

ANALYSE DES RISQUES APPLIQUÉE AUX PONTS EN MAÇONNERIE



Présentation du guide méthodologique

Rencontres Ouvrages d'Art du 14/04/2022 à Macon



SOMMAIRE DU GUIDE

Préambule

Chapitre 1 - Présentation de la méthodologie d'analyse des risques

- 1.1 - L'analyse des risques selon la méthodologie du Sétra
- 1.2 - Champs d'application de l'analyse des risques appliquée aux ponts en maçonnerie
- 1.3 - Références et textes en lien avec la démarche

Chapitre 2 - Objectifs de l'analyse des risques appliquée aux ponts en maçonnerie

- 2.1 - Nécessité d'une analyse des risques sur les ponts en maçonnerie
- 2.2 - La gestion du risque
- 2.3 - L'analyse des risques comme outil de gestion

Chapitre 3 - Définition du système

- 3.1 - Constitution des ouvrages en maçonnerie
- 3.2 - Notions et causes de désordres

Chapitre 4 - Identification et évaluation des aléas

- 4.1 - Aléa 1 : affouillement des fondations
- 4.2 - Aléa 2 : déstabilisation des fondations
- 4.3 - Aléa 3 : mise en charge de l'ouvrage lors de crues
- 4.4 - Aléa 4 : charges d'exploitation
- 4.5 - Aléa 5 : chocs sur la structure
- 4.6 - Aléa 6 : rupture des murs en aile ou en retour

Chapitre 5 - Vulnérabilités aux aléas

- 5.1 - Vulnérabilité 1 : affouillement des fondations
- 5.2 - Vulnérabilité 2 : déstabilisation des fondations
- 5.3 - Vulnérabilité 3 : mise en charge de l'ouvrage lors de crues
- 5.4 - Vulnérabilité 4 : charges d'exploitation
- 5.5 - Vulnérabilité 5 : chocs sur la structure
- 5.6 - Vulnérabilité 6 : rupture des murs en aile ou en retour

Chapitre 6 - Évaluation de la gravité des conséquences

- 6.1 - Importance de l'itinéraire porté par le pont
- 6.2 - Importance du trafic
- 6.3 - Valeur patrimoniale de l'ouvrage
- 6.4 - Impact sur le niveau de service

Chapitre 7 - Évaluation du niveau de risque

- 7.1 - Introduction de scénarios
- 7.2 - Évaluation du niveau d'aléa
- 7.3 - Évaluation du niveau de vulnérabilité
- 7.4 - Évaluation du niveau de criticité pour chaque scénario
- 7.5 - Évaluation du niveau de conséquences
- 7.6 - Évaluation du niveau de risque

Chapitre 8 - Suites à donner en fonction du niveau de risque

- 8.1 - Recherche d'informations plus détaillées sur l'ouvrage, son environnement et son état
- 8.2 - Précisions sur le niveau de risque
- 8.3 - Diagnostic
- 8.4 - Adaptation des actions de surveillance
- 8.5 - Actions de maintenance ou de réparation
- 8.6 - Adaptation du niveau de service

Annexes

- Annexe 1 - Adaptation de la méthode pour les autres gestionnaires
- Annexe 2 - Extrait de la feuille de calcul

