DIAGNOSTIC DES MURS EN REMBLAI RENFORCÉ PAR ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES ATTEINTS DE CORROSION

CONTEXTE

Le retour d'expérience [1] réalisé sur les murs en remblai renforcé par éléments métalliques a montré que la principale pathologie affectant ces ouvrages est celle liée à la corrosion des armatures de renforcement. Cette corrosion a conduit à des effondrements locaux de murs de soutènement.

Dans la grande majorité des cas (murs avec armatures en acier galvanisé), cette corrosion va largement au-delà de celle prévue dans les hypothèses de dimensionnement, en raison de la présence d'ions chlorures dans le remblai apportés par les sels de déverglaçage ou de sols chimiquement agressifs. En conséquence, les principaux risques à craindre pour l'ouvrage sont liés à une insuffisance de résistance prématurée des éléments de renforcement du sol pouvant mettre en cause la stabilité interne de l'ouvrage et entraîner des effondrements plus ou moins locaux.

Aujourd'hui la majeure partie du patrimoine routier des murs en remblai renforcé par éléments métalliques relève du procédé Terre Armée ®. Dans les premiers ouvrages construits au milieu des années 1960 jusqu'en 1976 environ, les armatures relevant de ce procédé étaient des bandes d'acier lisse galvanisé (procédé Sendzimir) et présentaient une épaisseur de 3 mm. À partir de 1976 environ, sont apparues les armatures en bande en acier galvanisé au trempé dites armatures HA[1] ou HAR[2] de 5 mm d'épaisseur.

Depuis, d'autres types d'armatures ont été utilisées telles que les armatures constituées de treillis.

Le cas des ouvrages avec armatures métalliques en acier inoxydable et avec armatures en alliage d'aluminium (ces armatures ont été utilisées de 1974 à 1976 environ) mérite d'être signalé, car ces ouvrages ont développé (notamment pour des choix de nuance d'acier inox inappropriée) des phénomènes de corrosion très particuliers et peu prévisibles.

Il est rappelé que les ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie Terre Armée® ont fait l'objet d'une méthode d'analyse des risques [1].

Dans le guide de 1979 [2], plusieurs durées de service minimales sont considérées :

– pour les ouvrages provisoires : 5 ans
– pour les ouvrages temporaires : 30 ans
– pour les ouvrages ordinaires : 70 ans
– pour les ouvrages à haut niveau de sécurité (culées de pont, ouvrages supportant une voie ferrée, barrages) : 100 ans

La norme NF P 94-270 de 2009 [3], dans son annexe B normative, porte la durée d'utilisation de projet à 75 ans pour les murs de soutènement routiers ordinaires et maintient à 100 ans celle des structures plus importantes telles les culées de pont.

Pour toute information concernant la conception et le calcul de dimensionnement de ce type d'ouvrages, le lecteur est invité à consulter les références [2], [3], [4] et [5].

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1
ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE

L'analyse du dossier de l'ouvrage doit permettre en premier lieu de connaître le type d'armature de renforcement de l'ouvrage (caractéristiques géométriques, nuance, protection contre la corrosion), et leurs caractéristiques mécaniques (résistance à rupture tout particulièrement). La date de construction peut donner des indications sur la vulnérabilité, et la période précédant l'année 1979 (date de parution du guide [2]) est à considérer pour identifier les ouvrages les plus vulnérables. Si le type d'armature est inconnu ou en cas de doute, des investigations sont à programmer (petite fouille ou carottage en parement) pour identifier le type d'armatures.

L'examen du dossier d'ouvrage porte en outre sur :

– la conception de l'ouvrage en particulier les modalités de prise en compte de la corrosion dans le dimensionnement des armatures de renforcement, le type d'attache des armatures sur le parement, la nature des remblais ;
– les dispositions retenues vis-à-vis du recueil et de l'évacuation des eaux, voire celles relatives à une éventuelle étanchéité sur le remblai (existence d'une géomembrane par exemple) ;
– les dispositifs éventuels de suivi de l'ouvrage (localisation et caractéristiques initiales des témoins de durabilité, localisation des repères topométriques, etc.).

Il est rappelé que les témoins de durabilité ont commencé à être mis en oeuvre sur les ouvrages à « haut niveau de sécurité » au sens du guide de 1979 [2] à partir de 1979 et jusqu'en 1986, date à laquelle ils ont été généralisés.

