

LES ANALYSES DE RISQUES SUR LES PONTS ROUTIERS

Pascal CHARLES
MEEDDAT - SETRA

1. INTRODUCTION

Les théories classiques de l'analyse des 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.

Plus récemment, l'analyse de risque 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 risque 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 des risques à elle seule ne suffit pas. Elle doit précéder la décision dans le cadre d'un processus global de maîtrise des risques.

Le Sétra s'est engagé depuis plusieurs années sur ces différentes thématiques, afin de produire une méthodologie générale applicable à plusieurs situations différentes, et de l'appliquer sur des exemples concrets. L'idée générale est de se conformer au maximum aux méthodes codifiées d'analyse des risques, et de respecter leur formalisme, mais aussi de simplifier l'analyse pour la rendre adaptée aux ouvrages d'art et accessible à la fois à des concepteurs et des gestionnaires d'ouvrages. La présentation de la méthodologie en cours de finalisation et de quelques exemples d'application font l'objet du présent article. Il est à noter que la présente méthodologie s'intéresse aux risques à long terme pour la structure de l'ouvrage supportés par le maître d'ouvrage ou le gestionnaire. Les risques en phase de conception, portant sur le projet et traitant par exemple les aspects de dérive des coûts et des délais ne sont pas traités ici.

2. LE CONCEPT DE RISQUE

La définition du risque peut être la suivante : "Le risque est un danger éventuel, plus ou moins prévisible, qui peut affecter l'issue d'un projet". La norme ISO/DIS 13824 ("Principes généraux pour l'évaluation des risques sur les systèmes comprenant des structures") en cours de finalisation 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'aléa (ou événement incertain) et de conséquences apparaissent dans tous les documents traitant d'analyse de risque, 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 d'une structure vis-à-vis d'un aléa, ce qui permet d'établir les conséquences de cet 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 proviennent du cœur même de la structure (corrosion par exemple).

Pour les ouvrages d'art, le risque se définit ainsi comme la convolution de l'aléa, de la vulnérabilité face à cet aléa et de la gravité des conséquences. La multiplicité de cas possibles s'évalue grâce aux scénarios.

3. DÉTERMINATION DU RISQUE POUR LES OUVRAGES D'ART

Ainsi que cela a été présenté au paragraphe précédent, pour conduire une analyse de risque sur un ouvrage d'art, 3 facteurs sont à évaluer et à renseigner de manière la plus complète possible. Ce sont l'« aléa », la « vulnérabilité » et la « gravité des conséquences », appelée aussi l'« enjeu ».

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. Il est très important de noter que l'aléa est "incertain". L'aléa est ainsi la manifestation soit :

- 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, évolution des besoins d'une infrastructure),
- 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 endommagement interne (endommagement par fatigue, corrosion, réactions de gonflement interne (alcali-réaction ou réaction sulfatique), retrait-fluage-relaxation plus élevés que prévus, dégradation de la résistance du béton, écaillage du béton ...)

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, pourcentage de réduction des armatures passives par corrosion etc.). 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 résultant d'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, par exemple l'exposition de l'ouvrage (marin, présence de sels de déverglaçage, gel/dégel), l'utilisation de l'ouvrage (taux de poids lourds, convois exceptionnels), des pratiques antérieures inadaptées liées à la non connaissance des phénomènes physiques.

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. Il peut être dans de nombreux cas utile de quantifier l'aléa par un indice "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. A titre d'exemple, l'aléa "corrosion des armatures" d'une poutre dépend de l'exposition, de l'âge, de la conception, de l'exécution...Il peut être analysé et quantifié en différents niveaux selon les valeurs des paramètres précédents. On parlera alors de niveaux d'aléa.