Bibliographie

Glossaire

INTRODUCTION

Méthodologie de gestion des OA complémentaire à l'ITSEOA

Caractériser éventualité de **ruine** ou de **baisse du niveau de service**

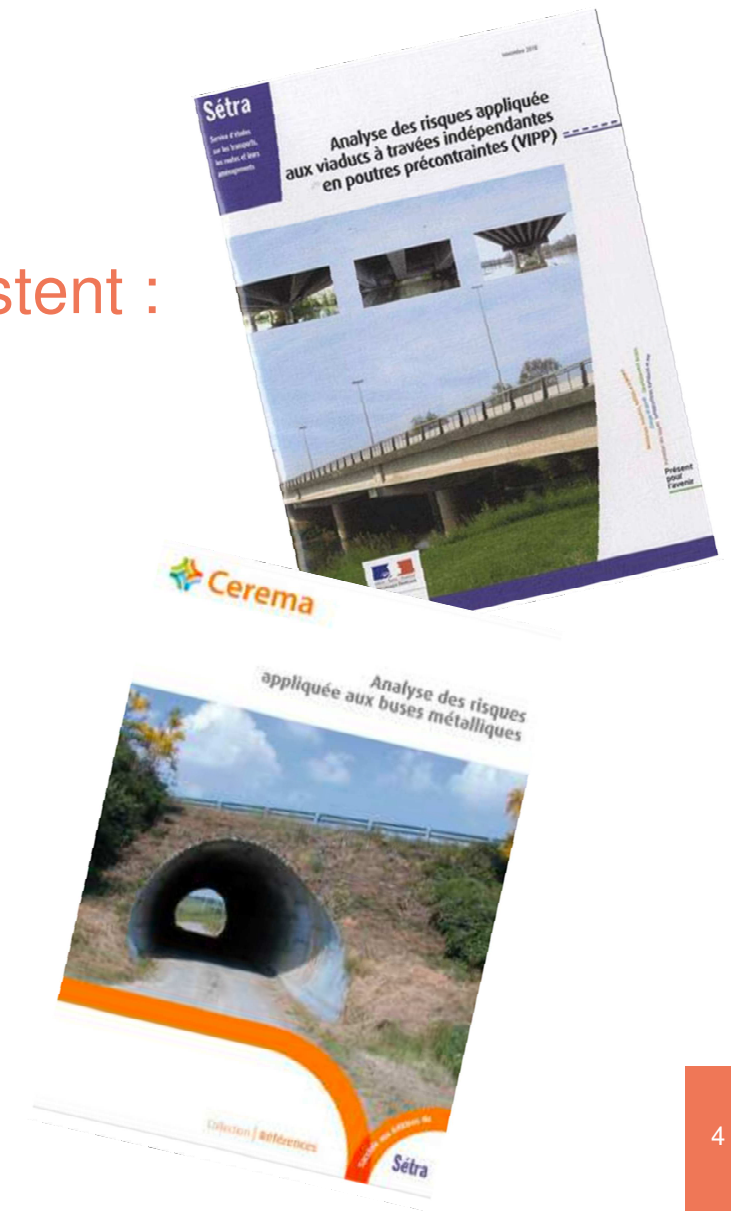
- Etat de l'ouvrage
- Insertion dans son environnement

Planification des actions de surveillance, auscultation, entretien, réparation

INTRODUCTION

Plusieurs guides pour l'analyse de risques existent :

- VIPP
- Ouvrages en remblai renforcé « terre armée »
- Buses métalliques
- Tranchées couvertes et tunnels
- Murs de soutènement en béton armé sur semelle
- Ponts en site affouillable
- Murs de soutènement en maçonnerie



MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

Analyse de risque simplifiée

- Qualitative : rapide et économique
- A partir des données disponibles
- Réalisée sur **l'ensemble du patrimoine**
- Classement selon catégorie de risque

Analyse détaillée pour les ouvrages avec fort niveau de risque

- Conditionnelle car + couteuse et longue
- Recueil de données quantitatives (prélèvements, sondages essais)
- Inspection par spécialiste
- + précise

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

Nécessite des données sur les ouvrages, qui sont à jour
Elle doit être mise à jour lorsque ces données évoluent

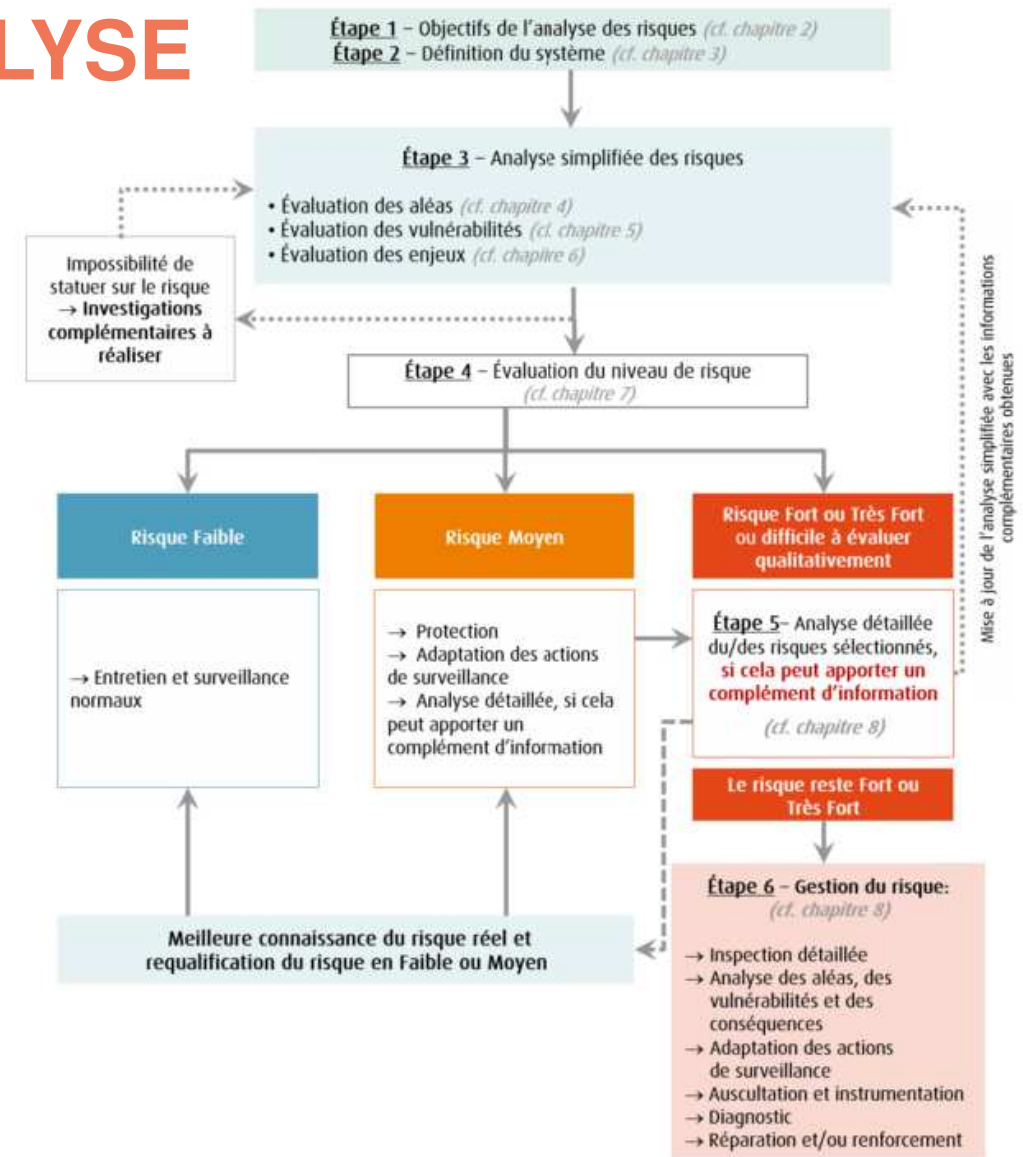
À décorrélérer de l'état de l'ouvrage
≠ risque immédiat pour la sécurité des usagers



MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

Six étapes :

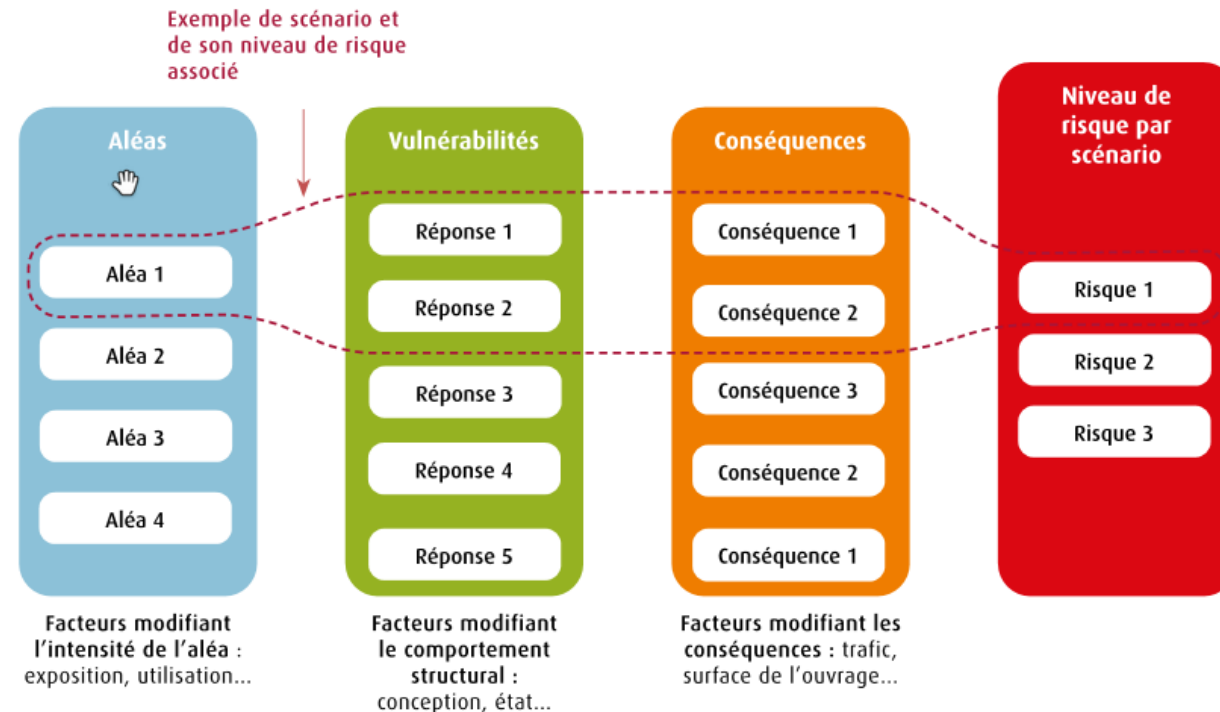
- Définition de l'objectif de l'étude
- Définition du système
- Analyse des risques simplifiée
- Evaluation du niveau de risque
- Analyse détaillée (conditionnelle)
- Traitement du risque



MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

Les composantes du risque :

