

# EXPLOITATION D'UNE CONCESSION AUTOROUTIÈRE À FORTES EXIGENCES DE PERFORMANCE : MAÎTRISE DES COÛTS DU RISQUE ASSOCIÉ

**Laurent AUGÉ, Isadora CORNISH-BOWDEN, Bruno GÉRARD**  
Oxand France, 49 avenue Franklin Roosevelt, 77210 Avon  
**Richard FRENETTE**  
Oxand Canada

## 1. INTRODUCTION

**L**a gestion dans le temps des infrastructures de génie civil, aux différents stades de leur cycle de vie (conception, construction, exploitation, démantèlement), est une problématique à laquelle doit faire face tout maître d'ouvrage ou gestionnaire d'actifs. Même si la sécurité des biens et des personnes revêt un caractère primordial et prioritaire dans ce domaine, une bonne gestion des ouvrages ne répond pas moins à de fortes exigences de performance économique. Pour chaque ouvrage, les enjeux d'une bonne gestion peuvent se décliner de différentes manières pour chacun des acteurs (maître d'ouvrage, exploitant, commanditaire...), en fonction de l'organisation et la répartition de responsabilité entre ceux-ci. Dans ce contexte se développe actuellement de plus en plus la gestion des risques appliquée à la gestion des infrastructures de génie civil [1]. Elle fournit un cadre permettant une meilleure définition des responsabilités et des budgets, tout en fiabilisant l'identification des causes de dérives ou d'incidents. Elle permet notamment de gérer l'importance croissante du vieillissement de l'état des infrastructures, en proposant une priorisation des actions. De plus, il se dessine également aujourd'hui une tendance justifiée à l'approche globale de la gestion du cycle de vie des infrastructures, c'est-à-dire à une optimisation sur le long

terme des performances économiques des projets. Un révélateur de cette tendance est le développement actuel des projets intégrés de conception, construction, financement, exploitation et maintenance (CCFEM) d'infrastructures de transport (réseaux autoroutiers, ouvrages d'art, tunnels...), pour lesquelles la vision de la gestion de l'actif sur l'ensemble de son cycle de vie est nécessaire dès la phase de conception du projet.

## 2. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

L'étude présentée concerne la concession d'un réseau autoroutier européen (Pays-Bas) pour lequel le contractant devra assurer l'ensemble du projet intégré de conception, construction, financement, maintenance et exploitation sur les trente prochaines années. Un appel d'offres a été lancé par l'autorité publique pour confier à un contractant privé l'exploitation de la concession autoroutière. De tels projets se développent de plus en plus dans le monde aujourd'hui (Viaduc de Millau en France, Projet « Sea to Sky » en Colombie Britannique, autoroute 30 au Québec).

Afin de garantir la disponibilité du réseau, la sécurité et la qualité pour les usagers, un système de pénalités a été instauré à l'initiative de l'autorité publique, dans le but d'inciter fortement le contractant à se prémunir de tout écart

par rapport aux objectifs de performance, ainsi qu'à prévoir un budget pour le financement des risques associés. La qualité de la réponse des soumissionnaires consultés a notamment été appréciée à partir de leurs propositions sur ce point. Le système de pénalités a pour but en particulier de minimiser les indisponibilités du réseau. Etant donné les amendes importantes imposées au contractant en cas de non-respect des critères de disponibilité, le contractant fait face à un risque potentiel fort associé aux indisponibilités fortuites, et ce malgré les précautions déjà prises pour fiabiliser l'exploitation. Un des soumissionnaires a ainsi consulté OXAND en phase de constitution de son offre pour obtenir une évaluation financière du risque associé aux indisponibilités fortuites. Son besoin principal était de prévoir et planifier la prise en charge de ce risque et d'expliquer sa position au client public (répartition des responsabilités, financement, acteurs, organisation,...).

### 3. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif principal de l'étude était de permettre au contractant, en phase de réponse à appel d'offres, de provisionner le coût du risque associé aux indisponibilités du réseau autoroutier. Les indisponibilités peuvent être de deux natures différentes : programmées ou fortuites. Les indisponibilités programmées correspondent aux prévisions d'intervention pour maintenance programmée. Les indisponibilités fortuites sont celles qui sont non-prévues et qui dépassent les limites pré-définies. Comme celles-ci peuvent survenir en marge d'un programme d'exploitation et de maintenance optimisé pour justement les réduire au minimum, on parle ainsi de risque résiduel. Tout l'enjeu de l'étude consistait donc à évaluer le risque résiduel associé aux indisponibilités fortuites.

