

Tenue à la corrosion de treillis en acier soudé dans les remblais



Pierre BREVET

Laboratoire central des Ponts et Chaussées
Centre de Nantes

Gilbert GRIMALDI

Laboratoire régional de l'Est-Parisien, Melun

Raphaël LU

VSL France, Egly

André RAHARINAIVO

Chargé de mission
auprès du Directeur chargé du pôle Ouvrages d'art
Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Introduction

La cohésion des remblais est fréquemment améliorée par la mise en place d'éléments en acier, souvent galvanisé. La tenue à la corrosion de ces aciers dépend à la fois des caractéristiques des aciers et de celles des sols. Les caractéristiques des matériaux de remblais qui peuvent bénéficier de cette technique en raison de leur moindre agressivité sont décrites dans différents documents réglementaires ou normatifs. Ainsi, pour les busées ou les ouvrages en Terre Armée, la durabilité de ces constructions est spécifiée par plusieurs textes.

On peut souligner que, dans ces cas, les éléments en aciers sont plats et l'application des textes en vigueur aux éléments cylindriques, les « ronds », a dû être examinée en détail. C'est le cas pour les armatures VSoL, qui sont des treillis en acier galvanisé. L'objet de cette étude est donc de répondre à trois questions concernant la durabilité de ces armatures métalliques :

- Quelle est la configuration de la corrosion des ronds d'acier utilisés dans les conditions d'emploi usuelles (notamment dans un sol granulaire non agressif) ?
- Les soudures peuvent-elles présenter une forme de corrosion particulière inhérente notamment à la transformation métallurgique due au soudage et/ou aux conditions particulières de contact sol/armatures ?
- Dans quelles conditions la résistance au cisaillement des soudures peut-elle être affectée par la corrosion ?

Dispositif expérimental. Procédure opératoire

Programme expérimental :

Le programme expérimental a suivi les étapes suivantes :

- la tenue à la corrosion des aciers plats étant connue, il s'est agi de comparer leur comportement à celui des ronds soudés ;

RÉSUMÉ

Les armatures en acier galvanisé utilisées pour renforcer les remblais sont souvent des lanières plates, isolées les unes des autres. Cette étude concerne des treillis soudés constitués de ronds en acier galvanisé ou non. Elle porte sur leur tenue à la corrosion, à comparer à celle des armatures plates, classiques.

Quatre types de treillis et des éprouvettes plates ont été placés dans des caisses remplies de remblais dont l'agressivité corrosive a été accentuée par des cycles de saturation en solution chlorurée et de séchage naturel. L'état de corrosion a été évalué en déterminant la perte de matière.

Les résultats ont montré que ni la forme cylindriques des aciers, ni la présence de joint soudé ne constituent des points de faiblesse vis-à-vis de la corrosion métallique.

MOTS CLÉS : 34-42 - Treillis d'armature - Acier - Renforcement (gén.) - Remblai - Corrosion - Éprouvette - Halogénure.

- des éprouvettes en acier galvanisé et nu ont été testées dans des conditions identiques, afin d'apprécier l'effet de la protection apportée par le zinc ;
- les éprouvettes métalliques ont été placées dans un sol granulaire comparable au matériau de remblaiement courant ;
- l'effet du vieillissement (corrosion) a été accéléré artificiellement, en ajoutant des chlorures au matériau de remblai et en faisant subir à celui-ci des cycles d'humidification totale suivie de séchage naturel ;
- les résultats de la corrosion ont été caractérisés par des observations visuelles et métallographiques, par des pesées donnant la perte de matière en fonction du temps, ainsi que par des essais mécaniques de mesure de la résistance résiduelle au cisaillement.

