

Bilan des investigations effectuées sur des ouvrages en terre armée

Gilbert Haïun, Jean-Marc Jailloux, Fabien Renaudin

Cela fait une quarantaine d'années que le procédé Terre Armée est employé pour la construction d'ouvrages de soutènement et de culées (et fausses culées) d'ouvrages d'art. La surveillance de ces ouvrages impose notamment d'apprécier régulièrement l'état de corrosion des armatures métalliques noyées dans les remblais techniques, (à cet égard on se reportera utilement aux documents cités en références [2] et [4] ci-après). Les investigations effectuées ont montré parfois un vieillissement prématuré des armatures, en particulier pour les ouvrages de technologies anciennes.

A la demande du Sétra, le laboratoire régional des ponts et chaussées (LRPC) de Strasbourg a donc réalisé en 2004 une synthèse des résultats disponibles sur l'état des armatures des ouvrages en terre armée issus des investigations effectuées sur ces ouvrages. Les données recueillies proviennent essentiellement des investigations effectuées par les LRPC, et notamment par le LR de Strasbourg, et de celles réalisées par la Société PROFRACAL pour près d'une cinquantaine d'ouvrages. La synthèse présentée ci-après concerne donc 116 ouvrages routiers ou autoroutiers, qui sont des murs de soutènement ou des culées porteuses.

Ces résultats confirment, s'il le fallait, l'importance de la surveillance des ouvrages en service, et l'absolue nécessité, pour les plus anciens de ces ouvrages, et notamment pour ceux dont la construction est antérieure à 1979, de faire procéder dans les plus brefs

délais à un diagnostic de l'état des armatures, si cela n'a pas été fait depuis plus de 7 ans environ (délai porté à une dizaine d'années au plus pour un ouvrage qui avait été reconnu «sain», et situé dans une ambiance non agressive - cf. références [2] et [4]).



Photo 1 : effondrement local d'un mur de soutènement en terre armée construit en 1974
Source : LR de Strasbourg

Ouvrages recensés

Trois de ces 116 ouvrages sont des murs de soutènement construits avec des armatures en acier inoxydable. Celles-ci ont été utilisées en 1974 et 1975 ; deux de ces ouvrages ont été réparés par clouage.

Trente sept d'entre eux sont des ouvrages construits avec des armatures lisses en acier E 24-1 galvanisé de 3 mm d'épaisseur, revêtues d'une épaisseur de zinc de 25 à 40 microns (galvanisation à chaud des tôles avant découpage, selon le procédé Senzimir). Ce type d'armature a été le plus utilisé jusqu'en 1976-1977 et concerne donc la plupart des ouvrages routiers construits avant cette date.

Enfin, soixante seize de ces ouvrages ont des armatures dites à haute adhérence (dénomination due à la présence de crénelures destinées à améliorer le frottement sol/armatures), en acier doux galvanisé, de 5 mm d'épaisseur. Elles sont galvanisées au trempé avec un revêtement de zinc d'environ 70 microns par face. Ce type d'armature en acier E24-1 a été mis en œuvre à partir des années 1977-1978 et concerne donc pratiquement tous les ouvrages routiers construits depuis cette date. Il est à noter toutefois que depuis près d'une quinzaine d'années, on utilise essentiellement ce même type d'armature, mais en acier E 36-3 (ou Fe 510 c ou S355JO), qui présente en outre une section renforcée coté parement (épaisseur de 8 mm).

Ces dispositions sont illustrées par la figure 1 qui présente la distribution de ces 116 ouvrages par année de construction et par type d'armature.