En particulier, il s'agissait de :

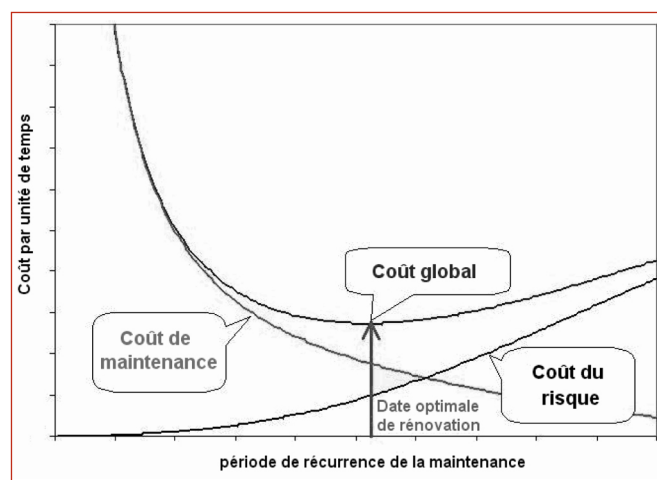
- identifier et estimer les risques :
  - fréquence d'occurrence : identifier les mécanismes de vieillissement susceptibles de remettre en cause les critères de disponibilité, évaluer leur cinétique, établir les probabilités de défaillance associées ;
  - gravité : identifier les scénarios de pénalités applicables et leur modalité d'application ;
- monétiser les risques, c'est-à-dire chiffrer financièrement le montant des risques ;
- caractériser l'évolution de ce risque chiffré quantitativement sur les trente années d'exploitation. Ceci permet de savoir combien et à quelles échéances provisionner pour le risque.

Une seconde phase à cette étude avait comme objectif l'optimisation globale des coûts prévisionnels d'exploitation rapportés à la totalité de la durée d'exploitation. Les coûts totaux d'exploitation comprennent :

- les coûts de construction, en fonction du dimensionnement retenu ;
- les coûts de maintenance sur l'ensemble de la durée de la concession ;
- les coûts d'exploitation sur l'ensemble de la durée de la concession ;

- le coût du risque associé aux indisponibilités.

L'étude a permis de faire correspondre un risque résiduel chiffré financièrement, relatif aux indisponibilités fortuites, à une série de scénarios concernant la qualité du design et les niveaux de maintenance mis en œuvre. Il est aisé de comprendre que plus les choix de design sont robustes ou plus la maintenance mise en œuvre est importante, plus le risque résiduel sera faible, et inversement. Par conséquent, le choix définitif des hypothèses de design et de maintenance relève d'une démarche de recherche d'optimum, visant à minimiser les coûts totaux du projet de concession. La Figure 1 illustre ce propos.



**Figure 1 : Coûts totaux (coûts de la maintenance + coût du risque) en fonction du niveau de maintenance mis en œuvre (période entre deux opérations de maintenance).**

### 4. DESCRIPTION DE L'INFRASTRUCTURE ÉTUDIÉE

Le tracé autoroutier étudié est l'une des connexions majeures aux Pays-Bas entre Amsterdam et la région située au nord du canal de la Mer du Nord, ce qui le rend particulièrement stratégique. Il est constitué d'un réseau autoroutier d'environ 15 km et datant d'une quarantaine d'années qui relie 3 autoroutes et permet de traverser le canal par l'intermédiaire d'un tunnel immergé d'une longueur d'environ 600 m.

Le tunnel existant est formé de deux tubes à circulation unidirectionnelle à deux voies par direction, occasionnant un rétrécissement sévère de la circulation. Il est devenu clair ces dernières années que la capacité de l'ouvrage était devenue insuffisante par rapport au trafic croissant, estimé à 100 000 véhicules par jour. Compte-tenu de ce besoin, la décision de construire un nouveau tracé parallèle à l'ancien a été prise par le Ministère des Transports des Pays-Bas, avec l'ajout d'un tunnel supplémentaire à deux tubes (Figure 2), le premier permettant de désengorger le réseau en doublant les capacités du tunnel actuel, et le second permettant d'ajouter 2 voies supplémentaires dans un sens ou dans l'autre lors des heures de pointe. Le tracé final atteindra alors une longueur cumulée proche de 50 km.

