

Analyse des risques appliquée aux viaducs à travées indépendantes en poutres précontraintes (VIPP)



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent
pour
l'avenir

Page laissée blanche intentionnellement

Guide méthodologique

Analyse des risques appliquée aux viaducs à travées indépendantes en poutres précontraintes



Ce document a été rédigé par Pierre Corfdir et Sébastien Neiers (CETE de l'Est).

Il rend compte du travail réalisé par le Réseau scientifique et technique du Ministère du développement durable, associant les groupes « Ouvrages d'Art » des Laboratoires régionaux des ponts et chaussées et les divisions « Ouvrages d'art » des CETE.

La méthodologie et le déploiement de cette étude ont été assurés par un groupe de pilotage composé de :

- Christophe Aubagnac, CETE de Lyon, Laboratoire Régional d'Autun ;
- Pierre Corfdir, CETE de l'Est ;
- Eric Delahaye, CETE Nord-Picardie ;
- Pascal Duchateau, Sétra ;
- Jean-Claude Hippolyte, Sétra ;
- Gilles Lacoste, Sétra ;
- Claire Marcotte, CETE Nord-Picardie ;
- Pierre Paillusseau, CETE du Sud-Ouest.

Sommaire

A - Analyse des risques appliquée aux VIPP	5
Introduction	6
Étape 1 : objectifs	9
Étape 2 : définition du système	9
Étape 3 : identification des aléas	10
3.1 - Principe de l'identification des aléas	10
3.2 - Identification des aléas et prise en compte de leurs manifestations sur un ouvrage VIPP	11
3.3 - Principe de pondération des notes « Facteurs et critères » et indicateur d'aléas	17
Étape 4 : vulnérabilité – analyse des scénarios	18
4.1 - Évaluation de la robustesse de l'ouvrage	18
4.2 - Définition des indicateurs	18
4.3 - Choix des indicateurs	19
4.4 - Tablier et poutre de référence	19
4.5 - Profils en travers	20
4.6 - Évolution des règlements de charges et de matériaux	20
4.7 - Limitation de tonnage	21
4.8 - Dégradation de la précontrainte	22
4.9 - Classe de vulnérabilité	22
Étape 5 : évaluation de la gravité des conséquences	24
5.1 - Principes généraux	24
5.2 - Importance de la voie portée	25
5.3 - Niveau de trafic	25
5.4 - Valeur patrimoniale de l'ouvrage	25
5.5 - Conséquences sur le niveau de service	25
5.6 - Évaluation de l'indice socio-économique	26
Étape 6 : évaluation du risque	27
6.1 - Synthèse des indicateurs d'aléas et de vulnérabilité	27
6.2 - Synthèse des niveaux d'enjeux	27
6.3 - Classes de risques	28
Étape 7 : sélection des risques	28
7.1 - Remarques préliminaires	28
7.2 - Principe de sélection des risques	29
7.3 - Ouvrages de classe de risques R1	29
7.4 - Ouvrages de classe de risques R2	30
7.5 - Ouvrages de classe de risques R3	31

Étape 8 : analyse détaillée	32
8.1 - Calcul ciblé de la partie d'ouvrage concernée	32
8.2 - Calcul complet de l'ouvrage	32
8.3 - Calcul complet de l'ouvrage assorti de scénarios d'exploitation dégradée	33
8.4 - Piles marteaux	33
B - Les niveaux d'investigation suivant le guide LCPC	35
B1 - Niveau 1 (N1)	36
B2 - Niveau 2 (N2)	36
B3 - Niveau 3 (N3)	37
C - Conclusion	39

Chapitre 1

Analyse des risques appliquée aux VIPP



Introduction

L'analyse des risques est une méthode qui permet des arbitrages techniques et financiers. Elle est bien adaptée à la gestion de patrimoines comme les ponts, qui sont techniquement complexes, présentent des enjeux socio-économiques importants, et qui doivent assurer la sécurité des usagers. La famille des ponts de type VIPP s'avère coûteuse en matière d'entretien et source de risques humains et financiers. C'est pourquoi une analyse de l'ensemble des ouvrages de type VIPP a été décidée par la DGITM/DIT (Direction Générale des Infrastructures du Transport et de la Mer/Direction des Infrastructures Terrestres).

Cette analyse a pour objectif de permettre au maître d'ouvrage d'affiner sa politique de suivi et d'inspection des ouvrages et d'optimiser ses interventions d'entretien, de réparation, voire de remplacement. Elle repose sur l'évaluation successive des aléas subis par la structure, de l'aptitude de la structure à les supporter et des enjeux liés aux conséquences de désordres.

On identifie les risques suivants :

- risque d'effondrement de tout ou partie de la structure : c'est le plus important et le plus grave, il a des conséquences humaines, financières, écologiques, etc. ;
- risque de perte d'aptitude au service de l'infrastructure : l'ouvrage ne s'effondre pas mais il est inutilisable sur une

certaine durée, ce qui a des conséquences importantes sur l'activité socio-économique d'une région ;

- risque financier sur le coût total du projet, sa durée de vie attendue du fait d'aléas de chantier, d'une inadaptation aux besoins ultérieurs, etc.

Pour la famille d'ouvrages VIPP, plusieurs objectifs sont visés :

- minimiser les coûts de gestion, en ciblant les inspections sur les parties les plus vulnérables ;
- anticiper l'exploitation du réseau en traitant, en priorité, les pathologies connues ;
- évaluer l'aptitude au service en fonction de l'évolution des besoins et de l'environnement ;
- donner au gestionnaire des outils décisionnels (affectation prioritaire des moyens financier et humain).

Une seconde phase de la démarche d'analyse des risques, portant uniquement sur les ouvrages à risques importants (forts), consistera à qualifier plus précisément les aléas par des investigations complémentaires ou à vérifier la vulnérabilité par des calculs détaillés (niveau N3 tel que défini dans le guide LCPC) [3].

Il appartiendra aux maîtres d'ouvrage et aux gestionnaires de donner suite à cette étude, en procédant aux investigations complémentaires (analyse détaillée des risques) ou en programmant des travaux de réparation (réduction des risques en améliorant l'aptitude au service).

En pratique, la méthodologie de l'analyse des risques mise en œuvre se décompose en neuf étapes :

- étape 1 – Objectifs de l'étude ;
- étape 2 – Définition du système et des principales hypothèses ;
- étape 3 – Identification et évaluation des aléas ;
- étape 4 – Analyse de la robustesse sous différents scénarios d'exploitation ;
- étape 5 – Évaluation des enjeux et de l'importance stratégique ;
- étape 6 – Évaluation du risque ;
- étape 7 – Sélection des risques ;
- étape 8⁽¹⁾ – Analyse détaillée pour les ouvrages à risque élevé ;
- étape 9⁽¹⁾ – Traitement du risque par le gestionnaire.

Pour conduire cette analyse des risques, trois facteurs primordiaux, à savoir l'aléa, la vulnérabilité et les enjeux, sont à évaluer :

• l'**aléa** est le phénomène à l'origine du risque. Il peut être de nature environnementale (séisme, ...), humaine (choc, ...) ou interne (corrosion). Un aléa est caractérisé par sa probabilité d'occurrence et son intensité : pour les VIPP, le niveau de la précontrainte dépend d'aléas internes initiaux (mise en tension, qualité des injections, ...) et d'aléas internes d'endommagement des matériaux. À partir de l'indicateur d'aléas de l'ouvrage, la classification du tableau 1 est alors proposée.

Classification des aléas des ouvrages	Indicateurs d'aléas
Aléas faibles	0 à 20
Aléas modérés	20 à 40
Aléas assez élevés	40 à 60
Aléas élevés	60 à 80
Aléas très élevés	80 à 100

Tableau 1 – Indicateur qualitatif global d'aléas d'un ouvrage

• la **vulnérabilité** est la sensibilité d'un ouvrage à l'aléa étudié : pour les VIPP, la vulnérabilité dépend beaucoup de la conception initiale, et bien sûr, du degré d'endommagement. Elle sera quantifiée par un ratio entre la résistance structurelle et les sollicitations réglementaires. Ce ratio constituera un indicateur de robustesse (l'inverse de la vulnérabilité). L'étude porte sur différents scénarios d'exploitation de l'ouvrage par réduction des profils en travers et par limitation des charges routières.

On pourra classer les ouvrages en cinq classes de vulnérabilité, en considérant le maximum entre le niveau de service obtenu à l'ELU et celui de l'ELS :

Robustesse	Classe de vulnérabilité	Vulnérabilité
Mauvais	5	Très vulnérable
Passable	4	Vulnérable
Correct	3	Correct
Assez bon	2	Peu vulnérable
Bon	1	Très peu vulnérable

Tableau 2 – Classes de vulnérabilité

• les **enjeux** représentent les conséquences en termes de dommages humains et matériels et les répercussions économiques et sociales : pour les VIPP, cet indicateur est lié principalement à la valeur socio-économique de l'ouvrage et aux itinéraires supportés et franchis. Le maître de l'ouvrage disposera ainsi d'une hiérarchisation de son patrimoine lui permettant de traiter en priorité les ouvrages dont la probabilité de défaillance est grande et présentant un grand intérêt stratégique.

L'indicateur socio-économique, ainsi évalué, permet de définir des niveaux d'enjeux (ou de conséquences) :

Niveaux d'enjeux	Indicateur socio-économique
1 - normaux	ISE < 8
2 - élevés	8 < ISE < 14
3 - très élevés	14 < ISE

Tableau 3 – Niveaux d'enjeux

L'indicateur d'aléas traduit l'importance des différents aléas qui agressent l'ouvrage, tandis que l'indicateur de vulnérabilité caractérise l'inaptitude de la structure à faire face à ces aléas. La combinaison de ces deux indicateurs caractérise la probabilité de défaillance, que nous appellerons « criticité de la structure ». Nous retenons une échelle à quatre niveaux :

Classe de criticité	Criticité des VIPP
C1	Ouvrage non critique
C2	Ouvrage peu critique
C3	Ouvrage critique
C4	Ouvrage très critique

Tableau 4 – Échelle des classes de criticité

La criticité d'un VIPP est établie par le croisement des classes de vulnérabilités et d'aléas selon le tableau suivant :

(1) Les étapes 8 et 9 ne font pas partie de la présente étude.

Classe de criticité		Classe de vulnérabilité				
		Très peu vulnérable	Peu vulnérable	Correct	Vulnérable	Très vulnérable
Classe d'aléa		1	2	3	4	5
0-20	Aléa faible	C1	C1	C2	C3	C3
20-40	Aléa modéré	C1	C2	C2	C3	C3
40-60	Aléa assez élevé	C2	C2	C3	C3	C4
60-80	Aléa élevé	C3	C3	C3	C4	C4
> à 80	Aléa très élevé	C3	C3	C4	C4	C4

Tableau 5 – Classes de criticité des VIPP

En croisant la criticité d'un ouvrage (sa probabilité de défaillance) avec l'enjeu qu'il représente (les conséquences de la défaillance), on définit une classe de risques qui doit permettre au gestionnaire d'établir une stratégie de surveillance et de réparation. Les classes de risques sont au nombre de trois :

Classes de risques	Indice
Risques faibles	R1
Risques modérés	R2
Risques forts	R3

Tableau 6 – Échelle des classes de risques

Le tableau suivant permet d'établir le niveau de risque en fonction de la classe de criticité et du niveau d'enjeu :

CLASSES DE RISQUES	Classe de criticité			
	C1	C2	C3	C4
NIVEAUX D'ENJEUX	OA non critique	OA peu critique	OA critique	OA très critique
1 - normaux	R1	R1	R2	R3
2 - élevés	R1	R1	R2	R3
3 - très élevés	R1	R2	R3	R3

Tableau 7 – Classes de risques

Lorsque le risque est acceptable (faible), l'analyse des risques s'arrête, mais l'ouvrage doit bien évidemment faire l'objet d'une procédure classique de suivi et d'inspection qui peut toutefois déboucher dans certains cas sur des investigations complémentaires.