[1] Haute adhérence
[2] Haute adhérence renforcée

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE	L'inspection détaillée des murs en remblai renforcé par éléments métalliques est conduite selon les recommandations du guide technique LCPC de 2003 [6]. L'attention est attirée sur le fait qu'une inspection détaillée visuelle seule ne permet pas de s'assurer du bon état des armatures de renforcement enterrées et qu'il convient d'accompagner les inspections détaillées périodiques de sondages visant à caractériser l'état de ces armatures. La périodicité, la nature et l'étendue des sondages sont fixés par les résultats des inspections précédentes en fonction de l'avancement du phénomène de corrosion. Les premiers sondages sont programmés lors de l'inspection détaillée de fin de garantie (avant 9 ans). Il est ensuite recommandé de réaliser des sondages au moins tous les 12 ans et en réduisant la périodicité lorsque le phénomène de corrosion s'accentue. Lors de l'inspection détaillée et vis-à-vis de la problématique de la corrosion des armatures de renforcement, on recherche notamment l'existence des désordres suivants : – déformations, mouvement d'éléments du parement ; – fissuration des terrains soutenues parallèle au parement ou déformation du terrain ; – traces de ruissellement en parement ; – dysfonctionnement des dispositifs de recueil et d'évacuation des eaux.
ÉTAPE 3 AUSCULTATION	La corrosion des armatures dans le sol est un phénomène progressif, la fréquence et l'intensité des investigations seront donc adaptées à l'âge de l'ouvrage. Le choix de la (ou des) méthode(s) d'auscultation à mettre en œuvre dépend de l'âge et de l'état de l'ouvrage ainsi que des contraintes d'accès et d'exploitation de l'ouvrage. Lors des premières inspections et avant dépassement du niveau de corrosion normal pris en compte dans le dimensionnement de l'ouvrage, les investigations sont réalisées à partir : – de l'extraction d'un témoin de durabilité (fiche B8.3), s'il en existe et s'il est représentatif des armatures du mur en terme d'exposition aux agents agressifs ; – de la réalisation d'une petite fouille (fiche B8.1) si les témoins ne sont pas positionnés dans la zone supposée la plus exposée, et si les contraintes (accès, exploitation) la permettent : – le cas échéant, de la réalisation de carottages en parement (fiche B8.2) ; ces carottages permettent d'apprécier l'état des armatures au voisinage du parement, mais pas en profondeur. Lorsque le niveau de corrosion observée dépasse le niveau de corrosion normal ou si l'ouvrage a été construit avant 1979, il est conseillé : – soit de réaliser directement une grande fouille si les contraintes (accès, exploitation) le permettent ; – soit de réaliser une petite fouille associée à une campagne d'investigations par carottages. Lors des investigations sur les armatures, des prélèvements de remblai sont réalisés en vue d'analyses visant à apprécier leurs caractéristiques chimiques et électrochimiques et d'expliquer les éventuels phénomènes de corrosion observés. La nature et le référentiel des essais à réaliser sur les sols prélevés sont précisées dans les documents en références [2], [6] et [7]. Les investigations réalisées sur les armatures de renforcement prélevées donnent principalement accès à deux informations : – la perte d'épaisseur d'acier par face exposée ; – la résistance en traction à rupture des différents lits concernés. Lorsque la corrosion est peu avancée le diagnostic du mur est essentiellement établi sur la base de l'analyse des pertes d'épaisseur d'acier par face des armatures. L'avancement de la corrosion est 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 4 du guide Setra cité en référence [8]. Un exemple de graphique est reproduit en figure 1. Dans ce graphique, deux droites sont 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).

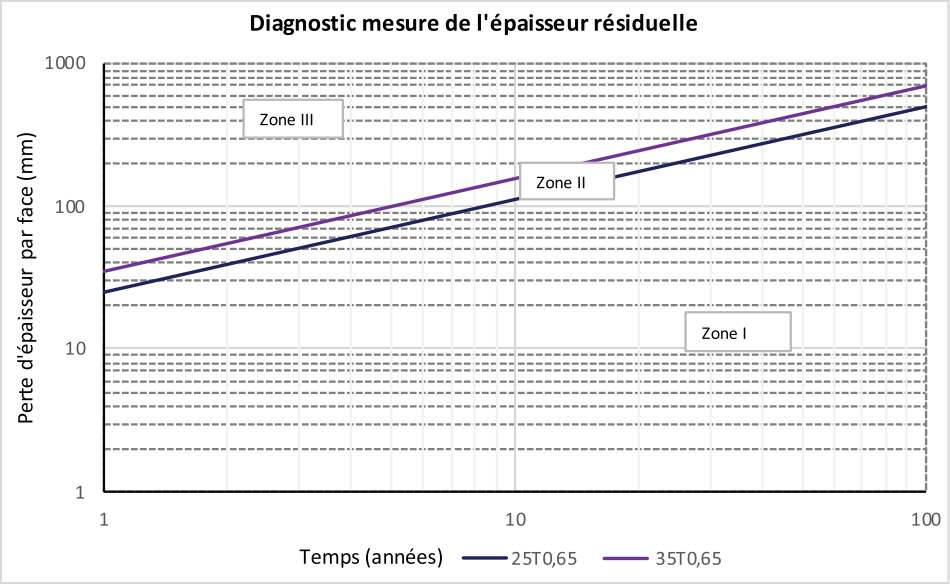


Figure 1 : Diagramme d'analyse de la corrosion des armatures pour un ouvrage hors d'eau avec armatures en acier galvanisé

Ces droites déterminent trois zones :

Zone I : La corrosion peut être considérée comme normale, c'est à dire conforme aux modèles d'évolution retenus pour des remblais satisfaisant les recommandations existantes au moment de la construction. La périodicité des inspections détaillées avec sondages est inférieure ou égale à 12 ans [8].

