nouvelle carte de zonage national ;
- vents violents associés aux phénomènes cycloniques (phases de service et construction) ;
- atmosphère humide de l'île de la Réunion et proximité de la mer ;
- contraintes socio-économiques liées à la pêche des bichiques (alevins de poissons très prisés par la population locale) dans la rivière et poids politique des associations de pêche ;
- présence d'une nappe phréatique profonde et fortes circulations d'eaux dans le sol de fondation ;
- présence d'espèces animales réunionnaises protégées (poissons, crustacés et oiseaux) ;
- présence à proximité d'une usine de sucrerie, d'un aérodrome (servitude aéronautique) et d'un petit temple Tamoul (lieu de prière sacré) ;
- site représentatif des rivières réunionnaises ;
- main d'œuvre et savoir-faire locaux plus ou moins présents et disponibles en fonction des typologies d'ouvrages et matériaux constitutifs retenus (contexte ilien) ;
- tracé routier particulièrement accidentogène ;

- délais très serrés imposés et nécessité de réaliser certaines parties d'ouvrage en dehors des périodes cycloniques (appuis et zone élargie de tablier construite sur cintre).

Les résultats de l'application de la méthode d'analyse de risques sont donnés dans le tableau 7-2. Par rapport aux aléas pressentis et pris en compte lors des différentes phases du projet, l'analyse a confirmé l'importance des aléas extrêmes impactant le site d'implantation de l'ouvrage, et dont certains sont directement à l'origine de l'effondrement de l'ouvrage à remplacer : phénomène d'affouillement, poussée hydrodynamique, vents cycloniques, enjeux environnementaux, exploitation de l'ouvrage... La prise en compte rigoureuse de ces aléas dans le dimensionnement conduit à une réduction efficace des indices de vulnérabilité correspondants (vulnérabilités faibles) et par conséquent des niveaux de criticité associés (criticité moyenne).

Pour cet ouvrage neuf, les niveaux de dangers liés aux aléas internes sont logiquement globalement faibles, les dernières normes et règlements de dimensionnement/réalisation ayant été appliqués. L'analyse confirme néanmoins l'extrême sensibilité de la structure aux erreurs de conception/dimensionnement compte tenu à la fois de la complexité des phénomènes (interaction sol-structure en situation d'affouillement et de forte poussée hydrodynamique), du système de fondations peu classiques retenu (octogone de barrettes jointives, paroi moulée tirantée) et du raffinement des modèles de calculs utilisés pour leur justification. Elle confirme également l'absolue nécessité du suivi et de l'entretien rigoureux de l'ouvrage, en particulier à la suite des épisodes cycloniques pouvant engendrer un abaissement du niveau du lit de la rivière et nécessiter la mise en œuvre des travaux de renforcement prévus (ajout de tirants supplémentaires dans la paroi moule en rive gauche, béton projeté autour des octogones de barrettes découverts).

Les résultats obtenus montrent également que certains phénomènes auraient pu faire l'objet d'une attention plus poussée. C'est le cas en particulier des actions malveillantes (criticité élevée) et à moindre niveau du réchauffement climatique (vulnérabilité moyenne).

Pour cet ouvrage, la matrice « Conséquences » reflète correctement la situation attendue, avec comme on pouvait s'y attendre, un indice socio-économique très élevé traduisant l'importance stratégique de l'ouvrage dans le système d'infrastructures de transports de l'île. Cet indice conduit à une majoration forfaitaire des indices de risques qui se retrouvent par conséquent davantage lissés et sensiblement plus pessimistes que les indices de criticité. Si cette approche de pondération du danger par les enjeux stratégiques pour l'évaluation du risque est globalement pertinente, elle conduit ici, dans le cas d'un ouvrage neuf, à une représentation trop défavorable de certains risques, les efforts et moyens mis œuvre pour minimiser la sensibilité de l'ouvrage (vulnérabilité faible) étant totalement masqués par l'aléa élevé et un niveau de conséquence très élevé.



| | | ALÉAS | VULNÉRABILITÉ | CRITICITÉ | CONSÉQUENCES | RISQUES |
|---|--|----------------------|---------------|-----------|--------------|---------|
| 1- DANGER LIÉ AUX ALÉAS INTERNES D'ORIGINE EXOGÈNES À L'OUVRAGE | Corrosion des armatures passives | moyen | faible | faible | Très élevés | moyen |
| | Corrosion des aciers de précontrainte intérieure | faible | moyen | faible | | moyen |
| | Corrosion des aciers de précontrainte extérieure | faible | moyen | faible | | moyen |
| | Corrosion des aciers de charpente pour une ossature métallique | faible | moyen | faible | | moyen |
| | Fatigue des aciers de charpente pour une ossature métallique | faible | faible | faible | | moyen |
| | Réactions de gonflement interne du béton | faible | moyen | faible | | moyen |
| | Corrosion d'un élément de l'ouvrage | moyen | faible | faible | | moyen |
| 2- DANGER LIÉ AUX ALÉAS INTERNES D'ORIGINE ENDOGÈNES À L'OUVRAGE | Défaut de qualité des matériaux | faible | moyen | faible | | moyen |
| | Erreurs de conception/dimensionnement | élevé | moyen | élevé | | élevé |
| | Erreurs de réalisation | faible | moyen | faible | | moyen |
| 3- DANGER LIÉ AUX ALÉAS EXTERNES D'ORIGINE NATURELLE | Séisme | faible | moyen | faible | | moyen |
| | Avalanche sur ouvrage | faible | faible | faible | | moyen |
| | Affouillement des fondations | élevé | faible | moyen | | élevé |
| | Chute de blocs, rochers sur ouvrage | faible | moyen | faible | | moyen |
| | Événements géotechniques | moyen | moyen | moyen | élevé | |
| | Événements hydrauliques | élevé | faible | moyen | élevé | |
| | Effet de la foudre | moyen | moyen | moyen | élevé | |
| | Effet du vent | élevé | moyen | élevé | élevé | |
| | Zones naturelles | moyen | faible | faible | moyen | |
| | Réchauffement climatique | élevé | moyen | élevé | élevé | |
| | Verglas | faible | faible | faible | moyen | |
| | 4- DANGER LIÉ AUX ALÉAS EXTERNES D'ORIGINE HUMAINE | Incendie sur ouvrage | moyen | moyen | moyen | élevé |
| Choc de poids lourds sur pile ou sur tablier | | faible | moyen | faible | moyen | |
| Choc de bateau | | faible | moyen | faible | moyen | |
| Chocs divers | | moyen | moyen | moyen | élevé | |
| Accidents divers | | moyen | moyen | moyen | élevé | |
| Effet dynamique des piétons sur une passerelle | | faible | faible | faible | moyen | |
| Actions malveillantes | | élevé | moyen | élevé | élevé | |
| Exploitation de l'ouvrage | | moyen | moyen | moyen | élevé | |
| Changement d'usage de l'ouvrage | | moyen | moyen | moyen | élevé | |
| Conditions de surveillance et d'entretien | | moyen | faible | faible | moyen | |

Tableau 7-2 : grille d'analyse de risques pour le pont de la rivière Saint-Étienne à la Réunion

7.1.4 - Projet du pont de la Tardoire sur la RN141

Ce bipoutre mixte, à deux travées de 85 m de long; franchit la Tardoire, un sous-affluent de la Charente, et est situé dans une zone géologique réputée pour sa morphologie karstique. Peu avant le début du projet, un effondrement majeur à proximité de l'ouvrage a de nouveau mis en évidence la vulnérabilité du site face aux mouvements de terrain d'origine karstique. Ces phénomènes ont conduit à réaliser des études géotechniques plus poussées concernant l'aléa karstique, au terme desquelles la prise en compte de ce phénomène à la conception de l'ouvrage est devenue prioritaire.

Les principales répercussions ont concerné les appuis (une semelle pour les deux tabliers, dimensions suffisantes pour reprendre une remontée de fontis de 15 m de diamètre).