Éprouvettes métalliques

Les éprouvettes métalliques étaient soit des plats, soit des ronds d'environ 12 mm de diamètre. Elles étaient en acier au carbone non allié, galvanisé et de diverses provenances. Leur teneur en carbone variait de 0,150 à 0,176 %, celle en manganèse de 0,39 à 0,80 % et celle en silicium de 0,088 à 0,18 %. Elles ont été repérées C0, C1, C2, C3, C4 et C5. Il faut noter que, sauf les armatures C0 et C2, ces aciers ont été galvanisés au trempé (par la méthode classique) après soudage. L'armature C0 est un acier plat nervuré, galvanisé au trempé, qui n'a pas été soudé. L'acier C2 a été galvanisé suivant le nouveau procédé Delot, avant d'être soudé. L'armature C5 est une barre nervurée. Ces aciers C2 et C5 ne correspondent pas à des utilisations réelles pour le renforcement des sols.

Au total, dix-huit éprouvettes d'acier C0, plat nervuré, ont été testées ainsi que cinquante éprouvettes d'aciers ronds, soudés.

Pour estimer l'influence de la galvanisation sur la corrosion, certaines éprouvettes ont été décapées pour enlever la couche de zinc et mettre à nu l'acier. Les mêmes repères ont été gardés pour les aciers galvanisés ou dénudés, de même provenance.

Les examens métallographiques ont montré que ces aciers ont été élaborés selon des traitements habituels, avec un refroidissement lent après un laminage à

chaud. En effet, la structure de ces aciers est composée de ferrite et de perlite (fig. 1).

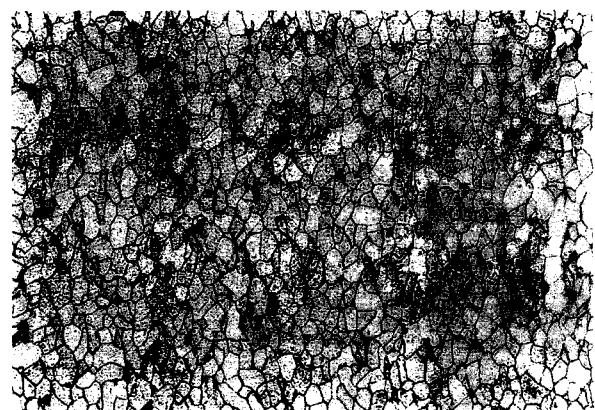


Fig. 1 - Microstructure d'un acier (exemple de l'acier C1) observée au grossissement $G = 200x$.

Ces examens métallographiques ont montré par ailleurs que, sauf pour C2, les revêtements métalliques étaient composés de diverses couches d'alliage zinc-ferré, caractéristiques du procédé classique de galvanisation au trempé. L'épaisseur du zinc a été mesurée à l'aide d'un appareil magnétique Deltascope MP3, placé successivement en trente points sur chaque éprouvette. La précision de mesures était de $\pm 2\%$. Ces mesures n'ont pas pu être faites sur l'acier C5, qui était nervuré. Les valeurs portées dans le tableau I sont des moyennes.

Le tableau I résume les caractéristiques des éprouvettes.

Les soudures ont été caractérisées par leur pénétration et, pour certains aciers, par la microstructure de la zone affectée par la chaleur lors du soudage (fig. 2).

La pénétration p de la soudure est définie (fig. 3) par la relation :

$$p = 100 \cdot \left[1 - \frac{1}{D_1 + D_2} \right]$$

Le soudage des éprouvettes a été effectué par passage de courant électrique à l'aide de pinces enserrant les

TABLEAU I
Caractéristiques des éprouvettes métalliques

| Éprouvette | C0 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
|--|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| Dimensions | | | | | | |
| Section (mm^2) | 40 × 5 | | | | | |
| Diamètre (mm) | | 12 | | | | |
| Longueur (mm) | 250 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Limite d'élasticité (MPa) | — | 500 | 500 | 460 | 460 | 560 |
| Galvanisation avant ou après soudage épaisseur (0 m) | non 141 | après 184 | avant 133 | après 77 | après 132 | après 207 |
| Pénétration de la soudure (%) | — | 9,6 | 8,8 | 11,2 | 16,8 | 19,3 |

pièces à souder. La microstructure de la zone fondue pendant l'opération de soudage est de type habituel. La figure 4 donne un exemple de telle microstructure.