- Aléa
- Vulnérabilité
- Gravité des conséquences
- Scénarios
- Niveau de risque par scénario
- Niveau de risque global



Quatre niveaux de risques sont définis : faible, moyen, fort, très fort

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

Exemple pour pont en maçonnerie :

- Aléa = surcharge d'exploitation
 - Vulnérabilité = capacité portante (type de voûte, état, modifications, etc.)
 - Gravité des conséquences = taille de l'ouvrage (difficulté de remplacement, coût, trafic supporté, difficulté de déviation, etc.)
- Création d'un scénario lié aux surcharges d'exploitation
- Définition d'un niveau de risque associé



MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

Champ d'application :

- Ponts voûtes en maçonnerie de pierres et de briques
- Attention aux ouvrages réparés
- Murs en retour ou en aile de grandes dimensions, se référer à la méthode dédiée pour les murs
- Traite du risque de ruine, mais également de la baisse du niveau de service



OBJECTIFS

Nécessité de l'analyse de risque pour les ponts en maçonnerie :

- 10% du patrimoine en moyenne, jusqu'à 25% en zone de montagne
- Age avancé, rareté des données fiables
- Peu d'expertise, évaluation de l'état assez complexe
- Modification de géométrie
- Entretien négligé
- Souvent pour traverser des cours d'eau, visite des parties immergées difficile
- Débouché hydraulique limité
- Difficultés de déviations en zone de montagne

OBJECTIFS

Gestion du risque :

- Identification des ouvrages où le gestionnaire doit porter son attention
- Procéder à des arbitrages techniques et financiers

Leviers d'action :

- Réduction des aléas
- Diminution de la vulnérabilité
- Diminution des enjeux

OBJECTIFS

Analyse des risques comme outil de gestion :

Affiner la stratégie de gestion :

- Stratégie optimisée d'inspection et de surveillance (visites subaquatiques)
- Affecter des moyens financiers et humains (concentrer les études sur les ouvrages à risque fort pour anticiper les réparations)
- Anticiper l'exploitation du réseau (ouvrages dont la fermeture est inenvisageable...)
- Evaluer l'aptitude au service en fonction de l'évolution des besoins (augmentation du trafic, nouveaux enjeux sécuritaires, etc.)

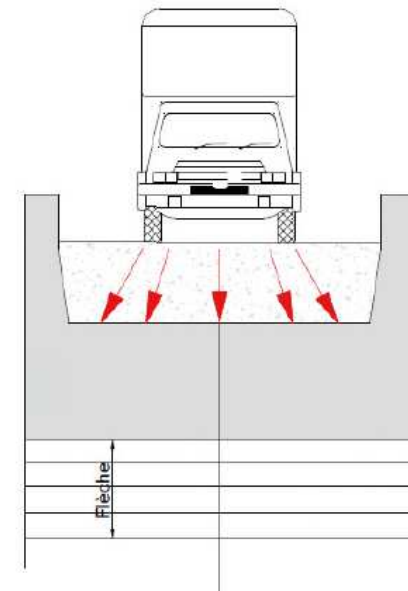
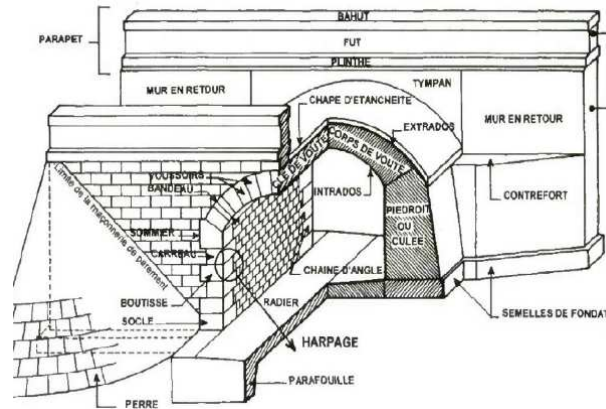
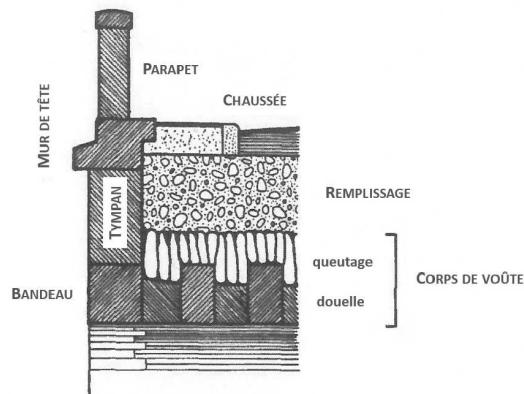
DÉFINITION DU SYSTÈME

