

Analyse des risques des ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie « Terre Armée® »



Guide méthodologique

Analyse des risques des ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie « Terre Armée® »



Ce guide a été rédigé et validé par un groupe de travail constitué de (le service indiqué correspond au service dans lequel les membres étaient présents lors de leur participation au groupe de travail de rédaction) :

- Eric DELAHAYE, CETE Nord-Picardie
- Vincent FARDEAU, Sétra
- Gilbert HAIUN, Sétra
- Jean-Claude HIPPOLYTE, Sétra
- Fabien RENAUDIN, CETE de L'Est
- Bertrand THIDET, DRIEA
- Cécile SIEGWART, Sétra

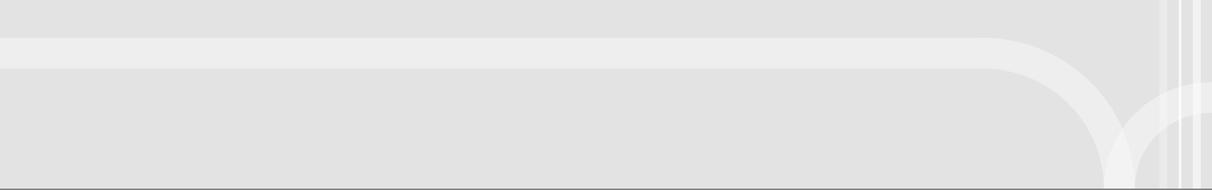
Contact technique : CEREMA/DTECITM/DGP

Email : piles.ctoa.dtecitm@cerema.fr

Au 1^{er} janvier 2014, les 8 CETE, le Certu, le Cetmef et le Sétra ont fusionné pour donner naissance au Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).

Sommaire

Avant-propos	5
1 - Généralités et principes	7
1.1 - Objectif de la démarche	7
1.2 - Champs d'application de la démarche	9
1.3 - Références et textes en interaction avec cette démarche	9
2 - Recensement, fonctionnalité et découpage des murs	10
2.1 - Recensement et fonctionnalité des murs	10
2.2 - Identification et découpage des individus à évaluer	11
3 - L'analyse simplifiée des risques	16
3.1 - Les principes de l'étape	16
3.2 - Évaluation de l'aléa	16
3.3 - Évaluation de la vulnérabilité	19
3.4 - Évaluation de la criticité	21
3.5 - Évaluation des conséquences	21
3.6 - Évaluation du risque	22
4 - La gestion du risque	23
Bibliographie	30



Avant-propos

L'analyse des risques est une méthode qui permet des arbitrages techniques et financiers. Elle est bien adaptée à la gestion de patrimoines composés d'objets complexes, présentant des enjeux socio-économiques ou de sécurité vis-à-vis des usagers de la route importants.

Cette démarche est donc prioritairement mise en œuvre pour des familles d'ouvrages, dont les connaissances actuelles de leur état ne suffisent pas à écarter certains dysfonctionnements bien identifiés, qui ont déjà pu conduire à de graves conséquences.

C'est notamment le cas des murs en remblai renforcé par éléments métalliques, principalement représentés en France par les ouvrages en Terre Armée®, dont des ruptures, causées par des phénomènes de corrosion affectant les armatures, ont pu être observées à des âges précoces. C'est la raison pour laquelle une analyse de l'ensemble des ouvrages de type Terre Armée® a été décidée par la DGTIM/DIT (Direction Générale des Infrastructures des Transports et de la Mer/ Direction des Infrastructures de Transports).





1 Généralités et principes

1.1 - Objectif de la démarche

L'objectif de la démarche d'analyse des risques appliquée aux ouvrages en Terre Armée® est d'améliorer la connaissance des ouvrages et de les hiérarchiser vis-à-vis d'un risque potentiel de ruine. Cette analyse vise *in fine* le classement des ouvrages en trois catégories de risques (en ayant ciblé les données essentielles à l'application de la démarche) :

- Catégorie 1 : Risque faible ;
- Catégorie 2 : Risque moyen ;
- Catégorie 3 : Risque fort ou difficile à évaluer qualitativement.

Le risque est la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un événement (sa fréquence et son intensité), de la sensibilité de l'ouvrage (vulnérabilité) vis-à-vis de l'événement et de la gravité des conséquences de sa défaillance.

L'événement (ou aléa) est le phénomène à l'origine du risque. Il peut être externe (séisme, incendie, vandalisme) ou interne à l'ouvrage (malfaçon, défaut de conception, endommagement).

La gravité des conséquences d'un événement s'apprécie généralement en fonction du bilan humain, socio-économique et (ou) environnemental qu'il génère.

Les conséquences peuvent être l'effondrement de l'ouvrage, de grandes déformations ou des chutes de parties de structure qui se traduisent par la mise en cause de la sécurité des usagers. Elles peuvent occasionner des pertes d'aptitude au service et engendrer des coûts de gestion disproportionnés.

L'analyse des risques, proposée par le Sétra dans le guide technique « Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art » [1], comporte en général deux phases successives.

La première phase consiste à compléter si nécessaire le recensement des ouvrages existants puis les données disponibles sur ces ouvrages afin de mener une analyse simplifiée des risques permettant un classement dans les trois catégories évoquées ci-avant. On retient alors certains paramètres qualitatifs, facilement accessibles, pour apprécier la probabilité et l'intensité des aléas que l'on rassemble dans un indicateur unique, caractéristique d'un niveau de danger.

Une seconde phase dite de gestion du risque doit être menée, pour les ouvrages présentant les niveaux de risques les plus importants. Elle nécessite le recueil d'informations plus quantitatives, le plus souvent en procédant à des prélèvements, des sondages ou des essais et en effectuant une visite d'inspection par du personnel qualifié. Elle est complétée le cas échéant par des recalculs détaillés et par une mise sous surveillance particulière (renforcée ou haute). Le figure 1 donne une description de la démarche générale.

L'analyse des risques est un outil d'aide à la gestion d'un patrimoine. Elle vise à identifier les ouvrages sur lesquels le gestionnaire doit porter prioritairement son attention. Cela consiste à préciser le risque par des investigations, des expertises et à traiter les risques avérés par la réparation ou le remplacement de l'ouvrage. Il convient de remarquer que l'évaluation des risques ne donne aucune information sur l'état pathologique des ouvrages, mais indique une probabilité de dégradation de l'ouvrage (criticité) pouvant entraîner un risque important pour l'utilisateur.

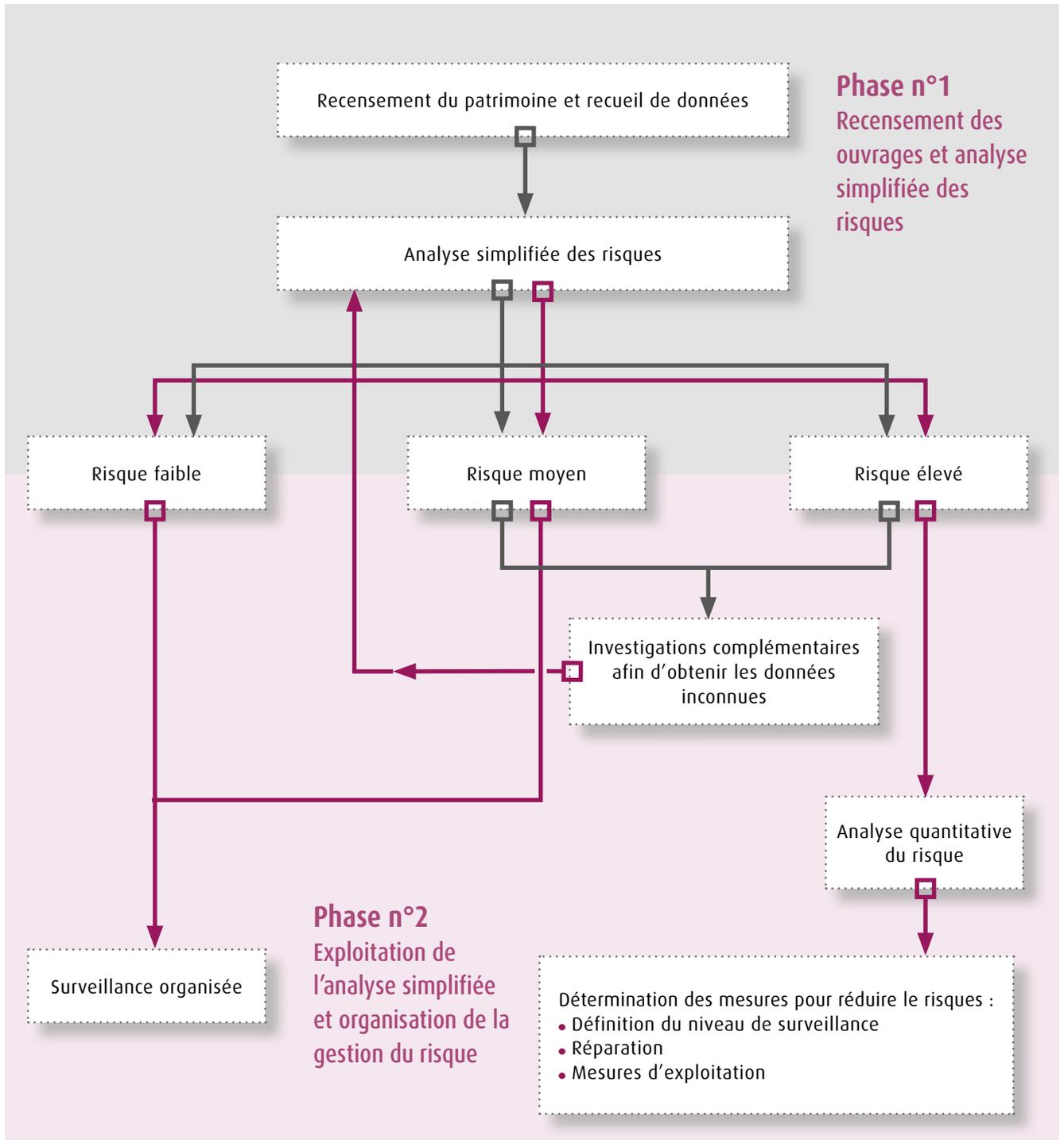


Figure 1 - Méthodologie d'analyse des risques adaptée du guide technique « Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art » [1].



