

Analyse des risques appliquée aux murs en béton armé sur semelle



Guide méthodologique

Analyse des risques appliquée aux murs en béton armé sur semelle



Ont participé à la réalisation de ce guide :

Groupe de rédaction :

- Julien ARPAIA (DIR Nord Ouest)
- Xavier BLANCHON (CD du Rhône)
- Pierre de LACLOS (DIR Centre-Est)
- Agnès JOSEPH (Cerema Centre-Est)
- Denis MALATERRE (Cerema Sud-Ouest)
- Thomas MARY (Cerema Méditerranée)
- Laurent LLOP (Cerema Infrastructures de transport et matériaux)
- Sabrina PERLO (Cerema Infrastructures de transport et matériaux)
- Jean-François SEIGNOL (IFSTTAR/MAST)
- Jean-Marc TARRIEU (Cerema Infrastructures de transport et matériaux)
- Benoit THAUVIN (Cerema Ouest)
- Emilie THIEBAUD (Cerema Méditerranée)

Groupe de relecture :

- Anil ABDOULHOUSSEN (Cerema Ile-de-France)
- Christophe AUBAGNAC (Cerema Centre-Est)
- Véronique BICILLI (DIR Massif central)
- Pierre CORFDIR (Cerema Infrastructures de transport et matériaux)
- Samuel HEUMEZ (Cerema Ile-de-France)
- Frédéric MARTY (DIR Méditerranée)

Groupe testeurs :

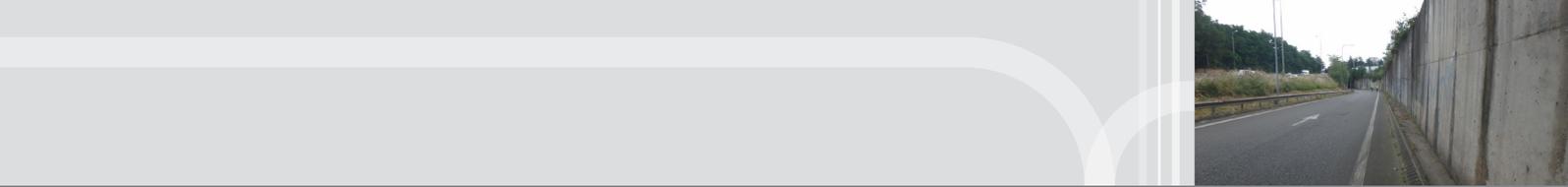
- Julien ARPAIA (DIR Nord Ouest)
- Xavier BLANCHON (CD du Rhône)
- Eric GUYOT (DIR Centre Est)
- Pierre de LACLOS (DIR Centre-Est)
- Agnès JOSEPH (Cerema Centre-Est)
- Frédéric MARTY (DIR Méditerranée)

Coordination : Sabrina PERLO (Cerema Infrastructures de transport et matériaux)

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Sommaire | 3 |
| Avant-propos | 5 |
| Chapitre 1 - Présentation de la méthodologie de l'analyse des risques simplifiée | 7 |
| 1.1 - L'objectif de l'analyse des risques | 7 |
| 1.2 - Champs d'application de la démarche | 8 |
| 1.3 - Références et textes en interaction avec cette démarche | 9 |
| Chapitre 2 - Étape 1 : Objectifs de l'Analyse des Risques | 10 |
| 2.1 - Le patrimoine des murs en béton armé sur semelle | 10 |
| 2.2 - Principe de l'analyse des risques | 11 |
| 2.3 - Les composantes du risque | 13 |
| 2.4 - La gestion du risque | 14 |
| Chapitre 3 - Étape 2 : Définition du système de l'Analyse des Risques | 15 |
| 3.1 - Description - Conception | 15 |
| 3.2 - Mode de fonctionnement et de rupture des murs de type 6 | 18 |
| 3.3 - Notions sur les causes et la nature des désordres | 19 |
| Chapitre 4 - Étape 3.1 : Identification des aléas | 23 |
| 4.1 - Aléa « Dégradation des matériaux constitutifs » | 24 |
| 4.2 - Aléa « Augmentation des sollicitations sur le mur » | 27 |
| 4.3 - Aléa « Résistance en pied défailante » | 32 |
| Chapitre 5 - Étape 3.2 : Vulnérabilité aux aléas | 35 |
| 5.1 - Vulnérabilité à la « Dégradation des matériaux constitutifs » | 35 |
| 5.2 - Vulnérabilité à la « Augmentation des sollicitations sur le mur » | 39 |
| 5.3 - Vulnérabilité à la « Résistance en pied défailante » | 40 |
| Chapitre 6 - Étape 3.3 : Gravité des conséquences | 42 |
| 6.1 - L'importance de l'itinéraire concerné par le mur | 42 |
| 6.2 - L'importance du trafic | 42 |
| 6.3 - L'importance de l'ouvrage | 43 |
| 6.4 - L'impact sur le niveau de service | 43 |
| 6.5 - Évaluation du niveau de conséquences | 44 |
| Chapitre 7 - Étape 6 : Évaluation du niveau de risque | 45 |
| 7.1 - Évaluation du niveau global de chaque aléa | 45 |
| 7.2 - Évaluation du niveau global de chaque vulnérabilité | 46 |
| 7.3 - Évaluation du niveau de criticité | 46 |
| 7.4 - Évaluation du niveau de conséquences | 48 |
| 7.5 - Évaluation du niveau du risque | 48 |
| Chapitre 8 - Éléments de traitement des risques | 49 |
| 8.1 - Sélection des risques | 49 |
| 8.2 - Traitement du risque | 52 |

| | |
|--|-----------|
| Annexes | 56 |
| Annexe 1 - Autres méthodes de gestion des ouvrages pour la maîtrise du risque | 56 |
| Annexe 2 - Les matériaux constitutifs | 56 |
| Annexe 3 - Les différentes sollicitations pour les murs de soutènement en béton armé sur semelle | 57 |
| Annexe 4 - Les bassins versants | 59 |
| Annexe 5 - Fiche d'évaluation du niveau de risque | 60 |
| Notations et symboles utilisés | 61 |
| Bibliographie | 62 |
| Glossaire | 64 |



Avant-propos

L'objet de ce guide est de présenter une méthodologie d'Analyse des risques appliquée aux murs de soutènement en béton armé encastrés sur une semelle.

La gestion des ouvrages de soutènement de ce type a mis en évidence que la surveillance seule des désordres visibles ne permet pas toujours de détecter certaines pathologies qui les affectent, mettant en cause leur solidité et leur stabilité. En effet, leur rupture peut être soudaine, et surtout sans signes avant-coureurs alarmants, résultant par exemple d'une corrosion importante des aciers de la partie de l'ouvrage côté remblai, la plus souvent localisée au niveau de la jonction voile/semelle.

Au service des gestionnaires, cette analyse des risques complète leur connaissance du patrimoine et de son état par une caractérisation méthodique de l'éventualité d'une ruine pour chacun des ouvrages et des conséquences qui en résulteraient. Cette information a vocation à être exploitée, en particulier, pour mieux identifier les ouvrages les plus préoccupants, établir et hiérarchiser une planification des actions de surveillance et d'entretien plus efficaces.

Cette démarche d'analyse des risques est établie selon la méthode générale de maîtrise des risques développée pour les ouvrages d'art et décrite dans le guide du Sétra [1] et appliquée aux familles d'ouvrages dites sensibles (terre armée, VIPP ...) ou à des ouvrages soumis à un risque spécifique (séisme, affouillement). Elle a déjà été appliquée à différents ouvrages d'art, donnant lieu à la parution de plusieurs guides (VIPP [2], terre armée [3], buses métalliques [4], tranchées couvertes et tunnels creusés [5]) et a vocation à être régulièrement étendue à de nouvelles familles d'ouvrages (murs de soutènement en maçonnerie, pont en maçonnerie, ponts mixtes, etc.) ou de types de risques spécifiques. Ainsi, les ouvrages de soutènement en murs en béton armé encastrés sur une semelle peuvent être caractérisés comme sensibles car les défauts principaux sont masqués.

La méthodologie décrite dans ce guide concerne en particulier les murs de soutènement en béton armé encastrés sur une semelle situés sur le réseau routier national concédé de l'État, et s'appuie d'ailleurs sur les méthodologies et instructions en vigueur pour les ouvrages d'art de l'État, mais peut être applicable aux autres maîtres d'ouvrages comme les collectivités territoriales, les exploitants autoroutiers...

Dans ce guide, tous les scénarios de ruine seront traités (causes géotechniques ou structurales), en dehors du phénomène de grand glissement.

Dans le cas où certains murs de soutènement ont pu être répertoriés à tort comme des murs en béton armé, nous considérons que cette analyse des risques peut être utilisée car elle reste sécuritaire vis-à-vis de ces autres types d'ouvrage.

Chapitre 1

Présentation de la méthodologie de l'analyse des risques simplifiée

1.1 - L'objectif de l'analyse des risques

L'analyse des risques, telle que traitée selon la méthodologie du Sétra [1], aide à la gestion des ouvrages du patrimoine en évaluant les composantes du risque, que sont les aléas, la vulnérabilité de la structure à ces derniers, les conséquences d'une défaillance et en déterminant un niveau de risque par rapport à une défaillance envisageable. La méthode simplifiée dont il est question dans ce guide permet de déterminer le niveau de risque maximal avec une fiabilité suffisante, tout en disposant d'une mise en œuvre aisée et financièrement supportable (examen visuel, dont les visites **IQOA** et la connaissance des processus à l'origine des pathologies). Bien évidemment, elle ne s'oppose pas aux dispositions réglementaires pour l'État découlant de l'**ITSEOA** Fascicule 0 (actions de surveillance et d'évaluation de l'état) [6] et constitue un outil supplémentaire pour l'aide à la décision des gestionnaires de patrimoine d'ouvrages d'art.

IQOA (Image **Q**ualité des **O**uvrages d'**A**rt) et **ITSEOA** (Instruction Technique pour la **S**urveillance et l'**E**ntretien des **O**uvrages d'**A**rt)

L'**IQOA** est un outil s'inscrivant dans le processus d'évaluation périodique de l'état des ouvrages. Elle est intégrée dans l'**ITSEOA** qui prévoit diverses modalités de surveillance des ouvrages. Cette méthode permet d'inventorier, de classer et d'évaluer l'état apparent des différentes parties d'un ouvrage et d'attribuer une classe d'état ne prenant en compte que les aspects techniques (défauts, désordres affectant éventuellement l'ouvrage). L'IQOA s'appuie sur des procès-verbaux types où sont consignés les résultats de la visite d'un ouvrage, dont les défauts constatés selon des catalogues de désordres [7] et [8].

Pour la méthode IQOA, on désigne les murs en béton armé encastés sur semelle par « **mur de type 6** ».



État du mur en juin 2010



État du mur en mars 2011

Figure 1 : Évolution de la dégradation d'un mur suite à un glissement de terrain amont (Mur de Maison Rouge - 42) [source : Cerema]



La finalité de cette méthodologie n'est pas de fournir des informations sur l'état apparent du mur (ce qui reste l'objectif de l'IQOA ou des méthodes similaires) mais sur les risques présents sur l'ouvrage en service et sur la sécurité des usagers de la route (Figure 1). Ainsi, il est possible :

- qu'un **ouvrage présentant des désordres importants** ne soit pas systématiquement classé en risque fort, et réciproquement ;
- qu'un **ouvrage classé en risque faible** ne soit pas nécessairement en bon état apparent (notamment suivant la méthodologie IQOA).

Ce document est constitué de 8 chapitres correspondant aux différentes étapes de la maîtrise des risques selon la méthodologie du Sétra [1] et détaillé dans le chapitre 2, et qui comprend également la définition de l'analyse des risques (*étape 1 de l'analyse des risques*). Le chapitre 3 (*étape 2*) définit le système, c'est-à-dire l'ouvrage et son environnement. Les chapitres 4 à 6 (*étapes 3.1 à 3.3* relatifs à l'analyse dite simplifiée), couvrent successivement l'identification des aléas, l'évaluation simplifiée de la vulnérabilité aux aléas et l'importance des conséquences et enfin l'évaluation du niveau de risque (chapitre 7 et étape 4). Le chapitre 8 fournit quelques éléments de traitement du risque (étapes 5 et 6).

1.2 - Champs d'application de la démarche

La méthodologie décrite dans le présent guide est destinée aux **murs de soutènement en béton armé sur semelle** gérés par l'État, cependant ces principes pourront être repris par d'autres maîtres d'ouvrage.

Les **murs de culée** (porteurs ou non) ne sont pas pris en compte, qu'il s'agisse de murs de front ou de murs en aile ou en retour. Le gestionnaire peut cependant s'inspirer de la présente méthode d'analyse pour étudier le cas de ces ouvrages particuliers.

Les **ouvrages ayant fait l'objet de réparations** impliquant un changement dans le fonctionnement du mur (par exemple la mise en œuvre de tirants) sortent du champ d'application de la méthode.

Les **ouvrages soumis à un glissement d'ensemble** (Figure 2) sont exclus de cette analyse des risques, car ce risque est indépendant de la nature ou de l'état de l'ouvrage. Nous invitons le gestionnaire à regarder des signes de mouvements de terrain étendus au-delà de la zone d'influence (dommages au niveau des constructions existantes, moutonnements, fissures des terrains non centrées sur le mur, etc.) et de se renseigner auprès des bases de données des mouvements de terrains (internes, auprès du site du BRGM – <http://infoterre.brgm.fr/mouvements-de-terrain>, ou parfois par consultation des cartes géologiques).

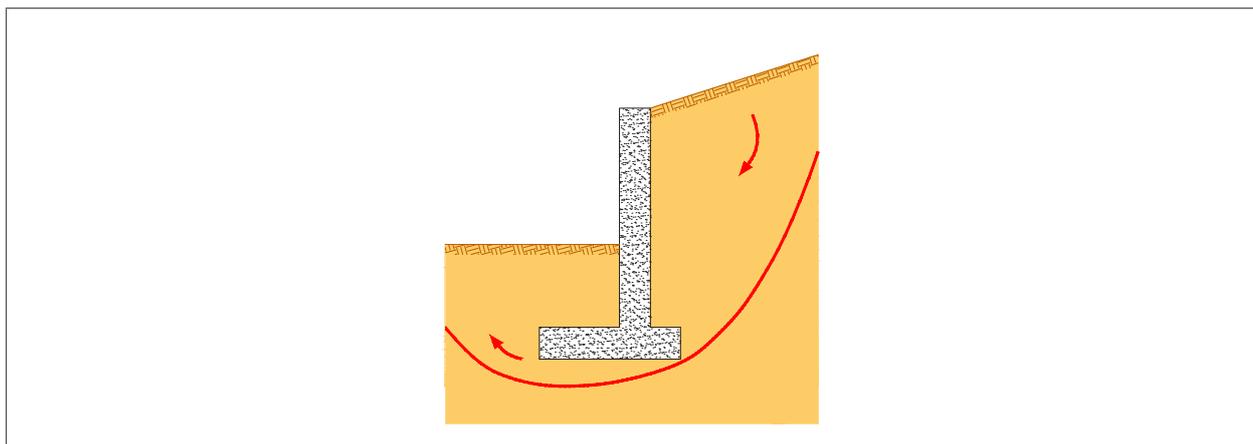


Figure 2 : Glissement d'ensemble



1.3 - Références et textes en interaction avec cette démarche

Cette démarche s'ajoute aux **actions de surveillance et d'entretien de l'ITSEOA**.

Concernant la **gestion du risque**, la méthode fait référence aux documents suivants :

- « Maîtrise des risques – Application aux ouvrages d'art », Sétra, 2013. [1]
- IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) – Murs, Murs de soutènement, Guide méthodologique, SETRA, 2005. [7]
- IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) – Murs, Murs de soutènement, Mur en béton armé encastré sur semelle, Type 6, SETRA, 2000. [8]
- ITSEOA (Instruction Technique de Surveillance et d'Entretien des Ouvrages) Fascicule 0 – Dispositions générales applicables à tous les ouvrages, Sétra, décembre 2010. [6]
- ITSEOA (Instruction Technique de Surveillance et d'Entretien des Ouvrages) Fascicule 51 – Ouvrages de soutènement, Sétra, 2010. [9]
- ITSEOA (Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art) Fascicule 2 – Généralités sur la surveillance, Sétra, Décembre. [10]
- ITSEOA (Instruction Technique de Surveillance et d'Entretien des Ouvrages) Fascicule 3 – Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde, Sétra, décembre 2010. [11]
- « Les ouvrages de soutènement – Guide de conception générale », SETRA, 1998. [12]



Chapitre 2

Étape 1 : Objectifs de l'Analyse des Risques

Cette partie présente le patrimoine d'ouvrages pris en compte, les grands principes de l'analyse des risques, les différentes composantes du risque, et les apports de celle-ci pour la gestion des murs en béton armé encastrés sur une semelle.

2.1 - Le patrimoine des murs en béton armé sur semelle

La méthodologie présentée dans ce document s'applique aux **murs en béton armé constitués d'un voile encastré sur une semelle de fondation**, ouvrages couverts par le Fascicule 51 de l'Instruction Technique de Surveillance et d'Entretien des Ouvrages (ITSEO) [9] et la méthodologie IQOA Murs de soutènement [7].

Selon la campagne IQOA de 2016, le **réseau routier national non concédé de l'État** compte 883 murs de soutènement en béton armé encastrés sur une semelle, sur une longueur estimée à près de 80 km. Ces ouvrages ont été généralement construits après 1950, et ont connu différentes formulations de bétons, dispositions d'armatures et mesures constructives de mise en œuvre. Ils sont particulièrement présents en zone montagneuse.

Les **contraintes d'exploitation** de certains itinéraires comportant ces ouvrages peuvent se révéler importantes et rendre difficile la surveillance ou l'entretien et rendre plus critiques les réparations ou les ruptures (coupure de l'axe sur une longue durée), d'autant plus qu'il apparaît souvent difficile (voire impossible) de proposer un itinéraire alternatif pendant l'intervention.

La **connaissance de ce patrimoine**, notamment ce qui concerne la conception et la réalisation, reste très limitée en raison de la difficulté ou de l'impossibilité d'accéder aux dossiers d'ouvrages¹, conduisant à des informations lacunaires sur les parties non visibles de l'ouvrage (géométrie de la semelle enterrée, positionnement, section des aciers, béton utilisé, système de drainage, etc.). De plus, l'accès aux ouvrages pour un examen visuel peut parfois se révéler difficile ou impossible sans moyens d'inspection particuliers (nacelles, etc.).

En plus d'une connaissance partielle des conditions de réalisation de l'ouvrage, l'**évolution de son état** n'est connue, selon la méthodologie IQOA, qu'à partir d'un examen visuel, ce qui ne donne pas accès directement à des informations majeures telles que le niveau de corrosion des aciers, la qualité du béton, les éventuelles infiltrations d'eau, etc. Il convient de préciser également que ces ouvrages peuvent connaître des ruptures fragiles.

Ce faible niveau d'information, quant à la conception ou à l'état du mur, donne tout son sens à une analyse des risques telle que décrite dans ce document.

¹ Les dossiers d'ouvrages ont été rendus obligatoires à partir de 1979.



2.2 - Principe de l'analyse des risques

L'analyse des risques selon la méthodologie du Sétra [1] comporte deux niveaux d'analyse (Figure 3) :

- une **analyse simplifiée** – principalement qualitative – rapide et économique car établie à partir des recensements et visites IQOA (inspections exclusivement visuelles) et d'autres données obtenues sans coût d'investigation supplémentaire. Cette analyse permet de classer les ouvrages selon 3 niveaux de risque : élevé (ou fort), moyen, faible ;
- une **analyse détaillée**, généralement optionnelle – semi-quantitative ou quantitative – réclamant des investigations complémentaires coûteuses, comme des prélèvements, des sondages, des essais, et le recours à du personnel plus qualifié. Cette analyse est requise lorsque l'analyse simplifiée aboutit à un risque élevé ou lorsque ce dernier s'est révélé difficile à évaluer qualitativement (approche sécuritaire).

Cette méthode d'aide à la décision peut permettre d'optimiser les politiques de gestion et ainsi de minimiser les coûts en demeurant sécuritaire vis-à-vis des usagers sous réserve que :

- **la base de données IQOA soit à jour** afin d'assurer son exploitabilité ;
- **l'analyse simplifiée soit renouvelée** afin de garantir la fiabilité des résultats en tenant compte de l'évolution des indicateurs.

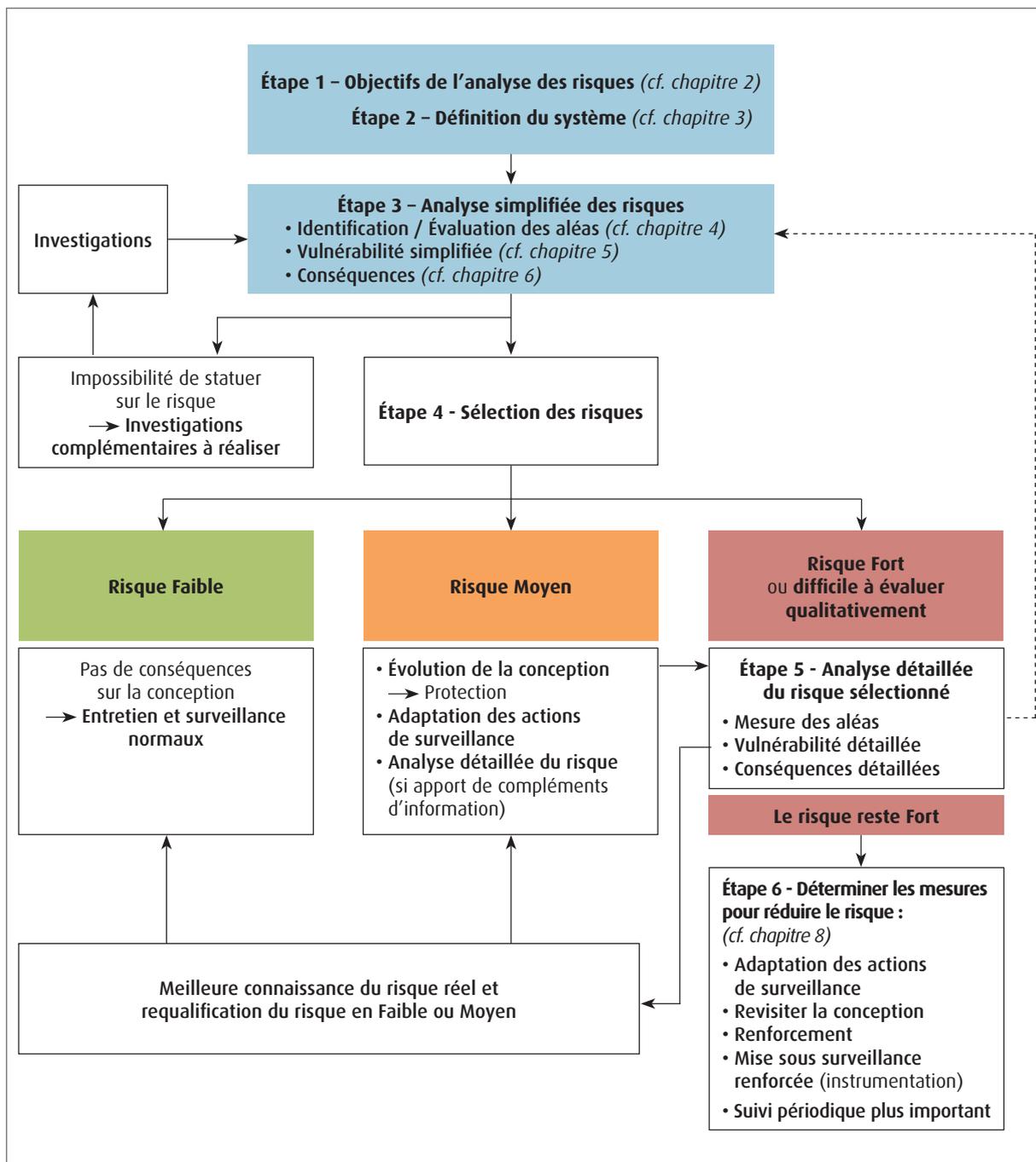


Figure 3 : Organigramme de la méthodologie générale d'analyse des risques
(La flèche en pointillé indique qu'une fois l'analyse détaillée réalisée, les informations ainsi récoltées doivent être réutilisées pour compléter les données de la prochaine analyse des risques simplifiée réalisée sur l'ouvrage concerné.)



