

GESTION DURABLE DES INFRASTRUCTURES PAR LES RISQUES : AIDE A LA DECISION EN GENIE CIVIL

Richard Frenette¹, Bruno Gérard¹, Olivier Bernard².

- 1 OXAND-Canada Inc., 1819 Boul. René-Lévesque Ouest, #202, Montréal, QC, H3H 2P5, CANADA, www.oxand.com.
- 2 OXAND SARL, Quai du Seujet 18 1201 Genève - SUISSE

RÉSUMÉ : La question de la gestion des infrastructures vieillissantes des pays développés se pose aujourd'hui avec une acuité sans précédent. Construites pour une part importante lors de la vague de développement qui suivit la seconde guerre mondiale, plusieurs de ces infrastructures portent aujourd'hui les stigmates d'une construction effrénée, de matériaux et/ou procédés de construction au comportement à long terme mal connus, et surtout du sous-financement de leur maintenance.

Ce contexte est aujourd'hui en évolution, avec une conscientisation grandissante du grand public et des pouvoirs élus. Face à un parc en expansion constante, la demande est grande en aide à la gestion qui permette de rencontrer des objectifs précis : intégration de l'ensemble des enjeux (économiques, sociétaux, santé et sécurité, environnementaux, juridiques, etc.), mutualisation des informations, hiérarchisation des priorités, partage des responsabilités, support à la décision (managérial, financier), prise en compte des aspects évolutifs, production de plans directeurs.

OXAND présente aujourd'hui une méthodologie qui a déjà permis dans plusieurs pays occidentaux d'atteindre ces objectifs tout en intégrant le retour d'expérience, le savoir-faire et les approches existantes de gestionnaires d'infrastructures à forts enjeux.

L'approche utilisée est axée autour de la gestion des risques, prise au sens large du terme. Par risque, on comprend ainsi l'ensemble des dysfonctionnements d'un système (ouvrage unique ou parc d'infrastructures), leurs conséquences selon les différents enjeux identifiés, les incertitudes associées à la connaissance du système, et les processus qui font évoluer les matériaux et les composants du système. Cette approche a ceci d'unique qu'elle ne se concentre pas uniquement sur l'état des systèmes mais aussi et surtout sur leur mode de fonctionnement et leur usage.

Grâce à cette approche est placé sur un dénominateur commun des systèmes de fonction (pont, tunnel, chaussée), de matériaux (acier, béton, asphalte), d'enjeux (disponibilité, sécurité, économie) et d'ampleur (ouvrage majeur, ouvrage secondaire) différents, permettant une identification des priorités et une gestion transversales et intégrées.

La conférence identifie les grands principes de l'approche, ses applications possibles avec exemples de même que certaines des adaptations particulières qui ont été faites pour accommoder les « différences culturelles » rencontrées d'un gestionnaire à un autre.

1. INTRODUCTION

La gestion des infrastructures dans les pays industrialisés est à une période charnière. Jusqu'à présent, la majorité des efforts se sont concentrés sur le développement de nouvelles infrastructures pour une société en pleine croissance. Une partie du budget a été prévue pour leur maintenance, surtout pour leur partie la plus visible. Or aujourd'hui, nous devons modifier cette vision : il devient en effet de plus en plus évident que la maintenance est désormais l'activité principale des ingénieurs, et que les budgets sont insuffisants pour remettre tout à neuf. Dans un

contexte où les actifs ont vieilli, les coûts de maintenance augmentent de façon non linéaire (Figure 1).