1.2 - Champs d'application de la démarche

Le retour d'expérience, sur les ouvrages en Terre Armée®, a montré que la pathologie la plus préoccupante, qui a effectivement conduit à quelques effondrements partiels d'ouvrages, est la corrosion des éléments de renforcement métalliques qui arment le sol (armatures). La démarche sera donc prioritairement focalisée au risque d'instabilité interne des murs relevant exclusivement du procédé Terre Armée® et à cette seule pathologie. La mise en œuvre de la démarche pourra cependant mettre en évidence d'autres problèmes qui seront à traiter de façon spécifique.

La méthodologie décrite dans la présente note a été appliquée aux ouvrages de l'État, mais ces principes pourront être repris pour d'autres maîtres d'ouvrage. Les ouvrages concernés peuvent aussi bien être des murs de soutènement que des murs de culées porteuses ou des murs de culées mixtes. Les ouvrages ayant fait l'objet de réparation sortent du champ d'application de la méthode. Toutefois, cette démarche s'applique aux ouvrages partiellement réparés (par exemple : les ouvrages dont seule la moitié supérieure a déjà été renforcée).

Pour certains murs, il est possible que les démarches de surveillance et d'investigations entreprises aient déjà permis de cerner avec suffisamment de précision le niveau de risque présenté. Dans ce cas, les actions de gestion à prévoir pour l'ouvrage sont a priori déjà connues, voire appliquées. On soumettra, malgré tout, ces murs à la démarche décrite ci-après pour en apprécier la pertinence. Les informations recueillies sur l'ouvrage seront consignées en tant que commentaires et le classement final de l'ouvrage pourra être modifié par le gestionnaire.

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 :

- Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art, Guide technique, Sétra, Janvier 2013 [1] ;
- Les ouvrages en Terre armée - Guide pour la surveillance spécialisée et le renforcement, Sétra, Décembre 1994 [2] ;
- Ouvrages de soutènement - Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des ouvrages de soutènement en remblai renforcé par des éléments métalliques, Guide technique, LCPC, Juillet 2003 [3] ;
- Pathologie, diagnostic et réparation des ouvrages en remblai renforcé par éléments métalliques atteints de corrosion, Guide technique, IFSTTAR, 2013 [4].



2 Recensement, fonctionnalité et découpage des murs

2.1 - Recensement et fonctionnalité des murs

L'identification des murs relevant de la technologie Terre Armée doit être détaillée ; les informations telles que la date de construction des ouvrages et le type d'armature utilisée font partie des données primordiales. Il convient d'être vigilant au découpage rationnel des murs en tenant compte de leur fonctionnalité.

Dans le cas des culées en mur terre armée, il est possible de dissocier le mur de front et les murs en retour qui n'ont pas la même fonctionnalité et des vulnérabilités différentes.

Les ouvrages concernés sont tous les murs en remblai renforcé par éléments métalliques (type 10 selon la méthodologie de recensement des murs de soutènement IQOA MURS), qui ne relèvent que de la technologie Terre Armée®.

Il s'agit donc :

- des murs de soutènement indépendants



- des murs contigus aux culées de pont : murs en aile et murs en retour



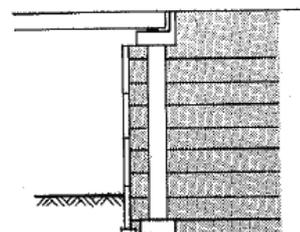
- des murs qui rentrent dans la constitution des culées de ponts :



*culées porteuses lorsque les fonctions de portance et de soutènement sont assurées par le mur, c'est-à-dire lorsque le sommier d'appui repose directement sur le mur,



*culées mixtes lorsque seule la fonction de soutènement est assurée par le mur, la fonction portance étant assurée par une structure indépendante du mur (pile-culée par exemple) pouvant être intérieure ou extérieure au mur.





Les murs en remblai en Terre Armée® ayant fait l'objet de travaux de réparation qui ont complètement modifié leur mode de fonctionnement (réparation par clouage par exemple) sortent du champ d'application de la méthodologie décrite à l'inverse des murs partiellement réparés (par exemple clouage de la partie supérieure) qui doivent être spécifiquement identifiés et évalués (ces murs sont du type 14 selon le recensement IQOA).

2.2 - Identification et découpage des individus à évaluer

On appelle objet, un mur qui fera l'objet d'une analyse des risques. Chaque mur ainsi identifié constitue alors un objet à évaluer. Les dénominations des procédés concernés sont a priori les suivantes (liste non exhaustive) :

- Mur Vert® ou TerraVert®
- TerraSet®
- TerraPlus®
- TerraTrel®
- TerraFlor®
- TerrArchi®
- ...

Un soutènement est l'ensemble d'un ou plusieurs objets, permettant de maintenir un même massif de terre (naturel ou remblais). Lorsqu'un soutènement est constitué de murs de types différents, on ne retient que le(s) mur(s) qui relève(nt) de la technologie Terre Armée. Un soutènement peut être constitué d'un ou de plusieurs murs contigus qui se distinguent notamment par leur fonction (mur de soutènement uniquement, culée porteuse, culée mixte,...).

Pour ces soutènements, le principe de découpage en objets doit être conduit en retenant les éventuels découpages déjà réalisés pour la gestion des ouvrages concernés. En cas de doute sur la fonction d'un mur on retiendra la fonction la plus contraignante dans l'ordre des contraintes décroissantes suivantes :

Culée porteuse → culée avec appuis intérieurs → culée avec appuis extérieurs → soutènement

Il convient de retenir les principes de découpage suivants :

Soutènement indépendant : le soutènement est découpé en un ou plusieurs murs homogènes (même type et même procédé notamment).

Le découpage des murs superposés sera mené selon le principe du guide « Les ouvrages de soutènement – Guide de conception générale » édité par le Sétra (Fig.2).

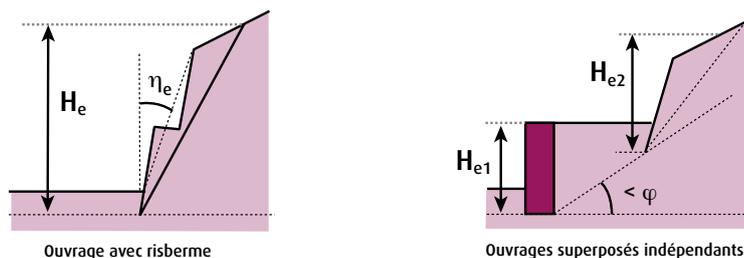


Figure 2 - Caractéristiques du découpage de murs superposés

Murs en retour ou en aile indépendants contigus à une culée ou un piédroit d'un pont (murs contigus à un portique PIPO par exemple) : chaque mur est un objet à évaluer. On identifie autant d'objets qu'il y a de murs associés au pont ; classiquement, pour un PIPO qui présente 4 murs en aile en Terre Armée®, on attend le recensement de 4 objets. Pour l'analyse simplifiée des risques, on fera l'hypothèse que ces murs ont uniquement une fonction de soutènement.

Soutènement constitué de murs en retour ou en aile prolongeant un mur de front de culée (culée porteuse ou culée mixte) en Terre Armée® : on découpe le soutènement en distinguant la partie « murs de front » des parties en aile ou en retour si :

- ces parties sont séparées par un « joint » et si les parties de murs ainsi découpées représentent une surface suffisamment grande ($> 20 \text{ m}^2$) ;
- ces parties ne sont pas séparées par un joint et si la surface des murs en dehors de la zone d'emprise du tablier est suffisamment grande (50 m^2).



La démarche de découpage en objets est illustrée, ci-après, au travers d'exemples :

Exemple 1 : murs en aile dans le prolongement du mur de front (tous les murs sont en Terre Armée®)

- **cas 1 :** mur en aile dans le prolongement du mur de front sans joint (Fig.3) :

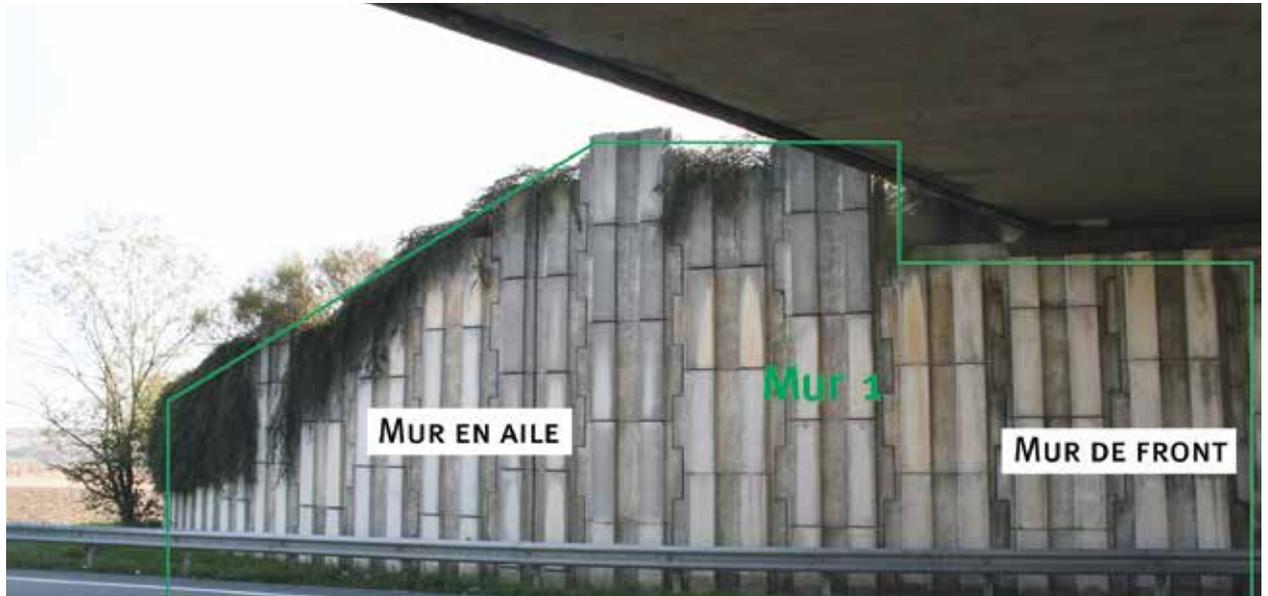


Figure 3 - Exemple de mur en aile

On compte un objet :

- en l'absence de joint le mur en aile (de surface inférieure à 50 m²) est rattaché au mur de front (mur 1), ce mur est du type « mur de culée porteuse ».