2.3 - Les composantes du risque

Les trois composantes de l'analyse des risques à évaluer et à renseigner sont l'**aléa**, la **vulnérabilité** et la **gravité des conséquences**, appelée aussi l'enjeu. La combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité caractérise la probabilité de défaillance appelée **criticité** de la structure. Ce niveau de **risque**, permettant l'établissement d'une stratégie de surveillance et de réparation par le gestionnaire, s'obtient en croisant la criticité d'un ouvrage avec la gravité des conséquences.

2.3.1 - L'aléa

L'aléa est le **phénomène qui est à l'origine du risque**, qui peut se produire ou non au cours de la vie de l'ouvrage. Il est incertain, et est caractérisé par sa probabilité d'occurrence pendant une période de référence et par l'intensité de sa manifestation (dimension d'une fissure initiale pour un défaut interne, avancée du front de carbonatation dans le béton, etc.).

Il peut être de nature diverse :

- **interne de causes exogènes** (corrosion, fatigue...);
- **interne de causes endogènes** (matériaux défectueux, conception défaillante...);
- **externe d'origine naturelle** (séisme, mouvements de terrain...);
- **externe d'origine humaine** (incendie, surcharges exceptionnelles...).

2.3.2 - La vulnérabilité

La vulnérabilité est relative à un ou plusieurs aléas. Elle concerne l'ouvrage en question, et sa capacité, vu son état et sa conception, à y résister.

2.3.3 - La gravité des conséquences

Il s'agit de s'intéresser aux conséquences possibles d'une défaillance, en terme de **vies humaines, de coûts de réparation, de perturbations économiques et sociales** occasionnées par la perte d'exploitation, ou encore **d'atteintes à l'environnement**. Cette réflexion socio-économique doit être menée **localement et à l'échelle de l'itinéraire concerné**.

Plusieurs types de conséquences peuvent intervenir comme la perte d'aptitude au service de l'infrastructure, l'effondrement de tout ou partie de la structure et/ou la mise en danger des usagers.

La **gravité des conséquences, ou encore l'enjeu de l'ouvrage**, dépend également de critères socio-économiques fixés ou validés par le gestionnaire, comme le trafic routier à proximité de l'ouvrage, et notamment le pourcentage de poids lourds, la possibilité de mettre en place des itinéraires alternatifs (donc directement associé à l'impact socio-économique), ou encore la taille de l'ouvrage et le coût des travaux de remise en service.

2.3.4 - Combinaison des facteurs du risque, les scénarios

La combinaison des aléas, de la vulnérabilité et de la gravité des conséquences, selon un scénario prédéfini (exemple de la Figure 4), donne alors un niveau de risque. Les gestionnaires disposent de ce dernier pour chaque scénario et d'un niveau global pour leur ouvrage.

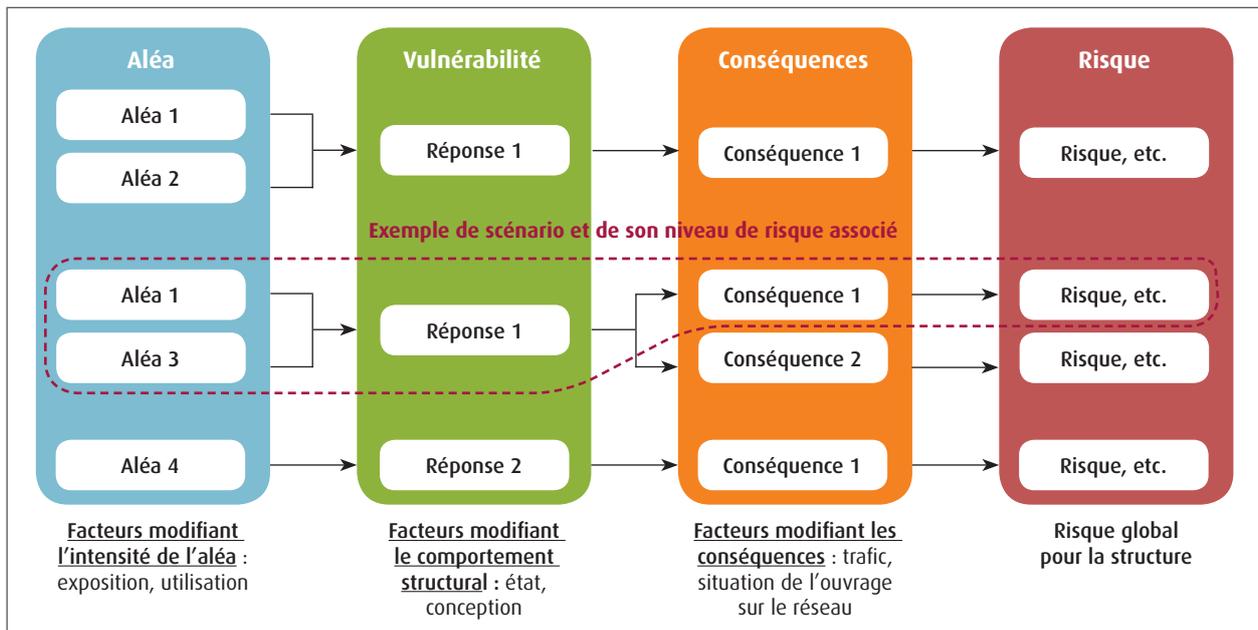


Figure 4 : Exemples de scénarios et détermination du niveau de risque (inspiré de [1])

2.4 - La gestion du risque

L'analyse des risques, par la classification des ouvrages selon leur niveau de risque, permet ainsi aux gestionnaires d'évaluer pour chaque ouvrage son aptitude au service en fonction de l'évolution des besoins et de l'environnement et d'affecter de manière ordonnée les moyens financiers et humains en addition des outils classiques de gestion de patrimoine.

Afin de diminuer le niveau de risque sur un ouvrage, le gestionnaire peut :

- **réduire les aléas** ;
- **diminuer la vulnérabilité** de l'ouvrage ;
- **réduire les conséquences**, en proposant une déviation par exemple.

Ainsi l'analyse des risques permet de **mieux cibler les travaux d'entretien préventif (ou d'actions de surveillance)** adaptés pour éviter (ou anticiper) des défaillances futures, limitant ainsi l'occurrence du risque fort. Elle permet également de mettre en place des actions de mise en sécurité (mesure de sauvegarde, voir fascicule 3 de l'ITSEOA [11]) et de programmer des actions de réparation/confortement le cas échéant.

L'analyse détaillée, particulièrement adaptée dans le cas de risque difficilement évaluable par l'analyse simplifiée, sort du cadre de ce guide. Le lecteur pourra trouver sa présentation dans le guide méthodologique du Sétra [1].

Chapitre 3

Étape 2 : Définition du système de l'Analyse des Risques

3.1 - Description – Conception

Terminologie

Les murs en béton armé encastrés sur une semelle, appelés aussi murs cantilever, murs en « T renversé » ou « L », ou encore murs « lestés » sont très couramment employés [12]. Ils sont constitués (Figure 5) :

- d'un **voile** en béton armé ;
- d'une **semelle**, également en béton armé, généralement horizontale, comprenant :
 - un **patin** à l'avant du voile (*Note*),
 - un **talon** à l'arrière (*Note*),
 - parfois une **bèche** afin d'améliorer la stabilité au glissement.

Note : Dans certains cas, les limitations d'emprise, généralement imposées par la présence de constructions ou de voies de circulation, peuvent conduire à supprimer soit le patin, soit le talon, on parle alors de **mur en « L »**.

Conception

Dans des conditions de sol particulières, il est possible de rencontrer des ouvrages présentant :

- un **massif en gros béton ou de béton immergé sous la semelle**, dans le cas de niveaux de fondation assez profonds ou en site aquatique par exemple ;
- des **fondations sur pieux ou sur barrettes**.

Certaines solutions, comme les murs sur pieux ou les **variantes de conception** présentées sur la Figure 6, ne sont quasiment plus construites de nos jours.

Ces murs peuvent être **coulés en place** ou faire appel à la **préfabrication totale ou partielle** (voile ou semelle).

Géométrie courante

La **géométrie courante** de ces ouvrages est présentée sur la Figure 7.

Pour des raisons économiques ou d'emprise, leur **hauteur** excède rarement 6 à 8 m.

La **hauteur de fiche** (Figure 8), c'est-à-dire l'encastrement par rapport au terrain, après construction, à l'aval immédiat du parement, est conditionnée par la règle qui impose que le sol de fondation d'un mur soit à l'abri du gel², mais peut aussi être justifiée par la nécessité de protéger un ouvrage contre une éventuelle désorganisation de son assise (érosion engendrée par les intempéries).

² La profondeur « hors gel » a changé avec l'évolution des normes. Ces profondeurs sont actuellement données dans l'annexe O de la norme NF P94-261 et dépendent de la présence ou non de sols gélifs, de l'exposition aux températures négatives fonction de la région, de l'exposition d'une construction par rapport au relief, de dispositions constructives incluant un éventuel isolant thermique.

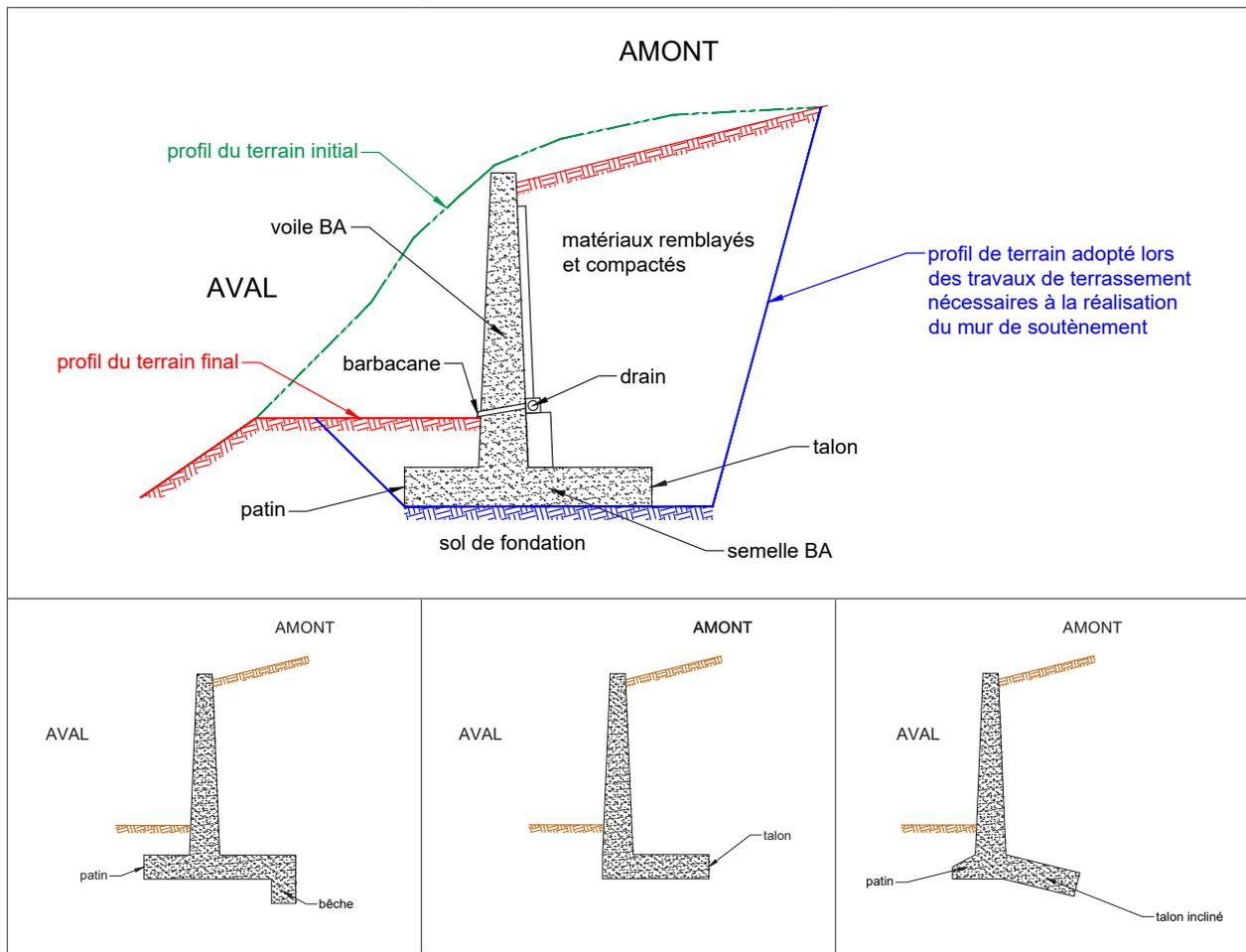


Figure 5 : Coupe type d'un mur en béton armé (BA) encastré sur une semelle en « T » renversé ou en « L »

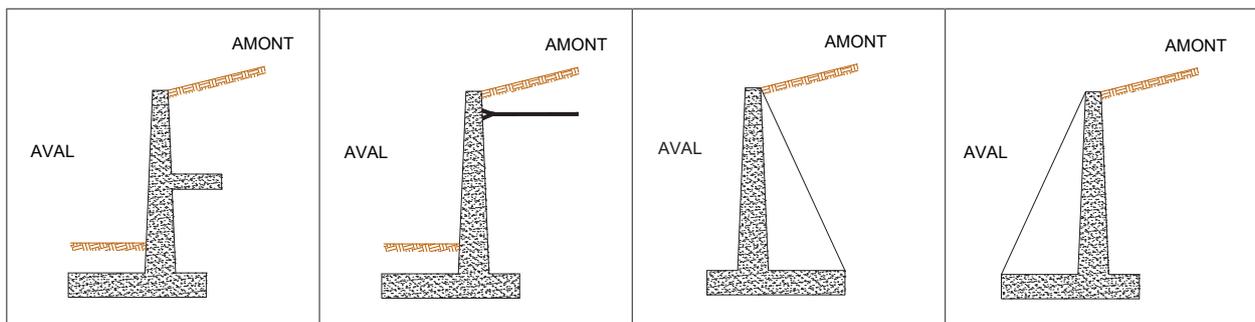


Figure 6 : Variantes de conception de murs en « T » avec contreforts transversaux, chaise de lestage ou tirant³

³ Les murs « cantilever » avec tirant ne sont pas traités dans cette analyse des risques car la présence du tirant modifie de manière majeure le comportement de l'ouvrage.

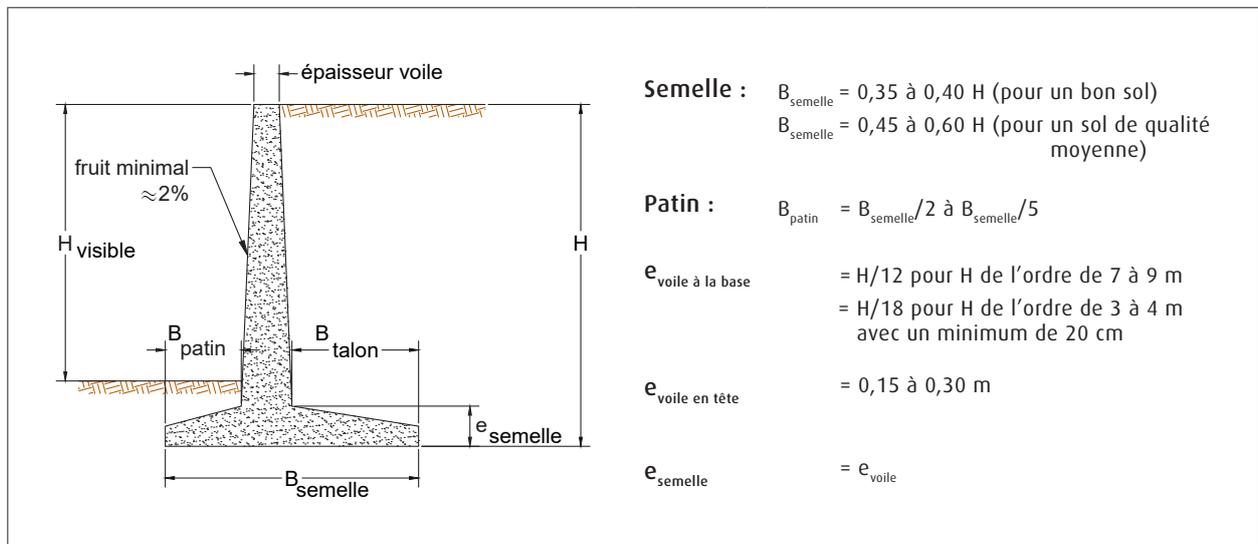


Figure 7 : Géométrie courante d'un mur en béton armé encastré sur une semelle (d'après [12])

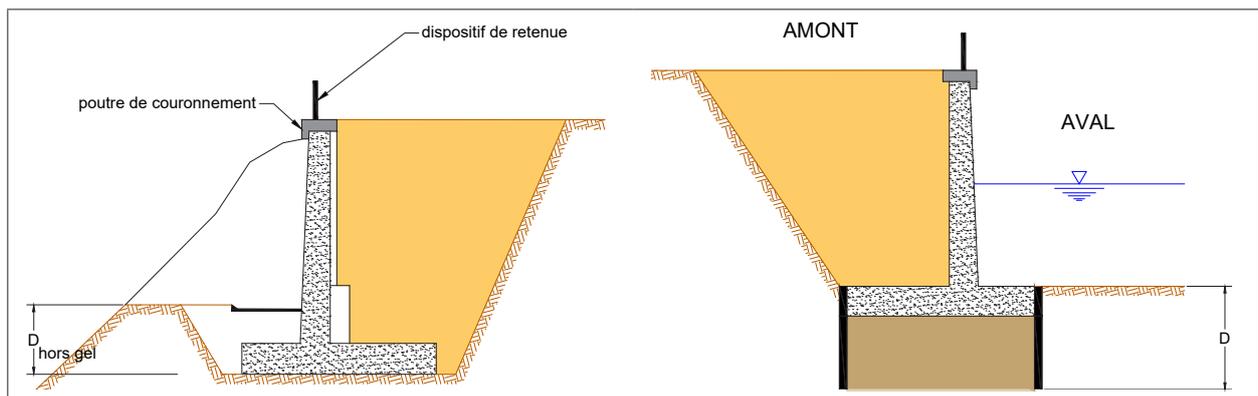


Figure 8 : La hauteur de fiche (d'après [12])

Conditions de sol

Les murs de soutènement en béton armé sur semelle sont fondés sur des sols de qualités moyennes à bonnes (faibles tassements pressentis de l'ordre de quelques centimètres au plus) [12].

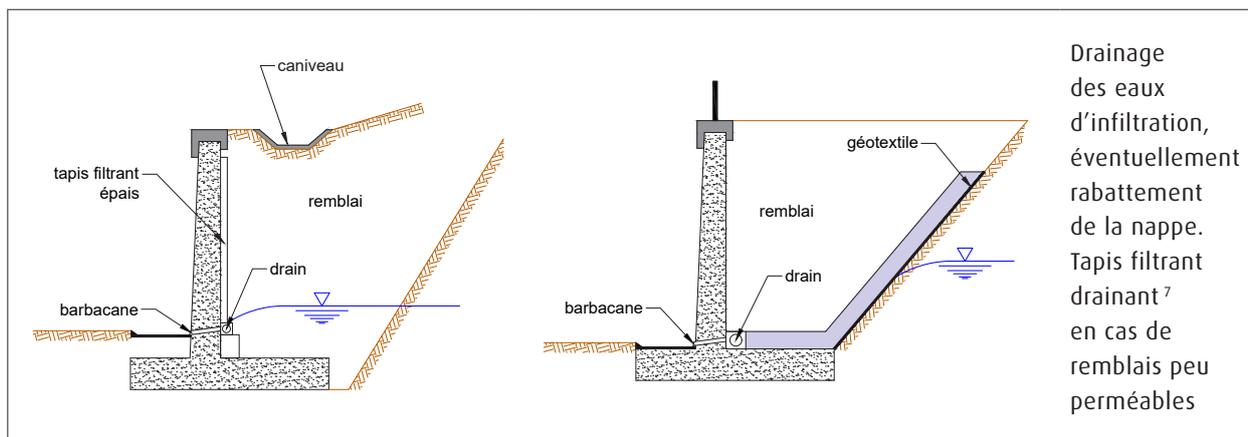
Drainage des murs

Les murs de soutènement, s'ils n'ont pas pour vocation de maintenir l'eau en amont, sont pourvus d'un **dispositif de drainage**⁴ disposé à l'arrière du voile associé à un dispositif d'évacuation (généralement des barbacanes⁵) (Figure 9), afin de limiter voire d'annuler les **sollicitations hydrostatiques** sur l'ouvrage qui peuvent être pénalisantes et les phénomènes de **dégradation de l'ouvrage** par suintement d'eau (joints mal traités, fissures, reprises de bétonnage). Il est aussi possible de prévoir un dispositif destiné à limiter la quantité d'eau pouvant s'infiltrer derrière l'ouvrage⁶.

⁴ Il faut s'assurer que le dispositif de drainage fonctionne correctement donc prévoir un drain de débit suffisant muni de regards permettant leur nettoyage périodique, et entretenir les barbacanes [17].

⁵ Qui doivent être largement dimensionnées (tuyaux de 10-15 cm de diamètre intérieur tous les 1.5-2 m) [17].

⁶ En amont, en réalisant des revêtements aussi peu perméables que possible avec une redirection des eaux par caniveau par exemple, et en aval, un revêtement plutôt imperméable et une pente du terrain.



Drainage des eaux d'infiltration, éventuellement rabattement de la nappe. Tapis filtrant drainant⁷ en cas de remblais peu perméables

Figure 9 : Exemples de dispositif de drainage des ouvrages (d'après [12])

3.2 - Mode de fonctionnement et de rupture des murs de type 6

Dans ce guide, on s'intéresse aux risques de rupture des murs en béton armé sur semelle que l'on peut classer en deux catégories :

- rupture par perte de « **Stabilité Interne** » (Figure 10c) en raison :
 - d'une « **Dégradation des matériaux constitutifs** » qui peut être occasionnée par l'une ou par plusieurs causes suivantes :
 - > une *défaillance des matériaux de construction*, c'est-à-dire la corrosion des aciers ou la rupture du béton armé,
 - > un *défaut de conception ou de réalisation*, comme un enrobage des armatures insuffisant ou une épaisseur de voile insuffisante.
 - d'une « **Augmentation des sollicitations sur le mur** », suite à une poussée supplémentaire sur le mur due à l'eau bloquée en raison de barbacanes bouchées ou à un apport de charges en tête de mur (stockage de matériaux, etc.)
- rupture par perte de « **Stabilité Externe** » par glissement (Figure 10b), par **poinçonnement** ou par **renversement** (Figure 10a), qui peut être due à :
 - une « **Augmentation des sollicitations sur le mur** »,
 - une « **Résistance en pied défaillante** », pouvant résulter de travaux improvisés ou mal étudiés, comme une ouverture de tranchée en pied, conduisant à une réduction de butée, ou en tête, facilitant des infiltrations d'eau importantes.

Nous rappelons que la **stabilité au « glissement d'ensemble »** (Figure 2) englobant l'ouvrage de soutènement, quel que soit son type, n'est pas traitée par cette analyse des risques.