Lorsque le risque est modéré, on peut, selon les cas, soit arrêter l'analyse à ce stade et prendre des mesures de surveillance et d'entretien plus poussées que pour un

ouvrage à risque faible, soit réaliser une étude détaillée lorsque l'on juge que celle-ci devrait permettre de mieux évaluer le risque.

Lorsque le risque est élevé, il faut réaliser une analyse des risques détaillée pour mieux quantifier son importance (ce qui peut conduire à requalifier le risque), et surtout, en vue du traitement du risque, pour l'utilisation optimale des moyens.

Dans tous les cas, le gestionnaire dispose principalement de deux leviers pour gérer le risque :

- réduire les aléas, ceux portant sur l'état de la structure par une meilleure connaissance de l'ouvrage (contrôle des épaisseurs d'enrobés, état de la précontrainte, ...) et ceux liés au trafic en réduisant les charges routières autorisées à circuler ;
- diminuer la vulnérabilité de son patrimoine par des réparations ou des renforcements.

Étape 1 : objectifs

Pour la famille d'ouvrages VIPP, plusieurs objectifs sont visés :

- minimiser les coûts de gestion, en ciblant les inspections sur les parties les plus vulnérables ;
- anticiper l'exploitation du réseau en traitant en priorité les pathologies connues ;
- évaluer l'aptitude au service en fonction de l'évolution des besoins et de l'environnement ;
- donner au gestionnaire des outils décisionnels (affectation prioritaire des moyens financier et humain).

Une seconde phase de la démarche d'analyse des risques, portant uniquement sur les ouvrages à risques importants (forts), consistera à qualifier plus précisément les aléas par des investigations complémentaires ou à vérifier la vulnérabilité par des calculs détaillés (niveau N3 tel que défini dans le guide LCPC) [3].

Il appartiendra aux maîtres d'ouvrage et aux gestionnaires de donner suite à cette étude, en procédant aux investigations complémentaires (analyse détaillée des risques) ou en programmant des travaux de réparation (réduction des risques en améliorant l'aptitude au service).

Étape 2 : définition du système

Pour les VIPP, la sécurité est alors principalement gouvernée par la précontrainte qui constitue le cœur de notre analyse. La perte du niveau de précontrainte, du fait d'aléas comme un mauvais dimensionnement initial, une mauvaise mise en œuvre, une mauvaise protection ou des agressions extérieures, est le principal facteur influant sur la vulnérabilité de ce type d'ouvrage. Cette déficience peut entraîner soit l'effondrement de tout ou partie de la structure, soit la perte d'aptitude partielle au service. L'analyse de ces risques comporte deux phases : la première, dite « simplifiée », consiste à analyser l'ensemble du patrimoine VIPP du réseau national, et la seconde phase, dite « détaillée », portera sur les ouvrages jugés à risques forts.

Nota : des aléas tels que les séismes ou les affouillements ne sont pas pris en considération dans cette étude qui se focalise principalement sur le tablier. Il est à noter que la méthodologie d'identification des aléas, objet du présent document, ne s'applique que **partiellement** aux tabliers d'ouvrages renforcés ou élargis par procédés modifiant fortement leur mode de fonctionnement (renforcement par précontrainte extérieure, par exemple).

Étape 3 : identification des aléas

L'**aléa**, phénomène qui est à l'origine du risque, peut se produire ou non au cours de la vie de l'ouvrage.

On peut classer les aléas en plusieurs **catégories** :

- **aléas environnementaux « exceptionnels »** : séisme, inondation, cyclone ou tempête exceptionnel, chute de rochers, glissement de terrain, foudre, avalanche, pluie violente, sol de caractéristiques nettement plus faibles que celles escomptées ;
- **aléas liés à l'activité humaine** : incendie, explosion, choc de véhicules (routiers, maritimes, aériens), attaque terroriste, surcharge d'un ouvrage ;
- **aléas liés à un défaut interne initial** : mauvais dimensionnement, mauvaise conception de détail, mauvaise mise en œuvre voire malfaçon, défaut de matériau ;
- **aléas d'endommagement interne à la structure** : rupture ou perte de résistance d'éléments internes à la structure du fait de l'évolution des caractéristiques des matériaux (corrosion, fatigue).

Un aléa est caractérisé par sa **probabilité d'occurrence** pendant une **période de référence** et l'**intensité** de sa manifestation. Pour un ouvrage existant, les aléas internes résultant d'un endommagement des matériaux ont une probabilité d'occurrence qui augmente avec le temps, d'autant plus vite que les conditions d'environnement sont sévères (environnement marin, gel/dégel, ...) et que l'exploitation de l'ouvrage est intense (nombre de passage de PL, fréquence d'utilisation de sels de déverglaçage). Leur probabilité peut être appréciée à partir d'un **indicateur d'état**, fonction de la qualité initiale de la construction, des matériaux et de leur endommagement.

La présente étude des VIPP du RRN porte principalement sur la dégradation de la structure et plus particulièrement sur l'incertitude de l'état de précontrainte. Ainsi, sont essentiellement prises en considération les deux dernières catégories d'aléas « liés à la structure ». Pour cette famille d'ouvrages, ces catégories d'aléas sont celles qui ont la plus forte probabilité d'occurrence.

3.1 - Principe de l'identification des aléas

Les aléas à l'origine de la dégradation des VIPP sont quantifiés par une note résultant de facteurs qualitatifs et de critères associés préétablis. Ces notes qualifient la **manifestation des aléas** (« croisement » de « l'intensité de l'aléa » et de sa « probabilité d'occurrence »), dont les probabilités d'occurrence sont parfois difficiles à déterminer, d'autant plus que les différents aléas ne sont pas indépendants les uns des autres.

Elles qualifient en particulier l'état de la précontrainte, soit directement, soit indirectement par l'intermédiaire de facteurs qui favorisent la dégradation.

Pour hiérarchiser les manifestations des aléas que l'on prend en compte pour les VIPP, il est proposé de considérer que celles-ci seront très faibles, hors défaut de conception ou d'exécution inhérent à tout ouvrage, pour un ouvrage construit avec les règlements de charges et de calculs actuels, avec une conception moderne avec hourdis général non précontraint.

Pour une bonne conception générant une manifestation de ces aléas très faible, on affectera la **note de zéro**. À partir de cette note de référence, tout aléa est en principe évalué sur une échelle de qualification comportant les niveaux définis dans le tableau 1.

Niveaux de qualification pour la manifestation d'un aléa donné	Notes associées
Manifestation très faible de l'aléa	+0
Manifestation modérée de l'aléa	+1
Manifestation assez élevée de l'aléa	+2
Manifestation élevée de l'aléa	+3
Manifestation très élevée de l'aléa	+4

Tableau 1 – Échelle de notes associées à la manifestation des aléas

3.2 - Identification des aléas et prise en compte de leurs manifestations sur un ouvrage VIPP

L'identification des aléas et la prise en compte de leurs manifestations renvoient aux points sensibles classiques comme la conception générale, l'exécution, l'exploitation, l'entretien et l'environnement.

Ainsi, l'étude prend en compte les **thèmes** suivants :

- **aléas** liés à un défaut interne initial :
 - a : conception générale ;
 - b1 : précontrainte initiale ;
 - c : exécution.
- **aléas** d'endommagement interne à la structure :
 - b2 : état général de la précontrainte ;
 - d : entretien et exploitation ;
 - e : environnement ;
 - f : état général actuel de l'ouvrage.

3.2.1- Aléas de conception générale

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 dallettes 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'identification des aléas et de la prise en compte de leurs manifestations, les facteurs qualitatifs suivants ont été retenus pour caractériser la conception générale d'un ouvrage :

- pont avec hourdis général ou hourdis intermédiaire ;
- pont avec 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 dallettes de continuité qui permettent d'éviter les infiltrations d'eau sur les appuis intermédiaires ;
 - présence ou non d'entretoises intermédiaires ;
 - nombre de poutres ; en effet, 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 les critères et les notes associées présentées dans le tableau 8, page suivante :

Facteurs et critères	Notes
Pont avec hourdis	
<i>général</i>	+0
<i>intermédiaire</i>	+1
Pont	
<i>avec précontrainte transversale</i>	+1
<i>sans précontrainte transversale</i>	+0
Ferraillage passif substantiel dans les âmes des poutres à l'about (> 4 cm ² /ml)	
<i>Oui</i>	+0
<i>Non</i>	+2
Ferraillage passif substantiel dans les hourdis (> 4 cm ² /ml)	
<i>Oui</i>	+0
<i>Non</i>	+1
Épaisseur de l'âme dans la section proche de l'appui à h/2 (supérieur à 20 cm)	
<i>Oui</i>	+0
<i>Non</i>	+2
Épaisseur de l'âme en section courante (supérieur à 16 cm)	
<i>Oui</i>	+0
<i>Non</i>	+2
Présence de dalles de continuité évitant les infiltrations d'eau sur appuis intermédiaires	
<i>Oui</i>	+0
<i>Non</i>	+2
Présence d'entretoises intermédiaires	
<i>Oui</i>	+0
<i>Non</i>	+2
Nombre de poutres (> 3) Si inférieur ou égal à 3, l'ouvrage est peu hyperstatique (+2) et présente une faible redondance des poutres porteuses.	
<i>Oui</i>	+0
<i>Non</i>	+2
Qualité du recueil des eaux (ruissellement sur les poutres latérales ou les abouts)	
<i>Correct</i>	+0
<i>Moyen</i>	+1
<i>Mauvais</i>	+2
Piles marteaux avec chevêtre précontraint	
<i>Non</i>	+0
<i>Oui</i>	+1
Chape d'étanchéité à l'origine	
<i>Absence</i>	+5
<i>Chape ciment ou chape mortier</i>	+3
<i>Mastic asphalte</i>	+1
<i>Autres</i>	+0

Tableau 8 – Notes associées aux facteurs relatifs à la conception générale

Nota : type de chape d'étanchéité à l'origine : pour certains types d'étanchéité plus que douteux, notamment certaines résines comme la résine époxy PONTALCO qui ont pu être brûlées à la mise en œuvre des enrobés, on retient la note de **+5** (corrélation à faire bien entendu avec les constats des diverses inspections détaillées).

Remarque : on doit aussi prendre en compte l'étanchéité des trottoirs (poutres de rive).

3.2.2 Aléas de conception générale

La corrosion des câbles de précontrainte est bien sûr 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 l'aléa « 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 l'estimation de la manifestation des aléas du fait de la nature de l'acier utilisé (acier tréfilé ou non), des gaines, des produits d'injection et des règlements.

Facteurs et critères	Notes
Corrosion fissurante (câbles de type KA)	
<i>Oui</i>	+3
<i>Non</i>	+0
Constitution de la précontrainte (pertes de précontraintes/possibilité de réancrage)	
<i>Fils parallèles</i>	+1
<i>Torons parallèles/fils crantés/torons hélicoïdaux</i>	+0
Nature des gaines de précontrainte	
<i>Tube acier</i>	+0
<i>Feuillard acier</i>	+1
<i>Conduit en feuillard de plomb</i>	+3
<i>Guipage</i>	+3
<i>Guipage (hourdis)</i>	+4
Coulis d'injection des câbles de précontrainte (voir nota)	
<i>Après 1973</i>	+0
<i>Avant 1973</i>	+2
<i>Utilisation d'adjuvant expansif avec poudre d'aluminium type intraplast Z</i>	+3
<i>Utilisation de ciment de laitier</i>	+3
<i>Présence d'éléments corrosifs (chlorures d'origine dans le coulis)</i>	+4
Résistance caractéristique du béton	
<i>> 35 MPa</i>	+0
<i>30 Mpa – 35 MPa</i>	+1
<i>25 MPa – 30 MPa</i>	+2
<i>20 Mpa – 25 MPa</i>	+3
Armatures de précontrainte initialement graissées	
<i>Non</i>	+1
<i>Oui</i>	+0

Tableau 9 – Notes associées aux facteurs relatifs aux matériaux

Nota : en l'absence d'informations sur la composition du coulis et de résultat d'investigation, on retient la note proposée suivant l'année de construction (+2 avant 1973 ou +0).