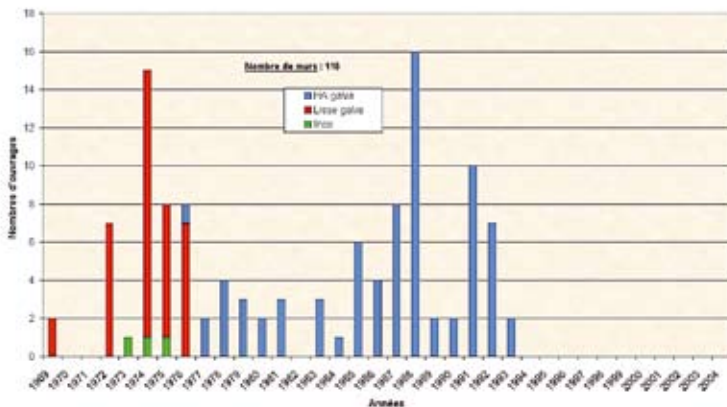


Figure 1 : distribution des 116 ouvrages auscultés par année de construction et par type d'armature

Principaux résultats de l'analyse des données

Les données recueillies permettent de disposer d'environ 500 échantillons de remblais et d'armatures. Les principaux résultats présentés ci-après ne portent que sur les armatures en acier galvanisé qui, à l'exception de quelques rares cas (3 sur 116), concernent la totalité des ouvrages.

Le graphique de la figure 2 indique les pertes d'épaisseur moyennes mesurées sur les échantillons d'armatures prélevés, en fonction du type d'armature et de leur âge (âge de l'ouvrage). Ainsi, et sans analyser ici dans le détail les causes de cette différence de comportement, il apparaît assez nettement que les armatures de 3 mm d'épaisseur, dont l'épaisseur de galvanisation est d'environ 30 microns (armatures généralement utilisées dans les ouvrages dont la date de construction est antérieure à 1978) présentent globalement une perte d'épaisseur moyenne très sensiblement supérieure à celle des armatures de 5 mm, dont l'épaisseur de galvanisation est de 70 microns (armatures en principe systématiquement utilisées au delà de cette date).

La ligne oblique tracée en rouge sur le graphique figure 2 représente la perte moyenne d'épaisseur de métal (acier et revêtement de zinc) par face, en fonction du temps, prise en considération aujourd'hui dans les justifications techniques. Pour les ouvrages hors d'eau (cas général ici), elle a pour expression $P = 25 \cdot T^{0,65}$.

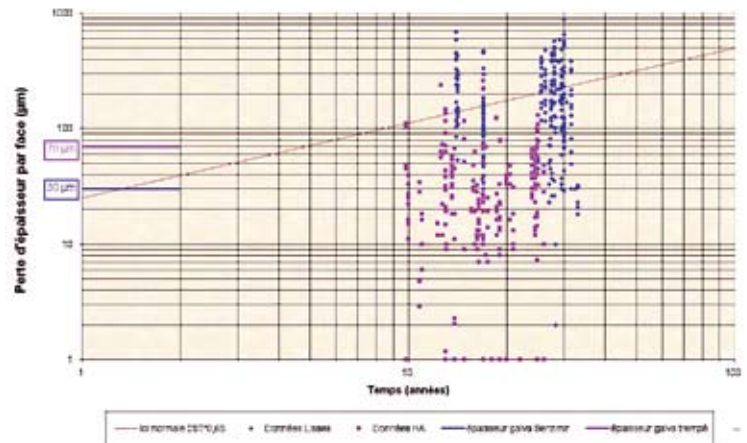


Figure 2 : perte d'épaisseur moyenne d'acier mesurée sur les échantillons d'armatures en fonction de l'âge de celles-ci et de leur constitution

On notera par ailleurs que pour les armatures à haute adhérence, environ 30 % des échantillons ne présentaient pas de perte d'épaisseur quantifiable. Ces échantillons ont donc été portés sur l'axe des abscisses (le faible nombre de points ainsi reportés tient au fait que pour une même année ces derniers se trouvent donc superposés).

La différence de comportement entre les armatures lisses et les armatures à haute adhérence (HA) est beaucoup plus accentuée encore lorsque l'on considère la perte relative de résistance des armatures ($\Delta R/R_0$).

Il est clair que pour une perte d'épaisseur Δe donnée, la perte relative de résistance est d'autant plus importante que l'épaisseur d'origine de l'armature e_0 est faible.