Deux contraintes particulières ont alors été identifiées pour cet ouvrage : l'aléa hydraulique et l'aléa géotechnique (karstique). Le premier aléa fait partie intégrante de l'ouvrage puisque la fonction du pont est de franchir la rivière de la Tardoire en assurant un débouché hydraulique de 50 m de large. Ce besoin a été déterminé par une étude

hydraulique. Le second aléa, l'aléa karstique, représente cependant la contrainte majeure sur l'ouvrage. Les résultats de l'application de la méthode d'analyse de risques sont donnés dans le tableau 7-3.

| | | ALÉAS | VULNÉRABILITÉ | CRITICITÉ | CONSEQUENCES | RISQUES | |
|---|--|--------|---------------|-----------|--------------|---------|--------|
| 1- DANGER LIÉ AUX ALÉAS INTERNES D'ORIGINE EXOGÈNES À L'OUVRAGE | Corrosion des armatures passives | faible | moyen | faible | Élevés | faible | |
| | Corrosion des aciers de précontrainte intérieure | faible | moyen | faible | | faible | |
| | Corrosion des aciers de précontrainte extérieure | faible | moyen | faible | | faible | |
| | Corrosion des aciers de charpente pour une ossature métallique | moyen | faible | faible | | faible | |
| | Fatigue des aciers de charpente pour une ossature métallique | faible | moyen | faible | | faible | |
| | Réactions de gonflement interne du béton | faible | moyen | faible | | faible | |
| | Corrosion d'un élément de l'ouvrage | moyen | moyen | moyen | | moyen | |
| 2- DANGER LIÉ AUX ALÉAS INTERNES D'ORIGINE ENDOGÈNES À L'OUVRAGE | Défaut de qualité des matériaux | faible | faible | faible | | faible | |
| | Erreurs de conception/dimensionnement | élevé | moyen | élevé | | élevé | |
| | Erreurs de réalisation | moyen | faible | faible | | faible | |
| 3- DANGER LIÉ AUX ALÉAS EXTERNES D'ORIGINE NATURELLE | Séisme | faible | moyen | faible | | Élevés | faible |
| | Avalanche sur ouvrage | faible | moyen | faible | | | faible |
| | Affouillement des fondations | moyen | moyen | moyen | | | moyen |
| | Chute de blocs, rochers sur ouvrage | faible | élevé | moyen | | | moyen |
| | Événements géotechniques | élevé | faible | moyen | moyen | | |
| | Événements hydrauliques | moyen | moyen | moyen | moyen | | |
| | Effet de la foudre | faible | élevé | moyen | moyen | | |
| | Effet du vent | faible | faible | faible | faible | | |
| | Zones naturelles | faible | moyen | faible | faible | | |
| | Réchauffement climatique | moyen | moyen | moyen | moyen | | |
| | Verglas | faible | moyen | faible | faible | | |
| 4- DANGER LIÉ AUX ALÉAS EXTERNES D'ORIGINE HUMAINE | Incendie sur ouvrage | moyen | moyen | moyen | moyen | | |
| | Choc de poids lourds sur pile ou sur tablier | faible | moyen | faible | faible | | |
| | Choc de bateau | faible | moyen | faible | faible | | |
| | Chocs divers | faible | faible | faible | faible | | |
| | Accidents divers | moyen | faible | faible | faible | | |
| | Effet dynamique des piétons sur une passerelle | faible | faible | faible | faible | | |
| | Actions malveillantes | moyen | moyen | moyen | moyen | | |
| | Exploitation de l'ouvrage | moyen | faible | faible | faible | | |
| | Changement d'usage de l'ouvrage | moyen | moyen | moyen | moyen | | |
| | Conditions de surveillance et d'entretien | faible | faible | faible | faible | | |

Tableau 7-3 : grille d'analyse de risques pour le pont de la Tardoire

Le premier constat concernant cet ouvrage, neuf et réalisé selon les prescriptions des Eurocodes, est qu'il ne présente pas de risque vis-à-vis des aléas les plus courants. Les risques moyens correspondent à des critères que l'on peut classer en plusieurs catégories :

- les critères qui ne sont pas pris en compte dans le projet : c'est le cas des incendies ou des actes de malveillance ;
- les critères qui correspondent aux contraintes majeures du site : dans ce cas, il s'agit des problèmes hydrauliques/ affouillement, ainsi que, bien sûr, les événements géotechniques. Le fait que le risque soit moyen indique notamment que l'aléa est important. Dans le cas des problèmes karstiques, ce niveau indique que l'aléa était problématique et qu'il a été traité de façon à limiter le risque au maximum (vulnérabilité faible) ;
- les critères pour lesquels il faut prendre du recul sur la méthode (critères « sans objet » concernant les deux études précédentes). Dans le cas de la foudre ou des chutes de bloc, par exemple, il n'y a pas de risque puisque l'aléa n'est pas présent. Pour autant, la vulnérabilité vis-à-vis de ces critères est forcément mauvaise, le fichier renvoie donc une valeur de risque moyenne.

Enfin, le risque est élevé par rapport au critère « Erreurs de conception/dimensionnement ». Le risque correspond ici à l'absence réglementaire vis-à-vis du traitement du risque karstique : les choix qui ont été faits pour modéliser le phénomène et les critères de justification qui ont été retenus (critère de vulnérabilité des fondations) comportent des hypothèses simplificatrices qui influencent ces résultats. En effet, dans le cas général, les fondations profondes s'avèrent plus robustes que les fondations superficielles, mais compte tenu du contexte karstique, c'est le contraire car les fondations profondes risquent de déstabiliser un horizon calcaire déjà fragilisé. La robustesse est amenée par les (sur)dimensions des semelles. Il ne faut alors pas hésiter à modifier les sous-critères ou forcer des valeurs de façon à ce que la valeur globale soit cohérente.

7.1.5 - Bilan sur l'application de la méthode

La méthodologie d'analyse de risques développée dans ce guide permet l'évaluation, pour un ouvrage donné, des risques encourus par ce dernier. Initialement développée pour l'évaluation d'ouvrages existant, comme le montrent les trois applications précédentes, la méthodologie est aussi applicable en phase de projet, afin de permettre au maître d'ouvrage et au maître d'œuvre un certain contrôle sur les différentes phases.

L'identification des aléas, ainsi que le contrôle de la bonne conception et du bon dimensionnement de l'ouvrage vis-à-vis des contraintes auxquelles il sera exposée, est la première utilisation de l'analyse de risques en phase de projet. Elle permet au maître d'œuvre de s'assurer que tous les éléments ont bien été pris en compte lors de la réalisation du projet. Le retour de ces trois études montre cependant qu'une connaissance approfondie de l'ouvrage et du projet, accompagnée de la plus grande objectivité, est nécessaire afin d'obtenir une analyse pertinente. Il est donc conseillé de faire réaliser l'analyse par un « ouvrier » chevronné (pouvant facilement maîtriser les différents éléments du projet) extérieur au projet.

L'utilisation de l'analyse de risques en phase de projet vise également l'évaluation des risques futurs encourus par l'ouvrage. Cela concerne principalement les risques durant l'exploitation de l'ouvrage, tels que le risque incendie pour les ponts mixtes. Finalement, l'analyse de risques doit être considérée comme un outil d'aide à la décision pour le maître d'ouvrage, qui se doit de conserver un jugement critique sur certains résultats. Il faut ajouter à cela que certains critères peuvent être modifiés ou complétés en fonction de l'expérience de chacun, de manière à rendre l'outil plus complet.

7.2 - Application de l'analyse de risques aux VIPP

L'analyse de risques est à envisager de manière systématique pour les familles d'ouvrages dont les pathologies connues sont susceptibles d'entraîner des préjudices élevés, quand les conséquences humaines ou économiques sont jugées inacceptables. Il s'agit de structures fragilisées, présentant des risques de ruptures brutales (partielles ou totales) en raison de leur conception ou de leurs conditions d'exploitation. Plusieurs familles d'ouvrages ont été identifiées comme étant susceptibles de connaître des ruptures brutales (partielles ou totales) avec des conséquences sociales ou économiques inacceptables. Il s'agit des massifs de Terre Armée, des buses métalliques [15], des ponts dits « affouillables » [18] et des viaducs à travées indépendantes à poutres préfabriquées en béton précontraint par post-tension (VIPP) [19]. L'évaluation des enjeux est dans un premier temps globale, sans tenir compte du contexte de chaque ouvrage. Les ouvrages d'une famille sont alors classés suivant une matrice de criticité, croisant les aléas et la vulnérabilité. Après cette hiérarchisation, il peut s'avérer nécessaire d'analyser plus en détail les risques des ouvrages les plus critiques. Cette seconde étape s'applique, à chaque ouvrage, avec un niveau détaillé d'analyse de la vulnérabilité justifiant un recalcul détaillé ou un recueil de données complémentaires, des auscultations ou des essais.