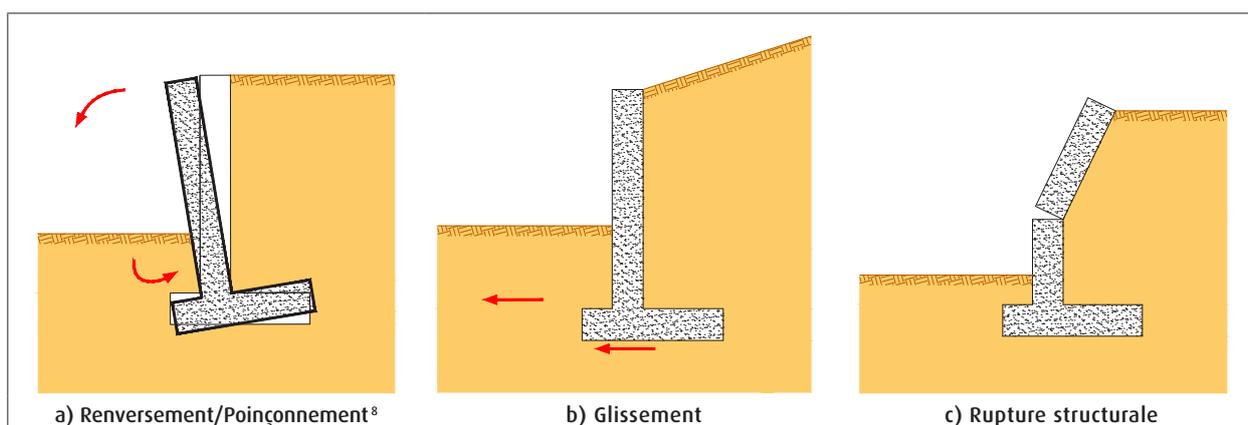


Figure 10 : Stabilité du mur

⁷ Dans le cas de remblais peu perméables, il faudra prévoir un tapis filtrant épais (minimum 30 cm) de matériau perméable évacuant les eaux, ou alors l'emploi d'un géotextile [17]. Il faudra s'intéresser à leur vitesse de colmatage.

⁸ Le basculement se fait généralement vers l'extérieur, mais il peut se produire vers l'intérieur en cas de surcharges trop importantes.



3.3 - Notions sur les causes et la nature des désordres

Cette analyse des risques concerne la ruine totale ou partielle de l'ouvrage (Figure 10) ou toute autre défaillance, comme la mise en danger des usagers, la perte d'aptitude au service de l'infrastructure ou l'impact des réparations éventuelles sur le coût total du projet sur sa durée de vie (§ 2.3.3 « la gravité des conséquences »).

Deux causes de ruine du mur de soutènement

On peut séparer les causes en deux catégories :

- une **insuffisance ou une réduction de la résistance interne** du voile en béton armé encastré sur semelle inhérentes aux caractéristiques initiales de cette structure et au vieillissement ou à l'endommagement du béton armé.
- un **déséquilibre des forces en présence** (§ 3.3.2 et Annexe A3) conduisant selon les cas :
 - à la rupture interne de l'ouvrage (par excès de flexion),
 - au mouvement de l'ouvrage (poinçonnement, renversement, glissement, tassement différentiel).

La résistance structurale du voile et de sa liaison avec la semelle

La résistance structurale du voile et de sa liaison avec la semelle étant assurée par le béton d'une part et par les armatures d'autre part, la défaillance de la résistance interne de la structure peut avoir pour origine :

- le **béton**, présentant une résistance inférieure à celle escomptée, en raison :
 - d'une anomalie de conception ou d'exécution (§ 3.1 et 5.1) : mauvaise formulation ou fabrication, mauvaise mise en œuvre (serrage insuffisant, notamment dans le nœud d'encastrement où la densité ferrailage est plus importante).
 - d'un affaiblissement mécanique du béton dû à un processus de dégradation non prévu (§ 3.3.1) - réactions de gonflement interne (alcali-réaction, réaction sulfatique), attaques chimiques, gel, forte humidité, etc.,
 - d'une reprise de bétonnage non soignée, particulièrement à la liaison entre le voile et la semelle.
- et/ou les **armatures**, en raison :
 - d'une anomalie de dimensionnement/conception/exécution ou des dispositions constructives adoptées : section d'acier insuffisante, mauvais positionnement de la nappe d'armature, etc.
 - d'un affaiblissement des armatures par corrosion pouvant conduire à une insuffisance de résistance à la flexion. La corrosion est facilitée par un béton poreux ou par la présence de fissurations ou pire, d'éclatement du béton ou encore par un enrobage insuffisant permettant l'introduction d'agents agressifs jusqu'au contact des armatures. Les pathologies propres au béton armé sont présentées dans la partie 3.3.1.

3.3.1 - Attaques du béton armé

Les agents agressifs pour le matériau béton armé

Le matériau béton armé peut-être dégradé par **plusieurs agents agressifs**⁹ qui affaiblissent ses propriétés mécaniques et sa durabilité, pouvant conduire à sa dégradation, et qui sont :

- le **gel et les sels de déverglaçage**¹⁰ : les désordres dus au gel, présentés ci-dessous, sont d'autant plus importants que le degré de saturation en eau du béton est élevé. Les cycles de gel/dégel (nombre, amplitude, vitesse de refroidissement, etc.) ainsi que la présence de sels de déverglaçage sont aussi des paramètres impactants. Ces modes de dégradation, font appel à des mécanismes différents, n'apparaissant pas nécessairement en même temps, ni sur les mêmes bétons [13] :
 - le gonflement et la microfissuration dans la masse du béton occasionnés par le gel interne et conduisant à une fragmentation de la pâte cimentaire,
 - l'écaillage en surface du béton déclenché par la présence de sel de déverglaçage. La détérioration peut atteindre quelques centimètres, et conduire à terme à une diminution de l'épaisseur d'enrobage.

⁹ La norme européenne (NF EN 206) a défini différentes classes d'exposition en fonction du type d'agressions : la carbonatation (XC), les chlorures (XD/XS : Deicing salts/Seawater), le gel/dégel (XF :Frost) et les attaques chimiques (XA :Agressive environment).

¹⁰ Pour en savoir plus, se référer au Guide technique du LCPC sur les « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » [20].



- **les attaques chimiques**, qui comprennent :

- les **attaques externes**, telles que les réactions sulfatiques externes, et les attaques acides : Ces attaques chimiques peuvent conduire à l'augmentation de la porosité du béton, du pH et à terme, à une décohésion/altération du béton en parement (réduction et endommagement de l'épaisseur d'enrobage). Les sulfates et acides peuvent provenir des eaux (de mer, usées, souterraines), du sol¹¹ (gypse, anhydrite, pyrites¹², évaporites, vases, tourbes¹³) ou de la pollution domestique (eaux usées...), industrielle ou agricole¹⁴.
- les **attaques internes** produisant un gonflement interne du béton, se traduisant par l'apparition d'un maillage de fissurations pouvant atteindre une ouverture millimétrique :
 - > les **réactions sulfatiques internes (RSI)**, conduisant à la formation différée d'étringite dans le matériau cimentaire, plusieurs mois voire plusieurs années après la prise du ciment et sans apport de sulfate extérieur [14]. Ce phénomène est peu probable dans le cas des murs sur semelle coulés en place¹⁵, mais ne peut être exclu en cas de préfabrication,
 - > les **réactions alcali-silice (RAS)**, encore appelées parfois alcali-réaction) : il s'agit d'une réaction chimique, à évolution lente entre certains granulats dits « potentiellement réactifs »¹⁶ et des alcalins solubles du béton produisant un gel de silicate¹⁷, si ces deux éléments sont en quantité suffisante et que le matériau dispose de suffisamment d'humidité.

→ Bien qu'il soit peu probable qu'ils conduisent à une instabilité par insuffisance de résistance interne, ces phénomènes délétères peuvent néanmoins favoriser la corrosion des armatures côté remblai en altérant la protection assurée par le béton d'enrobage.

Origine de la corrosion des armatures

Le phénomène de corrosion concerne à la fois les **armatures verticales placées du côté remblai**, qui vont assurer la résistance structurale du voile vis-à-vis de la flexion engendrée par la poussée des terres, et celles assurant la **liaison entre le voile et la semelle**. Le processus de corrosion [15] est due à deux phénomènes :

- la **carbonatation** du béton d'enrobage par adsorption du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère. La pénétration du dioxyde de carbone (CO₂) dans le béton conduit à une diminution du pH. La corrosion peut s'amorcer lorsque le pH du béton enrobant l'armature descend à une valeur de l'ordre de 9-10. Ce processus de pénétration est notamment sensible au taux de saturation en eau du béton d'enrobage et donc à l'humidité ambiante ;
- la **pénétration**, principalement, des **ions chlorures (Cl⁻)**, jusqu'au niveau des armatures ; lorsque la teneur en chlorures atteint un certain seuil au niveau des armatures, la corrosion est susceptible de s'amorcer.

Conséquences de la corrosion des armatures

La corrosion des armatures peut :

- conduire au **gonflement** de ces derniers (dans le cas de foisonnement des produits de corrosion) entraînant une poussée sur le béton d'enrobage pouvant provoquer de la fissuration (accompagnée ou non de trace de rouille), des éclatements localisés et progressivement la mise à nu des armatures ;
- entraîner à terme la **réduction des sections efficaces d'acier et de l'adhérence au béton**.

Les facteurs favorisant le développement de la corrosion

Les facteurs favorisant le développement de la corrosion des armatures dans le béton sont principalement :

- l'**agressivité de l'environnement** dans lequel se trouve le béton : le niveau de cette agressivité est fonction de la teneur en agents agressifs (chlorures, dioxyde de carbone) du milieu en contact avec le béton (béton en contact avec un remblai pollué par les sels de déverglaçage ou en contact avec l'eau de mer). L'alternance d'humidification et de séchage du béton peut favoriser la pénétration de ces agents agressifs (cas d'un béton en zone de marnage par exemple) ;

11 Présence de sulfate d'ammonium ((NH₄)₂SO₄), de sulfate de calcium (CaSO₄) et de sulfates métalliques solubles (FeSO₄, ...).

12 Pouvant être contenues dans les sols alluviaux ou argileux.

13 Proviennent de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes).

14 L'activité agricole peut générer des acides organiques (lactique, acétique, ...).

15 Les phénomènes de RSI sont favorisés par des températures élevées, ayant peu de chance de se produire dans le cas de structures peu massives.

16 Certaines formes de silice.

17 Oxyde de sodium Na₂O et oxyde de potassium K₂O.



- des **épaisseurs d'enrobages**¹⁸ **insuffisantes** (aux regards des conditions d'exposition du béton) : il peut s'agir d'erreurs de conception ou d'exécution (défaut de calage des cages d'armatures par exemple) ;
- une **qualité de béton insuffisante** (aux regards des conditions d'exposition du béton) - il peut s'agir au choix :
 - d'une **formulation de béton inadaptée** (dosage en liant trop faible, rapport « E/C¹⁹ » trop important par exemple),
 - de difficultés ou d'insuffisance dans **l'exécution** (défaut ou absence de cure par exemple, reprise de bétonnage de mauvaise qualité),
 - de difficultés ou d'insuffisance dans la **mise en œuvre du béton frais** (mauvais remplissage dû à un défaut de vibration et/ou un ferrailage trop dense).
- **l'état du béton** : les fissures de retrait (retrait gêné à la base des voiles de mur par exemple), d'effort (fissures de flexion côté remblai notamment), la fissuration due à des réactions de gonflement interne et les altérations diverses (gel, écaillage, etc.) favorisent la pénétration des agents agressifs (chlorures, dioxyde de carbone) et impactent donc la durabilité du béton armé vis-à-vis de la corrosion des armatures. L'impact est d'autant plus important que la fissuration est dense et ouverte.

Influence de l'humidité du béton

Selon le phénomène en jeu à l'origine de la corrosion (carbonatation ou chlorures), le **taux de saturation en eau** dans le béton et les **échanges avec le milieu extérieur** (cycles d'humidification/séchage), jouent le rôle de moteur ou de frein vis-à-vis du processus de corrosion. Les conditions d'humidité dans lesquelles se trouve la structure a donc une influence sur le processus de corrosion. Dans la pratique, il est cependant difficile (voire impossible) d'apprécier de manière simple le degré d'humidité au niveau de la paroi côté remblai. En effet, de nombreuses considérations interviennent : circulation d'eau dans le remblai, climat de la zone considérée (océanique, continental) et contexte local (proximité d'un cours d'eau ou d'une étendue d'eau, exposition, couverture forestière, etc.). On ne s'intéresse donc dans cette analyse des risques, par défaut et simplification, qu'aux **conditions d'humidité à l'aval de l'ouvrage**.

3.3.2 - Déséquilibre des forces en présence

Un déséquilibre des forces en présence (Annexe A3) peut conduire selon les cas :

- à la **rupture interne de l'ouvrage** (c'est-à-dire du voile par excès de flexion ou rupture au niveau de la liaison voile-semelle) ;
- au **mouvement de l'ouvrage** (poinçonnement, renversement, glissement, tassement différentiel).

Le déséquilibre des forces peut être dû à une mauvaise estimation de la poussée ou à une augmentation des charges d'exploitation et/ou des charges supplémentaires (constructions, stockages, etc.) de l'ouvrage (§ 4.2).²⁰

Dans ces deux cas, il s'agit d'un chargement trop important au regard du dimensionnement initial du mur. De ce fait, sont concernés tous les facteurs :

- conduisant à une **augmentation des charges d'exploitation et/ou une surcharge nouvelle** de l'ouvrage :
 - **une surcharge extérieure** : réalisation de constructions, disposition d'une charge ou d'un remblai en amont du mur, élargissement des voies, augmentation du trafic, etc.,
 - **un mauvais drainage** conduisant à une poussée hydrostatique non prise en compte dans le dimensionnement (Figure 11) pouvant être occasionné par :
 - > un **colmatage** (Figure 12) dû à une mauvaise conception des systèmes de drainage et d'évacuation des eaux, à un mauvais choix de matériaux de remblai, ou à un mauvais entretien,
 - > **l'inexistence du système de drainage**.
 - **une inondation à l'amont**,
 - **une augmentation de la hauteur du mur**,
 - **un accident** : détérioration du système de drainage par les engins de chantier, etc.
- ayant pour origine une **méconnaissance de l'environnement** :
 - de la **nature géologique et des caractéristiques géotechniques**,
 - de la **présence de sols gonflants** (argiles, pélites²¹, schistes cartons²², etc.), le plus souvent dans le cas d'ouvrages en déblais.

¹⁸ L'enrobage est un des paramètres clé de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures. Il joue le rôle de couche protectrice vis-à-vis de la pénétration des agents agressifs. Selon les règlements en vigueur, on considère un minimum de 3 cm pour une exposition courante voire une protection complémentaire et une épaisseur jusqu'à 5 cm en cas d'exposition aux embruns ou aux brouillards marins ou aux atmosphères très agressives (industries).

¹⁹ E/C : rapport entre le poids d'eau de gâchage et le poids de ciment d'un béton.

²⁰ On rappelle que cet équilibre des forces peut être aussi compromis par la mise en œuvre de travaux improvisés ou mal étudiés, comme cités précédemment (§ 3.2).



Les désordres dans la zone d'influence de l'ouvrage accompagnant ce type d'instabilité sont typiquement des fissures avec décalage²³ (Figures 18 et 19), des affaissements, des tassements, des bourrelets de terrain sur un linéaire appréciable (défauts étendus).

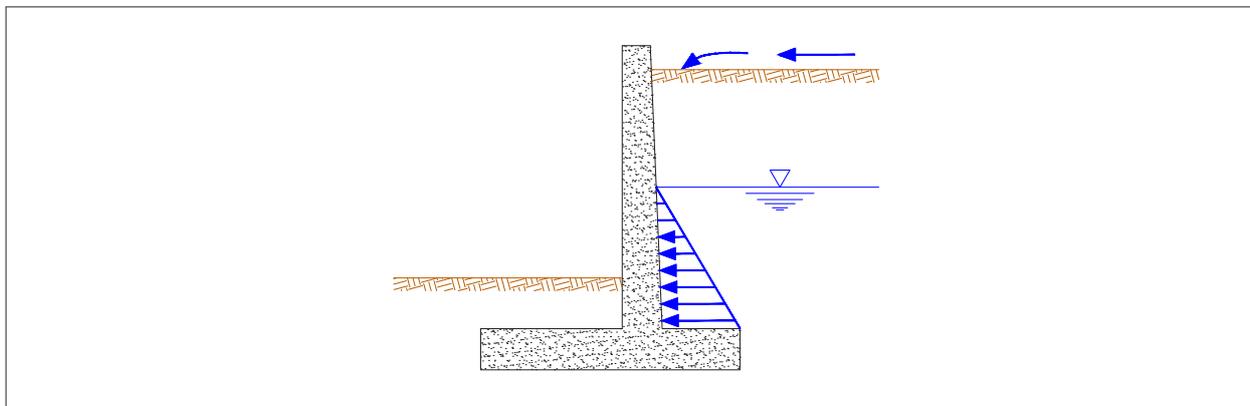


Figure 11 : Impact de l'absence (ou de la déficience) de système d'évacuation et/ou drainage des eaux (les flèches bleues représente la poussée de l'eau sur l'ouvrage)



Figure 12 : Exemples de colmatage de barbacane

21 Pélites : Roche sédimentaire à grain très fin. Généralement, les pélites contiennent de 30 à 75 % de minéraux argileux, du quartz, des micas relativement nombreux, de rares feldspaths, de fins débris de tests (enveloppe rigide du corps de certains invertébrés) ; certaines pélites sont calcaires. On trouve les pélites en abondance dans les formations détritiques. [18]

22 Schistes carton : Sédiment surtout marno-calcaire, d'aspect feuilleté et de consistance cartonneuse, dont la couleur brune ou grise est due à des imprégnations bitumineuses.

23 Déplacement de part et d'autre de la fissure créant un écart.

Chapitre 4

Étape 3.1 : Identification des aléas

Ce chapitre, première partie de l'analyse simplifiée des risques, présente les aléas potentiels que peuvent subir les murs en béton armé sur semelle. Les phénomènes inhérents à ces derniers sont présentés dans le chapitre 3.

Certains critères reposent sur les notes IQOA (§ 1.1) et sont donc associés à des numéros de défauts dont le titre est fourni et dont des schémas illustratifs se trouvent dans « IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) – Murs, Murs de soutènement, Mur en béton armé encastré sur semelle, Type 6 » [8]²⁴.

Les aléas ou facteurs non retenus, mais qui peuvent être étudiés dans le cadre d'une analyse détaillée lorsque les circonstances le requièrent, sont (liste non exhaustive) :

- le « **gel/dégel** » : Le gel affecte plus spécifiquement les ouvrages horizontaux, de ce fait son impact sur les murs de soutènement a été considéré comme mineur. Néanmoins il entre en considération indirectement par le facteur « Salage » (§ 4.1.1) ;
- les « **courants vagabonds** » ;
- la « **chute de bloc** », en considérant qu'un éventuel endommagement du mur entraînerait des réparations ;
- le « **séisme** », les sollicitations sismiques n'ont pas été retenues dans ces aléas, en raison du caractère non local et donc non systématiquement discriminant de ces sollicitations. Précisons que la prise en compte de ces sollicitations dans le dimensionnement des murs est récente. De ce fait, les ouvrages anciens présentent une plus grande sensibilité à ce type d'aléa. L'âge de l'ouvrage constitue donc une vulnérabilité et est considéré comme telle plus loin dans l'analyse.

Trois aléas ont été retenus :

- l'aléa « **Dégradation des matériaux constitutifs** » (§ 4.1) ;
- l'aléa « **Augmentation des sollicitations du mur** » (§ 4.2) ;
- l'aléa « **Résistance en pied défaillante** » (§ 4.3).

Chaque aléa est décliné en facteurs et est évalué au moyen de critères en additionnant les « points » donnés pour chacun d'eux. On invite le gestionnaire à faire une analyse selon deux procédures :

- une « **Procédure rapide** », à partir des éléments en sa possession ;
- une « **Procédure plus longue** », si nécessaire (§ 7.1), nécessitant par exemple, la recherche et la consultation du dossier d'ouvrage.

²⁴ Téléchargeable gratuitement sur le site PILES www.piles.setra.equipement.gouv.fr.



4.1 - Aléa « Dégradation des matériaux constitutifs »

Il s'agit de prendre en considération tous les facteurs significatifs conduisant à une **altération de la résistance structurale du mur en béton armé**, il s'agira majoritairement de facteurs conduisant à la corrosion des armatures ou à des facteurs facilitant son évolution (les phénomènes y conduisant sont décrits dans la partie 3.3).

La **corrosion** se développe au sein d'un environnement humide, en présence d'un béton carbonaté (dépassivation des aciers) et au contact d'agents agressifs pouvant être apportés par l'atmosphère, par l'eau, ou par le sol. Ainsi, les différents facteurs retenus pour cette analyse des risques accompagnant cet aléa sont :

- le facteur « **Salage** » en raison de son apport en chlorures ;
- le facteur « **Environnement humide** », facteur indispensable à tous les développements d'agression du béton et de corrosion des aciers ;
- le facteur « **Environnement agressif** ».

4.1.1 - Le facteur « Salage »

Critère retenu : est la **fréquence de salage**²⁵, c'est-à-dire le nombre moyen de jours d'application sur une année. Lorsque le mur protège une voie et en porte une autre, la fréquence de salage est la somme de celles des deux voies²⁶ (Figure 13).

La circulation d'eau va favoriser la pénétration des chlorures, cependant en raison de la difficulté de prise en compte des conditions hydrauliques du site, ce critère n'a pas été retenu.

Nota : La distance entre la voie salée et le mur est également un paramètre important. Cependant, en l'absence d'élément d'appréciation quantifiable, cette considération n'est pas prise en compte en première approche. Néanmoins, conformément à l'*Eurocode 2 (article 4.2 - Note 1)*, le salage n'est pas à considérer si la distance est supérieure à 6 m.

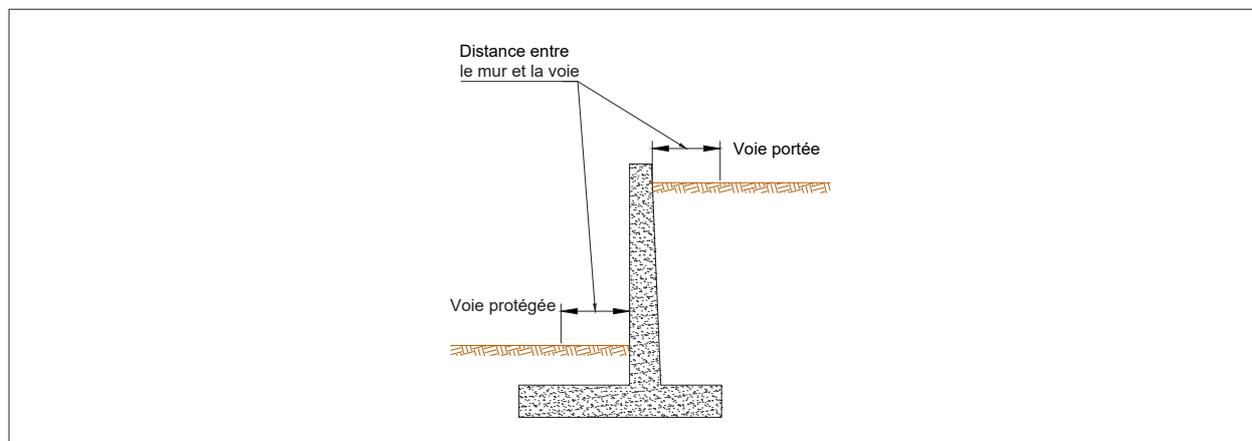


Figure 13 : Schéma voies protégée ou portée par le mur

Source de la donnée : Les modalités de salage demeurent du ressort de la politique locale du gestionnaire. La fréquence de salage telle que définie dans la norme *NF EN 206/CN* peut être estimée à partir de la consommation de sel obtenue, par exemple auprès des CEI (Centres d'Entretien et d'Intervention des DIR). En l'absence d'information locale sur la fréquence de salage, on s'appuiera, en première approximation, sur la carte de salage ci-après (Figure 14) issue de la norme *NF EN 206/CN*, ou encore sur le fascicule de documentation *FD P 18-326*, qui fixe les zones de gel à utiliser par canton et éventuellement en fonction de l'altitude pour les zones montagneuses.