- **cas 2 :** mur entre deux murs de front de culée séparés par des joints et d'une surface de plus de 20 m² (Fig.4)



Figure 4 - Murs de fronts séparés par des joints

On compte trois objets :

- un objet pour chaque mur de front (murs 1 et 3) qui sont du type « mur de culée porteuse » ;
- un objet pour le mur central entre mur de front (mur 2) qui est du type « mur de soutènement ».



- **cas 3** : mur en aile dans le prolongement d'un mur de front de culée séparé par un joint et d'une surface inférieure à 20 m² (Fig.5)



Figure 5 - Mur en aile dans le prolongement d'un mur de front

On compte un seul objet (le mur 3 sur la photo) car le mur en aile est certes séparé du mur de front par un joint mais sa surface est inférieure à 20 m², on le rattache donc au mur 3 ; ce mur est du type « mur de culée porteuse ».

Exemple 2 : mur en retour contigu à un mur de front (tous les murs sont du type Terre Armée®) (Fig.6)

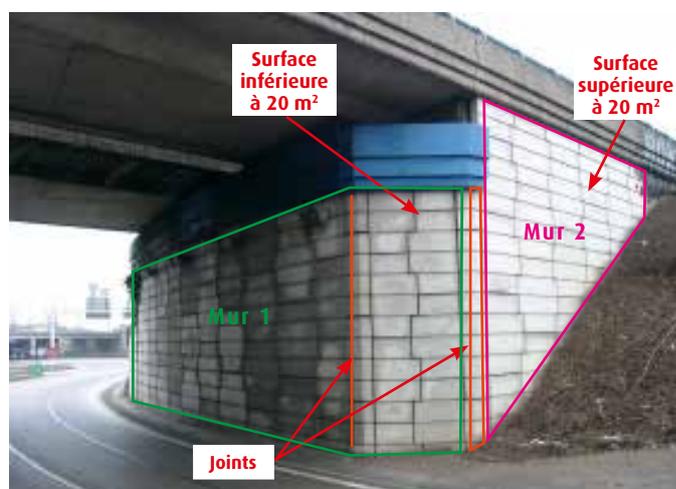


Figure 6 - Mur en retour contigu à un mur de front

On compte deux objets :

- un objet pour le mur de front auquel on rajoute un mur en aile qui, bien que séparé par un joint, présente une surface inférieure à 20 m² (mur 1), ce mur est du type « mur de culée porteuse » ;
- un objet pour le mur en retour séparé par un joint (mur 2) et dont la surface est supérieure à 20 m² ; ce mur est du type « mur de soutènement ».

Si le pont présente deux culées en Terre Armée®, le découpage doit être effectué pour chacune d'elles.



Découpages particuliers :

- **Cas d'un mur de front d'origine qui porte deux tabliers :** on compte un objet, que le mur présente ou non un joint (Fig.7) :

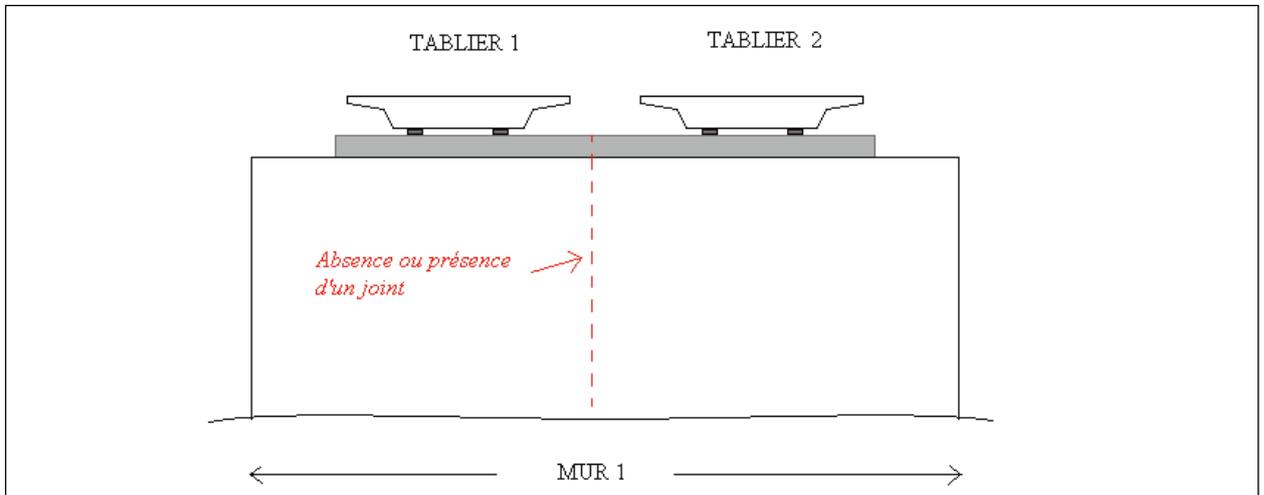


Figure 7 - Mur commun à deux tabliers

- **Cas d'un pont ayant été doublé,** si la culée en Terre Armée® a été élargie, un découpage du mur de front doit être considéré car l'âge des murs et éventuellement les technologies employées diffèrent (pieux intérieurs ou non, armatures de nature différente...) (Fig.8) :

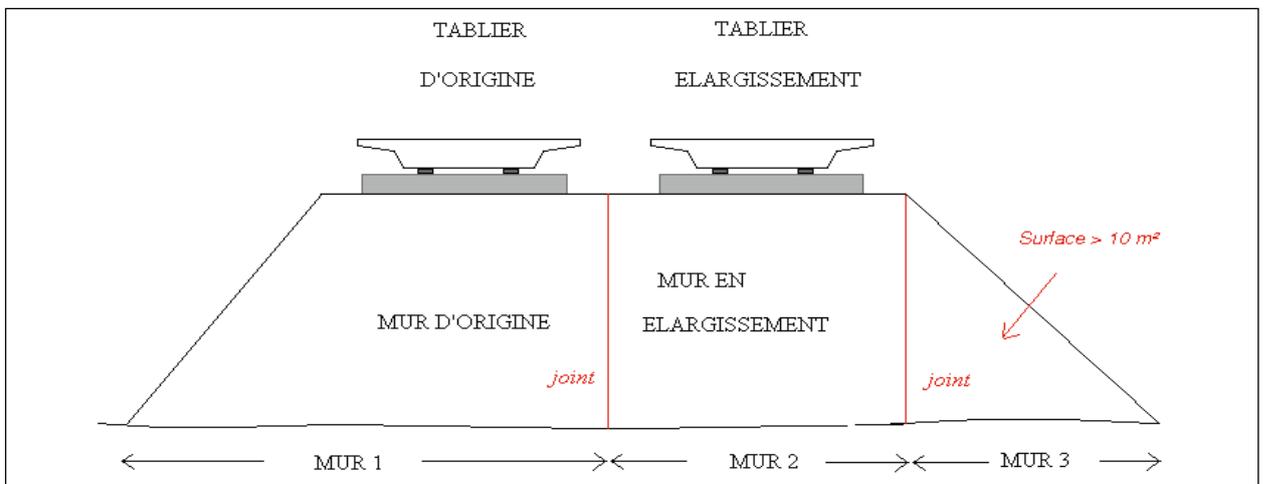


Figure 8 - Élargissement d'un mur

On compte ici trois objets :

- un objet pour le mur de front d'origine et le mur en aile associé sans joint (mur 1) ;
- un objet pour le mur de front de la culée en élargissement (mur 2) ;
- un objet pour le mur en aile de la culée en élargissement du fait de la présence d'un joint et d'une surface de mur en aile supérieure à 20 m² (mur 3).



- **Cas d'un mur en aile remonté pour faire un mur de front**, on considère un seul mur en retenant les caractéristiques du plus ancien (Fig.9) :

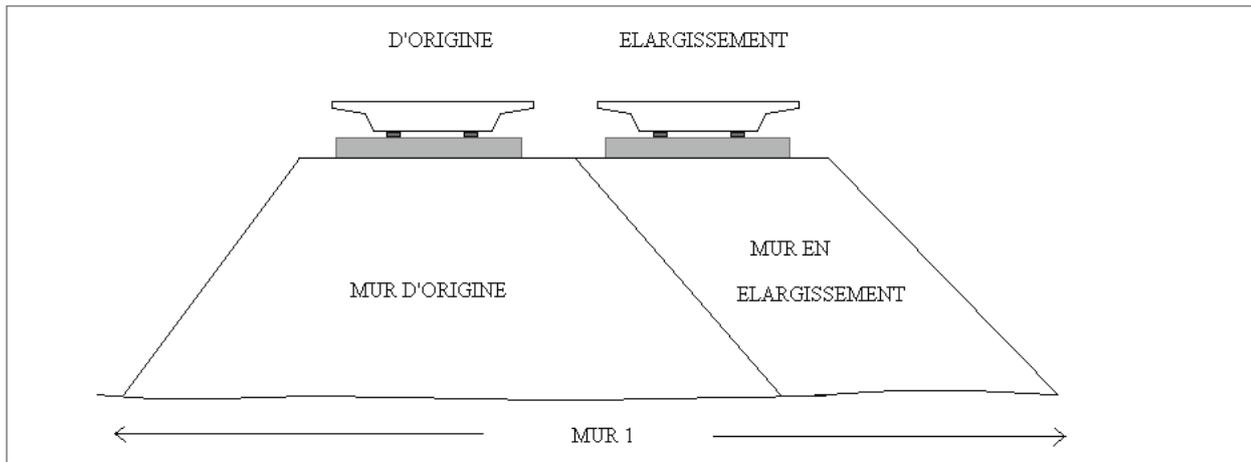


Figure 9 - Mur en aile remonté en mur de front

On compte ici un objet :

- un objet englobant les deux murs de front (mur 1).