Enfin, le nombre d'éprouvettes a été défini de façon à pouvoir faire les prélèvements nécessaires, à diverses échéances, pour mesurer l'effet de la corrosion. Au total, dix-huit éprouvettes « plates » et cinquante « rondes » ont subi les essais de corrosion dans un remblai.

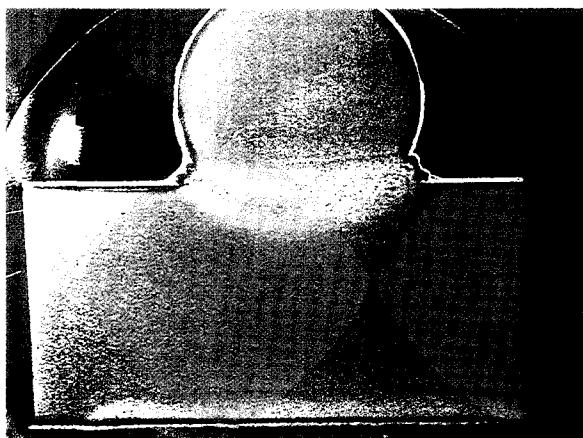


Fig. 2 - Examen métallographique d'un joint soudé en croix.

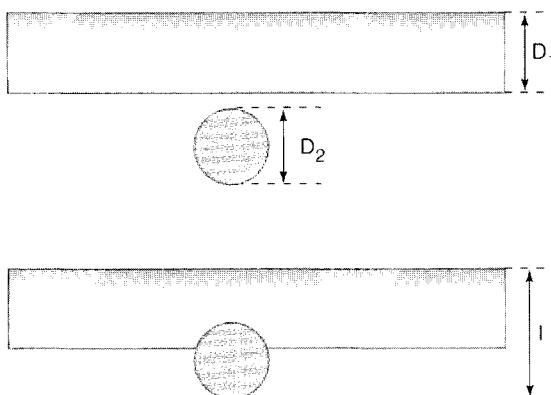


Fig. 3 - Définition de la pénétration p des aciers, après soudage. D_1 et D_2 sont les diamètres des ronds avant soudage, l est la hauteur totale de l'ensemble après soudage.

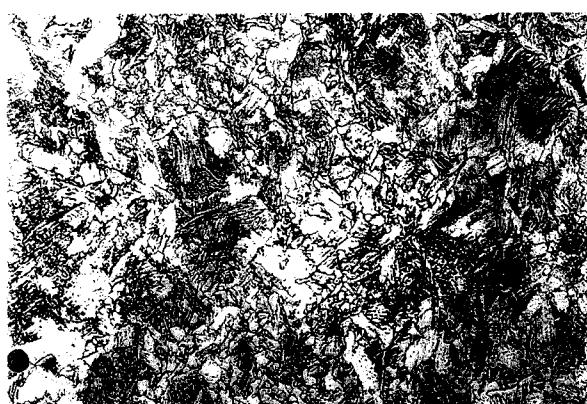


Fig. 4 - Structure de la zone fondue lors du soudage d'un acier (cas de l'acier C1). Métallographie au grossissement $G = 200x$.

Matériaux de remblai

Le matériau de remblaiement utilisé pour les essais était une grave 0/25 bien graduée, provenant de la carrière de Toussacq (Seine-et-Marne). Il contenait 90 % de calcaire et 10 % de silice. La granulométrie de ce remblai est donnée par la figure 5.

