

PONTS ROUTIERS ET OUVRAGES ASSOCIÉS

20 septembre 2007 (après-midi)

COMITÉ TECHNIQUE C4.4 PONTS ROUTIERS ET OUVRAGES ASSOCIÉS

RAPPORT INTRODUCTIF

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	3
MEMBRES DU COMITÉ AYANT CONTRIBUÉ A L'ÉLABORATION DU RAPPORT	4
1. INTRODUCTION	4
1.1. Programme de la session	5
2. LES TRAVAUX DU COMITÉ	7
2.1. Durabilité en phase de conception et construction.....	7
2.2. Durabilité et durée de vie des ouvrages existants.....	8
2.3. Approches pour une gestion rationnelle des ouvrages d'art	10
3. ORATEURS INVITÉS.....	10
3.1. Gestion des ponts historiques	11
3.2. L'intérêt pour le gestionnaire d'une approche probabiliste de la gestion des ponts historiques	12
3.3. Le programme d'entretien des ponts historiques en Virginie.	12
3.4. Analyse des ponts historiques par une méthode combinée d'éléments finis et discrets.	13
3.5. Critères pour s'assurer de la durabilité des fondations de ponts en maçonnerie	14
4. TRAVAUX FUTURS	15
CONCLUSIONS PROVISOIRES.....	15

RÉSUMÉ

Les ouvrages d'art constituent des liens essentiels pour les voiries nationales, régionales ou locales. Tout défaut de fonctionnement, perte de capacité portante ou incapacité à s'adapter sans restrictions à l'augmentation du trafic, représente des coûts importants dans l'économie d'une région. Par conséquent, les administrations doivent consacrer les ressources nécessaires pour maintenir le niveau de service et la sécurité du patrimoine d'ouvrages d'art.

Selon le niveau de développement des pays et leur histoire récente, la construction des ponts s'est faite de façon intensive sur des périodes relativement courtes, de l'ordre d'une à quelques décennies. Dans beaucoup de pays européens, l'après-guerre a été critique pour la construction des voiries et en particulier des ouvrages d'art. D'autres pays concentrent le développement dans leurs infrastructures routières pendant leurs périodes de plus grande expansion économique.

On peut citer plusieurs cas de figure où de telles périodes de construction intensive ont coïncidé avec le début de l'utilisation de « nouveaux » matériaux de structure, tels que l'acier ou le béton. L'utilisation intensive du béton, par exemple, à une période où on ne mettait pas en doute ses propriétés de durabilité, a conduit aujourd'hui à un patrimoine de ponts qui ne présente pas toujours un niveau de service satisfaisant.

Les progrès dans la connaissance des propriétés du béton et de l'acier, l'amélioration du contrôle de la qualité des constructions, les recommandations établies en phase de conception pour obtenir des structures durables, et les nouveaux outils de gestion des patrimoines de ponts ont aujourd'hui changé la donne.

Les travaux du comité technique 4.4 ont porté durant ces dernières années sur la comparaison des approches de différents pays à travers le monde en matière de durabilité et de gestion du patrimoine : comment améliorer la durabilité des ponts durant tout leur cycle de vie, c'est-à-dire en phase de conception, de construction et de service ? Quels sont les critères et les procédures utilisées par les différentes administrations au sein de leurs systèmes de gestion des ponts pour décider de l'affectation des ressources pour l'entretien et la réparation des ponts ?

Considérant que les ponts historiques constituent dans de nombreux pays un sous-ensemble important du patrimoine d'ouvrages d'art, le Comité a décidé de lancer un appel à communications auprès des ingénieurs qui ont en charge l'entretien de telles structures, qui nécessitent souvent un traitement spécifique par rapport aux méthodes et systèmes de gestion habituels.

La séance organisée par le comité TC4.4 « Ponts routiers et ouvrages associés » comporte trois parties :

- **Présentation des travaux du Comité technique**
 - Améliorer la durabilité des ponts en phase de conception et de construction
 - Augmenter la durée de vie d'un ouvrage en service : comparaison de méthodes traditionnelles et innovantes
 - Critères et procédures de hiérarchisation au sein des systèmes de gestion du patrimoine

- **Orateurs invités – Gestion des ponts historiques**
 - Analyse des ponts historiques par une méthode combinée d'éléments finis et discrets
 - Critères pour évaluer la durabilité des fondations d'ouvrages en maçonnerie
 - Gestion d'un patrimoine de ponts historiques
 - Le programme d'entretien des ponts historiques en Virginie
 - L'intérêt pour le gestionnaire d'une approche probabiliste de la gestion des ponts historiques – Exemples d'application

- **Débat et travaux futurs**
 - Durabilité en phase de conception
 - Durabilité en phase de construction
 - Maintenance et durabilité
 - Les systèmes de gestion du patrimoine et la durabilité
 - Ponts historiques
 - Travaux futurs du comité

MEMBRES DU COMITÉ AYANT CONTRIBUÉ A L'ÉLABORATION DU RAPPORT

Rafael Astudillo, Espagne	Président du comité
Brian Hayes, Royaume Uni	Animateur du thème 1
John Bjerrum, Danemark	Animateur du thème 2
Peter Graham, Australie	Animateur du thème 3
Dimitris Constantinidis, Grèce	Secrétaire anglophone
Florent Imbert, France	Secrétaire francophone

1. INTRODUCTION

Le transport des personnes et des marchandises est un élément majeur dans l'économie des pays, facteur essentiel de progrès et de bien-être, et ce d'autant plus que le niveau de développement d'un pays est élevé. L'importance du transport au niveau d'un pays se transpose également au niveau supranational.