Quantité initiale de précontrainte

Les évolutions réglementaires, tant sur les charges routières à prendre en compte, que sur le travail des matériaux, influent beaucoup 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 définis :

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

Le tableau 10 indique les critères et les notes retenus pour les facteurs relatifs à la quantité de précontrainte :

Facteurs et critères	Notes
Précontrainte calculée (évaluation plus ou moins rigoureuse des pertes de précontrainte)	
<i>Avant l'IP1 (1965)</i>	+2
<i>Avec l'IP1 entre 1965 et 1983</i>	+1
<i>Avec le BPEL après 1983</i>	+0
Règlement de charges (pour la flexion locale)	
<i>Avant 1960</i>	+2
<i>Entre 1960 et 1971</i>	+1
<i>Après 1971</i>	+0
Note de calcul informatisée	
<i>Non</i>	+2
<i>Oui</i>	+0

Tableau 10 – Notes associées aux facteurs relatifs à la quantité de précontrainte

État actuel de la précontrainte

L'état de la précontrainte joue un rôle important qui est caractérisé dans l'identification des aléas et la prise en compte de leurs manifestations par les critères préétablis suivants :

- état apparent de la précontrainte (non corrodé, peu corrodé, assez corrodé, très corrodé) apprécié sur la zone la plus dégradée de l'ouvrage ;
- injection des conduits (état de remplissage des conduits : bon ou mauvais – cf. Guide VIPP du LCPC d'octobre 2001, p. 35) ;
- état apparent du béton d'enrobage ;
- gestion de l'étanchéité durant la vie de l'ouvrage (présence ou non de calcite en sous face du hourdis – coloration des dépôts) ;
- présence ou non d'une dalle de continuité entre deux travées ;
- utilisation ou non de sels de déverglaçage.

À l'exception des trois derniers facteurs qui sont introduits respectivement dans les facteurs liés à l'entretien, la conception générale et à l'environnement, les trois premiers sont traités conformément au tableau 11 :

Facteurs et critères	Notes
État de la précontrainte (si l'on bénéficie de rapports d'ouvertures de fenêtre : analyse des faciès de rupture, cf. Guide VIPP du LCPC d'octobre 2001, p. 43)	
<i>Aspect sain ou enrouillé</i>	+0
<i>Présence de piqûres entourées de tâches rouges</i>	+1
<i>Présence de cratères (corrosion par dissolution localisée)</i>	+2 à +4 (suivant importance)
<i>Corrosion par dissolution généralisée</i>	+6 à +8 (suivant importance, dont présence de fils rompus)
<i>Présence de piqûres entourées de tâches noires</i>	+8
<i>Présence de fils rompus par corrosion fissurante sous tension</i>	+10
Injection des conduits – état de remplissage des conduits (si l'on bénéficie de rapports de gammagraphie, en fonction du % de clichés montrant un manque de coulis, cf. Guide VIPP du LCPC d'octobre 2001, p. 35)	
<i>Bon</i>	-1
<i>Mauvais</i>	+1
<i>Aucune information</i>	+0
État apparent du béton d'enrobage (si existence d'un rapport de diagnostic du béton d'enrobage, à apprécier en fonction des résultats obtenus)	
<i>Sain</i>	+0
<i>Moyen</i>	+1
<i>Dégradé</i>	+2

Tableau 11 – Notes associées aux facteurs relatifs à l'état de précontrainte

Nota :

• Si l'on bénéficie de résultats d'analyses sur prélèvements, il est bien entendu possible de s'en servir :

PH acide : +2 ;

- présence d'éléments nocifs (chlorure, ...) en quantité significative : +4 ;
- sensibilité à la corrosion fissurante sous tension mise en évidence : +6.

• En l'absence d'investigation particulière (pas de gammagraphie ou de fenêtre réalisée et/ou rapports non retrouvés), on retient la note de +0 en l'absence bien entendu de tout problème particulier et de désordre pouvant traduire une insuffisance de précontrainte.

3.2.3 Aléas d'exécution

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 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.

Nota : en l'absence d'informations, on retient la note +0 par défaut.

3.2.4 Aléas d'entretien et d'exploitation

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. 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, attelage de travées), c'est-à-dire une réduction de la manifestation de certains aléas.

Le tableau 12 détaille les critères et notes retenus pour les facteurs liés à l'entretien et l'exploitation :

Facteurs et critères	Notes
État du recueil des eaux (entretien et/ou réfection)	
<i>Bon</i>	+0
<i>Moyen</i>	+1
<i>Mauvais</i>	+2
Entretien de l'étanchéité (en particulier au droit des joints de dilatation)	
<i>Bon</i>	+0
<i>Moyen</i>	+1
<i>Mauvais</i>	+2
Réfection de la chape d'étanchéité	
<i>Pas d'information</i>	+0
<i>Date de moins de 10 ans</i>	-1
<i>Date de plus de 10 ans</i>	-3
<i>Plusieurs réfections</i>	-5
Présence de ruissellement ou de traces humides à proximité	
<i>Des câbles ou des ancrages des câbles relevés</i>	+3
<i>Des ancrages des câbles d'about</i>	+2
<i>Avec traces de couleur rouille</i>	+4
<i>Non</i>	+0
Présence de ruissellement ou de traces humides dans le hourdis à la liaison poutre/hourdis pour les hourdis précontraints transversalement	
<i>Oui</i>	+2
<i>Avec traces de couleur rouille</i>	+3
<i>Non</i>	+0
Rechargement de chaussée	
<i>> 4 cm</i>	+1
<i>> 8 cm</i>	+2
Attelage des travées postérieur à la construction	
<i>Oui</i>	-2
<i>Non</i>	+0
Travaux de réparation	
<i>Selon l'importance et l'efficacité des réparations</i>	-3 à +0
<i>Évolution du profil en travers</i>	
<i>Non</i>	+0
<i>Rajout de voies de circulation</i>	+2
<i>Réduction du nombre de voies</i>	-2

Tableau 12 – Notes associées aux facteurs relatifs à l'entretien et à l'exploitation

Nota : travaux de réparation : ne pas donner un bonus pour des travaux qui ne modifient pas l'état structurel de l'ouvrage, proposer la note +0 par défaut.

3.2.5 - Aléas d'environnement

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 :

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

Les critères et les notes de gravité sont donnés dans le tableau 13 :

Facteurs et critères	Notes
Importance des sels de déverglaçage (selon l'annexe du « Guide technique pour la durabilité des bétons soumis au gel » du LCPC)	
<i>Hiver clément</i>	+0
<i>Hiver peu rigoureux</i>	+1
<i>Hiver assez rigoureux</i>	+2
<i>Hiver rigoureux</i>	+3
Proximité de sites industriels chimiques	
<i>Distance < 1 km</i>	+2
<i>Distance > 1 km</i>	+0
Proximité de la mer	
<i>Distance < 1 km</i>	+2
<i>Distance > 1 km</i>	+0

Tableau 13 – Notes associées aux facteurs relatifs à l'environnement

3.2.6 - Aléas d'état général actuel de l'ouvrage

Les inspections régulières des ouvrages permettent d'évaluer l'état de santé probable des ouvrages à partir de l'état apparent des matériaux. Pour évaluer cet état, on appliquera les recommandations de l'ancien Ministère de l'Équipement pour l'évaluation de son patrimoine, en donnant la note IQOA. Si l'ouvrage a fait l'objet d'un diagnostic particulier, l'état de l'ouvrage sera également évalué à partir des rapports fournis. Un commentaire justifiera la note proposée.

Les notes associées sont présentées dans le tableau suivant :

Facteurs et critères	Notes
Note IQOA	
<i>1</i>	+0
<i>2</i>	+0
<i>2E</i>	+2
<i>3</i>	+3
<i>3U</i>	+6

Tableau 14 – Notes associées au facteur IQOA

Nota :

- si la note IQOA trouvée dans le dossier semble inappropriée, il est demandé de la recalibrer en le précisant explicitement ;
- en l'absence de notation IQOA (NE), mais en présence d'un rapport d'inspection détaillée récent (< 6 ans), une note IQOA sera établie « à dire d'expert » ;
- en l'absence de notation IQOA (NE) et en l'absence de rapport d'inspection détaillée récent, une note IQOA sera établie « à dire d'expert » sur la base des données du dossier et de la visite rapide sur l'ouvrage ; en revanche, il faudra prévoir une nouvelle IDP dans les meilleurs délais pour pouvoir attribuer une note IQOA pertinente à l'ouvrage ;
- si l'ouvrage a fait l'objet d'un diagnostic particulier (par exemple, la détermination de sa capacité portante), l'état de l'ouvrage sera évalué à partir des rapports fournis.

Paragraphes	Thèmes	Fourchettes des notes d'aléas		Notes de référence normalisant un ouvrage très malade
4.1	Conception générale	0	23	12
4.2.1	Précontrainte initiale	0	22	12
4.2.2	État général de la précontrainte	-1	13	12
4.3	Exécution	0	4	4
4.4	Entretien et exploitation	-10	15	10
4.5	Environnement	0	7	3
4.6	État général actuel de l'ouvrage	0	6	6

Tableau 15 – Fourchette des notes d'aléas par thèmes et notes de référence

3.3 - Principe de pondération des notes « Facteurs et critères » et indicateur d'aléas

L'indicateur d'aléas de l'ouvrage est obtenu à partir des notes critères associées aux facteurs identifiés dans les paragraphes précédents, avec un système de pondération.

Les principales difficultés de la classification résident dans la multiplicité des facteurs qualitatifs et dans le fait que les aléas correspondants ne sont pas indépendants entre eux.

Pour un thème donné (tableau 15), la note d'aléas de l'ouvrage, si elle est rapportée à la valeur maximale mathématiquement possible, peut être bornée entre 0 et 10. Cependant, dans cette situation, cela conduit à concentrer les notes autour de la valeur moyenne.

Nous avons donc retenu de rapporter la note d'aléas de l'ouvrage pour un thème donné à une valeur « critique » qui caractérise un ouvrage en très mauvais état (tableau 15). En théorie, des notes supérieures à 10 peuvent être obtenues et en pratique, en testant la méthode sur des ouvrages du réseau routier national qui ont été démolis, ce principe fonctionne bien.

Le calage de l'échelle de classification des ouvrages représente une vraie difficulté qui a conduit à tester plusieurs modes de classification sur une dizaine d'ouvrages du réseau routier national (cf. annexe B).

Au final, le système de pondération retenu, avec des coefficients de pondération fixes (tableau 16), donne un poids important à la précontrainte.

Paragraphes	Thèmes	Pondérations des notes
4.1	Conception générale	1,5
4.2.1	Précontrainte initiale	3
4.2.2	État général de la précontrainte	3
4.3	Exécution	0,5
4.4	Entretien et exploitation	0,5
4.5	Environnement	0,5
4.6	État général actuel de l'ouvrage	3

Tableau 16 – Système de pondération

À partir de l'indicateur pondéré d'aléas de l'ouvrage, la classification du tableau 17 est alors proposée.