À ce jour, des analyses de risques simplifiées sont en développement ou en cours d'application pour chacune de ces familles. L'étude des risques porte de manière détaillée sur ces aléas internes, connus (conception, exploitation) et s'appuie sur une quantification simplifiée ou sur l'expérience (bibliographie, essais, incidents) pour apprécier leur vulnérabilité. Parmi ces familles d'ouvrages, l'analyse du patrimoine VIPP est le plus abouti et est présenté succinctement dans ce rapport.

7.2.1 - Problématique

La construction de VIPP a été fortement utilisée après la Seconde guerre mondiale, dans la période allant de 1955 à 1970, grâce à son absence de cintre et son lancement de poutres préfabriquées qui permettait le franchissement d'obstacles non courants et de hauteur raisonnable (10 à 25 m au-dessus du sol). Ces travées indépendantes étaient utilisées dans une gamme de portée variant entre 30 et 50 m, voire exceptionnellement plus de 60 m (cas des ponts

de Saint-Waast à Valenciennes et pont de l'Hippodrome à Lille, construits entre 1947 et 1951). De nos jours, cette technique n'est quasiment plus utilisée car elle est fortement concurrencée par d'autres techniques de construction qui permettent de réaliser des ouvrages hyperstatiques qui sont plus économiques et présentent une plus grande sécurité vis-à-vis de la rupture (ponts poussés, encorbellement, cintre auto-lanceur...).

L'enthousiasme qui régnait à l'époque de la construction des ouvrages de première génération s'est traduit par une foi aveugle en la précontrainte totale (absence de fissuration), et par une croyance en la parfaite étanchéité d'un béton comprimé. Il est fréquent dans les anciens ponts à poutre que des fissures longitudinales suivent le tracé des câbles dans les âmes et dans les talons des poutres. Ces fissures naissent près des ancrages et se propagent au moment de la mise en tension des câbles, puis se stabilisent avec le temps. Si d'un point de vue structural, ces fissures ne présentent pas de risque particulier, du point de vue de la durabilité, elles peuvent en revanche constituer des chemins préférentiels pour la circulation de l'eau à l'intérieur de toute la structure. Il est d'ailleurs assez fréquent d'observer des efflorescences le long de certaines de ces fissures. En outre, lorsque les systèmes d'évacuation des eaux conduisent à arroser le parement des poutres de rives, ces fissures constituent des points d'entrée pour l'eau [20].

Les défauts de conception concernent donc principalement des choix de dispositions constructives ou de techniques inadaptés, et le choix de matériaux peu durables. Les défauts d'exécution susceptibles de provoquer la corrosion des armatures de précontrainte se rencontrent malheureusement assez fréquemment. Les deux principaux défauts responsables de la corrosion sont la mauvaise mise en œuvre de la chape d'étanchéité et la mauvaise injection des conduits de précontrainte. À ces défauts s'ajoute la mauvaise réalisation des cachetages aux abouts de poutres, des cachetages en extradors et des cachetages de la précontrainte transversale sur les rives de la dalle et des entretoises. Les cachetages aux abouts des poutres sont particulièrement vulnérables car ils sont souvent arrosés par l'eau qui passe à travers les joints de chaussées non étanches.

Enfin, l'absence d'une politique d'inspection des ouvrages d'art pendant les 30 années qui ont suivi la fin de la Seconde guerre mondiale, et la non-réalisation des actions correctives qui auraient dû être ensuite appliquées pour rétablir l'étanchéité des ouvrages, constituent les deux défauts majeurs de maintenance vis-à-vis de la corrosion. Les rechargements abusifs de la chaussée effectués sans se soucier de l'état de la chape d'étanchéité, la non-remise en état des dispositifs d'évacuation des eaux (débouchage des gargouilles obstruées), la non-intervention pour éviter que l'eau passant à travers les joints de chaussées ne vienne couler sur les cachetages d'about, sont autant de défauts de maintenance qui ont favorisé le développement de la corrosion des câbles. À cela s'ajoutent les conditions d'exploitation des ouvrages qui ont engendré une utilisation croissante de sels de déverglaçage qui ont pu accroître l'agressivité des eaux qui s'infiltrèrent au sein de la structure.

L'ensemble des VIPP du réseau routier national a fait l'objet en 2009 d'une analyse de risques suivant la méthodologie mise au point par le réseau technique (IFSTTAR, CETE) et appliquée en 2006 au réseau autoroutier concédé, pour le compte de l'ASFA [21]. Cette analyse de risques spécifique a fait l'objet d'une publication particulière [19] qui détaille la cotation des aléas et le calcul de la vulnérabilité. Ce document précise également les actions à mener selon l'appartenance d'un ouvrage à chaque niveau de risque. 117 ouvrages ont été répertoriés pour un âge moyen de 36 ans. Parmi ce patrimoine, 27 ouvrages n'ont pas encore été évalués en raison de l'absence de données sur les diagrammes de précontrainte (les plans de ferrailage s'avèrent être nécessaires à l'étude).

7.2.2 - Identification des aléas

L'étude des aléas cherche d'une part à identifier les facteurs ou les événements susceptibles de réduire la performance d'un ouvrage, et d'autre part à les créditer d'une note en fonction de critères préétablis. Ces notes qualifient la manifestation des aléas (croisement de l'intensité de l'aléa avec sa probabilité d'occurrence). Pour hiérarchiser ces manifestations des aléas, il a été proposé de considérer qu'un ouvrage construit avec les règlements de charge et de calculs actuels, avec une conception moderne avec hourdis général non précontraint, induit des manifestations très faibles, hors défaut de conception ou d'exécution inhérent à tout ouvrage. Une conception générant une manifestation de ces aléas très faible reçoit la note zéro. À partir de cet état de référence, tout aléa est en principe évalué sur une échelle comportant quatre niveaux de critères allant de +1 à +4 selon le tableau 7-4. Certains facteurs ont une notation plus étendue, c'est notamment le cas des facteurs « État de la précontrainte » et « Notation IQQA » qui présentent des niveaux plus étendus. Enfin, des améliorations apportées sur l'ouvrage peuvent améliorer la performance de ces derniers, ce qui a conduit à retenir des notes négatives.

L'identification des aléas et la prise en compte de leurs manifestations met en évidence les thèmes sensibles comme la conception générale, l'exécution, l'exploitation et l'entretien, ainsi que l'environnement. Il convient de souligner que la résistance des ouvrages est directement déterminée par leur précontrainte, ce qui justifie un thème à part entière.

La **Conception générale** des VIPP de première génération est nettement moins satisfaisante que la conception actuelle du fait de reprises de bétonnage longitudinales au droit des poutres, de la faiblesse du ferrailage passif, d'âmes trop fines et de l'absence de dalle de continuité. La date de construction est par elle-même un critère important (première génération, armatures susceptibles à la corrosion sous tension...). Les facteurs qualitatifs suivants ont été retenus pour caractériser la conception générale d'un ouvrage :

- pont avec hourdis général ou hourdis intermédiaire ;
- pont avec précontrainte transversale ou sans précontrainte transversale ;
- présence ou non d'un ferrailage passif substantiel d'effort tranchant dans les poutres ;
- présence ou non d'un ferrailage passif substantiel dans le hourdis ;
- épaisseur de l'âme dans la section proche de l'appui à $h/2$;
- épaisseur de l'âme en section courante ;
- présence de dalles de continuité qui permettent d'éviter les infiltrations d'eau sur les appuis intermédiaires ;
- présence ou non d'entretoises intermédiaires ;
- nombre de poutres (si l'ouvrage comporte peu de poutres, la faible redondance des poutres porteuses augmente la gravité des conséquences pour l'ouvrage, des désordres apparaissant sur une poutre) ;
- qualité du recueil des eaux ;
- piles marteaux avec chevêtre précontraint ;
- absence et/ou type d'étanchéité : les premiers VIPP ont été réalisés sans étanchéité ou seulement avec un renformis ciment (du fait de la compression de la dalle).

L'analyse de ces facteurs a conduit à retenir des critères spécifiques associés à des notes de gravité [19] décrites ci-après.