- **Cas de décrochements dans le mur de front** (cas de tabliers décalés en plan par exemple) (Fig.10) :

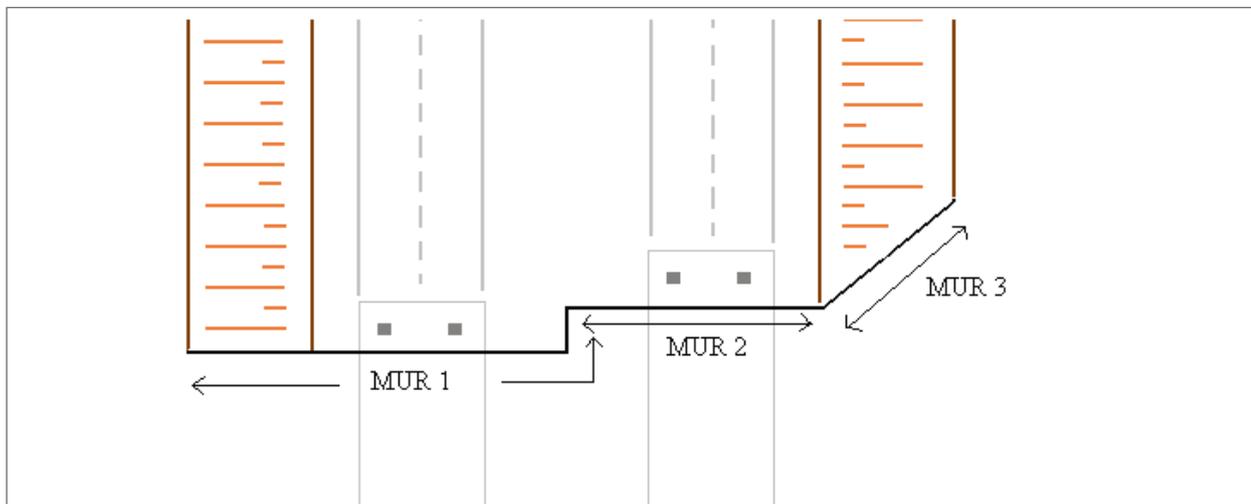


Figure 10 - Murs en décrochement

On compte trois objets :

- un objet pour le premier mur de front, son mur en aile associé sans joint, et le mur en retour entre les deux tabliers (mur 1) ;
- un objet pour le second mur de front (mur 2) ;
- un objet pour le mur en aile de surface supérieure à 20 m² séparé par un joint (mur 3).



3 L'analyse simplifiée des risques

3.1 - Les principes de l'étape

Cette étape consiste à appliquer la méthode simplifiée d'analyse des risques à l'ensemble des murs du patrimoine. Cette méthode nécessite l'appréciation de trois critères [1] :

- l'aléa : dans notre cas, le seul aléa envisagé est la corrosion des éléments métalliques de renforcement ; cet aléa est essentiellement qualifié par l'environnement de l'ouvrage et son âge ;
- la vulnérabilité de l'ouvrage vis-à-vis de cet aléa : cette vulnérabilité est essentiellement qualifiée par la nature des armatures et la géométrie du mur ;
- les conséquences d'une instabilité interne par corrosion des armatures : ces conséquences sont principalement qualifiées par des paramètres tels que la fonction du mur (culée porteuse, mur uniquement à fonction de soutènement, etc.), sa hauteur, l'importance des voies portées et protégées (trafic) et par les impacts qui résulteraient de la ruine du mur sur l'exploitation de la route et sur la sécurité des riverains et usagers.

La combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité permet d'évaluer le danger, c'est-à-dire la probabilité de ruine de l'ouvrage. La combinaison du danger avec les conséquences d'une défaillance permet de classer l'ouvrage suivant un niveau de risque (Fig.11).



Figure 11 - Schéma de principe de l'analyse simplifiée des risques

Nota : Bien que tous les ouvrages soient soumis à l'analyse simplifiée des risques, les principes suivants sont établis :

- les ouvrages « permanents » qui ont moins de 10 ans (conçus pour une durée de service de 70 ans environ) peuvent être considérés comme présentant un risque faible. La surveillance continue est suffisante.
- les ouvrages de plus de quarante ans, indépendamment de l'évolution des technologies et des règlements, sont considérés comme des ouvrages à risque élevé. Il convient de prévoir une analyse quantitative des risques incluant des investigations et un recalcul.

3.2 - Évaluation de l'aléa

ALÉA = CORROSION DES ARMATURES



3.2.1 - Les paramètres évalués

3.2.1.1 - Ancienneté de l'ouvrage

Une pondération est établie en considérant cinq classes : < 10 ans, 10-20 ans, 20-30 ans, 30-40 ans et > 40 ans.

3.2.1.2 - Conditions d'exploitation

On s'intéresse uniquement aux conditions de salage. On retient comme critère la carte de salage donnée par le guide LCPC « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel » [6]. On distingue quatre classes de salage : hiver clément avec salage peu fréquent, hiver peu rigoureux avec salage fréquent, hiver assez rigoureux avec salage très fréquent, hiver rigoureux avec salage très fréquent.

3.2.1.3 - Conception de l'ouvrage

On retient quatre critères :

- l'étanchéité du parement ;
- l'efficacité des dispositifs de drainage et d'étanchéité ;
- la présence d'une canalisation d'alimentation en eau ou d'assainissement enterrée ;
- la présence d'ouvrages hydrauliques à travers les murs.

Pour le parement, on distingue les parements verticaux en béton ou en peau métallique qui sont relativement étanches et que l'on classe dans la catégorie « pseudo-étanche », des parements en treillis métallique ou de type Mur Vert (éléments préfabriqués en béton permettant la végétalisation du mur) qui laissent pénétrer les agents agressifs de façon plus importante et que l'on classe dans la catégorie « non étanche ». Le rôle d'étanchéité du parement est notamment important en ambiance marine car elle limite la progression horizontale des agents agressifs extérieurs.

Pour les dispositifs de drainage et d'étanchéité, on considère deux classes : les « dispositifs efficaces » et les « dispositifs inefficaces ». On classe dans la première catégorie, les ouvrages qui disposent d'une géomembrane en bon état assurant l'étanchéité en tête et d'un système de recueil et d'évacuation des eaux efficace. À défaut, l'ouvrage sera rangé dans la catégorie « dispositifs inefficaces ».

Pour les canalisations enterrées et les ouvrages hydrauliques, on considère deux classes selon leur « absence » ou leur « présence ». Ce critère nécessite une vérification formelle.

3.2.1.4 - Environnement

On retient quatre critères :

- l'intensité du gel en considérant la carte de l'AN à la norme NF EN 206-1, avec deux classes de gel [7] :
 - première classe : zone de « gel faible ou modéré »
 - deuxième classe : zone de « gel modéré ou sévère » et zone de « gel sévère »
- l'ambiance marine avec deux classes « ouvrage exposé à une ambiance marine » ou « ouvrage non exposé à une ambiance marine ». On considère qu'un ouvrage situé à moins de 50 m de la mer est exposé ;
- le site avec deux classes « ouvrage susceptible d'être en site immergé » ou « ouvrage hors d'eau » ;
- les courants vagabonds avec deux classes :
 - le mur porte ou protège une voie SNCF électrifiée
 - le mur ne porte pas ou ne protège pas de voies SNCF électrifiées.

3.2.2 - Le classement des ouvrages

On choisit de donner à l'aléa une note théorique maximale de 33 avec les pondérations par critères suivantes :

- ancienneté de l'ouvrage : 12 points ;
- conditions d'exploitation : 5 points ;
- conception : 4 points ;
- environnement : 12 points.



