

# Les ouvrages de soutènement

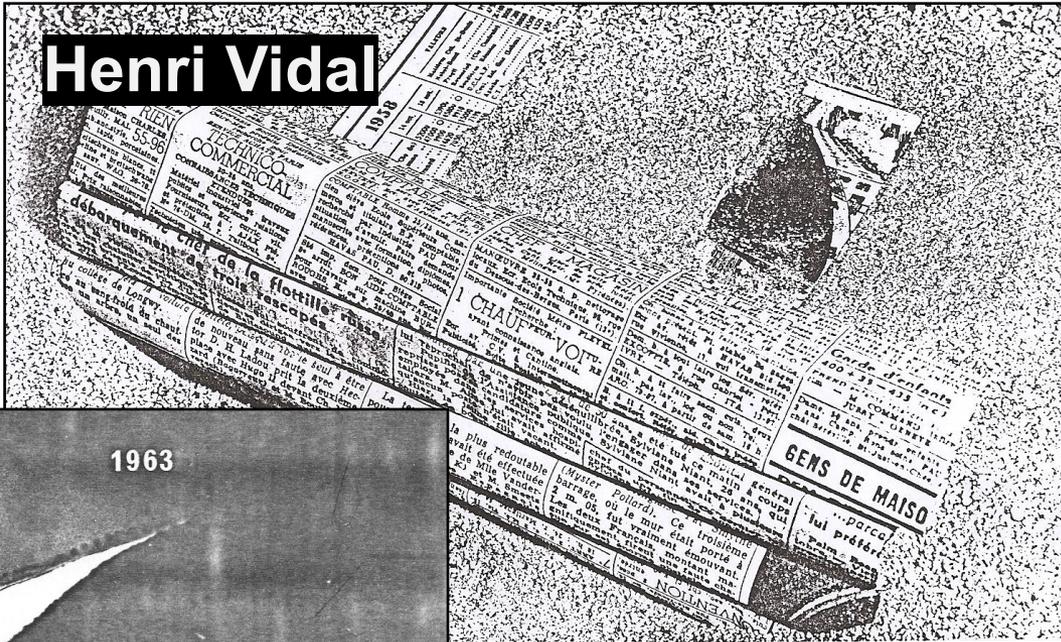
## Partie 2 : les ouvrages en remblai renforcé

### *La Terre Armée hier et aujourd'hui*

- Nicolas FREITAG    Terre Armée



# Henri Vidal



1963



# LA TERRE ARMÉE

HENRI VIDAL  
Ingénieur de l'École Polytechnique  
Ingénieur civil de l'École des Ponts et Chaussées  
Architecte DPLG

## BREVET D'INVENTION

9.421

N° 1.393.988

Internationale :

E 02 L

tion.

se).

à 14° 42', à Paris.

22 février 1965.

industrielle, n° 14 de 1965.)

publiée en exécution de l'article 11, § 7,  
de la loi du 3 juillet 1844 modifiée par la loi du 7 avril 1902.)

Les premiers ouvrages sortis de la main de l'homme ont emprunté l'essentiel de leurs matériaux à la nature, principalement au sol. C'est ainsi que parmi les constructions les plus anciennes, des fossés, remblais, canaux, huttes, etc., ont été exécutés en terre. De nos jours encore certaines régions connaissent, pour l'exécution de bâtiments, l'usage du torchis, c'est-à-dire d'un mélange de terre argileuse et de paille ou foin mis en place entre des branches.

Au cours des siècles, le progrès des techniques a conduit à une réduction du domaine d'application de la terre comme matériau de construction. C'est ainsi que le béton armé, s'il utilise des éléments tirés du sol, les agrégats — le plus souvent après traitement (concassage, criblage, lavage, etc.) — exige la mise en œuvre de deux constituants d'origine essentiellement industrielle, l'acier, pour les armatures et le ciment pour la liaison entre agrégats et armatures.

Ce n'est qu'au cours des dernières années, que sous l'effet de l'utilisation généralisée des engins de terrassement et du développement de la mécanique des sols, de nombreux ouvrages de haute technicité ont été exécutés, dans des conditions économiques, en terre : digues, routes, pistes d'aérodrome, barrages, etc.