Par ailleurs, et comme l'illustre la figure 3⁽¹⁾ ci-après établie pour les armatures lisses (3 mm d'épaisseur), la perte relative de résistance de l'armature peut être liée à sa perte relative d'épaisseur par la relation⁽²⁾ :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \cdot \frac{\Delta e}{e_0}$$

Ce rapport K ainsi défini entre perte relative de résistance et perte relative d'épaisseur traduit essentiellement le fait que la corrosion n'est pas uniforme. Il est ici de l'ordre de 2 lorsque la perte relative d'épaisseur ($\Delta e/e_0$) se situe entre 10 et 20 %. On constate également sur ce graphique que la perte de résistance de l'armature peut être pratiquement totale (résistance résiduelle quasi nulle) lorsque cette perte d'épaisseur relative ($\Delta e/e_0$) atteint 30 % environ.

Pour les armatures HA, une telle exploitation n'est pas possible du fait des faibles corrosions constatées.

Outre les différences technologiques fondamentales entre les deux types d'armatures évoquées ici, il convient de souligner également les différences qu'il peut y avoir dans les dispositions de conception et de construction des ouvrages. Ainsi, l'une des causes les plus fréquentes d'une corrosion excessive des armatures est l'évolution de l'agressivité des remblais par infiltration d'eaux chargées d'agents agressifs en provenance de la plate-forme soutenue, et cela en raison bien souvent d'une insuffisance ou d'une défaillance des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux de ruissellement ou encore de l'absence de dispositif particulier d'étanchement (géomembrane).

Si pour les ouvrages construits avant 1979, la conjonction de dispositions constructives insuffisantes vis à vis des infiltrations d'eau chargées en chlorures et de l'utilisation d'armatures en acier de faible épaisseur et mal protégé, est bien généralement à l'origine des effondrements locaux survenus sur des ouvrages de ce type, force est de constater aussi que ces effondrements ont pu se produire faute d'avoir pu déceler à temps l'état de corrosion anormal des armatures de ces ouvrages.

Ces effondrements locaux sont survenus assez brutalement, et apparemment sans signe annonciateur réellement décelable, ce qui impose la mise en place d'une politique de suivi rigoureux de ces ouvrages basée notamment sur l'examen régulier de l'état des armatures (cf. ci-après).

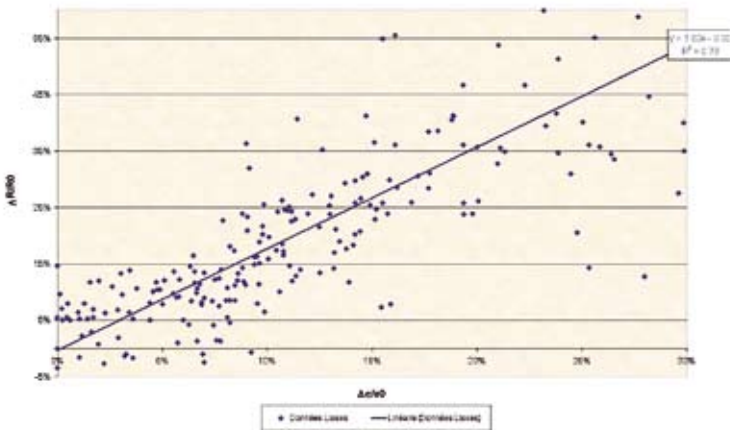


Figure 3 : perte relative de résistance mesurée sur les échantillons prélevés en fonction de la perte relative d'épaisseur de l'armature (armature lisse de 3 mm)

(1) Sur cette figure, les valeurs des résistances initiales R_0 ont été recalées de façon à ce que la régression linéaire reliant la perte relative de résistance à la perte relative d'épaisseur passe par l'origine.

(2) Jailloux J-M, Montuelle J. - La corrosion de l'acier galvanisé dans les sols - 8^{ème} Congrès européen de Corrosion, Nice - 19-21 nov. 1985.