On propose alors la notation des tableaux 1 et 2 :

ANCIENNETÉ OUVRAGE					
	moins de 10 ans	10-20 ans	20-30 ans	30-40 ans	> 40 ans
a1	0	2	4	8	12

CONDITIONS D'EXPLOITATION				
zone de salage	peu fréquent	fréquent	hiver assez rigoureux, très fréquent	hiver rigoureux, très fréquent
a2	0	2	3	5

CONCEPTION				
réseaux d'eau intérieurs	absence		présence	
a3	0		1	
étanchéité, drainage	efficaces		inefficaces	
a4	0		1	
parement "pseudo-étanche"	oui		non	
a5	0		1	
ouvrage hydraulique interne	absence		présence	
a6	0		1	

ENVIRONNEMENT		
Mer (distance < 50 m)	oui	non
a7	8	0
Immergé	oui	non
a8	2	0
Courant vagabond (porte ou protège une voie)	oui	non
a9	1	0
Gel	Zone "gel faible ou modéré"	Zones "gel modéré ou sévère" et "gel sévère"
a10	0	1

Tableau 1 - Système de notation pour les rubriques ancienneté, exploitation, conception et environnement

Des niveaux d'aléas sont alors fixés pour définir trois classes (Tableau 2) :

A = a1+a2+a3+a4+a5+a6+a7+a8+a9+a10	
Niveaux d'aléa	Note d'aléa
A1 : faible	A <= 6
A2 : moyen	6 < A < 12
A3 : élevé	12 <= A

Tableau 2 - Classes de sévérité de l'aléa



3.3 - Évaluation de la Vulnérabilité

VULNÉRABILITÉ = SENSIBILITÉ DE L'OUVRAGE VIS-À-VIS DU PHÉNOMÈNE DE CORROSION DES ARMATURES

3.3.1 - Les paramètres évalués

3.3.1.1 - Type d'armature

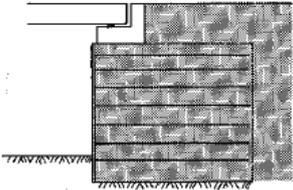
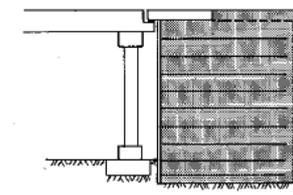
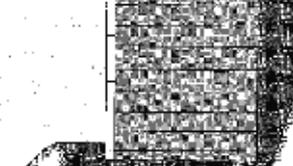
Quatre familles d'armature sont considérées. L'absence d'information sur le type d'armature est également envisagée. Les 4 familles d'armatures sont les suivantes :

- armature en acier galvanisé ou trempé à haute adhérence dites HA⁽¹⁾ ou HAR⁽²⁾ de 5 mm d'épaisseur, utilisée théoriquement depuis 1976 ;
- armature en acier lisse galvanisé (procédé Sendzimir) de 3 mm d'épaisseur utilisée depuis l'invention du procédé au milieu des années 1960 jusqu'à 1976 ;
- armature en acier inoxydable ou en alliage d'aluminium utilisée théoriquement de 1974 à 1976 ;
- armature en acier non revêtu utilisée dans de très rares cas (ouvrage provisoire, environnement particulier, etc.).

3.1.1.2 - Facteurs susceptibles de diminuer la réserve de résistance des armatures

On retient trois critères :

- **le type de mur** : on distingue

<p>les culées porteuses qui ont la double fonction de soutènement et d'appui d'un tablier ;</p>	
<p>les culées mixtes qui assurent uniquement un rôle de soutènement et qui possèdent des appuis à l'intérieur du massif ;</p>	
<p>les culées mixtes qui assurent uniquement un rôle de soutènement et qui possèdent des poteaux à l'extérieur du massif ;</p>	
<p>les murs de soutènement indépendants qui ont uniquement une fonction de soutènement sans interaction avec un pont ;</p>	

(1) HA : armature haute adhérence

(2) HAR : armature haute adhérence à extrémité renforcée



- **la hauteur du mur** : on distingue trois catégories :
 - les murs de hauteur inférieure ou égale à 5 m ;
 - les murs de hauteur strictement supérieure à 5 m et inférieure ou égale à 10 m ;
 - les murs de hauteur strictement supérieure à 10 m.

Nota :

- pour les murs superposés avec risbermes : la hauteur du mur est la hauteur du soutènement total (tout type de soutènement confondu) ;
- pour les murs de front de culée, on retient la hauteur du mur de front augmentée de la hauteur de remblai au-dessus de ce mur.

- **les autres facteurs** connus susceptibles de diminuer la réserve de résistance des armatures (déformations, tassements, végétation, surcharges, nature du remblai,...), pour lesquels il est demandé de se prononcer sur :
 - leur absence ;
 - leur présence avec des conséquences jugées mineures ;
 - leur présence avec des conséquences jugées majeures.

3.3.2 - Le classement des ouvrages

On choisit de donner à la vulnérabilité une note théorique maximale de 20 avec, par critères, les pondérations suivantes :

- **Type d'armatures : 8 points**
- **Facteurs susceptibles de diminuer la réserve de résistance des armatures : 12 points.**

On propose alors la notation du tableau 3 :

TYPE D'ARMATURE					
type d'armatures	HAR OU HA galva 5 mm	lisse galva 3 mm	inox et alu	non revêtu	inconnu
v1	0	6	8	8	8
FACTEURS SUSCEPTIBLES DE DIMINUER LA RÉSERVE DE RÉSISTANCE DES ARMATURES					
type de mur	culée porteuse	fausse culée pieux intérieurs	fausse culée poteaux extérieurs	mur simple	
v2	3	3	0	0	
hauteur du mur	<= 5 m	entre 5 et 10 m		> 10 m	
v3	0	2	5		
autres facteurs connus : déformations, tassement, végétation, surcharges, nature du remblai...	absence	présence jugée mineure		présence jugée majeure	
v4	0	1	4		

Tableau 3 - Système de notation pour les facteurs influençant la vulnérabilité

Trois niveaux de vulnérabilité sont alors définis (Tableau 4) :

V = v1+v2+v3+v4	
Niveaux de vulnérabilité	Note de vulnérabilité
V1 : faible	V < 4
V2 : moyen	4 <= A < 8
V3 : élevé	8 <= V

Tableau 4 - Classes de vulnérabilité



3.4 - Évaluation de la criticité

La criticité est le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité suivant le tableau 5 :

Criticité	Vulnérabilité	V1	V2	V3
Aléa		faible	moyen	fort
A1	Faible	Cr1	Cr1	Cr2
A2	Moyen	Cr1	Cr2	Cr3
A3	Fort	Cr2	Cr3	Cr3

Tableau 5 - Classes de criticité

3.5 - Évaluation des conséquences

3.5.1 - Les critères évalués

3.5.1.1 - Impacts techniques

Les impacts techniques sont déterminés à partir de la connaissance du type de mur et de sa position par rapport aux voies circulées. On distingue ainsi 4 catégories :

- les murs de culée (porteuse ou non) ;
- les murs simples qui à la fois supportent et protègent une voie ;
- les murs simples qui supportent une voie ;
- les murs simples qui protègent une voie.

3.5.1.2 - Impacts sociaux économiques

On retient trois critères :

- l'importance du trafic, critère pour lequel on envisage 4 catégories :
 - trafic \leq 15 000 véhicules/jour (v/j) ;
 - 15 000 v/j < trafic \leq 35 000 v/j ;
 - 35 000 v/j < trafic \leq 80 000 v/j ;
 - 80 000 v/j < trafic.
- l'importance de l'ouvrage (associée à sa surface), critère pour lequel on envisage 3 catégories :
 - surface \leq 500 m² ;
 - 500 m² < surface \leq 1 000 m² ;
 - 1 000 m² < surface.

Nota : Pour les murs superposés avec risbermes, on retient la surface totale du soutènement pas uniquement la surface du mur en Terre Armée®.

Les impacts potentiels de la ruine de l'ouvrage sur l'exploitation de l'itinéraire et sur la zone d'influence, critère pour lequel on envisage 3 catégories :

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

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

- la zone théoriquement neutralisée en cas de rupture du mur ;
- l'éloignement des voies par rapport au mur ;
- la possibilité et l'importance des déviations de l'ouvrage à prévoir ;
- la sensibilité des constructions dans la zone d'influence (habitations, écoles,...) ;
- le cas d'ouvrages sous ou à travers les murs.

3.5.2 - Le classement des ouvrages

Le système de notation du tableau 6 est utilisé pour évaluer les conséquences :

IMPACTS TECHNIQUES				
type de mur	amont	aval	intermédiaire	culée
c1	0	1	3	6
IMPACTS SOCIO-ÉCONOMIQUES				
importance du trafic	trafic <= 15 000 v/j	15 000 v/j < trafic <= 35 000 v/j	35 000 v/j < trafic <= 80 000 v/j	80 000 v/j < trafic
c2	0	1	3	5
Importance de l'ouvrage	surface <= 500 m2	surface <= 1 000 m2		surface > 1 000 m2
c3	0	2		5
Impacts sur exploitation de l'itinéraire et sur la zone d'influence	faibles	moyens		forts
c4	0	2		4

Tableau 6 - Système de notation pour l'évaluation des conséquences

Trois niveaux de conséquences sont alors définis (Tableau 7) :

C = c1+c2+c3+c4	
Niveaux de conséquences	Note des conséquences
C1 : faible	C < 6
C2 : moyen	6 < C < 12
C3 : élevé	C > 12

Tableau 7 - Niveaux des conséquences

3.6 - Évaluation du risque

Le risque est le croisement de la criticité et des conséquences suivant le tableau 8 :

RISQUE	CRITICITÉ	CR1	CR2	CR3
Conséquences		faible	moyen	fort
C1	faible	R1	R1	R2
C2	moyenne	R1	R2	R3
C3	fort	R2	R3	R3

Tableau 8 - Classes de risques

Les trois niveaux de risque R1 à R3 permettent le classement des ouvrages en trois groupes :

- Risque R1 : Risque faible ;
- Risque R2 : Risque moyen ;
- Risque R3 : Risque élevé ou difficile à évaluer qualitativement.



4 La gestion du risque

Ce chapitre a pour objectif de fournir au gestionnaire une méthode d'aide à la gestion du risque afin d'optimiser la gestion de ses ouvrages.

La première phase, « identification des aléas et analyse simplifiée des risques », a permis un premier classement du patrimoine en trois catégories en fonction de l'intensité du risque estimée pour chacun des ouvrages concernés.

Cette phase doit déboucher sur un programme d'actions permettant progressivement de mieux cerner l'état réel du patrimoine.

Les actions à prévoir porteront en priorité sur les ouvrages classés en risque fort.

