

ANALYSE DE LA CRITICITÉ DU PATRIMOINE VIPP AUTOROUTIER

Jean-Luc DABERT

Autoroutes Paris Rhin Rhône (APRR)

Christian CREMONA

MEEDDAT - CGDD

1. LA PROBLÉMATIQUE VIPP

Les VIPP (Figure 1) sont des **Viaducs à travées Indépendantes à Poutres préfabriquées en béton Précontraint par post-tension**. Ce type de construction a été fortement utilisé après la seconde guerre mondiale, dans les années 1955 à 1970, grâce à son absence de cintre et son lancement de poutres préfabriquées qui permettait le franchissement d'obstacles non courants et de hauteur raisonnable (10 à 25 m au-dessus du sol).

Ces travées indépendantes étaient utilisées dans une gamme de portée variant entre 30 et 50 m, voire exceptionnellement plus de 60 m (cas des ponts de Saint-Waast à Valenciennes et pont de l'Hippodrome à Lille construits entre 1947 et 1951). De nos jours, cette technique n'est quasiment plus utilisée car elle est fortement concurrencée par d'autres techniques de construction qui permettent de réaliser des ouvrages hyperstatiques qui sont plus économiques et présentent une plus grande sécurité vis-à-vis de la rupture (ponts poussés, encorbellement, cintre auto-lanceur...).



Figure 1 : Exemples de VIPP

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

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

Enfin, l'absence d'une politique d'inspection des ouvrages d'art pendant les 30 années qui ont suivi la fin de la seconde guerre mondiale, et la non réalisation des actions correctives qui auraient dû être ensuite appliquées pour rétablir l'étanchéité des ouvrages constituent les deux défauts majeurs de maintenance vis-à-vis de la corrosion.

Les rechargements abusifs de la chaussée effectués sans se soucier de l'état de la chape d'étanchéité, la non remise en état des dispositifs d'évacuation des eaux (débouchage des gargouilles obstruées), la non-intervention pour éviter que l'eau passant à travers les joints de chaussées ne vienne couler sur les cachetages d'about, sont autant de défauts de maintenance qui ont favorisé le développement de la corrosion des câbles. A cela s'ajoutent les conditions d'exploitation des ouvrages qui ont engendré une utilisation croissante de sels de déverglaçage qui ont pu accroître l'agressivité des eaux qui s'infiltrèrent au sein de la structure.

Une description détaillée des problèmes rencontrés dans la famille des VIPP et de leur mode d'inspection et d'auscultation peut être trouvée dans les références (Godart, 2003) et (Guide VIPP, 2001). Les quelques lignes précédentes montrent cependant combien l'auscultation de ces ouvrages est essentielle pour mener à bien une réévaluation pertinente de leur performance. C'est dans ce contexte que les différentes Sociétés Concessionnaires d'Autoroutes ou d'ouvrages routiers (APRR, ASF, CCIH, Cofiroute, ESCOTA, SANEF, SAPN, SFTRF) au sein de l'ASFA ont décidé en 2005 de lancer une consultation ayant pour objet une étude sur la fiabilisation des connaissances des VIPP du réseau autoroutier concédé. En effet, les 116 ouvrages de type VIPP gérés par ces sociétés constituent un sujet de préoccupation commun et systématique. Le but de l'étude initiée par l'ASFA a donc été de mieux connaître la fiabilité des connaissances des VIPP du réseau autoroutier concédé. Cela comprenait essentiellement la précontrainte longitudinale des poutres, la précontrainte transversale des hourdis et des entretoises et la précontrainte des piles marteaux. Cette étude devait permettre aux gestionnaires d'identifier l'aptitude de ces ouvrages à leur usage. La proposition du Groupement LCPC-CETE à cet appel d'offre a reposé sur une démarche de « Sûreté de Fonctionnement ».

La Sûreté de Fonctionnement est une activité d'ingénierie qualitative et quantitative. Initialement conçue pour les phases des projets jusqu'à la mise en production, elle constitue généralement une méthodologie d'analyse et d'action de réduction de risques. Dans le cadre de « produits » existants (à savoir, pour ce qui concerne l'étude, les VIPP), l'application des principes de sûreté de fonctionnement porte sur l'identification des risques, leur qualification et leur quantification simplifiée en vue d'énoncer des propositions de quantification détaillée des risques et de solutions correctives.

Pour cela, l'étude du groupement CETE-LCPC s'est structurée par des étapes qui peuvent se réorganiser, dans un schéma d'analyse de sûreté de fonctionnement, comme suit :

1. une Analyse Fonctionnelle Interne (AFI) qui a porté sur les aspects suivants :
 - l'inventaire détaillé des ouvrages concernés comprenant notamment leurs caractéristiques techniques (date de construction, entreprise, bureau d'étude, dimensions, chape d'étanchéité...),
 - la récupération des données des dossiers d'ouvrages (récolement et suivi, entretien et réparations, rapports d'inspections détaillées, dates et principales conclusions, liste des travaux, trafic supporté) et le recensement des éventuels modes d'exploitation exceptionnelle de chacun des ouvrages (passage de convoi exceptionnel...),
 - le recensement et analyse des réparations déjà réalisées (attelages, changement d'appuis...),
 - l'analyse de l'environnement de l'ouvrage (agressivité, franchissement, accès, ambiance, réseau environnant, agressivité, viabilité hivernale, fréquence et nature des produits de déverglaçage...),
 - l'analyse des matériaux constitutifs (béton, précontrainte, coulis, gaine...) et des méthodes de construction,
 - l'analyse des méthodes de calculs de l'époque (règlements, largeur circulaire et roulable, surcharge),
 - l'inventaire et analyse des investigations réalisées ;
2. une Analyse Préliminaire de Risques (APR) visant à :
 - définir des familles d'ouvrages en fonction de critères pertinents (construction, défaillance, ...) à partir des données de recensement,
 - identifier les carences et les problèmes propres à chaque ouvrage et chaque famille, définir et proposer des investigations complémentaires nécessaires pour caractériser