Les ponts constituent des liens fondamentaux pour les voiries nationales, régionales ou locales. Tout défaut de fonctionnement, perte de capacité portante ou incapacité à s'adapter sans restrictions à l'augmentation du trafic, représente des coûts importants dans l'économie d'une région. Par conséquent, les administrations doivent consacrer les ressources nécessaires pour maintenir le niveau de service et la sécurité du patrimoine d'ouvrages d'art.

Selon le niveau de développement des pays et leur histoire récente, la construction des ponts s'est faite de façon intensive sur des périodes relativement courtes, de l'ordre d'une à quelques décennies. Dans beaucoup de pays européens l'après-guerre a été critique pour la construction des voiries et en particulier des ouvrages d'art. D'autres pays concentrent le développement dans leurs infrastructures routières pendant leurs périodes de plus grande expansion économique.

On peut citer plusieurs cas de figure où de telles périodes de construction intensive ont coïncidé avec le début de l'utilisation de « nouveaux » matériaux de structure, tels que l'acier ou le béton. L'utilisation intensive du béton, par exemple, à une période où on ne mettait pas en doute ses propriétés de durabilité, a conduit aujourd'hui à un patrimoine de ponts qui ne présente pas toujours un niveau de service satisfaisant.

Les progrès dans la connaissance des propriétés du béton et de l'acier, l'amélioration du contrôle de la qualité des constructions, les recommandations établies en phase de conception pour obtenir des structures durables, et les nouveaux outils de gestion des patrimoines de ponts ont aujourd'hui changé la donne.

Il a été jugé intéressant d'étudier la façon dont la question de l'amélioration de la durabilité est traitée par les différents pays, alors qu'ils sont confrontés à des environnements, des matériaux, des méthodes de construction et des pratiques de maintenance différents. Cette étude a été confiée au présent comité.

Bien sûr, la durabilité est un domaine vaste ; le TC4.4 a concentré ses travaux en collectant des informations sur la façon dont les différents pays traitent ce sujet pendant les phases de conception et de construction des ouvrages.

L'entretien nécessaire pour traiter les problèmes de durabilité d'un pont fait appel à de multiples compétences, méthodes et techniques, dont beaucoup avaient été analysées au sein des précédents comités ponts de l'AIPCR. Lors du présent cycle, le comité a choisi de comparer, pour un problème de durabilité donné, des expériences pratiques d'utilisation de méthodes innovantes par rapport à des techniques traditionnelles.

L'utilisation de systèmes de gestion de ponts (Bridge Management System, BMS en anglais) est maintenant largement répandue dans la plupart des administrations routières ; ces systèmes sont des outils essentiels pour permettre la gestion de grands patrimoines d'ouvrages d'art. Un des modules critiques dans un BMS est la façon dont sont décidées les affectations de ressources d'entretien et de réparation dans un réseau. Afin de clarifier les critères et les procédures utilisés par les différents pays, le Comité a rassemblé l'information auprès de nombreuses administrations, et a analysé les résultats sur ce point spécifique.

Ce rapport d'introduction donne un aperçu des principaux points qui seront présentés et discutés lors de la session TC4.4 consacrée aux ponts routiers et ouvrages associés.

1.1. Programme de la session

La session s'adresse à un public de techniciens et d'ingénieurs travaillant dans les domaines de l'entretien des ponts, de la durabilité (concepteurs, constructeurs) et de la gestion d'un patrimoine d'ouvrages. Les personnes intéressées par la maçonnerie et les ponts historiques auront l'occasion d'assister à plusieurs présentations concernant cette catégorie d'ouvrages particuliers.

La séance comporte trois parties :

- **Présentation des travaux du comité TC4.4**

- *Thème 1: Améliorer la durabilité au stade de la conception et de la construction*

Présentation des facteurs influençant la durabilité des matériaux de construction courants dans différents pays. Comparaison des pratiques en matière de conception (règlements, guides, recommandations).

- *Thème 2 : Augmenter la durée de vie et la durabilité des ponts existants*

Comparaison pour un problème de durabilité donné des différentes approches possibles : méthodes innovantes et méthodes traditionnelles.

- *Thème 3 : Approches pour une gestion rationnelle des ouvrages d'art*

Présentation des différents systèmes de gestion d'ouvrages ; analyse des informations contenues dans les BMS, et des différentes méthodes et critères de hiérarchisation des opérations de maintenance.