²⁵ C'est-à-dire l'apport de chlorure en contact avec la surface en béton et qui risque d'atteindre les armatures.

²⁶ Effectivement, nous ne sommes pas en mesure de savoir quelle est la configuration (portée ou protégée) la plus pénalisante. Dans ce cas, le mur est attaqué par les chlorures du côté aval et amont. Nous rappelons que les aciers structuraux se trouvent du côté amont.

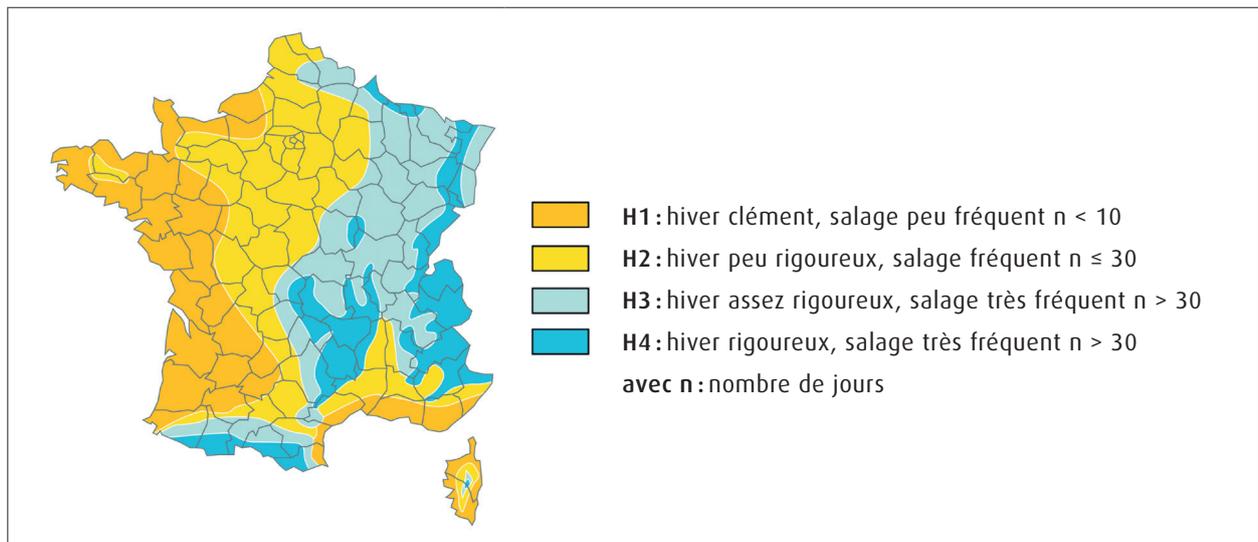


Figure 14 : Carte de salage [20]

4.1.2 - Le facteur « Environnement humide »

Critères retenus : L'humidité du béton et par corollaire de son environnement est un des paramètres régissant le processus de corrosion (voir explications §3.3.1). On s'intéresse donc aux modalités de contact de l'ouvrage avec l'eau. Par simplification²⁷, on distingue donc les murs ayant leur base soit en zone de marnage, soit immergée en permanence.

Nota : On rappelle que les zones les plus sensibles vis-à-vis de la corrosion, sont le côté amont du mur en contact avec le remblai et l'intersection semelle-voile, qui malheureusement ne sont pas accessibles. Une reprise de bétonnage peu soignée représente un chemin d'accès privilégié pour l'eau.

Critères aggravants : En environnement marin, le contact de l'ouvrage avec l'eau de mer constitue un élément aggravant (processus de corrosion dû aux chlorures). Il en est de même, pour les ouvrages en zone tropicale, en raison de la sensibilité accrue des armatures vis-à-vis de la corrosion (conditions de température et d'hygrométrie).

Sources de la donnée : **Modalités de contact** de l'ouvrage avec l'eau à l'aval (pas de contact, zone de marnage...), **Cartes climatiques de Météo France**.

4.1.3 - Le facteur « Environnement agressif »

Critères retenus : Les agents agressifs vis-à-vis de l'attaque du béton et des armatures peuvent provenir de :

- l'**activité anthropique**, comme la présence d'industries²⁸, d'activités agricoles (par exemple, l'acide organique) ou l'urbanisation (par exemple, les eaux usées). L'origine de la pollution peut être multiple et avoir un caractère aléatoire et accidentel. L'absence d'activités humaines permet, le plus souvent, d'écarter l'éventualité d'une rupture de canalisation d'eau usée ou d'eau de pluie.
- la **présence de sols agressifs** (gypse, anhydrite, pyrites, évaporites, vases, tourbes).

Nota : La **diffusion de la pollution (ou de la contamination)** va être sensible au fonctionnement hydrogéologique, ainsi qu'à la perméabilité des sols traversés, critères qui ne peuvent être renseignés sans une étude détaillée spécifique. A titre indicatif et à défaut de connaissance plus précise, **une zone d'influence de 250 m à l'amont du mur** a été arrêtée pour répertorier les sources éventuelles de pollution ou de contamination.

²⁷ Il est difficile d'estimer le niveau d'humidité du mur, donc n'ont été considérées que les situations sans ambiguïté, mais le gestionnaire peut, en fonction de sa connaissance, adapter son évaluation.

²⁸ Une distinction est faite sur la dangerosité des sites industriels.



Source de la donnée :

- l'**activité anthropique** : Connaissance de l'occupation du site ou Informations trouvées sur le site internet www.georisques.gouv.fr²⁹, entre autre, sur les sites pollués, les installations classées, les canalisations de matières dangereuses (gaz, hydrocarbures, produits chimiques) et les installations nucléaires.
- la **présence des sols agressifs** : Exploitation des cartes géologiques³⁰ ou Connaissance géologique du site³¹.

4.1.4 - Évaluation de l'aléa « Dégradation des matériaux constitutifs »

Le système de notation du Tableau 1 est utilisé pour évaluer l'aléa « Dégradation des matériaux constitutifs » :
 $A1 = a11 + a12 + a13 + a14$.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

| Salage ³² | | | | | |
|--|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| a11 | Absence | < 10 jours/an | Entre 10 et 30 jours /an | > 30 jours/an | |
| | 0 | +5 | +10 | +15 | |
| Environnement humide (Ouvrage en contact avec l'eau côté aval ³³ visible) | | | | | |
| a12 | 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 |
| | 0 | +5 | +10 | +2 | +3 |
| Environnement agressif attaquant le voile côté amont ³⁴ (non visible) | | | | | |
| a13 | Autres environnements (a priori sans agents agressifs) | Zones urbaines | Activités agricoles | Sites industriels | |
| | | | | Courants | Défavorables |
| | 0 | +5 | | +10 | |
| a14 | Sols agressifs ³⁵ | | | | |
| | Absence avérée | Aucune information | Présence possible ³⁶ | Présence avérée dans le terrain amont | Présence avérée dans le remblai |
| | 0 | +2 | +3 | +5 | +10 |

Tableau 1 : Système de notation de l'aléa « Résistance structurale défaillante »

29 BASIAS : Inventaire historique des sites industriels et activités en service.

30 En l'absence de cartes géologiques, le site du BRGM « Infoterre » peut être consulté : www.infoterre.brgm.fr.

31 Dans le cadre d'une analyse des risques détaillée, une analyse de carottes de sol permettra de lever le doute.

32 Lorsque le mur protège et porte des voies, la fréquence de salage est la somme de celle des deux voies. En présence de mur étagé, les murs concernés sont ceux en contact avec une voie.

33 L'eau est souvent présente en amont du mur, mais il est difficile de le déterminer.

34 La zone d'influence est de l'ordre de 250 m autour du mur.

35 gypse, pyrites, vases, tourbes, ...

36 car déjà repérée dans le secteur.



4.2 - Aléa « Augmentation des sollicitations sur le mur »

Notre ouvrage a été dimensionné en tenant compte de tous les efforts auxquels il est censé être soumis au moment de sa conception du fait de la réglementation en vigueur. Si son environnement ou son mode de fonctionnement sont modifiés lors de son exploitation, alors l'ouvrage risque de ne plus pouvoir résister à ces nouvelles sollicitations. On considère qu'il peut y avoir deux **origines à l'augmentation des sollicitations sur le mur** :

- une **non accidentelle** :
 - le facteur « Évolution des conditions d'exploitation de la voie portée »,
 - le facteur « Évolution de l'aménagement en tête ou à l'amont du mur ».
- une **accidentelle** :
 - le facteur « Augmentation de la pression hydrostatique à l'amont du mur »,
 - le facteur « Instabilité du terrain amont »,
 - le facteur « Choc de véhicule ».

4.2.1 - Le facteur « Évolution des conditions d'exploitation de la voie portée »

Critères retenus : **Trafic journalier des poids lourds (PL) et transports exceptionnels** si la voie portée est située à une distance inférieure ou égale à 1,7 fois la hauteur du mur par rapport à la tête du mur (Figure 15), ce qui est généralement le cas.

Nota : En réalité, il convient d'évaluer l'évolution du trafic depuis la réalisation du mur. Le gestionnaire doit tenir compte de l'historique de son ouvrage (par exemple une augmentation du trafic poids-lourd importante en raison d'une ouverture de carrière ou au contraire une diminution due à sa fermeture). En cas d'absence d'information, on retient le trafic actuel par sécurité et homogénéité de traitement.

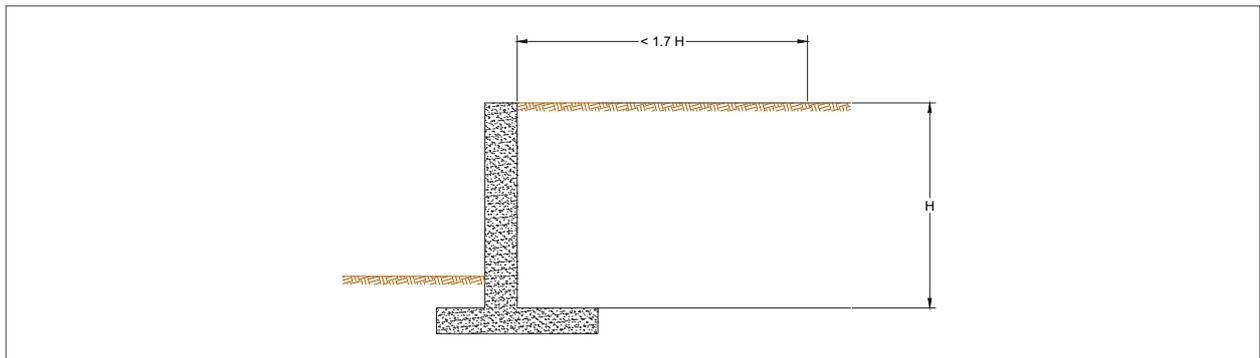


Figure 15 : Zone à prendre en compte pour le trafic des poids lourds

Critère aggravant : Si la voie est identifiée comme un axe de transport exceptionnel, elle risque de supporter des charges exceptionnelles ne correspondant pas à son dimensionnement courant. Dans le cadre du présent guide, on considère comme exceptionnels les convois qui dépassent 120 tonnes.

Sources des données : logiciel de gestion du trafic (par exemple « Isidor³⁷ ») ou **Connaissance du gestionnaire**.

³⁷ ISIDOR est une application web permettant de consulter, gérer, publier, analyser, cartographier des données du patrimoine routier national.



4.2.2 - Le facteur « Évolution de l'aménagement en tête ou à l'amont du mur »

Critères retenus : Toute **construction récente** ou **accumulation de matériaux**, respectivement construite ou stockée dans la zone d'influence immédiate de l'ouvrage en amont du mur conduisent à une évolution de l'aménagement à proximité du mur. Sont donc incluses toutes les charges soupçonnées non prévues lors de sa conception : bâtis, voiries³⁸, parkings, dépôts (décharge, terres), talus, charges ponctuelles d'importance remarquable (pylônes électriques, portiques, etc.), surélévation du mur par des ouvrages (murs antibruit, ouvrages de protection contre les chutes de blocs, etc.) ou rehausse du mur avec son remblaiement³⁹.

Nota : Toute surcharge va augmenter la poussée des terres sur l'ouvrage et sur ses fondations (§ 3.3), et risque d'entraîner un tassement, un déplacement du mur ou encore de conduire à sa rupture structurale. Plus elle est proche de la tête du mur et plus elle aura un effet défavorable (Figure 16).

Dans cette analyse des risques, nous partons du principe que pour tous ces aménagements, le mur n'a pas fait l'objet d'un renforcement.

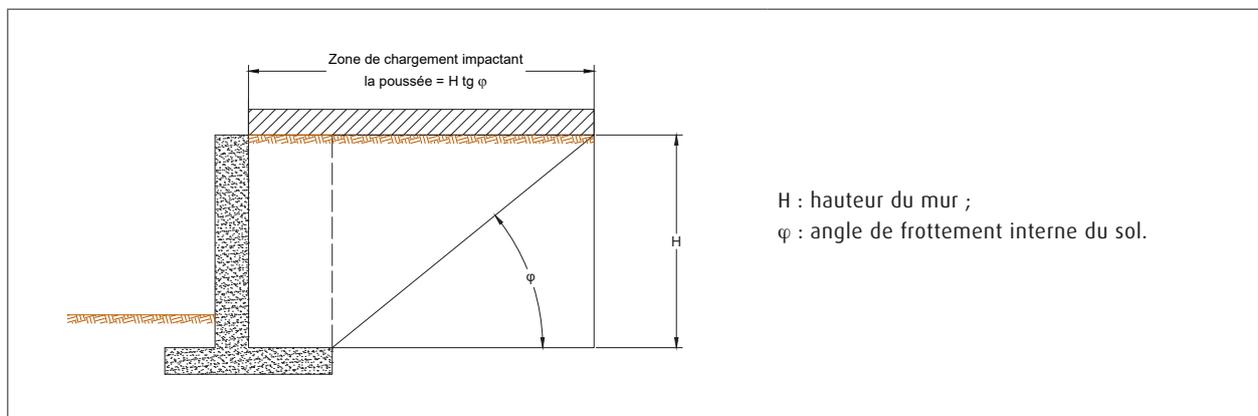


Figure 16 : Zone de chargement influençant la poussée des terres sur le voile

Sources de la donnée : pour la réalisation d'aménagement non prévue lors de la conception du soutènement :

- **inspection visuelle** attestant de la présence d'une surcharge (bâtis, voiries, parking, dépôts, rehausse, surélévation, ...), ou éventuellement des signes laissant supposer par exemple une rehausse du mur ;
- **connaissance du gestionnaire** ;
- **photographies aériennes multi-dates** accessibles sur les sites Internet « Google-earth » (outil « afficher les images d'archive ») ou sur <https://remonterletemps.ign.fr/> ;
- **documents attestant d'une réalisation** (bâtis, voiries, parking, rehausse, surélévation, etc.).

4.2.3 - Le facteur « Augmentation de la pression hydrostatique à l'amont du mur »

Critères retenus : L'**arrivée d'eau en quantité importante à l'arrière d'un mur** quelle qu'en soit l'origine a occasionné dans le passé de nombreuses ruptures de mur. Plusieurs critères ont été retenus pour évaluer ce facteur :

- critère « **Immersion totale ou partielle du mur lors d'une crue** » conduisant à une imbibition du mur et des terrains ou des remblais à l'arrière du mur depuis le pied du mur, entraînant des poussées hydrostatiques lors de la décrue et dont l'importance dépend de l'efficacité du drainage interne. On s'intéressera donc au niveau de l'aléa « Inondation » et à l'occurrence d'une crue.
- critère « **Arrivées d'eau accidentelles** », suite à une rupture de canalisation ou à une défaillance d'étanchéité d'un bassin ou d'un canal, critère non facilement identifiable. On va donc estimer la probabilité de leur présence à l'arrière du mur ou à proximité de celui-ci en fonction de l'environnement (zone urbaine, résidentielle, industrielle, dispositifs d'irrigation ou autre).

³⁸ Par exemple, en raison d'une modification de tracé, les voies de circulation ont été rapprochées du mur ou ajout d'une voie.

³⁹ Une simple élévation par clôture ou parapet n'implique pas de modifications significatives sur les efforts, et de ce fait n'est pas prise en compte dans le cas de surcharge éventuelle.



- critère « **Gestion des eaux pluviales** »⁴⁰ : La mauvaise gestion des eaux pluviales à l'amont du mur peut être à l'origine de très forts ruissellements de surface et/ou écoulements épidermiques dans le sol et, par conséquent, d'arrivées d'eau massives à l'arrière du mur. La gestion de l'eau pluviale de la voie portée et aux environs doit être étudiée afin d'identifier tous les aménagements qui pourraient conduire à une accumulation d'eau à l'arrière du mur, voire empêcher l'évacuation des eaux hors du mur. En raison de la difficulté de cette analyse, nous ferons reposer ce critère sur les signes laissant envisager une mauvaise gestion : stagnation d'eau en haut du mur ou ruissellements diffus ou concentrés vers la tête du mur. La définition des **bassins versants** est présentée en Annexe 4.

Critères aggravants :

- critère « **Arrivées d'eau accidentelles** », la présence d'une défaillance connue, n'ayant pas encore fait l'objet d'une réparation, constitue un critère aggravant ;
- critère « **Gestion des eaux pluviales** », en raison d'une plus grande concentration d'arrivée d'eau, la position du mur en partie basse d'un bassin versant et/ou l'imperméabilisation des terrains amont (en absence d'aménagement spécifique, comme un bassin de rétention d'eau) constituent un critère aggravant (§ Annexe A4).

Sources des données :

- critère « **Immersion totale ou partielle du mur lors d'une crue** » : cartographies de l'aléa inondation existantes (cartographie nationale sur le site <http://www.georisques.gouv.fr>⁴¹, sites spécifiques à certains districts hydrographiques⁴², cartes d'aléa communales PPRI (Plan de Prévention des Risques d'Inondation), auprès des DREAL⁴³, DDT(M)⁴⁴ ou éventuellement informations plus précises auprès des communes) et/ou à partir d'une approche hydrogéomorphologique succincte.
- critère « **Arrivées d'eau accidentelles** » : analyse hydrogéomorphologique succincte de la zone (voir Nota) grâce aux cartes topographiques IGN, aux photographies aériennes, etc.
- critère « **Pluies extrêmes** » :
 - En métropole : les départements ayant connu au moins un événement pluvieux journalier > 200 mm entre 1966 et 2015 ont été identifiés par Météo France⁴⁵. Pour tous les départements, le gestionnaire peut cibler son département en consultant le site <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Cartes-pluviometriques.html>, ou encore faire le choix d'une approche plus fine sur son parc, en interrogeant le site <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Autour-d-une-commune-sur-1-jour.html> afin d'identifier si un événement pluvieux journalier supérieur à 200 mm a été enregistré dans un rayon de 20 km autour de la commune dans laquelle se situe l'ouvrage. Dans ce cas, il pourra alors considérer qu'à partir d'un seul événement répertorié, son ouvrage est affecté de la qualification « pluies extrêmes fréquentes ». Dans le cas contraire, il pourra abaisser la qualification d'un niveau.
 - Hors-métropole :
 - > les Antilles, la Réunion et Mayotte sont soumis à des épisodes cycloniques à très forte pluviométrie (<http://pluiesextremes.meteo.fr/>).
 - > la Guyane ne présente pas d'événements extrêmes avec une pluviométrie journalière > 200 mm, mais en revanche peut être soumise à « la succession d'épisodes pluvio-orageux [...] pouvant entraîner des cumuls de pluie importants, à l'origine de crues, d'inondations voire même de glissements de terrain » (source : <http://pluiesextremes.meteo.fr/guyane/Typologie-des-precipitations.html>⁴⁶).
- critère « **Gestion des eaux pluviales** » : **Inspection visuelle** ou **Cotations IQQA** sur le « Drainage en partie supérieure du mur » (Numéro de défauts : 3211 – *Défaut d'évacuation de l'eau en partie haute*).

40 Pour information, en France, la loi sur l'Eau (2006) ainsi que le code de l'urbanisme imposent la prise en compte de la problématique de gestion des eaux pluviales aux collectivités territoriales détentrices de cette compétence (syndicat, communauté de communes ou communes), principalement à partir de 2 outils réglementaires :
- le zonage pluvial (appelé aussi Schéma Directeur de Gestion des Eaux Pluviales – SDGEP), Schéma Directeur d'Assainissement Pluvial – SDAP ou Schéma Directeur des Eaux Pluviales – SDEP) menant à la délimitation des zones où l'imperméabilisation doit être limitée et les zones où il est nécessaire de prévoir des systèmes de collecte des eaux pluviales ; ce document a une portée réglementaire uniquement s'il est intégré au Plan Local d'Urbanisme – PLU ;
- le règlement d'assainissement définissant les conditions et modalités de déversement des eaux usées et pluviales dans le réseau collectif de la collectivité et dont les préconisations intègrent les contraintes du zonage pluvial.

41 Pour le moment, les cartographies établies dans le cadre de la mise en oeuvre de la Direction Inondation (accessibles sur <http://www.georisques.gouv.fr/cartes-interactive>) ne sont pas exploitables en l'état pour le travail d'analyse des risques. A terme, les données en ligne seront vraisemblablement mises à jour.

42 Par exemple, le district hydrographique Rhône-Méditerranée (http://carmen.developpement-durable.gouv.fr/115/directive_inondation.map).

43 DREAL : Direction Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement.

44 DDT(M) : Direction Départementale des Territoires (et de la Mer).

45 <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Episodes-mediterraneens.html> consulté en mars 2017 et carte éditée en février 2016.

46 consulté en mars 2017.



Nota : À titre indicatif et à défaut de connaissances plus précises, une zone d'influence de 50 m autour du mur a été arrêtée pour répertorier les sources éventuelles de fuite de liquide, mais évidemment en présence de pente forte, de terrains plutôt imperméables et de débits importants, cette distance peut être augmentée.

4.2.4 - Le facteur « Instabilité du terrain amont »

Critère retenu : Présence de marqueurs caractéristiques d'un glissement de terrain en amont du mur (fissures avec décalages, affaissements, tassements, bourrelets de terrain sur un linéaire appréciable).

Critère aggravant : Un glissement ponctuel recensé à une distance de 50 m maximum de l'ouvrage est considéré comme un critère aggravant.

Sources de la donnée : **Inspection visuelle** ou **Cotations IQOA** sur la « Zone d'influence en partie supérieure du mur » (numéros de défauts : 1110 – *Fissuration du terrain parallèle au mur*, 1111 – *Fissuration du terrain en arc de cercle*, 1112 – *Tassement du terrain en tête de mur*, 1113 – *Tassement de terrain*, 1114 – *Bourrelets de terrain*, 1115 – *Erosions*) ou **Consultation du site** « Présence de glissement de terrain »⁴⁷.

4.2.5 - Le facteur « Chocs de véhicule »

Critère retenu : **Accidentologie** sur un itinéraire si la tête du mur fait office de dispositif de sécurité ou de retenue (Figure 8) ou s'il lui est associé par ancrage. Ce facteur ne concerne donc **que les murs aval** (soutenant la voie portée)⁴⁸.