Rappels sur la constitution des ouvrages en maçonnerie

Morphologie

Matériaux

Fonctionnement



DÉFINITION DU SYSTÈME

Notions et causes des désordres

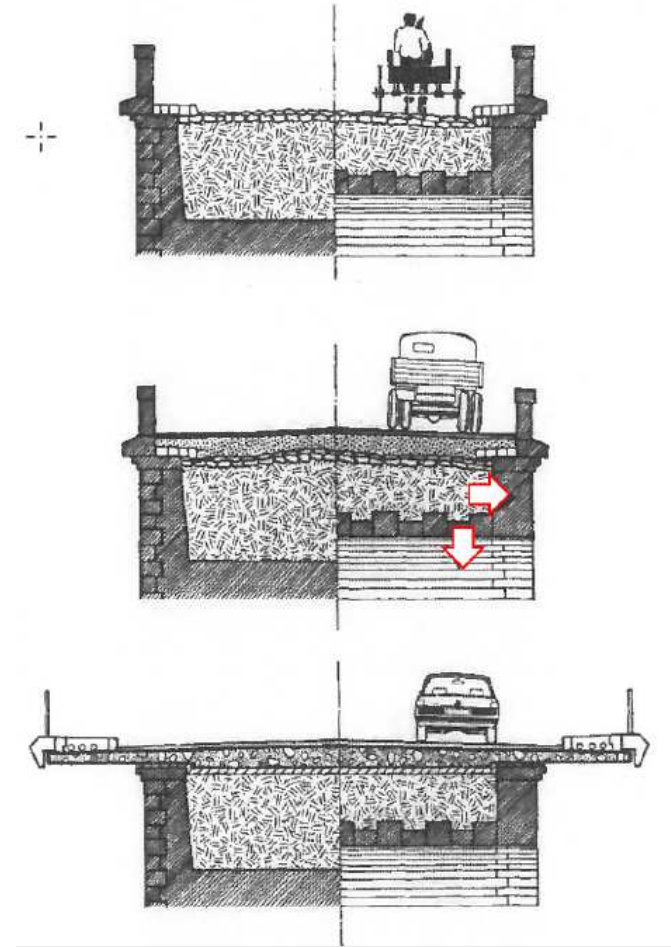
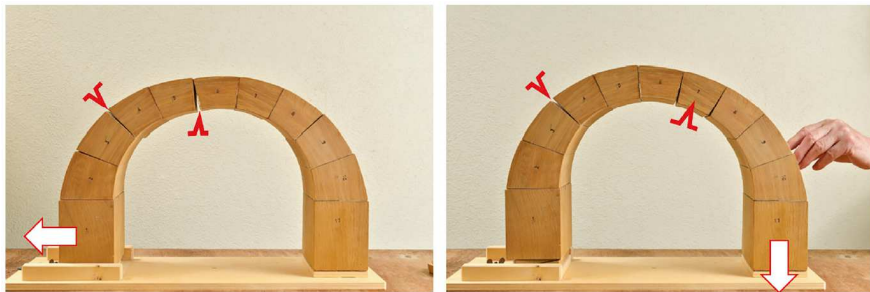
Modifications de la géométrie

Evènements accidentels

Modifications d'usage

Altération des matériaux

Rupture des murs en aile ou en retour



LES ALÉAS : IDENTIFIER ET ÉVALUER

Six aléas sont identifiés et codifiés dans le guide :

- Affouillement des fondations A11 à A16
- Déstabilisation des fondations A21 à A22
- Mise en charge lors des crues A31 à A33
- Charges d'exploitation A41 à A42
- Chocs sur la structure A51 à A54
- Rupture des murs en aile ou en retour A61 à A62

LES ALÉAS : IDENTIFIER ET ÉVALUER

Pour chacun, une grille d'évaluation est proposée :

- Affouillement des fondations

A ₁₁	Type d'écoulement du cours d'eau	rivière fluviale	2
		rivière torrentielle	3,5
		torrent de montagne	5

A ₁₂	Nature du fond de lit	substratum rocheux	0	0	A ₁₈
		blocs	1	0,4	
		graves, cailloux, galets	1,6		
		limons, argiles	2,8	1	
		sables	3,5		

A ₁₃	Effet de contraction du fond de lit y compris présence d'embâcles	peu impacté	0,5
		débouché réduit de 15 % à 40 %	2
		débouché réduit de plus de 40%	6

A ₁₄	Dimension des obstacles	pas de culées ni de piles en saillie	1
		largeur inférieure ou égale à 2 m	1,5
		largeur comprise entre 2 et 4 m	2,5
		largeur supérieure à 4 m	3,5

A ₁₅	Forme et orientation des piles	pas de piles ni de culées en saillie	1
		fûts circulaires ou carrés ou absence de biais	1
		forme oblongue ou allongée, avec un biais de nature à tripler la largeur d'obstacle vue	3
		autre cas	2

A ₁₆	Évolution du lit	lit connu pour être stable	1,1
		présence de dunes H > 1 m ou bancs d'alluvions mobiles	1,3