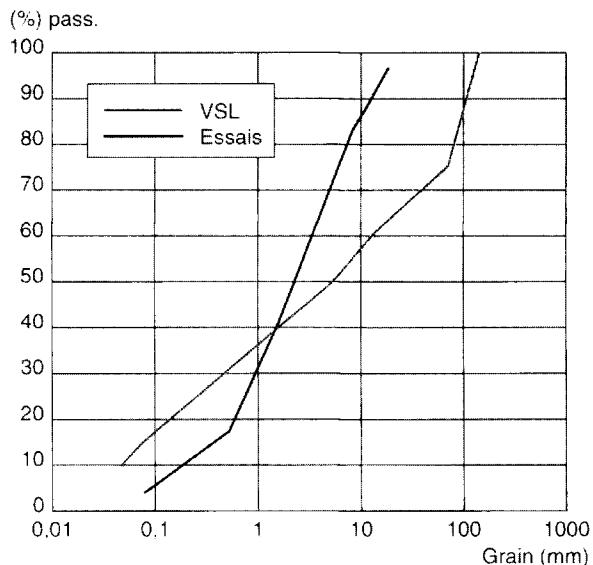


Fig. 5 - Granulométrie du sol utilisé pour les essais, comparée à celle des remblais recommandés par VSL.

Cette grave était globalement peu agressive, ce qui permettait de limiter les risques de perturbation de l'essai qui seraient dues au sol. Pour l'expérimentation, ce remblai a été rendu plus agressif en l'imbibant de solution de chlorure de sodium, suivant des cycles d'humidification (immersion) et séchage naturel. Le chlorure de sodium a été choisi parce qu'il accélère la dissolution du zinc.

Mise en place des éprouvettes dans les bacs

Les éprouvettes ont été réparties dans six bacs en polyester, de $118,8 \times 79,8 \times 59$ cm, d'une contenance d'environ 400 l. Chaque bac était séparé en deux compartiments, isolés pour séparer les éprouvettes galvanisées et dénudées, de même provenance.

Une couche drainante d'environ 5 cm, faite de sable fin, était placée en fond de bac. Une feuille de géotextile était placée sur celle-ci pour l'isoler du remblai étudié. Les éprouvettes métalliques étaient placées entre deux couches de grave, d'environ 10 cm de hauteur chacune.

Ainsi, dans un même bac étaient placées, sur un seul niveau mais séparées, d'un côté, quatre armatures en acier nu et de l'autre côté, quatre éprouvettes en acier galvanisé (fig. 6). Seules les éprouvettes plates (C0), qui sont plus courtes, ont été placées en deux ensembles de huit éprouvettes dans le même bac.

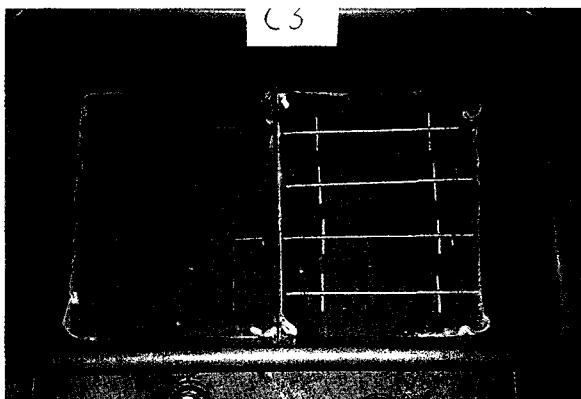


Fig. 6 - Disposition des éprouvettes dans un bac, avant enfouissement complet.

Circuit de la solution saline

La solution saline qui doit saturer le remblai était contenue dans des réservoirs. Elle pouvait entrer dans les bacs grâce à des canalisations d'environ 50 mm de diamètre, en matière plastique (PVC). Les différents bacs étaient alimentés en parallèle.

Pour chaque bac, une vanne s'ouvrait automatiquement pour le remplissage. Cette opération durait environ 10 min (fig. 7). Après une certaine durée d'immersion, une autre vanne automatique s'ouvrait pour évacuer l'eau. Celle-ci n'était pas réutilisée.

Procédure opératoire

Pour les premiers cycles, la saumure utilisée était dosée à 35 g/l de chlorure de sodium et l'immersion durait 4 h et le séchage 12 h. Les mesures faites après vingt-cinq cycles ont montré que la corrosion métallique était très lente. L'agressivité du remblai a été accrue pour accélérer le vieillissement.

Plus précisément, à partir du 51^e cycle, la saumure contenait 66 g/l de NaCl, l'immersion durait 12 h et le séchage 24 heures.