Critère aggravant : Si la voie portée est proche de la tête du mur avec un dispositif de sécurité ou de retenue ancré au mur, l'impact du choc sera encore plus important et cette disposition constitue un critère aggravant.

Sources de la donnée : **logiciel de gestion du trafic** (par exemple, « **Isidor**³⁷ ») ou **Connaissance du gestionnaire**.

⁴⁵ <http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Episodes-mediterraneens.html> consulté en mars 2017 et carte éditée en février 2016.

⁴⁶ consulté en mars 2017.

⁴⁷ [http://www.georisques.gouv.fr/rubrique « Mouvements de terrain »](http://www.georisques.gouv.fr/rubrique%20«%20Mouvements%20de%20terrain%20»).

⁴⁸ Les chocs en pied du mur ne sont pas pris en compte en considérant que si l'accident est grave un contrôle sera effectué, et dans le cas contraire la résistance du mur n'est pas impactée.



4.2.6 - Évaluation de l'aléa « Augmentation des sollicitations »

Le système de notation du Tableau 2 est utilisé pour évaluer l'aléa « Augmentation des sollicitations » : $A2 = a21 + a22 + a23 + a24 + a25 + a26 + a27 + a28$.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

Nota : on rappelle que les murs amont protègent la voie et ceux aval la soutiennent.

| Évolution des conditions d'exploitation de la voie portée ⁴⁹ (Trafic Poids Lourds) | | | | | | |
|--|--------------------------------|---|--|--|--|-------------------------------------|
| | < 1500 PL/jour | Entre 1500 et 6000 PL/jour | > 6000 PL/jour | Critère aggravant : Transports exceptionnels ⁵⁰ | | |
| a21 | 0 | +3 | +6 | +4 | | |
| Évolution de l'aménagement en tête ou à l'amont du mur à moins de 1,7H ⁵¹ de la tête du mur (Figure 16) | | | | | | |
| a22 | Absence d'aménagement | Talus ou Charges ponctuelles importantes ⁵² ou Ouvrages en tête de mur ⁵³ | Réalisation non prévue lors de la conception du mur | | | |
| | | | Bâties | Voiries et parkings, etc. | Dépôts ⁵⁴ | Rehausse du mur et son remblaiement |
| | 0 | +3 | +6 | +8 | +12 | +15 |
| Augmentation de la pression hydrostatique à l'amont du mur | | | | | | |
| Immersion totale ou partielle du mur lors d'une crue | | | | | | |
| a23 | Absence d'inondation | Aucune information | Aléas « inondation » Modéré ou Crue centennale | Aléas « inondation » sans précision de niveau /période de retour | Aléas « inondation » fort ou Crue décennale | |
| | 0 | +2 | +6 | | +10 | |
| Arrivée d'eau accidentelle possible par défaillance ⁵⁵ | | | | | | |
| a24 | Environnement de l'ouvrage | | Présence avérée de canalisations et/ou de bassin en eau à proximité de la tête du mur | | | |
| | Zones non aménagées | Zones aménagées (résidentielle, industrielle, urbaine, etc.) | oui | | Critère aggravant : Défaillance connue | |
| | 0 | +6 | +10 | | +5 | |
| Pluies extrêmes | | | | | | |
| a25 | Aucun épisode pluvieux extrême | Métropole | | Hors métropole | | |
| | | Pluies extrêmes rares ⁵⁶ Départements : 04, 09, 38, 40, 43, 63, 65, 81. | Pluies extrêmes fréquentes Départements : 06, 07, 11,12, 13, 2A, 2B, 26, 30, 34, 48, 66, 83, 84 | Guyane | Antilles, Réunion, Mayotte | |
| | 0 | +6 | +15 | +6 | +15 | |

Suite du tableau page suivante →

49 Si la voie portée est située à une distance inférieure ou égale à 1,7 fois la hauteur du mur (visible) par rapport à la tête du mur (Figure 16).

50 Ce critère aggravant peut être réduit à 1 s'il s'agit de demandes occasionnelles de transport exceptionnel.

51 Dans cette analyse des risques, nous partons du principe que tous ces aménagements n'ont pas fait l'objet d'un redimensionnement.

52 Par Exemple, pylônes électriques, portiques, ...

53 Par exemple, murs anti-bruit, ouvrages de protection de chute de blocs, ...

54 Par exemple, décharge de terre.

55 À titre indicatif et à défaut de connaissances plus précises, une zone d'influence de 50 m autour du mur a été arrêtée pour répertorier les sources éventuelles de fuite de liquide, mais évidemment en présence de pente forte, de terrains plutôt imperméables et de débit important cette distance peut être augmentée.

56 Correspond à moins d'un événement pluvieux extrême sur 10 ans.



| Système de gestion des eaux pluviales | | | | | | |
|--|---|---|-----|---------|--|---|
| Note IQOA « Drainage en partie supérieure du mur » | | | | | | |
| a26 | 1 | 2 | 2E | NE | Absence de système de collecte, d'évacuation et de descentes des eaux | Critère aggravant : Point bas d'un bassin versant et bassin versant élémentaire et/ou imperméabilisation amont du sol ⁵⁷ |
| | | 0 | +4 | +7 | +7 | +10 |
| Instabilité du terrain amont | | | | | | |
| a27 | Note IQOA sur la « Zone d'influence en partie supérieure du mur » | | | | Critère aggravant : Evènement glissement ponctuel recensé à une distance de 50 m de l'ouvrage | |
| | 1 ou 2 | | 2E | 3 ou 3U | NE | |
| | 0 | | +4 | +8 | +6 | +7 |
| Choc de véhicule en tête du mur aval | | | | | | |
| a28 | Zone accidentogène | | | | Critère aggravant : Voie portée proche de la tête du mur et/ou Dispositif de sécurité ancré au mur | |
| | Non | | Oui | | | |
| | 0 | | +3 | | +2 | |

Tableau 2 : Système de notation de l'aléa « Augmentation des sollicitations »

4.3 - Aléa « Résistance en pied défailante »

Cet aléa peut conduire à une déformation de l'ouvrage, voire à un mouvement d'ensemble de type renversement ou glissement.

Différents facteurs peuvent entraîner le développement de cet aléa :

- le facteur « **Travaux en pied de l'ouvrage** », engendrant un remaniement du sol à l'aval de l'ouvrage pouvant conduire à une diminution de la butée mobilisée pour l'équilibre du mur ;
- le facteur « **Instabilité du terrain aval** », entraînant une instabilité en pied de l'ouvrage ;
- le facteur « **Présence d'eau** », en raison des risques d'affouillement ou de perte de résistance des terrains en pied du mur.

4.3.1 - Le Facteur « Travaux en pied de l'ouvrage »

Critères retenus : Modification géométrique défavorable postérieure à la construction, comme une excavation ou une modification défavorable du profil du terrain (par exemple, inclinaison vers l'aval) ou encore un remaniement du sol lors de la pose de réseau⁵⁸ (Figure 17).

Sources de la donnée : Inspection visuelle ou Connaissance du gestionnaire ou état de l'ouvrage (côté amont) par rapport au Dossier de l'ouvrage (DOE⁵⁹) s'il est disponible.

⁵⁷ en absence d'aménagement spécifique, comme un bassin de rétention d'eau.

⁵⁸ Tous les réseaux sont concernés : eaux de pluie, eaux usées, électricité, assainissement...

⁵⁹ DOE : Dossier de l'Ouvrage Exécuté.

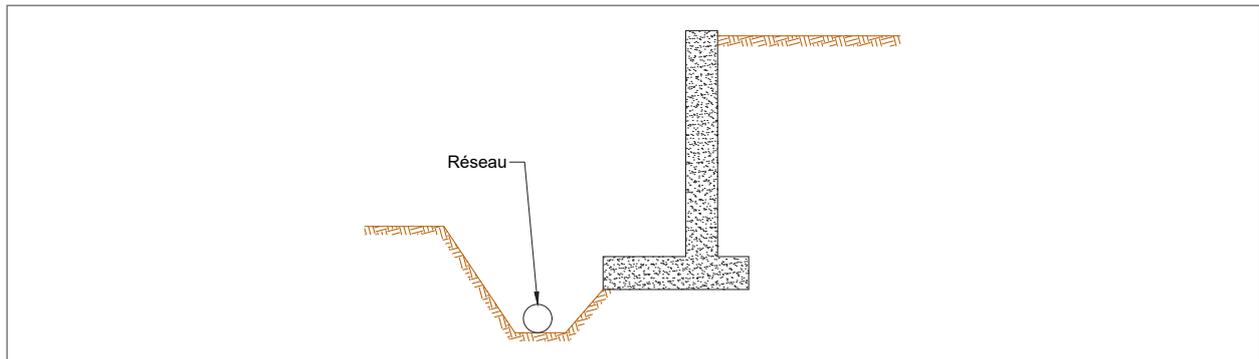


Figure 17 : Diminution de la butée en pied de l'ouvrage

4.3.2 - Le facteur « Instabilité du terrain aval »

Critères retenus : Il s'agit de répertorier les **indices d'instabilité du terrain en contrebas** du mur (fissurations, bourrelets, etc.).

Critères aggravants : les **profils topographiques défavorables** (pentes naturelles fortes) en présence de terrains meubles exerçant une poussée ou la **présence d'un glissement ponctuel** recensé à une distance de 50 m maximum de l'ouvrage qui représentent des critères aggravants.

Sources des données : **Inspection visuelle** ou **Cotations IQOA** sur la « Zone d'Influence en contrebas du mur » (numéros de défauts : 1210 – *Fissuration du terrain parallèle au mur*, 1211 – *Fissuration du terrain en arc de cercle*, 1213 – *Bourrelets de terrain*) ou **Consultation du site** « Présence de glissement de terrain » grâce au lien <http://www.georisques.gouv.fr/> rubrique « Mouvements de terrain ».

4.3.3 - Le facteur « Présence d'eau »

Critères retenus : Il s'agit de relever des indices de **circulation d'eau** avec risques d'affouillement ou de stagnation de l'eau, pouvant entre autre résulter d'un défaut de drainage en amont du mur ou de collecte des eaux.

Critère aggravant : Lorsque l'affouillement ou le ravinement est avéré, il constitue un critère aggravant.

Sources des données :

- **Inspection visuelle** ou **Cotations IQOA** sur le « Drainage en contrebas du mur » (numéros de défauts : 3310 – *Stagnation d'eau*, 3311 – *Chute d'eau sur le parement de l'ouvrage*, 3312 – *Configuration d'ensemble favorisant les stagnations d'eau et/ou les érosions et les ravinements du massif d'assise*).
- Pour l'affouillement ou le ravinement, **Cotations IQOA** sur la « Structure – Fondations » (numéros de défauts : 4210 – *Affouillement du lit du cours d'eau, de ses berges ou fosse d'érosion (en site aquatique)*, 4220 – *Ravinement en site terrestre*).



4.3.4 - Évaluation de l'aléa « Résistance en pied défailante »

Le système de notation du Tableau 3 est utilisé pour évaluer l'aléa « Résistance en pied défailante » :
 $A3 = a31 + a32 + a33$.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

| Travaux en pied de l'ouvrage | | | | | | |
|-------------------------------|---|---|--------------------------|----|---|---|
| a31 | Absence | | Réseau en pied du mur | | Excavation / Modification défavorable du profil du terrain | |
| | 0 | | +2 | | +5 | |
| Instabilité du terrain aval | | | | | | |
| a32 | Note IQOA sur la « Zone d'Influence en contrebas du mur » | | | | Critère aggravant : | |
| | 1 ou 2 | 2E | 3 ou 3U | NE | Présence de pentes naturelles fortes ⁶⁰ constituées de terrains meubles | Événement glissement ponctuel recensé à une distance de 50 m de l'ouvrage |
| | 0 | +4 | +8 | +6 | +3 | +4 |
| Présence d'eau en aval du mur | | | | | | |
| a33 | Aucune présence d'eau | Note IQOA sur le « Drainage en contrebas du mur » | | | Critère aggravant : | |
| | | 2 (stagnation) | 2E (érosion, ravinement) | NE | Note IQOA sur la « Structure - Fondations » Affouillement ou Ravinement avérés (2E à 3U) | |
| | 0 | +2 | +4 | +3 | +6 | |

Tableau 3 : Système de notation de l'aléa « Résistance en pied défailante »

⁶⁰ Une pente > 30° peut être donnée à titre indicatif, à adapter à la nature du terrain et à la présence de végétation.

Chapitre 5

Étape 3.2 : Vulnérabilité aux aléas

Ce chapitre, seconde partie de l'analyse simplifiée des risques, présente la vulnérabilité des murs aux aléas présentés dans le chapitre 4. Les critères font appel parfois aux règles de l'art rappelées en partie § 3.1 de ce guide.

Comme pour les aléas, certains critères reposent sur les notes IQOA (§ 1.1) et sont donc associés à des numéros de défauts dont le titre est fourni et dont des schémas illustratifs se trouvent dans « IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) – Murs, Murs de soutènement, Mur en béton armé encastré sur semelle, Type 6 » [8]⁶¹.

Trois vulnérabilités ont été retenues pour résister aux aléas définis dans le chapitre précédent :

- la vulnérabilité « **Dégradation des matériaux constitutifs** » (§ 5.1) ;
- la vulnérabilité « **Augmentation des sollicitations du mur** » (§ 5.2) ;
- la vulnérabilité « **Résistance en pied défailante** » (§ 5.3).

Comme pour les aléas, chaque vulnérabilité est déclinée en facteurs et est évaluée au moyen de critères en additionnant les « points » donnés pour chacun d'eux. De même, **on invite le gestionnaire à faire une analyse selon deux procédures, une rapide et l'autre plus longue si nécessaire** (§ 7.2).

5.1 - Vulnérabilité à la « Dégradation des matériaux constitutifs »

5.1.1 - Le facteur « Défauts structuraux »

Critères retenus : Vulnérabilités internes relatives à des défauts de conception ou de réalisation qui vont faciliter l'endommagement du matériau béton armé, et de ce fait fragiliser la structure.

Nota : Le parement aval étant seul visible, on fera l'hypothèse qu'il est un bon indicateur de son état global. Il faut néanmoins noter que tous les murs ne présentent pas d'armatures en face avant.

- critères « **Défauts de réalisation**⁶² » :
 - l'insuffisance d'enrobage des armatures diminue le rôle de la couche protectrice du béton vis-à-vis de la pénétration des agents agressifs et certains défauts flagrants (affleurement des armatures, ...) en sont la manifestation ;
 - les reprises de bétonnage non soignées, en particulier la reprise de bétonnage située à la liaison entre le voile et la semelle⁶³, peuvent conduire, en cas de mauvaise exécution, à une corrosion des armatures préjudiciable à la tenue du mur. Cette interface est rarement visible. Cependant, les reprises de bétonnage toutefois visibles sur le parement aval peuvent donner des indications générales sur leur qualité d'exécution.
 - les défauts de parements de type ségrégation se manifestant par des nids de cailloux. Ces défauts sont dus notamment à des difficultés de mise en œuvre et de serrage du béton.

⁶¹ Téléchargeable gratuitement sur le site PILES www.piles.setra.equipement.gouv.fr.

⁶² Le retour d'expérience ne nous permet pas de faire une distinction en terme de qualité entre la préfabrication et la réalisation in-situ.

⁶³ Les assemblages « voile-semelle » sur site peuvent être source de fragilité de l'ouvrage.



- critères « **Défauts de conception** » diminuant la résistance de la structure sont :
 - l'épaisseur du voile insuffisante, en tête et à la base,
 - le fruit négatif du mur (critère aggravant).

Critère aggravant : critères « **Défauts de conception** », le **fruit négatif** (Figure 18a) du mur est considéré comme un critère aggravant parce qu'il facilite le renversement du mur.

Sources des données :

- critères « **Défauts de réalisation** » :
 - l'insuffisance d'enrobage :
 - > les *défauts flagrants d'enrobage* : **Inspection visuelle** ou **Cotations IQOA** sur la « Structure du mur » (numéro de défauts : 4148 – *Armatures apparentes sans éclatement du béton*),
 - > la valeur théorique de *l'enrobage* peut se trouver dans le **dossier de l'ouvrage**⁶⁴ s'il est disponible.
 - les reprises de bétonnage non soignées : **Inspection visuelle**,
 - les défauts du parement : **Inspection visuelle** ou **Cotations IQOA** sur la « Structure du mur » (numéro de défauts : 4145 – *Nid de cailloux* - Figure 18b).
- critères « **Défauts de conception** » : Pour les valeurs seuils, on se réfère aux règles de l'art [12], à défaut de vérifications calculatoires. Ces valeurs ont pu être retranscrites dans le dossier de l'ouvrage.

5.1.2 - Le facteur « Sensibilité de l'ouvrage aux attaques » du béton

Critères retenus : Vulnérabilités associées à la **fragilité** de l'ouvrage vis-à-vis de la rupture interne **en raison de son état** :

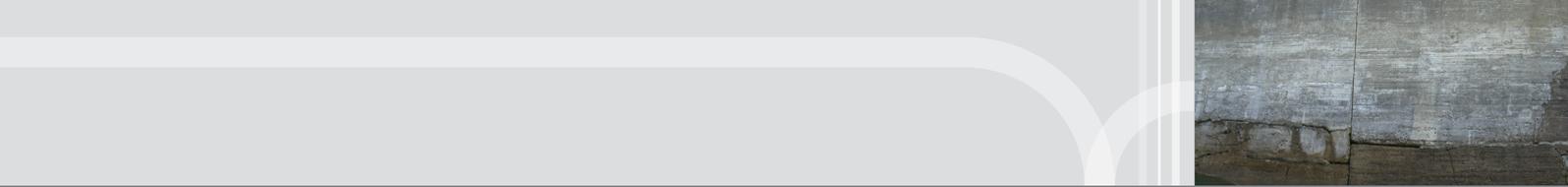
- critère « **Age de l'ouvrage** » : La durée d'exposition aux agents à l'origine de la corrosion et par conséquent la probabilité de corrosion s'accroît avec l'âge de l'ouvrage ;
- critère « **Fissurations du béton** » (Figure 18c) : Il peut s'agir de fissures de retrait gêné⁶⁵, ou dues à des réactions de gonflement interne, ou dues au gel interne ou encore associées à des mouvements du mur. Ces fissures sont susceptibles de favoriser la pénétration des agents agressifs et donc la corrosion des armatures.
- critère « **Signes de corrosion** » des armatures sur le parement aval car ils indiquent que le processus de corrosion des armatures est dès à présent engagé. On pourra distinguer trois stades d'avancement de la corrosion :
 - absence de signes de corrosion,
 - corrosion peu avancée : fissuration suivant le ferrailage (le long des armatures horizontales et/ou verticales) et/ou amorce d'éclatement de béton sans armature apparente,
 - corrosion avancée : éclatements de béton avec armatures apparentes oxydées et/ou trace de rouille le long des fissures.



Figure 18 : Exemples de défauts du parement

⁶⁴ Compte-tenu des conditions de mise en oeuvre (respect des plans d'exécution, calage des cages d'armatures), l'enrobage peut présenter une variabilité importante sur un ouvrage et il convient donc d'être prudent sur les informations issues des sources documentaires.

⁶⁵ Elles sont courantes et normales pour ce type de structure, il convient donc d'identifier les situations singulières (densité et ouverture des fissures > 0,3 mm).



Critères aggravants : Critère « **Fissurations du béton** », la présence de **calcite humide** ou encore une **venue d'eau** à travers les fissures témoignent d'une circulation d'eau dans le béton et constitue un critère aggravant au regard de la sensibilité de l'ouvrage aux attaques sur le béton et à la corrosion des armatures.

Sources des données :

- critère « **Age de l'ouvrage** » : Dossier d'ouvrage ;
- critère « **Fissurations du béton** » : **Inspection visuelle** ou **Cotations IQOA** « structure du mur » (Numéros de défauts : 4110 – *Fissures verticales de type I*, 4111 – *Fissures obliques de type II*, 4113 – *Fissures horizontales*, 4140 – *Faiçonnage superficiel irrégulier*, 4141 – *Maillage « régulier » de fissures*) ;
- critère « **Signes de corrosion** » : **Inspection visuelle** ou **Cotations IQOA** « structure du mur » (Numéros de défauts : 4112 – *Fissures suivant le ferrailage*, 4146 – *Amorce d'éclatement de parement sans armature apparente*, 4147 – *Eclatement(s) localisé(s) de béton avec mise à nu d'armature(s)*).

5.1.3 - Évaluation de la vulnérabilité « Résistance structure défaillante »

Le système de notation du Tableau 4 est utilisé pour évaluer la vulnérabilité à la « Résistance structure défaillante »
 $v1 = v11.1 + v11.2 + v11.3 + v12.1 + v12.2 + v13 + v14$.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

| Défauts structuraux de réalisation ⁶⁶ | | | | | | | |
|--|---|-------------------------------|--------------|-----------|---------------|--|-------------------------------|
| v11.1 | Défauts flagrants | Insuffisance d'enrobage | | | | | Aucune information disponible |
| | | Enrobage | | | | | |
| | | ≤ 3 cm | | > 3 cm | | | |
| +5 | +3 | 0 | | | +2 | | |
| v11.2 | Reprise de bétonnage | | | | | | |
| | Soignée | Aucune information disponible | | | | Non soignée | |
| 0 | +1 | | | | +5 | | |
| v11.3 | Défauts de parement | | | | | | |
| | Aucun | Très localisés | | | | Etendus | |
| 0 | +1 | | | | +5 | | |
| v12.1 | Épaisseur du voile | | | | | | |
| | En tête | | | | | | |
| | ≥ 20 cm | Aucune information disponible | | | < 20 cm | | |
| | 0 | +3 | | | +6 | | |
| | A la base | | | | | | |
| v12.2 | < H/18 avec 3 < H < 4 m ou < H/12 avec 7 < H < 9 m avec un minimum de 20 cm | | | | | | |
| | non | Aucune information disponible | | | oui | | |
| | 0 | +4 | | | +7 | | |
| Critère aggravant : Fruit négatif > 1 cm/m | | | | | | | |
| Sensibilité de l'ouvrage aux attaques du béton | | | | | | | |
| v13 | Age de l'ouvrage | | | | | | |
| | < 20 ans | 21 à 30 ans | 31 et 40 ans | 41-50 ans | 51 et 100 ans | > 100 ans | Aucune information |
| | 0 | 1 | +2 | +3 | +5 | +10 | +5 |
| v14 | Fissurations de l'ouvrage | | | | | | |
| | Fissures | | | | | Critères aggravants : Venue d'eau et/ou Présence de Calcite humide par temps sec | |
| | Non | Oui | | | | | |
| | | ≤ 0,3 mm | > 0,3 mm | | | | |
| 0 | +2 | +4 | | +6 | | | |
| v15 | Signes de corrosion | | | | | | |
| | Absence | Corrosion peu avancée | | | | Corrosion avancée | |
| | 0 | +5 | | | | +10 | |

Tableau 4 : Système de notation de la vulnérabilité « Résistance structure défaillante »

⁶⁶ $v11 = v11.1 + v11.2 + v11.3$.

⁶⁷ $v12 = v12.1 + v12.2$.

5.2 - Vulnérabilité à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur »

5.2.1 - Le facteur « État structural de l'ouvrage »

Un ouvrage dégradé présente généralement une altération de la résistance. En outre quelque soit l'état de l'ouvrage (y compris neuf), toute augmentation des sollicitations sur l'ouvrage représente un risque accru de rupture pour celui-ci. La vulnérabilité du mur vis-à-vis de l'augmentation des sollicitations est donc d'autant plus grande que son état structural est altéré.