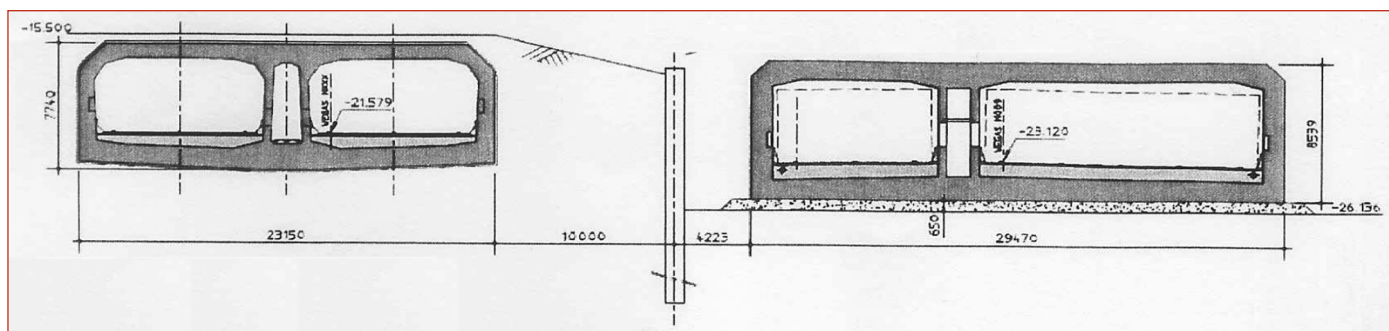


Figure 2: Système étudié : ancien et nouveau tunnels.

L'étude concernait non seulement le génie civil des ouvrages mais également tous les équipements, le tunnel de secours situé entre les tubes de circulation de véhicules et le système de surveillance et de gestion dont sont dotés les tunnels.

## 5. EXIGENCES DE PERFORMANCE DE L'INFRASTRUCTURE

La construction de ce nouveau tracé a donné lieu à un appel d'offre de type CCFEM (Conception, Construction, Financement, Exploitation et Maintenance). A la suite de la construction qui devrait s'étaler sur 4 ans et qui comprend la rénovation du tracé existant, le contractant aura également la charge d'exploiter et de maintenir l'ensemble du réseau pendant 30 ans et d'assurer que l'Etat pourra ensuite continuer son exploitation pendant une durée similaire. Le paiement du contractant au cours de l'exploitation se fera par l'Etat sur la base du niveau de disponibilité réel. Toute indisponibilité est considérée par l'Etat comme pénalisante pour les usagers du réseau et impacte alors très fortement la rémunération du contractant par l'intermédiaire de pénalités très élevées, de l'ordre du million d'euros par journée d'indisponibilité non prévue.

Le nombre élevé d'usagers journaliers rend toute indisponibilité du tracé très critique. Pour éviter au maximum que le tracé subisse constamment des opérations de maintenance, le contrat de construction et d'exploitation comprenait une clause de pénalité pour indisponibilité ainsi que des critères de qualité et de confort à respecter. Ces pénalités particulièrement élevées s'appliquent dès lors que ces critères de qualité ne sont pas respectés.

Ainsi une trentaine d'exigences de fonctionnement (Tableau 1) étaient définies dans les spécifications techniques depuis la qualité de la chaussée (rugosité, drainage, ...) jusqu'au fonctionnement correct des équipements de sécurité, notamment à l'intérieur du tunnel (éclairage, ventilation, signalisations lumineuses...). Pour chacun de ces critères et au-delà d'un certain niveau de défaillance des équipements (ex : nombre de lumières éteintes) ou de dégradation de la chaussée (ex : temps de drainage des eaux de pluie), une maintenance est imposée et le tronçon sur lequel se produit la défaillance est considéré comme étant indisponible, déclenchant alors ces pénalités.

Le montant de la pénalité appliquée dépend de plusieurs paramètres, notamment de la durée de l'indisponibilité

(nombre de quarts d'heure), du tronçon sur lequel elle se produit, du nombre de voies fermées par rapport au nombre de voies qui restent ouvertes à la circulation, et du moment de la journée (heure de pointe, heure creuse, nuit), mais aussi de la date de l'indisponibilité (pendant la construction ou la rénovation des tracés, ou pendant leur exploitation). Ces pénalités peuvent rapidement atteindre plusieurs millions d'euros.