Après un certain nombre (25, 75, 86, 100 et 170) de cycles d'immersion-séchage, des éprouvettes métalliques ont été extraites des bacs, à raison d'une éprou-

vette par type d'acier et pour une échéance. Elles ont été nettoyées, pesées avant et après le décapage permettant d'enlever la rouille adhérente. Ensuite, les éprouvettes soudées ont été coupées en deux, une moitié étant soumise à un essai de cisaillement. Quelques essais complémentaires ont également été effectués : examen métallographique, essai de dissolution accélérée.

Ainsi, les éprouvettes qui ont été extraites du remblai n'ont pas été remises en place.

Mesures et résultats

Observations visuelles

Les éprouvettes prélevées après un certain nombre de cycles de vieillissement ont été examinées visuellement. Elles étaient entourées d'une gangue, qui était souvent peu adhérente. Celle-ci s'enlevait à la brosse métallique, ce qui permettait de mieux évaluer l'état des éprouvettes.

Les figures 8 et 9 donnent des exemples d'éprouvettes après vieillissement dans les bacs.

Pesées et perte d'épaisseur

Après vieillissement, les éprouvettes ont été nettoyées par attaque acide contrôlée par l'utilisation d'un inhibiteur.

Les éprouvettes en acier galvanisé ont été immergées dans l'acétate d'ammonium à saturation (dissous à 1 483 g/l) dans l'eau distillée à 25 °C. Cette immersion qui durait 15 min, était suivie d'un brossage métallique et de deux rinçages à l'eau chaude, puis d'un rinçage en eau courante froide. Ensuite, les éprouvettes ont été séchées à l'acétone et à l'étuve à 50 °C pendant une heure.

Les éprouvettes en acier nu ont été décapées en solution d'acide chlorhydrique contenant un inhibiteur, dont la composition pour 1 l était de 184 cm³ HCl 6N, 2 g d'hexaméthylène – tétramine, le reste étant H₂O.

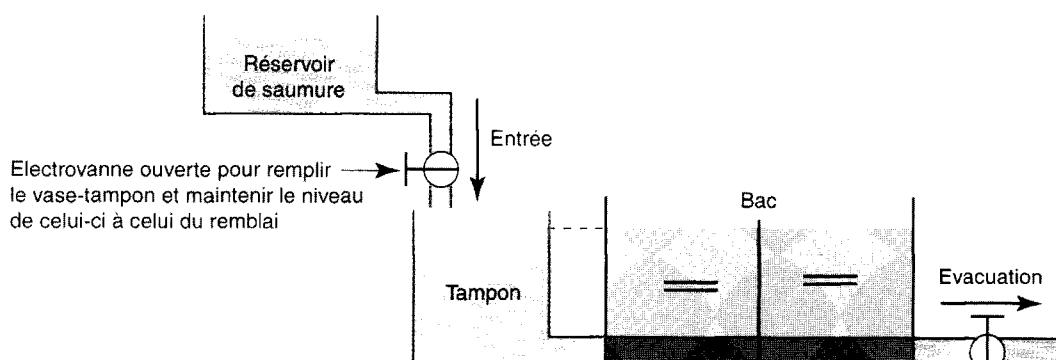


Fig. 7 - Principe du circuit de la solution saline vers un bac contenant les éprouvettes métalliques.

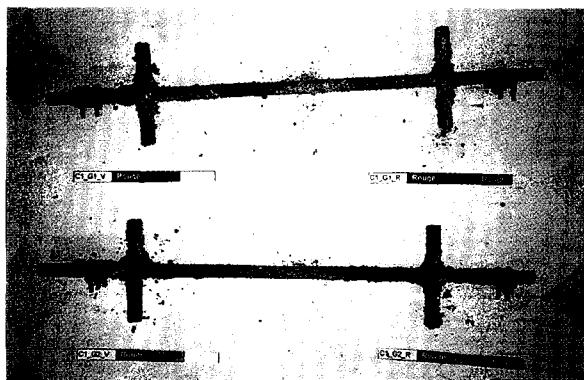


Fig. 8 - Aspect d'éprouvettes après corrosion dans un remblai, avant nettoyage.