- **Orateurs invités – Ponts en maçonnerie et ponts historiques**

L'entretien des ponts historiques et des ouvrages en maçonnerie fait appel à des compétences spécifiques de la part de leurs gestionnaires. Au cours de la session seront présentés cinq exemples reflétant les pratiques à travers le monde :

- *Gestion des ponts historiques. Finlande.*
- *L'intérêt pour le gestionnaire d'une approche probabiliste de la gestion des ponts historiques – Exemples d'application. Danemark.*
- *Le programme d'entretien des ponts historiques en Virginie. VDOT, États-Unis*
- *Analyse des ponts historiques par une méthode combinée d'éléments finis et discrets. Portugal*
- *Critères pour évaluer la durabilité des fondations d'ouvrages en maçonnerie. Espagne.*

- **Débat et travaux futurs**

Un débat aura lieu sur l'ensemble des sujets traités précédemment. Seront ensuite présentées et discutées les propositions pour les prochains travaux du comité au sein de l'AIPCR.

2. LES TRAVAUX DU COMITÉ

2.1. Durabilité en phase de conception et construction

Les retours d'expérience sur l'entretien et les réparations d'ouvrages ont mis en évidence les problèmes de durabilité des structures d'ouvrages courants, même dans les cas où les spécifications de matériaux et la construction s'étaient faites suivant les règles de l'art.

La plupart de ces problèmes peuvent être expliqués par des choix de conception qui minimisent le coût initial au lieu de tenter de raisonner sur le coût global de la structure.

Les problèmes de durabilité des ouvrages courants autoroutiers sont encore accentués par les restrictions de budget sur les crédits d'entretien, et par le coût élevé des travaux sous circulation.

L'enquête menée au sein du comité 4.4 s'est attachée à recueillir les expériences des membres de l'AIPCR sur leur façon de concevoir, de construire des structures durables, et de répondre aux différents problèmes couramment rencontrés.

Le groupe de travail en charge de ce thème était constitué de onze membres du comité, dont dix européens et un canadien.

Un questionnaire a été rédigé par ce groupe de travail et a été diffusé auprès des membres de l'AIPCR. Le champ d'investigation a été restreint aux ouvrages en béton et en métal de courte et moyenne portée (moins de 150m de portée principale), afin de couvrir la très grande majorité du patrimoine ; les grands ouvrages font l'objet d'études spécifiques en matière de durabilité qui sortaient du cadre d'étude défini. Le questionnaire visait à recueillir l'expérience de praticiens et non pas à faire le point sur les travaux de recherche en cours sur le sujet.

Le questionnaire traitait les points suivants :

- Information générale sur le réseau routier couvert par la réponse
- Information générale sur les normes en vigueur
- Conditions environnementales
- Données relatives à la durabilité des matériaux (béton et acier)
- Principaux problèmes de durabilité rencontrés
- Pratiques de conception
- Conception de détail
- Développements futurs prévus en matière de durabilité

Vingt pays ont répondu à l'enquête, avec parfois plusieurs réponses au sein d'un même état (réseaux ou régions différentes). L'étude montre le grand éventail de données mettant en jeu la durabilité ; elle fournit une base de donnée utile pour les concepteurs ainsi que pour les rédacteurs de codes et de recommandations.

2.2. Durabilité et durée de vie des ouvrages existants

Se basant sur un questionnaire envoyé à tous les membres et membres correspondants du comité 4.4 de l'AIPCR, cette étude avait pour objectif de constituer une bibliothèque d'exemples sur les façons de réduire les coûts d'entretien et de réparation et/ou de réduire les restrictions de circulation, en augmentant la durabilité et la durée de vie d'ouvrages ou parties d'ouvrages existants.

Pour chaque problème de durabilité, le questionnaire demandait de comparer une façon « traditionnelle » et une façon « nouvelle » de régler le problème. La définition du caractère innovant ou non d'une technique était laissée à l'appréciation des personnes répondant au questionnaire.

Chaque exemple était complété par des recommandations à appliquer en phase de conception pour éviter que le problème ne se reproduise. La figure jointe illustre le schéma général de l'étude.

L'étude s'inscrit dans l'un des objectifs stratégiques du thème 4 de l'AIPCR : « améliorer la qualité des infrastructures routières par une gestion rationnelle du patrimoine, en tenant compte des attentes des usagers et des demandes du gestionnaire ».

49 réponses ont été collectées, couvrant environ 60% des pays représentés au sein du comité 4.4. Les exemples reçus proviennent d'Amérique du Nord, du Japon, d'Europe, d'Afrique du Sud et de Nouvelle Zélande.

Les exemples traitent de toutes les parties d'ouvrages (tabliers de ponts, dalles, appuis, barrières de sécurité, etc....) ; les réparations peuvent être dues à des défauts de conception, de construction, d'entretien, à des chocs, des incendies, à l'environnement, ou à de nouvelles exigences politiques nécessitant des interventions sur l'ouvrage. A chaque fois sont présentées deux façons de traiter un même problème. Il est raisonnable de penser que chaque pays a répondu en présentant ses meilleurs idées ou exemples sur la façon d'augmenter la durée de vie des ouvrages, de réduire les coûts et/ou de minimiser les durées de travaux et de restrictions de trafic.