LES ALÉAS : IDENTIFIER ET ÉVALUER

Pour chacun, une grille d'évaluation est proposée :

- Déstabilisation des fondations des fondations

A ₂₁	Nature du terrain	substratum rocheux ou bon sol	0
		autres	5
A ₂₂	Modification de l'environnement en pied de l'ouvrage	absence	0
		modification défavorable de l'environnement	7

Tableau 2 : Évaluation de l'aléa « mouvement des fondations »

- Mise en charge lors des crues

A ₃₁	Conditions d'écoulement	rivière fluviale	2
		rivière torrentielle	5
		torrent de montagne	8
A ₃₂	Effet de contraction de l'ouverture de l'ouvrage (sans prise en compte des embâcles)	peu impacté	2
		débouché réduit de 15 % à 40 %	5
		débouché réduit de plus de 40 %	10
A ₃₃	Présence d'embâcles	non	0
		possible	2
		avérée	4

Tableau 3 : Évaluation de l'aléa « crues »

VULNÉRABILITÉ AUX ALÉAS

A caractériser pour chaque ouvrage :

- En fonction de la constitution et de l'environnement de l'ouvrage, on établit également une grille d'évaluation : V11 à V61

V ₄₁	Forme de la voûte	plein cintre	2			
		surbaissée	5			
		fortement surbaissée	10			
V ₄₂	Ouverture maximale	≤ 8 m	0			
		> 8 m	5			
V ₄₃	Présence d'encorbellements en contrepoids	non	0			
		oui	8			
V ₄₄	Distance entre les tympans et la bande roulable	présence d'une dalle	0			
		d > 2 m	0			
		1 m < d ≤ 2 m	5			
		d ≤ 1 m	15			
V ₄₅	Note IQOA de l'ouvrage	1 ou 2	0	+3	+2	+5
		2E	5			
		3 ou 3U ou NE	10			
			Désordres dus aux surcharges	Désordres dus au mauvais fonctionnement du drainage ou de l'étanchéité	Désordres dus à une circulation parasite d'eau dans la structure	

Tableau 11 : Évaluation de la vulnérabilité « surcharges »

GRAVITÉ DES CONSÉQUENCES

A caractériser pour chaque ouvrage, selon grille d'évaluation :

- Importance de l'itinéraire porté
- Importance du trafic
- Valeur patrimoniale de l'ouvrage
- Impact sur le niveau de service

Surface de tablier	$S \leq 150 \text{ m}^2$	1
	$150 \text{ m}^2 < S \leq 300 \text{ m}^2$	2
	$300 \text{ m}^2 < S \leq 500 \text{ m}^2$	3
	$500 \text{ m}^2 < S \leq 1000 \text{ m}^2$	4
	$S > 1000 \text{ m}^2$	5

Tableau 16 : Évaluation de la valeur patrimoniale de l'ouvrage

ÉVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE

On introduit des **scénarios** pour associer chaque **aléa** avec la ou les **vulnérabilités** concernées.

N° du scénario	Nom du scénario	Aléa à prendre en compte	Vulnérabilité(s) à prendre en compte	Niveau de criticité du scénario obtenu par
1	Affouillement	$A_{Affouillement}$	$V_{Affouillement_voûte}$ $V_{Affouillement_mur}$	Niveau de la criticité la plus pénalisante
2	Mouvement du sol de fondation	$A_{Mvt_fondations}$	$V_{Mvt_fondations}$	-
3	Submersion de l'ouvrage	A_{Crues}	V_{Crues}	-
4	Charges d'exploitation	$A_{Charges}$	$V_{Charges}$	-
5	Déstabilisation par chocs sur la voûte ou sur les piles	$A_{Chocs_ouvrage}$	$V_{Chocs_ouvrage}$	Niveau du couple aléa/vulnérabilité le plus pénalisant
		$A_{Chocs_voûte}$	$V_{Chocs_voûte}$	
		A_{Choc_piles}	V_{Choc_piles}	
6	Rupture des murs	A_{Murs}	V_{Murs}	-

Tableau 18 : Définition des scénarios

ÉVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE

A partir de **scénarios**, on procède à l'évaluation des niveaux d'aléa

Un tableur Excel permet de faire ces calculs...