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'ouvrage proprement dit, mais aussi de l'aléa (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 vulnérabilité dépend de plusieurs aspects : la conception de l'ouvrage, mais aussi l'état réel de l'ouvrage pour un ouvrage existant. La notion de vulnérabilité des ouvrages peut être reliée à la notion de robustesse conseillée par l'Eurocode 1 partie 1-7, bien que cette dernière traduise plutôt une disproportion entre les conséquences et les causes, et soit plus souvent étudiée dans un cadre quantitatif que qualitatif. Néanmoins, ces deux concepts s'évaluent par des méthodes et des outils relativement similaires.

3.3. La gravité des conséquences

Les conséquences, qui recouvrent par exemple l'enjeu ou l'importance, comptabilisent les dommages directs à la fin de l'événement sur l'ouvrage. Ceci inclut également les perturbations économiques et sociales qui résident essentiellement dans les pertes d'exploitation de l'infrastructure routière, 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.

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 etc...
- Sécurité des usagers : autant l'effondrement complet de la structure est rare, autant les évolutions pouvant mettre en question 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.
- Augmentation du coût total du projet sur sa durée de vie attendue du fait d'aléas de chantier, d'une inadaptation aux besoins ultérieurs, nécessitant des travaux de réhabilitation.

L'enjeu de l'ouvrage dépend de sa position et de son utilisation, quantifié à l'aide de plusieurs facteurs :

- Trafic sur l'ouvrage, pourcentage de Poids lourd 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. Il paraît ainsi difficile de comparer des pertes en vie humaine aux conséquences socio-économique de la rupture d'un itinéraire. Pour palier à ce problème, on peut utiliser dans l'analyse de risque 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. La sécurité des usagers doit toujours être mise en avant par rapport à la valeur socio-économique de l'ouvrage qui doit quand même intervenir.

3.4. Combinaison des facteurs du risque

Au final, les 3 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, 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).

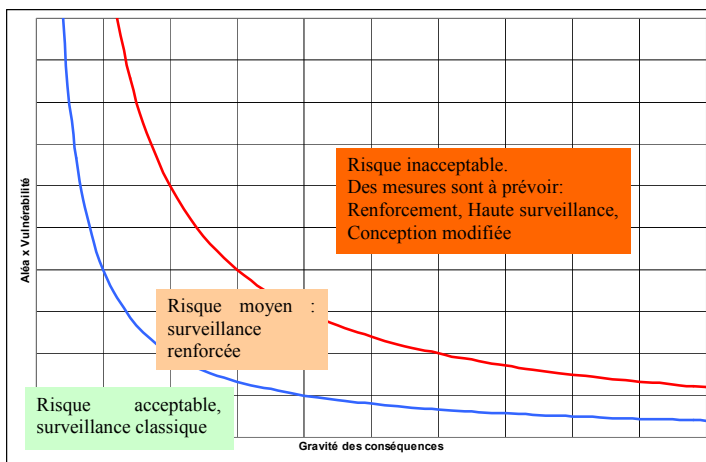
On peut évaluer un niveau de risque par scénario envisagé (voir figure 3b paragraphe 4). Le risque global découle ainsi de l'ensemble des risques individuels correspondant aux différents scénarios envisagés (somme des risques correspondant à un ou plusieurs aléas distincts, le risque correspondant à un aléa particulier étant l'enveloppe des niveaux de risques associés aux différents scénarios de réalisation de l'aléa).

L'évaluation qualitative du risque peut se faire à l'aide de matrices de risque comprenant un nombre de dimensions à adapter aux critères qualitatifs. On croise dans un premier temps l'aléa et la vulnérabilité, puis le résultat de ce croisement, que l'on nomme le danger, avec le terme de conséquence. L'exemple ci-dessous (fig 1) montre une analyse simplifiée avec 3 critères qualitatifs pour l'aléa, la vulnérabilité et les conséquences :