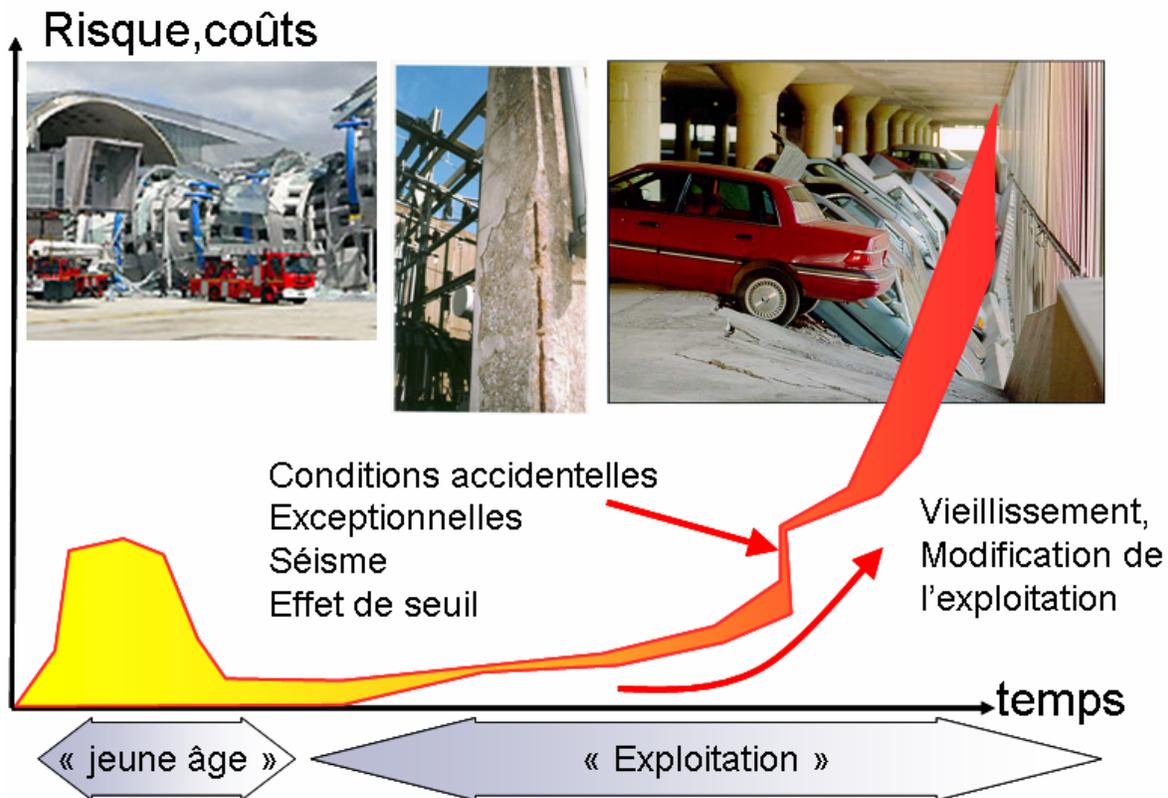


Figure 1 : Evolution des risques, des coûts vs cycle de vie des ouvrages d'art

L'idée traditionnelle du génie civil reste celle de construire du neuf. Les étudiants fraîchement sortis de l'université en sont les porte-parole : ils savent globalement concevoir les composants d'une nouvelle structure, mais ils n'ont qu'une vague idée de ce que sont les mécanismes de vieillissement et comment réparer un ouvrage qui ne répond plus à ses fonctions, et n'ont certainement jamais entendu parler de hiérarchiser des interventions de maintenance. C'est donc sans surprise que le premier réflexe de plusieurs ingénieurs, une fois confrontés à ce type problème, soit de vouloir tout ramener à l'état initial (ou encore « la norme »). Et si à cela s'ajoutent des contraintes budgétaires, on réparera ce qui paraît le plus urgent (visible), voire ce qui est déjà défaillant selon une approche « à dire d'expert » souvent trop subjective car manquant de référentiel clair et précis.

En génie civil, la notion de risque est encore généralement restreinte à décrire les aspects sécurité dans le domaine de la construction ou le risque financier associé à la gestion de projet. Néanmoins, une bonne compréhension et une bonne connaissance du risque associé à une infrastructure est vitale pour une stratégie de surveillance et de maintenance efficace.

Dans la suite de l'article, nous allons résumer les besoins du secteur du génie civil en évaluation et en gestion de risques. Nous décrirons brièvement les principes de la gestion par les risques, que nous illustrerons ensuite par une série d'exemples d'applications.

2. LES OBJECTIFS DE LA GESTION DES OUVRAGES D'ART

La gestion des ouvrages d'art comporte des difficultés inhérentes issues de leur nature et du contexte dans lequel ils opèrent : coûts élevés, unicité de conception, longs cycles de vie, niveaux d'incertitudes élevés sur certains composants, complexité des mécanismes de vieillissement et de défaillance, effets de seuil, forts enjeux, etc.

La plupart des approches de gestion de ces ouvrages peuvent être représentées de façon générique par le schéma de la Figure 2. L'activité de gestion s'y décompose en trois : **identifier les problèmes « importants »**, **choisir les solutions « appropriées »** et **organiser un plan d'action « optimisé »**. Bien entendu, toute la difficulté réside dans l'identification de ce qui est « important », « approprié » et « optimisé ».

La recherche des **problèmes importants** peut s'effectuer du point de vue des fonctions accomplies par le système et des conséquences si ce système venait à ne plus les accomplir (Figure 3). Cette approche permet de faire une première distinction : les problèmes que l'on veut prévenir sont associés aux conséquences (effets), alors que l'état, l'utilisation, les contraintes, les incertitudes sont plutôt à l'origine (causes) des problèmes. On cherche donc à **gérer les effets inacceptables en traitant leurs causes, et non l'inverse**.

Les **solutions appropriées** seraient celles qui permettent de réduire les problèmes à un niveau acceptable, à un coût en adéquation avec la performance de la solution. La plage de solutions à envisager pour réduire les problèmes doit pouvoir couvrir l'ensemble des activités associées à la maintenance, voire à la stratégie de gestion et d'utilisation (Figure 4). Toutes ces solutions doivent ensuite pouvoir être comparables du point de vue de leur efficacité à régler les problèmes de façon appropriée et de leur coût.

L'organisation du **plan d'action optimisé** devrait quant à lui découler logiquement des deux étapes précédentes, tout en intégrant les contraintes (temps, budget, ...) externes.

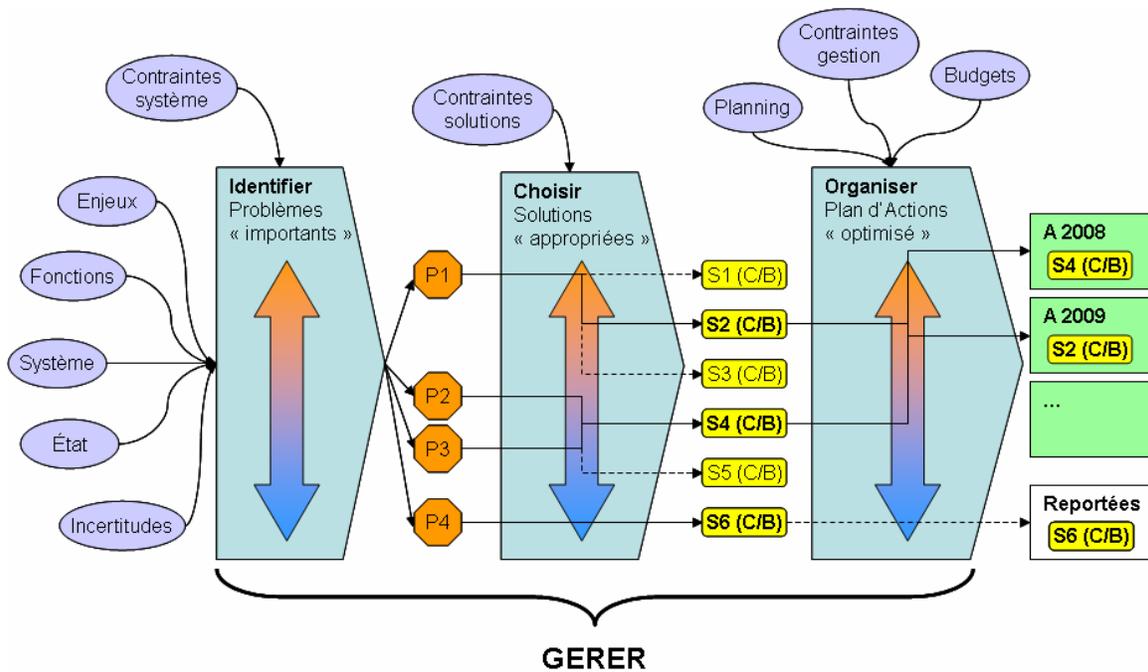


Figure 2 : Illustration d'un processus de gestion connecté à ses contraintes externes