La note des aléas est calculée à partir des évaluations de chaque facteur selon les équations suivantes :

- $A_{Affouillement} = 2 * A_{11} * A_{12} - 5 + A_{13} + 1.2 * A_{14} * A_{15} * A_{16} * A_{18} * A_{11}$
- $A_{Mvt_fondations} = A_{21} + A_{22}$
- $A_{Crues} = A_{31} + A_{32} + A_{33} + A_{34}$
- $A_{Charges} = A_{41} + A_{42} + A_{43}$
- $A_{Chocs_ouvrage} = A_{51}$
- $A_{Chocs_voûte} = A_{52}$
- $A_{Chocs_piles} = A_{53} + A_{54}$
- $A_{Murs} = A_{61} + A_{62}$

Aléa	Faible	Moyen	Fort
Affouillement	$A_{Affouillement} < 3$	$3 \leq A_{Affouillement} < 7$	$7 \leq A_{Affouillement}$
Déstabilisation des fondations	$A_{Mvt_fondations} < 4$	$4 \leq A_{Mvt_fondations} < 10$	$10 \leq A_{Mvt_fondations}$
Submersion de l'ouvrage	$A_{Crues} < 11$	$11 \leq A_{Crues} < 20$	$20 \leq A_{Crues}$
Charges d'exploitation	$A_{Charges} < 5$	$5 \leq A_{Charges} < 10$	$10 \leq A_{Charges}$
Chocs	$A_{Chocs} < 8$	$8 \leq A_{Chocs}$	
Murs	$A_{Murs} < 10$	$10 \leq A_{Murs}$	

Tableau 19 : Bornes des niveaux d'aléas

ÉVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE

A partir de **scénarios**, on procède à l'évaluation des niveaux de **vulnérabilité**

Un tableur Excel permet de faire ces calculs...

⌘ Pour chaque scénario, on évalue le niveau de vulnérabilité à l'aide des équations suivantes :

- $V_{\text{Affouillement_voûte}} = V_{11} + V_{12} + \max(V_{13}; V_{14}) + V_{15}$
- $V_{\text{Affouillement_mur}} = V_{16} + V_{17} + V_{18}$
- $V_{\text{Mvt_fondations}} = V_{21} + V_{22}$
- $V_{\text{Crues}} = V_{31} + V_{32}$
- $V_{\text{Charges}} = V_{41} + V_{42} + V_{43} + V_{44} + V_{45}$
- $V_{\text{Chocs_ouvrage}} = V_{51}$
- $V_{\text{Chocs_voûte}} = V_{52}$
- $V_{\text{Chocs_piles}} = V_{53}$
- $V_{\text{Murs}} = V_{61}$

Vulnérabilité	Faible	Moyen	Fort
Affouillement	$V_{\text{Affouillement_voûte}} < 20$	$20 \leq V_{\text{Affouillement_voûte}} < 30$	$30 \leq V_{\text{Affouillement_voûte}}$
	$V_{\text{Affouillement_mur}} < 8$	$8 \leq V_{\text{Affouillement_mur}} < 15$	$15 \leq V_{\text{Affouillement_mur}}$
Déstabilisation des fondations	$V_{\text{Mvt_fondations}} < 5$	$5 \leq V_{\text{Mvt_fondations}} < 15$	$15 \leq V_{\text{Mvt_fondations}}$
Submersion de l'ouvrage	$V_{\text{Crues}} < 5$	$5 \leq V_{\text{Crues}} < 10$	$10 \leq V_{\text{Crues}}$
Charges d'exploitation	$V_{\text{Charges}} < 11$	$11 \leq V_{\text{Charges}} < 20$	$20 \leq V_{\text{Charges}}$
Eau	$V_{\text{Eau}} < 8$	$5 \leq V_{\text{Eau}} < 8$	$8 \leq V_{\text{Eau}}$
Chocs	$V_{\text{Chocs}} < 8$	$8 \leq V_{\text{Chocs}}$	
Murs	$V_{\text{Murs}} < 8$	$8 \leq V_{\text{Murs}}$	

Tableau 20 : Borne des niveaux de vulnérabilité

ÉVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE

En croisant **aléa** et **vulnérabilité**, on obtient le **niveau de criticité**

		Niveau d'aléa		
		Faible	Moyen	Fort
Niveau de vulnérabilité	Faible	Criticité faible	Criticité faible	Criticité moyenne
	Moyen	Criticité faible	Criticité moyenne	Criticité forte
	Fort	Criticité moyenne	Criticité forte	Criticité forte

Tableau 21 : Détermination du niveau de criticité par scénario

On évalue ensuite le **niveau de conséquences**

Note des conséquences	Niveau des conséquences
$ISE \leq 8$	Faible
$8 < ISE \leq 14$	Moyen
$14 < ISE$	Élevé

Tableau 22 : Détermination du niveau d'enjeu

ÉVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE

En croisant **niveau de criticité** et **niveau de conséquence**, on obtient le **niveau de risque** pour chaque scénario

		Niveau de criticité		
		Faible	Moyen	Fort
Niveau de conséquences	faible	Risque faible	Risque faible	Risque moyen
	moyen	Risque faible	Risque moyen	Risque fort
	fort	Risque moyen	Risque fort	Risque fort

Tableau 23 : Évaluation du niveau de risque par scénario

ÉVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE

En croisant **niveau de criticité** et **niveau de conséquence**, on obtient le **niveau de risque** pour chaque scénario

