

Analyse des Risques appliquée aux murs de soutènement en maçonnerie *(méthodologie)*

PERLO S. , BONIFAS C . , COLAS A.-S . , PLASSARD F. ,
ROUXEL N. , LLOP L.

SOMMAIRE

La gestion du patrimoine des OA en France

ITSEOA – Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des OA
La méthode IQOA – Image Qualité des Ouvrages d'Art

L'Analyse des risques selon la méthodologie du Sétra*

Origine de la méthodologie de l'Analyse des risques

Méthodologie « Maîtrise des risques »

Aléas, Vulnérabilités, Conséquences, Criticité et Niveaux de risque

L'analyse des risques appliquée aux murs de soutènement en maçonnerie

Approche par scénarii

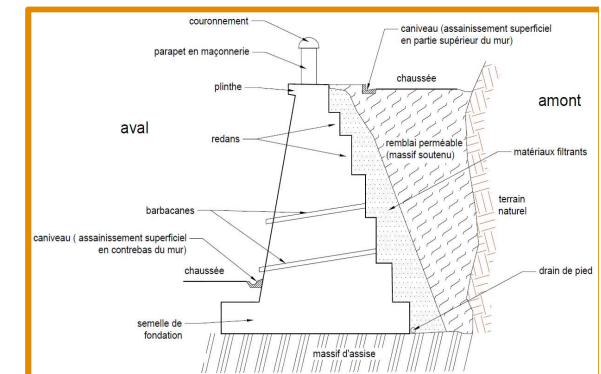
Exemples d'Aléas de Vulnérabilités pour l'agressivité du milieu

Exemples d'évaluation, de la Criticité, du niveau de gravité des Conséquences

et du niveau du Risque

Exemples de traitement des risques

* Sétra : Actuel Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux



LA GESTION DU PATRIMOINE DES OA EN FRANCE

• L'ITSEOA

L'ITSEOA de décembre 1979, révisée en octobre 2010,
présente une organisation de la gestion des ouvrages

1^{ère} urgence : Recensement des ouvrages

↳ **Différentes actions de surveillance visuelle**

➔ **IQOA** pour connaître facilement l'état des ouvrages

➤ pour les empêcher de se dégrader, il faut les **entretenir**

➤ si, malgré ces actions, leur niveau de service se détériore, il faut les **réparer**

1 fascicule :
« Généralités sur la Surveillance
de l'état du patrimoine »



3 Fascicules :
Annexes à l'Instruction



21 Fascicules :
Guides d'application



LA GESTION DU PATRIMOINE DES OA EN FRANCE

• La méthode IQOA – Image Qualité des Ouvrages d’Art (1995)

➔ **Méthode d'évaluation** (cotations 1, 2, 2E, 3, 3U)

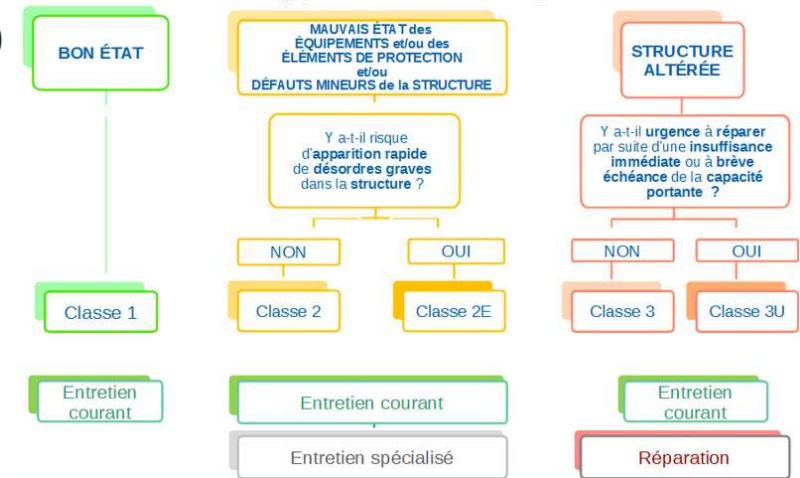
➤ **Ouvrages** : Ponts, Murs, Tranchées couvertes et Tunnels, PPHM (portiques, potences et haut mâts)

➤ **Visite d'ouvrages** tous les 3 ans ➔ Cotation

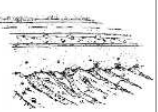


➤ **Documents méthodologiques** :