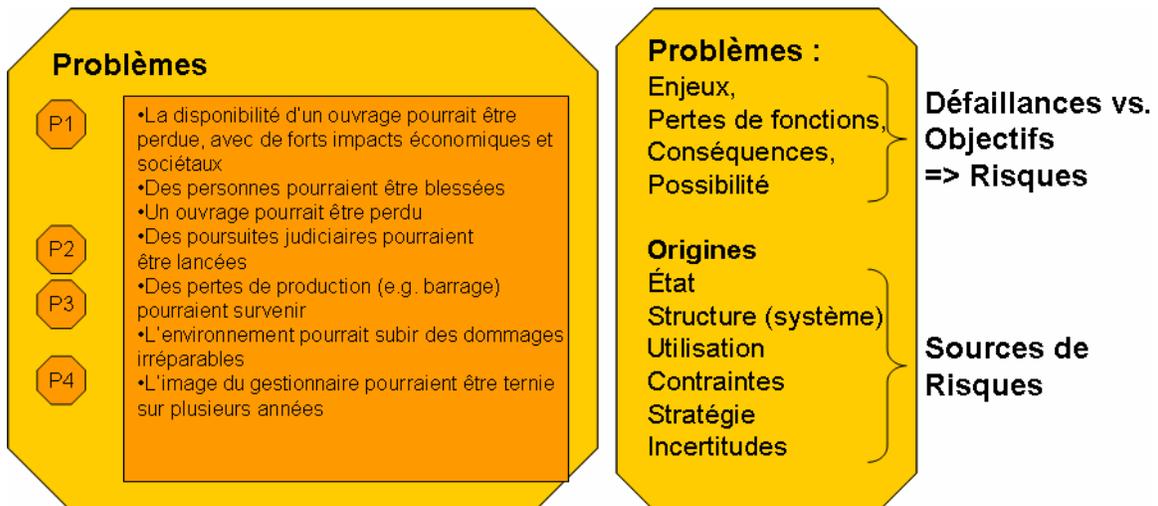


Figure 3 : Identification de problèmes importants



Figure 4 : Exemples de solutions devant être considérées

3. LE BESOIN

Toute approche de gestion des ouvrages d'art vise donc à définir ce qui est important, approprié, et optimisé. En particulier, on attend d'une telle approche qu'elle :

- Soit assez générale pour être appliquée à n'importe quel type d'infrastructure et permette de les comparer ;
- Puisse intégrer aussi bien les données « maison » que le retour d'expérience ou encore les données extérieures disponibles ;
- Puisse permettre l'exploration de tous les modes de défaillance ;
- Puisse être modulable et s'ajuster au niveau de détail exigé : du simple composant à un parc d'infrastructures ;
- Puisse intégrer les différents types d'enjeux : humains, économiques, environnementaux, financiers, sociaux, politiques, etc.
- Puisse intégrer les processus de vieillissement ;
- Puisse être accessible au personnel technique ;
- Puisse être accessible aux équipes dirigeantes
- Puisse aboutir facilement à une stratégie de surveillance et de maintenance ;
- Puisse aider à l'élaboration d'un business plan ;
- Ait déjà été utilisée avec succès pour des infrastructures à forts enjeux.

D'un point de vue méthodologique, l'approche doit avoir les qualités essentielles suivantes :

- **Consistante** : limiter la subjectivité des évaluations afin d'assurer la consistance des résultats, quel que soit le contexte ;
- **Exhaustive** : assurer la prise en compte de tous les problèmes importants;
- **Transversale** : assurer la comparabilité de tout types de problèmes et de solutions;
- **Evolutive** : pouvoir intégrer l'évolution des problèmes et des contraintes dans le temps ;

- **Décisionnelle** : fournir tous les éléments nécessaires à une décision optimisée, communicable et défendable ;

4. LA GESTION PAR LES RISQUES

En 2002, une équipe de chercheurs du groupe EDF (Electricité de France) travaillant sur la méthode d'analyse de risques appliquée au secteur des déchets nucléaires réalise rapidement la puissance de son approche et la diversité des autres secteurs du génie civil auxquels elle pourrait être appliquée. La société OXAND fût alors créée, avec comme objectif de faire profiter le monde du génie civil d'un savoir-faire développé dans un des secteurs les plus pointus.

Dans cette approche, **le risque (R) correspond à une mesure de l'importance des problèmes**. Sa définition de base est le produit de la **probabilité d'occurrence** (ou fréquence F) d'un problème (souvent issu d'une défaillance) et de la **gravité (G) des conséquences** associées :

$$[1] \quad R = F \times G$$

Cette définition est depuis longtemps utilisée dans les domaines de la finance, des assurances ou dans les domaines à risques élevés comme l'industrie aérospatiale, pétrochimique et nucléaire. Aujourd'hui, elle est de plus en plus acceptée dans le domaine du génie civil, qui doit faire face à des problèmes de fiabilité dans un contexte budgétaire limitant.