		Niveau de criticité		
		Faible	Moyen	Fort
Niveau de conséquences	faible	Risque faible	Risque faible	Risque moyen
	moyen	Risque faible	Risque moyen	Risque fort
	fort	Risque moyen	Risque fort	Risque fort

Tableau 23 : Évaluation du niveau de risque par scénario

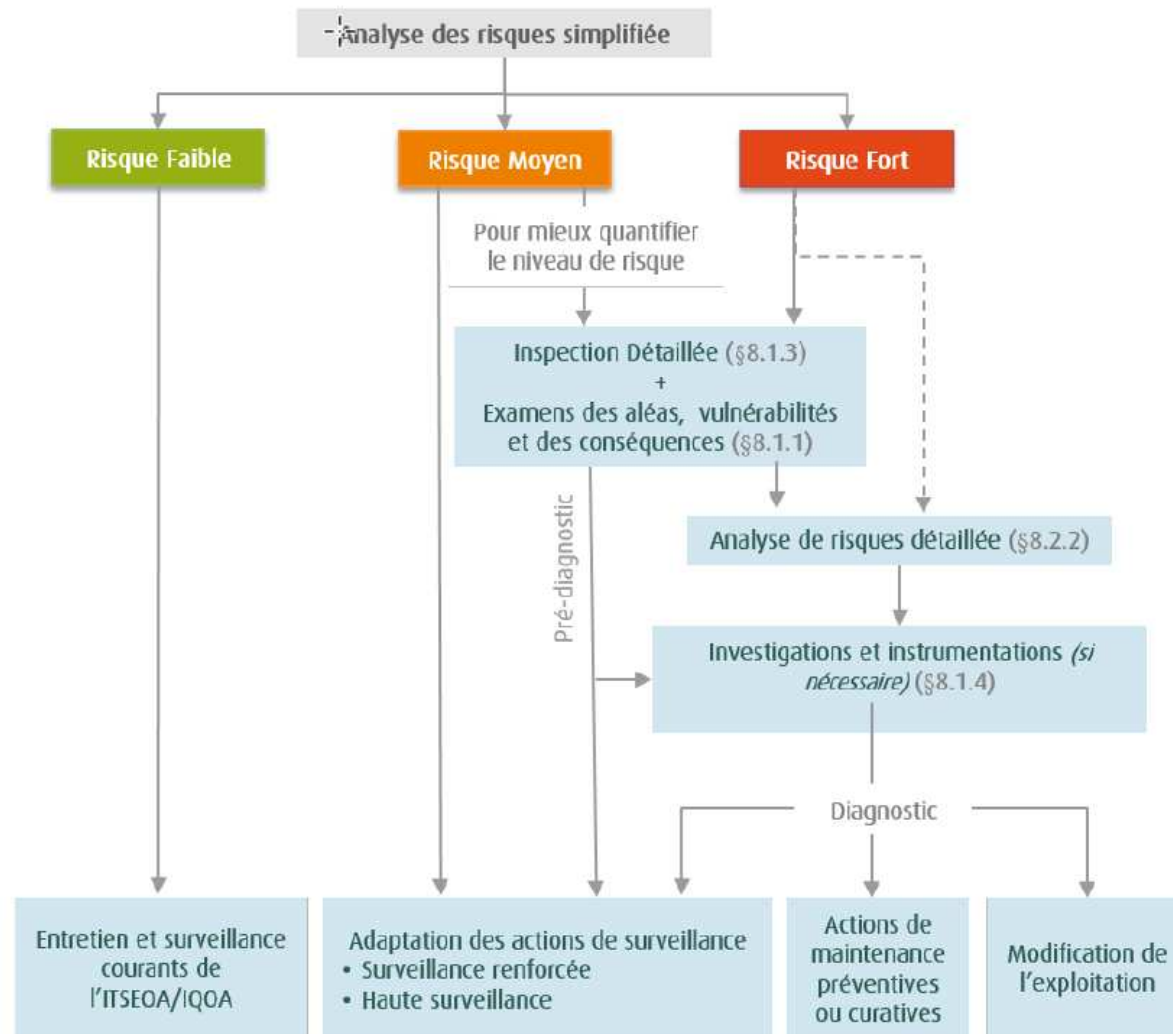
ÉVALUATION DU NIVEAU DE RISQUE PAR OUVRAGE

Par ouvrage, le niveau de risque correspond au niveau de scénario **le plus pénalisant**.

Lorsque 2 scénarios sont en risque **FORT**, le niveau de risque obtenu est **TRES FORT**



SUITES À DONNER



SUITES À DONNER

Actions pouvant être menées à l'issue de l'anayse simplifiée :

- Recherche d'informations plus détaillées
- Précisions sur le niveau de risque (introduction de risques complémentaires, analyse détaillée)
- Diagnostic
- Adapter les actions de surveillance
- Lancer des actions de maintenance ou de réparation
- Adapter le niveau de service



Merci de votre attention