○ **Catalogues de désordres** ➔

○ **Procès verbaux de visite**



1 - ZONE D'INFLUENCE
1.2 - En contrebas du mur

| ILLUSTRATIONS DES DÉFAUTS | N° | DESCRIPTION DES DÉFAUTS | CLASSE | RELEVÉ | SÉCURITÉ | ORIGINES POSSIBLES DES DÉFAUTS | OBSERVATIONS COMMENTAIRES CROQUIS |
|---|------|--|--------|--------|----------|--|---|
| 121 STABILITÉ D'ENSEMBLE | | | | | | | |
|  | 1214 | Erosions Observables suite à des ravinnements du sol dans la zone d'influence (hors fondations). | 0 | | | - Dues à l'instabilité du terrain superficiel, aggravé par un défaut du système d'évacuation des eaux dans la zone d'influence de l'ouvrage. | <i>Ne pas confondre avec le défaut 421.</i> |
| | | - Localisées. | 1 | | | - Et/ou dues au déboussement intensif, des travaux de déblaiement ou de remblaiement effectués au voisinage de l'ouvrage. | |
| | | - Étendues. | 2 | | | | |
| CLASSE DUE À LA STABILITÉ D'ENSEMBLE EN CONTREBAS DU MUR | | | | | | | |
|  | 1220 | Inclinaisons anormales d'arbres et poteaux Arbres, poteaux, et candélabres implantés dans la zone d'influence de l'ouvrage anormalement penchés. | | | | - On retient la cotation la plus élevée ? > * > 3U > 3 > 2E > 2 > 1. - On reporte, éventuellement, la mention « 5 ». | Indiquer par une croix (X) dans la colonne « relevé » la présence du défaut. |
| | | | | | | Désordres non classés, examiner les défauts de structure (chapitre 4). |  |

SOMMAIRE

La gestion du patrimoine des OA en France

ITSEOA – Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des OA
La méthode IQOA – Image Qualité des Ouvrages d'Art

L'Analyse des risques selon la méthodologie du Sétra*

Origine de la méthodologie de l'Analyse des risques

Méthodologie « Maîtrise des risques »

Aléas, Vulnérabilités, Conséquences, Criticité et Niveaux de risque

L'analyse des risques appliquée aux murs de soutènement en maçonnerie

Approche par scénarii

Exemples d'Aléas de Vulnérabilités pour l'agressivité du milieu

Exemples d'évaluation, de la Criticité, du niveau de gravité des Conséquences
et du niveau du Risque

Exemples de traitement des risques

Conclusion

* Sétra : Actuel Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux

L'ANALYSE DES RISQUES SELON LA MÉTHODOLOGIE DU SETRA

- Origine de la méthodologie de l'Analyse des risques

IQOA

- état à l'instant « t »
- Quid quant à l'Evolution ???
la Priorisation des réparations ???

➔ Etude des phénomènes à l'origine des pathologies
Indices détectables lors de visites (sans essais !)



État du mur en juin 2010



État du mur en mars 2011

Évolution de la dégradation d'un mur
suite à un glissement de terrain amont
(Mur de Maison Rouge – 42) [source : Cerema]

Analyse
des
risques



Selon la **méthodologie** Sétra

sur

« **Maîtrise des risques** »

(2013)

Méthodologie simple : applicable
à un parc d'ouvrages
important
(plusieurs centaines ou milliers)