Classification des aléas des ouvrages	Indicateurs d'aléas
Aléas faibles	0 à 20
Aléas modérés	20 à 40
Aléas assez élevés	40 à 60
Aléas élevés	60 à 80
Aléas très élevés	80 à 100

Tableau 17 – Indicateur qualitatif global d'aléas d'un ouvrage

Étape 4 : vulnérabilité – analyse des scénarios

Cette étape consiste à tester l'ouvrage vis-à-vis des aléas et à déterminer si ceux-ci provoquent sa ruine ou non. Les aléas étant nombreux et se combinant en conséquences variées et nombreuses pouvant toucher différentes parties de la structure, il est impossible d'envisager tous les scénarios. Il faut sélectionner les **scénarios** jugés les plus représentatifs et tester l'ouvrage avec ces derniers.

Chaque scénario examiné dans cette étude VIPP vise, pour une situation d'exploitation donnée, à évaluer les ouvrages face aux aléas de défaut initial (mauvaise conception, mauvaise mise en œuvre, ...) et d'endommagement interne, qui se traduisent par une probabilité de défaillance de la structure, par insuffisance de la capacité portante d'une partie du tablier ou d'un appui. La robustesse traduit l'aptitude de l'ouvrage à faire face à ce scénario, inversement, la vulnérabilité traduit sa sensibilité.

Les **différents scénarios** étudiés sont des scénarios d'exploitation pour trois profils en travers :

- **scénario avec profil initial** : avec les charges de dimensionnement de l'époque de construction :
 - sous les charges civiles et charges militaires éventuelles ;
 - avec limitation de tonnage à 19 t ;
 - avec limitation de tonnage à 12 t ;
 - avec limitation de tonnage à 3,5 t.
- **scénario avec profil actuel** : avec les charges de dimensionnement actuelles :
 - sous les charges civiles et charges militaires éventuelles ;
 - avec limitation de tonnage à 19 t ;
 - avec limitation de tonnage à 12 t ;
 - avec limitation de tonnage à 3,5 t.
- **scénario avec profil réduit** : avec les charges de dimensionnement actuelles :
 - sous les charges civiles et charges militaires éventuelles ;
 - avec limitation de tonnage à 19 t ;
 - avec limitation de tonnage à 12 t ;
 - avec limitation de tonnage à 3,5 t.

Pour apprécier la robustesse, nous avons choisi d'évaluer le ratio entre la résistance structurelle et les sollicitations pour les différents scénarios. Plus ce ratio est élevé, plus la structure est robuste et capable d'encaisser soit des surcharges importantes, soit une défaillance de l'un de ses éléments structurels. Cette méthode ne permet toutefois pas d'apprécier quantitativement le bénéfice d'une redondance structurelle éventuelle.

Dans une analyse des risques, il est également intéressant d'apprécier la capacité de la structure à prévenir qu'elle s'approche de la défaillance, et la vitesse à laquelle la

dégradation évolue. Grâce à cette information, il est en effet possible de prendre les mesures conservatoires appropriées, par exemple le renforcement des zones de rupture fragiles (brutale) et/ou la surveillance renforcée ou la haute surveillance de l'ouvrage. Cela ressort d'une analyse détaillée des ouvrages les plus exposés. Cet aspect devra être abordé dans une phase d'étude ultérieure.

4.1 - Évaluation de la robustesse de l'ouvrage

L'évaluation de la robustesse d'un ouvrage ne peut se faire que par l'évaluation de sa capacité portante. Cette évaluation est effectuée en termes de résistance aux états limites, dans l'état d'origine (précontrainte intègre) pour les parties principales de l'ouvrage (poutres, hourdis et chevêtres de piles marteaux).

Cette analyse permet également de mettre en évidence la **marge disponible sur la précontrainte** (en pourcentage de cette précontrainte intègre), par rapport à des seuils de criticité prédéfinis. La marge dont on dispose représente la fraction de précontrainte qui pourrait être « consommée par corrosion » avant atteinte du seuil. Cette marge permet également d'apprécier le surcroît de sollicitation que l'ouvrage pourrait supporter avec une précontrainte intègre. Si, au contraire, on observe un déficit (marge négative) pour certains scénarios, il est possible d'apprécier l'évolution du déficit, voire le retour à un indicateur satisfaisant, pour des scénarios plus restrictifs (réduction du profil en travers et limitation de tonnage).

4.2 - Définition des indicateurs

L'objectif est d'apprécier la robustesse de l'ouvrage par une méthode pertinente pour décrire le fonctionnement de l'ouvrage, sur la base de calculs simples.

La quantification de la robustesse mécanique repose sur des indicateurs permettant d'évaluer l'aptitude au service (états limites de service) et la sécurité structurelle (états limites ultimes). Dans cet objectif, cette robustesse est représentée par un indicateur de type générique :

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

Cet indicateur est évalué pour les trois scénarios définis précédemment :

- Le **scénario avec profil initial** correspond à la configuration d'origine, compte tenu des règlements de charges (définition des charges civiles et militaires) et des règlements de matériau en vigueur (définition des coefficients de combinaison) à l'époque de sa conception. Le profil en travers utilisé pour disposer les charges est le profil en travers initial.

- Les **scénarios avec profil actuel et avec profil réduit** correspondent à la situation actuelle, compte tenu des définitions des règlements actuels (fascicule 61, titre II de 1971 et BPEL) qui précisent la nature des charges d'exploitation et les différents coefficients de combinaison d'action. Ces deux scénarios se distinguent uniquement par le profil en travers fonctionnel sur lesquels sont disposées les charges.

Pour ces trois scénarios, les indicateurs sont évalués pour différents types de trafics (trafic réglementaire civil et militaire, trafic limité en tonnage).

4.3 - Choix des indicateurs

Grâce à un calcul simplifié mais réaliste de l'ouvrage, on approche 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 parties d'ouvrage (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 ensemble à la sécurité structurale de l'ouvrage. Pour un VIPP, il s'agit 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.

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.

L'évaluation de ces indicateurs de robustesse concerne uniquement les structures de type VIPP, et n'est pas transposable à des structures modifiées ou réparées (par exemple, élargissement par poutres métalliques, renforcement par précontrainte additionnelle), qui sont des structures hybrides nécessitant une approche spécifique non prévue dans la présente étude. Il en est de même pour les ouvrages de type VIPP mécaniquement continus (noyau de clavage sur appui et précontrainte longitudinale de continuité).

Les ouvrages correspondants seront identifiés au début de l'étude et ne pourront pas faire l'objet d'une analyse de robustesse.

Les développements qui suivent ont pour objet de préciser dans quelles conditions les indicateurs seront déclinés.

4.4 - Tablier et poutre de référence

Un franchissement ne se résumant pas toujours à une travée indépendante, nous avons défini la notion de **tablier de référence**, pour lequel seront recensées les données utiles à la construction des indicateurs. En effet, dans le cas général, les ouvrages peuvent présenter des travées de portées différentes, des tabliers séparés ou des tabliers uniques. L'analyse des risques est effectuée sur un tablier de référence, sujet du plus grand risque pressenti dans l'ensemble des tabliers constituant le franchissement.

Pour ce tablier, l'analyse est effectuée sur une poutre de référence, représentative du plus grand risque pressenti dans l'ensemble des poutres constituant le tablier.

4.4.1 - Tablier de référence

Le franchissement peut comprendre un tablier unique portant les deux sens de circulation ou des tabliers séparés.

Cas d'un tablier unique

On décrit le tablier unique portant les deux sens de circulation sans le TPC (on intègre la largeur du TPC dans la largeur chargeable).

Cas de tabliers séparés

Si les tabliers ont été construits à la même date (même opération) et par le même constructeur, on ne réalise qu'une seule étude en retenant l'ouvrage le plus large (conduisant au plus grand nombre de voies, ce qui maximise l'effet des charges routières). On caractérisera les aléas par la situation la plus défavorable des deux tabliers.

Dans tous les autres cas, on réalisera deux études indépendantes. Il appartiendra toutefois aux personnes chargées de l'étude de juger s'il est nécessaire de réaliser deux analyses distinctes.

En cas de tablier élargi

Les tabliers peuvent avoir été élargis (en général récemment) en accolant une structure nouvelle. Seul le tablier initial (non élargi) est alors étudié.

Pour les OA réparés

L'analyse de(s) risques ne peut pas être effectuée, mais a dû l'être lors du diagnostic précédant les études de réparation.

4.4.2 - Travée de référence

On se réfère à la travée de plus grande portée.

En effet, sur un franchissement comportant plusieurs travées de portée différente, il s'avère généralement que toutes les poutres ont la même hauteur, ce qui confère implicitement une plus grande robustesse aux poutres franchissant les petites portées.

4.4.3 - Poutre de référence

En général, les VIPP comportent des poutres régulièrement espacées. Les poutres de rive ont souvent des caractéristiques différentes des poutres dites « intermédiaires » (géométrie, béton, charges, câblage). On étudie donc un tablier fictif constitué de poutres IDENTIQUES et ÉQUIDISTANTES de caractéristiques rigoureusement identiques dont le nombre est noté « **npou** ». Les poutres constitutives du tablier sont espacées d'une distance « **entrapou** ». La largeur de la structure de ce tablier sera donc de « **npou entrapou** », qui pourra être légèrement différente de la largeur réelle.

La poutre décrite (et dont les caractéristiques sont recherchées dans le dossier d'ouvrage) est une poutre intermédiaire. En pratique, la poutre la plus proche de l'axe de l'ouvrage est considérée.

4.5 - Profils en travers

Trois profils en travers sont étudiés.

Le **profil en travers initial** permet d'évaluer l'effet des charges de dimensionnement. Il doit normalement figurer dans les documents d'exécution.

Les profils en travers des scénarios étudiés doivent également être décrits :

- le profil en travers actuel ;
- un profil en travers réduit se déduisant en neutralisant les BDG et BAU ou BDD.

À partir des profils en travers fonctionnels (trottoirs, largeur roulable, bandes dérasées, chaussées), les profils en travers de calcul (trottoirs, bandes non chargeables et largeur chargeable) peuvent être déduits, en tenant compte de la proximité des dispositifs de retenue. Chaque profil en travers fonctionnel est décrit par :

- les différentes largeurs de plate-forme (**etroitg, bdg, chaussée, bau ou bdd, etroitd**) ;
- la position relative chaussée/structure définie par la donnée dpoutg ;
- l'intensité des superstructures (épaisseur enrobé + chape + éventuel renformis, intensité et position des équipements en bord d'ouvrage tels que trottoirs, corniches, équipements de sécurité, ...).

4.6 - Évolution des règlements de charges et de matériaux

La période de construction de la centaine d'ouvrages concernés par l'étude a vu une évolution réglementaire importante, tant pour les règlements de charges que pour les règlements de matériaux (béton précontraint, en particulier).

Les ouvrages les plus anciens ont été dimensionnés selon les règles en vigueur à l'époque de leur conception. Bien que la situation d'exploitation actuelle soit la plus significative et la plus intéressante, l'évolution des indicateurs est effectuée depuis la construction.

La figure 1 illustre les différentes situations qu'il est possible de rencontrer (en pratique, aucun ouvrage n'a été dimensionné aux Eurocodes).