La **Précontrainte** a fait l'objet de deux thèmes d'analyse spécifiques. La corrosion des câbles de précontrainte est en effet le souci premier sur les VIPP, comme pour tous les ouvrages précontraints. Il faut pouvoir caractériser la bonne protection des câbles (étanchéité, injection) ainsi que le risque de corrosion fissurante sous tension. La présence de câbles relevés et ancrés dans le hourdis est une particularité dommageable pour la durabilité des VIPP. L'époque de la précontrainte gouverne pour beaucoup le risque du fait de la nature de l'acier utilisé (acier tréfilé ou non), des gaines, des produits d'injection et des règlements. Le sous-thème **Précontrainte initiale** tient compte des évolutions réglementaires, tant sur les charges routières à prendre en compte, que sur le travail des matériaux, car elles influent sur la quantité de précontrainte mise en œuvre et donc sur le coefficient de sécurité réel de l'ouvrage. C'est pourquoi les facteurs suivants ont été retenus :

- précontrainte calculée avant l'IP1 (1965), entre l'IP1 et le BPEL1983, après le BPEL 1983 ;
- pont construit avant le règlement de charge de 1960, entre 1960 et 1971 ou après 1971 (pour la flexion locale).

L'**État de la précontrainte** est un deuxième sous-thème au rôle important, caractérisé par les critères suivants :

- état apparent de la précontrainte (non corrodée, peu corrodée, assez corrodée, très corrodée) appréciée sur la zone la plus dégradée de l'ouvrage ;
- injection des conduits (état de remplissage des conduits) ;
- état apparent du béton d'enrobage ;
- gestion de l'étanchéité durant de la vie de l'ouvrage ;
- présence ou non d'une dalle de continuité entre deux travées ;
- utilisation ou non de sels de déverglaçage.

Les trois derniers facteurs ne sont pas traités dans ce sous-thème mais dans les facteurs de risques liés à l'**Entretien**, la **Conception générale** et à l'**Environnement**.

Les phases de chantier jouent un rôle primordial dans la bonne durabilité des ouvrages. L'examen des dossiers d'archives doit permettre de mettre en évidence les incidents de chantier dont on peut craindre qu'ils réduisent la durée de vie de la précontrainte. Ceci se traduit, pour le thème **Construction**, en critères du type :

- problèmes de chantier significatifs relatifs au béton (nid de cailloux, résistance) ;
- problèmes de chantier significatifs relatifs à la précontrainte (mise en tension, injection) ;
- problèmes signalés lors des épreuves.

Une note de 0 à 4 est laissée à l'appréciation du notateur.

Au cours de la vie de l'ouvrage, le gestionnaire est responsable de nombreuses interventions qui doivent garantir la bonne durée de vie de l'ouvrage. Constituant le thème **Entretien**, ces éléments doivent être appréciés à partir de l'examen du dossier d'entretien de l'ouvrage et des rapports de visite sur toute la vie de l'ouvrage :

- entretien du recueil des eaux ;
- entretien de l'étanchéité ;
- rechargement de chaussée ;
- attelage des travées postérieur à la construction ;
- travaux de réparation ou d'amélioration.

Le gestionnaire a pu améliorer, maintenir ou dégrader l'état initial de l'ouvrage, ce qui explique que des notes négatives ont été retenues, traduisant une amélioration (par exemple, création de travées d'attelage).

L'**Environnement** de l'ouvrage occasionne des agressions, par des agents chimiques comme les chlorures, qui engendrent des phénomènes de dégradation des bétons et des aciers. Les critères retenus pour caractériser la sensibilité d'un ouvrage sont :

- qualité du recueil des eaux (ruissellement sur les poutres latérales ou les abouts) ;
- importance des sels de déverglaçage (carte des zones de salage) ;
- sites industriels chimiques ;
- proximité de la mer (distance < 1 km).

Les inspections régulières des ouvrages permettent d'évaluer l'**État général actuel** des ouvrages. Les recommandations du ministère de l'Équipement pour l'évaluation de son patrimoine ont été appliquées, en donnant la note IQOA. Si l'ouvrage a fait l'objet d'un diagnostic particulier, son état a également été évalué à partir des rapports fournis.

La note générale de l'ouvrage est obtenue à partir des notes de gravité des facteurs identifiés dans les paragraphes précédents, ceci avec un système de pondération. Les principales difficultés de la classification résident dans la multiplicité des indicateurs, dans le fait que les phénomènes que ces indicateurs révèlent ne sont pas indépendants les uns des autres et dans le fait qu'ils ne sont pas indépendants. Ainsi, un ouvrage peut être notablement « malade » sans relever pour autant des 2/3 des critères, et ce n'est pas parce qu'il n'est pas au bord de la mer que de simple fait son état s'améliore. Il a été convenu de rapporter la note de l'ouvrage à une valeur « critique » qui caractérise un ouvrage en très mauvais état, ceci par thème. Suite à des tests effectués sur une dizaine d'ouvrages, un choix de notes de pondération par thème a été proposé et retenu, ce qui conduit à classer les ouvrages en cinq classes de risques (tableau 7-4). Le tableau 7-5 donne la répartition en pourcentage des ouvrages par classes d'aléas.

| Classification des ouvrages | Note |
|-----------------------------|---------|
| Aléas faibles | 0 à 20 |
| Aléas modérés | 20 à 40 |
| Aléas assez élevés | 40 à 60 |
| Aléas élevés | 60 à 80 |
| Aléas très élevés | > 80 |

Tableau 7-4 : indicateur qualitatif global d'aléas d'un ouvrage

Les ouvrages sont en majorité dans la classe d'aléas « Assez élevée ». La pertinence de l'analyse repose sur une bonne connaissance des facteurs qui forment chacun des thèmes ; malheureusement, cela n'est pas toujours le cas. L'absence de données (ou d'information) doit être palliée par des notes par défaut.

| Classes d'aléas | Faible | Modérée | Assez élevée | Élevée | Très élevée |
|-----------------|--------|---------|--------------|--------|-------------|
| | 10,4 % | 37,6 % | 48,1 % | 3,9 % | 0 % |

Tableau 7-5 : répartition par classes d'aléas

7.2.3 - Étude de la vulnérabilité

7.2.3.1 - Principe de l'analyse

L'objectif est d'apprécier la robustesse d'un ouvrage par une méthode pertinente pour décrire son fonctionnement sur la base de calculs simples. La quantification de cette robustesse repose sur un indicateur générique :

$$I = \frac{\text{Résistance}}{\text{Sollicitation}}$$

Cet indicateur est évalué pour un ouvrage exploité dans sa configuration d'origine, dans sa situation actuelle, puis avec une chaussée réduite. L'évolution des indicateurs est estimée pour des situations dégradées (pertes de câbles de précontrainte supposées ou effectives selon le recensement des données) ou pour des trafics limités en tonnage.

La méthodologie consiste, grâce à un calcul simplifié mais réaliste de l'ouvrage, à approcher le fonctionnement réel de l'ouvrage. Les effets des actions, fixes ou variables, sont approchés le plus finement possible à partir de calculs détaillés ci-après par partie d'ouvrage (poutres, hourdis, piles marteaux), de manière à garantir que le modèle simplifié approche le fonctionnement complexe avec un écart inférieur à 10 %.

Du fait de la complexité d'un ouvrage de type VIPP, un seul indicateur ne peut résumer le fonctionnement de l'ouvrage. C'est pourquoi, il convient de rechercher les éléments particuliers remarquables qui concourent à la sécurité structurale de l'ouvrage. Pour un VIPP, il s'agit de la résistance du hourdis qui reçoit les charges routières, de la résistance des poutres longitudinales porteuses, puis de la résistance des appuis. Pour les poutres, qui sont isostatiques, on considère qu'une bonne évaluation de leur résistance consiste à contrôler leur résistance en flexion à mi-travée et leur résistance à l'effort tranchant sur appui. Les indicateurs ne sont d'ailleurs évalués que pour une poutre de référence faisant partie d'un tablier de référence. Ces indicateurs ne peuvent évidemment, à eux seuls, traduire la capacité portante réelle de l'ouvrage qui n'est accessible, pour un ouvrage complexe construit par phases et avec de la précontrainte, que par un recalcul complet, poutre par poutre et à la condition de pouvoir disposer d'informations réalistes sur la tension des armatures de précontrainte. Ils forment un outil mis à la disposition d'un gestionnaire pour évaluer de manière grossière le niveau de service intrinsèque de ses ouvrages, mais surtout pour pouvoir hiérarchiser le niveau de service des ouvrages entre eux afin de mettre en place une politique de gestion et de maintenance du patrimoine homogène et pertinente.