Les réponses sont réparties par thèmes (voir tableau), permettant un accès facile aux idées et propositions formulées :

Thème	Sous-thème
1.0 Ouvrage entier / Buse	1.1 Capacité portante insuffisante 1.2 Corrosion 1.3 Demande d'un nouveau pont sur une route existante
2.0 Tablier, dalle et poutres	2.1 Capacité portante insuffisante 2.2 Largeur insuffisante 2.3 Corrosion des aciers passifs 2.3.1 Dalle 2.3.2 Poutres 2.4 Dégradation du bois 2,5 Déformée excessive
3.0 Appuis et fondations	3.1 Tassements 3.2 Dégradation du béton 3.2 Capacité portante insuffisante
4.0 Équipements d'ouvrages, superstructures	4.1 Fuites au niveau d'un joint de chaussée 4.2 Barrières de sécurité insuffisantes ou abîmées 4.3 Dégradation de la couche de roulement 4.4 Dégradation de la peinture

Les exemples mettent en évidence le fait que les solutions nouvelles ou alternatives ont été développées et mises en œuvre essentiellement pour réduire les coûts et les perturbations du trafic.

De nombreux exemples montrent comment réduire le temps d'intervention, et éviter des restrictions de trafic ; par exemple, remplacement d'une buse par insertions d'une nouvelle buse dans l'ancienne, plutôt que de creuser la route pour procéder à un remplacement. L'utilisation de nouveaux matériaux est également présente ; par exemple, renforcement des poutres ou dalles en béton par des tissus de fibre de carbone, au lieu d'un remplacement pur et simple.

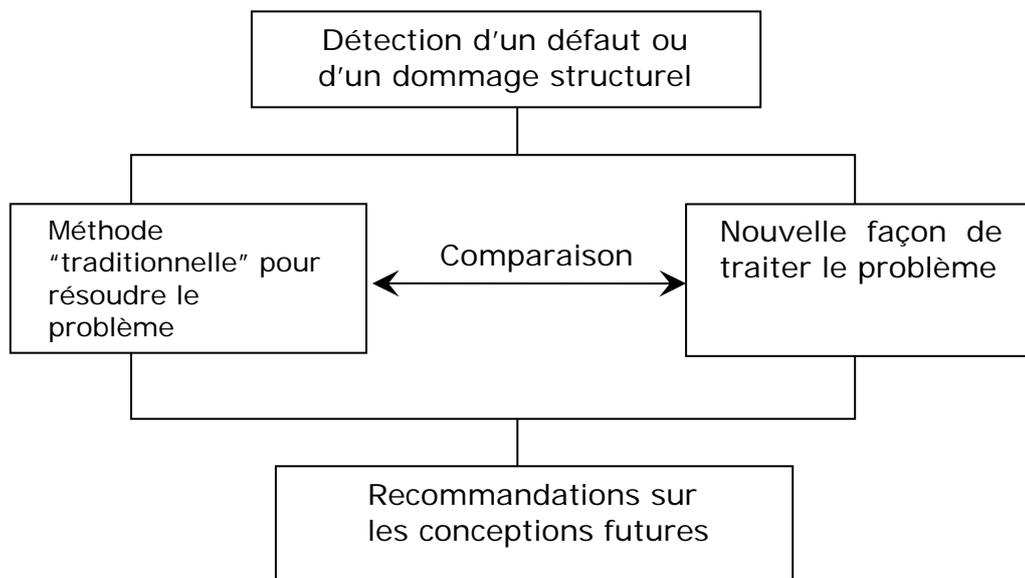
D'autres exemples montrent comment réduire les coûts immédiats en différant les interventions, par exemple en mettant en place une protection cathodique des armatures de béton armé. Un exemple montre l'utilisation de méthodes probabilistes pour démontrer que la capacité portante est suffisante.

De nombreux exemples ont mis l'accent sur la réduction des coûts liée à l'utilisation de matériaux qui permettent d'augmenter significativement la durée de vie ; par exemple, réparation d'une buse métallique corrodée par du béton fibré projeté.

La plupart des exemples contiennent également des recommandations sur la façon d'éviter que le problème ne se reproduise à l'avenir. Quelques exemples :

- Utilisation de ponts intégraux (sans joints de chaussée)
- Pas de rotules à mi-travée !
- Utilisation dans les tabliers d'aciers passifs mieux résistants à la corrosion
- Concevoir la structure pour que toutes les parties soient accessibles pour l'entretien, la réparation et le remplacement

Le TC4.4 espère que la bibliothèque d'exemples pourra servir pour donner des idées aux administrations, consultants et aux entreprises afin de déterminer dans des conditions semblables la meilleure stratégie d'entretien ou de réparation.



2.3. Approches pour une gestion rationnelle des ouvrages d'art

En matière de gestion d'ouvrages, le défi consiste à maintenir tous les ponts d'un réseau routier fonctionnels pendant toute leur durée de vie ce conception et au-delà, pour un coût global minimal. Sachant cela, le comité 4.4 de l'AIPCR a identifié le besoin d'analyser les pratiques en matière de hiérarchisation des interventions sur un réseau, telles que les ont adoptées un certain nombre d'état membres disposant de systèmes de gestion intégrée des ouvrages au sein d'un réseau.

Une enquête auprès des pays membres a été jugée utile, à la fois pour les pays disposant déjà de tels systèmes que pour ceux où ces systèmes sont en cours de développement. Pour les premiers, une telle étude peut servir pour évaluer les systèmes existants ou les améliorer ; pour les seconds, l'étude fournit une base de données et des contacts afin d'intégrer des fonctionnalités similaires dans leurs systèmes.