Une parade possible contre ces pénalités est d'anticiper les défaillances et de planifier les actions de maintenance avant qu'elles soient imposées. L'exploitant du système dispose en effet de 35 nuits/an d'indisponibilité autorisée pour maintenance pendant lesquelles les pénalités ne sont pas appliquées. L'enjeu pour le contractant est alors de trouver l'optimum de son programme de maintenance entre l'anticipation des travaux qui permet d'éviter les indisponibilités fortuites et leur report qui permet d'éviter la multiplication des actions de maintenance. Il doit également prendre en considération le fait que les indisponibilités fortuites ont généralement une durée allongée par le « temps de réaction » et de sollicitation des équipes.

A ces pénalités concernant le confort des usagers du tracé s'ajoute également un autre système de « points de pénalité » relatif à l'état général des tunnels (génie civil) et à la qualité générale de la prestation vis-à-vis du client (Ministère des Transports des Pays-Bas). Ces points sanctionnent en particulier les retards d'information concernant les indisponibilités fortuites et les délais importants d'intervention pour réparer. Dans cette optique, l'ajout d'un deuxième tunnel a posé la problématique de sa construction à côté d'un tunnel existant sans en impacter la disponibilité. Une étude des risques liés à cette construction a également été menée par OXAND.

## 6. MÉTHODOLOGIE EMPLOYÉE

L'objectif de l'étude était d'évaluer financièrement le risque associé aux pénalités induites par les indisponibilités fortuites du système. Une analyse préliminaire des exigences de fonctionnement du système a mis en évidence le fait que certaines de ces exigences étaient plus critiques que d'autres. Cette criticité préliminaire a été estimée sur la base d'une dizaine de critères tels que :

- la possibilité d'anticiper la défaillance ;
- la fréquence de défaillance prévue ;
- la complexité de la remise en conformité (durée de la maintenance et temps nécessaire pour la préparer) ;

Catégorie principale	Catégorie	Description
Sécurité (tunnels)	Gestion d'accident	Lutte contre les incendies
		Fonctionnement des postes de secours
		Fonctionnement du système de ventilation du tunnel
		Présence d'une surpression dans le tunnel de secours
		Fonctionnement des barrières mécaniques de fermeture des voies
	Eclairage	Fonctionnement de l'éclairage dans les tunnels
	Evacuation	Fonctionnement de l'éclairage du tunnel de secours
		Fonctionnement des signaux lumineux indiquant les chemins d'évacuation et la localisation des extincteurs
		Accès aux tunnels de secours
		Guidage lumineux de l'évacuation
Gestion du trafic	Evacuation/ communication	Fonctionnement du signal d'alerte sonore
		Fonctionnement du système de sonorisation
	Communication	Fonctionnement du système de surveillance et de gestion
		Possibilité de communication entre les services de secours et l'utilisateur
	Communication	Fonctionnement de la signalisation
	Signalisation des ralentissements	Fonctionnement des détecteurs de trafic
	Regulation	Fonctionnement des détecteurs de hauteur de véhicules
		Fonctionnement de la signalisation spéciale
Sécurité (générale)	Chaussée	Rugosité de la surface
		Dévers transversal de la surface
		Erosion des rainures
		Uniformité longitudinale de la surface
		Régularité longitudinale au niveau des joints de dilatation
		Capacité de drainage de l'eau de la couche de surface
		Accumulation eau
	Guidage	Dégradation de la couche supérieure de la chaussée
		Fonctionnement des barrières de sécurité
		Fonctionnement du système d'assainissement
	Drainage des substances	Fonctionnement du revêtement résistant à la chaleur
		Signalisation de la hauteur sous plafond et largeur des voies

**Tableau 1 : Critères de qualité et de confort à respecter par le réseau.**

- la possibilité de fractionner les actions de maintenance de manière à limiter son impact sur la disponibilité ;
- le coût de la pénalité liée au non respect de l'exigence
- etc.