La présente invention se propose de réaliser une nouvelle application de la terre comme matériau de construction. Elle a plus particulièrement pour objet un ouvrage de construction caractérisé en ce qu'il comprend principalement des éléments granuleux ou pulvérulents et des armatures disposées de telle sorte que ces éléments sont maintenus les uns par rapport aux autres, soit par frottement direct avec les armatures, soit par frottement avec d'autres éléments en contact avec les armatures, l'ensemble formant ainsi un volume doué de cohésion et capable de résistance.

Par « éléments granuleux ou pulvérulents », il faut entendre des grains normalement tirés du sol et

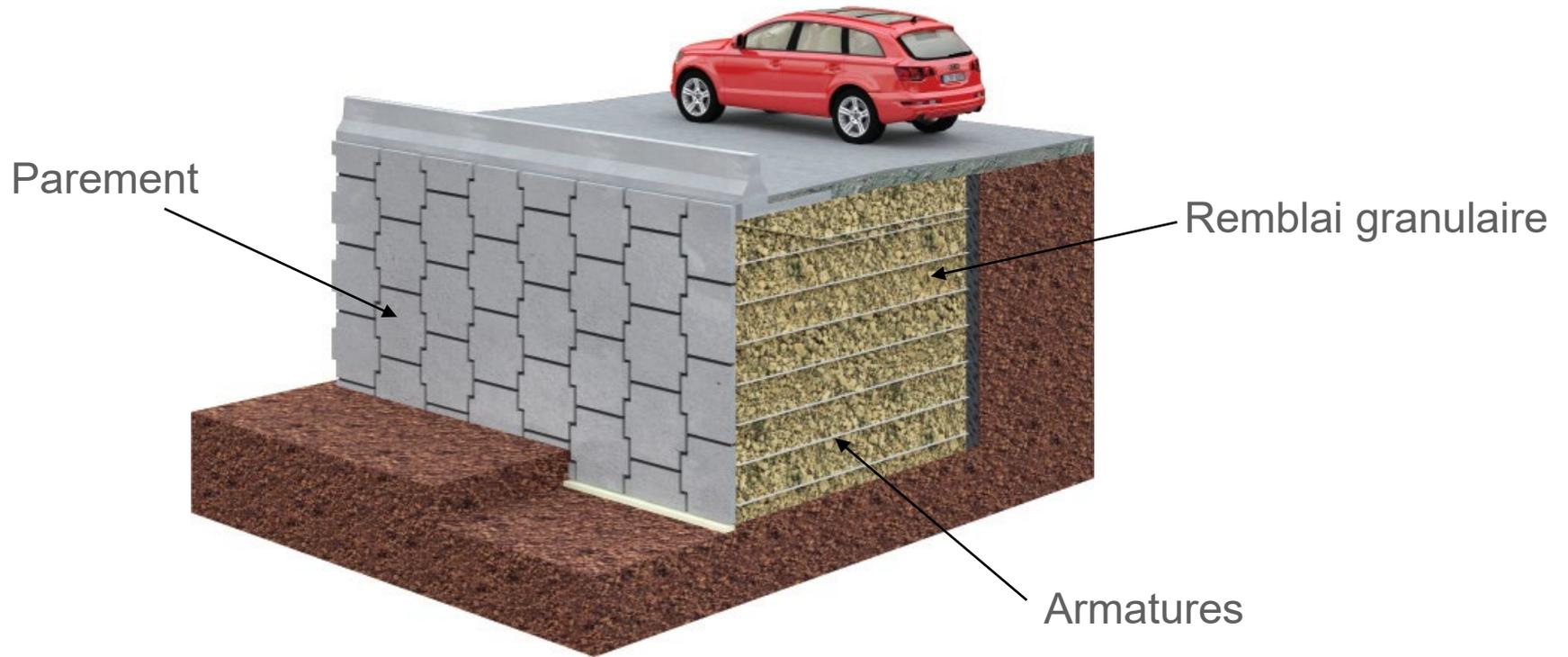
le terme « armature » vise des éléments de grande longueur résistant à la traction tels que ceux qui sont utilisés dans le béton armé et dans les plastiques armés.

Alors que dans un massif de terre non cohérente l'équilibre ne peut être obtenu que sous l'effet du frottement interne des grains, dans un ouvrage suivant l'invention le frottement grains-armatures est un facteur de stabilité qui, combiné avec le frottement des grains entre eux, permet d'obtenir des profils d'équilibre ou des volumes stables qui seraient impossibles en l'absence d'armature. Dans les ouvrages suivant l'invention, la cohésion a une origine très différente de celle qui caractérise les massifs en béton, armé ou non, où elle est due à la liaison rigide créée par la prise et le durcissement du ciment, différente également des constructions en torchis dont la cohésion est créée par l'effet de collage de l'argile.