3. une Quantification des risques (QR) ayant pour objectif de :
 - contrôler par calcul simple, l'aptitude de la configuration actuelle des ouvrages aux modes d'exploitation,
 - définir les modes provisoires d'exploitation possibles du tablier défaillant en fonction des défauts visibles probables (aucune exploitation, une seule voie VL ou PL, deux voies VL, PL ou VL et PL) ;
4. une Analyse détaillée de la criticité pour :
 - définir et proposer des investigations complémentaires nécessaires pour caractériser l'état de chaque ouvrage et de chaque famille,
 - définir une méthode d'évaluation de la capacité portante résiduelle et de la durée de vie résiduelle dans différents modes d'exploitation permettant d'être assuré du passage de l'ensemble du trafic ou des limitations de charges nécessaires.

L'intérêt de recourir à cette démarche réside dans l'intérêt de proposer un cadre méthodologique éprouvé et de rationaliser la phase analytique d'identification des risques, de justification des études détaillées, et de détermination des moyens de détection des risques. Cet article présente les caractéristiques principales de cette méthodologie et les principaux résultats obtenus.

2. FONCTIONNEMENT DU GROUPEMENT

Afin de mener de manière efficace les travaux, notamment en raison de la durée imposée de 6 mois à l'étude, le comité de pilotage (LCPC, Divisions Ouvrages d'Art des CETE et Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées) qui a assuré l'animation et la coordination des études, s'est appuyé sur deux groupes : un groupe « méthodologie » et un groupe de correspondants pour le recensement des données. Le groupe « méthodologie » a eu pour mission essentielle de définir les critères qualitatifs de l'analyse préliminaire de risques, les indicateurs de criticité de la quantification simplifiée des risques, de préparer les outils informatiques nécessaires aux différentes phases de l'analyse de risques et de proposer une démarche d'analyse détaillée de la criticité.

Le fonctionnement en réseau du groupement LCPC-CETE a offert la facilité de disposer des équipes d'inspecteurs proches des différents maîtres d'ouvrages. Un correspondant coordonnateur a ainsi affecté à chaque maître d'ouvrage pour centraliser les informations collectées par les différents Laboratoires Régionaux intervenant sur les ouvrages de la société d'autoroute, assurer le suivi du recueil des données, s'informer du bon avancement des prestations ou des problèmes rencontrés par les inspecteurs, et de proposer des actions correctives au comité de pilotage de l'étude. Un comité de « relecture » des documents (composé de membres d'appartenant ni au groupe « correspondants » ni au groupe « méthodologie », mais interne au groupement) a enfin été constitué pour valider les documents intermédiaires à 3 mois, et les documents finaux. Les différents outils informatiques mis en œuvre dans l'étude ont été réalisés par le groupe « méthodologie ». Afin d'assurer la bonne utilisation de ces outils, des fiches explicatives validées ont été fournies aux différents intervenants en charge soit de l'inspection, soit de l'évaluation de la criticité des ouvrages. Pour permettre un recueil efficace des données, des formations internes ont été organisées afin de garantir la compréhension de la méthode et une homogénéité des informations recueillies. A chaque étape de rédaction, un comité de suivi ASFA, placé sous l'animation de J-P. Marion d'APRR, a eu en charge la relecture des documents et leur validation. Dans ce travail de validation, l'ASFA s'est appuyé sur l'expertise technique du bureau d'études Tonello Ingénieurs Conseil.

3. ANALYSE FONCTIONNELLE INTERNE OU ANALYSE DE LA VALEUR

Le recensement des données a été réalisé afin de répondre aux exigences de l'appel d'offre, mais surtout aux besoins des étapes suivantes de l'analyse, à savoir de l'Analyse Préliminaire de Risques (APR) et de l'analyse de Quantification des Risques (QR). Le recueil des informations s'est donc organisé sur la base d'une fiche par ouvrage qui permet le recensement de toutes les données nécessaires pour mener correctement les analyses ultérieures. Les fiches sont informatisées, sous un format de type feuille Excel®, afin de faciliter l'analyse multicritères de l'Analyse Préliminaire de Risques (APR). Sur l'ensemble du réseau, 8 ouvrages ont fait l'objet d'une fiche d'anomalie, car non conforme à la typologie VIPP. La méthodologie proposée par le Groupement, explicitée et détaillée dans les rapports généraux Analyse Préliminaire de Risques et Quantification des Risques ne peut en effet être appliquée complètement que sur des ouvrages répondant strictement à la définition usuelle des VIPP. Les indicateurs qualitatifs et quantitatifs de cette méthodologie reposent en effet sur des données spécifiques des VIPP et ne peuvent donc être évalués que pour de véritables VIPP.