Cinq exigences principales sont ressorties de cette première analyse comme pilotant le risque pendant toute la durée d'exploitation ou comme représentatives de l'ensemble en termes d'impact financier et de type de défaillance (deux exigences relatives à la qualité de la chaussée, et trois exigences liées aux équipements) :

- rugosité de la chaussée ;
- accumulation d'eau sur la chaussée ;
- fonctionnement du système de ventilation dans les tunnels ;
- fonctionnement des détecteurs de trafic ;
- fonctionnement du système de surveillance et de gestion (salle de contrôle).

Le risque d'indisponibilité évalué financièrement à travers les pénalités encourues a alors été calculé précisément pour ces cinq exigences dans un premier temps et extrapolé à l'ensemble dans un second temps.

La démarche adoptée pour l'étude de l'indisponibilité liée à un problème de rugosité de la chaussée et à une défaillance de ventilateurs est présentée ci-dessous. De

manière générale, la probabilité d'une défaillance au cours du temps a été calculée dans un premier temps sur la base du retour d'expérience d'OXAND et des données du constructeur sur les divers équipements considérés. La probabilité de la défaillance a ensuite permis de déterminer la probabilité cumulée d'une défaillance pendant la période de concession de 30 ans.

La valeur chiffrée globale du risque de pénalité a ensuite été estimée pour chacun des tronçons en considérant ses spécificités en termes de date de construction (tronçon nouveau ou rénové), de montant de la pénalité et de probabilité de défaillance compte tenu de sa longueur et la durée estimée pour remettre le système en conformité suite à une défaillance fortuite.

## 6.1. Rugosité de la chaussée

Cette exigence consiste à définir une rugosité (coefficient de frottement) minimale afin de garantir une bonne adhérence des véhicules sur la chaussée.

La surface des chaussées du réseau sera fabriquée à partir de deux types d'asphalte selon sa localisation, un béton de type ZOAB (béton bitumineux drainant) à l'extérieur des

tunnels pour permettre l'évacuation des eaux de pluies à travers la chaussée, et un béton de type DAB (béton bitumineux dense) à l'intérieur des tunnels. Ces deux types d'asphalte possèdent des propriétés de rugosité et des cinétiques de vieillissement différentes, ce qui implique des probabilités de défaillance (non respect de l'exigence) différentes au cours du temps. Ces deux asphaltes ont donc été traités séparément. L'exemple qui suit présente les résultats obtenus pour l'étude du béton drainant ZOAB. En règle générale, la rugosité d'une chaussée augmente au cours de la première année d'exploitation dû à l'érosion progressive du liant autour des granulats, qui deviennent alors plus saillants. Ainsi, le coefficient de frottement initial peut être relativement bas et la probabilité de non respect de l'exigence de rugosité est alors non-nulle. Lorsque le liant présent en surface a disparu, le coefficient de frottement commence à diminuer de nouveau du fait du polissage des granulats et se stabilise après environ 5 ans. La probabilité de défaillance augmente alors pendant cette période, jusqu'à la rénovation de surface de la chaussée prévue tous les 10 à 13 ans par le constructeur, permettant de pallier également les autres dégradations telles que formation de nids de caillou ou orniérage (critique notamment du point de vue de l'évacuation rapide des eaux de pluie). Le coût probabilisé des pénalités présenté dans la Figure 5 a été calculé en fonction du nombre de voies qui seraient

impactées par l'indisponibilité et en tenant compte des spécificités de chaussée des différents tronçons.

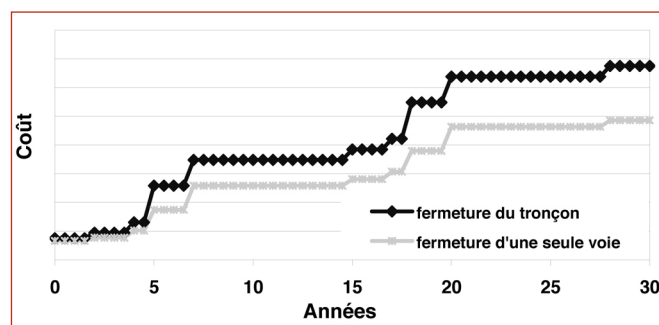


Figure 5: Coût probabilisé cumulé des pénalités d'indisponibilité dues à une trop faible rugosité de la chaussée.