Critères retenus : Signes de désordres majeurs, de type :

- **fractures obliques multiples avec décalage** vertical, rejet ou ouverture supérieur à 0,5 mm (Figure 19) ;
- **déversement vers l'aval** (mouvement d'ensemble) supérieur à $H/100$ ou déversement vers l'amont (à ne pas confondre avec le fruit d'origine du parement) ;
- **déformation ou déplacement d'ensemble** dans le sens horizontal (en plan) ou vertical (en élévation) avec apparition de fissures ou de bourrelets dans la zone d'influence ou sur la chaussée ;
- **dégradation au droit d'un joint d'étanchéité** (entre plots) avec venue de matériaux des terrains soutenus ou éclats de béton (consécutifs au mouvement d'un plot).

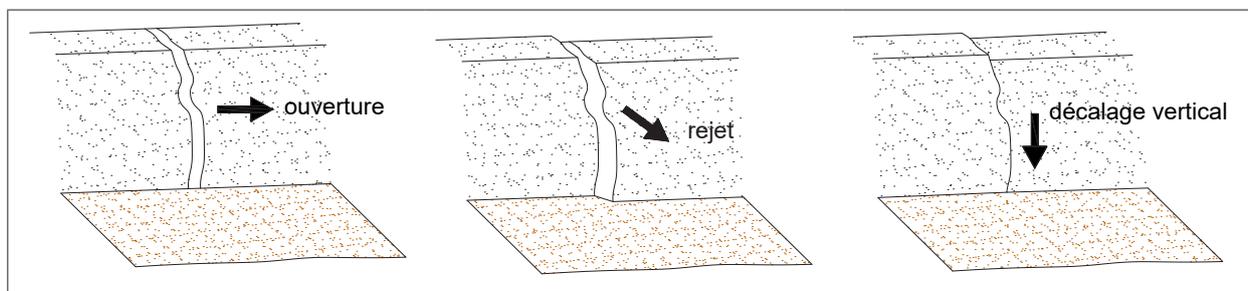


Figure 19 : Schéma représentant un décalage vertical, un rejet et une ouverture

Sources des données : **Inspection visuelle** ou **Cotations IQOA** sur la « Structure » (numéro de défauts : 4120 et 4121 – Déversement respectivement vers l'aval et vers l'amont, 4130 et 4131 – Déformation ou déplacement d'ensemble respectivement dans le sens horizontal et vertical, 4132 – Mouvement d'un plot isolé au droit d'un joint, 4133 – Dégradation d'un joint d'étanchéité).

5.2.2 - Le facteur « Système de drainage »

Critères retenus : Indices de mauvais drainage du mur.

Critère aggravant : En raison du fort impact de la poussée de l'eau sur le mur en cas d'absence de drainage, l'absence de barbacanes ou de tout autre dispositif de drainage constitue un critère aggravant.

Sources des données : **Inspection visuelle** ou **Cotations IQOA** du « drainage interne du mur » (numéros de défauts : 3110 – Zones humides, ruissellements d'eau, efflorescences, concrétions sur le parement du mur, 3111 – Ecoulements de fines du matériau du remblai, 3120 – Altération du dispositif de drainage interne, 3121 – Absences de barbacanes ou de drains, 3122 – Fonctionnement du dispositif apparent de drainage interne).

5.2.3 - Le facteur « Reconnaissance géotechnique »

Critère retenu : Présence ou absence de rapport de reconnaissance géotechnique, avec des informations suffisantes pour établir un diagnostic « sol et fondation ».

Source de la donnée : **Dossier d'ouvrage**.

5.2.4 - Le facteur « Distance entre la voie portée ou surcharge et la tête du mur »

Critère retenu : Rapport entre la distance de la voie portée (ou de la surcharge) à la tête du mur par rapport à la hauteur visible du mur de soutènement (Figures 13 et 16), car l'impact de l'augmentation de surcharge s'atténue avec l'éloignement au mur. En cas de mur de hauteur variable, le gestionnaire peut tronçonner son ouvrage ou prendre la valeur la plus défavorable, soit la plus petite hauteur.

Sources de la donnée : Mesures lors de visites.

5.2.5 - Évaluation de la vulnérabilité à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur »

Le système de notation du Tableau 5 est utilisé pour évaluer la vulnérabilité à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur » : $V2 = v21 + v22 + v23 + v24$.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

| État structural de l'ouvrage | | | | |
|--|---------------------------------------|--------------------------|--------------------|---|
| v21 | Note IQOA « Structure » | | | |
| | 1 ou 2 | 2E | 3 ou 3U | NE |
| | 0 | +7 | +15 | +11 |
| Système de drainage du mur | | | | |
| v22 | Note IQOA « Drainage interne du mur » | | | |
| | 1 ou 2 | 2E | NE | Critère aggravant : absence de barbacanes ou de drains |
| | 0 | +7 | +5 | +5 |
| Reconnaitances géotechniques « suffisantes » pour un diagnostic « sol-fondation » | | | | |
| v23 | Présence | Absence | Aucune information | |
| | 0 | +5 | +2 | |
| Distance entre la tête de mur et le positionnement de la charge (voie portée ou surcharge) | | | | |
| v24 | Distance > 1,7 H | 0,5 H < Distance < 1,7 H | Distance < 0,5 H | |
| | 0 | +5 | +10 | |

Tableau 5 : Système de notation de la vulnérabilité « Augmentation des sollicitations sur le mur »

5.3 - Vulnérabilité à la « Résistance en pied défailante »

5.3.1 - Le facteur « Conception structurale »

Critères retenus : Connaissance ou non des caractéristiques de l'ouvrage et vérification des seuils géométriques de parties constitutives du soutènement favorisant sa résistance issus des « règles de l'art » [12].

Source de la donnée : Dossier d'ouvrage.

5.3.2 - Le facteur « Sol de fondation compressible »

Il s'agit ici de s'intéresser au phénomène de poinçonnement de l'ouvrage en raison d'un sol tassant fortement sous chargement.

Critère retenu : Présence ou soupçon ou absence de **sol de fondation compressible**. Même en absence d'informations, la configuration géomorphologique du mur peut laisser subodorer la présence de sol compressible (par exemple, zone de plaine alluviale, marécageuse ...).

Source de la donnée : Dossier d'ouvrage, Cartes géologiques et Connaissance du site.

5.3.3 - Évaluation de la vulnérabilité à la « Résistance en pied défailante »

Le système de notation du Tableau 6 est utilisé pour évaluer la vulnérabilité à la « Résistance en pied défailante » : $V3 = v31 + v32 + v33 + v34 + v35$.

| Conception structurale (cf. dimensions courantes sur la Figure 7) | | | | | |
|--|---|--------------------|--------------------|-------------------------|------------------------------------|
| v31 | Patin | | | | |
| | Oui | | Aucune information | Absence ⁶⁸ | Mur en « L » inversé ⁶⁹ |
| | $B_{\text{patin}} \geq B/2$ à $B/5$ | | | | |
| | Oui | Non | | | |
| | 0 | +3 | +5 | +9 | +15 |
| v32 | Semelle | | | | |
| | $B \geq 0,35H$ à $0,45H$ (selon le sol) | | | | |
| | Oui | | Dimension inconnue | $B < 0,35H$ à $0,45H$ | |
| | 0 | | +3 | +15 | |
| v33 | Ancrage de la semelle⁷⁰ | | | | |
| | $Z >$ prof. hors gel | | Dimension inconnue | $Z \leq$ prof. hors gel | |
| | 0 | | +5 | +15 | |
| v34 | Bêche ou inclinaison de la semelle | | | | |
| | Présence | | Aucune information | Absence | |
| | -15 | | 0 | | |
| v35 | Sol de fondation compressible | | | | |
| | Absence | Aucune information | Soupçon | Présence | |
| | 0 | +7 | +10 | +15 | |

Tableau 6 : Système de notation de la vulnérabilité « Résistance en pied défailante »

⁶⁸ Mur en « L ».

⁶⁹ Patin seul, sans talon.

⁷⁰ Les profondeurs hors gel sont données dans l'annexe O de la norme NF P94-261.



Chapitre 6

Étape 3.3 : Gravité des conséquences

Ce chapitre, troisième partie de l'analyse simplifiée des risques, s'intéresse à la perte d'exploitation de l'ouvrage par ruine ou inaptitude. La gravité des conséquences est évaluée selon la méthodologie proposée dans le guide « Maîtrise des risques – Application aux ouvrages d'art » [1] et repose sur des critères socio-économiques⁷¹ :

- **l'importance de l'itinéraire** associé à l'ouvrage (c1), qui comprend la valeur stratégique de l'itinéraire ;
- **l'importance du trafic** de la voie ou des voies (c2) ;
- la **valeur patrimoniale** de l'ouvrage (c3), qui est associée aux coûts de la construction ou des réparations, dépendant de sa hauteur et de sa surface ;
- les **conséquences sur le niveau de service** (c4), pendant les travaux de réparation ou de remplacement de l'ouvrage sur l'exploitation de l'itinéraire et sur la zone affectée par la ruine.

6.1 - L'importance de l'itinéraire concerné par le mur

Critère retenu : L'importance de l'itinéraire concerné par le mur est déterminée en fonction de la position du mur par rapport aux voies circulées :

- **murs qui supportent une voie** (murs aval) ;
- **murs qui protègent une voie** (murs amont) ;
- **murs qui, à la fois, supportent et protègent une voie** (murs amont et aval).

Nota : Les murs de culée⁷² (porteurs ou non) ne sont pas pris en compte, qu'ils s'agissent de murs de front ou de murs en aile ou en retour. Le gestionnaire peut cependant s'inspirer de la présente méthode d'analyse pour étudier le cas de ces ouvrages particuliers.

6.2 - L'importance du trafic

Critère retenu : Les quatre seuils de trafic considérés sont :

- **trafic inférieur ou égal à 15 000 véhicules/jour** ;
- **trafic compris entre 15 000 et 35 000 véhicules/jour** ;
- **trafic compris entre 35 000 et 80 000 véhicules/jour** ;
- **trafic supérieur à 80 000 véhicules/jour**.

Nota : Si le mur protège et soutient la voie, les trafics de chaque voie doivent être additionnés.

⁷¹ Les conséquences humaines ne sont pas prises en compte directement car non discriminantes (de même niveau d'inadmissibilité), mais indirectement par le trafic.

⁷² Ils ne sont d'ailleurs pas, en principe, répertoriés dans la base de données IQOA - murs mais dans celle des ponts en tant qu'éléments d'appui de type culée.



6.3 - L'importance de l'ouvrage

Critère retenu : Le coût de la réparation ou du remplacement du mur va dépendre de la surface de parement vue et de la hauteur maximale. Trois seuils de surface de parement vue :

- **surface inférieure ou égale à 200 m² ;**
- **surface comprise entre 200 m² et 500 m² ;**
- **surface supérieure à 500 m².**

Critère aggravant : L'importance de la hauteur est considérée comme un critère aggravant à partir de 5 m (Nota) :

- **hauteur comprise entre 5 et 8 m ;**
- **hauteur supérieure à 8 m.**

Nota : Dans le cas de murs à hauteur très variable, il peut être judicieux de tronçonner le mur.

6.4 - L'impact sur le niveau de service

Critère retenu : L'impact potentiel sur le niveau de service (arrêt ou diminution du trafic) pendant les travaux de réparation ou de remplacement de l'ouvrage sur l'exploitation de l'itinéraire et sur la zone affectée par la ruine. Trois catégories sont considérées :

- **impact faible ;**
- **impact moyen ;**
- **impact fort.**

Pour évaluer ces impacts, on peut notamment considérer les éléments d'appréciation suivants :

- **l'éloignement des voies par rapport au mur** – Un éloignement important et une hauteur faible de soutènement peuvent éventuellement éviter la fermeture de l'ensemble des voies circulées, moyennant des dispositions assurant la sécurité du trafic.
- **la possibilité et l'importance, en terme d'exploitation, d'une déviation de la section de route** où est situé l'ouvrage – Plusieurs routes sont éventuellement concernées pour dévier le trafic.
- **la sensibilité socio-économique des constructions situées dans la zone affectée** par l'effondrement éventuel de l'ouvrage : habitations, écoles, terrains de sport, etc.
- **la présence d'autres équipements d'importance significative** qui seraient affectés par la ruine d'un mur, tels que des réseaux d'assainissement, d'AEP, d'énergie, telecom, etc.



6.5 - Évaluation du niveau de conséquences

Le système de notation du Tableau 7 est utilisé pour évaluer les conséquences : $C = c1 + c2 + c3 + c4$.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

| Importance de l'itinéraire | | | | | |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--|-------|
| c1 | Type de mur | | | | |
| | Amont – protège la voie | Aval – soutient la voie | Amont et aval ⁷³ | | |
| | +2 | +3 | +5 | | |
| Importance du trafic | | | | | |
| c2 | Trafic < 15 000 v/j | 15 000 v/j < T < 35 000 v/j | 35 000 v/j < T < 80 000 v/j | T > 80 000 v/j | |
| | 0 | +2 | +3 | +5 | |
| Importance de l'ouvrage | | | | | |
| c3 | Surface < 200 m ² | 200 < S < 500 m ² | Surface > 500 m ² | Critère aggravant : Hauteur importante du mur | |
| | | | | Entre 5 et 8 m | > 8 m |
| | 0 | +2 | +3 | +1 | +2 |
| Impacts sur le niveau de service | | | | | |
| c4 | Faibles | | Moyens | Forts | |
| | 0 | | +2 | +4 | |

Tableau 7 : Système de notation relatif au niveau des conséquences

⁷³ Cas de murs situés entre deux routes ou voies, à l'intérieur d'un lacet, etc.

Chapitre 7

Étape 6 : Évaluation du niveau de risque

7.1 - Évaluation du niveau global de chaque aléa

Chaque aléa est évalué au moyen de critères en additionnant les « points » donnés pour chacun d'eux, puis classé en trois niveaux (faible, moyen et fort). Le Tableau 8 renseigne sur les niveaux d'aléas.

| Note des Aléas | A1 | A2 | A3 | Niveaux d'Aléas |
|----------------|-------|-------|-------|-----------------|
| $A \leq$ | 16 | 31 | 10 | Faible |
| $< A \leq$ | 16-32 | 31-62 | 10-20 | Moyen |
| $A >$ | 32 | 62 | 20 | Fort |

Tableau 8 : Niveaux d'aléas

Exemple : variation de cotation de l'Aléa « Résistance en pied défailante » (A3)

Le mur considéré n'a pas fait l'objet de travaux en pied ($a_{31}=0$), présente une forte pente en aval (critère aggravant de a_{32} , soit +3), avec des signes de ravinement avérés (critère aggravant de a_{33} , soit +6). Par contre les notes IQOA en contrebas du mur, sur la zone d'influence (soit finalement $a_{32}=6+3$) et celle sur le drainage n'ont pas été renseignées (soit $a_{33}=+3 +6$). Dans le cadre de la « procédure rapide », on obtient un aléa de niveau moyen pour la résistance en pied.

Si maintenant, une nouvelle visite de l'ouvrage (« procédure plus longue ») permet de lever les incertitudes, on pourrait dans le cas le plus favorable descendre à un niveau faible, mais dans le cas le plus défavorable, monter à un niveau de risque fort !

| Cotation / Aléas | a31 | a32 | a33 | Total | |
|--|-----|-------|-------|-------|--------|
| « Procédure rapide » | 0 | +6 +3 | +3 +6 | 18 | Moyen |
| « Procédure plus longue » Plus favorable | | 0 +3 | 0 +6 | 9 | Faible |
| « Procédure plus longue » Moins favorable | | +8 +3 | +4 +6 | 23 | Fort |

7.2 - Évaluation du niveau global de chaque vulnérabilité

Comme pour les aléas, chaque vulnérabilité est évaluée en additionnant les « points » donnés pour chaque critère, puis classée selon trois niveaux (faible, moyen, fort). Le Tableau 9 renseigne sur le niveau des vulnérabilités.

| Note des Vulnérabilités | V1 | V2 | V3 | Niveaux des Vulnérabilités |
|-------------------------|-------|-------|-------|----------------------------|
| $V \leq$ | 20 | 14 | 23 | Faible |
| $< V \leq$ | 20-40 | 14-28 | 23-46 | Moyen |
| $V >$ | 40 | 28 | 46 | Fort |

Tableau 9 : Niveaux de vulnérabilité

Exemple : variation de cotation de la vulnérabilité à la « Résistance structure défaillante » (V1)

Le mur considéré, haut de 6 mètres, présente des défauts de parement étendus (v11.3=+5) et la reprise de bétonnage visible semble peu soignée (v11.2=+5). L'âge de l'ouvrage n'est pas renseigné et les dimensions de l'ouvrage ne sont pas connues a priori. Dans le cadre de la « procédure rapide », on obtient une vulnérabilité de niveau fort pour la « résistance structure défaillante ».

Dans le cadre de la « procédure plus longue », l'âge (36 ans), ainsi que des données sur les dimensions du mur (épaisseur de 22 cm en tête du voile et de 55 cm à sa base) sont renseignés dans le dossier de l'ouvrage exécuté (DOE), ce qui permet de lever les incertitudes, entraînant la chute du risque d'un niveau fort à moyen.

| Cotation / Vulnérabilités | v11.1 | v11.2 | v11.3 | v12.1 | v12.2 | v13 | v14 | v15 | Total | Niveau |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-------|--------|
| « Procédure rapide » | +2 | +5 | +5 | +3 | +4 | +5 | +8 | +10 | 42 | Fort |
| « Procédure plus longue » Accès DOE | 0 | | | 0 | 0 | +2 | | | 30 | Moyen |

7.3 - Évaluation du niveau de criticité

Nous avons considéré trois types de rupture, qui conduisent à différents scénarios (Figure 20) :

1) La perte de stabilité externe, conduisant au poinçonnement/renversement ou au glissement du mur sur sa base, qui peut être favorisée par :

- des **aléas**, c'est-à-dire des conditions d'exposition et d'utilisation, dont :
 - des contraintes excessives sur le sol de fondation, qui correspond à l'aléa « Augmentation des sollicitations sur le mur » (§ 4.2) ;
 - une modification de l'environnement modifiant la résistance du sol, que traduit l'aléa « Résistance en pied défaillante » (§ 4.3).
- des **vulnérabilités** de l'ouvrage par rapport à ces aléas, ayant pour origine son état ou sa conception et traduisant son comportement structural :
 - > une poussée des terres sous-estimées (vulnérabilité « Augmentation des sollicitations sur le mur » - § 5.2),
 - > une perte de résistance au pied de l'ouvrage (vulnérabilité « Résistance défaillante en pied » - § 5.3).

2) La perte de stabilité interne, entraînant la rupture de l'ouvrage, qui peut être favorisée :

- des **aléas**, conduisant à la perte de résistance de l'ouvrage (aléa « Dégradation des matériaux constitutifs » - § 4.1) ;
- des **vulnérabilités** de l'ouvrage par rapport à ces aléas en raison de défauts de conception de l'ouvrage ou d'une sensibilité accrue en raison de l'état du mur (vulnérabilité « Dégradation des matériaux constitutifs » - § 5.1).

3) La perte de stabilité globale, qui correspond à un phénomène de grand glissement, et n'est pas propre à l'ouvrage. Elle n'est pas traitée dans ce guide, mais certains points d'alerte sont présentés pour aider le gestionnaire à l'identifier.

Nota : Nous n'avons pas distingué la vulnérabilité locale (protection conception) de celle globale (état détérioré).

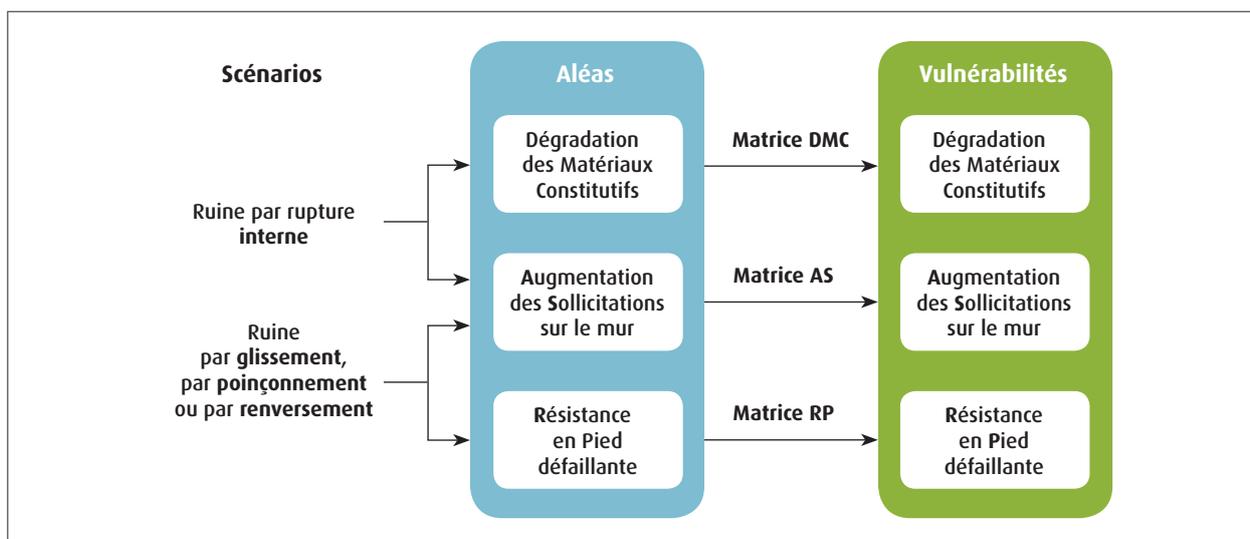


Figure 20 : Les différents scénarios considérés

Démarche pour déterminer le niveau de criticité :

1. **L'estimation des matrices de criticité élémentaire pour chaque binôme aléa/vulnérabilité :** le niveau de criticité résulte du croisement de l'aléa et de la vulnérabilité, on obtient ainsi : les matrices de criticité « DMC » (Dégradation des Matériaux Constitutifs), « AS » (Augmentation des Sollicitations sur le mur) et « RP » (Résistance défailante en Pied) en utilisant le Tableau 10.

| 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 élevée |
| | Fort | Criticité Moyenne | Criticité élevée | Criticité élevée |

Tableau 10 : Matrice de criticité par scénario

2. **Estimation de la criticité pour chaque scénario,** obtenue en appliquant le Tableau 11.

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

Tableau 11 : Niveaux de criticité pour chaque scénario de ruine

Comme présenté sur la figure 20, pour le scénario «Rupture Interne», on croise la criticité élémentaire « DMC » (Dégradation des Matériaux constitutifs) et la criticité élémentaire « AS » (Augmentation des sollicitations sur le mur). Pour le scénario «Rupture Externe» (glissement, poinçonnement, renversement), on croise la criticité élémentaire « AS » et la criticité élémentaire « RP » (Résistance en Pied défailante).

7.4 - Évaluation du niveau de conséquences

Trois niveaux de conséquences sont définis dans le Tableau 12 :

| Conséquences - $C = c1 + c2 + c3 + c4$ (selon le Tableau 7) | |
|---|--------------------------|
| Note des conséquences | Niveaux des conséquences |
| $C < 4$ | Faible |
| $4 < C < 12$ | Moyen |
| $C > 12$ | Elevé |

Tableau 12 : Niveaux de conséquences

7.5 - Évaluation du niveau du risque

1. L'évaluation du risque pour l'ouvrage est réalisée selon deux étapes :

L'estimation du niveau de risque pour chaque scénario, résulte du croisement du niveau de criticité et celui des conséquences selon le Tableau 13, la composante technique n'est plus le seul paramètre de décision, la valeur socio-économique du mur intervient pour l'estimation du niveau de risques et donc la classification des ouvrages.

| Niveau de risque du scénario | | Niveau de conséquences | | |
|------------------------------|--------|------------------------|---------------|--------------|
| | | Faible | Moyen | Élevé |
| Niveau de criticité | Faible | Risque Faible | Risque Faible | Risque Moyen |
| | Moyen | Risque Faible | Risque Moyen | Risque Fort |
| | Elevé | Risque Moyen | Risque Fort | Risque Fort |

Tableau 13 : Niveaux de risque par scénario

2. L'estimation du niveau de risque pour l'ouvrage : les 2 scénarios de ruine (Figure 20) sont au même niveau et indépendants, par contre le risque est d'autant plus grand, statistiquement parlant, lorsqu'on a un cumul de niveaux de risque. Il s'agit ici de pouvoir classifier les ouvrages (Tableau 14).

| Niveau de risque de 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 |

Tableau 14 : Niveaux de risque de l'ouvrage

Éléments de traitement des risques

La méthodologie, d'analyse des risques, participe à la gestion globale d'un patrimoine ou d'une partie de patrimoine face à un risque identifié, mais peut également constituer un outil d'aide à la gestion d'un ouvrage donné.