Remarque

Comme cela a été signalé précédemment, les résultats présentés ici ne concernent que les armatures en acier galvanisé. Ces dernières constituent en effet aujourd'hui pratiquement la quasi-totalité des ouvrages routiers et autoroutiers existants. Les ouvrages construits avec armatures en acier inoxydable en 1975 et 1976 ont connu une pathologie particulière en raison même du type d'acier utilisé. La plupart de ces ouvrages ont déjà été renforcés, mais ceux qui ne l'ont pas encore été doivent faire l'objet d'une surveillance particulière.



Photo 2 : exemple d'écaille équipée à l'origine de témoins de durabilité – Source : Sétra



Photo 3 : trépied d'extraction des témoins – Source : Jean-Marc Jailloux

Méthodes d'auscultation des armatures

Les méthodes d'auscultation des ouvrages en remblai renforcé par éléments métalliques sont largement décrites dans les documents cités en références [2] et [3]. L'objectif premier des investigations réalisées est d'évaluer l'état de conservation des inclusions métalliques noyées dans le remblai. Pour accéder à ces inclusions plusieurs techniques sont envisageable :

- extraction de témoins de durabilité mis en œuvre à l'origine (photos 2 et 3) ;
- réalisation de fouille depuis le dessus du mur (figure 4 et photo 4) ;
- réalisation de carottages en parement latéralement à une inclusion (photos 5, 6, 7).

Les témoins de durabilité sont généralement positionnés en partie basse des murs et sous les dalles de transition dans le cas des culées de pont. Ces témoins permettent donc d'évaluer la vitesse de corrosion des armatures en fonction des caractéristiques que présente le remblai technique à l'origine, mais ne renseignent pas en général sur les effets de la pollution de ce remblai par les agents agressifs extérieurs.

Les fouilles permettent d'observer un grand nombre d'armatures et il est possible de reconstituer l'armature après prélèvement d'un tronçon. Les grandes fouilles nécessitent des moyens importants (engins spéciaux, blindage de fouille, neutralisation provisoire de voies de circulation, éventuellement soutènement provisoire du mur,...) mais cette technique reste la solution privilégiée pour avoir une vision précise de l'état d'un mur.

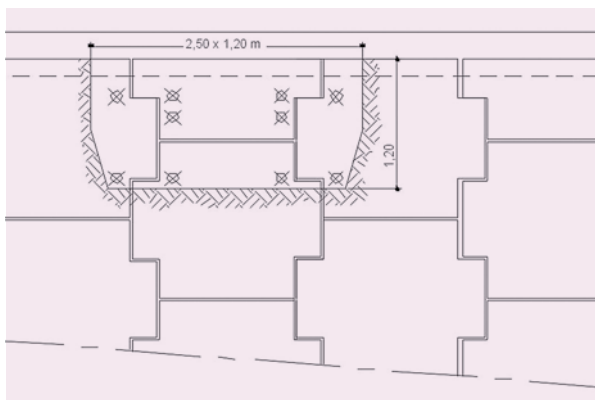


Figure 4 : exemple d'implantation (élévation) d'une petite fouille avec repérage des armatures dégagées

Les carottages ont l'avantage de pouvoir être implantés pratiquement où on le souhaite sur la hauteur du mur, leur réalisation est relativement facile et rapide. Ils restent néanmoins agressifs pour l'ouvrage et doivent être utilisés lorsqu'il n'est pas possible de procéder autrement. Ils peuvent être utilisés localement sur les murs de grandes longueurs pour déterminer la position d'une grande fouille, où pour lever ou confirmer un doute. Leur principal inconvénient est de ne pas permettre la reconstitution de l'armature en cas de prélèvement d'un tronçon. On restreindra donc les prélèvements au cas des armatures dont l'observation fait apparaître une forte corrosion.

Les investigations réalisées sur les armatures consistent en :

- un examen visuel accompagné d'une notation selon les principes du document cité en référence [2]
- la caractérisation de la géométrie (section, longueur, pertes d'épaisseur de zinc et d'acier par face)
- la réalisation d'un essai de traction permettant de connaître l'effort de rupture résiduel de l'échantillon (on pourra également mesurer l'allongement à rupture de l'échantillon)

En parallèle, des prélèvements de remblais sont réalisés de façon à connaître les caractéristiques chimiques et électrochimiques du matériau entourant les inclusions; on détermine ainsi en laboratoire :

- la teneur en eau,
- la résistivité du sol,
- le pH,
- les teneurs en sels solubles (chlorures, sulfates, sulfures principalement).