Deux critères additionnels peuvent compléter cette définition du risque : sa « **défectabilité** » (ou à l'inverse l'incertitude associée), ce qui permet d'intégrer l'inconnu, et son **évolutivité**, ce qui permet d'intégrer entre autres certains processus de vieillissement.

La gestion par les risques peut être décomposée en ses activités principales (Figure 5) :

- **L'identification des risques** consiste à identifier toutes les fonctions d'un système comme tous ses composants pour lesquels une défaillance conduirait à une perte d'une ou de plusieurs fonctions du système. Cette analyse fonctionnelle doit être aussi exhaustive que possible afin d'éviter l'omission d'un mode de défaillance.
- **L'estimation des risques** consiste à estimer (quantitativement ou qualitativement) la probabilité et les conséquences d'un mode de défaillance.
- **L'évaluation des risques** est l'étape où l'on associe le risque au seuil de tolérance ou d'acceptabilité du responsable d'une infrastructure.
- **Le traitement des risques** consiste à trouver une solution à un risque inacceptable.

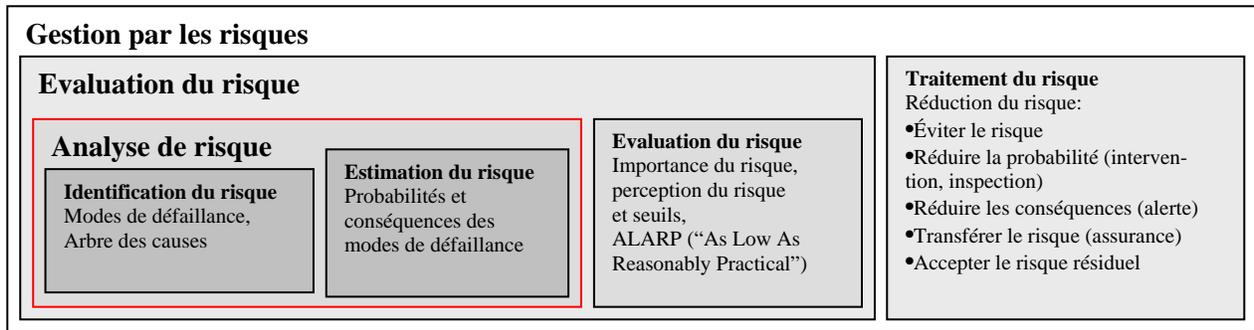


Figure 5: Étapes de la gestion par les risques (CSA, 1991)

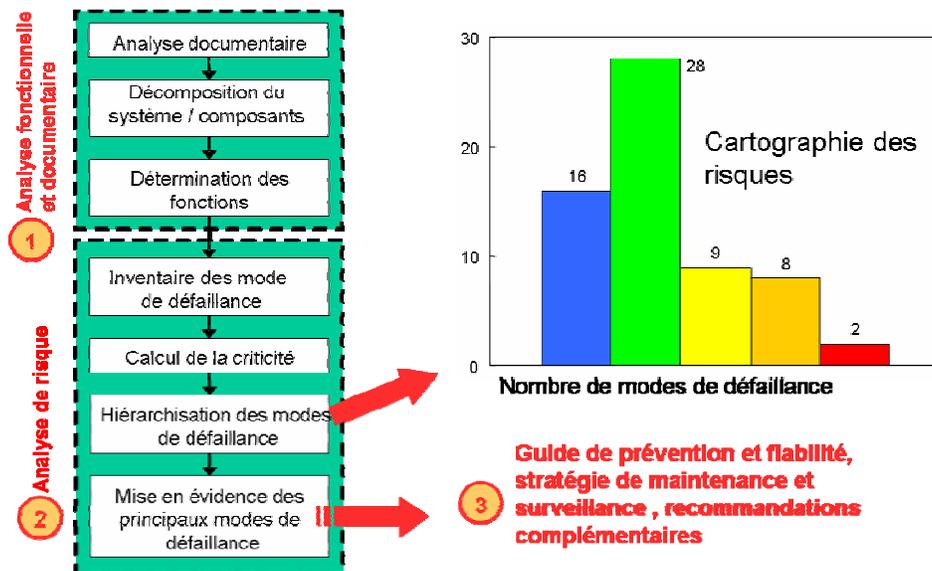


Figure 6: Approche OXAND de la gestion par les risques appliquée aux infrastructures de génie civil

Le principe méthodologique (Figure 6) consiste à effectuer une analyse fonctionnelle exhaustive du système étudié dans laquelle toutes les fonctions et les composants aussi bien que leurs corrélations sont pris en compte. Ceci est fait en utilisant les données « maison » ainsi que le retour d’expérience. Cette étape nécessite de se placer selon une approche système et d’abandonner l’approche composant utilisé en phase de design d’une construction. Enfin, l’exhaustivité requiert l’utilisation d’un référentiel méthodologique garantissant celle-ci.

Une fois cette étape terminée, l’analyse de risques formelle commence. Cette étape consiste à définir tous les modes de défaillance. On attribue ensuite à chaque mode un niveau de fréquence (probabilité) et une gravité (conséquences), ceci en proche collaboration avec les propriétaires/dirigeants du système à considérer. Ces niveaux peuvent être exprimés par des

valeurs numériques, si disponibles, ou grâce à l'aide de tables étalonnant certains niveaux à des intervalles représentatifs, définis de manière qualitative et/ou qualitative. Ces grilles doivent être définies d'après le secteur d'application et la perception des gérants des infrastructures. Ainsi, plusieurs définitions de gravité peuvent être établies pour traduire les différents niveaux de conséquence, qu'ils soient humains, économiques, financiers, politiques, etc. Une fois que les niveaux de fréquence et de gravité sont attribués à chaque mode de défaillance, un niveau de criticité peut être défini (figure 3). Un procédé supplémentaire peut être appliqué à ce niveau de criticité, en prenant en compte la « détectabilité » du mode de défaillance (la capacité à mesurer ou à prédire son événement), ou encore son « évolution » lorsque des causes de défaillance peuvent évoluer au cours du temps (conditions d'exploitation, vieillissement, etc.).