## 6.2. Fonctionnement du système de ventilation dans les tunnels

Pour les équipements, la probabilité de défaillance a été déterminée d'après les données des constructeurs en utilisant une loi de type Weibull, souvent utilisée pour prédire et modéliser les durées de vie.

La loi de probabilité pour chacun des composants a été calée sur la base des durées de vie prévues (périodicités de remplacement prévues), des moyennes des temps entre pannes (*MTBF* : *mean time between failures*) fournies par les constructeurs, et des durées de vie utiles au cours desquelles une défaillance est très peu probable.

Dans le cas des ventilateurs, on considère la combinaison des probabilités de défaillance des ventilateurs eux-mêmes (usure des hélices) et des composants électroniques et électriques qui les alimentent (Figure 6).

Cette exigence n'est valable qu'au niveau des tunnels, et le risque de pénalité n'a donc été pris en compte que pour ces tronçons là.

Pour calculer le coût probable des pénalités, plusieurs choix de conception étaient possibles et notamment une possible redondance des ventilateurs était envisagée (Figure 7).

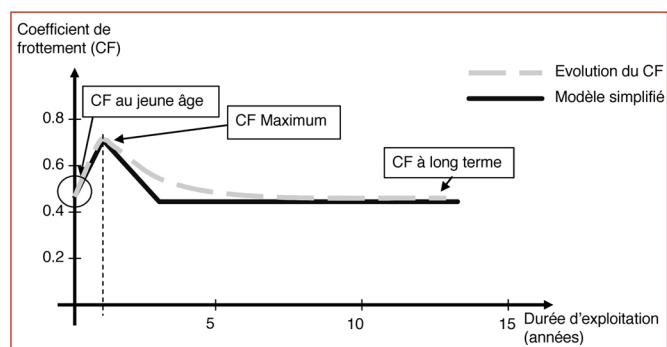


Figure 3: Évolution de la rugosité de l'asphalte dans le temps (valeur moyenne).

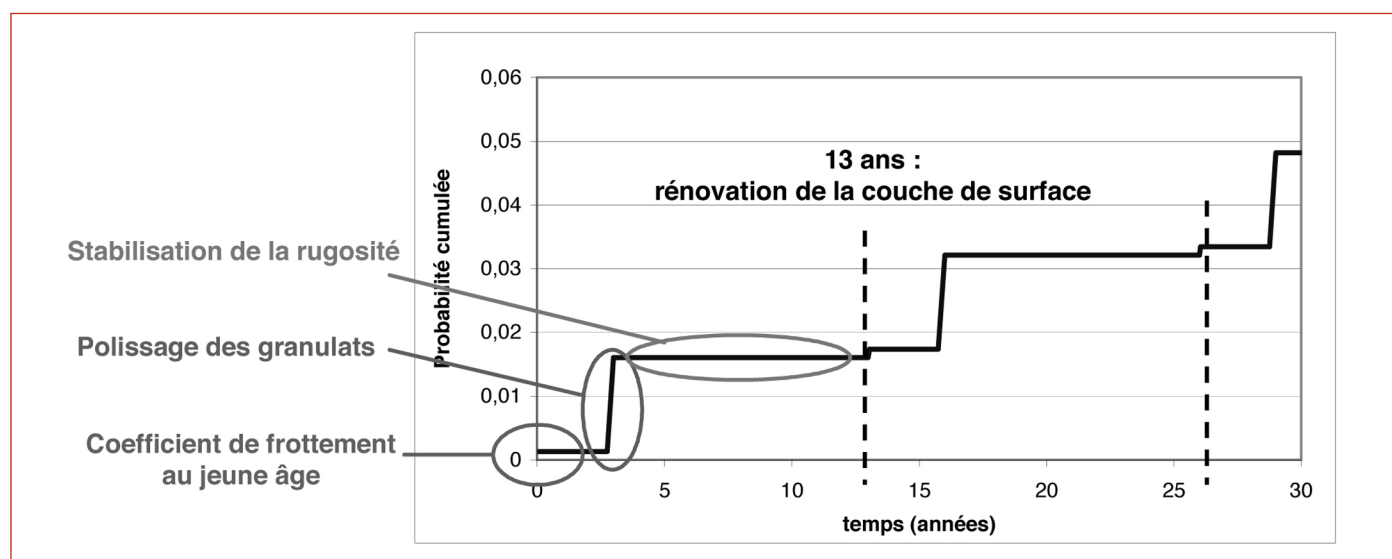


Figure 4: Probabilité cumulée d'une indisponibilité liée à la rugosité de la chaussée de type ZOAB.