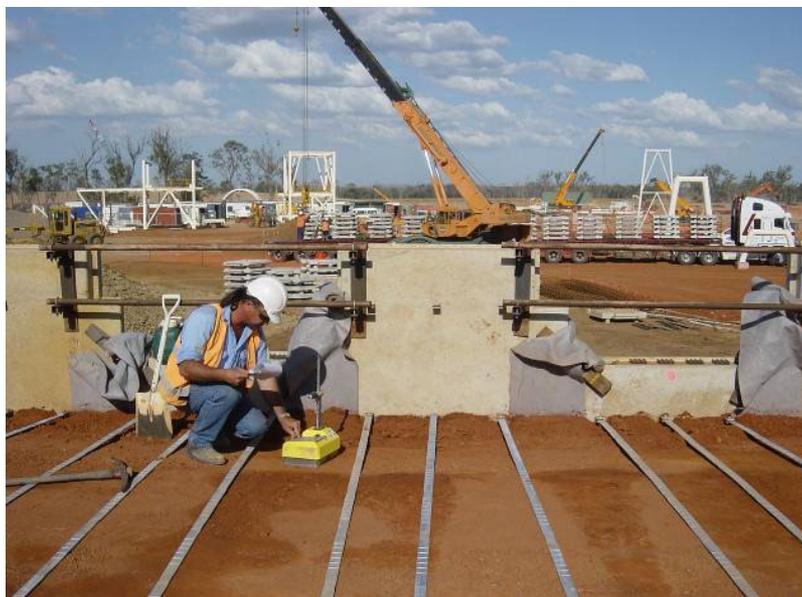
Dans les ouvrages suivant l'invention, les armatures font sentir leur action sur une certaine zone qui les entoure mais il va de soi que même si les armatures sont prolongées jusqu'à la surface libre de l'ouvrage, cette action, génératrice de cohésion, est moins efficace sur la surface libre où la poussée des grains tend à chasser ces derniers hors du massif, de sorte qu'il est le plus souvent nécessaire de prévoir sur la surface libre d'un ouvrage suivant l'invention un moyen pour retenir les grains qui se trouvent sur la surface ou au voisinage de cette dernière.

Dans la plupart des cas, ce moyen est constitué par une sorte d'habillage distinct des grains et de l'armature; on l'appellera dans la suite « peau ». Cette peau peut être réalisée sous diverses formes, mais son mode d'exécution préféré est constitué par des éléments dotés d'une certaine rigidité, de profil en U, dont les ailes servent à la fois à les ancrer dans le massif de grains et à les juxtaposer les uns par rapport aux autres. Cette peau ne joue à proprement parler aucun rôle dans la stabilité de l'ouvrage, étant

# Éléments constitutifs principaux de la Terre Armée®



# La Terre Armée<sup>®</sup>, les armatures



HA en acier galvanisé



Géosynthétique : GeoStrap<sup>®</sup>, EcoStrap<sup>™</sup>



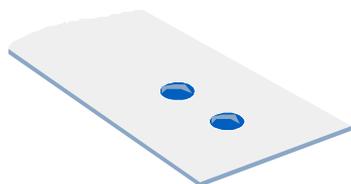
HA EcoStrap<sup>™</sup>



# Introduction

## Armatures métalliques : technologies successives

### ARMATURES LISSES

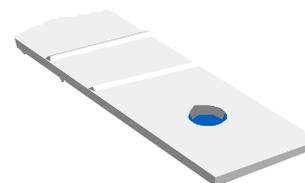


**De 1965 à 1976**  
Acier galvanisé  
Epaisseur 3 mm  
+ 25-40  $\mu\text{m}$  zinc

**De 1972 à 1975**  
**Métaux passivables**  
- Acier inoxydable (65 structures)  
- Alliage Al-Mg (8 str.)

**Ces matériaux passivables se sont montrés inadéquats, conduisant à des cinétiques de corrosion excessives**

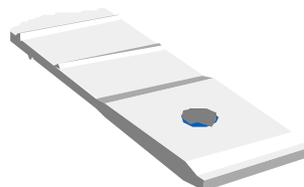
### ARMATURES NERVUREES (Haute Adhérence HA)