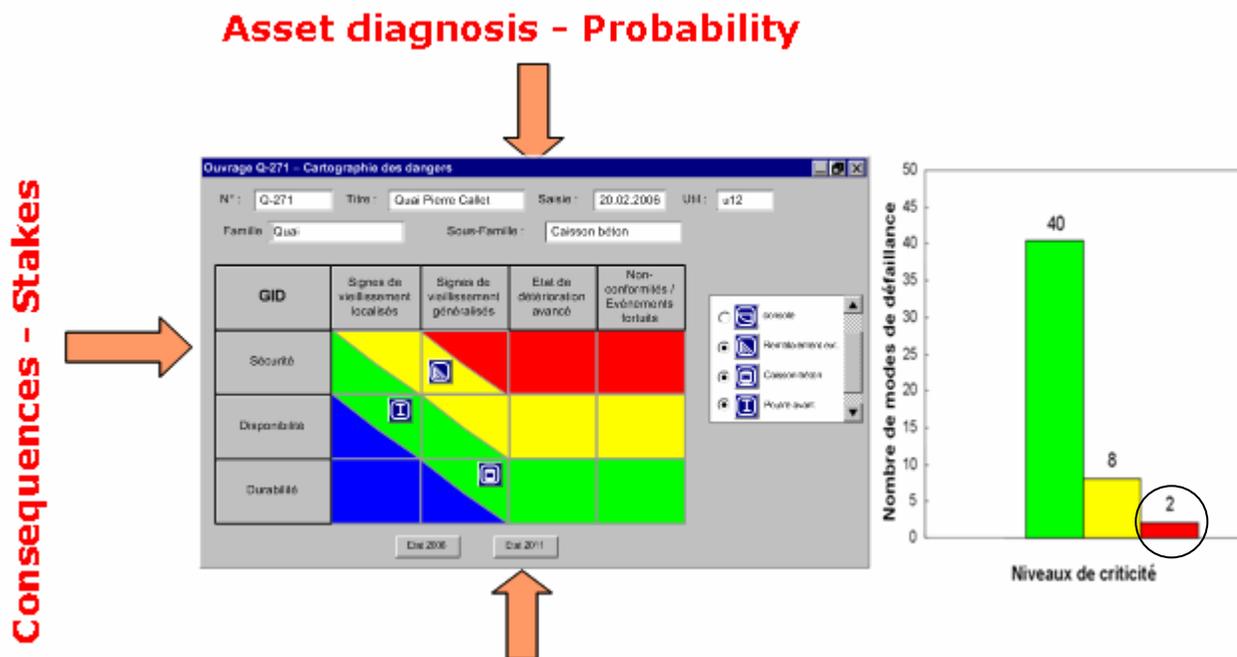


Figure 7: Exemples de grille et cartographie des risques sur un ouvrage de génie civil. Deux risques à haute criticité sont détectés.

La cartographie obtenue permet de **hiérarchiser les modes de défaillance et leur visualisation constitue une force de communication évidente pour défendre le plan d'action de maîtrise des risques.**

L'efficacité de cette approche ne s'arrête pas là. Comme les modes de défaillance ont été décrits en termes de fonctions et de composants, il est maintenant possible d'identifier quels composants contribuent le plus au risque global ou à la criticité d'un système (voir figure 5, figure 6 et la description dans la section suivante). **Associés à une analyse économique, différents scénarios de maintenance peuvent être simulés** pour identifier lesquels sont les plus efficaces en termes de coûts ou de diminution de criticité globale.

5. GAINS DE LA GESTION PAR LES RISQUES

Recourir à l'analyse de risques génère de nombreux gains au propriétaire/gestionnaire de l'infrastructure. L'information sur les risques obtenue par la méthode permet tout d'abord de prévoir et de mettre en place une stratégie d'inspection et d'instrumentation, se concentrant sur les composants qui posent un risque maximal (probabilité et gravité). Comme nous l'avons vu, c'est aussi un outil puissant dans l'établissement d'une stratégie de maintenance, qui peut accroître la durée de vie de la structure. Parallèlement, une combinaison de la méthode avec des outils financiers peut aider à optimiser les budgets dans les secteurs à enjeux. En outre, lorsque les mécanismes de vieillissement peuvent être prédits ou modélisés (par exemple, les processus de corrosion ou réaction alcaline des agrégats), il devient possible de projeter la stratégie à long terme pour prévoir l'évolution de l'infrastructure.

Cette stratégie peut même devenir « vivante » si elle est couplée à un monitoring en temps réel et à un retour d'expérience, en donnant naissance à un planning d'évaluation et de maintenance en temps réel.

La force de l'approche est la rapidité avec laquelle peut se construire un plan d'actions objectif. Les impacts en termes d'accélération des prises de décisions et de communication sont spectaculaires. Il en résulte aussi que sur le plan financier, les études sont extrêmement compétitives par rapport aux approches « traditionnelles » sans qu'elles soient concurrentes mais plutôt complémentaires. Les approches d'ingénierie traditionnelle ayant leur valeur ajoutée lors de la définition chiffrée des solutions techniques devant être construite sur la base du cahier des charges fournis par l'analyse des risques.

Un autre gain important apporté par l'analyse de risque est le fait de rapprocher les points de vue des ingénieurs et des dirigeants. En effet, notre expérience montre qu'une telle approche fournit une base commune facilitant les échanges d'idées sur les priorités et les enjeux parmi les différents niveaux hiérarchiques.