L'ANALYSE DES RISQUES SELON LA MÉTHODOLOGIE DU SÉTRA

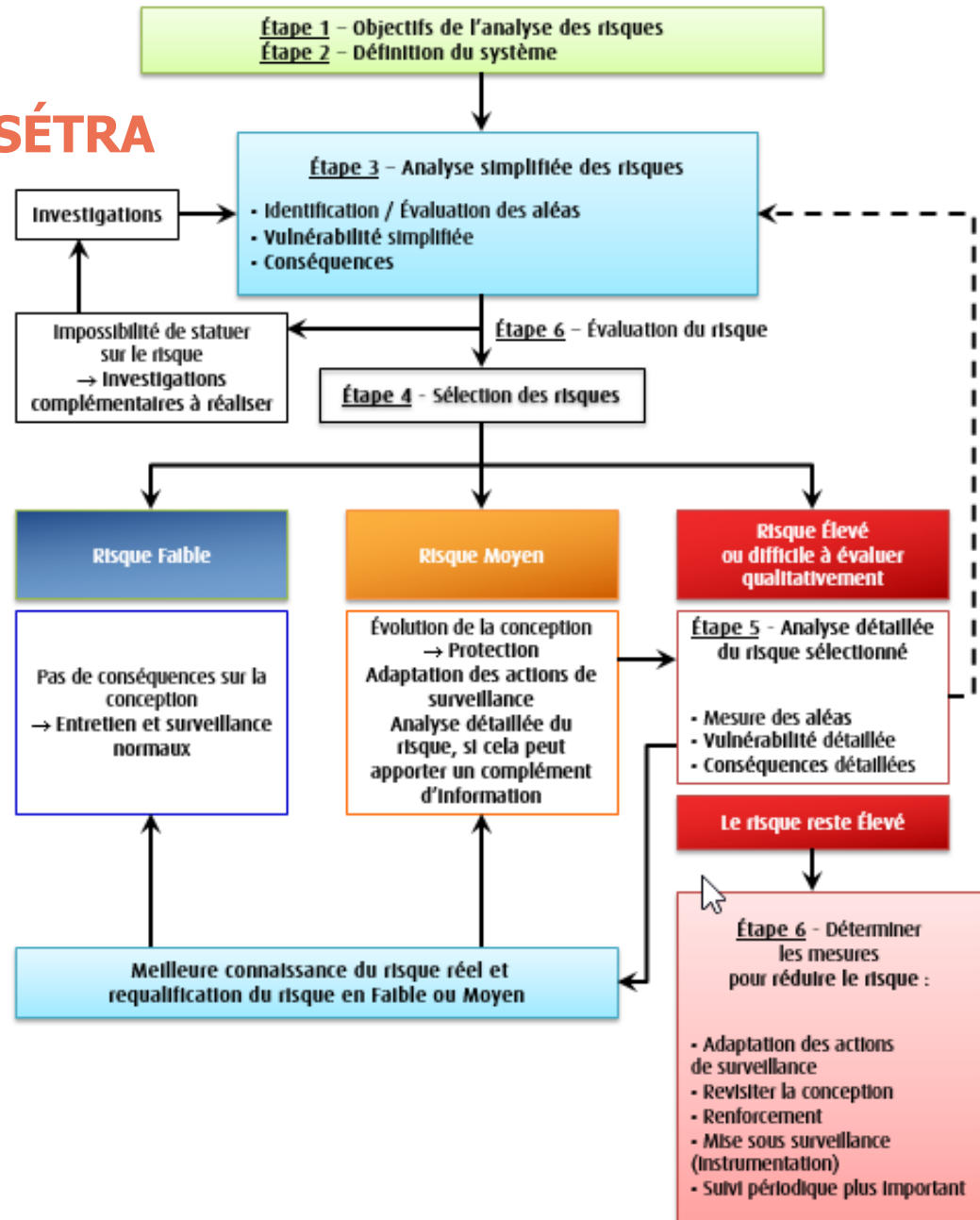
Méthodologie

« Maîtrise des Risques »