Les indicateurs de robustesse effectuent la comparaison des efforts résistants par rapport aux efforts sollicitants. Plus l'indicateur est élevé, plus la partie d'ouvrage présente une résistance importante eu égard à la situation de service examinée (type de charge, type de règlement, conditions d'exploitation). L'évaluation des indicateurs procède de calculs comparant ainsi les effets sollicitants qui ne dépendent que des conditions d'exploitation de l'ouvrage, aux effets résistants qui ne dépendent que des caractéristiques de résistance intrinsèques des matériaux constitutifs de l'ouvrage et de leur disposition dans l'ouvrage. Dans le cas des structures précontraintes, l'effet résistant est très fortement lié à l'intégrité de la précontrainte. Or, l'accès à cette donnée fondamentale demeure très difficile. Les indicateurs évalués pour différentes situations d'exploitation fournissent une appréciation de l'adéquation du dimensionnement de la partie d'ouvrage considérée avec ces situations d'exploitation, pour l'hypothèse d'une précontrainte intègre.

Les indicateurs proposés portent sur la flexion des poutres (ELS, ELU), l'effort tranchant des poutres (ELS, ELU), la flexion des hourdis (ELS, ELU) et la flexion des piles marteaux (ELS, ELU).

7.2.3.2 - Notion de valeur critique de précontrainte

Des hypothèses sur une diminution de l'effort de précontrainte permettent de mettre en évidence la marge disponible sur la précontrainte et nous avons défini la notion de valeur critique de la précontrainte, telle que l'indicateur atteint exactement une valeur limite jugée pertinente. Un indicateur défavorable (inférieur à l'indicateur limite) démontre la probable insuffisance de dimensionnement et l'existence d'un risque sur la pérennité ou le bon usage de l'ouvrage (indicateur de type ELS) ou de sécurité de l'ouvrage (indicateur de type ELU).

Un indicateur favorable démontre seulement que le dimensionnement est satisfaisant pour la précontrainte supposée intègre. L'absence de risque couvrant les critères de service ou ultimes ne peut être démontrée qu'à la condition d'être certain que la précontrainte est intègre, ce qui nécessite des investigations le confirmant, l'absence de signes visibles de désordres n'étant pas suffisante de ce point de vue.

Les **indicateurs à la rupture** ou à **l'état limite ultime** (ELU) de résistance selon la terminologie des règlements aux contraintes limites anciens ou aux états limites actuels sont établis de la façon suivante :

- l'effet sollicitant est évalué par combinaisons d'actions conformément au règlement de béton précontraint utilisé (IP1 ou BPEL) ;
- l'effet résistant est évalué SANS coefficient de sécurité sur les matériaux.

L'indicateur représente donc la limite *physique* de résistance de la partie d'ouvrage concernée. Conformément aux usages actuels sur les coefficients de sécurité relatifs aux armatures en acier (aciers passifs comme aciers de précontrainte), nous proposons de fixer à 1,15 la valeur limite de l'indicateur à l'ELU. Les coefficients de sécurité vis-à-vis des actions ou des modèles n'ont pas été modifiés. Cette présentation est tout à fait adaptée à la capacité en flexion des poutres ou du hourdis où l'indice est pratiquement proportionnel à la quantité de précontrainte. En effet, l'indice est le rapport de la capacité portante (apportée principalement par la précontrainte) sur l'effort sollicitant indépendant de la précontrainte. Aussi, on peut décliner l'indice en fonction du pourcentage de précontrainte par rapport à la précontrainte initiale nécessaire pour obtenir l'indice de base 1,15 (la valeur de 1,15 correspond au coefficient de sécurité à la rupture des aciers passifs et de précontrainte).

| État de l'ouvrage | Niveau de vulnérabilité | Indice | Pourcentage de précontrainte nécessaire/précontrainte initiale |
|---|-------------------------|-------------------|--|
| Ouvrage robuste | 1 | $I > 1,25$ | $p < 90 \%$ |
| Probablement conforme à un dimensionnement moderne actuel | 2 | $1,15 < I < 1,25$ | $90 \% < p < 100 \%$ |
| Probablement légèrement sous-dimensionné, mais présentant une capacité physique à supporter les charges | 3 | $1,00 < I < 1,15$ | $100 \% < p < 115 \%$ |
| Sous-dimensionné et probablement inapte réglementairement à supporter les charges | 4 | $0,85 < I < 1,00$ | $115 \% < p < 130 \%$ |
| Sous-dimensionné et inapte réglementairement à supporter les charges | 5 | $I < 0,85$ | $p > 130 \%$ |

Tableau 7-6 : classification de l'état de l'ouvrage en fonction du pourcentage de précontrainte (ELU)

| État de l'ouvrage | Niveau de vulnérabilité | Indice | Pourcentage d'aciers passifs nécessaire/aciers passifs existants |
|---|-------------------------|-------------------|--|
| Ouvrage robuste | 1 | $I > 1,25$ | $a < 90 \%$ |
| Probablement conforme à un dimensionnement moderne actuel | 2 | $1,15 < I < 1,25$ | $90 \% < a < 100 \%$ |
| Probablement légèrement sous-dimensionné, mais présentant une capacité physique à supporter les charges | 3 | $1,00 < I < 1,15$ | $100 \% < a < 115 \%$ |
| Sous-dimensionné et probablement inapte réglementairement à supporter les charges | 4 | $0,85 < I < 1,00$ | $115 \% < a < 130 \%$ |
| Sous-dimensionné et inapte réglementairement à supporter les charges | 5 | $I < 0,85$ | $a > 130 \%$ |

Tableau 7-7 : classification de l'état de l'ouvrage en fonction du pourcentage de d'aciers passifs (ELU)

La valeur de la précontrainte correspondant à la valeur limite de l'indicateur est appelée « précontrainte critique » et permet de définir cinq classes de vulnérabilité (tableau 7-6) Il paraît plus pertinent, pour les parties d'ouvrage où la précontrainte intervient à la fois sur les efforts sollicitants et sur la résistance (cas de l'effort tranchant), de classer les ouvrages directement sur le pourcentage de précontrainte nécessaire pour vérifier l'indice et on propose donc, de façon générale, de raisonner à partir des pourcentages de précontrainte.

Pour les hourdis en béton armé, on peut définir les classes de vulnérabilité à partir du rapport de la section d'armatures passives nécessaires pour atteindre la criticité sur la section existante (tableau 7-7).

Les **indicateurs en service** ou à **l'état limite de service** (ELS) de résistance selon la terminologie des règlements aux contraintes limites anciens ou aux états limites actuels sont établis de la façon suivante :

- l'effet sollicitant est évalué par combinaisons d'actions conformément au règlement de béton précontraint utilisé (IP1 ou BPEL) ;
- la justification consiste à évaluer l'effet de la sollicitation sur une donnée limite de type contrainte. Le niveau de service requis n'apparaît pas explicitement sous la forme d'un coefficient de sécurité.

L'indicateur représente donc la limite *de service* de la partie d'ouvrage concernée. On peut considérer qu'il corrige l'analyse de résistance, qu'il renforce ou atténue les indicateurs ultimes. Ainsi, on pourra considérer que la partie d'ouvrage sera classée selon le tableau 7-8.

| État de l'ouvrage | Niveau de vulnérabilité | Indice | Pourcentage de précontrainte nécessaire/précontrainte initiale |
|---|-------------------------|-------------------|--|
| Conforme à son usage et présente une bonne durabilité conforme à un dimensionnement moderne actuel | 1 | $I > 1,00$ | $p < 100 \%$ |
| Probablement sous-dimensionné et risquant de présenter des dégradations réduisant la durée de vie de l'ouvrage et le confort de l'utilisateur | 2 | $0,85 < I < 1,00$ | $100 \% < p < 115 \%$ |
| Ouvrage dans une situation de fonctionnement peu pérenne | 3 | $I < 0,85$ | $p > 115 \%$ |

Tableau 7-8 : classification de l'état de l'ouvrage selon les indicateurs ELS

L'**indicateur global de vulnérabilité** est défini pour la résistance des poutres vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant et vis-à-vis du hourdis. Pour classer l'ouvrage, on retient le maximum des différents coefficients retenus. Les indicateurs relatifs à la pile marteau sont donnés séparément. Un ouvrage est alors classé en cinq niveaux, en considérant le maximum entre le niveau de service obtenu à l'ELU et celui de l'ELS. Les cinq niveaux pour l'indicateur quantitatif sont donnés dans le tableau 7-9.

| Robustesse | Classes de vulnérabilité | Vulnérabilité |
|-------------|--------------------------|---------------------|
| Mauvaise | 5 | Très vulnérable |
| Passable | 4 | Vulnérable |
| Correcte | 3 | Correcte |
| Assez bonne | 2 | Peu vulnérable |
| Bonne | 1 | Très peu vulnérable |