L'analyse des réponses fournies par plus de vingt pays a montré que la hiérarchisation des interventions au niveau réseau nécessitait un certain nombre de données et de processus. Même si la philosophie et les méthodes de hiérarchisation utilisées diffèrent d'un pays à l'autre, on observe une certaine convergence dans les données d'entrée nécessaires, notamment la description de l'ouvrage et de son positionnement dans le réseau ; concernant la description et la notation des défauts observés, les approches peuvent être assez différentes, en fonction de la philosophie des pays interrogés en matière de hiérarchisation des opérations d'entretien et de maintenance. Toutefois, quelle que soit l'approche adoptée, il apparaît essentiel de disposer de données homogènes, fiables et régulièrement mises à jour, afin de pouvoir effectuer les analyses et les traitements destinés à évaluer le niveau de service et fixer les stratégies d'intervention sur ouvrages.

Le groupe de travail a analysé les différentes approches pratiquées par les pays ayant répondu à l'enquête, et a sélectionné un jeu minimal de données et de processus nécessaires pour hiérarchiser les opérations d'entretien et de réparation sur les ouvrages au sein d'un réseau.

Les principaux points traités sont :

- Processus et flux de données au sein d'un BMS
- Analyse des BMS présentés en réponse à l'enquête
- Analyse des méthodes de hiérarchisations
- Adaptation des résultats issus du système de traitement
- Modalités de traitement des priorités non financées

3. ORATEURS INVITÉS

Les ponts historiques sont des structures qui nécessitent un traitement spécifique en matière d'inspection, de diagnostic, d'entretien, de réparation, et de façon plus générale pour tout ce qui concerne leur gestion. De nombreux pays disposent d'un vaste patrimoine de ponts historiques, dont certains supportent toujours un trafic important et sont traités comme monuments historiques. D'autres vieux ouvrages, en général situés sur des réseaux secondaires, ne font pas l'objet d'un entretien adéquat, voire sont abandonnés ; même s'il ne s'agit pas de monuments historiques, il arrive ainsi fréquemment que de très beaux ouvrages soient endommagés de façon irréversible.

La conservation d'ouvrages historiques en pierre, en brique, en bois ou métal nécessite une prise en compte spécifique de leur comportement structurel, leur esthétique, les matériaux utilisés en réparation, la préservation de leur environnement, etc. Les ponts historiques sont toujours traités comme des points singuliers du réseau routier.

Les pays en développement ou en transition souffrent d'un déficit important en matière de gestion de leur patrimoine de ponts historiques. Les crédits sont alloués prioritairement au développement et à l'entretien du réseau routier, et la maintenance des ponts historiques n'est pas une priorité. L'expérience des pays disposant de systèmes efficaces de gestion des ponts historiques pourraient contribuer à améliorer la situation.

Pour toutes ces raisons le C4.4 a décidé de lancer un appel à présentations consacré aux ponts historiques.

3.1. Gestion des ponts historiques

Jouko Lämsä. Administration des Routes / Comité Ponts, HELSINKI. Finlande

L'Administration des Routes Finlandaise (Finrra) gère actuellement environ 40 ouvrages qui sont classés « ponts musées », et donc ponts historiques, selon les critères du Bureau National des Antiquités, la haute autorité finlandaise en matière de patrimoine culturel. Les ponts historiques de Finnra appartiennent au « Road Museum » (musée de la route), géré aujourd'hui par Mobilia, un musée du trafic routier. Ce Road Museum, créé en 1970, comportait à l'origine un comité composé de spécialistes dans les domaines de l'histoire, des musées et des technologies. Aujourd'hui, la gestion du musée est régie par des réglementations spécifiques, et la responsabilité officielle du musée a été transférée de l'administration centrale au district de Häme.

Les réglementations donnent des instructions sur le diagnostic, l'inspection et l'entretien des ponts qui sont qualifiés de ponts historiques. Les principaux critères de sélection sont l'importance historique de l'ouvrage au plan national en terme de technique de construction de l'ouvrage, en terme d'histoire des routes et des communications, et les conditions locales qui ont permis à l'ouvrage de survivre dans son état actuel.

Les ponts qui ont été sélectionnés représentent les plus vieux exemples encore conservés des différents types de ponts rencontrés sur le réseau routier finlandais ; sont également sélectionnés les ponts qui ont une importance particulière et nécessitent d'être conservés pour les générations futures. Les matériaux de construction sont variés, et la répartition géographique a été choisie de façon à couvrir le pays de façon la plus uniforme possible.

Pour chaque matériau de construction, les plus vieux ouvrages encore en service et entretenus par Finnra sont : un pont en pierre de 1777, un pont en bois de 1837 de 77m de longueur, un pont métallique de 1856, et un pont en béton armé de 1911. Jusqu'au début des années 1900 la plupart des ponts finlandais étaient en bois, ce qui a joué un grand rôle dans la sélection des ponts historiques.