Application aux ouvrages d'art

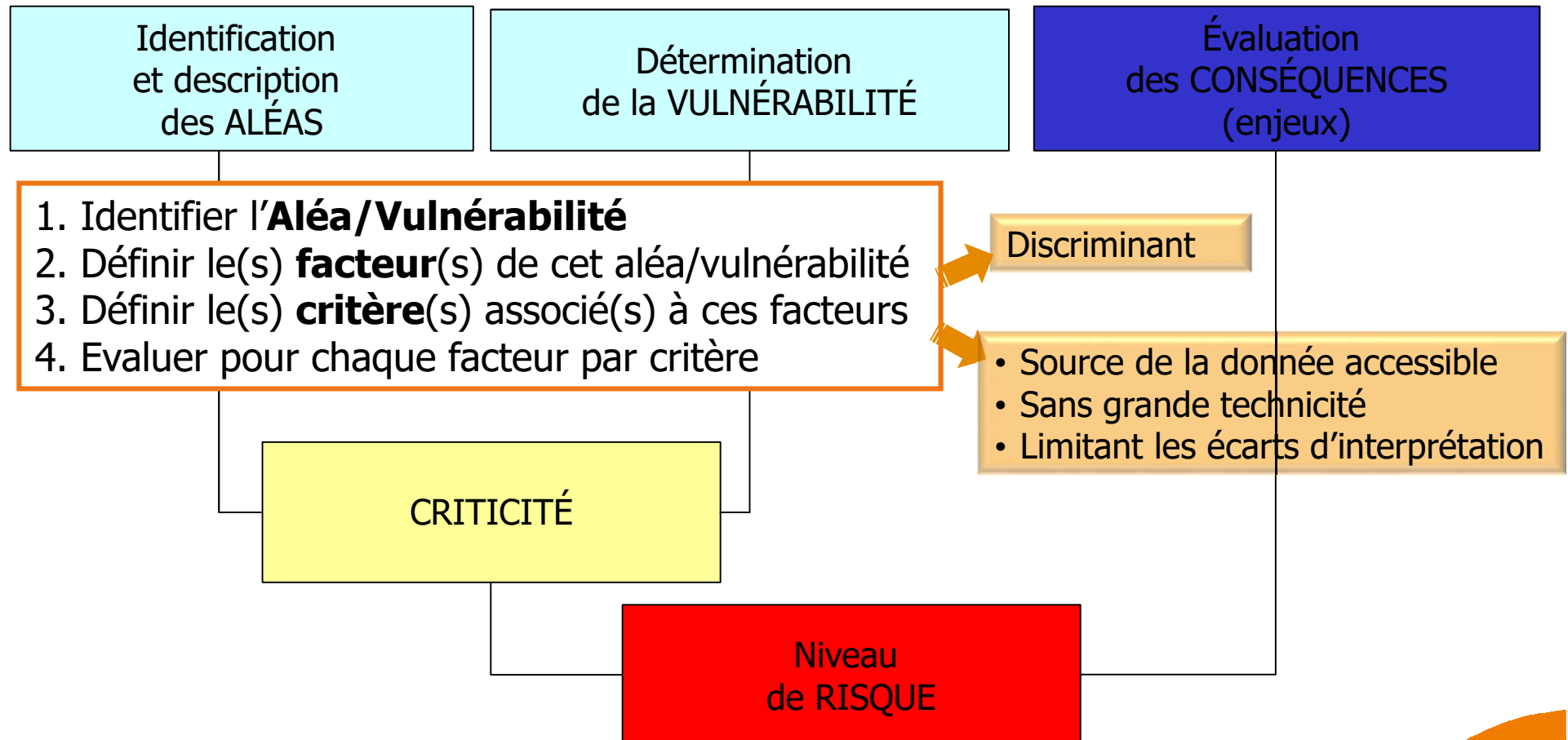


- ✓ VIPP
- ✓ Buses métalliques
- ✓ Tranchées couvertes et tunnels
- ✓ Terres Armées
- ✓ Murs BA encastrés sur semelle
- ✓ Ponts en maçonnerie
- ✓ Murs en maçonnerie



L'ANALYSE DES RISQUES SELON LA MÉTHODOLOGIE DU SETRA

- Aléas, Vulnérabilité, Conséquences, Criticité et Niveaux de risque



SOMMAIRE

La gestion du patrimoine des OA en France

ITSEOA – Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des OA
La méthode IQOA – Image Qualité des Ouvrages d'Art

L'Analyse des risques selon la méthodologie du Sétra*

Origine de la méthodologie de l'Analyse des risques
Méthodologie « Maîtrise des risques »
Aléas, Vulnérabilités, Conséquences, Criticité et Niveaux de risque

L'analyse des risques appliquée aux murs de soutènement en maçonnerie

Approche par scénarii
Exemples d'Aléas de Vulnérabilités pour l'agressivité du milieu
Exemples d'évaluation, de la Criticité, du niveau de gravité des Conséquences
et du niveau du Risque

Exemples de traitement des risques

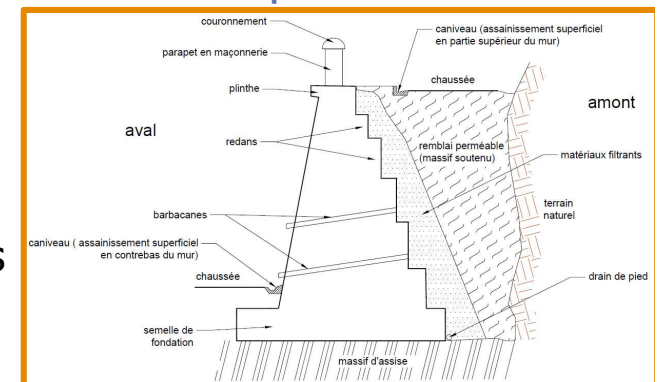
Exemples de types d'essais d'investigation