Tableau 7-9 : classes de vulnérabilité

Le tableau 7-10 donne la répartition des ouvrages dans les cinq niveaux de vulnérabilité. Il en ressort que près de 35 % des ouvrages sont vulnérables ou très vulnérables, ce qui souligne la sensibilité de cette famille par rapport au dimensionnement. Pour les VIIP classés très vulnérables ou vulnérables, les origines de la vulnérabilité peuvent être multiples, mais concernent majoritairement le cisaillement et la flexion des poutres.

| Classes de vulnérabilité | Très peu vulnérable | Peu vulnérable | Correcte | Vulnérable | Très vulnérable |
|--------------------------|---------------------|----------------|----------|------------|-----------------|
| | 22,1 % | 11,7 % | 31,1 % | 14,3 % | 20,8 % |

Tableau 7-10 : répartition par classes de vulnérabilité

7.2.4 - Évaluation des conséquences

L'étude de l'indicateur socio-économique montre que la majorité des ouvrages (60 %) présente un enjeu élevé et un tiers des ouvrages un enjeu très élevé. Un enjeu normal n'a été attribué qu'à seulement deux ouvrages du réseau routier national. Ceci s'explique par l'importance stratégique du réseau routier national. Le tableau 7-11 donne la répartition des ouvrages par classes de conséquences.

| Classes de conséquences | Normale | Élevée | Très élevée |
|-------------------------|---------|--------|-------------|
| | 1,3 % | 61,0 % | 37,7 % |

Tableau 7-11 : répartition par classes de conséquences

7.2.5 - Évaluation des risques

La classe d'aléas reflète globalement l'importance des différents aléas qui agressent l'ouvrage : la classe de vulnérabilité caractérise l'état de santé mécanique, donc l'aptitude à faire face à ces aléas. La combinaison de ces deux indicateurs indique la criticité de la structure. Quatre niveaux ont été retenus selon le tableau 7-12, qui donne également le pourcentage d'ouvrages pour chaque couple « aléa/vulnérabilité ».

| Aléas | Vulnérabilité | | | | |
|--------------------|---------------------|----------------|----------|------------|-----------------|
| | Très peu vulnérable | Peu vulnérable | Correcte | Vulnérable | Très vulnérable |
| Aléas faibles | 6,49 % | 1,30 % | 0,00 % | 1,30 % | 1,30 % |
| Aléas modérés | 10,39 % | 5,19 % | 10,39 % | 3,90 % | 7,79 % |
| Aléas assez élevés | 5,19 % | 5,19 % | 19,48 % | 9,09 % | 9,09 % |
| Aléas élevés | 0,00 % | 0,00 % | 1,30 % | 0,00 % | 2,60 % |
| Aléas très élevés | 0,00 % | 0,00 % | 0,00 % | 0,00 % | 0,00 % |

Tableau 7-12 : classes de criticité

En croisant la criticité avec les classes de conséquences, on définit une classe de risques qui doit permettre au gestionnaire d'établir une stratégie de surveillance et de réparation. Le tableau 7-13 donne la matrice de risques définies dans l'étude du patrimoine VIPP. Trois classes de risques ont été définies dans l'analyse. Le tableau 7-12 donne également le pourcentage d'ouvrages pour chaque couple « criticité/conséquences ».

| Conséquences | Criticité | | | |
|--------------|--------------|--------------|----------|---------------|
| | Non critique | Peu critique | Critique | Très critique |
| Normales | 0,00 % | 1,30 % | 0,00 % | 0,00 % |
| Élevées | 12,99 % | 18,18 % | 22,08 % | 7,79 % |
| Très élevées | 5,19 % | 5,19 % | 23,38 % | 3,90 % |

Tableau 7-13 : classes de risques

L'analyse des ouvrages permet de constater que tous les ouvrages construits avant 1960 sont de classe R3 (risque élevé). Le pourcentage d'ouvrages R3 augmente d'ailleurs avec l'âge, 60 % de ces ouvrages ayant été construits avant 1973. Les figures 7-1 et 7-2 donnent une visualisation graphique des pourcentages des tableaux 7-11 et 7-12 par couples « aléas/vulnérabilité » et « criticité/conséquences ».

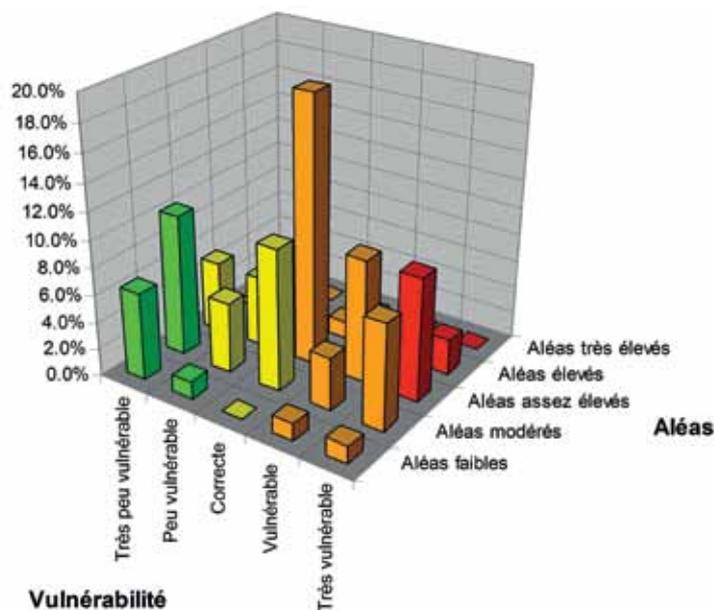


Figure 7-1 : répartition des ouvrages (criticité)

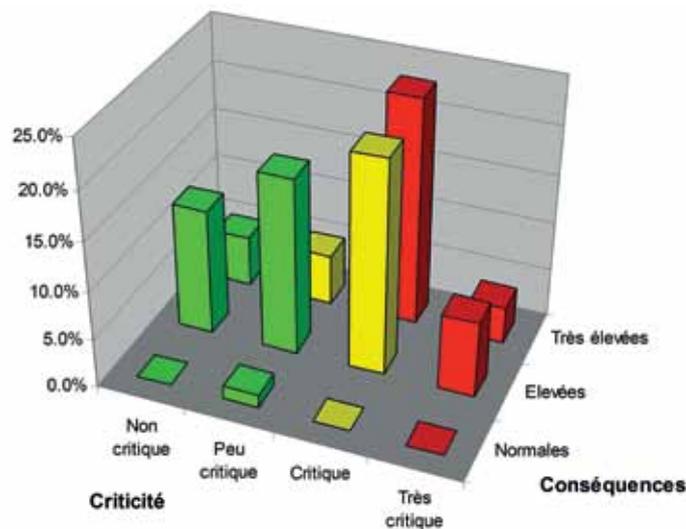


Figure 7-2 : répartition des ouvrages (risqué)

Le classement d'un ouvrage dans une classe de risques peut donc évoluer en fonction d'informations, d'investigations ou d'études complémentaires. Il est cependant intéressant de cibler les recherches éventuelles sur les critères qui ont caractérisé l'ouvrage, c'est-à-dire sur les critères qui ont « pénalisé » sa cotation. C'est ce que détaille le guide du Sétra « Analyse de risques appliquée aux viaducs à travées indépendantes en poutres précontraintes (VIPP) » [19] brièvement rappelé ici.

Les ouvrages entrant dans la **classe R1** sont caractérisés par des couples (aléas/vulnérabilité) qui convergent pour indiquer que l'ouvrage paraît en bon état, tant visuellement que sur le plan du dimensionnement (adéquation du dimensionnement à la situation d'exploitation actuelle). Les ouvrages concernés ne font l'objet d'aucune indication particulière et présentent un bon état général : aucun signe de mauvaise étanchéité, aucun signe de dégradation de la précontrainte, aucun facteur de risque signalé. Leur dimensionnement est jugé satisfaisant. Les quelques points signalés (données manquantes le plus souvent) méritent cependant d'être contrôlés. Sauf en ce qui concerne la certitude de la qualité de l'injection (faisant l'objet de la recherche par gammagraphie du processus N1 du guide LCPC [21]), cet ouvrage satisfait aux critères de conception (ce qui est visé par la référence à 1967) et à l'absence de désordres graves qui débouchent sur une surveillance normale. Si de nouvelles données sont obtenues, la réévaluation de la note d'aléas peut conduire à modifier la classe d'aléas. Ceci pourra déboucher en cas de doute sur le processus N2 suivant le guide LCPC [21].