**Depuis 1976**  
Galvanisation à chaud  
Epaisseur 4 ou 5 mm  
+  $\geq 70 \mu\text{m}$  zinc

**Adhérence sol/armature améliorée**

### ARMATURES H.A. A EXTREMITÉ RENFORCEE (HAR)



**Depuis 1986**  
Galvanisation à chaud  
Epaisseur 5 mm  
+ Extrémité épaissie au laminage

# Limites d'agressivité des remblais pour les ouvrages "permanents"

	Unité	Hors d'eau	Immergé
Résistivité (à l'état saturé)	$\Omega.cm$	> 1000	> 3000
pH	—	5 < pH < 10	5 < pH < 10
Chlorures	mg/Kg	< 200	< 100
Sulfates <sup>(3)</sup>	mg/Kg	< 1000	< 500
5 [Cl <sup>-</sup> ] + [SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] <sup>(1)</sup>	mg/kg	< 1000	< 500
Matières organiques (teneur totale en C)	ppm	< 100	< 100

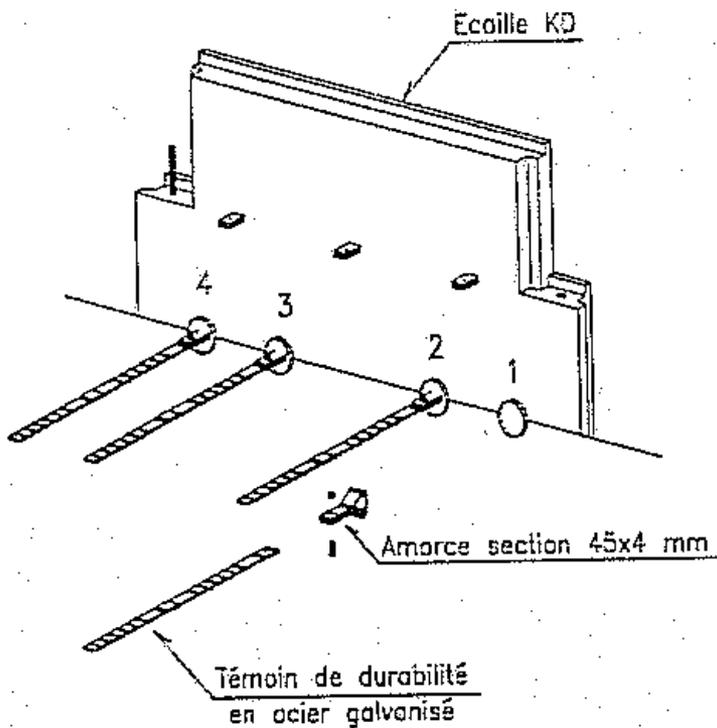
(1) Superposition simplifiée en présence des deux sels

(2) Il est recommandé de vérifier systématiquement la résistivité et les teneurs en sels

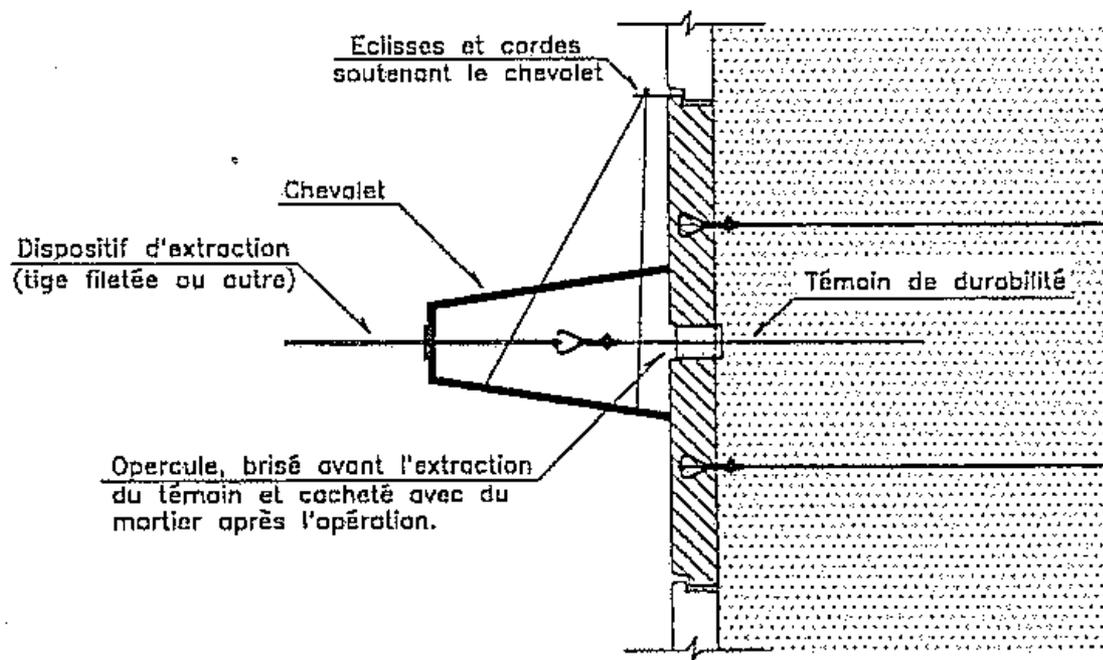
(3) En présence de sulfures S<sup>2-</sup>, substituer par [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] + 3 [S<sup>2-</sup>]