Exemples de types d'instrumentation

Exemples d'actions de maintenance préventives et curatives

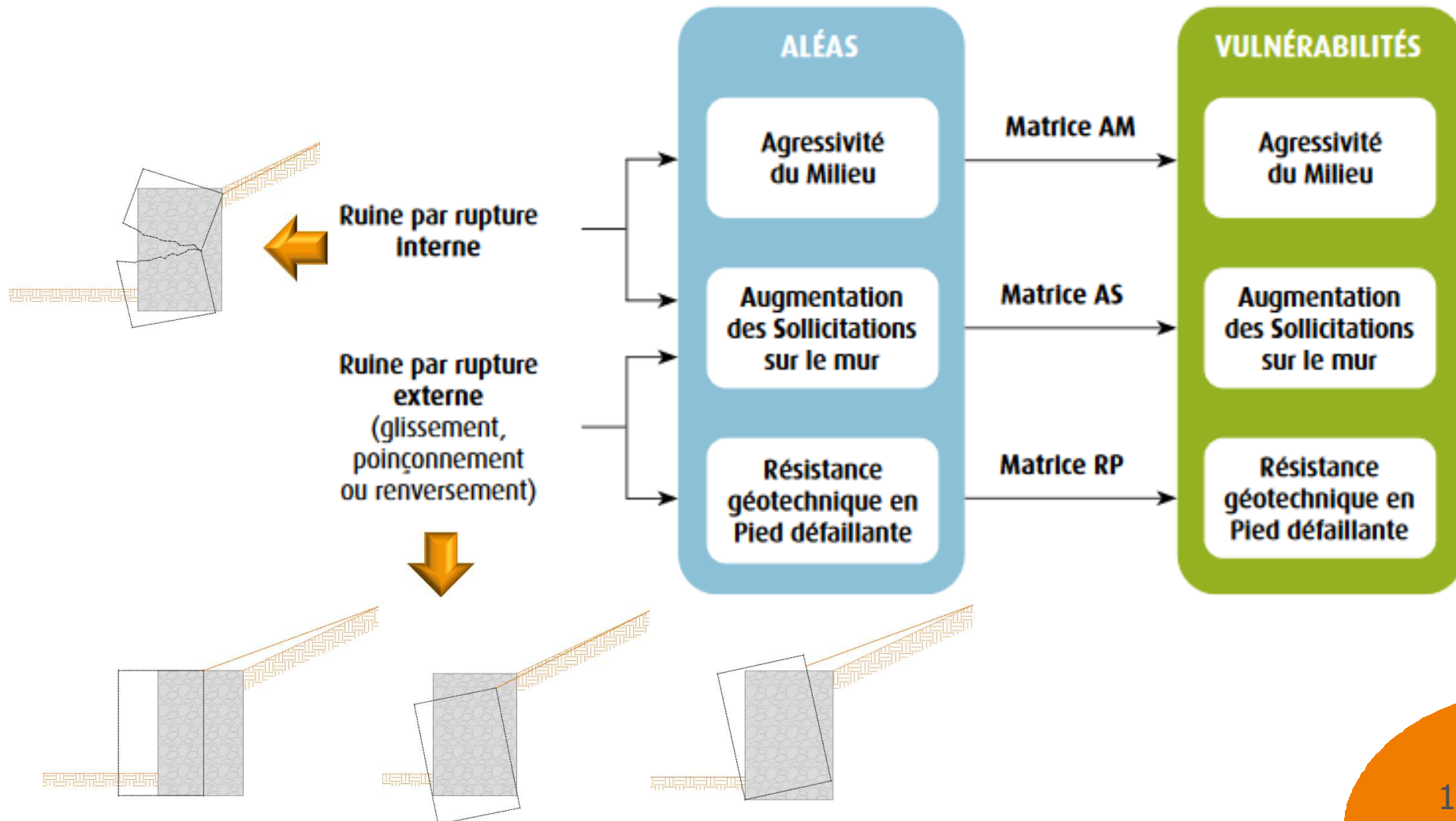
Conclusion

* Sétra : Actuel Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux



L'ADR APPLIQUÉE AUX MURS DE SOUTÈNEMENT EN MAÇONNERIE

- Approche par scenarii

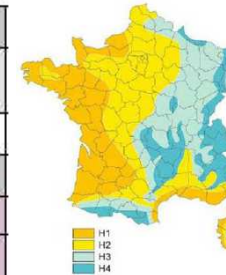


L'ADR APPLIQUÉE AUX MURS DE SOUTÈNEMENT EN MAÇONNERIE

- Exemples d'Aléas et Vulnérabilités pour l'agressivité du milieu

Aléas

| Salage ²⁶ au regard de l'apport en chlorure et du gel | | | | |
|--|--|----------------------------------|--|--|
| Types 1 et 2 | Absence | < 10 jours/an (H1) ²⁷ | Entre 10 et 30 jours/an (H2) ²⁷ | > 30 jours/an (H3 et H4) ²⁷ |
| a11 | 0 | +1 | +3 | +5 |
| Environnement humide (ouvrage en contact avec l'eau côté aval ²⁸ visible) | | | | |
| Type 2 | Pas de contact avec l'eau | En contact permanent avec l'eau | En zone de marnage | Critères aggravants : |
| | | | | En contact avec de l'eau de mer |
| | | | | Climat tropical |
| a12 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| Environnement agressif contre le parement ²⁹ (non visible) | | | | |
| Types 1 et 2 | Autres environnements (a priori sans agents agressifs) | Zones urbaines | | |
| a13 | 0 | | | |
| Type 2 | Absence avérée | Aucune information | Sol | |
| a14 | 0 | +2 | | |