Afin de conserver les informations relatives aux ponts historiques, un livre a été écrit sur la construction, les bâtisseurs, la structure et les décideurs associés à chaque pont. De plus, plusieurs ponts ont fait l'objet de publications très détaillées. Les ponts historiques sont repérés sur le réseau par une signalisation spécifique, accompagnée d'informations sur l'histoire du pont en plusieurs langues. Enfin, les archives nationales et le bureau national des antiquités conservent les informations les plus importantes relatives aux ponts historiques qui ont déjà été démontés (plans, photographies et autres documents).

3.2. L'intérêt pour le gestionnaire d'une approche probabiliste de la gestion des ponts historiques

John Bjerrum, Danish Road Directorate, job@vd.dk, Alan O'Connor & Ib Enevoldsen, Rambøll, alo@ramboll.dk, ibe@ramboll.dk. Denmark.

La croissance économique de la seconde moitié du XX^e siècle a provoqué une augmentation constante des volumes de trafic sur les routes, avec des exigences de service toujours plus fortes sur un patrimoine d'ouvrages vieillissant. La croissance économique ne s'est toutefois malheureusement pas traduite par une augmentation des budgets alloués aux gestionnaires pour l'entretien de leurs ponts.

L'approche retenue par le Directorat des Routes Danois (DRD) pour faire face à ce défi a été de tenter d'exploiter les avancées scientifiques pour mieux gérer ses vieux ouvrages. Ceux-ci ont une double valeur économique : à la fois en tant que composant du réseau de transport, et en tant qu'héritage culturel et historique.

L'article passe en revue les pratiques actuelles. Après une présentation générale de la démarche, l'accent est mis sur les économies significatives que les gestionnaires d'ouvrages peuvent espérer en adoptant ces approches probabilistes. Sont également abordés les futures défis auxquels devront faire face les gestionnaires. Les approches probabilistes intégrant des modèles d'incertitude ont permis au DRD de réaliser des économies importantes. L'article présente enfin les recommandations qui ont été récemment publiées par le DRD pour l'utilisation des méthodes probabilistes dans l'évaluation de l'état des vieux ouvrages et la gestion des ponts historiques. Des cas d'application de ces recommandations à des structures réelles sont donnés, ainsi que les économies appréciables qui ont été réalisées grâce à elles.

3.3. Le programme d'entretien des ponts historiques en Virginie.

Malcolm T. Kerley, P.E. Chief Engineer .Virginia Department of Transportation. Virginia. USA

Le Département des Transports de Virginie (VDOT) gère le troisième plus grand réseau de transport des Etats-Unis. Afin de préserver l'héritage culturel de la Virginie et également de satisfaire les besoins actuels de mobilité, le VDOT s'est doté d'un Plan de gestion et d'entretien des ponts historiques. Le développement de ce programme a effectué conjointement par différentes divisions internes du VDOT – ponts et structures, environnement –, la division recherche du VDOT et le Virginia Transportation Research Council (VTRC).

Cet article présente le Plan de gestion et d'entretien des ponts historiques du VDOT. Depuis les années 1970, le VDOT avait par l'intermédiaire du VTRC étudié les différents types de ponts âgés de l'état de Virginie, et avait évalué leur intérêt historique. Ces études par type de pont incluent les ponts métalliques à poutres treillis, les ponts en maçonnerie et les ponts-voûte en béton, les ponts en bois couverts, les autres ponts en béton, et les ponts mobiles. Ont alors été recensés les structures qui avaient un intérêt historique suffisant pour être choisies par le Registre National des Monuments Historiques des États-unis. Une fois l'intérêt historique déterminé, l'étape logique suivante était la définition d'un programme de gestion pour chacune de ces structures.

Ce projet s'est basé sur des données préalablement recueillies par le VTRC, ainsi que sur des informations techniques fournies par le bureau central du VDOT et par les agents de district. Des données complémentaires ont également été fournies par le groupe de travail des structures historiques de Virginie, un comité interservices interdisciplinaires chargé de formuler des recommandations pour les structures historiques de transport de Virginie.

Ce groupe de travail comprend des ingénieurs, des architectes historiens, un archéologue, et un scientifique spécialiste du domaine environnemental, représentant les différentes agences fédérales et régionales : VDOT, VTRC, la *Federal Highway Administration*, et le Virginia Department of Historic Resources. Ce projet a permis d'identifier et prendre en considération les nombreuses problématiques soulevées par les ponts historiques (incluant les aspects juridiques, techniques, réglementaires, financiers, politiques et environnementaux).

Plusieurs options de gestion, d'entretien et de maintenance ont été définies et testées, et des recommandations spécifiques ont été formulées pour chacun des ponts historiques de Virginie gérés par le VDOT. Une base de donnée de gestion des ponts historiques a été spécialement développée pour le projet.