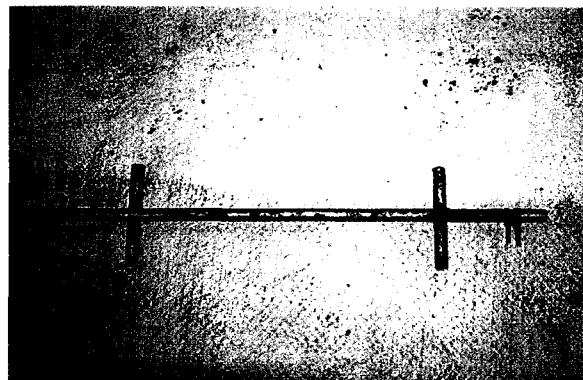


Fig. 9 - Aspect d'une éprouvette après corrosion dans un remblai et nettoyage.

Les masses des éprouvettes ont été mesurées avant et après vieillissement, avec une précision meilleure que 0,01 g.

Les pertes de masses ont été transformées en pertes moyennes d'épaisseur, suivant la relation suivante, où m est la perte de masse, e la perte d'épaisseur d'une éprouvette d'aire latérale (au contact du sol), S et ρ la masse volumique du métal : $e = \frac{m}{\rho \cdot S}$. Cette perte d'épaisseur était rapportée au rayon des éprouvettes.

La figure 10 donne les pertes d'épaisseur des éprouvettes en acier nu, en fonction du nombre de cycles de vieillissement. De même, la figure 11 donne celles des éprouvettes en acier galvanisé.

Résistance au cisaillement

Pour l'essai de résistance au cisaillement, après vieillissement artificiel, les éprouvettes rondes ont été coupées en deux morceaux comprenant chacun un joint de soudure. Les dimensions de l'éprouvette pour cet essai sont données sur la figure 12.

La force à la rupture F a été mesurée conformément à la norme NF A35.023. Elle caractérise la résistance au cisaillement de l'éprouvette. Un joint soudé est jugé satisfaisant si le rapport entre cette force de rupture F et F_e (qui correspond, pour la barre longitudinale, à la valeur nominale de la limite d'élasticité) dépasse 0,3,

soit $\frac{F}{F_e} \geq 0,3$.

Le tableau II donne les valeurs de ce rapport pour les éprouvettes prélevées après 75 ou 170 cycles. Ces résultats montrent que les spécifications sur la tenue au cisaillement sont satisfaites dans tous les cas, pour les éprouvettes après essai de corrosion. La comparaison de ces différents résultats montre que l'acier C3 a été localement plus dégradé que les autres.

Epaisseur perdue (μm)

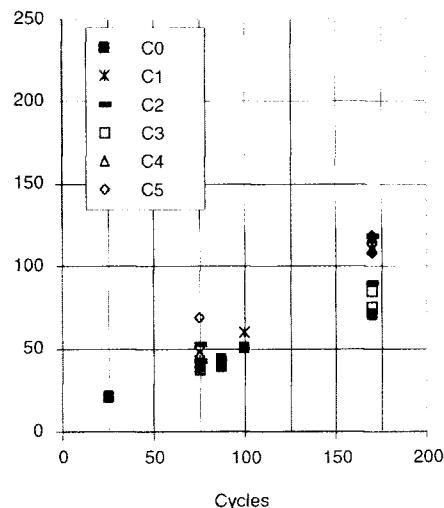


Fig. 10 - Perte d'épaisseur des éprouvettes en acier nu en fonction du nombre de cycles de vieillissement (immersion-séchage).