Carte de salage

Vulnérabilités

| Défauts structuraux | | | | | | | |
|---|------------|--|-------------------------------|----|-----------------------|----|---|
| Types 1 et 2 | v11 | Épaisseur du mur | | | | | |
| | | En tête | | | | | |
| | | ≥ min (H/12 ; 0,30 m) | Aucune information disponible | | < min (H/12 ; 0,30 m) | | |
| | | 0 | +2 | +3 | | | |
| Types 1 et 2 | v12 | A la base | | | | | |
| | | < 0,3 | | | | | |
| | | non | Aucune information disponible | | oui | | |
| | | 0 | +2 | +3 | | | |
| Robustesse des matériaux (blocs et mortier) | | | | | | | |
| Types 1 et 2 | v13 | Altérations des blocs | | | | | |
| | | 0 | 2 | 2E | 3 | 3U | Critère aggravant Pour les cotations 0, 2 ou 2E ²⁷ : Pierre poreuse |
| | | 0 | +1 | +2 | +4 | +5 | +3 |
| Type 2 | v14 | Disjointoiement, altération des joints | | | | | |
| | | 0 | 2 | 2E | 3 | 3U | |
| | | 0 | +5 | +6 | +7 | +8 | |

Type 1 : pierres sèches
 Type 2 : maçonnés



L'ADR APPLIQUÉE AUX MURS DE SOUTÈNEMENT EN MAÇONNERIE

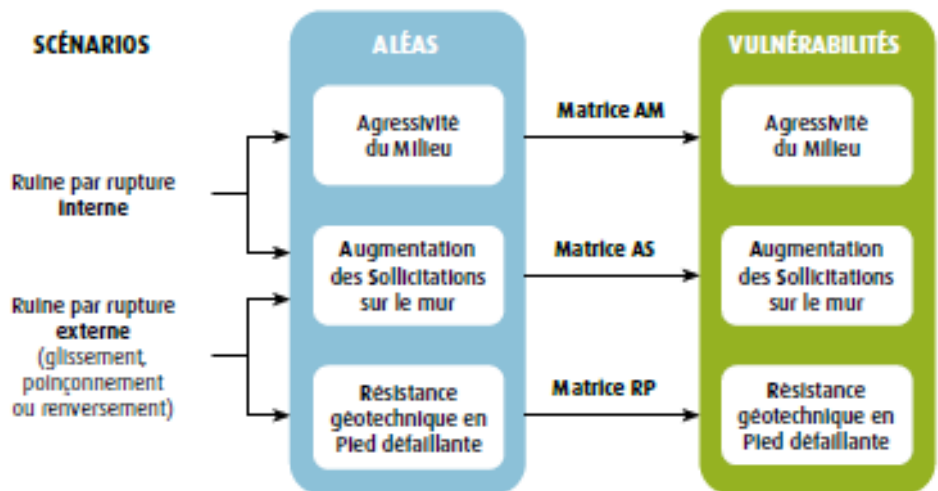
- Exemples d'évaluation de la Criticité, du niveau de gravité des Conséquences et du niveau de Risque

Evaluation de la Criticité pour un binôme Aléas/Vulnérabilité

➔ Evaluation de la Criticité pour un scénario

| Niveau de criticité élémentaire | | Niveau de vulnérabilité | | |
|---------------------------------|--------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| | | Faible | Moyen | Fort |
| Niveau d'aléa | Faible | Criticité Faible | Criticité Faible | Criticité Moyenne |
| | Moyen | Criticité Faible | Criticité Moyenne | Criticité Elevée |
| | Fort | Criticité Moyenne | Criticité Elevée | Criticité Elevée |

| Niveau de criticité du scénario | | Niveau de criticité pour un binôme « aléa/vulnérabilité » | | |
|---|--------|---|-------------------|------------------|
| | | Faible | Moyen | Elevé |
| Niveau de criticité pour un binôme « aléa/vulnérabilité » | Faible | Criticité Faible | Criticité Moyenne | Criticité Elevée |
| | Moyen | Criticité Moyenne | Criticité Elevée | Criticité Elevée |
| | Elevé | Criticité Elevée | Criticité Elevée | Criticité Elevée |



L'ADR APPLIQUÉE AUX MURS DE SOUTÈNEMENT EN MAÇONNERIE

- Exemples d'évaluation de la Criticité, du niveau de gravité des Conséquences et du niveau de Risque