	Vuln faible	Vuln moyenne	Vuln élevée		Conseq faible	Conseq moyenne	Conseq élevée
Niveau d'Aléa faible	Danger faible	Danger faible	Danger moyen	Niveau de Danger faible	Risque faible	Risque faible	Risque moyen
Niveau d'Aléa moyen	Danger faible	Danger moyen	Danger élevé	Niveau de Danger moyen	Risque faible	Risque moyen	Risque élevé
Niveau d'Aléa élevé	Danger moyen	Danger élevé	Danger élevé	Niveau de Danger élevé	Risque moyen	Risque élevé	Risque élevé

Figure 1 : a) Croisement Aléa x Vulnérabilité= Danger b) croisement Danger x Conséquence

L'évaluation quantitative se réalise et faisant le produit de l'aléa par la vulnérabilité et la gravité des conséquences, et en comparant à des seuils définissant le risque faible ou le risque élevé. On représente dans le graphique ci-dessous (fig 2) le croisement du produit (alea x vulnérabilité) et de la gravité des conséquences, et les courbes de risque faible et de risque élevé :



L'évaluation du risque global cumulant les différents aléas et scénarios possibles peut se réaliser à l'aide de l'expression :

$$Risque = \sum_{aléa} \sum_{scénario} \max_j (A_i \times V_{i,j} \times C_{i,j})$$

où A,V,C sont respectivement l'aléa, la vulnérabilité et les conséquences. Ceci permet de considérer qu'un ouvrage sensible à plusieurs risques "moyens" présente un niveau de risque global "élevé". Cette expression est cependant à manipuler avec précaution pour ne pas surclasser les ouvrages en risque systématiquement élevé.

Figure 2 : Croisement (Aléa x Vulnérabilité) x Conséquences dans le cadre de l'analyse quantitative

4. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE ET DE TRAITEMENT DES RISQUES SUR OUVRAGES D'ART

L'évaluation du trio aléa – vulnérabilité – gravité des conséquences peut se faire de manière qualitative, ou plus quantitative selon les cas. Il est proposé de procéder en deux étapes, en réalisant dans un premier temps systématiquement une analyse de risque simplifiée, uniquement qualitative, et en approfondissant et quantifiant certains points lorsque cette première analyse ne permet pas de conclure (analyse des risques détaillée qui peut être semi-quantitative ou quantitative en fonction des moyens, et aussi de la connaissance des phénomènes physiques).

La méthodologie de l'analyse des risques comporte un certain nombre d'étapes définies dans la figure 3a. Les paragraphes suivants explicitent certains items de l'organigramme ci-dessous. On s'attache notamment à préciser la manière de définir l'aléa, la vulnérabilité et la gravité des conséquences lors de l'analyse simplifiée et détaillée, et la manière de combiner les trois critères et les différents risques possibles.