3.1. Nomenclature des données recensées

Les délais courts consacrés à l'Analyse Fonctionnelle Interne (de l'ordre d'une journée et demi par ouvrage pour l'analyse du dossier, la visite rapide et l'entretien avec l'exploitant) obligent à l'efficacité et à concentrer le recueil des données sur les éléments essentiels de la méthodologie d'analyse. Un franchissement ne se résumant pas à une travée indépendante, la notion de tablier de référence a été définie, tablier pour lequel seulement seront

recensées les caractéristiques géométriques. Ce tablier de référence est lui-même défini par une poutre de référence et une coupe transversale de référence. En effet, dans le cas général, les ouvrages peuvent présenter des travées de portées différentes, des tabliers séparés ou des tabliers uniques. Pour cela, la notion de portée de référence a été introduite ; en général il s'agit de la travée de plus grande portée. Pour la coupe transversale de référence, en cas de tabliers jumeaux construits à des dates différentes, l'ouvrage le plus ancien est retenu. Dans le cas contraire, c'est l'ouvrage ayant la plus grande largeur de chaussée (bande dérasée + voies + BAU), conduisant donc au plus grand nombre de voies, ce qui maximise l'effet des charges routières. En cas de tablier unique, un tablier fictif limité à gauche par l'axe du TPC est étudié. Les données recueillies par les inspecteurs sont regroupées dans une nomenclature spécifique qui apparaît dans le diagramme radar de la Figure 2.

3.2. Synthèse des données recensées

La synthèse des ouvrages présentée dans ce paragraphe est globale et sommaire. Une analyse plus fine sera menée dans le cadre de l'Analyse Préliminaire de Risques et de l'étude de Quantification des Risques. Les informations générales des sections suivantes ont pour seules raisons d'offrir un panorama synthétique de la connaissance que la Société Concessionnaire a de son patrimoine de VIPP. Afin de présenter sommairement le niveau de connaissance recensé sur les 115 ouvrages (les ouvrages non conformes ont été exclus de cette analyse), chacun des 28 thèmes du tableau 1 est noté par la lettre :

- C : si la connaissance du thème est jugée complète ;
- P : si la connaissance du thème est jugée partielle ;
- R : si aucune information n'a pu être relevée ;
- SO : si le thème est sans objet (par exemple, absence de pile marteau).

Le diagramme radar de la Figure 1 donne une idée du degré de connaissance recueilli sur le réseau ASFA.

Chaque rayon correspond à un thème et est borné à 100%. Une connaissance parfaite dans un thème se traduit par un indicateur C à 100%. La Figure 2 montre que l'absence de connaissances, ou différemment l'absence de données disponibles, porte essentiellement sur les caractéristiques de la précontrainte, des coulis d'injection et des données de construction. En moyenne, les données recensées sont de qualité uniforme sur l'ensemble des sociétés concessionnaires.

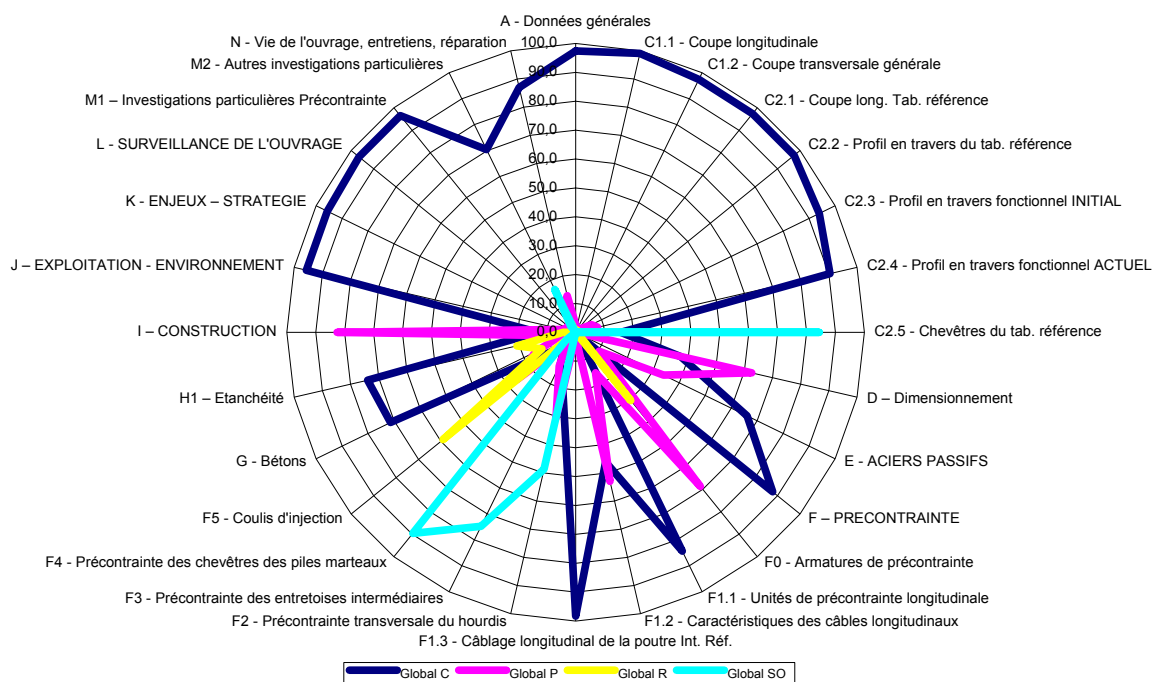


Figure 2 : Synthèse des connaissances sur les ouvrages VIPP sur l'ensemble réseau ASFA