# Armatures témoin

## MISE EN PLACE



## EXTRACTION D'UN TEMOIN



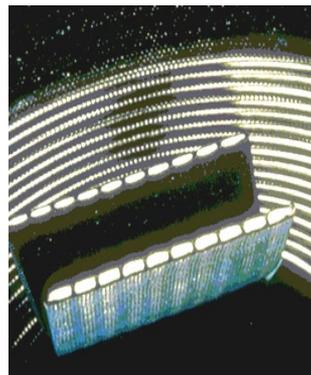
# GeoStrap<sup>®</sup>, Ecostrap<sup>™</sup> les Armatures géosynthétiques

Armatures les plus récentes et d'application croissante

- Particulièrement adaptées dans le cas de remblai chimiquement agressifs

GeoStrap<sup>®</sup> 2 < ph < 9

- fibres polyester haute tenacité
- gaine polyéthylène
- largeur : 50 mm, 70 mm et 90 mm



EcoStrap<sup>™</sup> 1 < ph < 13

- fibres PVA
- LLDPE gaine
- largeur : 50 mm

HA Haute Adhérence

- Haute adhérence
- Pour les matériaux fins traités



# Parements

## Peau métallique pour les tout premiers ouvrages

Premier mur en Terre Armée construit en 1965 par EDF sur la route d'accès au barrage de Pagnères (Hautes-Pyrénées)



# Autoroute A 8 (Roquebrune – Menton)

5.000 m<sup>2</sup> (parement) de murs en 1969

Hauteur maximale 20m



Mur du Peyronnet, A8



## Parements en béton, les plus courants



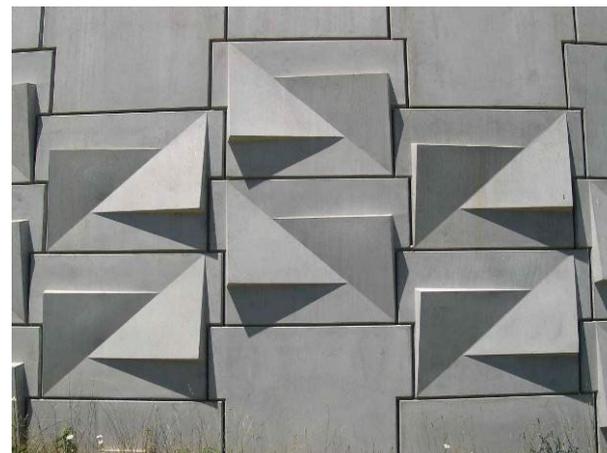
TerraClass® (1.5 m x 1.5 m)



TerraSquare® (1.5 m x 1.5 m)