Evaluation de la Criticité pour un binôme Aléas/Vulnérabilité

➔ Evaluation de la Criticité pour un scenario

Evaluation du niveau de gravité des Conséquences

| Gravité des conséquences - $C = c1 + c2 + c3 + c4$ (selon le Tableau 8) | |
|---|---------------------------------------|
| Note des gravités des conséquences | Niveaux des gravités des conséquences |
| $C < 6$ | Faible |
| $6 \leq C < 12$ | Moyen |
| $C \geq 12$ | Elevé |

Evaluation du niveau de Risque pour chaque scenario

| | | Niveau de conséquences | | |
|---------------------|--------|------------------------|---------------|--------------|
| | | Faible | Moyen | Elevé |
| Niveau de criticité | Faible | Risque Faible | Risque Faible | Risque Moyen |
| | Moyen | Risque Faible | Risque Moyen | Risque Fort |
| | Elevé | Risque Moyen | Risque Fort | Risque Fort |

L'ADR APPLIQUÉE AUX MURS DE SOUTÈNEMENT EN MAÇONNERIE

- Exemples d'évaluation de la Criticité, du niveau de gravité des Conséquences et du niveau de Risque

Evaluation de la Criticité pour un binôme Aléas/Vulnérabilité

➔ Evaluation de la Criticité pour un scenario

Evaluation du niveau de gravité des Conséquences

Evaluation du niveau de Risque pour chaque scenario

➔ Evaluation du niveau de Risque pour l'ouvrage

| | | Niveau de risque du scénario « Ruine par perte de stabilité externe » | | |
|---|---------------|--|--------------|------------------|
| | | Risque Faible | Risque Moyen | Risque Fort |
| Niveau de risque du scénario « Ruine par rupture interne » | Risque Faible | Risque Faible | Risque Moyen | Risque Fort |
| | Risque Moyen | Risque Moyen | Risque Fort | Risque Fort |
| | Risque Fort | Risque Fort | Risque Fort | Risque Très Fort |

L'ADR APPLIQUÉE AUX MURS DE SOUTÈNEMENT EN MAÇONNERIE

• Exemples de traitement des risques

Exemples de types d'essais d'investigation

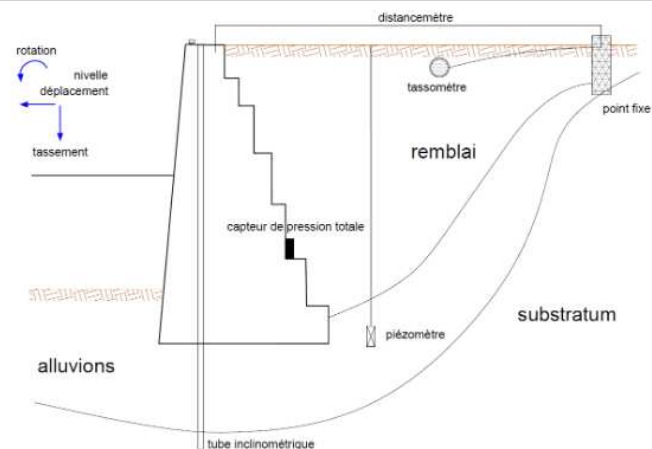
| Types d'essais | Informations obtenues |
|---|---|
| Essais directs | |
| Essais mécaniques <i>in-situ</i> (pressiomètre, pénétromètre) | • caractéristiques des sols de fondation (capacité portante) |
| • A partir d'une carotte ou d'un prélèvement | |
| • De mortier : | |
| Analyse au MEB (Microscope Electronique à Balayage) | • caractéristiques de la microstructure, présence de produits d'altération |
| Essais mécaniques | • résistance mécanique du matériau composite pierre ou brique/ mortier (complexe) |
| Analyse chimique élémentaire du mortier | • dosage des éléments constitutifs et de la nature du liant |
| Analyse chimique élémentaire du mortier | • profils de pénétration des chlorures, du magnésium et des sulfates dans la maçonnerie |
| • Des blocs : | |
| Caractéristique minéralogique | • analyse mécanique et chimique élémentaire |
| Fracturation de la maçonnerie | • Indice RQD ⁷⁹ |
| Essais de compression simple | • résistance à la compression des blocs |
| • De sol : | |
| Essais d'identification | • nature des sols |
| Essais mécaniques (triaxial ou boîte de cisaillement) | • caractéristiques mécaniques de cisaillement ⁸⁰ des sols |