Si, à l'issue de l'analyse simplifiée des risques, des doutes subsistent sur la nature des armatures ou sur l'existence de réparations, une première étape passe par la levée de ces interrogations :

- pour les ouvrages avec armatures en acier inoxydable ou en alliage d'aluminium, il s'agit de confirmer la nature des armatures (par la réalisation d'une petite fouille ou de carottages en parement) et de savoir si ils ont été réparés ou non (un renforcement systématique de ces ouvrages a normalement été réalisé, car ils sont considérés comme très sensibles face à la corrosion de leurs armatures). Si tel est le cas, un diagnostic doit être établi à brève échéance pour évaluer la nécessité d'une réparation ;
- pour les ouvrages dont le type d'armature est inconnu, il s'agit de lever l'incertitude par la réalisation d'une petite fouille ou de carottages en parement⁽¹⁾.

À l'issue de cette première étape et à partir des informations recueillies, le risque doit être réévalué. Pour les ouvrages dont le type d'armature a pu être reconnu, cela peut notamment conduire à diminuer le niveau du risque initialement estimé.

Cette première étape est présentée par la figure 14 « Étape 1 ». À noter, dans le cas d'un soutènement comportant plusieurs murs, qu'elle peut être menée sur un seul des murs le composant jugé représentatif, sous réserve d'avoir vérifié qu'ils ont tous été construits à la même période (même âge, à un ou deux ans près) et en utilisant la même technologie.

La seconde étape consiste à établir le diagnostic des murs basé sur l'état de conservation des armatures. Le gestionnaire doit en premier lieu effectuer ces diagnostics sur le patrimoine R3 (risque fort), et réaliser une pré-visite de ces ouvrages afin d'organiser au mieux les investigations. La priorisation des investigations débute par les ouvrages construits avant 1979 et tient éventuellement compte des critères spécifiques retenus par le gestionnaire (nature des conséquences en cas de défaillance, désordres déjà observés...).

Cette seconde étape est présentée par la figure 15 « Étape 2 ».

Le cas échéant, l'établissement du diagnostic de l'état d'un ouvrage débouche sur la liste des actions de gestion à prévoir comprenant notamment :

- les mesures de sauvegarde éventuelles à appliquer comprenant les restrictions de circulation, les étaitements ;
- les propositions d'une surveillance renforcée ou d'une haute surveillance ;
- les travaux d'entretien courant ou spécialisé ;
- les réparations.

Les tâches sont réparties entre les deux différents niveaux selon les principes suivants :

- niveau organisationnel :
 - Définition des travaux d'entretien spécialisé ;
 - Projet de réparation, définition des restrictions et des actions de surveillance particulière.
- niveau opérationnel :
 - Entretien courant et certains types de travaux d'entretien spécialisé léger ;
 - Mise en place des restrictions et des actions de surveillance particulière.

(1) Les témoins de durabilité ont commencé à être mis en place en 1979 et se sont généralisés en 1986, un ouvrage en Terre Armée® équipé de témoins de durabilité comporte donc normalement des armatures en acier galvanisé de 5 mm d'épaisseur. C'est la raison pour laquelle l'extraction de témoins n'est pas évoquée ici. Si l'existence de témoins a pu être mise en évidence sans que le type d'armature ne soit néanmoins connu, il reste possible de procéder à une extraction pour confirmer le type d'armature.



Dans le cas où des réparations s'avéreraient nécessaires, l'analyse doit envisager les solutions de confortement possibles et définir les éventuelles investigations complémentaires nécessaires pour son dimensionnement. Pour cela, on pourra se référer aux guides suivants :

- Les ouvrages en Terre armée – Guide pour la surveillance spécialisée et le renforcement, Sétra, Décembre 1994 [2] ;
- Ouvrages de soutènement – Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des ouvrages de soutènement en remblai renforcé par des éléments métalliques, Guide technique, LCPC, Juillet 2003 [3] ;
- Pathologie, diagnostic et réparation des ouvrages en remblai renforcé par éléments métalliques atteints de corrosion, Guide technique, IFSTTAR, 2013 [4].

Une fois toutes ces actions réalisées sur les ouvrages à risque fort, le gestionnaire devra poursuivre la gestion de l'ensemble des ouvrages (R1+R2+R3) en application du modèle ITSEOA exprimé dans la gire 14, en respectant notamment la périodicité des inspections détaillées avec sondages pour les ouvrages R1+R2 ; ces sondage ont pour objectif de connaître l'état de conservation des armatures dans les ouvrages. Sans ces actions de surveillance préventives, certaines pathologies ne pourront pas être détectées à temps, et des risques de ruptures brutales resteront à craindre, même parmi les ouvrages présentant un risque faible (évalués à partir de l'analyse de risques simplifiée).

ÉTAPE 1 :

La première étape consiste à vérifier la pertinence des informations sur les ouvrages de conception particulière et de lever toutes les inconnues sur le type d'armature (Fig.12).

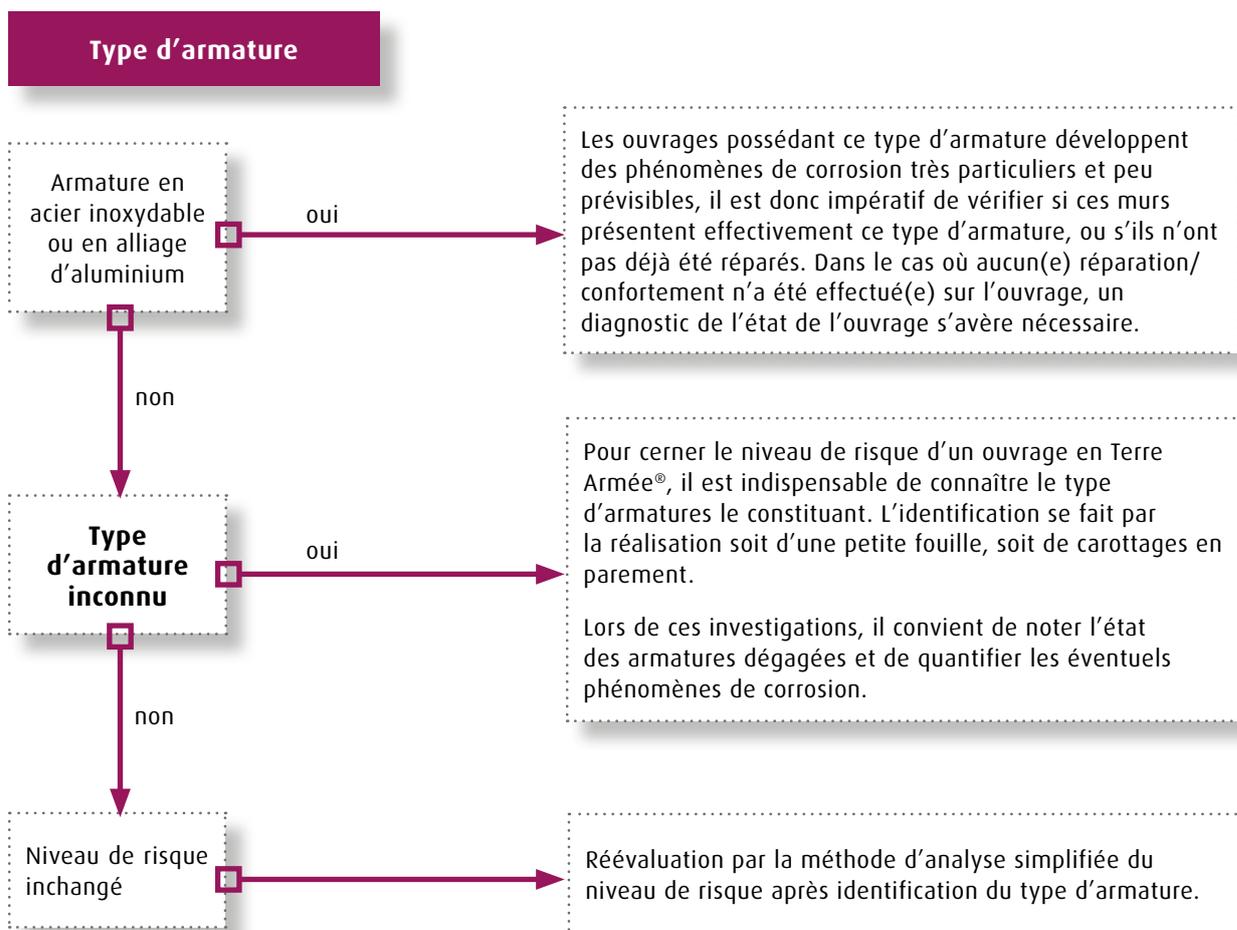


Figure 12 - Principes d'actualisation du risque selon la nature des armatures



ÉTAPE 2 :

La seconde étape consiste à réaliser le plan d'inspection ou le diagnostic de l'état du mur vis-à-vis de la corrosion des éléments de renforcement (et à établir le cas échéant le pronostic d'évolution de l'état du mur) pour chaque ouvrage du patrimoine (Fig.13).