La gestion grâce à l'analyse des risques simplifiée est complémentaire de celle du classement IQOA. Ces deux classements sont supposés à jour : l'analyse des risques est un processus itératif constamment actualisé et optimisé en fonction de l'évolution des données utilisées (cotations IQOA, âge, typologie...) et de l'efficacité des actions entreprises.

Dans tous les cas, il appartient au gestionnaire de fixer la politique de surveillance de son patrimoine et de décider des éventuelles mesures d'exploitation que l'état du mur de soutènement peut nécessiter.

8.1 - Sélection des risques

A l'issue de cette analyse, le gestionnaire dispose pour chaque ouvrage d'un niveau de risque. Ce dernier oriente le gestionnaire vers les actions à entreprendre. Cette sélection des risques est décrite dans la Figure 21, et dépend de l'étendue de la procédure appliquée :

- la « **Procédure rapide** », où certains critères ont été évalués comme « aucune information » ou « non évalué ⁷⁴ », faute d'obtention rapide de l'information ;
- la « **Procédure plus longue** », permettant d'évaluer plus finement ces critères non déterminés en première instance, en recherchant certaines données, comme par exemple, celles contenues dans le dossier d'ouvrage ⁷⁵.

8.1.1 - Inspection détaillée

L'inspection détaillée est définie dans le fascicule 2 de l'ITSEOA [10] et dans le guide méthodologique « IQOA-Murs » [7]. En résumé, elle doit constituer un « bilan de santé » de l'ouvrage au travers d'un examen visuel ⁷⁶, et le cas échéant être complétée par des auscultations ou des mesures et donner lieu à un compte-rendu détaillé.

Cette inspection détaillée peut être orientée par les résultats de l'analyse des risques simplifiée.

Concernant les murs en eau, afin de lever les incertitudes au niveau des fondations, l'inspection devra être complétée par une visite subaquatique, réalisée par une équipe de plongeurs et pourra se baser sur l'application du fascicule 10 de l'ITSEOA sur les fondations en site aquatique ⁷⁷.

⁷⁴ Dans le cas d'une évaluation selon l'IQOA.

⁷⁵ Il peut être instructif de se référer à des dossiers d'ouvrages similaires et réalisés durant la même période.

⁷⁶ Dans le cas d'ouvrages du réseau routier national, l'inspection doit être dirigée par un agent ayant suivi une formation qualifiante de chargé d'études en inspection d'ouvrage, que ce soit en site terrestre ou sub-aquatique. [10]

⁷⁷ Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Fascicule 10 - Fondations en site aquatique. Sétra, Août 2013, 100 p.

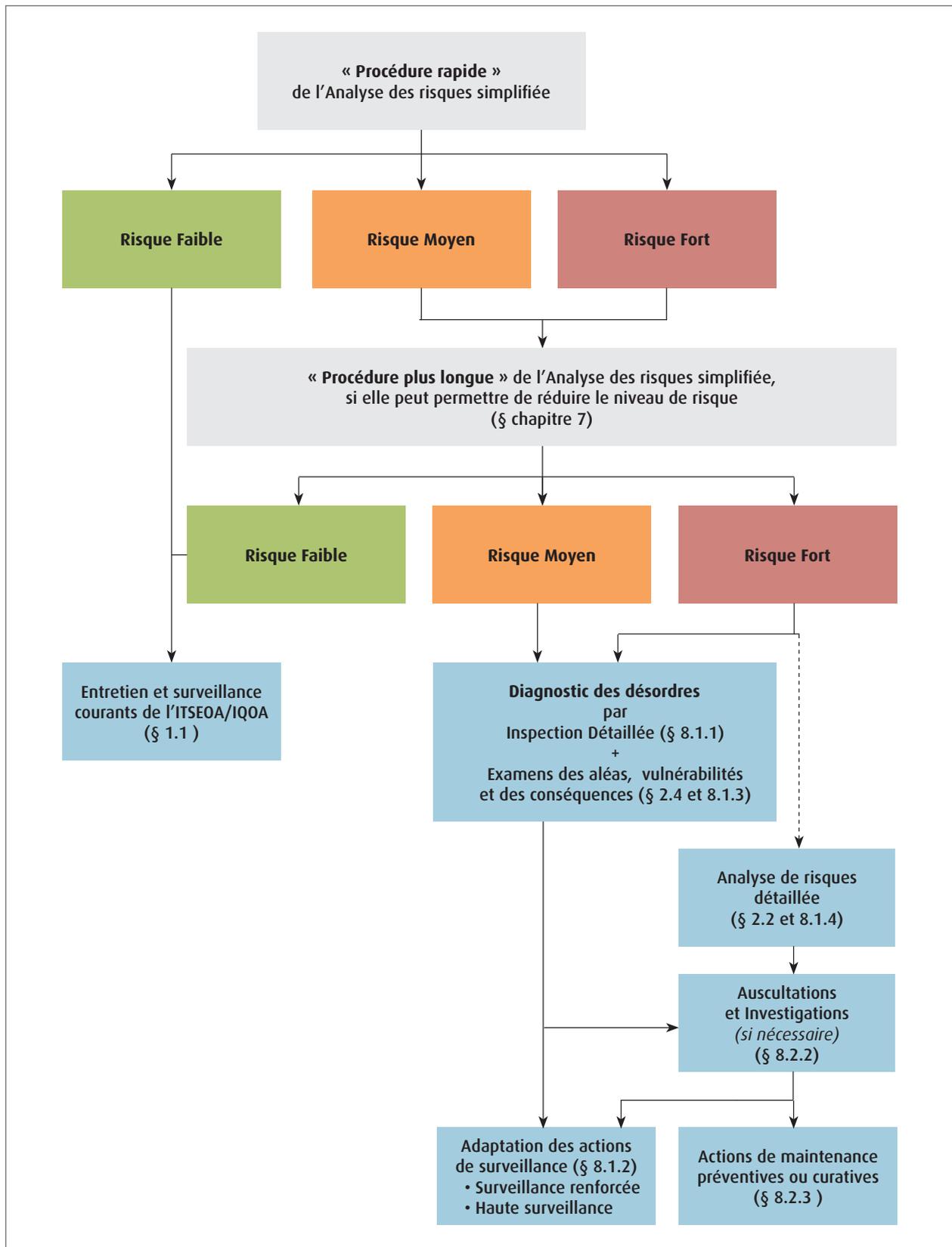
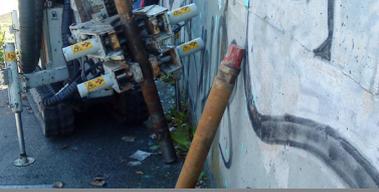


Figure 21 : Organigramme du traitement du risque qui détaille l'organigramme précédent (Figure 3)



8.1.2 - Les actions de surveillance

En fonction de la présence de désordres, d'aléas ou de vulnérabilités spécifiquement identifiés comme prépondérants pour un ouvrage, des modalités de surveillance particulières doivent être appliquées au cas par cas, temporairement ou définitivement en fonction de la possibilité de mettre en œuvre ou non des actions de maintenance :

- **modifications de la périodicité** des actions de surveillance prévues par l'ITSEOA ;
- **instrumentation** (mesures de déplacements, d'angles, etc.) ;
- **prélèvements pour analyses**, etc.

Le gestionnaire doit appliquer les mesures relatives à la « surveillance renforcée », notamment lorsque le mur est identifié à risque fort, et à la « haute surveillance »⁷⁸ si l'état défectueux est avéré et qu'il entraîne un risque de rupture brutale et un danger pour les usagers. Ces mesures sont définies dans le fascicule 03 de l'ITSEOA [11].

8.1.3 - Examens des aléas, des vulnérabilités et des conséquences

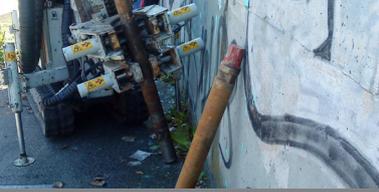
Sur un ouvrage donné, l'application d'une méthode d'analyse des risques permet d'identifier, tant au niveau des aléas que des vulnérabilités, des points de faiblesse dont il est alors parfois possible de diminuer l'occurrence ou l'importance des conséquences par des actions de maintenance préventive adaptées, comme l'entretien des barbacanes.

8.1.4 - Analyse des risques détaillée

Si la méthodologie générale introduit la possibilité de réaliser une **analyses des risques détaillée**⁷⁹ (cf. § 2.3.5 de [1]) à l'issue de l'application de la méthodologie simplifiée (§ 2.2), il convient de considérer que, dans les cas les plus fréquents, l'analyse des risques simplifiée combinée avec un relevé par un spécialiste de l'état visuel des désordres de l'ouvrage permet d'envisager sur des suites pertinentes. Ainsi l'analyse détaillée des risques doit rester très exceptionnelle.

⁷⁸ La « haute surveillance » n'est pas toujours réalisable en raison de rupture fragile du mur, pour laquelle l'instrumentation ne pourra pas fournir l'information d'alerte.

⁷⁹ L'analyse détaillée proposée dans ce guide repose essentiellement sur une recherche de renseignements dans le dossier d'ouvrage, mais en cas d'insuffisance ou d'absences d'informations, il peut être instructif de se référer à des dossiers d'ouvrages similaires et réalisés dans la même période.



8.2 - Traitement du risque

8.2.1 - Deux axes de traitement du risques

Dans le cadre du traitement du risque, on peut considérer deux axes de traitement du risque pour les ouvrages à risque fort :

- **l'évitement ou la réduction de l'impact des aléas** identifiés comme importants pour l'ouvrage considéré, lorsque cette solution est possible (Nota) ;
- **un examen des vulnérabilités et des solutions structurales** permettant de les corriger.

Nota : S'il est bien évidemment difficile d'agir sur l'aléa relatif aux conditions d'exploitation de la route, des actions sont possibles par exemple face à une augmentation des pressions hydrostatiques à l'amont d'un mur en remettant, par exemple en état le drainage.

8.2.2 - Les investigations

Si elles se révèlent nécessaires, les investigations visent à permettre un diagnostic fiable de l'ouvrage et, le cas échéant, la production d'un Avant-Projet de Réparation d'Ouvrage d'Art (APROA).

Elles peuvent correspondre à (liste non exhaustive) :

- des études de **caractérisation des matériaux** (localisation précise des aciers, caractéristiques dimensionnelles et mécaniques, états de dégradation). Elles peuvent nécessiter la mise en œuvre de radar de structure, de ferroskan⁸⁰, de prélèvements, d'analyses physico-chimiques des matériaux (mur, remblai ...) et des eaux d'écoulement, d'essais mécaniques...
- des études de **caractérisation de la zone d'influence** (caractéristiques géotechniques, des écoulements ...).

Le Tableau 15 présente en fonction du type d'**essais d'investigation**, les informations obtenues. Un certain nombre de ces essais sont présentés sous forme de fiche dans les cahiers Interactifs « Auscultation des ouvrages d'art » réalisés par l'IFSTTAR et le Cerema [16].

Le Tableau 16 propose des exemples d'**instrumentation de l'ouvrage**, pour lesquels il faut être vigilant à l'adéquation entre la plage de mesure visée et la sensibilité du matériel utilisé.

⁸⁰ Ces méthodes sont non destructives et complémentaires. Elles permettent, sous certaines conditions, de détecter la présence d'armatures, d'estimer leurs positions, leur diamètre ainsi que leurs enrobages dans le béton. Leur principe est basé sur la propagation d'ondes électromagnétiques qui se réfléchissent sur des hétérogénéités au sein du matériau ausculté.



| Type d'essais | Informations obtenues |
|--|---|
| Essais directs | |
| Auscultation Radar ⁸¹ depuis le parement aval | <ul style="list-style-type: none"> • enrobage • épaisseur de voile • position des armatures dans le voile sur une certaine profondeur |
| Auscultation sonique ⁸² de surface | <ul style="list-style-type: none"> • homogénéité du béton |
| Essais mécaniques <i>in-situ</i> (pressiomètre, pénétromètre) | <ul style="list-style-type: none"> • caractéristiques des sols |
| Auscultation Impact Echo | <ul style="list-style-type: none"> • épaisseur de voile |
| A partir d'une carotte (Nota) ou d'un prélèvement | |
| D'armatures avec essais chimiques ⁸³ , essais de traction, analyse métallographique | <ul style="list-style-type: none"> • section • résistance à la corrosion des aciers • composition • caractéristiques mécaniques |
| De béton armé avec des essais mécaniques | <ul style="list-style-type: none"> • caractéristiques mécaniques du béton • nature et section des aciers |
| De béton au niveau de la reprise de bétonnage | <ul style="list-style-type: none"> • état du béton, position et section des armatures côté remblai |
| Dans le voile avec profils de pénétration des chlorures et des sulfates, profondeur de carbonatation | <ul style="list-style-type: none"> • risque de corrosion des aciers |
| De béton avec essais de résistivité | <ul style="list-style-type: none"> • porosité du béton en lien avec la pénétration des agents agressifs |
| De sol avec essais d'identification | <ul style="list-style-type: none"> • nature des sols |
| De sol avec essais mécaniques (triaxial ou boîte de cisaillement) | <ul style="list-style-type: none"> • caractéristiques mécaniques de cisaillement ⁸⁴ des sols |
| De sol et d'eau avec analyses chimiques ⁸⁵ | <ul style="list-style-type: none"> • agents agressifs dans l'eau ou dans les sols |
| Autres | |
| Excavation limitée en pied d'ouvrage (saignée de faible largeur perpendiculaire au mur) | <ul style="list-style-type: none"> • hauteur du voile • présence de bêche • présence d'un patin |
| Percement du béton | <ul style="list-style-type: none"> • épaisseur de voile |
| Fil à plomb | <ul style="list-style-type: none"> • mesure de dévers |
| Relevés topographiques | <ul style="list-style-type: none"> • mouvements du parement • mouvements du sol |

Tableau 15 : Exemples de types d'essais d'investigation avec la nature de l'information obtenue

Nota : Le lieu de carottage doit être choisi avec soin, et à moins que l'on ne souhaite tester les armatures, il est préférable d'éviter de les sectionner car elles assurent la majorité de la résistance à la flexion. Néanmoins il faut garder à l'esprit que les essais actuels ne permettent pas toujours de les positionner avec soin, d'autant plus dans les parties sensibles comme l'intersection voile-semelle ou côté amont du voile puisque les mesures se font à partir du parement aval (cf. Auscultation radar).

⁸¹ Son efficacité dépend de l'épaisseur et de la densité de ferrailage, et de la profondeur d'investigation ainsi que de la résolution de la fréquence.
⁸² Efficace sur une profondeur limitée.

⁸³ Dont les essais de mesure de la profondeur de carbonation à la phénolphthaléine décrit dans la fiche B2-2 (IFSTAR- Cerema) [19].

⁸⁴ La cohésion « c » et l'angle de frottement interne « φ ».

⁸⁵ FD P18-011 « Béton — Définition et classification des environnements chimiquement agressifs — Recommandations pour la formulation des bétons ».



| Type d'instrumentation | Informations obtenues |
|---|---|
| Piézomètre (ouvert ou fermé) | • niveau de la nappe ou pression interstitielle |
| Pose de nivelles ou niveaux à bulle | • inclinaison du parement |
| Appareil de mesure de déformation tridimensionnelle (théodolite, méthode « 3D » géomètres...) | • mouvements du parement |
| Pose d'inclinomètres | • mouvements du parement ⁸⁶ • mouvements du sol amont ou aval |
| Fissurométrie par jauges ou extensomètres | • mesures dans le temps de l'ouverture et la fermeture des fissures |

Tableau 16 : Exemples de types d'instrumentation avec la nature de l'informations obtenues

8.2.3 - Les actions de maintenance curatives ou préventives

Les suites à donner ne sont pas systématiques et leur opportunité est à apprécier par le gestionnaire en particulier en regard de l'existence et/ou de l'évolution éventuelle de désordres, de la possibilité de rupture brutale vis-à-vis des aléas et des vulnérabilités identifiées par l'analyse simplifiée. Elles peuvent porter sur une adaptation ou un renforcement des actions de surveillance ou encore sur la mise en œuvre d'investigations pouvant par la suite déboucher sur des actions de maintenance curatives ou préventives.

L'action de maintenance la plus fondamentale est l'**entretien courant**. Cette action peut permettre par exemple de s'assurer de l'état de fonctionnement du dispositif de drainage. Cet entretien courant est obligatoire pour tous les ouvrages et *a fortiori* pour les ouvrages présentant un risque fort. Son importance ne doit pas être négligée.

Les **actions de maintenance curatives** découlent généralement de la constatation des désordres, dont l'orientation est donnée à l'issue de l'inspection détaillée. Cette dernière constitue donc un outil fondamental pour établir un pré-diagnostic, pour définir des actions de surveillance adaptées, des investigations éventuelles et des actions de maintenance. Les ouvrages identifiés comme présentant un risque fort doivent légitimement faire l'objet d'un tel examen par un spécialiste.

Indépendamment de l'existence de désordres visibles, les **actions de maintenance préventives** sont difficiles à appréhender tant en ce qui concerne leur définition que leur opportunité ; la méthodologie d'analyse des risques est alors d'un apport considérable. En quantifiant les criticités des ouvrages, elle permet d'identifier les axes de maintenance préventive.

Des **actions de maintenance curatives et préventives** sont à envisager. Elles ont pour préalable indispensable la réalisation d'un diagnostic des désordres visibles sur la base d'une inspection détaillée mais également d'un examen des aléas et vulnérabilités et de la faisabilité de les traiter. Un diagnostic définitif peut également s'appuyer sur des investigations complémentaires et un suivi instrumental. A l'issue de ce diagnostic, la production d'un Avant-Projet de Réparation d'Ouvrages d'Art (APROA) peut se révéler nécessaire.

Les actions de maintenance curatives ou préventives (Tableau 17) peuvent être, non exhaustivement :

- le **renforcement de la structure** en vue de pallier des insuffisances constatées (clous, tirants, contreforts, etc.) ;
- la **réduction de l'impact des aléas** (réseau de drainage, passivation d'aciers, amélioration de la gestion des eaux pour limiter l'impact du salage et/ou les arrivées d'eau accidentelles, etc.) ;
- le **traitement de vulnérabilités**.

Ces différentes actions sont parfois conjuguées, selon les opportunités foncières, les pathologies, le niveau de risque...

⁸⁶ Seulement si le tube est placé à l'extérieur contre le parement, ou encore scellé dans ce dernier, car les déformations sont faibles et de l'ordre de précision des mesures.



| Actions visées | Types d'action |
|--|---|
| Interventions côté amont du mur pour réduire les poussées | |
| Amélioration du dispositif d'évacuation des eaux, côté amont ⁸⁷ , et du drainage interne | <ul style="list-style-type: none"> • imperméabilisation des surfaces • recueil et évacuation contrôlés des eaux • création de barbacanes (carottage) • drains sub-horizontaux selon les conditions hydrogéologiques et les contraintes d'aménagement du site • tous systèmes 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 allégés⁸⁸) • éloignement de la voie portée |
| Diminution de la hauteur des remblais | <ul style="list-style-type: none"> • aménagements en terre-plein piétonniers en arrière |
| Interventions côté amont du mur pour s'opposer au glissement, au renversement ou au basculement | |
| Diminution de l'inclinaison du talus côté aval | <ul style="list-style-type: none"> • réalisation de soutènements étagés • en s'intéressant aux zones d'influence • en effectuant un clouage en partie supérieure |
| Confortement des fondations | |
| Modification des fondations | <ul style="list-style-type: none"> • élargissement de la semelle, généralement du patin • réalisation d'une longrine avec des micropieux • reprise en sous-œuvre en utilisant la technique du jet-grouting |
| Renforcement du sol de fondation ⁸⁹ | <ul style="list-style-type: none"> • différents procédés d'améliorations (soil-mixing, jet grouting, etc.) |
| Renforcement du soutènement pour s'opposer au renversement | |
| Renforcement du soutènement | <ul style="list-style-type: none"> • clouage • liaisonnement par « tirants d'enserrement »⁹⁰ • mise en place de butons entre deux murs de part et d'autre de la voie |

Tableau 17 : Exemples d'actions de maintenance curatives ou préventives

⁸⁷ Surtout en présence de traces d'humidité sur le parement.

⁸⁸ Copeaux de pneu, pouzzolanes, remblais de polystyrène, tous procédés pour alléger le sol (par exemple, avec des bidons de 200 l en plastique vides liaisonnés entre eux par un remplissage en coulis de ciment en agencement en nid d'abeille).

⁸⁹ Très rarement, quand les enjeux sont très importants et dépassent le montant financier d'une déconstruction.

⁹⁰ Un tirant d'enserrement relie deux murs en opposition de part et d'autre d'un remblai.

Annexes

Annexe 1 - Autres méthodes de gestion des ouvrages pour la maîtrise du risque

Il existe d'autres méthodes de gestion des ouvrages pour la maîtrise du risque :

- **La méthode départementale** couvre différents aspects de la gestion des ouvrages, comprenant l'évaluation de l'état apparent composée de la surveillance périodique des ouvrages et de leur classification selon leur état apparent, intégrant leur importance technique et socio-économique par la détermination des indices de priorité, et fournissant une estimation macro-économique des coûts de maintenance du patrimoine pour l'évaluation des réparations.
- **La méthode VSC** (Visites Simplifiées Comparées) s'appuie sur trois analyses indépendantes conduisant à l'attribution de deux indices : un indice d'état traduisant l'état global de l'ouvrage et composé d'un indice d'état mécanique (à partir d'observations visuelles de désordres) et d'un indice d'usage (capacité de l'ouvrage à assurer sa fonction d'usage), et un indice stratégique (importance de l'ouvrage selon, entre autre, les enjeux politiques et financiers). Le croisement de ces indices attribués à chaque ouvrage doit permettre de classer les priorités et de définir une première programmation des interventions à court, moyen et long terme.

Annexe 2 - Les matériaux constitutifs

Les armatures

Une attention particulière doit être apportée aux armatures, à la fois au niveau de la section totale, des diamètres choisis, des longueurs de recouvrement, de leur disposition (nombre de lits et espacement), ainsi que des reprises de bétonnage (Figure 22). Certains murs ne comportent que des armatures en nappes arrières du voile (côté amont).