Zone II : La corrosion est plus importante que ne le prévoient les modèles de corrosion retenus pour les remblais satisfaisant les recommandations existantes au moment 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 9 ans.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

NB : 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. 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.

Zone III : La corrosion est anormalement importante. Il convient d'en rechercher les causes, notamment à partir d'analyse de remblai. Il convient d'établir un diagnostic et un pronostic sur la base d'un recalcul qui prend en compte les résistances résiduelles mesurées sur les armatures prélevées. 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 d'évolution de l'état des armatures.

Pour déterminer les limites entre les zones I et II et les zones II et III, on reprend les valeurs données à l'annexe 4 du guide [8], à savoir pour les armatures en acier galvanisé :

Site d'implantation	Loi limite entre zones I et II	Loi limite entre zones II et III
Mur hors d'eau	$25\ T^{0,65}$	$35\ T^{0,65}$
Mur en eau douce	$50\ T^{0,60}$[3]	$70\ T^{0,60}$

Tableau 1 : Lois des courbes définissant les différentes zones de corrosion en fonction du site d'implantation du mur (T représente l'âge des armatures en années ; le résultat exprime la perte d'épaisseur par face exposée en µm)

Selon les résultats des auscultations, les suites à donner peuvent être :

– surveillance de l'ouvrage (date et consistance des prochaines inspections avec sondages, instauration d'un régime particulier de surveillance visant à détecter une rupture prématurée du mur, etc.) ;
– restriction d'exploitation (éloignement des voies circulées par rapport au parement, etc.) ;
– renforcement du soutènement ;
– démolition et reconstruction de l'ouvrage.

Compte tenu des difficultés d'établir un diagnostic exhaustif de l'état des armatures enterrées, il est conseillé de procéder au renforcement des ouvrages à enjeux qui présentent des armatures sensibles vis-à-vis de la corrosion, et donc ceux construits avant 1979. Pour ces derniers, lorsque le choix du renforcement n'est pas a priori retenu, on doit établir systématiquement un diagnostic sur la base d'un recalcul dont les données d'entrée reposent sur des reconnaissances poussées de l'état des armatures.

[3] La norme NF P 94-270 propose une loi de la forme $40T^{0,60}$ dans cette situation

RÉFÉRENTIEL

[1] Analyse des risques des ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie « Terre Armée ® » - Cerema - Sept 2014.

[2] Les ouvrages en terre armée : Recommandations et règles de l'art – LCPC / SETRA Septembre 1979 (ré-impression en juillet 1991, avec fiches techniques actualisées).

[3] Norme NF P 94-270 (Juin 2010) Calcul géotechnique - Ouvrages de soutènement - Remblais renforcés et massifs en sol cloué.

[4] Norme NF P 94-220 (1992, mise à jour en 1998, annulée en 2010) Renforcement des sols - Ouvrages en sols rapportés renforcés par armatures ou nappes peu extensibles et souples - Dimensionnement.

[5] Les ouvrages de soutènement : Guide de conception générale – SETRA – Décembre 1998.

[6] 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.

[7] Pathologie, diagnostic et réparation des ouvrages en remblai renforcé par éléments métalliques atteints de corrosion – Guide technique – Ifsttar – 2013.

[8] Les ouvrages en terre armée : Guide pour la surveillance spécialisée et le renforcement – SETRA – Décembre 1994.

Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'ouvrages d'art :

- B8-1 : Évaluation de la corrosion d'une armature d'un remblai renforcé par éléments métalliques (à partir du prélèvement d'une armature dans une fouille)
- B8-2 : Évaluation de la corrosion d'une armature d'un remblai renforcé par éléments métalliques (par carottage en parement du mur)
- B8-3 : Évaluation de la corrosion d'une armature d'un remblai renforcé par éléments métalliques (par extraction d'un témoin de durabilité)

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel, visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre pour aboutir au diagnostic est donné ci-après à titre de guide.

E6-2 : DIAGNOSTIC DES MURS EN REMBLAI RENFORCÉ PAR ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES ATTEINTS DE CORROSION