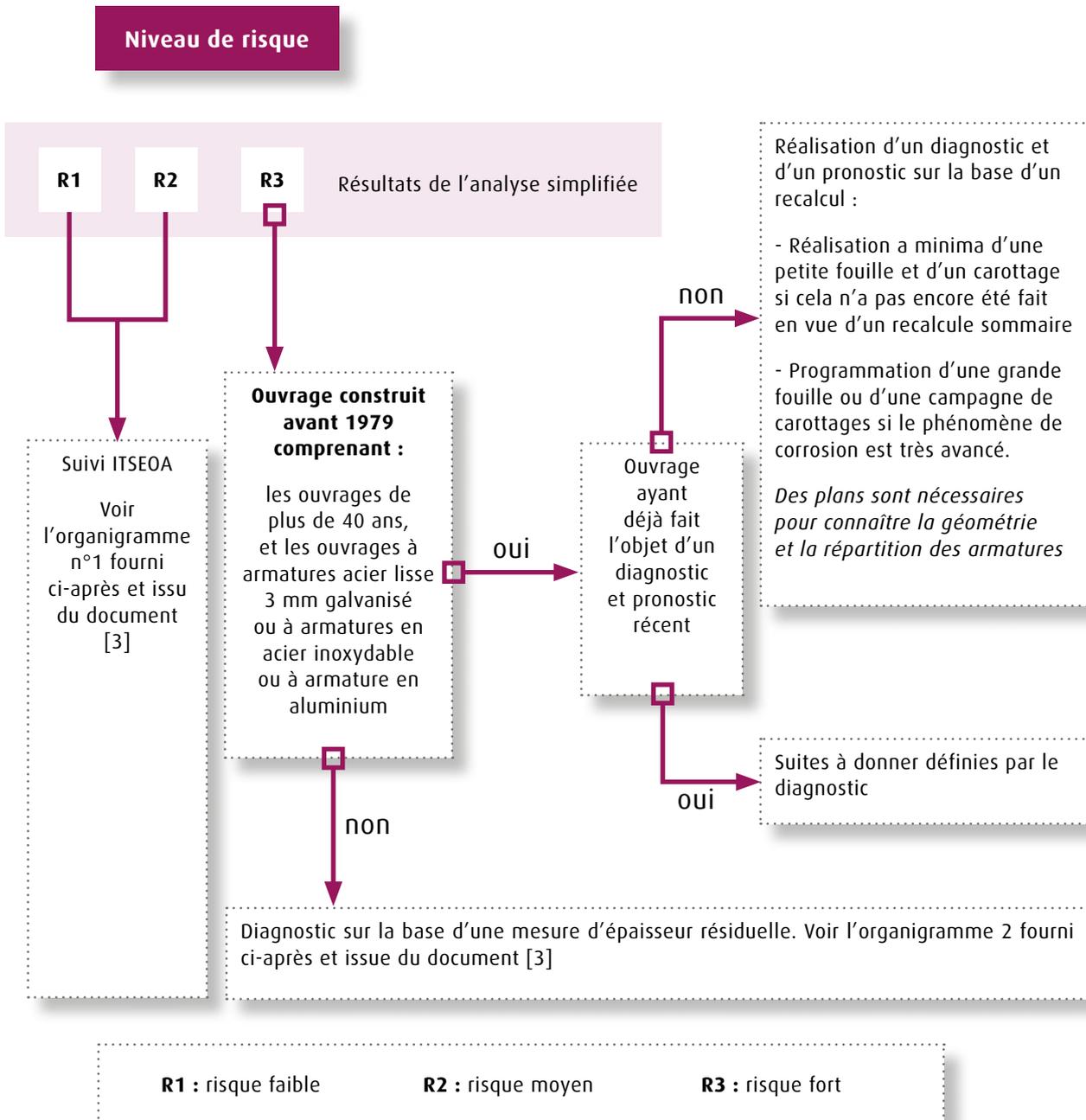


Figure 13 - Principes de surveillance selon les résultats de l'analyse simplifiée des risques