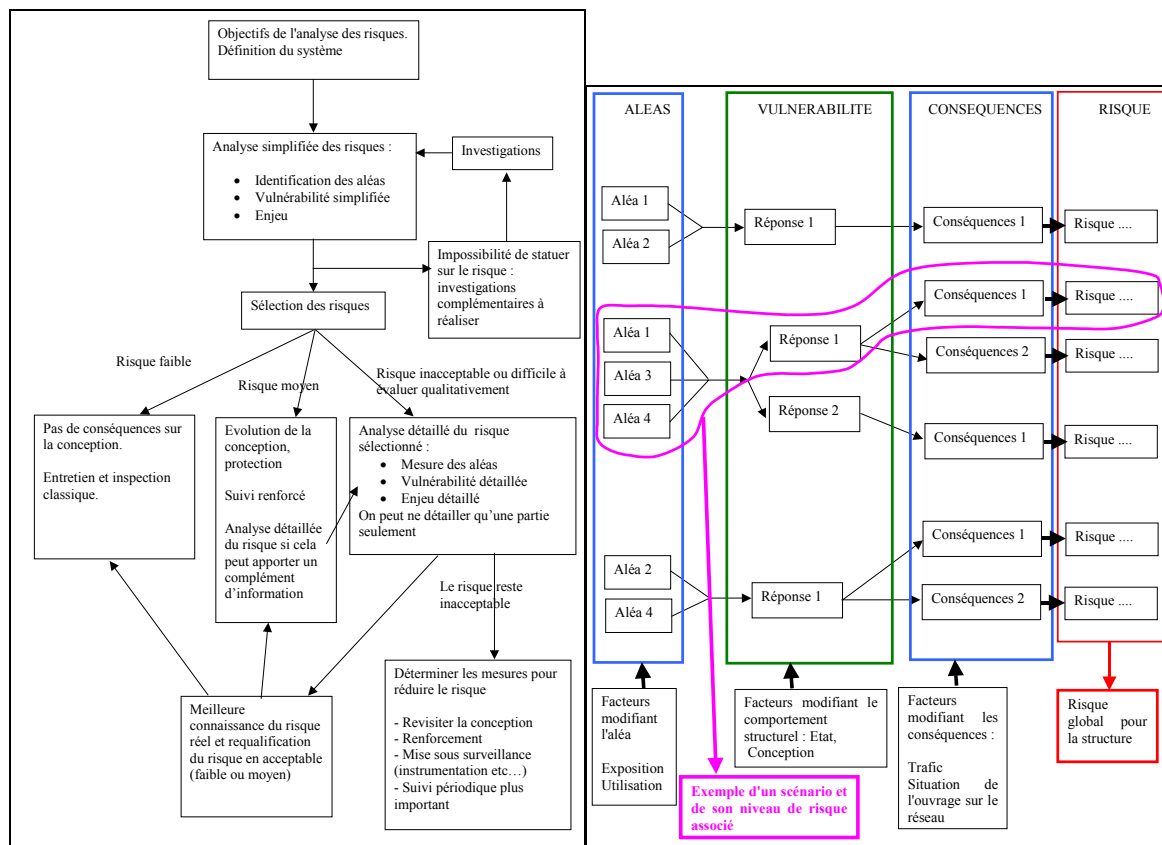


Figure 3 : 3.a) Méthodologie de l'analyse des risques

3.b) synoptique des scénarios

4.1. Définition de l'objectif de l'analyse de risques et du système étudié

Avant de procéder à une analyse des risques sur un ouvrage d'art neuf ou existant, il convient de préciser l'intérêt et le rôle de l'analyse de risque. Il n'est en effet pas nécessaire de pratiquer systématiquement une analyse de risque pour tous les ouvrages à tous les stades de leur vie. Il faut aussi préciser ce que l'on attend de l'analyse des risques. Il y a en effet un aspect décisionnel qui est une conclusion logique de l'analyse des 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 des risques est prêt à éventuellement mettre les moyens (même limités comme la surveillance) si l'analyse des risques révèle des dangers importants.

On peut citer les différents cas de figure suivants pouvant nécessiter une analyse des risques : risques anticipés à étudier (chocs de navire, glissement de terrain), structures exceptionnelles ou méga-projets, événements extraordinaires, optimisation d'un parc d'ouvrage existant, anticipation de l'évolution des besoins et de l'environnement.

Il convient de décrire précisément le système étudié, c'est-à-dire l'ouvrage considéré. Pour un ouvrage existant, 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 réalisés etc.

4.2. Identification et évaluation des aléas

Les aléas doivent être identifiés et listés, de la manière la plus exhaustive possible. Dans le cadre de l'analyse simplifiée, il n'est pas raisonnable d'imposer l'évaluation de la probabilité ou de l'intensité. Il est proposé soit d'estimer l'aléa très qualitativement ("faible" – "moyen" – "élevé"), soit d'élaborer un système de notation basé sur des critères qualitatifs et d'en déduire plusieurs catégories d'importance de l'aléa. Dans les deux cas, on détermine au sein d'un indicateur unique la probabilité de l'aléa et son intensité.