4. ANALYSE PRÉLIMINAIRE DE RISQUES

L'analyse préliminaire de risques (APR) est une analyse déductive à partir des informations disponibles dans les dossiers d'ouvrages rendus accessibles aux membres du groupement LCPC-CETE (date de construction, conception générale, état de l'ouvrage) dont les résultats sont :

- l'identification des défauts de conception ou de réalisation, des défauts liés à l'endommagement des matériaux, à l'évolution des charges, à l'évolution des conditions d'exploitation des ouvrages...),
- une analyse des risques, à partir des critères qualitatifs pré-établis, critères relatifs à la nature et à l'état de l'ouvrage,
- la qualification du risque présenté par chaque ouvrage (analyse préliminaire de risques),
- le classement des ouvrages en familles de nature, d'état et/ou de risque comparable.

Les résultats attendus de cette analyse préliminaire de risques sont donc d'avoir une visibilité sur les carences des ouvrages et une hiérarchisation des ouvrages en cinq classes notamment, permettant de concentrer les analyses et investigations détaillées sur les ouvrages les plus sensibles. Les structures « hybrides » ayant fait l'objet d'adaptations importantes modifiant le fonctionnement initial des structures (exemple : précontrainte longitudinale extérieure de renforcement...) ont été exclues de cette analyse.

4.1. Principe de l'analyse

L'analyse préliminaire de risques cherche d'une part à identifier les facteurs ou les événements susceptibles de réduire la performance d'un ouvrage, et d'autre part de les créditer d'une note de gravité en fonction de critères pré-établis. Pour hiérarchiser les risques dans les VIPP, il a été proposé de considérer qu'un ouvrage construit avec les règlements de charge et de calculs actuels, avec une conception moderne avec hourdis général non précontraint, ne présente pas de risques particuliers, hors défaut de conception ou d'exécution inhérent à tout ouvrage. Une conception n'impliquant aucun risque particulier reçoit la note zéro. A partir de cet état de référence, tout facteur est en principe évalué sur une échelle comportant 4 niveaux de critères allant de +1 à +4. Certains facteurs ont une notation plus étendue ; c'est notamment le cas des facteurs « Etat de la précontrainte » et « notation IQOA » qui présentent des niveaux plus étendus. Enfin, des améliorations apportées sur l'ouvrage peuvent améliorer la performance de ces derniers, ce qui a conduit à retenir des notes négatives.

4.2. Thèmes considérés par l'analyse

L'analyse préliminaire de risques met en évidence les thèmes sensibles classiques, comme la conception générale, l'exécution, l'exploitation et l'entretien, l'environnement. Il convient de souligner que la résistance des ouvrages est directement déterminée par la précontrainte de l'ouvrage, ce qui justifie un thème à part entière.

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

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

L'analyse de ces facteurs a conduit à retenir des critères spécifiques associés à des notes de gravité.

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

matériaux, car elles influent sur la quantité de précontrainte mise en œuvre et donc sur le coefficient de sécurité réel de l'ouvrage. C'est pourquoi les critères suivants ont été retenus :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.3. Note générale d'un ouvrage

La note générale de l'ouvrage est obtenue à partir des notes de gravité des facteurs identifiés dans les paragraphes précédents, ceci avec un système de pondération. Les principales difficultés de la classification résident dans la multiplicité des indicateurs, dans le fait que les phénomènes que ces indicateurs révèlent ne sont pas indépendants les uns des autres, et dans le fait qu'ils ne sont pas indépendants. Ainsi un ouvrage peut être notablement « malade » sans relever pour autant des 2/3 des critères, et ce n'est pas parce qu'il n'est pas au bord de la mer que de simple fait son état s'améliore. Il a été convenu de rapporter la note de l'ouvrage à une valeur

« critique » qui caractérise un ouvrage en très mauvais état, ceci par thème. Suite à des tests effectués sur une dizaine d'ouvrages, un choix de notes de pondération par thème a été proposé et retenu, ce qui conduit à classer les ouvrages en 5 classes de risque (Tableau 3). Le Tableau 4 donne la répartition en pourcentage des ouvrages par classes de risque (APR).

Tableau 3 : Indicateur qualitatif global de risque d'un ouvrage (APR)

CLASSIFICATION DES OUVRAGES	NOTE
Absence de Risque	0 à 20
Risque modéré	20 à 40
Risque assez élevé	40 à 60
Risque élevé	60 à 80
Risque très élevé	>80

Tableau 4 : Répartition par classes de risque

	1	2	3	4	5
APR	7%	62%	28%	3%	1%

Les ouvrages sont en majorité classés en classe de risque « modéré ». La pertinence de l'analyse APR repose sur une bonne connaissance des critères qui forment chacun des thèmes ; malheureusement, cela n'est pas toujours le cas. L'absence de données (ou d'information) doit être palliée par des notes par défaut. Les notes par défaut ont été établies par les divisions Ouvrages d'Art des CETE.