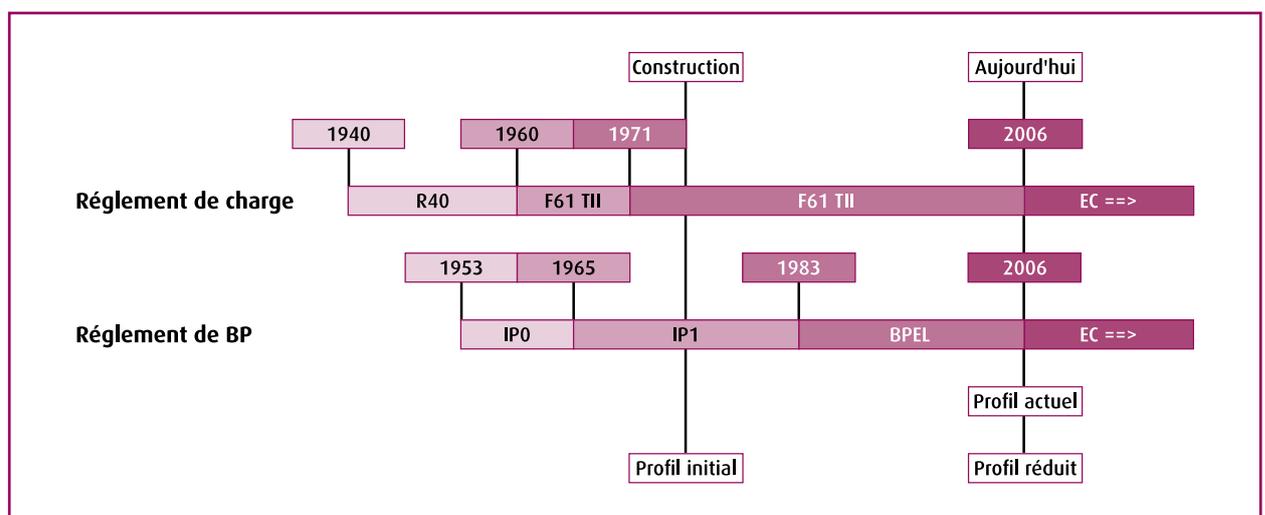


Figure 1: réglementations concernées par l'étude

4.6.1 - Règlement de béton précontraint

- 1953 : premier règlement de béton précontraint sous la forme de l'instruction provisoire relative à l'emploi du béton précontraint, dite « IP0 » ;
- 1965 : circulaire n° 44 du Ministère des Travaux publics, des Transports et du Tourisme : instruction provisoire relative à l'emploi du béton précontraint, dite « IP1 » ;
- 1983 : fascicule 62, titre I du CCTG, aussi appelé « règles BPEL ». Différentes mises à jour ont été publiées en 1991 et 1999.

4.6.2 - Règlements de charges de 1940 à 1960

Dans la période concernée par l'ensemble des ouvrages, les règlements de 1940, puis de 1960 ont précédé le règlement actuel datant de 1971.

Charges de type A(I)

$$\text{En 1940 : } A_{40}(l) = 1,200 - 0,008 l$$

$$\text{En 1960 : } A_{60}(l) = 35 + \frac{320000}{225000 + 60 l^2 + l^3}$$

Pour le règlement de 1940, le nombre de voies peut être plus important qu'aujourd'hui.

Dans les deux cas, les largeurs chargeable et roulable sont identiques et il n'y a pas de coefficient de dégressivité transversale. Le coefficient a_1 du règlement de 1971 étant égal à 1 pour une ou deux voies portées, on prendra en compte la même répartition transversale.

Charges de type Bc

En 1940, le convoi B était constitué de camions de 25 t de même morphologie que le convoi Bc. Les effets longitudinaux seront les mêmes que Bc dans le rapport 5/6. En 1960, le convoi B est le convoi Bc de 30 t. Seule la dégressivité transversale modifie la définition de Bc en 1971. On admet de conserver le même coefficient de majoration dynamique et le même coefficient de répartition transversale que celui de 1971.

Charges de type Bt

Bt n'apparaît qu'en 1971.

Charges militaires

Le système Mc 120 (de 110 t) apparaît avec le règlement de 1971. Auparavant, le système de référence était le char de classe 4 de 100 t avec des chenilles de 4,50 m de longueur, de 1,00 m de largeur et de 2,80 m d'entraxe. Le char ne peut circuler à moins de 1,10 m de la limite de chaussée, alors que la chenille de Mc 120 peut se placer au bord de la chaussée. Il est admis cependant de conserver la même répartition transversale.

4.6.3 - Fascicule 61, titre II de 1971

Les indicateurs sont évalués avec les charges du fascicule 61, titre II sur le profil en travers actuel et sur le profil en travers réduit. La combinaison de référence est la combinaison rare, au sens du BPEL. La combinaison fréquente, comprenant 60 % de la charge d'exploitation de la combinaison rare est également évaluée.

4.7 - Limitation de tonnage

Les différents scénarios envisagés visent à évaluer l'impact d'une réduction de l'aléa du trafic par mise en œuvre d'une limitation de tonnage pour les deux scénarios d'exploitation avec et sans réduction de profil en travers.

Les indicateurs sont donc évalués sur le profil en travers actuel, avec les charges de limitation à 19, 12 et 3,5 t. Les charges de type réparties sont des charges de type A(I), avec intensité réduite variant avec la longueur chargée. Les charges de type B sont constituées de camions en file, de charge réduite et de géométrie généralement plus étalée que Bc.

4.7.1 - Charges de type A(I)

Les conditions d'application des charges sont identiques longitudinalement (entre zéros de lignes d'influence) et transversalement par voies. Le coefficient a_1 est toujours égal à 1, ce qui n'aurait une incidence que dans les cas d'ouvrages à trois voies exploités avec une réduction de charge. Le coefficient de répartition transversale est identique.

L'intensité de la charge répartie varie en fonction de la limitation de charge.

4.7.2 - Charges de type Bc

Les camions ont même morphologie transversale et on place autant de camions que l'on peut placer de Bc. Cependant, les coefficients de dégressivité (bc) sont proposés égaux à 1. Or ils sont pris en compte à 1,2 et 1,1 pour une ou deux voies chargées pour le Bc. Il est donc admis de conserver le même coefficient de répartition transversal que Bc. Le coefficient de majoration dynamique des charges réduites est utilisé.

4.7.3 - Prise en compte du véhicule isolé

Il est tenu compte d'un convoi isolé contrevenant correspondant à la limitation de charge immédiatement supérieure. De ce fait, les règles suivantes sont appliquées :

- pour la limitation à 19 t, un Bc seul sans pondération est considéré ;
- pour la limitation à 12 t, un 19 t seul sans pondération est considéré ;
- pour la limitation à 3,5 t, un 12 t seul sans pondération est considéré.

4.8 - Dégradation de la précontrainte

L'incidence de la dégradation de la précontrainte peut être évaluée directement, en observant l'évolution des indicateurs par simulation de la rupture d'un ou plusieurs câbles. Il a paru bien plus utile de calculer le pourcentage de précontrainte pour lequel l'indicateur devient « critique ».

Ce pourcentage de précontrainte nécessaire qui conduit aux différentes réductions de charges retenues (19 t, 12 t et 3,5 t) est évalué, ce qui permet d'apprécier le risque pour différentes situations d'exploitation dégradées.

4.9 - Classe de vulnérabilité

4.9.1 - Preamble

La robustesse traduit l'aptitude intrinsèque d'un ouvrage à faire face aux aléas ; la vulnérabilité traduit quant à elle sa sensibilité.

La robustesse est évaluée par le rapport des efforts résistants/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).

Les effets sollicitants ne dépendent que des conditions d'exploitation de l'ouvrage ; les effets résistants ne dépendent que des caractéristiques de résistance intrinsèques des matériaux constitutifs de l'ouvrage et de leur disposition dans l'ouvrage.

Tels que définis, les indicateurs traduisent la robustesse de la partie d'ouvrage considérée. Plus l'indicateur est élevé, plus la partie d'ouvrage est robuste.

Dans la suite de cette étude, pour une interprétation plus homogène aux principes d'analyse des risques (à aléas croissants, vulnérabilité croissante), les ouvrages seront reclassés suivant leur degré de vulnérabilité.

4.9.2 - À l'ELU

Les indicateurs ELU de résistance 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) ou de béton armé (cas des hourdis non précontraints) ;
- l'effet résistant est évalué **SANS** coefficient de sécurité sur les matériaux.

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 de seuil de criticité de l'indicateur à l'ELU. Les coefficients de sécurité vis-à-vis des actions ou des modèles n'ont pas été modifiés.

Ainsi, on pourra considérer que la partie d'ouvrage sera classée selon le tableau 18 :

Robustesse ELU	Indicateur de robustesse	Classe de vulnérabilité
Ouvrage robuste	$I > 1,25$	1
Probablement conforme à un dimensionnement moderne actuel	$1,15 < I < 1,25$	2
Probablement légèrement sous-dimensionné, mais présentant une capacité physique à supporter les charges	$1,00 < I < 1,15$	3
Sous-dimensionné et probablement inapte réglementairement à supporter les charges	$0,85 < I < 1,00$	4
Sous-dimensionné et inapte réglementairement à supporter les charges	$I < 0,85$	5

Tableau 18 - Indicateurs à l'ELU

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 » (cf. tableau 19).

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. De façon générale, on propose donc de raisonner à partir des pourcentages de précontrainte.

Pour les hourdis en béton armé (qui sont les seules parties d'ouvrage en béton armé étudiées), on peut définir les classes de vulnérabilité à partir du rapport de la section d'armatures passives nécessaires pour atteindre la criticité sur la section existante. On obtient alors le tableau 20.

Remarque : les deux dernières colonnes du tableau ne sont pas rigoureusement équivalentes, compte tenu d'arrondis, la dernière colonne étant utilisée en pratique.

4.9.3 - À L'ELS

Les indicateurs ELS 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.

On peut considérer qu'il renforce ou atténue les indicateurs ultimes. Ainsi, on pourra considérer que la partie d'ouvrage sera classée selon le tableau 21, page suivante.

Robustesse ELU	Classe de vulnérabilité	Indicateur de robustesse	Pourcentage de précontrainte nécessaire/précontrainte initiale
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 19 - Classification de l'état de l'ouvrage en fonction du pourcentage de précontrainte (ELU)

Robustesse ELU	Classe de vulnérabilité	Indicateur de robustesse	Pourcentage d'aciers passifs nécessaire/aciers passifs existants
Ouvrage robuste	1	$I > 1,25$	$a < 90 \%$
Probablement conforme à un dimensionnement moderne actuel	2	$1,15 < I < 1,25$	$90 \% < a < 100 \%$
Probablement légèrement sous-dimensionné, mais présentant une capacité physique à supporter les charges	3	$1,00 < I < 1,15$	$100 \% < a < 115 \%$
Sous-dimensionné et probablement inapte réglementairement à supporter les charges	4	$0,85 < I < 1,00$	$115 \% < a < 130 \%$
Sous-dimensionné et inapte réglementairement à supporter les charges	5	$I < 0,85$	$a > 130 \%$

Tableau 20 - Classification de l'état de l'ouvrage en fonction du pourcentage d'aciers passifs (ELU)

Robustesse ELS	Indicateur de robustesse	Pourcentage de précontrainte nécessaire	Décalage de classe de vulnérabilité
Conforme à son usage et présente une bonne durabilité conforme à un dimensionnement moderne actuel.	$I > 1,00$	$p < 100 \%$	1
Probablement sous-dimensionné et risquant de présenter des dégradations réduisant la durée de vie de l'ouvrage et le confort de l'utilisateur.	$0,85 < I < 1,00$	$100 \% < p < 115 \%$	2
Ouvrage dans une situation de fonctionnement peu pérenne.	$I < 0,85$	$p > 115 \%$	3

Tableau 21 – Classification de l'état de l'ouvrage selon les indicateurs à l'ELS

4.9.4 - Synthèse des indicateurs quantitatifs de robustesse

L'indicateur 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.

On propose de considérer à part les indicateurs relatifs à la pile marteau et de définir ici un indicateur propre au tablier.

On pourra classer les ouvrages en cinq classes de vulnérabilité, en considérant le maximum entre le niveau de service obtenu à l'ELU et celui de l'ELS.