Lors de l'analyse détaillée, lorsque la connaissance scientifique des phénomènes est suffisante, il est possible d'évaluer un ou plusieurs couples Probabilité / Intensité pour les différents aléas. Si ceci n'est pas possible, on quantifie l'aléa par un système de notation plus évolué qu'au cours de l'analyse simplifiée, faisant apparaître éventuellement plus de critères et une notation plus fine.

4.3. Évaluation de la vulnérabilité

Cette étape consiste à tester l'ouvrage vis-à-vis de ces aléas et à déterminer comment celui-ci réagit. 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, et tester l'ouvrage avec ces scénarios. La pertinence du choix des scénarios est essentielle pour une analyse de risque la plus pertinente possible.

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. Par contre, lorsqu'on procède à un niveau d'analyse très détaillé, des calculs plus sophistiqués peuvent être nécessaires, 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. On cherche ainsi à évaluer le comportement réel de l'ouvrage, au-delà de sa sécurité réglementaire.

Lorsque l'aléa est interne à la structure, il est parfois difficile d'imaginer des scénarios plausibles. Deux alternatives sont alors possibles : soit tester un ensemble de ruptures possibles et voir comment l'ouvrage se comporte, soit 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, et moins la structure est vulnérable et capable d'encaisser soit des surcharges importantes, ou 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.

Au final, l'étude de la vulnérabilité de l'ouvrage aux aléas doit être matérialisée soit par une appréciation qualitative, soit par une note chiffrée déterminée de manière plus ou moins précise.

4.4. Évaluation de la gravité des conséquences

L'évaluation de la gravité des conséquences est une phase importante de l'analyse. Cette évaluation peut être qualitative, ou bien quantitative. L'évaluation quantitative est difficile, car il y a des enjeux de nature différente qui se pondèrent de manière différente. On privilégiera donc une analyse qualitative qui doit prendre en compte les éléments suivants :

- Dégâts humains occasionnés par l'effondrement d'un ouvrage, ou par des dégradations locales
- Coût de reconstruction partielle / totale, coût d'un ouvrage provisoire si nécessaire
- Coût pour l'activité socio-économique pour la région en cas de perte d'un ouvrage
- Conséquences morales ou médiatiques
- Impact environnemental
- Dégâts collatéraux

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 lourd sur l'ouvrage (qui donne une idée des conséquences humaines de l'effondrement et aussi des conséquences socio-économiques pour la région).

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 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.

Toutes ces conséquences ne sont bien évidemment pas comparables les unes aux autres, et les conséquences en termes de vies humaines sont bien sûr d'un niveau supérieur aux conséquences économiques. Néanmoins, les conséquences humaines ne permettent pas toujours de discriminer entre plusieurs ouvrages, alors que l'examen des autres types de conséquences peut permettre de faire ressortir des ouvrages plus "importants" que d'autres.

4.5. Sélection et traitement des risques

À l'issue de l'analyse simplifiée, la matrice de risque permet de définir un niveau de risque qui est soit acceptable, 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. Lorsque le risque est élevé, il faut réaliser une analyse de risque détaillée, pour mieux quantifier l'importance de ce risque (ce qui peut conduire à requalifier le risque), et surtout en vue du traitement du risque, pour l'utilisation optimale des moyens. Lorsque le risque est moyen, des mesures intermédiaires peuvent être prises au cas par cas.

Le traitement du risque peut être réalisé de plusieurs manières : il est possible de partager le risque, de transférer le risque (via l'assurance) d'éviter le risque, mais dans la plupart des cas, on ne peut que réduire le risque en jouant sur l'aléa, ou la vulnérabilité, ou les conséquences en fonction de l'analyse faite. Les possibilités de réduire le risque sont les suivantes :

- Ré-examiner les hypothèses et les données en les complétant, ou en procédant à des études complémentaires.
- Revisiter la conception de l'ouvrage, lorsque l'aléa est suffisamment bien connu : on redimensionne l'ouvrage vis-à-vis de cet aléa. On peut aussi améliorer la ductilité.
- Dimensionner des dispositifs de protection (ou d'isolation)
- Modifier le programme de suivi de l'ouvrage en fonction des risques (inspections)
- Mettre en place des dispositifs de surveillance (instrumentation)
- Réduire les sollicitations de l'ouvrage : restriction de circulation, limitation du tonnage.
- Mettre au point un système de fermeture plus ou moins automatique de l'ouvrage

En pratique, on combine généralement des mesures de réduction de la vulnérabilité et des mesures de réduction des conséquences. 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.