Epaisseur perdue (μm)

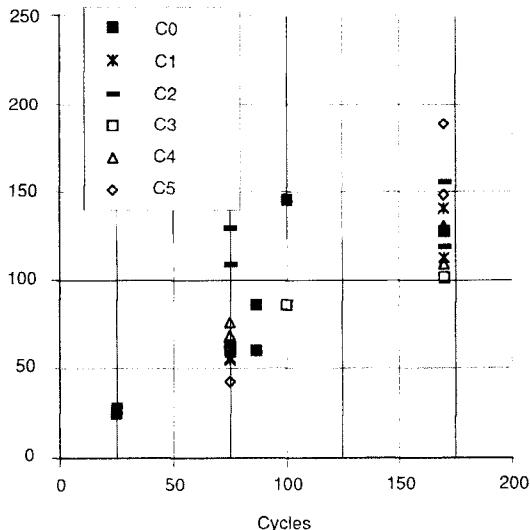


Fig. 11 - Perte d'épaisseur des éprouvettes en acier galvanisé en fonction du nombre de cycles de vieillissement (immersion-séchage). L'épaisseur du revêtement galvanisé était de 80 μm pour C3 et environ 200 μm pour C5.

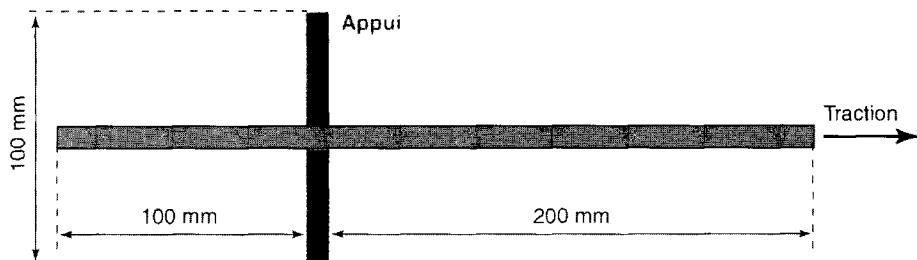


Fig. 12 - Éprouvette soudée en croix, pour essai de cisaillement par arrachement.

TABLEAU II
Résultats des essais de cisaillement des éprouvettes soudées en croix

| Valeur de F/F_e | Acier nu après 75 cycles | Acier nu après 170 cycles | Acier galvanisé après 75 cycles | Acier galvanisé après 170 cycles |
|-------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| C1 | 0,63 | 0,60 | 0,83 | 0,75 |
| C2 | 0,85 | 0,76 | 0,51 | 0,46 |
| C3 | 0,40 | 0,36 | 0,43 | 0,31 |
| C4 | 1,06 | 1,15 | 1,22 | 1,06 |
| C5 | 0,96 | 0,91 | 0,91 | 0,96 |

Interprétation des résultats. Étude complémentaire

Comparaison des vitesses de corrosion des armatures galvanisées

L'un des objets de cette étude était de comparer les vitesses de corrosion moyenne des armatures galvanisées de forme plate ou cylindrique. Il s'agit de vitesses moyennes déterminées à partir de pesées des éprouvettes.

Les résultats expérimentaux ont montré que la forme des armatures influe peu sur cette vitesse de corrosion. Par ailleurs, si la comparaison exclut les résultats concernant les aciers C2 et C5, qui ne sont pas utilisés pour renforcer les sols, la vitesse de corrosion des armatures cylindriques est très légèrement inférieure à celle de l'armature plate.

Localisation des zones corrodées

Un autre objet de cette étude était de vérifier si la corrosion se produit, ou non, préférentiellement au niveau des soudures des éprouvettes cylindriques.

Les examens visuels ont montré que ces joints soudés n'étaient pas plus corrodés que l'ensemble de l'éprouvette. Comme ces observations étaient qualitatives, la tenue des joints soudés a été caractérisée par les essais de cisaillement. Pour toutes les éprouvettes qui ont été soumises à la corrosion accélérée, ces essais ont montré que les joints soudés avaient des caractéristiques mécaniques assez proches des exigences normatives, même si, pour l'un des aciers, un doute pouvait subsister du

fait qu'une seule éprouvette a été prélevée à chaque échéance, pour un acier donné.

Étude complémentaire sur l'influence de la soudure

Les résultats des pesées après essai de corrosion ont montré que les pertes moyennes d'épaisseur des ronds soudés étaient comparables à celles des aciers plats. Toutefois, un doute pouvait venir sur la tenue locale des joints soudés. C'est pourquoi, des essais très accélérés de corrosion ont été effectués pour lever ce doute.