Photo 4 : vue de dessus d'une grande fouille – Source : Lr de Strasbourg



Photo 5 : réalisation du carottage en parement du mur
Source : Jean-Marc Jailloux

Si les investigations font apparaître une corrosion importante des inclusions métalliques (au-delà de la loi normale du graphique de la figure 2), un re-calcul de l'ouvrage doit être effectué sur la base des données recueillies (cf. références [2] et [4]).

Conclusions

Les résultats des investigations effectuées sur les ouvrages en terre armée présentés ici confirment avant tout, s'il le fallait, l'importance de la surveillance des ouvrages en service, telle que celle-ci est définie dans les documents cités en références, et l'absolue nécessité, pour les plus anciens de ces ouvrages, et notamment pour ceux dont la construction est antérieure à 1979, de faire procéder dans les plus brefs délais à un diagnostic de l'état des armatures, si cela n'a pas été fait depuis plus de 7 ans environ (voire une dizaine d'années au plus pour un ouvrage qui avait été reconnu alors « sain », et situé dans une ambiance non agressive).

Ces résultats soulignent également, d'une manière générale, le bon comportement des armatures des ouvrages construits après cette date et confirment la nécessité de respecter strictement les règles de conception et de construction de ces ouvrages ■



Photo 7 : observation d'une armature depuis l'ouverture réalisée en parement – Source : Jean-Marc Jailloux

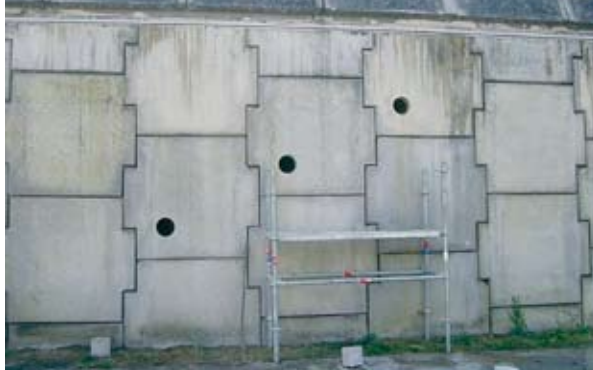


Photo 6 : implantation de carottages sur la hauteur d'un mur
Source : L.R de Strasbourg

Références bibliographiques

- [1] Les ouvrages en terre armée : Recommandations et règles de l'art - LCPC/Sétra - septembre 1979 (ré-impression en juillet 1991, avec fiches techniques actualisées).
- [2] Les ouvrages en terre armée : Guide pour la surveillance spécialisée et le renforcement - Sétra - décembre 1994.
- [3] Les ouvrages de soutènement : Guide de conception générale - Sétra - décembre 1998.
- [4] 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.

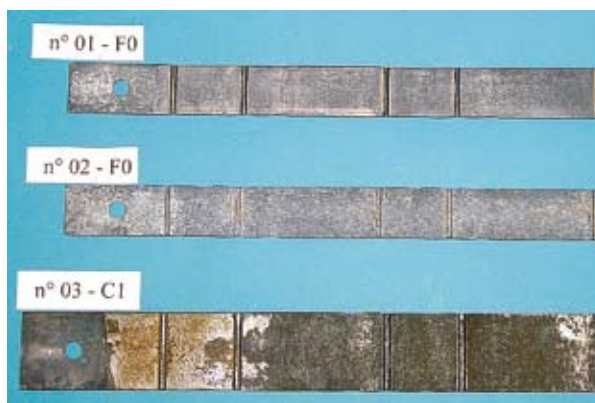


Photo 8 : armatures en cours de préparation en laboratoire avant réalisation de l'essai de traction – Source : Jean-Marc Jailloux