5. EXEMPLES

Les 3 exemples suivants montrent trois exemples d'application de la méthodologie exposée précédemment à des situations très variées. Ces analyses, actuellement en cours de test et de validation, sont donnés à titre purement indicatif pour illustrer la méthode.

5.1. Cas d'une famille d'ouvrages à risque

Le Sétra s'est engagé dans une série d'analyses de risques pour des familles d'ouvrages à risque important. Ce sont les VIPP, les buses métalliques, les ouvrages affouillables et les murs en terre armée. Un exemple d'évaluation qualitative, mais chiffrée, du niveau de risque pour les buses métalliques est donné dans le tableau ci-après :

Désignation	Aléa				Vulnérabilité				Gravité des conséquences			
	Probabilité relative des aléas	paramètres influents	Importance de l'aléa		paramètres influents	Valeurs	Indice de vulnérabilité = somme des valeurs de paramètres	Niveau	impacts sur la voie portée	Valeurs		
Corrosion	1	piétons (avec salages peu fréquents sur PNI)	inexistante	0	si date de construction $\leq$ 1981	6	Indice de vulnérabilité $\leq$ 10	faible	trafic $<$ 15 000 v/j	faible	1	
		OR (avec salages peu fréquents) ou piétons (avec salages fréquents à très fréquents)	faible	0.25	si date de construction $>$ 1981	0	Indice de vulnérabilité $<$ 15	moyenne	15 000 v/j $<$ trafic $<$ 35 000 v/j	moyenne	2	
		OD (avec salages peu à fréquents) ou OR (avec salages fréquents)	moyenne	0.5	si âge $>$ 35 ans	6	Indice de vulnérabilité $\geq$ 15	forte	35 000 v/j $<$ trafic $<$ 80 000 v/j	élevée	3	
		PA (tous salages) ou OD ou OR (avec salages très fréquents)	élevée	0.75	si âge $\leq$ 35 ans	0			80 000 v/j $<$ trafic	très élevée	4	
		buse hydraulique (OH) (tous salages)	très élevée	1	si note IQQA (buse) 3U	6			Déviations possibles	oui	0	
					si note IQQA (buse) 3	3				non	1	
					si buse arche ou arche	2						
					si autre forme de buse	0						
										impacts sur la voie franchie		
Actions hydrauliques (affouillement, soulèvements, érosion, renard)	0.7	PA (passage agricole), piétons, OR (RID ou VC)	inexistante	0	si IQQA (lit cours d'eau) = 1	0	Indice de vulnérabilité $\leq$ 10	faible	inexistants		0	
			faible	0.25	si IQQA (lit cours d'eau) = 2 ou NE	2	Indice de vulnérabilité $<$ 15	moyenne	faibles		1	
		buse de décharge (OD) (I)	moyenne *	0.5	si IQQA (lit cours d'eau) = 3 ou 3U	8	Indice de vulnérabilité $\geq$ 15	forte	moyens		2	
		buse hydraulique (OH) (I)	élevée *	0.75	si têtes renforcées (à préciser)	0			élevés		3	
		OH et régime torrentiel possible	très élevée	1	si têtes non renforcées	3			très élevés		4	
		(I) si probabilité de mise en charge	* monter d'un niveau l'aléa		si buse arche	3						
					si autre forme de buse	0						
					si extrémités en sifflet oui	3						
					si extrémités en sifflet non	0						
					si largeur sous remblai $\leq$ 15 m	3						
					si largeur sous remblai $<$ 30 m	1						
					si largeur sous remblai $\geq$ 30 m	0						
										Gravité des conséquences		
										faible si G $<$ 4		
										moyenne 4 $\leq$ G $\leq$ 6		
										élevé si G $>$ 6		
Surcharges accidentelles	0.4	trafic $<$ 15 000 v/j	faible	0.25	si couverture $>$ 4,00 m	0	Indice de vulnérabilité $<$ 10	faible				
		15 000 v/j $<$ trafic $<$ 35 000 v/j	moyenne	0.5	si 1,00 m $<$ couverture $\leq$ 4,00 m	5	Indice de vulnérabilité $<$ 15	moyenne				
		35 000 v/j $<$ trafic $<$ 80 000 v/j	élevée	0.75	si couverture $\leq$ 1,00 m	10	Indice de vulnérabilité $\geq$ 15	forte				
		80 000 v/j $<$ trafic	très élevée	1	si note IQQA (buse) 3 ou 3U	10						
Chocs	0.15	piétons, OH, OD, PA, OR (RID, VC)	inexistante	0	si IQQA (buse) = 1 ou 2	0	Indice de vulnérabilité = 0	faible				
			faible	0.25	si IQQA (buse) = 2E	10	Indice de vulnérabilité $\geq$ 10	moyenne				
			moyenne	0.5	si IQQA (buse) $\leq$ 3 et 3U	20	Indice de vulnérabilité $\geq$ 20	forte				
			élevée	0.75								
			très élevée	1								
Incendie	0.1		inexistante	0	si couverture $>$ 4,00 m	0	Indice de vulnérabilité = 0	faible				
		OH	faible	0.25	si 1,00 m $<$ couverture $\leq$ 4,00 m	10	Indice de vulnérabilité $\geq$ 10	moyenne				
		OD	moyenne	0.5	si couverture $\leq$ 1,00 m	20	Indice de vulnérabilité $\geq$ 20	forte				
		OR (VC, RID)	élevée	0.75								
		PA et piétons,	très élevée	1								