L'ADR APPLIQUÉE AUX MURS DE SOUTÈNEMENT EN MAÇONNERIE

• Exemples de traitement des risques

Exemples de types d'instrumentation

| Types d'instrumentation | Informations obtenues |
|--|---|
| Piézomètre (ouvert ou fermé ⁸²) | • niveau de la nappe ou pression interstitielle |
| Capteur de pression ⁸³ | • contraintes dans le sol ou poussées à l'arrière du soutènement |
| Pose de nivelles ou niveaux à bulle | • inclinaison du parement |
| Appareil de mesure de déformation tridimensionnelle (théodolite, laser, méthode « 3D » géomètres...) | • mouvements du parement |
| Pose de tassomètre | • tassements |
| Systèmes à fil invar tendu (distancemètre à fil invar) | • déplacements latéraux |
| Pose d'inclinomètres | • mouvements du parement ⁸⁴ (rotation) • mouvements du sol de fondation amont ou aval |
| Fissurométrie par jauges ou extensomètres | • mesures dans le temps de l'ouverture et la fermeture des fissures |



L'ADR APPLIQUÉE AUX MURS DE SOUTÈNEMENT EN MAÇONNERIE

• Exemples de traitement des risques

*Exemples d'actions
de maintenance
préventives
et curatives*

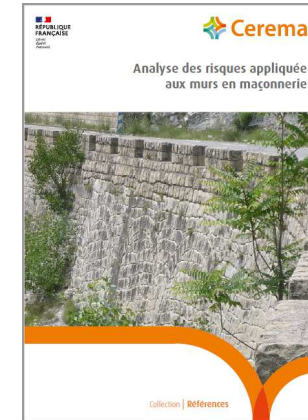
| Actions visées | Types d'action |
|--|--|
| Restauration de la maçonnerie | |
| Protection du mur contre les agressions | <ul style="list-style-type: none"> • rejointoiement⁸⁶ • remplissage des vides par injection⁸⁷ des maçonneries afin d'en réduire la perméabilité (Figure 25) |
| Reconstruction partielle ⁸⁸ | <ul style="list-style-type: none"> • remplacement⁸⁹ de blocs (Figure 26) |
| Augmentation de la résistance mécanique | <ul style="list-style-type: none"> • par injection⁹⁰ des maçonneries en rétablissant le monolithisme de la structure (Figure 25) √ Risques de déstabilisation de la maçonnerie lors de l'injection du coulis par les surpressions occasionnées ou par la réduction de frottement entre les blocs par la présence de ce milieu visqueux |
| Limiter les déformations du mur ou l'ouverture des fissures | <ul style="list-style-type: none"> • mise en œuvre de tirants (Figure 26), aiguilles, clous ou boulons⁹¹ |
| Interventions du mur pour réduire les poussées côté amont | |
| Amélioration du dispositif d'évacuation des eaux, côté amont, et du drainage interne ⁹² | <ul style="list-style-type: none"> • imperméabilisation des surfaces • recueil et évacuation contrôlés des eaux • création de barbacanes (sondage destructif⁹³) dans le cas de mur jointoyé • drains sub-horizontaux selon les conditions hydrogéologiques et contraintes d'aménagement du site • tout système permettant d'éviter l'apport d'eau (tranchées drainantes) |
| Diminution des sollicitations (déchargement amont du mur) | <ul style="list-style-type: none"> • déchargement suite à l'acquisition de terrains fonciers / de constructions avoisinantes, ou à une négociation avec les communes • substitution de sol avec mise en place de remblai (sol renforcé, matériaux allégés⁹⁴) • éloignement de la voie portée • décaissement • recépage du mur |

L'ADR APPLIQUÉE AUX MURS DE SOUTÈNEMENT EN MAÇONNERIE

- **Conclusion**



Groupe de travail constitué d'experts
et de gestionnaires



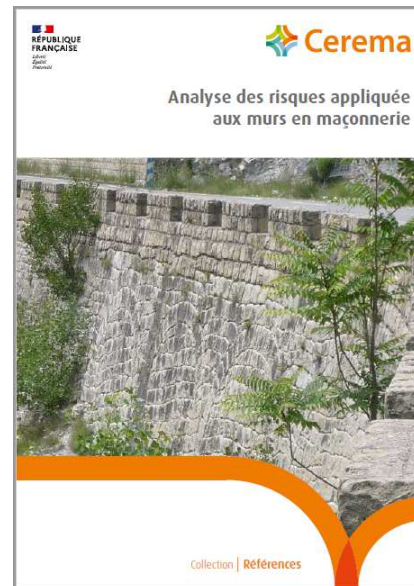
L'analyse de risque

↓
Critère de risque associé à chaque ouvrage

↓
Priorisation sans se baser uniquement sur l'état structurel

↓
Proposition de solutions pour **le traitement de ces risques**

Merci de votre attention



Contact :

Florent.Plassard@cerema.fr