Robustesse	Classe de vulnérabilité	Vulnérabilité
Mauvaise	5	Très vulnérable
Passable	4	Vulnérable
Correcte	3	Correcte
Assez bonne	2	Peu vulnérable
Bonne	1	Très peu vulnérable

Tableau 22 – Classe de vulnérabilité

Étape 5 : évaluation de la gravité des conséquences

5.1 - Principes généraux

Les enjeux doivent caractériser l'importance des conséquences d'éventuels désordres qui menacent l'ouvrage, soit en durabilité (niveau de service), soit en sécurité offerte au public (risque de ruine).

Pour les VIPP, il a été retenu une méthode simplifiée d'évaluation des enjeux qui repose essentiellement sur des critères socio-économiques représentatifs :

- critère A : de l'importance de l'itinéraire porté par l'ouvrage ;
- critère B : du trafic de la voie portée ;
- critère C : de la valeur patrimoniale de l'ouvrage ;
- critère D : des conséquences d'une réduction du niveau de service.

Les conséquences humaines sont jugées au même degré d'inacceptabilité pour l'ensemble du patrimoine. Elles ne permettent pas de discriminer les ouvrages. En revanche, leur probabilité est prise en compte en fonction de l'importance du trafic et de la surface du tablier sur une échelle de notation allant de 1 à 5.

La méthode proposée est adaptée aux ouvrages du réseau routier national qui se situent tous sur des axes routiers ou autoroutiers structurants. Elle permet par le biais d'une grille d'analyse d'affecter à chaque ouvrage un niveau d'enjeu relatif à partir de la valeur stratégique de l'itinéraire porté par l'ouvrage, des valeurs de trafics, de la configuration du franchissement et des caractéristiques fonctionnelles de l'ouvrage.

Cette évaluation est estimée en donnant aux quatre critères (A, B, C et D) un même poids. Elle est chiffrée par l'attribution d'un indice socio-économique ISE valant : **ISE = A + B + C + D.**

5.2 - Importance de la voie portée

Le premier critère **(A)** représente la valeur stratégique de l'itinéraire porté par l'ouvrage. Il relève de la hiérarchisation du réseau routier national et conduit à distinguer :

- les itinéraires très stratégiques (A = 4) ;
- les itinéraires stratégiques (A = 2 ou 3) ;
- les autres itinéraires (A = 1).

La valeur stratégique de l'itinéraire est déterminée par le gestionnaire en considérant, par exemple pour les itinéraires très stratégiques (A = 4) :

- les grands axes autoroutiers ;
- les tronçons urbains à forts enjeux stratégiques ;
- les itinéraires de convois exceptionnels très fréquentés ;
- les itinéraires de desserte d'un site d'importance stratégique : centrale électrique, hôpital régional (CHR, CHU), aéroport international, etc.

Les itinéraires stratégiques comprennent notamment les autres axes autoroutiers, les tronçons inter-urbains à enjeux moins importants (A = 2 ou 3).

Enfin, les autres itinéraires sont ceux qui présentent une importance stratégique secondaire (A = 1).

La valeur stratégique de l'itinéraire peut être augmentée pour tenir compte de l'environnement proche de l'ouvrage et des conséquences de sa ruine. Dans ce cas, le critère A doit être augmenté d'un point dans le cas où l'ouvrage présente des enjeux stratégiques particuliers.

À titre d'exemple, il s'agit :

- d'un ouvrage supportant un réseau d'intérêt national (gaz, électricité) ;
- d'un ouvrage de franchissement sur une ligne TGV ou une autoroute ;
- d'un ouvrage intégré à un échangeur routier stratégique.

5.3 - Niveau de trafic

Ce deuxième critère **(B)** indique le volume du trafic routier supporté par l'ouvrage, où quatre seuils de trafic ont été considérés : 80k, 60k, 35k et 15k.

Variant de 1 à 5, le calibrage de ce critère tient compte de la distribution du trafic par tronçons d'itinéraires.

5.4 - Valeur patrimoniale de l'ouvrage

Ce troisième critère **(C)** témoigne de la valeur patrimoniale de l'ouvrage. Estimée à partir de sa surface utile, cette valeur représente l'importance des coûts de la reconstruction ou des réparations pour garantir un niveau de service homogène à l'ensemble du patrimoine national VIPP.

Variant de 1 à 5, le calibrage de ce critère tient compte de la distribution du patrimoine national.

5.5 - Conséquences sur le niveau de service

Ce quatrième critère **(D)** caractérise l'impact éventuel sur le niveau de service pendant des travaux de réparation ou de remplacement de l'ouvrage (traitement de la vulnérabilité). Il donne également une estimation de l'impact induit par une réduction de la capacité portante ou de la limitation des trafics autorisés (réduction des aléas).

Pour déterminer la valeur de ce critère, on distingue les ouvrages à tablier unique pour lesquels une déviation est nécessaire en cas de travaux de réparation ou de remplacement, et les franchissements à tabliers séparés pour lesquels un basculement de circulation sur l'autre tablier est envisageable.

Dans le premier cas, il est peu probable qu'un itinéraire de substitution existe et permette une déviation sans trop de conséquences sur le trafic (allongement de parcours, gêne) et sur l'activité économique (commerces). La conservation de l'ouvrage revêt une importance stratégique. C'est au gestionnaire d'apprécier les possibilités existantes de déviation et d'évaluer les conséquences très fortes (D = 5) ou fortes (D = 4) de la déviation.

Dans le second cas, il convient d'examiner les possibilités de basculement de circulation sur l'autre tablier du franchissement. Pour ce faire, nous faisons référence à la circulaire du 29 août 1991 relative au profil en travers des OA. Selon la largeur roulable du tablier sur lequel est effectué le basculement de circulation, le profil en travers réduit peut être de :

- 2+2 voies pour une largeur roulable supérieure à 14 mètres ;
- 2+1 voies pour une largeur roulable comprise entre 11 et 14 mètres ;
- 1+1 voies pour une largeur roulable inférieure à 11 mètres.

Le critère D tient compte de la capacité d'écoulement du trafic selon le profil en travers réduit que l'on peut envisager, et varie de 1 à 3.

5.6 – Évaluation de l'indice socio-économique

La valeur socio-économique est déterminée par la formule $ISE = A + B + C + D$.

Itinéraire	Très stratégique	Stratégique	Autre
A =	4	3 ou 2	1
Si impact particulier de l'ouvrage A =	5	4 ou 3	2

Trafic journalier moyen	TMJA > 80K	60K < TMJA < 80K	35K < TMJA < 60K	15K < TMJA < 35K	TMJA < 15K
B =	5	4	3	2	1

Surface utile tablier	S > 5 000 m ²	2 000 m ² < S < 5 000 m ²	1 000 m ² < S < 2 000 m ²	500 m ² < S < 1 000 m ²	S < 500 m ²
C =	5	4	3	2	1

Franchissement à tablier unique Conséquences d'une déviation	Très fortes	Fortes
D =	5	4

Franchissement à tabliers séparés Conséquences sur l'exploitation	Largeur roulable d'un tablier								
	LR > 14 m			11 m < LR < 14 m			LR < 11 m		
	T > 60K	35K < T < 60K	T < 35K	T > 35K	20K < T < 35K	T < 20K	T > 20K	10K < T < 20K	T < 10K
D =	3	2	1	3	2	1	3	2	1

L'indicateur socio-économique, ainsi évalué, permet de définir des niveaux d'enjeux (ou de conséquences).

Niveaux d'enjeux	Indicateur socio-économique
1 - normaux	ISE < 8
2 - élevés	8 < ISE < 14
3 - très élevés	14 < ISE

Tableau 23 – Niveaux d'enjeux

Étape 6 : évaluation du risque

6.1 - Synthèse des indicateurs d'aléas et de vulnérabilité

L'indicateur d'aléas traduit l'importance des différents aléas qui agressent l'ouvrage. L'indicateur de vulnérabilité caractérise quant à lui l'inaptitude de la structure à faire face à ces aléas.

La combinaison des indicateurs d'aléas et de vulnérabilité caractérise la probabilité de défaillance, que nous appellerons « criticité de la structure ». Nous retenons une échelle à quatre niveaux :

Classe de criticité	Criticité des VIPP
C1	Ouvrage non critique
C2	Ouvrage peu critique
C3	Ouvrage critique
C4	Ouvrage très critique

Le tableau 24 permet d'établir la criticité en fonction de la classe de vulnérabilité et de la classe d'aléas.

Classe de criticité		Classe de vulnérabilité				
		Très peu vulnérable	Peu vulnérable	Correct	Vulnérable	Très vulnérable
Classe d'aléas		1	2	3	4	5
0-20	Aléa faible	C1	C1	C2	C3	C3
20-40	Aléa modéré	C1	C2	C2	C3	C3
40-60	Aléa assez élevé	C2	C2	C3	C3	C4
60-80	Aléa élevé	C3	C3	C3	C4	C4
> 80	Aléa très élevé	C3	C3	C4	C4	C4

Tableau 24 – Classes de criticité des VIPP

6.2 - Synthèse des niveaux d'enjeux

Les enjeux caractérisent l'importance des conséquences d'éventuels désordres qui menacent l'ouvrage, soit en durabilité (niveau de service), soit en sécurité offerte au public (risque de ruine).

L'indicateur socio-économique proposé détermine trois niveaux d'enjeux :

Niveaux d'enjeux	Indicateur socio-économique
1 - normaux	$ISE \leq 8$
2 - élevés	$8 < ISE \leq 14$
3 - très élevés	$14 < ISE$

6.3 - Classes de risques

En croisant la criticité d'un ouvrage (sa probabilité de défaillance) avec l'enjeu qu'il représente (les conséquences de la défaillance), on définit une classe de risques qui doit permettre au gestionnaire d'établir une stratégie de surveillance et de réparation.

Les classes de risques sont au nombre de trois :

Classe de risques	Indice
Risques faibles	R1
Risques modérés	R2
Risques forts	R3

Le tableau 25 permet d'établir le niveau de risque en fonction de la classe de criticité et du niveau d'enjeu.

Classe de risques	Classe de criticité			
	C1	C2	C3	C4
Niveaux d'enjeu	OA non critique	OA peu critique	OA critique	OA très critique
	R1	R1	R2	R3
1 - normaux	R1	R1	R2	R3
2 - élevés	R1	R1	R2	R3
3 - très élevés	R1	R2	R3	R3

Tableau 25 – Classes de risques

Étape 7 : sélection des risques

7.1 - Remarques préliminaires

Pour gérer le risque, le gestionnaire dispose principalement de deux leviers :

- réduire les aléas, ceux portant sur l'état de la structure par une meilleure connaissance de l'ouvrage (contrôle des épaisseurs d'enrobés, état de la précontrainte, ...) et ceux liés au trafic en réduisant les charges routières autorisées à circuler ;
- diminuer la vulnérabilité de son patrimoine par des réparations ou des renforcements.

En règle générale, à l'issue de l'étape 6, le gestionnaire dispose d'informations qui lui permettent d'avoir une vue de la qualité générale de son patrimoine et une hiérarchisation des risques, par classes de risques, grâce à un classement des ouvrages à l'aide d'une note globale et unique. Cette note est très complexe, car elle croise des informations sur les aléas, sur la robustesse et sur les enjeux socio-économiques de l'ouvrage. La gestion du risque consiste en premier lieu, si nécessaire, à le cerner davantage pour autoriser des actes de gestion rationnels et pertinents.

À ce stade, les classements résultent en effet d'analyses simplifiées, s'appuyant sur une exploitation des dossiers d'archives qui peuvent ne refléter qu'assez partiellement la réalité (dossier d'archives incomplet, évolution de l'ouvrage insuffisamment connue, informations pertinentes non obligatoirement repérées lors du recueil de données, ...), et sur l'estimation de la vulnérabilité à partir d'hypothèses et de calculs simplifiés et sur l'évaluation simplifiée des enjeux.