5.2. Cas de la prise en compte du risque incendie sur les ponts

Une méthodologie de prise en compte du risque incendie sur les ouvrages est en cours au Sétra. Cette méthodologie est basée sur les méthodes d'analyse des risques car l'incendie n'a pas les mêmes conséquences sur ou sous un pont en atmosphère ouverte, où l'évacuation est aisée, qu'en atmosphère confinée comme un tunnel ou un bâtiment. Les principes généraux de détermination des critères aléas-vulnérabilité-conséquences sont donnés de manière succincte ci-après. Les détails pourront être trouvés dans un futur document.

Méthode simplifiée :

- Aléa : faible / moyen / important suivant le trafic, le taux de PL et les conditions particulières locales (accidentogènes).
- Vulnérabilité : faible / moyenne / élevée suivant le type d'ouvrage (faible pour pont en béton armé ou pont à hauban avec grande interdistance entre haubans, élevée pour un bipoutre mixte juste au-dessus d'une autoroute, un pont à haubans avec haubans rapprochés et proches de la route)
- Gravité des conséquences : elle est fonction de l'importance de l'ouvrage dans son environnement et de son coût intrinsèque.

Méthode détaillée :

- Probabilité de l'aléa : données statistiques d'incendie modifiées pour tenir compte des particularités locales.
- Vulnérabilité : application des courbes d'incendie normalisées (feu de poids lourd, feu d'hydrocarbures, chargement solide ou liquide) sur l'ouvrage et conclusion sur la durée de résistance. Dans des cas plus complexes, utilisation de l'ingénierie du feu.
- Gravité des conséquences : suivant la durée de résistance, évaluation approximative du nombre de victimes, dégâts matériels (coûts)

Le risque global est le produit des 3 critères et est à comparer à des seuils. En cas de risque important, des mesures peuvent être prévues (surdimensionnement, protection, dispositif d'alerte etc...).