Enfin, d'une manière plus globale, on estime que les **gains financiers** apportés grâce à l'utilisation de l'analyse de risques s'élèvent à 20 voire 100 fois le coût de l'analyse elle-même, auquel s'ajoute immédiatement environ 20% d'économie annuelle sur les plans de maintenance.



Scenario : set safety and availability levels

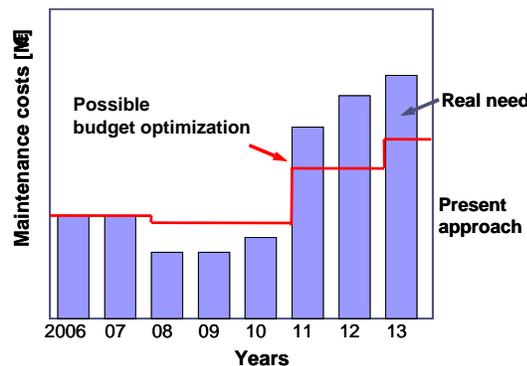


Figure 8: Exemples de processus de vieillissement intégrés à l'analyse de risques: corrosion des armatures (haut à gauche) et réaction alcali granulat (haut à droite). Analyse technico-économique de gestion budgétaire d'une infrastructure (bas).

6. CHAMPS D'APPLICATION

Les approches développées se positionnent entre l'ingénierie technique traditionnelle et la gestion d'entreprise. En utilisant le risque comme un indicateur à la fois de l'état d'une infrastructure et des conséquences de sa défaillance à remplir sa fonction, la méthodologie développée et le savoir-faire qui l'accompagne a montré une très grande performance dans des secteurs de génie civil aussi variés que transport, réseaux d'eau, portuaire, ferroviaire, navigation maritime, nucléaire, pétrolier et gazier, et plus récemment processus industriel.

L'étendue des enjeux pouvant être intégrés est très large : techniques, humains, économiques, environnementaux, juridiques, etc.

La Figure 9 illustre l'application de l'approche dans le secteur portuaire, avec (gauche, en haut) une liste d'action et leur ratio coûts/bénéfices (maîtrise de risque) associés. Cette liste est ensuite traduite en plan d'action (droit, en haut) qui fait intervenir les résultats des inspections prévues.

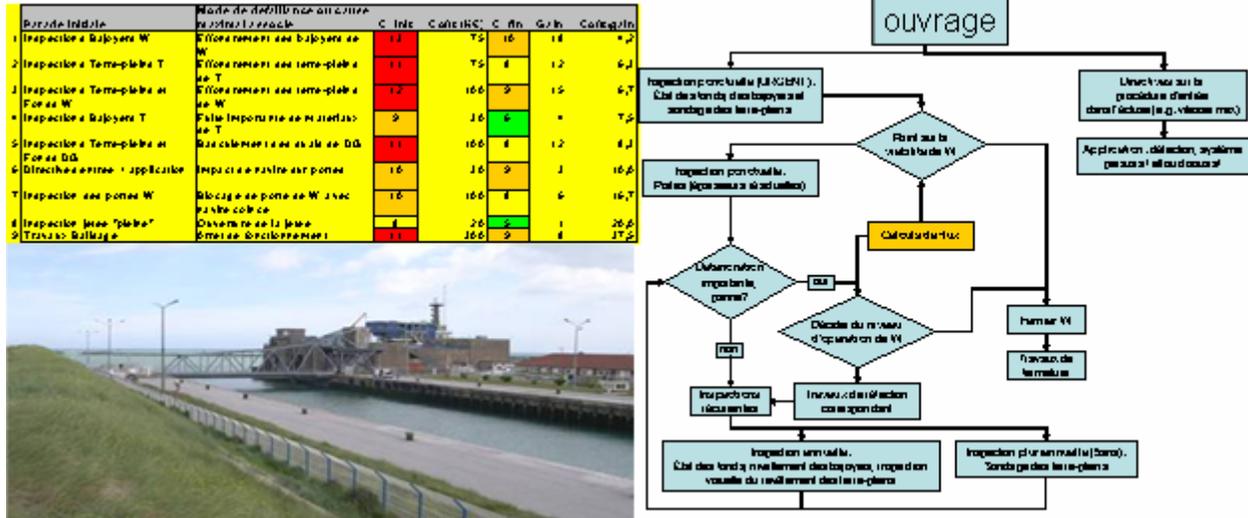


Figure 9: Plan d'action hiérarchisé pour un ouvrage portuaire

La Figure 10 illustre une stratégie de maintenance d'un ouvrage d'art (secteur énergétique) ayant été formulée à l'aide de l'analyse de risque.