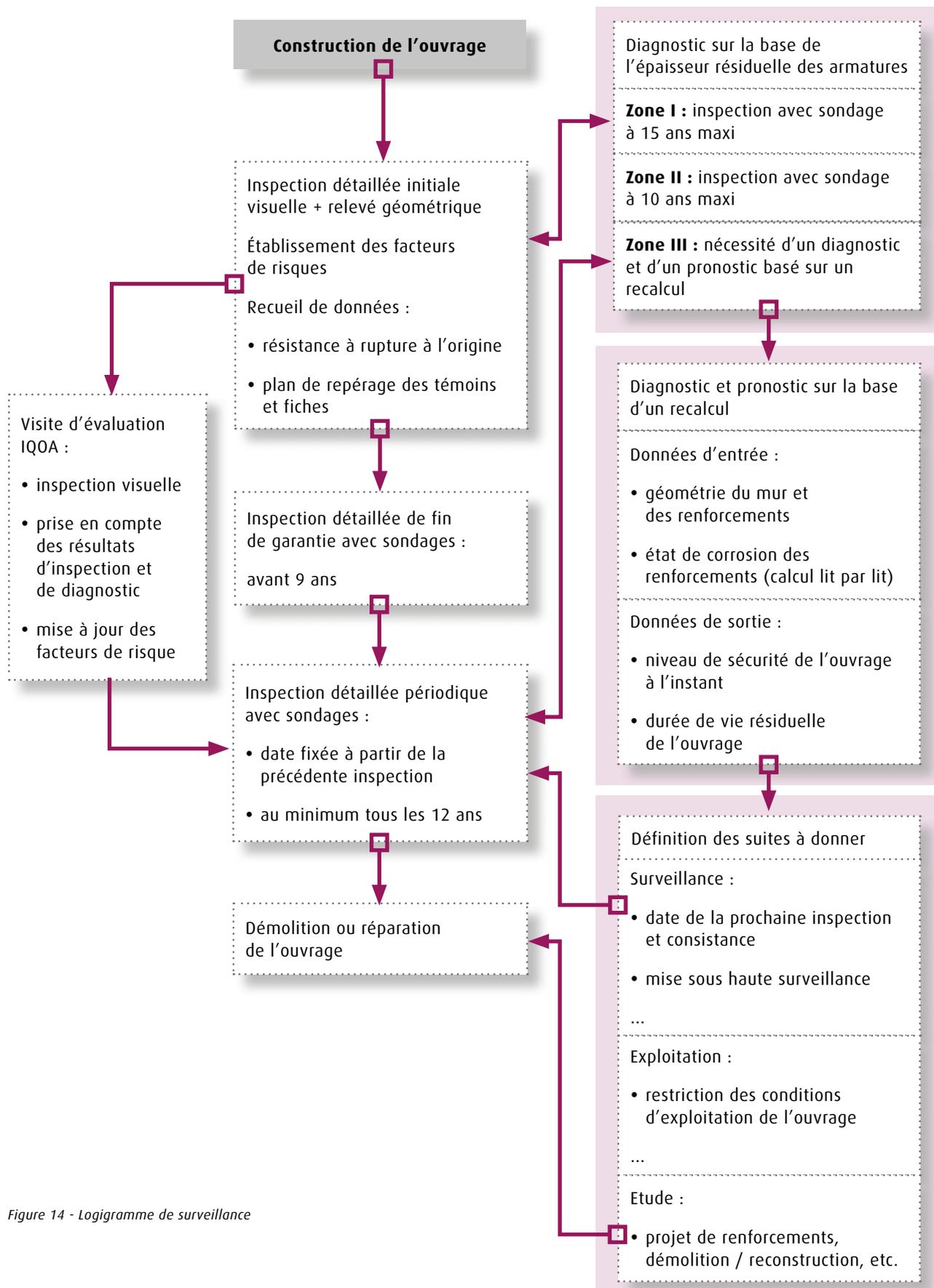


Figure 14 - Logigramme de surveillance

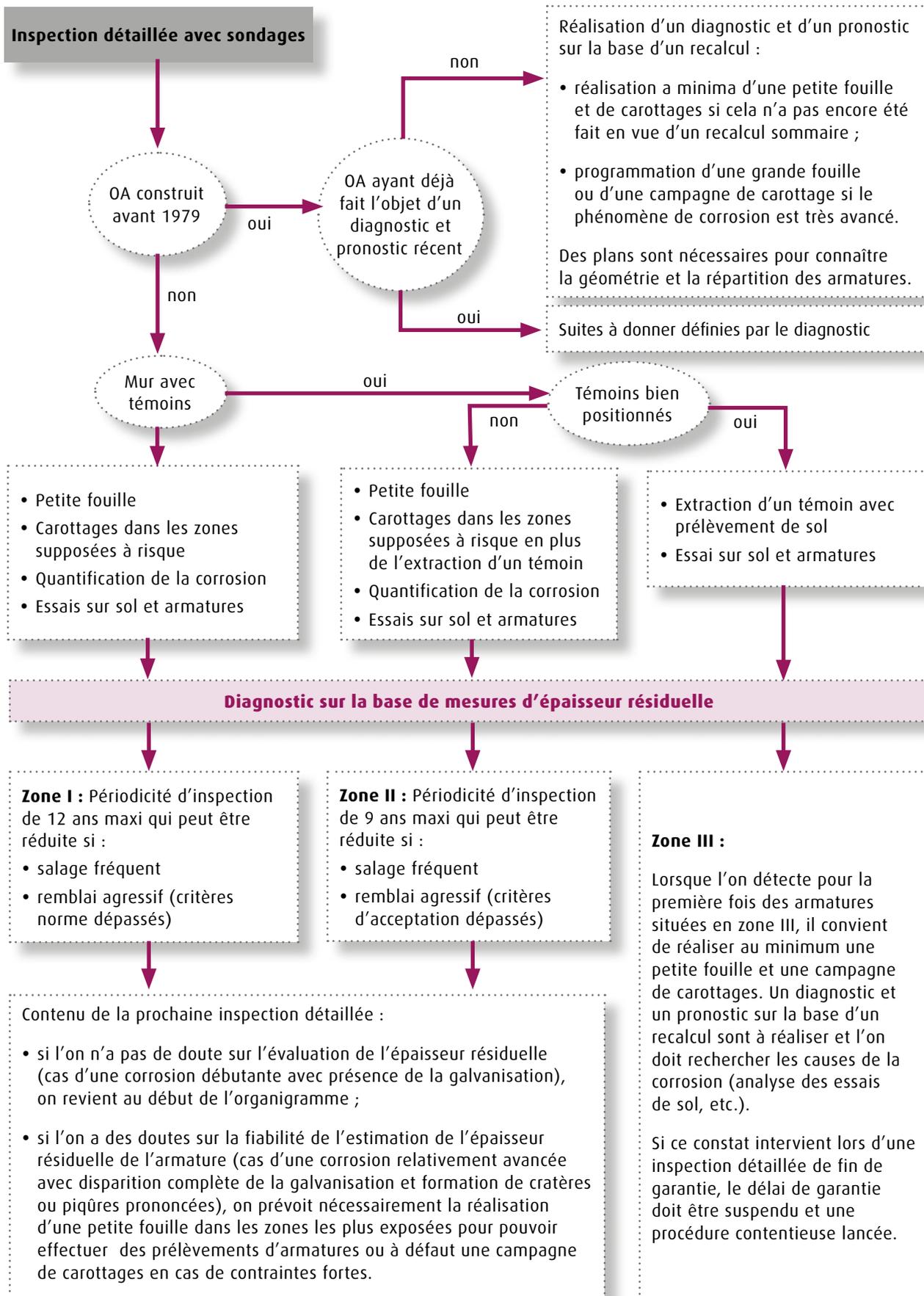


Figure 15 - Logigramme d'inspections détaillées



La périodicité des inspections avec sondages est fixée par les résultats de l'inspection précédente en fonction de l'avancement du phénomène de corrosion. Cet avancement peut être visualisé sur un graphique bi-logarithmique avec le temps en abscisse et la perte d'épaisseur par face en ordonnée conformément aux principes de l'annexe A4 du Guide pour la surveillance spécialisée et le renforcement (ouvrages en terre armée) du Sétra [2]. Dans ce diagramme (Fig.16), deux droites sont également positionnées, l'une correspondant à la vitesse de corrosion théorique, l'autre à la vitesse de corrosion prise en compte dans le dimensionnement (c'est-à-dire, pour schématiser, à la vitesse de corrosion théorique avec prise en compte d'une marge de sécurité). Ces droites déterminent trois zones :

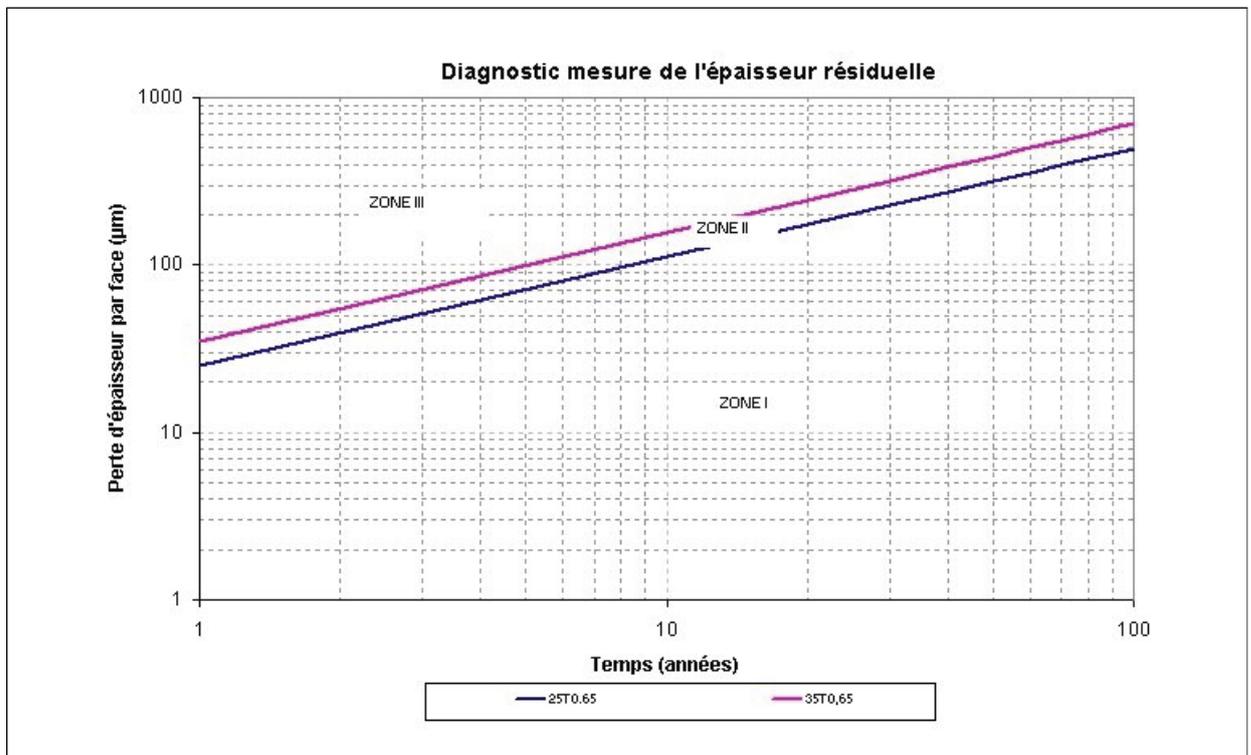


Figure 16 - Exemple de diagramme pour un ouvrage hors d'eau avec armatures en acier galvanisé

Zone I : la corrosion peut être considérée comme normale, c'est-à-dire conforme aux modèles d'évolution retenus lors de la construction. La périodicité des inspections détaillées avec sondages est inférieure ou égale à 12 ans [2].

Zone II : la corrosion est plus importante que ne le prévoient les modèles de corrosion retenus lors de la construction, mais reste inférieure à celle prise en compte pour la justification des ouvrages. La périodicité des inspections détaillées avec sondages est inférieure ou égale à 9 ans.

Les périodicités mentionnées ci-dessus doivent être réduites si l'ouvrage est soumis à un salage fréquent ou si l'on constate une agressivité particulière du remblai vis-à-vis du risque de corrosion.

Zone III : la corrosion est anormalement importante. Il convient d'en rechercher les causes, notamment à partir d'analyses de remblai. Il convient d'établir un diagnostic et un pronostic sur la base d'un recalcul. Ce recalcul permet de fixer la périodicité des inspections ultérieures. Il peut être nécessaire de prévoir des investigations rapprochées pour valider les lois de corrosion considérées pour établir le pronostic.

Pour les zones I et II, la périodicité peut être fixée en s'aidant des résultats des essais réalisés sur les matériaux de remblai.



Pour déterminer les limites entre les zones I et II et II et III, on reprend les valeurs données (Tableau 9) à l'annexe A4 du guide [2], à savoir pour des armatures en acier galvanisé :

	Loi limite entre zone I et II	Loi limite entre zone II et III
Mur hors d'eau	25 T ^{0,65}	35 T ^{0,65}
Mur en eau douce	50 T ^{0,60} (1)	70 T ^{0,60}

Lois des courbes définissant les différentes zones de corrosion en fonction du site

Au-delà de l'examen des pertes d'épaisseur, il convient également de considérer les pertes relatives de résistance pour déterminer la périodicité des inspections, tout particulièrement pour les ouvrages anciens dont l'épaisseur initiale des armatures est relativement faible.

(1) La norme NF P 94-270 propose une loi de la forme $40.T^{0,60}$ dans cette situation.





Bibliographie

- [1] Maitrise des risques - Application aux ouvrages d'art, Guide technique, Sétra, Janvier 2013.
- [2] Les ouvrages en Terre armée - Guide pour la surveillance spécialisée et le renforcement, Sétra, Décembre 1994.
- [3] Ouvrages de soutènement - Recommandations pour l'inspection détaillée, le suivi et le diagnostic des ouvrages de soutènement en remblai renforcé par des éléments métalliques, Guide technique, LCPC, Juillet 2003.
- [4] Pathologie, diagnostic et réparation des ouvrages en remblai renforcé par éléments métalliques atteints de corrosion, Guide technique, IFSTTAR, 2013.
- [5] Les ouvrages en terre armée - Recommandations et règles de l'art, LCPC/ Sétra, 1979 (réédition 1991).
- [6] Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel - Guide technique, LCPC, 2004.
- [7] Norme NF EN 206-1 - Béton - Partie 1 : spécification, performance, production et conformité, 2004.

© 2014 - Cerema

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, créé au 1^{er} janvier 2014 par la fusion des 8 CETE, du Certu, du Cetmef et du Sétra.

Le Cerema est un établissement public à caractère administratif (EPA), sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Égalité des territoires et du Logement. Il a pour mission d'apporter un appui scientifique et technique renforcé, pour élaborer, mettre en œuvre et évaluer les politiques publiques de l'aménagement et du développement durables, auprès de tous les acteurs impliqués (État, collectivités territoriales, acteurs économiques ou associatifs, partenaires scientifiques).

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, Direction technique infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia : **Karine Massouf**

Mise en page › **Studio Ogham - 2-4, rue de l'industrie - 31320 Castanet-Tolosan**

Illustrations › © **MEDDE/DRIEA/Dirif - Cerema**

Impression › **Jouve - 1, rue du Docteur Sauvé - 53100 Mayenne - Tél. 01 44 76 54 40**

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF). L'imprimerie Jouve est une installation classée pour la protection de l'environnement et respecte les directives européennes en vigueur relatives à l'utilisation d'encre végétales, le recyclage des rognures de papier, le traitement des déchets dangereux par des filières agréées et la réduction des émissions de COV.

Achévé d'imprimer : **décembre 2014**

Dépôt légal : **décembre 2014**

ISBN : **978-2-37-180054-0**

ISSN : **2276-0164**

Pour toute correspondance › **Cerema - DTecITM - Bureau de vente - BP 214 - 77487 Provins Cedex**
ou par mail › **bventes.dtecitm@cerema.fr**

www.cerema.fr › Rubrique « 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, savoirs-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 des ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie « Terre Armée® »

Le retour d'expérience, sur les ouvrages en Terre Armée®, a montré que la pathologie la plus préoccupante, et qui a effectivement conduit à quelques effondrements partiels d'ouvrages, est la corrosion des éléments de renforcement métalliques qui arment le sol.

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 de ses murs de type Terre Armée® 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.

Connaissance et prévention des risques - Développement des infrastructures - Énergie et climat - Gestion du patrimoine d'infrastructures
Impacts sur la santé - Mobilité et transports - Territoires durables et ressources naturelles - Ville et bâtiments durables

ISSN : 2276-0164
ISBN : 978-2-37180-054-0