5. QUANTIFICATION DES RISQUES

5.1. Principe de l'analyse

L'objectif est d'apprécier l'aptitude de la configuration actuelle et de configurations dégradées des ouvrages et de les comparer au sein de leur famille. Pour ce faire, la méthode utilisée doit être suffisamment riche pour décrire le fonctionnement de l'ouvrage, mais cependant, la plus simple possible compte tenu des indications du cahier des charges. La quantification de la criticité mécanique reposera donc sur des indicateurs simples permettant d'évaluer l'aptitude au service (états limites de service) et la sécurité structurale (états limites ultimes). Dans cet objectif, cette criticité est représentée par un indicateur de criticité de type générique :

$$I = \frac{\text{Résistance}}{\text{Sollicitation}} \quad (1)$$

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

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

Du fait de la complexité d'un ouvrage de type VIPP, un seul indicateur ne peut résumer le fonctionnement de l'ouvrage. C'est pourquoi, il convient de rechercher les éléments particuliers remarquables qui concourent tous ensembles à la sécurité structurale de l'ouvrage. Il s'agit pour un VIPP, de la résistance du hourdis qui reçoit les charges routières, de la résistance des poutres longitudinales porteuses, puis de la résistance des appuis. Pour les poutres, qui sont isostatiques, on considère qu'une bonne évaluation de leur résistance, consiste à contrôler leur résistance en flexion à mi-travée et leur résistance à l'effort tranchant sur appui. Les indicateurs ne sont d'ailleurs évalués que pour une poutre de référence faisant partie d'un tablier de référence (cf. §3.1). Ces indicateurs ne peuvent évidemment, à eux seuls, traduire la capacité portante réelle de l'ouvrage qui n'est accessible, pour un ouvrage complexe construit par phases et avec de la précontrainte, que par un recalcul complet, poutre par poutre et à la condition de pouvoir disposer d'informations réalistes sur la tension des armatures de précontrainte. Ils forment un outil mis à la disposition d'un gestionnaire pour évaluer de manière grossière le niveau de service intrinsèque de ses ouvrages, mais surtout pour pouvoir hiérarchiser le niveau de service des ouvrages entre-eux afin de mettre en place une politique de gestion et de maintenance du patrimoine homogène et pertinente.

Les indicateurs quantitatifs effectuent la comparaison des efforts résistants par rapport aux efforts sollicitants. Plus l'indicateur est élevé, plus la partie d'ouvrage présente une résistance importante eu égard à la situation de service examinée (type de charge, type de règlement, conditions d'exploitation). L'évaluation des indicateurs procède de

calculs comparant ainsi les effets sollicitants qui ne dépendent que des conditions d'exploitation de l'ouvrage, aux effets résistants qui ne dépendent que des caractéristiques de résistance intrinsèques des matériaux constitutifs de l'ouvrage et de leur disposition dans l'ouvrage. Dans le cas des structures précontraintes, l'effet résistant est très fortement lié à l'intégrité de la précontrainte ; or, l'accès à cette donnée fondamentale demeure très difficile. Les indicateurs évalués pour différentes situations d'exploitation fournissent une appréciation de l'adéquation du dimensionnement de la partie d'ouvrage considérée avec ces situations d'exploitation, pour l'hypothèse d'une précontrainte intègre.

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

5.2. Notion de valeur critique de précontrainte

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

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

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

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

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

La valeur de la précontrainte correspondant à la valeur limite de l'indicateur est appelée précontrainte critique (Tableau 5). Il paraît plus pertinent, pour les parties d'ouvrages où la précontrainte intervient à la fois sur les efforts sollicitants et sur la résistance (cas de l'effort tranchant), de classer les ouvrages directement sur le pourcentage de précontrainte nécessaire pour vérifier l'indice et on propose donc, de façon générale de raisonner à partir des pourcentages de précontrainte.

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

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

L'indicateur représente donc la limite *de service* de la partie d'ouvrage concernée. On peut considérer qu'il corrige l'analyse de résistance, qu'il renforce ou atténue les indicateurs ultimes. Ainsi on pourra considérer que la partie d'ouvrage sera classé selon le Tableau 6.

Tableau 5 : Classification de l'état de l'ouvrage en fonction du pourcentage de précontrainte (ELU)

ÉTAT DE L'OUVRAGE	NIVEAU	INDICE	POURCENTAGE DE PRECONTRAINTES NECESSAIRE/PRECONTRAINTES INITIALES
Ouvrage robuste	1	$I > 1,25$	$p < 90\%$
Probablement conforme à un dimensionnement moderne actuel	2	$1,15 < I < 1,25$	$90\% < p < 100\%$
Probablement légèrement sous-dimensionné, mais présentant une capacité physique à supporter les charges.	3	$1,00 < I < 1,15$	$100\% < p < 115\%$
Sous-dimensionné et probablement inapte réglementairement à supporter les charges	4	$0,85 < I < 1,00$	$115\% < p < 130\%$
Sous-dimensionné et inapte réglementairement à supporter les charges	5	$I < 0,85$	$p > 130\%$

Tableau 6 : Classification de l'état de l'ouvrage selon les indicateurs à l'ELS

ÉTAT DE L'OUVRAGE	NIVEAU	INDICE	POURCENTAGE DE PRECONTRAINTES NECESSAIRE/PRECONTRAINTES INITIALES
Conforme à son usage et présente une bonne durabilité conforme à un dimensionnement moderne actuel	1	$I > 1,00$	$p < 100\%$
Probablement sous-dimensionné et risquant de présenter des dégradations réduisant la durée de vie de l'ouvrage et le confort de l'usager	2	$0,85 < I < 1,00$	$100\% < p < 115\%$
Ouvrage dans une situation de fonctionnement peu pérenne	3	$I < 0,85$	$p > 115\%$