5.3. Analyse de risque globale sur les ponts

Outre des cas bien spécifiques évoqués ci-avant, l'analyse des risques peut-être réalisée de manière globale sur l'ensemble des ouvrages, qu'ils soient au stade de la conception ou existants. Une check-list des aléas possibles sur des ouvrages, avec des critères qualitatifs permettant de d'établir une notation est en cours au Sétra. Elle s'appuie naturellement sur les connaissances nombreuses capitalisées sur différents types d'ouvrages, et permet pour des ouvrages neufs principalement de ne pas oublier d'aléa et d'aider le maître d'ouvrage pour les choix à effectuer, et pour des ouvrages anciens de pouvoir les hiérarchiser non pas en fonction de leur état structurel mais de leur niveau de risque (qui inclut bien entendu partiellement l'état structurel).

On donne deux exemples de quantification de niveaux d'aléas. On rappelle que ceci est en cours de réflexion actuellement et est donné à titre purement indicatif pour illustrer la méthode :

Exemple 1 : corrosion significative des armatures de béton armé :

<i>Facteurs connus modifiant l'aléa</i>	<i>Quantification de l'aléa (à affiner)</i>	<i>Données à recueillir</i>
inadéquation de l'enrobage des armatures par rapport à l'environnement : si l'enrobage n'est pas connu le supposer égal à 3cm. Prendre des hypothèses pessimistes en cas d'absence de données (résistance béton, chape, liant hydraulique etc...)	3 par centimètre d'enrobage manquant par rapport à l'enrobage théorique issu du calcul EC2	enrobage des armatures, présence d'une chape, classe d'exposition selon EC2, nature béton, nature du liant
mauvaise qualité de béton environnant l'armature	0 si inspection Ok, 2 si inspection montre dégradations, 1 si on ne sait rien	inspection visuelle de l'ouvrage
âge de l'ouvrage	1 par tranche de 20 ans	date de construction
qualité de l'évacuation des eaux (pente long et trans, système d'évacuation adapté)	1 si mauvais système d'évacuation, 0 si OK	analyse des plans disponibles et/ou visite sur place
Présence ou non d'une fissuration du béton	1 si fissure > 0,2mm ; 2 si >0,4mm ; 0 sinon	inspection détaillée
Signes visibles issues de l'inspection	4 si présence de calcite, 10 si présence de rouille, 0 si absence d'information	inspection détaillée
Si disponible, position du front de carbonatation	5 si le front a atteint les armatures	essai spécifique

Exemple 2 : aléa rupture par fatigue des aciers de charpente

<i>Facteurs connus modifiant l'aléa</i>	<i>Quantification de l'aléa (à affiner)</i>	<i>Données à recueillir</i>
Trafic présent sur l'ouvrage	3 si trafic important et taux de PL important (valeurs à fixer), 2 si moyen et 1 si faible	Etudes de trafic, comptage sur site éventuellement
Rapport charges variables / poids propre	2 si poids propre faible (-> le trafic engendre une forte variation de sigma si le dimensionnement est correct), 1 si moyen, 0 si important (peu de variations de contrainte)	Plans de l'ouvrage et estimation sommaire sur la base du poids de la section transversale et des charges de trafic de l'EC1
Prise en compte de la fatigue dans le dimensionnement	-3 si prise en compte de la fatigue conformément à l'EC3-4	Notes de calcul
Qualité des aciers de charpente	notes à définir	Dossier d'ouvrage
Dimensionnement de la structure	-1 si Epaisseurs supérieures à 25mm, détails de fatigue favorables (par exemple changements de section en douceur (pente<1/4))	Notes de calcul
Etat de l'ouvrage : relevé de fissures, date de la dernière inspection détaillée des fissures	2 par dizaines d'années depuis la dernière inspection détaillée des fissures, 10 si des fissures ont été relevées lors de la dernière inspection	Inspection