Avant toute mise en œuvre de processus décisionnel (renfort de l'ouvrage, limitation de tonnage ou encore démolition/reconstruction), il faut d'abord faire le point sur le volume et la qualité de données prises par défaut pour l'ouvrage. Il est alors conseillé aux gestionnaires de combler au mieux les lacunes éventuelles du recensement des données.

Cette étape de validation des référentiels de connaissance effectuée, les paragraphes suivants proposent des suites à donner au maître d'ouvrage pour chaque classe de risques. Cette réflexion est globale et, dans le cadre de la présente étude, ne peut être détaillée ouvrage par ouvrage.

La méthodologie d'investigation des ouvrages est définie par le guide LCPC [3] sur le sujet qui sert de trame. Les principes à appliquer sont rappelés dans la partie C du présent guide.

Le paragraphe suivant synthétise la démarche proposée dans ce guide pour affiner la connaissance de l'état de l'ouvrage, qui est la priorité pour gérer le risque.

Aléas		Vulnérabilité	Criticité	Enjeux
0-20	Aléa faible	1 : très peu vulnérable ou 2 : peu vulnérable	C1	Niveaux d'enjeux 1 : normaux ou 2 : élevés ou 3 : très élevés
20-40	Aléa modéré	1 : très peu vulnérable	C1	Niveaux d'enjeux 1 : normaux ou 2 : élevés ou 3 : très élevés
0-20	Aléa faible	3 : correct	C2	Niveaux d'enjeux 1 : normaux ou 2 : élevés
20-40	Aléa modéré	2 : peu vulnérable ou 3 : correct	C2	Niveaux d'enjeux 1 : normaux ou 2 : élevés
40-60	Aléa assez élevé	1 : très peu vulnérable ou 2 : peu vulnérable	C2	Niveaux d'enjeux 1 : normaux ou 2 : élevés

Tableau 26 – Notes des ouvrages de classe de risques R1

7.2 - Principe de sélection des risques

À l'issue de l'analyse simplifiée, la matrice de risques permet de définir une classe qui est soit acceptable (faible), soit modérée, soit inacceptable (fort).

Lorsque le risque est acceptable (faible), l'analyse des risques s'arrête, mais l'ouvrage doit bien évidemment faire l'objet d'une procédure classique de suivi et d'inspection qui peut toutefois déboucher dans certains cas sur des investigations complémentaires.

Lorsque le risque est modéré, on peut, selon les cas, soit arrêter l'analyse à ce stade et prendre des mesures de surveillance et d'entretien plus poussées que pour un ouvrage à risque faible, soit s'engager dans une étude détaillée lorsque l'on juge que celle-ci devrait permettre de mieux évaluer le risque.

Lorsque le risque est élevé, il faut réaliser une analyse des risques détaillée pour mieux quantifier son importance (ce qui peut conduire à requalifier le risque) et surtout, en vue du traitement du risque, pour l'utilisation optimale des moyens.

7.3 - Ouvrages de classe de risques R1

Les ouvrages entrant dans cette classe sont caractérisés par l'un des cas du tableau 26.

Classe d'aléas < 40

Sauf en ce qui concerne la certitude de la qualité de l'injection, qui fait l'objet de la recherche par gammagraphie du processus N1 suivant le guide LCPC, cet ouvrage satisfait aux critères de conception et à l'absence de désordres graves, qui n'entraînent aucune action particulière mais doivent faire l'objet d'une surveillance normale.

40 < classe d'aléas < 60

Les aléas semblent non négligeables : 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 évaluer les aléas.

Si de nouvelles données sont obtenues, la réévaluation de la note d'aléas peut conduire à modifier la classe d'aléas. Ceci pourra déboucher en cas de doute sur le processus N2 suivant le guide LCPC.

Aléas		Vulnérabilité	Criticité	Enjeux
0-20	Aléa faible	3 : correct	C2	Niveau d'enjeux 3 : très élevé
20-40	Aléa modéré	2 : peu vulnérable ou 3 : correct	C2	Niveau d'enjeux 3 : très élevé
40-60	Aléa assez élevé	1 : très peu vulnérable ou 2 : peu vulnérable	C2	Niveau d'enjeux 3 : très élevé
0-20	Aléa faible	4 : vulnérable ou 5 : très vulnérable	C3	Niveaux d'enjeux 1 : normaux ou 2 : élevés
20-40	Aléa modéré	4 : vulnérable ou 5 : très vulnérable	C3	Niveaux d'enjeux 1 : normaux ou 2 : élevés
40-60	Aléa assez élevé	3 : correct ou 4 : vulnérable	C3	Niveaux d'enjeux 1 : normaux ou 2 : élevés
60-80	Aléa élevé	1 : très peu vulnérable, 2 : peu vulnérable ou 3 : correct	C3	Niveaux d'enjeux 1 : normaux ou 2 : élevés
> à 80	Aléa très élevé	1 : très peu vulnérable ou 2 : peu vulnérable	C3	Niveaux d'enjeux 1 : normaux ou 2 : élevés

Tableau 27 – Notes des ouvrages de la classe de risques R2

7.4 - Ouvrages de classe de risques R2

Les ouvrages entrant dans cette classe sont caractérisés par l'un des cas du tableau 27. Les ouvrages sont soit en relativement bon état mais avec des enjeux socio-économiques forts, soit déjà légèrement dégradés mais avec des enjeux faibles ou modérés.

Classe d'aléas < 40

On engagera le processus N1 d'investigation, s'il n'a pas déjà été mis en place.

40 < classe d'aléas < 60

Les aléas semblent non négligeables, mais l'ouvrage semble peu vulnérable : 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 évaluer les aléas.

Si de nouvelles données sont obtenues, la réévaluation de la note d'aléas peut conduire à modifier la classe d'aléas. Ceci pourra déboucher en cas de doute sur le processus N2, suivant le guide LCPC.

60 < classe d'aléas < 80

La note d'aléas est moyenne et mérite d'être confirmée. 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 évaluer les aléas. Si de nouvelles données sont obtenues, la réévaluation de la note d'aléas peut conduire à modifier la classe d'aléas.

En règle générale, il convient d'engager le processus N2.

Classe d'aléas > 80

Après contrôle des données sur les aléas et la vulnérabilité 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 potentiellement insuffisante pour la situation d'exploitation actuelle. Si les résultats d'essais le justifient, ceci débouchera sur un recalcul complet.

Classe de vulnérabilité > 4

La classe de vulnérabilité mérite d'être confirmée dès lors qu'elle est égale ou supérieure à 4. Il est en effet possible qu'une donnée totalement erronée ait produit cette note élevée (manque de données sur les aciers d'effort tranchant, par exemple). Une recherche dans le dossier d'archives ciblée sur les données qui ont pénalisé la note et sur la partie d'ouvrage concernée est nécessaire. La réévaluation de la note peut entraîner la correction de la classe de vulnérabilité et le processus d'analyse doit alors être repris.

Si la classe de vulnérabilité 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'ouvrage sont saines avant d'engager des mesures de confortement ou de réparation.

7.5 - Ouvrages de classe de risques R3

Les ouvrages entrant dans cette classe sont caractérisés par l'un des cas du tableau 28. Les ouvrages sont dégradés avec des enjeux socio-économiques souvent importants.

Après élimination des ouvrages qui ont récemment fait l'objet de travaux lourds (ouvrages réparés qui ont en fait été par le biais de cette étude dans leur état antérieur, ouvrages n'étant pas de véritables VIPP et pour lesquels la méthodologie ne s'applique pas, ...), les ouvrages de la classe R3 doivent être considérés comme à risques, du fait de la conjonction d'enjeux importants, d'aléas élevés ou d'une grande vulnérabilité.

40 < classe d'aléas < 60

La note d'aléas est moyenne et mérite d'être confirmée. 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 évaluer les aléas. Si de nouvelles données sont obtenues, la réévaluation de la note d'aléas peut conduire à modifier la classe d'aléas.

Il convient d'engager le processus N2.

Classe d'aléas > 60

Après contrôle des données sur les aléas et la vulnérabilité 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 potentiellement insuffisante pour la situation d'exploitation actuelle. Si les résultats d'essais le justifient, ceci débouchera sur un recalcul complet.

Classe de vulnérabilité > 3

Un recalcul complet doit être engagé avec simulation de scénarios des restrictions d'exploitation (passage à un profil en travers réduit, allègement des superstructures, limitation de tonnage, ...).

Aléas		Vulnérabilité	Criticité	Enjeux
0-20	Aléa faible	4 : vulnérable ou 5 : très vulnérable	C3	Niveau d'enjeux 3 : très élevés
20-40	Aléa modéré	4 : vulnérable ou 5 : très vulnérable	C3	Niveau d'enjeux 3 : très élevés
40-60	Aléa assez élevé	3 : correct ou 4 : vulnérable	C3	Niveau d'enjeux 3 : très élevés
60-80	Aléa élevé	1 : très peu vulnérable, 2 : peu vulnérable ou 3 : correct	C3	Niveau d'enjeux 3 : très élevés
> 80	Aléa très élevé	1 : très peu vulnérable ou 2 : peu vulnérable	C3	Niveau d'enjeux 3 : très élevés
40-60	Aléa assez élevé	5 : très vulnérable	C4	Tous niveaux
60-80	Aléa élevé	4 : vulnérable ou 5 : très vulnérable	C4	Tous niveaux
> 80	Aléa très élevé	3 : correct, 4 : vulnérable ou 5 : très vulnérable	C4	Tous niveaux

Tableau 28 - Notes des ouvrages de classe de risques R3

Étape 8 : analyse détaillée

Cette étape concerne particulièrement les ouvrages de la classe de risques R3, et d'ores et déjà, les ouvrages actuellement cotés 3 et 3U. Pour ceux-ci, on prévoit ainsi un recalcul par le logiciel VIPP-EL, ce qui justifie un recueil des données étendues (mesure de la chaussée par radar, plans de câblage des poutres, mise en tension, ...).

En règle générale, on reproduit les étapes 3 à 6 mais en réalisant une analyse des risques plus détaillée sur certains points, en particulier sur la connaissance de l'état de la précontrainte et sur la résistance de l'ouvrage.

Les processus d'investigation nécessaires sont décrits dans le guide méthodologique de surveillance et d'auscultation du LCPC [3].

Les processus de calculs complémentaires portent sur les différentes parties d'ouvrage et comportent trois niveaux gradués :

- Pour les poutres, ce recalcul portera sur toutes les poutres (poutres intermédiaires pour lesquelles ont été évalué les indicateurs, et une ou plusieurs poutres de rive). Les justifications à la flexion et à l'effort tranchant sont simultanées. Les compléments de justification de l'équilibre du coin et de la transmission de la bielle d'effort tranchant seront conduits. Le contrôle des aciers passifs complémentaires sera effectué.
- Pour le hourdis, ce recalcul tiendra compte de la flexion générale et de la flexion locale et seront évalués les moments entre poutres et au droit des poutres et la justification au poinçonnement.

Ces calculs ont un double objectif :

- confirmer ou infirmer la note de robustesse par un calcul plus raffiné, et par conséquent statuer sur l'adéquation du dimensionnement de la partie d'ouvrage concernée eu égard à la situation d'exploitation envisagée (situation actuelle ou situation dégradée) ;
- préciser les parties d'ouvrage qui nécessitent réparation ou renforcement et conduire à une étude particulière de type APROA, qui est généralement conduite en prolongement du diagnostic.