L'indicateur global est défini pour la résistance des poutres vis à vis de la flexion et de l'effort tranchant et vis à vis du hourdis. On retient pour classer l'ouvrage le maximum des différents coefficients retenus. Les indicateurs relatifs à la pile-marteau sont donnés séparément. Un ouvrage est alors classé en 5 niveaux, en considérant le maximum entre le niveau de service obtenu à l'ELU et celui de l'ELS. Les 5 niveaux pour l'indicateur quantitatif sont donnés dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Indicateur quantitatif global de risque d'un ouvrage (QR)

INDICATEUR QR	
1	Bon
2	Assez bon
3	Correct
4	Passable
5	Mauvais

Le Tableau 8 donne la répartition des ouvrages dans les 5 niveaux de gravité. Il en ressort qu'ils sont à plus de 50% de niveau de gravité « correct ».

Tableau 8 : Répartition par niveau de gravité des ouvrages

	1	2	3	4	5
QR	8%	13%	53%	10%	16%

6. SYNTHÈSE ET STRATÉGIES D'INVESTIGATIONS

L'indicateur qualitatif reflète globalement la susceptibilité à des risques potentiels ou avérés de l'ouvrage et rend compte principalement de l'évaluation du risque de perte de précontrainte. L'indicateur quantitatif reflète globalement l'état de santé mécanique en supposant l'ouvrage sain. Pour le gestionnaire, il convient donc de coupler ces indicateurs pour essayer d'évaluer l'état de santé mécanique compte tenu de l'état probable de la précontrainte. L'indicateur qualitatif tient compte du dossier d'ouvrage et de la vie de l'ouvrage (modifications apportées, efficacité de l'étanchéité,...). Il a été noté de 0 à 100. Il faut donc le pondérer en fonction de l'indicateur quantitatif qui permet de constater si l'ouvrage a été sur ou sous-dimensionné, ce qui relativise les conclusions de l'étude qualitative. Il faut cependant tenir compte du niveau de l'indicateur qualitatif pour la pondération. En effet, si

l'ouvrage est en très mauvais état (niveau proche de 100), le fait qu'il soit surdimensionné apporte une garantie aléatoire, car la précontrainte est probablement très dégradée. Par sécurité, on propose de ne pas reclasser l'ouvrage ayant un indicateur qualitatif très mauvais et un indicateur quantitatif bon. Au contraire, s'il est dans un état moyen, cela a un impact non négligeable. Par contre, si l'ouvrage est en mauvais état, le fait qu'il soit sous-dimensionné est un facteur aggravant important. Une matrice de prise de décision a donc été proposée et est illustrée dans le Tableau 9. Sont indiqués les pourcentages d'ouvrages appartenant à chaque couple (APR,QR).

L'approche effectuée par la définition des classes de criticité globale est destinée à ébaucher une méthode de classement des ouvrages en affectant une note globale et unique à chaque ouvrage. Il paraît nécessaire de ne définir cet indicateur global que pour un nombre de situations d'exploitation réduit et le plus pertinent semble correspondre à la situation d'exploitation actuelle (profil en travers actuel et règlement actuel pour les charges civiles sous combinaison rare).

Tableau 9 : Matrice de décision de l'analyse VIPP

CLASSE APR	CLASSE QR				
	1	2	3	4	5
0-20	0%	3%	4%	0%	0%
20-40	5%	8%	34%	7%	9%
40-60	3%	3%	14%	3%	5%
60-80	0%	0%	1%	0%	2%
> à 80	0%	0%	0%	0%	1%

CRITICITE GLOBALE

A	Ouvrage sain
B	Ouvrage peu dégradé
C	Ouvrage dégradé
D	Ouvrage très dégradé

INDICATEUR QR

1	Bon
2	Assez bon
3	Correct
4	Passable
5	Mauvais

INDICATEUR APR

0-20	Absence de Risque
20-40	Risque modéré
40-60	Risque assez élevé
60-80	Risque élevé
> à 80	Risque très élevé

La note de criticité globale croise des informations sur l'état apparent de l'ouvrage, caractérisé principalement par la note APR, et sur l'état théorique de l'ouvrage caractérisé principalement par la note QR.

Le classement effectué résulte d'une première analyse, s'appuyant sur une exploitation des dossiers d'archives qui peuvent ne refléter que partiellement une réalité (dossier d'archive incomplet, évolution de l'ouvrage insuffisamment retracée, informations pertinentes non obligatoirement repérées lors du recueil de données, ...).

L'estimation de la note QR repose sur des hypothèses et des calculs simplifiés.

7. RECOMMANDATIONS ET SUITES DONNÉES

Le classement d'un ouvrage dans une classe de criticité globale peut donc évoluer en fonction d'informations, d'investigations ou d'études complémentaires. Il est cependant intéressant de cibler les recherches éventuelles sur les critères qui ont caractérisé l'ouvrage, c'est à dire sur les critères qui ont « pénalisé » sa cotation.