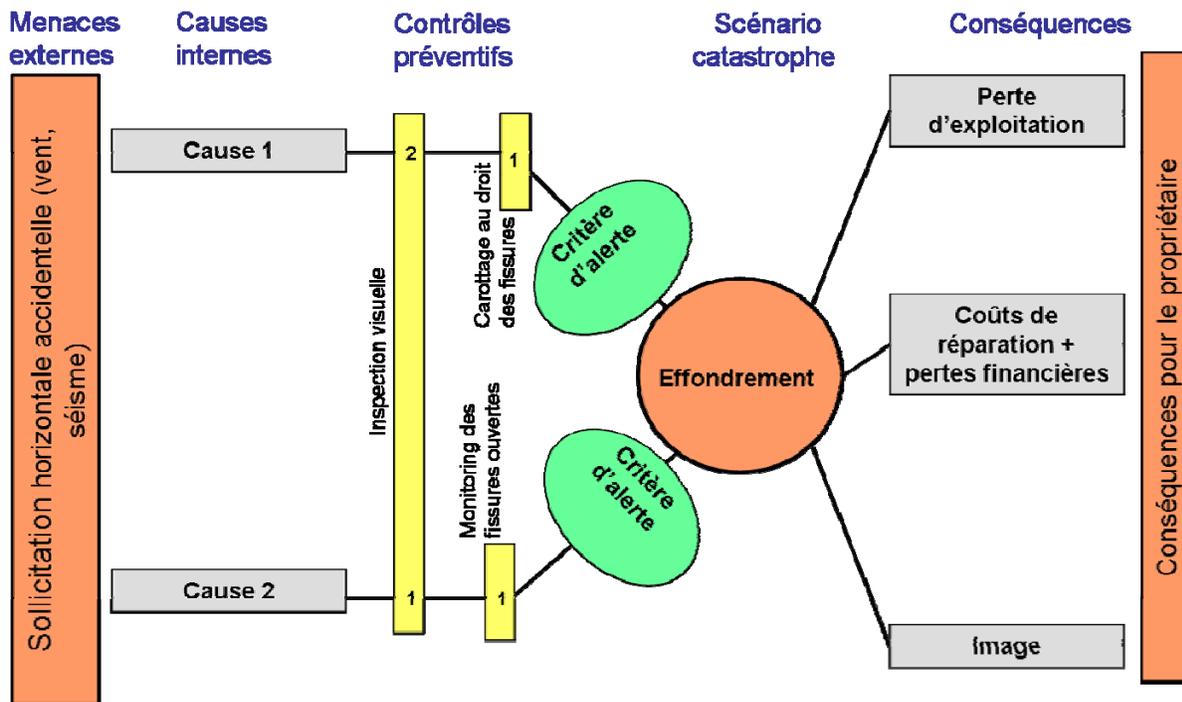


Figure 10: Exemple d'une stratégie de maintenance découlant d'une analyse de risque

La Figure 11 illustre un exemple de cartographie des risques d'un réseau routier en milieu urbain.



Figure 11: Méthodologie appliquée à des infrastructures urbaines: routes (gauche) et bâtiments (droite)

La Figure 12 illustre une cartographie des risques appliquées sur l'ensemble d'un parc d'ouvrages.

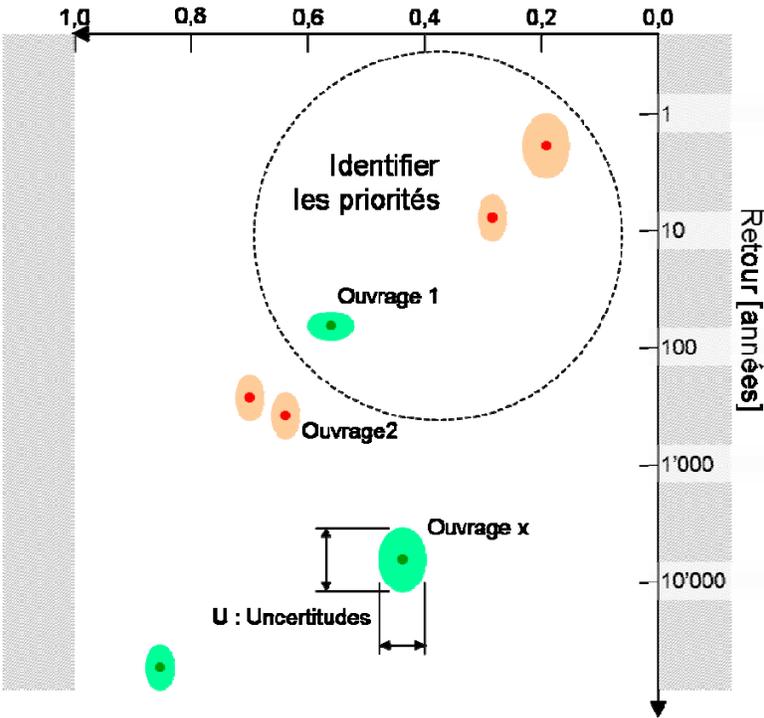


Figure 12 : Application à un parc d'ouvrages de différents types

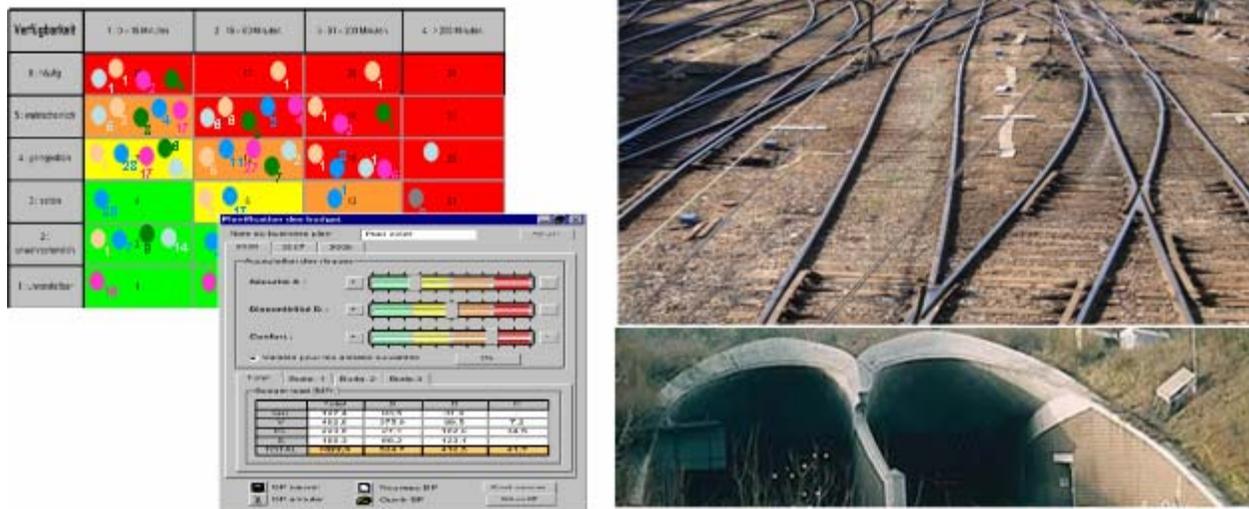


Figure 13: Hiérarchisation d'actions de maintenance

La Figure 13 illustre un exemple de plan de maintenance dans le secteur ferroviaire obtenu de l'analyse de risques et permettant une gestion par enjeu (disponibilité, confort, sécurité) plutôt par défauts. La Figure 14 illustre un plan de surveillance élaboré avec l'analyse de risque et visant la prolongation de durée de vie d'une conduite en béton armé.