Le plan contenait des recommandations spécifiques pour la gestion et l'entretien des 55 ponts du VDOT classés ou susceptibles d'être classés par le National Register. Parmi ceux-ci, des ponts en maçonnerie du début du XIX^e siècle, des ponts en bois couverts de la seconde moitié du XIX^e, des ponts à poutres treillis métalliques datant des années 1870 à 1930, et des ponts en béton du début du XX^e siècle. Plusieurs d'entre eux ont été ou seront prochainement fermés à la circulation, et le plan recommande de les maintenir en service pour une utilisation par les piétons et les cyclistes. En accord avec les recommandations formulées dans le plan, certains ponts ont été donnés à des compagnies privées ou gouvernementales qui ont accepté d'assumer la propriété et la gestion de ces structures. Actuellement, environ 30% des ponts historiques de Virginie ont été réhabilités selon les recommandations du plan. D'autres projets sont à l'étude.

3.4. Analyse des ponts historiques par une méthode combinée d'éléments finis et discrets.

Gilberto Antunes Ferreira. Polytechnic Institute of Viseu - School of Technology, Department of Civil Engineering DEC-ESTV-IPV, Viseu. Portugal

Cet article présente une analyse des ponts historiques par une méthode combinée d'éléments finis et d'éléments discrets. La méthode des éléments discrets, qui décrit un système de blocs, a été développée à l'origine pour l'étude des massifs rocheux fissurés, et a été rapidement adaptée et généralisée à d'autres études, comme le comportement structurel des bâtiments et ponts historiques en maçonnerie.

Il s'agit d'une méthode particulièrement adaptée pour représenter des structures essentiellement discrètes, constituées de blocs rigides ou déformables, sans qu'il soit nécessaire de modéliser spécifiquement les joints comme dans les méthodes par éléments finis. Les principaux avantages de cette méthode résultent de la possibilité pour chacun des blocs de se déplacer et de tourner librement les uns par rapport aux autres, et d'établir de nouveaux contacts.

Les formulations existantes considèrent des modèles constitués de blocs rigides ou déformables, ou de particules rigides, en 2D ou en 3D. Afin d'élargir son domaine d'application, un modèle plan mixte a été développé, associant blocs et éléments finis. Cela rend possible l'étude 2D de voûtes en maçonnerie : la voûte et les tympans sont modélisés par des blocs, et le matériau de remplissage par des particules.

Ce modèle suit les lois classiques de la méthode des éléments discrets, en introduisant quelques nouveaux concepts, parmi lesquels la définition de nouveaux contacts, l'adaptation de la méthode de détection de ces nouveaux types de contacts, la génération du maillage éléments finis entre l'extrados de l'arche et la chaussée.

L'algorithme 2D qui a été développé permet la détermination des valeurs propres et des vecteurs propres de la structure, ce qui est très utile pour calibrer le modèle numérique. L'application de la méthode est particulièrement utile pour déterminer la capacité portante et les modes de rupture de ponts en maçonnerie. Un exemple d'application est présenté.

3.5. Critères pour s'assurer de la durabilité des fondations de ponts en maçonnerie

Masonry Bridges Task Group of the Bridges Committee of the Spanish branch of PIARC. Presented by J. León. Prof. Escuela de Ingenieros de Caminos. Madrid. Spain.

En Espagne, les ponts en maçonnerie (routiers et ferroviaires) représentent environ 30 à 40 % du nombre total de ponts, un pourcentage voisin de la moyenne européenne. Ces structures élégantes, encore en fonction après des décennies voire des siècles de service, sont toujours capables de répondre aux exigences actuelles, ce qui représente un exemple remarquable d'ingénierie durable.

Toutefois, afin d'être certain que le pont en maçonnerie et ses fondations peuvent toujours être utilisés – ce qui constitue généralement la meilleure solution –, les ingénieurs doivent décider comment faire pour élargir la plateforme, renforcer les voûtes, réparer, etc. Une telle décision implique généralement une inspection et un renforcement des fondations. Dans le cas spécifique des ponts en maçonnerie, la présence ou le risque d'affouillement suffisent généralement à déclencher une étude des fondations, même si aucun élargissement n'est envisagé. Comme c'est bien connu, le comportement relativement fragile des ruptures de fondations en présence d'affouillement, aux conséquences fatales, justifie à lui seul une analyse approfondie des caractéristiques des fondations et de leur capacité portante.

Il est intéressant de signaler que depuis 2003, environ 50 % des crédits de réhabilitation de ce type de structure sont consacrés aux différentes interventions sur les fondations. Les autorités espagnoles confirment également qu'environ la moitié des travaux effectués sur les ponts en maçonnerie sont consécutifs à des endommagements des fondations.

Il y a deux ans un groupe de travail des ponts en maçonnerie, sous-groupe du comité ponts de la délégation espagnole de l'AIPCR, a démarré la rédaction d'un document contenant des critères à l'intention des ingénieurs qui travaillent sur ce problème relativement peu courant qu'est le diagnostic des fondations de ponts en maçonnerie existants, et le cas échéant la définition des solutions de renforcement. Le document contient une courte description des typologies les plus courantes, les méthodes d'inspection disponibles, les principes de comportement mécanique, et des règles de conception en matière de renforcement ou de réparation. Ce document contient en particulier un chapitre consacré à l'étude des lits de rivières et des affouillements, deux phénomènes particulièrement importants.

Le document, préparé par un groupe d'expert regroupant différentes spécialités, donne une présentation rigoureuse mais pragmatique du problème et de ses solutions. Comme souvent dans les structures en maçonnerie, l'ingénieur doit traiter des matériaux inhabituels (la maçonnerie) dans des structures inhabituelles (les vieux ouvrages), tout en faisant appel à des techniques avancées d'inspection et d'intervention.