Les ouvrages entrant dans la **classe A** sont caractérisés par des couples (APR, QR) qui convergent pour indiquer que l'ouvrage paraît en bon état, tant visuellement que sur le plan du dimensionnement (adéquation du dimensionnement à la situation d'exploitation actuelle). Les ouvrages concernés ne font l'objet d'aucune indication particulière et présentent un bon état général : aucun signe de mauvaise étanchéité, aucun signe de dégradation de la précontrainte, aucun facteur de risque signalé. Leur dimensionnement est jugé satisfaisant. Les quelques points signalés (données manquantes le plus souvent) méritent cependant d'être contrôlés. Sauf en ce qui concerne la certitude de la qualité de l'injection (faisant l'objet de la recherche par gammagraphie du processus N1

du Guide VIPP de 2001), cet ouvrage satisfait aux critères de conception (ce qui est visé par la référence à 1967) et à l'absence de désordres graves, qui débouchent sur une surveillance normale.

Trois cas se présentent pour les ouvrages de la **classe B** selon que la classe APR est 0-20, 20-40 ou 40-60.

Lorsque la note APR est 0-20, on peut considérer que les critères qualitatifs témoignent de la fiabilité du recueil de données APR. La note QR est moyenne et mérite d'être confirmée. Une recherche dans le dossier d'archive ciblée sur les données qui ont pénalisé la note QR et sur la partie d'ouvrage concernée est nécessaire. La réévaluation de la note QR peut entraîner une modification d'appartenance à une classe QR, et éventuellement à la classe de criticité globale : le processus du logigramme doit alors être repris. Si la note QR est confirmée, il faut procéder à un recalcul « fin » de la partie d'ouvrage concernée (hourdis ou poutre vis-à-vis de la flexion ou de l'effort tranchant), appelé « calcul ciblé ». Si les résultats de ce calcul ciblé sont bons, il convient de se limiter à une surveillance normale. Si, au contraire, les résultats de ces calculs sont mauvais, il nous paraît nécessaire de confirmer par une « investigation ciblée » avant de statuer définitivement sur l'insuffisance de la partie d'ouvrage concernée et d'entreprendre des études ou des travaux de renforcement éventuels. Si cette itération est favorable, on se limite à la surveillance normale, sinon, nous proposons de réaliser un calcul complet, destiné à confirmer que les autres parties d'ouvrages sont saines avant d'engager des mesures de confortement ou de réparation.

La note APR 20-40 est moyenne et mérite d'être confirmée. Il faut alors compléter ou confirmer le recueil des données dans le dossier d'ouvrage (à défaut par des investigations simples) en privilégiant les données ayant contribué à pénaliser la note APR. On constate que la note APR est souvent pénalisée par le manque de données. Si de nouvelles données sont obtenues, la réévaluation de la note APR peut conduire à modifier la classe d'appartenance APR de l'ouvrage, et éventuellement celle de la classe de criticité globale : le processus du logigramme doit alors être repris. Si la classe APR est confirmée, il convient d'enclencher le processus N2 du Guide VIPP de 2001, qui débouche sur différentes situations de surveillance, de travaux ou d'investigations. Pour la classe 40-60, la note APR est assez élevée et doit être confirmée. La même démarche que pour la classe APR 20-40 est appliquée.

Les ouvrages de la **classe C** sont caractérisés par trois cas très différents. Le cas 0-20 correspond à un ouvrage qui ne présenterait aucun signe de désordre (bonne note APR) mais un sous-dimensionnement flagrant. La note QR est très forte et mérite d'être confirmée. Il est en effet possible qu'une donnée totalement erronée ait produit cette note élevée (manque de donnée sur les aciers d'effort tranchant par exemple). Une recherche dans le dossier d'archive ciblée sur les données qui ont pénalisé la note QR et sur la partie d'ouvrage concernée est nécessaire. La réévaluation de la note QR peut entraîner la correction de la classe QR, et éventuellement de la classe de criticité globale. Si la note QR est confirmée, il faut procéder à un recalcul « fin » de la partie d'ouvrage concernée (hourdis ou poutre vis-à-vis de la flexion ou de l'effort tranchant), appelé « calcul ciblé ». Si les résultats de ce calcul ciblé sont bons, il convient de se limiter à une surveillance normale. Si, au contraire, les résultats de ces calculs sont mauvais, il paraît nécessaire de confirmer par une « investigation ciblée » avant de statuer définitivement sur l'insuffisance de la partie d'ouvrage concernée et d'entreprendre des études ou des travaux de renforcement éventuels. Si cette itération est favorable, on se limite à la surveillance normale, sinon, un calcul complet est à réaliser, destiné à confirmer que les autres parties d'ouvrages sont saines avant d'engager des mesures de confortement ou de réparation. Les cas des ouvrages classés en APR 20-40, 40-60 et 60-80 correspondent à des notes APR moyennes à fortes et ces notes sont à confirmer. Il est nécessaire de compléter ou de confirmer le recueil des données dans le dossier d'ouvrage (à défaut par des investigations simples) en privilégiant les données ayant contribué à pénaliser la note APR. Si de nouvelles données sont obtenues, la réévaluation de la note APR peut conduire à modifier la classe APR de l'ouvrage, éventuellement la classe de criticité globale : le processus du logigramme doit alors être repris. Pour ces trois classes, il convient d'engager le processus N2. La note QR mérite également d'être confirmée. Si tel est le cas, on effectuera un recalcul ciblé de la partie d'ouvrage concernée et d'enclencher le processus qui en découle décrit précédemment pour les classes APR 20-40 et 40-60, correspondant aux valeurs de QR supérieures à 2. Pour la classe APR 60-80, compte tenu des signes « forts » de la note APR, nous recommandons de faire un recalcul de l'ensemble du tablier. Si la classe APR est supérieure à 80, la note QR est faible et un sous-dimensionnement n'est pas soupçonné.