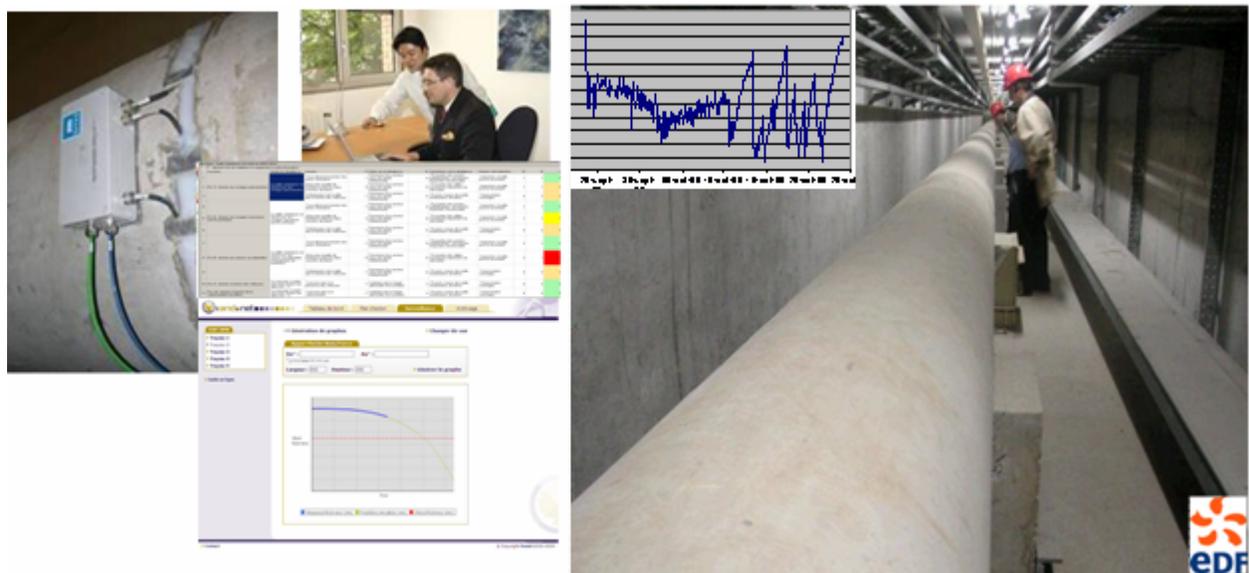


Figure 14 : Programme de surveillance conçu à l'aide de l'analyse de risques

7. DÉBAT

Les objections les plus courantes au recours à l'évaluation du risque sont que les ouvrages sont "sûrs", "respectueux des normes" et que par conséquent ils ne présentent aucun risque. Et pourtant l'expérience nous montre trop souvent que des défaillances qualifiées d' "improbables" peuvent survenir, dues à des éléments imprévus (changements climatiques, terrorisme...), des défauts de matériaux, des erreurs de conception, une évolution dans l'utilisation ou les contraintes exercées, etc. La règle d'or est que "le risque zéro n'existe pas". Le risque peut être négligeable, tolérable, dans des limites acceptables mais jamais nul. Cette nouvelle approche oblige les ingénieurs et les décideurs à adopter un mode de réflexion probabiliste et non plus déterministe. Notre système d'éducation ne fait que commencer à intégrer ces concepts dans les programmes d'études en génie civil.

Une objection similaire est également soulevée quand l'évaluation porte sur des infrastructures à "faible probabilité et forts enjeux" tels que certains ouvrages d'art. Le commentaire qui revient le plus souvent est que "zéro multiplié par l'infini" donne un résultat non quantifiable. Et pourtant, même pour ce type d'infrastructures, des experts ont dû se prononcer sur le seuil acceptable de risque. Si un expert peut se prononcer sans aucun autre outil que son propre jugement, ne serait-il pas possible a minima de formaliser celui-ci et de pouvoir ainsi identifier quels composants contribuent le plus au risque et de quelle manière il peut être réduit.

Une autre idée reçue est que l'analyse de risque se substitue à l'avis d'expert. Or une telle vision est complètement erronée. A chaque étape de l'analyse de risque, les experts interviennent pour évaluer de manière transparente les valeurs associées à la probabilité de défaillance (fréquence qualitative) ou à la gravité des conséquences. De surcroît, une conclusion qui viendrait à l'encontre d'un avis d'expert ne serait pas recevable. L'analyse de risque, tout comme l'outil informatique ou n'importe quel autre outil mis à la disposition des ingénieurs et des décideurs, ne peut nullement se substituer au jugement mais vient le conforter et surtout le formaliser.

Une dernière objection souvent rencontrée est que l'analyse de risque requiert une énorme quantité de données afin d'être fiable, données qui peuvent être difficilement accessible au gestionnaire de l'ouvrage. Or, l'expérience démontre que si pour mettre en œuvre une solution technique un certain niveau de précision est effectivement nécessaire, au contraire lorsque vient le temps de faire des choix, de décider, de gérer, le niveau de précision est largement moins important que la consistance, l'exhaustivité, la transversalité ou la clarté d'une approche. De plus, comme l'analyse de risques permet d'intégrer justement l'incertitude comme source de risques, il devient possible d'identifier les problèmes pour lesquels celle-ci est importante, et donc de cibler et circonscrire précisément le besoin en information additionnelle (activités de caractérisation, d'inspections, de surveillance).