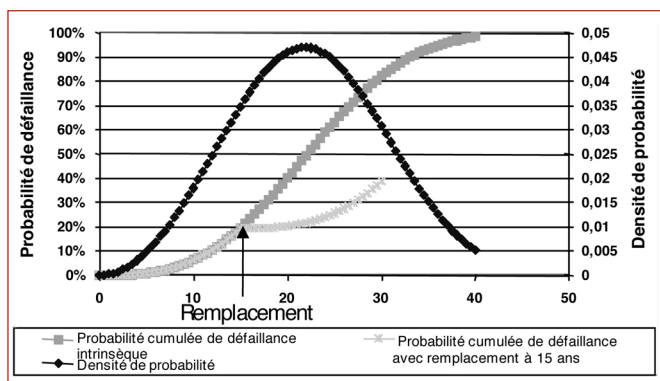


Figure 6: Probabilité de défaillance d'un ventilateur (hors composants électroniques).

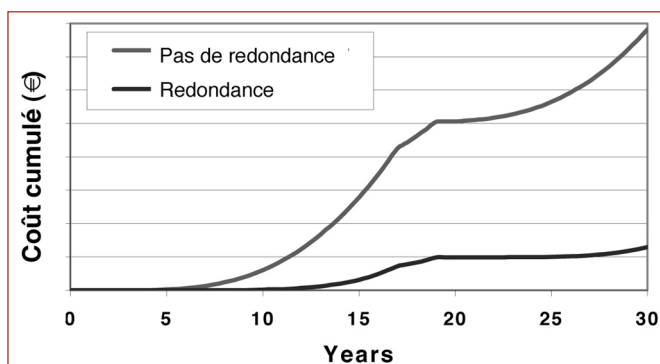


Figure 7: Valeur chiffrée cumulée dans le temps du risque résiduel d'indisponibilité liée à une défaillance de ventilateurs en fonction du choix de conception.

## 7. RÉSULTATS OBTENUS

L'approche adoptée a permis de traduire financièrement les risques d'indisponibilité liés aux exigences de performance du réseau en termes de qualité et de confort pour les usagers sur toute la période de la concession depuis la construction des nouveaux tronçons jusqu'à la fin d'exploitation. Pour chacune de ces exigences, le cumul des pénalités peut être déterminé, ce qui permet ensuite de déduire le coût total des pénalités liées au risque résiduel d'indisponibilités compte tenu des actions de maintenance prévues.

Le calcul du montant total probabilisé de pénalités d'indisponibilité a également permis de valider des choix de conception en déterminant l'optimum entre une conception

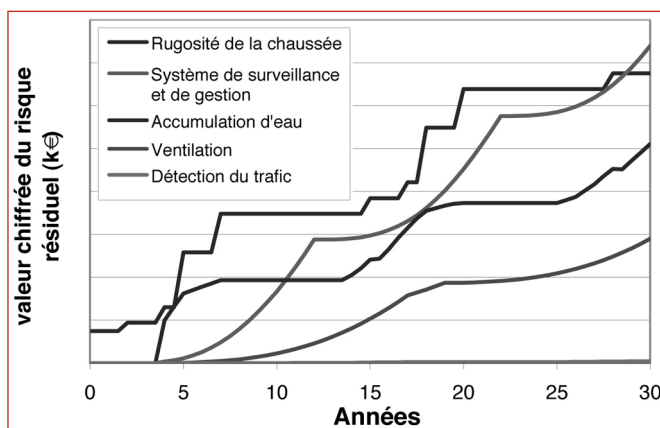


Figure 8: Valeur chiffrée cumulée dans le temps du risque résiduel d'indisponibilité pour chacune des 5 exigences analysées.