L'ouvrage présente donc des signes de dégradation significatifs. Après confirmation de la note APR (recherche complémentaire d'archive, analyse éventuelle de processus de type N2 qui aurait pu être engagé), il est impératif d'engager le processus N3 du Guide VIPP destiné à évaluer la précontrainte résiduelle par mesure de la tension et évaluation des sections résiduelles. Si la précontrainte résiduelle est inférieure à la précontrainte critique, il y a insuffisance potentielle à supporter les charges de services, il convient de se ramener au processus de la **classe D**, comprenant un recalcul avec scénarii d'exploitation dégradée. Dans le cas contraire, un recalcul complet de l'ouvrage doit être effectué, destiné à confirmer la valeur de la précontrainte critique.

Les ouvrages entrant dans la **classe D** sont les plus délicats à traiter. Après élimination des ouvrages qui ont fait l'objet récemment de travaux lourds (ouvrages réparés pour lesquels ont été évalués les ouvrages d'origine, ouvrages n'étant pas de véritables VIPP et pour lesquels la méthodologie ne s'applique pas, ...), les ouvrages concernés doivent être considérés comme critiques. Les notes qualitatives APR et quantitatives QR concourent à

conclure dans le mauvais état de l'ouvrage, ce qui permet de les juger fiables. Après contrôle des données APR et QR et confirmation des notes, il est impératif d'engager un processus de niveau N3 destiné à évaluer la précontrainte résiduelle par mesure de la tension et évaluation des sections résiduelles). La précontrainte en place est vraisemblablement insuffisante pour la situation d'exploitation actuelle, ce qui équivaut à supposer que la précontrainte résiduelle est inférieure à la précontrainte critique. Un recalcul complet doit être engagé avec simulation de scénarii des restrictions des situations d'exploitation (passage à un profil en travers réduit, allègement des superstructures, limitation de tonnage, ...).

Il est impératif d'engager le processus de niveau N3, (comprenant le processus N2, et qui consiste à réaliser des investigations d'évaluation de la précontrainte résiduelle), ainsi qu'un recalcul complet comprenant des scénarii d'exploitation dégradée. Ces processus peuvent déboucher sur des modalités de surveillance renforcée ou de haute surveillance ou sur des travaux préventifs visant à améliorer la protection des armatures (étanchéité, assainissement, reprise des défauts de bétonnage), voire des travaux lourds de réparation.

L'étude présentée dans cet article a été poursuivie par chacune des sociétés concessionnaires d'autoroutes et d'ouvrages suivant la criticité de leur patrimoine VIPP ainsi classé. L'étude en cours menée par ASF (Guérard 2009) illustre un exemple de poursuite d'investigations sur la base des conclusions de l'étude ASF-LCPC-CETE.

RÉFÉRENCES

Godart B., 2003. L'évaluation et la maintenance des viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes (VIPP). *Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants*, sous la direction de C. Cremona, Presses de l'ENPC.

Guérard H., 2009. Les VIPP du réseau ASF/Recalculs d'ouvrages : les VIPP d'ASF. Journées GC'09, 18-19 mars 2009, Cachan.

Guide VIPP, 2001. *Guide technique: Viaduc à travées indépendantes à poutres précontraintes* (VIPP). Presses du LCPC.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article sont largement redevables aux intervenants des diverses sociétés concessionnaires (JP.Marion-APRR, F.Melin & M.Trains-ASF, JM.Parisot & Y.Jeanjean-SANEF, S.Barbaux & F.Beauvallet-Cofiroute, E. Porre-Escota, B.Textier-SAPN, N.Miche-SFRTF, D.Jean-CCIH) qui ont participé au comité de suivi de l'étude et à la mise à disposition de l'ensemble des dossiers d'ouvrages, aux membres des groupes de pilotage (L.Labourie-CETE Nord-Picardie, M. Laude-CETE Ouest, P.Gilleron-CETE Normandie-Centre, V. Barbier-CETE Est, P.Dantec-CETE Lyon), de méthodologie (P. Corfdir-CETE Est, P.Paillusseau-CETE Sud-Ouest, C.Aubagnac-CETE Lyon, B.Tonnoir-CETE Nord-Picardie) et de relecture (B.Godart-LCPC, JC-Carles-CETE Méditerranée, J.Baneau-CETE Sud-Ouest), aux coordonnateurs (C.Aubagnac-CETE Lyon, P.Roenelle-CETE Lyon, P.Gilleron-CETE Normandie-Centre, S.Lopez-CETE Méditerranée, S.Defaux-CETE Normandie-Centre, C.Bonifas-CETE Nord-Picardie) et aux inspecteurs et aux ingénieurs en charge du recensement et du traitement des données. Qu'ils soient assurés de leur pleine reconnaissance au bon déroulement de l'étude VIPP et à la qualité des résultats obtenus.