Ainsi, deux croisillons de l'acier C4 ont été soumis à une dissolution dans une solution à 20 % d'acide chlorhydrique 6N, après avoir été lavés et séchés. Cette immersion a duré une semaine. Ensuite, ces éprouvettes ont été lavées, séchées, pesées et examinées, avant d'être immergées de nouveau pendant une semaine.

Les mesures et observations visuelles ont montré que la perte totale d'épaisseur (rapportée au rayon des cylindres) était d'environ 1 mm. Les zones affectées par la chaleur du soudage n'ont pas été dissoutes et ont joué le rôle de cathode dans le mécanisme de corrosion. Il s'agit, en particulier, soit des zones d'appui des pinces de soudage, soit du métal refoulé. La dissolution a affecté principalement la partie courante des aciers (à partir d'une certaine distance des joints soudés). Elle a aussi mis en évidence le fibrage de ces pièces, dû au laminage à chaud (fig. 13).

Conclusion

Les résultats expérimentaux permettent de répondre, en grande partie, aux questions qui ont été posées au début

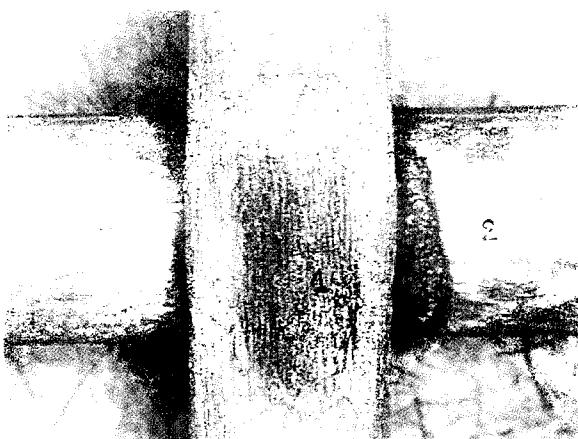


Fig. 13 - Aspect d'une éprouvette après dissolution dans une solution d'acide chlorhydrique.

de cet article et qui concernent la tenue à la corrosion des treillis soudés en acier rond galvanisé. Les conclusions générales suivantes peuvent être tirées, en tenant compte du nombre relativement faible des éprouvettes testées.

La corrosion se produit de façon pratiquement uniforme sur les aciers, hors des soudures.

La vitesse de corrosion des aciers ronds est du même ordre de grandeur que celle des produits plats.

Même lorsque la dissolution est importante, la résistance au cisaillement des joints soudés reste satisfaisante pour les aciers qui ont été soudés avec une forte pénétration et avaient à l'origine, une grande résistance au cisaillement.

Remerciements. Nous remercions Mlle Me-Sun Kim et M. Jean-Claude Languehard pour leur importante contribution à cette étude.

REFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Terre armée : recommandations et règles de l'art, LCPC-SETRA, 1978.

Buses métalliques : recommandations et règles de l'art, LCPC-SETRA, 1981.

Earth retaining structures, British Standard BS 8002, 1994.

Strengthened-reinforced soils and other fills, British Standard BS 8006, Section 3, 1995.

Design and construction guidelines for reinforced soil structures, US Federal Highway Administration publication FHWA-RD-89-043, Vol. 1, 1990.

ABSTRACT

Corrosion resistance of welded steel reinforcing mesh in fill

P. BREVET, G. GRIMALDI, R. LU, A. RAHARINAIVO

The galvanized steel reinforcing bars used in fills often consist of individual flat strips. This study deals with welded steel mesh made from galvanized or ungalvanized round reinforcing bars and compares their corrosion resistance with that of the conventional flat reinforcing bars.

Four types of mesh and flat test specimens were placed in cases containing fill whose corrosiveness was increased by cycles of saturation with a chlorinated solution followed by natural drying. The extent of corrosion was then assessed by determining the amount of material lost.

It was found that neither the cylindrical form of the reinforcing bars nor the presence of a weld made the metal more susceptible to corrosion.