Les ouvrages de la **classe R2** sont soit en relativement bon état mais avec des enjeux socio-économiques forts, soit déjà légèrement dégradés mais avec des enjeux faibles ou modérés. Si la classe d'aléas est 0-20 ou 20-40, le processus N1 d'investigation sera engagé s'il n'a pas déjà été mis en place. Si la classe d'aléas est 40-60, les aléas ne sont plus négligeables, mais l'ouvrage semble peu vulnérable : il est nécessaire de compléter ou de confirmer le recueil des données dans le dossier d'ouvrage (à défaut par des investigations simples) en privilégiant les données ayant contribué à évaluer les aléas. Si de nouvelles données sont obtenues, la réévaluation de la note d'aléas peut conduire à modifier la classe d'aléas. Ceci pourra déboucher en cas de doute sur le processus N2, suivant le guide LCPC. Enfin, si la classe d'aléas est 60-80, la note d'aléas est moyenne et mérite d'être confirmée. Il est nécessaire de compléter ou de confirmer le recueil des données dans le dossier d'ouvrage (à défaut par des investigations simples) en privilégiant les données ayant contribué à évaluer les aléas. Si de nouvelles données sont obtenues, la réévaluation de la note d'aléas peut conduire à modifier la classe d'aléas. En règle générale, il convient d'engager le processus N2. Pour une classe d'aléas supérieure au seuil de 80, après contrôle des données sur les aléas et la vulnérabilité, et confirmation des notes, il est impératif d'engager un processus de niveau N3 destiné à évaluer la précontrainte résiduelle par mesure de la tension et évaluation des sections résiduelles. La précontrainte en place est potentiellement insuffisante pour la situation d'exploitation actuelle. Si les résultats d'essais le justifient, ceci débouchera sur un recalcul complet. Lorsque la classe de vulnérabilité est supérieure à 4 pour un ouvrage R2, il est nécessaire de la confirmer : il est en effet possible qu'une donnée totalement erronée ait produit cette note élevée (manque de données sur les aciers d'effort tranchant, par exemple). Une recherche dans le dossier d'archives ciblée sur les données qui ont pénalisé la note et sur la partie d'ouvrage concernée est nécessaire. La réévaluation de la note peut entraîner la correction de la classe de vulnérabilité et le processus d'analyse doit alors être repris. Si la classe de vulnérabilité est confirmée, il faut procéder à un **recalcul détaillé** de la partie d'ouvrage concernée (hourdis ou poutre vis-à-vis de la flexion ou de

l'effort tranchant). Si les résultats de ce calcul ciblé sont bons, il convient de se limiter à une surveillance normale. Si, au contraire, les résultats de ces calculs sont mauvais, il nous paraît nécessaire de confirmer par une **inspection ciblée** avant de statuer définitivement sur l'insuffisance de la partie d'ouvrage concernée et d'entreprendre des études ou des travaux de renforcement éventuels. Si cette itération est favorable, on se limite à la surveillance normale, sinon, un calcul complet est requis afin de confirmer que les autres parties d'ouvrage sont saines avant d'engager des mesures de confortement ou de réparation.

Les ouvrages de la **classe R3** sont caractérisés par trois cas très différents. Les cas 0-20 ou 20-40 correspondent à un ouvrage qui ne présenterait aucun signe de désordre mais un sous-dimensionnement flagrant associé à des enjeux très élevés. La classe de vulnérabilité est très forte et mérite d'être confirmée. Il est en effet possible qu'une donnée totalement erronée ait produit cette note élevée (manque de donnée sur les aciers d'effort tranchant, par exemple). Une recherche dans le dossier d'archives ciblée sur les données qui ont pénalisé le niveau de vulnérabilité et sur la partie d'ouvrage concernée est nécessaire. La réévaluation de la vulnérabilité peut entraîner la correction de la classe, et éventuellement de la classe de criticité. Si la classe de vulnérabilité est confirmée, il faut procéder à un **recalcul détaillé** de la partie d'ouvrage concernée (hourdis ou poutre vis-à-vis de la flexion ou de l'effort tranchant). Si les résultats de ce calcul ciblé sont bons, il convient de se limiter à une surveillance normale. Si, au contraire, les résultats de ce calcul sont mauvais, il paraît nécessaire de confirmer par une **inspection ciblée** avant de statuer définitivement sur l'insuffisance de la partie d'ouvrage concernée et d'entreprendre des études ou des travaux de renforcement éventuels. Si cette itération est favorable, on se limite à la surveillance normale, sinon, un calcul complet est à réaliser afin de confirmer que les autres parties d'ouvrage sont saines avant d'engager des mesures de confortement ou de réparation. Les cas des ouvrages en classes d'aléas 40-60 et supérieurs à 60 correspondent à des classes d'aléas moyennes à élevées et ces notes sont à confirmer. Il est nécessaire de compléter ou de confirmer le recueil des données dans le dossier d'ouvrage (à défaut par des investigations simples) en privilégiant les données ayant contribué à pénaliser la note. Si de nouvelles données sont obtenues, la réévaluation de la note d'aléas peut conduire à modifier la classe d'aléas de l'ouvrage, éventuellement la classe de criticité. Pour la classe 40-60, il convient d'engager le processus N2. Pour des notes supérieures à 60, il est impératif d'engager le processus de niveau N3 (comprenant le processus N2 et qui consiste à réaliser des investigations d'évaluation de la précontrainte résiduelle). La précontrainte en place est vraisemblablement insuffisante pour la situation d'exploitation actuelle, ce qui équivaut à supposer que la précontrainte résiduelle est inférieure à la précontrainte critique. Si les résultats d'essais le confirment, un recalcul complet de l'ouvrage doit être effectué, destiné à confirmer la valeur de la précontrainte critique. Lorsque la classe de vulnérabilité est supérieur à 3, un recalcul complet doit être engagé avec simulation de scénarios des restrictions des situations d'exploitation (passage à un profil en travers réduit, allègement des superstructures, limitation de tonnage, etc.).

L'analyse détaillée est décrite dans le guide spécifique sur l'analyse de risques simplifiée des VIPP [19]. Un guide sur le recalcul des VIPP complètera ce guide [23] et le guide LCPC sur les investigations [21].

7.3 - Application à la gestion des ouvrages

Une analyse de risques doit contribuer à optimiser le programme d'inspection et d'entretien, en ciblant l'inspection sur les parties vulnérables, de part leur conception initiale et leur niveau de sollicitation, ou en raison de leur susceptibilité d'endommagement. Il doit permettre de jeter les bases d'une inspection ciblée et d'une maintenance préventive.

Pour les ouvrages existants, on distingue le cas de la gestion d'un parc d'ouvrages, de l'évaluation des risques sur une famille d'ouvrages sélectionnée, ou de l'évaluation des risques sur un ouvrage spécifique atteint d'une pathologie ou nécessitant une évaluation détaillée à un moment de sa vie.

Depuis l'effondrement du pont de Tours en 1979 par suite d'une crue de la Loire, le parc d'ouvrages du réseau national est géré selon les prescriptions de l'ITSEOA (Instruction Technique sur la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art). En 1995, cette instruction a été complétée en y introduisant une méthode d'évaluation de l'état apparent de dégradation des ouvrages : la méthode IQOA (Image Qualité des Ouvrages d'Art). L'introduction a été actualisée en 2010 [7] pour intégrer ces différents niveaux d'inspection.

La méthode de surveillance est basée sur des visites régulières des ouvrages qui sont classés en deux catégories :

- Les ouvrages « standards » de la liste 1 de l'instruction, simples, rustiques et bien connus, dont l'ensemble des désordres ou défauts possibles a été catalogué et dont la gravité a été estimée par des spécialistes. Ces catalogues de désordres permettent à des personnels moins spécialisés d'évaluer l'état de ces ouvrages et de leur attribuer une note.
- Les ouvrages de la liste 2, plus complexes de par leur réalisation ou leur conception, plus diversifiés et généralement de plus grande taille, sont inspectés par des spécialistes qui proposent une cotation de ces ouvrages après rédaction d'un rapport d'inspection.