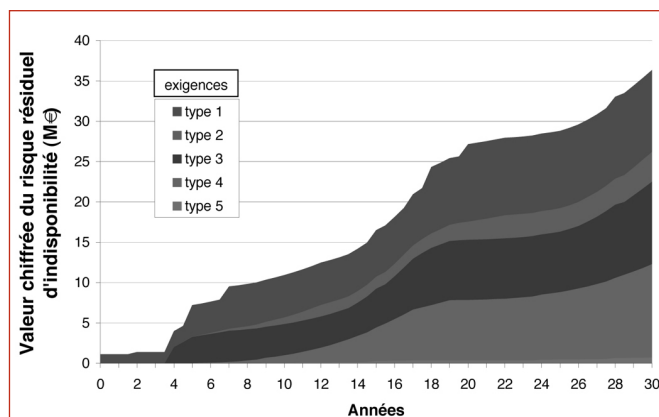


Figure 9: Valeur chiffrée cumulée dans le temps du risque résiduel global associé aux indisponibilités fortuites du tracé.

entraînant moins d'indisponibilités mais plus coûteuse (ex : redondance des systèmes) et le gain apporté par cette solution en termes de coût du risque associé à ces pénalités. De la même manière, le risque résiduel chiffré financièrement a également été calculé en considérant différentes périodicité de maintenance.

En fin d'étude, le client a obtenu une estimation probabilisée des pénalités qu'il aurait à payer avec sa répartition sur les 30 années d'exploitation. Cela lui a permis de connaître les périodes où la maintenance préventive serait à prévoir pour éviter des « pics » de défaillance.

## 8. COMMENTAIRES DES RÉSULTATS

Les résultats obtenus permettent au contractant de disposer de la visibilité quantitative nécessaire sur le risque résiduel associé aux indisponibilités fortuites du réseau autoroutier. De plus, la connaissance de sa répartition dans le temps dans les trente prochaines années rend possible la programmation des budgets dans le temps.

La valeur obtenue, de l'ordre de 35 M€ sur trente ans, soit une moyenne proche de 1 M€ par an, semble importante en comparaison de l'ordre de grandeur du coût total du projet, d'environ 500 M€. Ce résultat est lié au montant très élevé des amendes en cas de non-respect des critères de disponibilité.

En connaissance de ce chiffre, le contractant a pu provisionner une somme destinée à prendre en charge le coût de ce risque. Dès lors, le contenu de l'offre financière soumise au client (l'autorité publique) a pu être commenté de manière transparente, ce qui a permis de cadrer les discussions sur la définition des responsabilités de chaque partie. En particulier, sur cette base ont pu être définis les modes de financement du risque, les risques qui étaient à la charge du contractant et les risques qui étaient à la charge de l'autorité publique.

Il apparaît ainsi que le bénéfice de ce type d'approche globale de la gestion du cycle de vie des infrastructures s'applique aussi bien au maître d'ouvrage, ou propriétaire, commanditaire, qu'au maître d'œuvre, ou exploitant, ou contractant. En effet, dans de nombreux projets, l'organisation en place autour d'une infrastructure s'articule à partir d'une dualité. A titre d'exemple :

- propriétaire / maître d'ouvrage délégué ;
- maître d'ouvrage / exploitant ;
- Special Purpose Company (SPC)/Engineering, Procurement and Construction (EPC) ; ...

Dans tous les cas, les gains de l'approche proposée sont les suivants :

- définition claire des objectifs de performance et des critères et indicateurs associés ;
- répartition claire des responsabilités de chaque partie ;
- transparence sur les risques identifiés et sur leur mode de prise en charge (qui est responsable ? quelles actions de gestion des risques à mettre en œuvre ?) ;
- défense argumentée des budgets par les parties ;
- optimisation des coûts totaux des projets d'infrastructures, rapportés à l'ensemble du cycle de vie ;
- prise en compte et préservation des enjeux propres à chacune des parties ;
- surveillance et maintenance des infrastructures par les risques, c'est-à-dire pilotées par la double considération des causes des mécanismes de vieillissement et des

enjeux impactés, selon les parties et les horizons temporels examinés.

Un aspect important de l'approche est sa capacité à faire l'adéquation entre les choix à court terme (conception, méthodes de construction), les enjeux de court terme (ex : disponibilité au jour le jour), et les implications à long terme de ces choix (coût de la maintenance sur l'ouvrage vieilli, état de l'ouvrage en fin de durée d'exploitation contractuelle...) de même que les enjeux de long terme (maintien en l'état du patrimoine, gestion durable...).

## 9. RÉFÉRENCES

- [1] Gestion durable des infrastructures par les risques : aide à la décision en génie civil, R. Frenette, B. Gérard, O. Bernard, XIV<sup>e</sup> colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, 2007