4. TRAVAUX FUTURS

La pratique veut qu'à la fin des quatre ans d'un cycle de travail de l'AIPCR, chaque comité propose pour le cycle suivant des aspects de son travail qui mériteraient d'être complétés, ainsi que des sujets complètement nouveaux.

Le C4.4 considère que la durabilité est un sujet trop vaste pour pouvoir être traité sur un seul cycle. Dans un premier temps, le C4.4 s'est attaché à recueillir des informations auprès des différentes administrations sur leur façon d'améliorer la durabilité de leur patrimoine existant, et sur les règles utilisées en phase de conception et de construction pour améliorer la durabilité des matériaux et des structures nouvelles.

Le Comité a également étudié la façon dont sont hiérarchisées les interventions à mener, et a comparé les différentes méthodes de réparer un ouvrage – méthodes traditionnelles et innovantes. Il reste de nombreux sujets à étudier à l'avenir en lien avec la durabilité. Voici une liste de certains d'entre eux :

- Influence des facteurs environnementaux
- Modèles d'attaques chimiques et de progression d'endommagement
- Dommages physiques et chimiques
- Définition de l'état d'une structure
- Détection des dommages
- Nouveaux matériaux
- etc.

Mis à part la durabilité, d'autres sujets présentent un intérêt certain pour l'avenir. Le Comité les a passés en revue, et a proposé de retenir notamment les suivants :

- Évaluation des structures existantes
- Instrumentation des ouvrages : méthodes et intérêt
- Gestion des ponts historiques
- Esthétique des ponts

CONCLUSIONS PROVISOIRES

Des conclusions provisoires peuvent être dressées concernant les travaux développés par le comité au sein de ses trois sous-groupes.

Concernant la prise en compte de la durabilité dans les phases de conception et de construction :

- Les questions de durabilité sont désormais des facteurs déterminants dans la conception des structures d'ouvrages courants autoroutiers. Les ingénieurs se focalisaient précédemment sur la résistance des structures ; mais la recherche de l'optimisation du coût global d'une structure rend primordiaux les aspects de durabilité.

- L'enquête menée sur un patrimoine très important de ponts montre la variété des facteurs influençant cette problématique, du choix de la structure à sa construction, en passant par les spécifications de matériaux, la conception de détail, et jusqu'à l'entretien et les stratégies de gestion. Le rôle des facteurs environnementaux est également essentiel.
- Compte tenu du grand nombre de paramètres mis en jeu et la subjectivité de certaines réponses aux questionnaires, il ne faut pas s'attendre à ce qu'une solution unique idéale émerge du débat sur la durabilité. Toutefois, on constate un accord général sur l'impact des principales questions de durabilité, et sur la combinaison de mesures qu'il est nécessaire de mettre en œuvre pour les résoudre.
- Les données collectées permettent aux ingénieurs d'avoir un bon aperçu de la situation de leur pays, et de la comparer à celle d'autres pays qui, avec des conditions climatiques semblables, peuvent avoir des approches et des réponses différentes aux problèmes de durabilité. La comparaison des pratiques peut bénéficier à tous.

Concernant l'utilisation des méthodes innovantes pour l'entretien et la réparation des ponts :

- Les nouvelles méthodes trouvent principalement leur origine dans la nécessité de minimiser les restrictions de trafic et de réduire les coûts des travaux.
- L'utilisation de nouveaux matériaux organiques pour la réparation est une méthode innovante fréquemment proposée.
- Quelques recommandations reviennent souvent pour éviter les problèmes les plus fréquents : éviter les joints, supprimer les rotules à mi-travées, concevoir les différentes parties d'ouvrage pour qu'elles soient visitables et remplaçables.

Concernant la hiérarchisation des interventions sur les ouvrages d'un réseau :

- L'analyse au niveau réseau est indispensable pour identifier les réparations sur ouvrages qui permettront d'avoir le plus grand retour sur investissement.
- Il est essentiel de disposer de données homogènes, fiables et à jour sur la description des ouvrages et leur état.
- Des systèmes de gestion automatisés et intégrés sont nécessaires pour tous les réseaux sauf les plus modestes, afin de faciliter le traitement de données, leur analyse et leur rendu.
- Les administrations interrogées ont adopté différentes méthodes de hiérarchisation et facteurs de choix ; toutefois, l'état de la structure reste le facteur essentiel dans tous les systèmes.
- Tous les pays interrogés font un post-traitement manuel des sorties du logiciel de gestion, afin de prendre en compte les contraintes politiques, stratégiques, opérationnelles, sociales et budgétaires qui n'auraient pas été intégrées dans l'analyse automatisée du système de gestion. Les principales raisons conduisant à modifier les opérations prioritaires sont des contraintes budgétaires et opérationnelles, qui peuvent entraîner le report des investissements sur d'autres ouvrages.
- Les opérations prioritaires qui n'ont pas pu être financées doivent être gérées de façon active et transparente, afin d'éviter toute dégradation ultérieure, tout risque à l'usager et tout problème de responsabilité.