Les études de réparation des ouvrages visent également à conférer à la structure réparée ou renforcée une ductilité, ce qui permet d'éviter une rupture fragile.

8.1 - Calcul ciblé de la partie d'ouvrage concernée

La classe de vulnérabilité résulte du maximum des notes du hourdis, de la flexion des poutres ou du cisaillement des poutres. Il ne paraît utile de conduire dans ce calcul ciblé qu'un recalcul des parties d'ouvrage concernées, et éventuellement de la pile marteau.

Il s'agira en premier lieu de l'examen des notes de calcul d'origine, pouvant mettre en évidence des anomalies, des hypothèses plus optimistes de prise en compte des charges d'exploitation et de charges permanentes (superstructures notamment).

Ce calcul sera confronté à un calcul « moderne », qui tient notamment compte des connaissances actuelles du comportement des matériaux (fluage et relaxation principalement).

La précontrainte est supposée intègre. Il est fondamental de recueillir des paramètres réalistes décrivant les armatures de précontrainte (relaxation, tension à l'origine, limite élastique et limite à la rupture).

8.2 - Calcul complet de l'ouvrage

Dans les cas explicités précédemment, notamment les ouvrages actuellement cotés 3 et 3U ainsi que les ouvrages de la classe de risques R3, nous préconisons de réaliser un recalcul complet. Les doutes sur la précontrainte sont tels qu'un contrôle est effectué sur toutes les parties d'ouvrage. Le même principe que pour le calcul ciblé est donc appliqué pour les poutres, le hourdis et les piles marteaux.

8.3 - Calcul complet de l'ouvrage assorti de scénarios d'exploitation dégradée

Principalement dans le cas de la classe de risques R3, nous préconisons de réaliser le recalcul complet de l'ouvrage pour différentes configurations :

- Sous la précontrainte intègre : il est fondamental de bien caractériser l'acier de précontrainte (limite élastique, limite à la rupture, tension à l'origine et paramètres permettant d'évaluer les pertes de précontrainte (coefficients de frottement, rentrée d'ancrage et surtout relaxation).
- Sous la précontrainte dégradée : en fonction des résultats des investigations sur la précontrainte, il sera possible de prendre en compte la tension résiduelle dans les armatures, résultant de mesures à l'arbalète et les sections résiduelles résultant d'une appréciation du pourcentage de corrosion des armatures. L'analyse comprendra également la simulation de la rupture d'un câble de précontrainte (le plus défavorable eu égard à la justification effectuée).
- Pour les situations d'exploitation dégradée : la probabilité forte de corrosion des armatures conduit vraisemblablement à un non-respect des critères réglementaires. Il est intéressant d'utiliser les modèles construits pour le recalcul pour simuler différentes situations d'exploitation (limitation de charges, évolution du profil en travers, allègement de l'ouvrage), voire de prédimensionner des solutions de renforcement des parties d'ouvrage pour assurer une sécurité à la rupture ou un retour à des conditions de service.

8.4 – Piles marteaux

Les piles marteaux ne sont directement caractérisées que par leur classe de vulnérabilité spécifique.

On propose de les traiter selon la démarche suivante :

- intégrer le recalcul des piles marteaux précontraintes dans le cas où un calcul complet de l'ouvrage est nécessaire ;
- réaliser un recalcul spécifique si la classe de vulnérabilité est égale à 4 ou 5, voire 3 si les désordres constatés sur les matériaux concernent explicitement les chevêtres des piles marteaux.



Chapitre 2

Les niveaux d'investigation suivant le guide LCPC



Le guide définit trois niveaux d'investigation : le **niveau 1 (N1)**, le **niveau 2 (N2)** et le **niveau 3 (N3)**.

B1 – Niveau 1 (N1)

« Analyse approfondie du dossier d'ouvrage, complétée par une évaluation de l'état de l'injection des conduits de précontrainte faite par des sondages gammagraphiques ou radioscopiques, suivant l'environnement de l'ouvrage, ses conditions d'accès et l'épaisseur des parois. Cette méthodologie s'applique à tous les VIPP, quelles que soient les observations faites lors de leur inspection détaillée. (...) »

Commentaires sur les investigations N1

Le guide méthodologique d'avril 2000 préconise systématiquement la gammagraphie **dès le niveau N1 d'investigation**. La gammagraphie est un type d'investigation relativement lourd et coûteux, en regard de l'examen du dossier de construction, ou de l'inspection détaillée, « investigations » du même niveau, et on pourrait être tenté de s'en affranchir.

Si les premières investigations dans les archives, en particulier concernant l'année de construction de l'ouvrage, le type et la nature de la précontrainte, le résultat des IDP, etc., ne montrent pas de résultats favorables, la réalisation des gammagraphies est indispensable et doit être rapidement exécutée afin d'évaluer le niveau de recours à l'étape N2 et de faciliter la réalisation des investigations complémentaires telles que l'ouverture de fenêtres.

Pour les ouvrages dont les premières investigations dans les archives ne révèlent pas de risques *a priori* (ouvrages récents sans pathologie), les gammagraphies peuvent être différées.

B2 – Niveau 2 (N2)

« Évaluation qualitative de la précontrainte par ouverture de fenêtres pour examiner l'état des câbles et, éventuellement, procéder à des prélèvements de matériaux pour déterminer leurs caractéristiques par analyses en laboratoire, si les examens précédents ou la date de construction de l'ouvrage (avant 1967) occasionnent des doutes sur l'état de la précontrainte. Si le béton présente des lacunes, des éclatements ou des épaufrures à des endroits stratégiques, on peut éviter d'ouvrir des fenêtres ou en limiter le nombre, en pratiquant les examens et prélèvements dans les zones affectées. »

Commentaires sur les investigations N2

Au niveau N2, il faut largement favoriser l'ouverture de fenêtres de reconnaissance, très utiles pour compléter le diagnostic : à moindre frais, elles permettent notamment de lever le doute sur « l'intégrité de la précontrainte », qui est supposée telle à défaut de la présence de signes extérieurs d'endommagement, et ceci est essentiel.

Si l'ouvrage n'a pas fait l'objet de reconnaissance gammagraphique (comprise dans le processus N1 du guide), nous recommandons d'en effectuer une afin de positionner les fenêtres à réaliser pour l'inspection visuelle du processus N2.

Le guide méthodologique propose l'investigation de niveau N2 pour tous les ouvrages construits avant 1967. Ces VIPP de première génération pouvaient être suspectés d'une mauvaise conception. L'analyse de la vulnérabilité permet à notre avis de tenir compte du bon niveau de dimensionnement de l'ouvrage et nous proposons de ne pas envisager le niveau N2 sur le seul critère d'une conception antérieure à 1967.

B3 – Niveau 3 (N3)

« Évaluation de la capacité portante résiduelle de l'ouvrage, par différents essais locaux ou globaux sur la précontrainte et la structure, en vue de permettre un recalcul de l'ouvrage, si les résultats du niveau précédent d'investigation sont alarmants. »

Commentaires sur les investigations N3

Les investigations les plus adaptées sont la mesure des tensions par la méthode de l'arbalète.

Mesures de contrainte par la méthode de libération

Cette méthode, restant lourde en temps et en matériels nécessaires, est toujours aussi complexe à mettre en œuvre et à exploiter. Le guide s'est montré un peu optimiste sur la précision des résultats. Si l'incertitude d'une mesure de contrainte locale pouvait (difficilement) rester inférieure à 0,3 MPa (cf. Guide LCPC), celle entachant l'évaluation de la précontrainte moyenne d'une poutre est plutôt de l'ordre de 1 MPa.

Courburemètrie sous chargement

Les bonnes perspectives de la méthode pour l'évaluation des VIPP se révèlent aujourd'hui plus limitées. Les premières expérimentations en vraie grandeur sur des VIPP (ouvrages du nord de la France, pont de l'Yonne, viaduc de Saint-Nazaire et surtout essais à la rupture de la poutre de Merlebach) ont en effet montré que si les courburemètres détectaient bien la « limite de fissuration » à mi-portée d'un VIPP, celle-ci pouvait être très supérieure à la « limite de décompression » qui est recherchée pour remonter à la précontrainte résiduelle. Nous préconisons de réserver cette méthode soit aux ouvrages hyperstatiques pour détecter les joints décomprimés ou les fissures respirantes, soit aux VIPP, à la condition qu'ils présentent déjà la trace d'une fissure de type flexion et que la résistance à la traction du béton a donc localement été dépassée. Ceci limite donc beaucoup le champ d'application sur les VIPP.



Conclusion



La méthode exposée dans ce guide permet à un maître d'ouvrage gestionnaire d'analyser et de classer l'ensemble de ses ponts à poutres précontraintes par câble de type VIPP, en fonction des aléas auxquels ils sont soumis, de leur vulnérabilité et des conséquences d'une défaillance de l'ouvrage, principalement sur les plans sociaux et financiers.

Ce guide conseille également le maître d'ouvrage sur les mesures à prendre en fonction des résultats de l'analyse des risques. Ces mesures sont de plusieurs types en fonction des classes de risques qui ont été déterminées. Il peut s'agir d'investigations, d'études complémentaires ou de recalculs qui permettront d'affiner les résultats de la première étude et de confirmer le classement de l'ouvrage et les risques encourus.

Enfin, ce guide a aussi pour vocation d'aider les maîtres d'ouvrage dans la planification des études ou travaux rendus nécessaires par l'analyse des risques et de l'assister dans la prise de décision sur les mesures de sécurité qui pourraient s'avérer indispensables dans les cas les plus graves.

Page laissée blanche intentionnellement

Page laissée blanche intentionnellement



Compte tenu de leur âge et de l'aggravation constante des conditions d'exploitation, les ouvrages de type VIPP présentent de manière récurrente des désordres caractéristiques pouvant fragiliser leur structure et remettre en cause leur niveau de service, et la sécurité des usagers.

À la demande la DGITM/DIT (Direction Générale des Infrastructures du Transport et de la Mer/Direction des Infrastructures Terrestres), le réseau scientifique et technique du ministère a mis au point une méthodologie d'analyse des risques spécialement adaptée à ce type d'ouvrage. Cette méthode permet d'analyser les VIPP d'un maître d'ouvrage, d'identifier les ouvrages les plus sensibles et de préconiser les mesures à prendre pour limiter au maximum les risques pour la structure et les usagers.

L'objectif est aussi d'aboutir aux meilleurs arbitrages techniques et financiers compte tenu des enjeux socio-économiques et humains.

Cette méthode a été mise en œuvre en 2009 sur le patrimoine des ouvrages de l'État, avec l'appui des services en charge de la gestion du patrimoine au sein des DIR. L'étude réalisée a permis d'analyser le patrimoine de l'État, mais aussi de calibrer les paramètres qui interviennent dans cette méthodologie d'analyse des risques.



Document disponible au bureau de vente du Sétra

46 avenue Aristide Briand - BP 100 - 92225 Bagneux Cedex - France
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 53 - télécopie : 33 (0)1 46 11 33 55
Référence : **1040** - Prix de vente : **15 €**

*Couverture, crédit photo : RST, MEEDOM
Mise en page : SCEI - 50/54 bd du Colonel Fabien - 94200 Ivry-sur-Seine ;
Impression : JOUVE - 1 rue du Docteur Sauvé - 53100 Mayenne ;
L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction, même partielle, de ce document
© 2010 Sétra - Dépôt légal : 4^e trimestre 2010 - ISBN : 978-2-11-099172-0*

Ce document participe à la protection de l'environnement.
Il est imprimé avec des encres à base végétale sur du papier écolabélisé PEFC.



Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagement

46 avenue Aristide Briand
BP 100 - 92225 Bagneux
Cedex - France
tél : 33 (0)1 46 11 31 31
fax : 33 (0)1 46 11 31 69

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique du MEEDDM