L'ITSEOA prévoit également que les ouvrages présentant des désordres ou des signes de faiblesse entrent dans un cycle spécial de surveillance :

- investigations complémentaires dans le but de réaliser un diagnostic ;
- mise sous surveillance continue de l'ouvrage (surveillance renforcée) ;
- mesures éventuelles de restriction d'usage (haute surveillance) ;
- études pour réaliser un projet d'entretien spécialisé ou de réparation.

De plus, l'ITSEOA comporte également un volet d'entretien courant et d'entretien préventif pour éviter une dégradation trop rapide des structures.

Cette méthode a fait ses preuves, puisque aucun accident imputable à un défaut de surveillance n'a eu lieu depuis lors en France. En revanche, quelques effondrements se sont produits suite à des actions climatiques extrêmes ou à des actions accidentelles (pont de Sully sur Loire par suite d'une rupture de suspente sous choc de PL, PS sur l'autoroute A10 effondré par suite d'un choc de PL sur une pile, pont sur la rivière Saint-Étienne à la Réunion détruit après le passage du cyclone Gamède). Enfin, certaines pathologies du béton ou certains phénomènes impactant les ouvrages métalliques se sont révélés ces dernières années en même temps que les ouvrages vieillissaient, augmentant ainsi les risques pour certains types d'ouvrages dont les désordres peuvent échapper à une inspection visuelle.

Ceci montre qu'il est indispensable de compléter le dispositif actuel, en introduisant une méthode basée sur l'analyse de risques. Cette dernière, appliquée à un grand nombre d'ouvrages, est nécessairement à conduire au niveau simplifié. Son but est de mettre en avant les ouvrages qui présentent un niveau de risque inacceptable dans un premier temps, puis de prioriser les ouvrages en fonction de leur niveau de risque. Enfin, l'analyse de risques permet l'aide à la décision et donne des éléments pour mener une analyse de type « coûts-bénéfices ».

L'analyse de risques simplifiée doit prendre en compte quasiment les mêmes aléas que pour un projet d'ouvrage neuf (sauf bien sûr ceux liés à la période de construction). Il s'agit donc principalement d'examiner les probabilités d'occurrence :

- d'un défaut interne initial (défauts de conception ou de construction entraînant une rupture interne, matériaux défectueux, etc.) ;
- d'un endommagement interne (endommagement par fatigue, corrosion, etc.) ;
- d'un phénomène externe d'origine naturelle (séismes, crues, chutes de blocs) ;
- d'un phénomène externe d'origine humaine (incendie, choc de véhicule, effet vibratoire d'une foule, surcharge exceptionnelle, évolution des besoins).

Ces facteurs peuvent être estimés à partir de la zone géographique d'implantation des ouvrages, des voies portées et des obstacles franchis.

La vulnérabilité ne peut pas être estimée ouvrage par ouvrage, mais globalement en fonction des facteurs suivants qui sont disponibles dans les bases de données de recensement du patrimoine :

- type de structure et de matériau ;
- période de construction ;
- implantation géographique.

Au niveau de l'analyse simplifiée, les enjeux peuvent difficilement être appréciés, car ils dépendent de beaucoup des conditions locales. On peut toutefois donner un classement en travaillant par itinéraire.

Cette première étude simplifiée a in fine deux objectifs :

- Sur un patrimoine donné, permettre de classer les ouvrages en fonction du niveau de risque. Le maître d'ouvrage pourra ensuite fixer des priorités et décider d'engager des analyses plus fines pour certains d'entre eux.
- Sur un plan plus général, introduire l'analyse de risques dans l'instruction technique en donnant des prescriptions applicables à différentes familles d'ouvrages en fonction d'autres critères comme l'âge, l'environnement ou les conditions d'exploitation (investigations complémentaires ciblées à certaines périodes données de la vie d'un ouvrage).

Bibliographie

- [1] ISO/CD 13824 Bases du calcul des constructions – Principes généraux sur l'évaluation du risque pour les systèmes comprenant des structures, AFNOR, 2009.
- [2] ISO Guide 73 – Management du risque : vocabulaire, AFNOR, 2009.
- [3] NF EN 1990 Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures, 2^e tirage, AFNOR, 2003.
- [4] NF EN 1991-1-7 Eurocode 1 – Actions sur les structures, partie 1-7, « Actions générales – Actions accidentelles », 2^e tirage, AFNOR, 2011.
- [5] NF EN 1992-2 Eurocode 2 – Calcul des structures en béton, partie 2, « Ponts en béton – Calcul des dispositions constructives », AFNOR, 2006.
- [6] NF EN 206-1 Béton, partie 1, « Spécification, performances, production et conformité », AFNOR, 2004.
- [7] ITSEOA Instruction Technique de Surveillance et d'Entretien des Ouvrages d'Art, Sétra, fascicules 0, 2 et 3, 2010.
- [8] SISMOA Évaluation préliminaire du risque sismique sur les ouvrages d'art existants, Sétra, 2010.
- [9] NF EN 1991-1-4 Eurocode 1 – Actions sur les structures, partie 1-4, « Actions générales – Actions du vent », 2^e tirage, AFNOR, 2010.
- [10] Comportement au feu des ouvrages d'art, Sétra, à paraître, 2012.
- [11] Eurocodes 0 et 1 – Application aux ponts routes et passerelles, Sétra, 2010.
- [12] Risk Based Framework for the design and management of bridge, Atkins, Highways Agency SSR National Framework Contract, 03 387 (ATK), 2007.
- [13] LAGORA – Logiciel de gestion des ouvrages d'art, Sétra, 2011.
- [14] Approche probabiliste de la performance des structures, Cremona C., Hermes-Lavoisier, Paris, 2010.
- [15] Analyse de risques appliquée aux buses métalliques, Sétra, à paraître, 2012.
- [16] Structural Engineering Documents, Knoll F., Vogel T. Design for Robustness, IABSE, 2009.
- [17] Structural performance: probability-based assessment, Cremona C., ISTE-WILEY, London, 2011.
- [18] Analyse de risques appliquée aux ouvrages affouillables, Sétra, à paraître, 2012.
- [19] Analyse de risques appliquée aux viaducs à travées indépendantes en poutres précontraintes (VIPP), Sétra, 2010.
- [20] L'évaluation et la maintenance des viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes (VIPP). Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants, Godart B. sous la direction de C. Cremona, Presses de l'ENPC, Paris, 2003.

- [21] Analyse de la criticité du patrimoine VIPP autoroutier, Dabert J-L, Cremona C., Journées GC'09, Cachan, France, 18-19 mars 2009.
- [22] Guide technique : Viaduc à travées indépendantes à poutres précontraintes (VIPP), LCPC, Paris, 2001.
- [23] Guide technique sur le recalcul des VIPP, Sétra, à paraître.
- [24] Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel, collection « Guides techniques LCPC », 2003.

Page laissée blanche intentionnellement



Ce guide méthodologique aborde la mise en place d'une méthodologie complète d'analyse de risques, et des outils opérationnels pour l'évaluation simplifiée des risques appliquée aux ouvrages d'art.

L'objet de ce document est de présenter les principes généraux de maîtrise des risques et de les appliquer de façon opérationnelle à des ouvrages d'art, neufs ou existants. Il est ainsi complété par des exemples d'application aux projets d'ouvrage neuf et à l'évaluation d'ouvrages existants sensibles.

Ce guide est complété par une fiche MS-Excel® téléchargeable sur la plate-forme Ouvrages d'Art « PILES » du Sétra : <http://www.piles.setra.developpement-durable.gouv.fr/>



Document disponible au bureau de vente du Sétra

110 rue de Paris - 77171 Sourdon - France
Téléphone : 33 (0)1 60 52 31 31 - Télécopie : 33 (0)1 60 52 31 69
Référence : **1225** - Prix de vente : **20 €**

*Couverture - crédit photos : CETE Méditerranée ;
vignettes : CETE Aix, dir est ;
Conception graphique - mise en page : SCEI - 50/54 bd du Colonel Fabien - 94200 Ivry-sur-Seine
Impression : Jouve - 1 rue du docteur Sauvé - 53100 Mayenne
L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction, même partielle, de ce document
© 2012 - Dépôt légal : 4^e trimestre 2012 - ISBN : 978-2-11-129880-4*

Ce document participe à la protection de l'environnement.
Il est imprimé avec des encres à base végétale sur du papier écolabellisé PEFC.
PEFC/10-31-1316



Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagement

110 rue de Paris
77171 SOURDUN
France
tél. : 33 (0)1 60 52 31 31
fax : 33 (0)1 60 52 31 69

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique du MEDDE