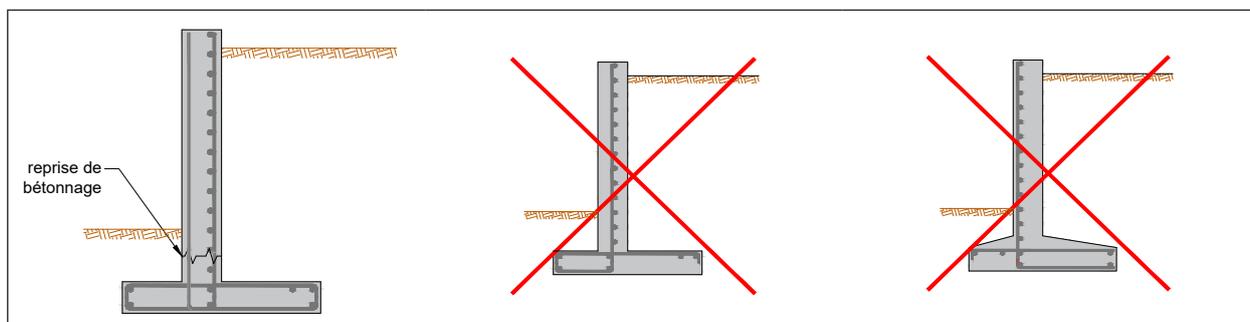


Figure 22 : Exemple de ferrailage des murs de soutènement de type 6
(en trait plein les armatures verticales, les points représentant les armatures horizontales)

Le remblai

Les caractéristiques auxquelles il faut être attentif pour les **matériaux de remblai** sont :

- leurs **performances mécaniques** et plus spécifiquement l'angle de frottement interne ;
- leur **aptitude à la mise en œuvre** (compactage⁹¹), dépendant de leur granulométrie et pour certains de leur teneur en eau ;
- l'adéquation de la granulométrie⁹² **pour empêcher le colmatage** des drains/barbacanes ;
- leur **capacité à résister au gel**⁹³ ou à assurer le **drainage des eaux d'infiltration** ;
- leurs **caractéristiques chimiques et électrochimiques**, liées notamment à la protection de l'environnement et à la durabilité de l'ouvrage et de ses constituants.

Un compactage inapproprié (prématuré, épaisseur de couches importantes, trop forte puissance, mauvais choix de l'engin de compactage) peut endommager le mur en générant des efforts de poussée supérieurs à ceux considérés pour le dimensionnement.

Annexe 3 - Les différentes sollicitations pour les murs de soutènement en béton armé sur semelle

Dans un premier temps, nous rappelons les principales forces qui sollicitent le mur (Figure 23) :

- le **pooids propre de la semelle** (W_{semelle}) ;
- le **pooids propre du voile** (W_{voile}) ;
- le **pooids d'un massif de terre** (W_1), délimité à l'aval par le mur lui-même et, à l'amont, par un plan vertical passant par l'extrémité arrière de la semelle, et considéré comme associé au mur ;
- le **pooids d'un massif de terre** (W_2), délimité à l'amont par le mur lui-même et, à l'aval, par un plan vertical passant par l'extrémité avant de la semelle, et considéré comme associé au mur ;
- la **résultante de la poussée des terres** (P) agissant sur le plan fictif, due au sol à l'arrière de l'écran fictif et à la surcharge ou à la charge d'exploitation⁹⁴. *La valeur de la poussée des terres (P) résulte des caractéristiques du sol (densité, cohésion⁹⁵ et angle de frottement interne) et de la hauteur du mur à soutenir, d'une éventuelle pente du talus par rapport à l'horizontale, de l'angle d'inclinaison du parement interne du mur par rapport à la verticale et des possibilités du mur à se déplacer pour mobiliser la poussée active. Elle s'applique au tiers inférieur du parement et son inclinaison va dépendre de la rugosité du mur en contact avec le sol ;*
- éventuellement la **poussée hydrostatique** agissant sur le voile, en cas d'absence ou de défaillance de dispositif pour recueillir et évacuer les eaux de ruissellement ou de nappe phréatique (Figure 9), le mur sera soumis à une poussée hydrostatique (force horizontale s'appliquant sur le mur - Figure 11) ;
- la **résultante de la butée** (B) du terrain côté aval, généralement négligée car elle nécessite un déplacement important du mur pour la mobiliser et qu'on ne peut s'assurer de la pérennité de sa présence (par exemple en cas de travaux) ;
- la **réaction du sol d'assise** (R), à laquelle il convient d'ajouter éventuellement la pression hydrostatique due à la nappe phréatique ;
- la force représentant des **chocs** éventuels.

91 Le compactage a des effets antagonistes : il augmente la valeur de l'angle de frottement interne (effet positif) et le poids volumique du sol (effet négatif vis-à-vis du poinçonnement).

92 Il est conseillé d'utiliser des granulats perméables (sables et graviers) contenant un très faible pourcentage d'éléments fins (proportion forfaitaire de 10% d'éléments inférieurs à 80 μm [17]).

93 Le gel entraîne le gonflement du terrain d'assise et du terrain soutenu (augmentant ainsi la poussée des terres). Dans le cas de zones très sensibles au gel, il est préférable de prévoir une couche de remblai non gélif en contact avec le mur d'une épaisseur allant de 0,70 à 1 mètre [17]. Les profondeurs « hors gel » sont données dans l'annexe O de la norme NF P94-261.

94 La surcharge du remblai (qu'elle soit ponctuelle, uniforme, partielle, linéaire, d'exploitation), par le biais du sol remblai, vient augmenter la poussée du sol sur le parement.

95 Si le sol soutenu se révèle être cohérent, la valeur de la poussée peut être réduite mais par sécurité cette réduction n'est généralement pas prise en compte.

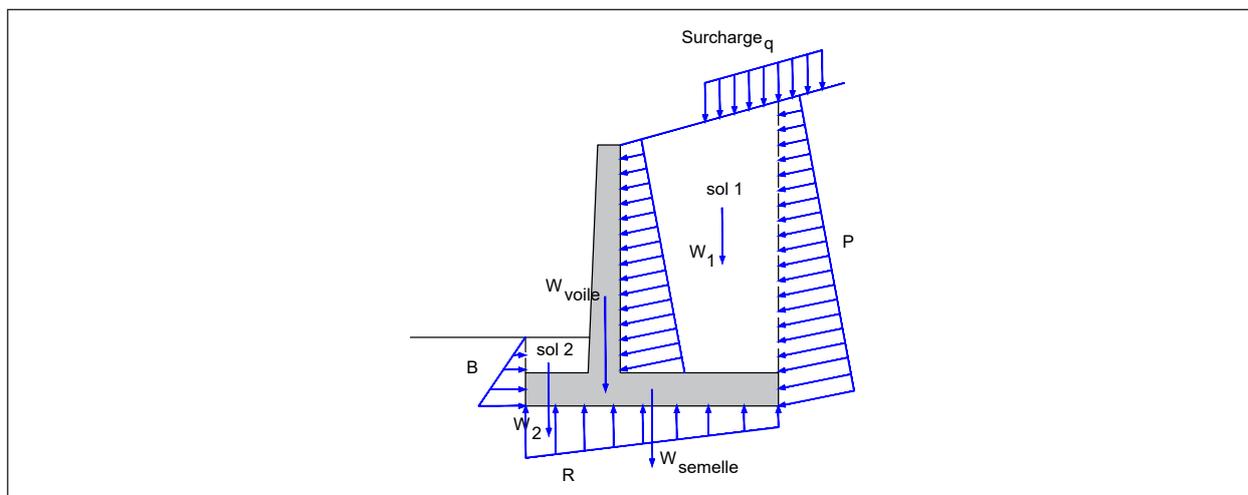


Figure 23 : Schéma simplifié des sollicitations agissant sur un mur en « T » (inspiré de [NF P 94-281])

Pour vérifier la stabilité de l'ouvrage, il convient de s'assurer (Figure 10) :

- de la **stabilité du mur au renversement** (Figure 10a), c'est-à-dire de l'équilibre des forces en présence, entre autre de l'absence d'une poussée et/ou d'une descente de charge trop importantes pour le système. Une autre cause de renversement peut être le tassement différentiel sous la semelle, provoqué par une résultante des forces trop excentrée au regard de la résistance⁹⁶ du sol de fondation ;
- de la **stabilité au glissement** (Figure 10b). Les forces s'opposant à ce déplacement sont celles d'adhérence et de frottement de la semelle⁹⁷ au contact du sol, et la butée lorsqu'elle n'est pas négligée. Afin d'améliorer la résistance au glissement, la semelle peut être inclinée ou posséder une bêche (Figure 5) ;
- de la **stabilité interne ou de l'absence de rupture structurale** (Figure 10c). Il s'agit majoritairement de vérifier que les armatures prévues (face tendue, jonction semelle-voile) sont capables de résister aux efforts de traction.

Nous rappelons que la **stabilité au « glissement d'ensemble »** (Figure 2) englobant l'ouvrage de soutènement, quel que soit son type, n'est pas traitée par cette analyse des risques.

Selon la stabilité étudiée, les forces en présence, suivant leur direction et leur orientation, peuvent être stabilisatrices ou au contraire déstabilisatrices.

⁹⁶ Quelques recommandations, si le sol de fondation est :

- pratiquement incompressible (roche), pas trop d'inquiétude sur l'excentrement admissible ;
- pas trop compressible (sable et gravier, marne compacte, argile raide), l'excentrement doit être contrôlé ;
- compressible (argile plastique) ou très compressible (vase), l'excentrement doit être très faible.

⁹⁷ Ces forces dépendent de la résultante des forces verticales et de la tangente à l'angle de frottement pris en considération (généralement l'angle de frottement interne du sol de fondation).

Annexe 4 - Les bassins versants

Définition⁹⁸ :

Le bassin versant associe à la fois un paysage, un relief et un cours d'eau. En effet, des lignes de crête (ou lignes de partage des eaux) délimitent une surface (fermée au regard de l'hydrogéologie), sur laquelle l'eau de pluie va ruisseler (et/ou s'infiltrer en fonction de la nature des terrains) le long du relief pour venir alimenter un cours d'eau (Figure 24a).

Modification d'un bassin versant : Certaines réalisations modifient le trajet des écoulements dans le bassin versant pouvant conduire à une diminution ou à une augmentation des débits (Figure 24b).

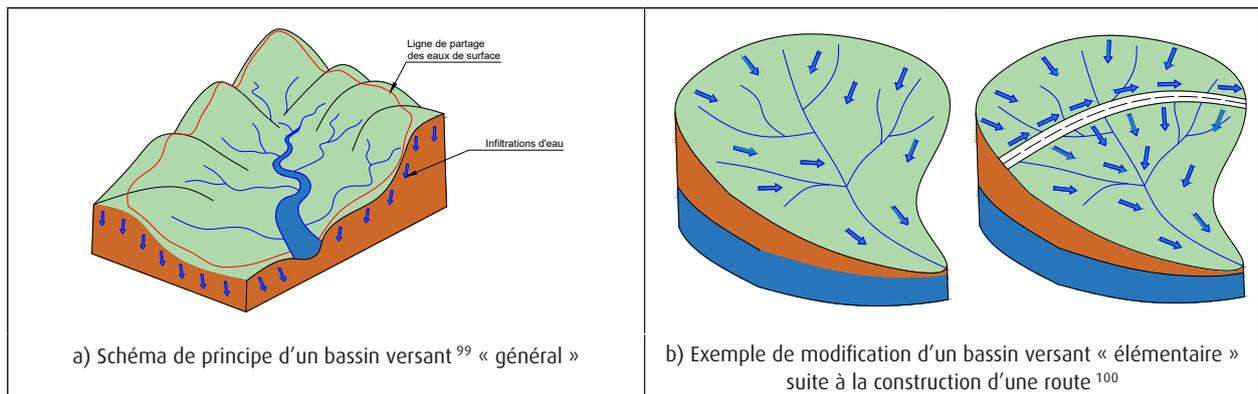


Figure 24 : Schémas de principe du fonctionnement d'un bassin versant

⁹⁸ Définition du Larousse : « unité géographique naturelle recevant les précipitations qui alimentent un cours d'eau ». (www.larousse.fr - consulté le 25/07/2017).

⁹⁹ Inspiré du site <http://massifdusud.com/bassins-versants/>, consulté en juillet 2017.

¹⁰⁰ Inspiré du site <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html> consulté en juillet 2017.

Annexe 5 - Fiche d'évaluation du niveau de risque

Référence de l'ouvrage :

Lieu :

Agent : Date :

Aléas

| Dégradation des matériaux constitutifs | | Augmentation des sollicitations | | Résistance en pied défailante | | | | |
|--|--|---------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------|-----|-------------|
| (Tableau 1) | | (Tableau 8) | (Tableau 2) | | (Tableau 8) | (Tableau 3) | | (Tableau 8) |
| a11 | | Total A1 | a21 | | Total A2 | a31 | | Total A3 |
| a12 | | | a22 | | | a32 | | |
| a13 | | Niveau A1 | a23 | | | Niveau A2 | a33 | |
| a14 | | | a24 | | | | | |
| | | | a25 | | | | | |
| | | | a26 | | | | | |
| | | | a27 | | | | | |
| | | | a28 | | | | | |

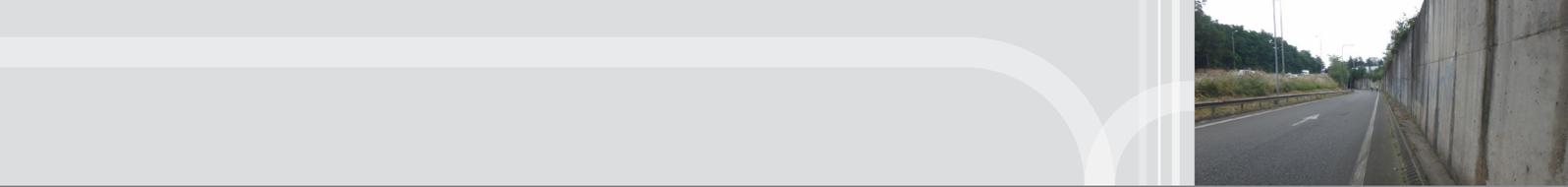
Vulnérabilités

| Dégradation des matériaux constitutifs | | Augmentation des sollicitations | | Résistance en pied défailante | | | | |
|--|--|---------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------|-------------|-----|-------------|
| (Tableau 4) | | (Tableau 9) | (Tableau 5) | | (Tableau 9) | (Tableau 6) | | (Tableau 9) |
| v11.1 | | Total V1 | v21 | | Total V2 | v31 | | Total V3 |
| v11.2 | | | v22 | | | v32 | | |
| v11.3 | | | Niveau V1 | v23 | | Niveau V2 | v33 | |
| v12.1 | | v24 | | | v34 | | | |
| v12.2 | | | | | v35 | | | |
| v13 | | | | | | | | |
| v14 | | | | | | | | |
| v15 | | | | | | | | |

Conséquences (Tableau 7 et Tableau 14)

| | | |
|----|--|----------|
| c1 | | Total C |
| c2 | | |
| c3 | | Niveau C |
| c4 | | |

| Niveau de criticité | | Niveau de risque | | |
|---|--|---|--|--------------------------------|
| Pour chaque binôme « aléa-vulnérabilité » (Tableau 10) | | Pour chaque scénario (Tableau 11) (Tableau 13) | | Pour l'ouvrage (Tableau 16) |
| Dégradation des matériaux constitutifs A1 - V1 | | Ruine par rupture Interne (A1-V1 x A2-V2) | | |
| Augmentation des sollicitations sur le mur A2 - V2 | | Ruine par rupture externe (A2-V2 x A3-V3) | | |
| Résistance en pied défailante A3 - V3 | | | | |
| | | | | |



Notations et symboles utilisés

| | |
|---------------|---|
| APROA | Avant-Projet de Réparation d’Ouvrage d’Art |
| CEI | Centre d’Entretien et d’Intervention des DIR |
| DDT(M) | Direction Départementale des Territoires (et de la Mer). |
| DIR | Direction Interdépartementale des routes |
| DOE | Dossier de l’Ouvrage Exécuté |
| DREAL | Direction Régionales de l’Environnement, de l’Aménagement et du Logement |
| IDP | Inspection Détaillée Périodique (§ 8.1.1) |
| IGN | Sigle associé à l’Institut national de l’information géographique et forestière français (anciennement « Institut géographique national ») |
| IQA | Image Qualité Ouvrage d’Art. Il s’agit de la méthodologie d’évaluation de l’état des ouvrages d’art du réseau routier national préconisée par l’ITSEOA. (§ 1.1) |
| ITSEOA | Instruction Technique pour la Surveillance et l’Entretien des Ouvrages d’Art (§ 1.1) |
| NE | Non évalué (IQA) |
| PPRI | Plan de Prévention des Risques d’Inondation |

Bibliographie

Guides techniques

- [1] Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art. Sétra, 2013, 92 p.
- [2] Analyse des risques appliquée aux viaducs à travées indépendantes en poutres précontraintes (VIPP). Sétra, 2010.
- [3] Analyse des risques appliquée aux ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie Terre armée®. Cerema, 2014.
- [4] Analyse des risques appliquée aux buses métalliques. Cerema, 2015.
- [5] Analyse des risques appliquée aux tranchées couvertes et aux tunnels creusés. Cerema, 2015.
- [6] ITSEOA (Instruction Technique de Surveillance et d'Entretien des Ouvrages) Fascicule 0 - Dispositions générales applicables à tous les ouvrages. Sétra, décembre 2010.
- [7] IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) - Murs, Murs de soutènement. *Guide méthodologique*, Sétra, 2005.
- [8] IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) - Murs, Murs de soutènement, Mur en béton armé encastré sur semelle, Type 6. Sétra, 2000.
- [9] ITSEOA (Instruction Technique de Surveillance et d'Entretien des Ouvrages) Fascicule 51 - Ouvrages de soutènement, Sétra, 2010.
- [10] ITSEOA (Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art) Fascicule 2 - Généralités sur la surveillance. Sétra, Décembre 2010, 60 p.
- [11] ITSEOA (Instruction Technique de Surveillance et d'Entretien des Ouvrages) Fascicule 3 - Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde. Sétra, décembre 2010.
- [12] Les ouvrages de soutènement - Guide de conception générale. Sétra, 1998, 154 p.
- [13] Diagnostioc de la gélivité d'un béton. Les collections de l'IFSTTAR, D1-2, IFSTTAR & Cerema, Auscultation des ouvrages d'art [En ligne]. Marne-la-Vallée : IFSTTAR, 2015, Cahiers Interactifs, Prochainement disponible sur le web : <http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1>.
- [14] Recommandations pour la prévention des désordres dus à a réaction sulfatique interne. *Guide technique, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées*. LCPC, août 2007.
- [15] Diagnostioc de corrosion du béton armé. Les collections de l'IFSTTAR, D1-1, IFSTTAR & Cerema, Auscultation des ouvrages d'art [En ligne]. Marne-la-Vallée : IFSTTAR, 2015 [consulté en septembre 2017], Cahiers Interactifs, Disponible en ligne : <http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1>.
- [16] IFSTTAR & CEREMA, Auscultation des ouvrages d'art [En ligne]. Marne-la-Vallée : IFSTTAR, 2015 [consulté en juillet 2017]. Cahiers Interactifs, CII1. Disponible en ligne : <http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/>.
- [17] La pathologie des murs de soutènement . LOGEIS Louis, Editions du Moniteur, Moniteur technique, 1982, 132 p.
- [18] Dictionnaire de Géologie . FOUCAULT Alain et RAOULT Jean-François. Dunod, 6^{ème} édition, 2006, 382 p.
- [19] Méthodes d'auscultation du matériau en place - Béton armé (durabilité) : Mesure de la profondeur de carbonatation. Les collections de l'IFSTTAR, B2-2, IFSTTAR & Cerema, Auscultation des ouvrages d'art [En ligne]. Marne-la-Vallée : IFSTTAR, 2015 [consulté en août 2017], Cahiers Interactifs, CII1. Disponible sur le web : <http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1>.
- [20] Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel. Guide technique, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées. LCPC, décembre 2003, 167 p.



Normes

AFNOR FD P18-011 « Béton — Définition et classification des environnements chimiquement agressifs — Recommandations pour la formulation des bétons », mars 2016.

AFNOR FD P18-326 « Béton – Zones de gel en France », août 2016.

AFNOR NF EN 206/CN « Béton – Spécification, performance, production et conformité – Complément national à la norme NF EN 206 », Décembre 2014.

AFNOR NF EN 1992-2 « Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – Partie 2 : Ponts en béton – Calcul et dispositions constructives », octobre 2005.

AFNOR NF P94-261 « Justification des ouvrages géotechniques – Normes d’application nationale de l’Eurocode 7 – Fondations superficielles », juin 2013.

AFNOR NF P94-281 « Justification des ouvrages géotechniques – Normes d’application nationale de l’Eurocode 7 – Ouvrages de soutènement – Murs », avril 2014.



Glossaire

Aléa : l'aléa est le phénomène à l'origine du risque, qui peut se produire ou non au cours de la vie de l'ouvrage. Il est important de noter que l'aléa est « incertain ».

Conséquences : les conséquences comptabilisent les dommages directs sur les ouvrages (et les coûts de réparation associés) et les vies humaines.

Criticité : la criticité est le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité.

Haute surveillance : mesure d'exception qui consiste à guetter l'apparition d'un signe faisant craindre la possibilité de défaillance à très court terme.

« **Procédure plus longue** » : afin de traiter rapidement un certain nombre d'ouvrage, cette méthode d'analyse des risques propose deux procédures, une rapide utilisant les informations immédiatement à disposition (par exemple grâce aux cotations IQOA), et la seconde « plus longue », nécessitant une nouvelle visite, une recherche d'informations (par exemple sur des sites internet), la consultation du dossier d'ouvrage, s'il est disponible.

« **Procédure rapide** » : cf. « Procédure plus longue ».

Risque : le risque est le danger éventuel, plus ou moins prévisible, qui peut affecter un projet.

Surveillance renforcée : mesure de surveillance mise en œuvre lorsque l'état d'un ouvrage le justifie, ou en cas d'incertitude sur l'origine, la nature et la cause de désordres ou lorsque l'ouvrage a un caractère innovant ou exceptionnel.

Vulnérabilité : la vulnérabilité est la sensibilité d'un ouvrage vis-à-vis de l'aléa. Cette vulnérabilité dépend de l'aléa proprement dit, mais aussi de l'ouvrage, car les ouvrages sont plus ou moins sensibles aux différents aléas.

© 2018 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement durable des territoires.

Le Cerema est un établissement public, créé en 2014 pour apporter un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre d'études et d'expertise, il a pour vocation de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, organismes de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination et suivi d'édition › Cerema Infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia : **Pascale Varache**

Mise en page › **Domigraphic** - 17 avenue Aristide Briand - 91550 Paray-Vieille-Poste

Illustration couverture › © Cerema Centre-Est

Illustrations › © Cerema (Infrastructures de transport et matériaux, Centre-Est, Méditerranée et Ouest), DIR Méditerranée, DIR Centre-Est, CD du Rhône

Dessins › © Denis Cousin (Cerema Infrastructures de transport et matériaux)

Dépôt légal : juin 2018

ISBN : 978-2-37180-255-1

ISSN : 2276-0164

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

Pour commander nos ouvrages › www.cerema.fr

Pour toute correspondance › Cerema - Bureau de ventes - 2 rue Antoine Charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex 03

ou par mail › bventes@cerema.fr

www.cerema.fr › Nos éditions

La collection « Références » du Cerema

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Analyse des risques appliquée aux murs en béton armé sur semelle

Le retour d'expérience sur les murs de soutènement en béton armé sur semelle a montré que ces ouvrages peuvent se rompre sans signes avant-coureurs flagrants.

À la demande de la DGITM/DIT (Direction Générale des Infrastructures des Transports et de la Mer/ Direction des Infrastructures de Transport), 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 à un maître d'ouvrage d'analyser et de classer l'ensemble des murs de soutènement en béton armé sur semelle en fonction des aléas auxquels ils sont soumis, de leur vulnérabilité et des conséquences de leur défaillance potentielle.

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

Sur le même thème

Analyse des risques appliquée aux viaducs à travées indépendantes en poutres précontraintes (VIPP), Sétra, 2010

Analyse des risques appliquée aux ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie Terre armée®, Cerema, 2014

Analyse des risques appliquée aux buses métalliques, Cerema, 2015

Analyse des risques appliquée aux tranchées couvertes et aux tunnels creusés, Cerema, 2015

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Gratuit

ISSN : 2276-0164

ISBN : 978-2-37180-255-1