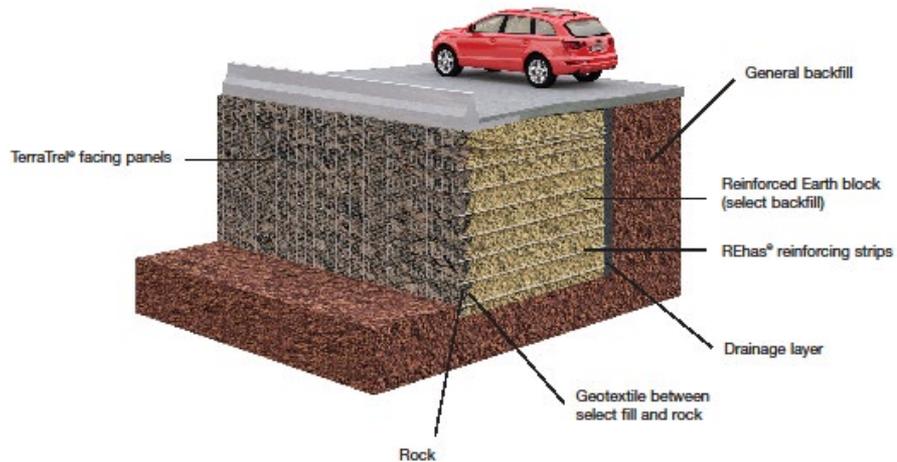
TerraPlus® (3.0 m x 1.5 m)



TerraTee® (1.6 m x 2.0 m)



# Parements en treillis soudés



TerraTrel® Minéral



ArmaStone™ ArmaGreen™



TerraTrel® Minéral



# Evolution des Normes

1973: Note Technique LCPC : "La Terre Armée"

1979: Guide de l'Administration Nationale des Routes: «Recommandations et règles de l'art pour les ouvrages en Terre Armée»

1992/1998: Norme Française NF P 94-220 "Renforcement des sols – Ouvrages en soles rapportés renforcés par armatures peu extensibles et souples"

À ce jour: NF P 94-270:2020 "*Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement – Remblais renforcés et massifs en sol cloué*", norme nationale d'application de l' Eurocode 7 (EN 1997-1:2004) pour les parois clouées et les ouvrages en sol renforcé, les vérifications sont faites aux états limites ultimes avec coefficients de sécurité partiels.

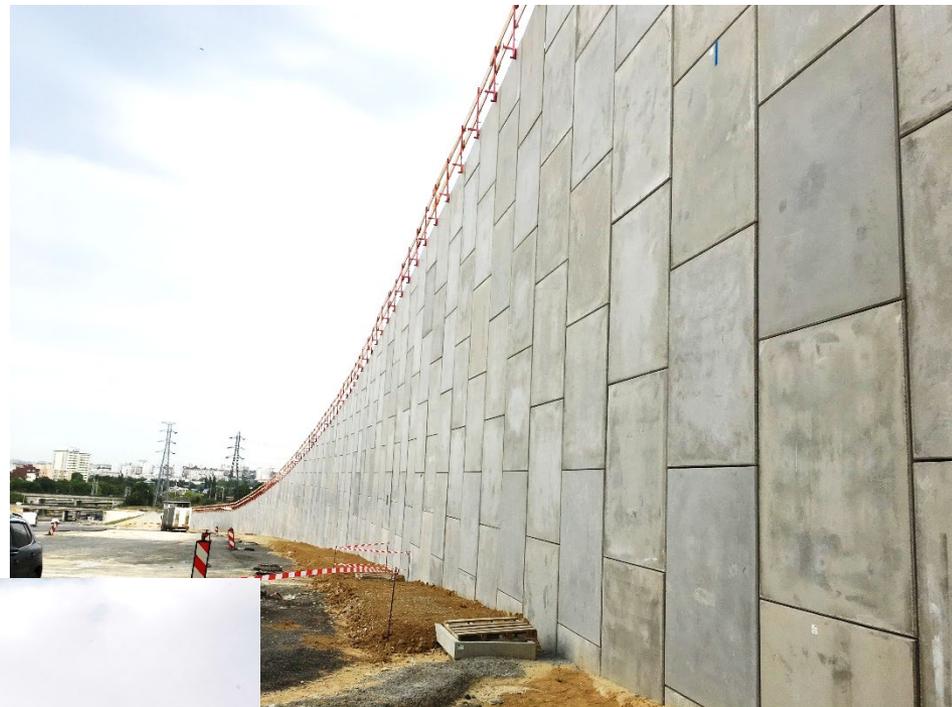
En outre, norme européenne pour l'exécution de travaux géotechniques spéciaux pour remblai renforcé: EN 14475:2006

Des normes spécifiques pour la Terre Armée existent également dans d'autres pays: Allemagne, UK (British Standard), USA (AASHTO), Japon, Australie...



## Projets récents: France

**RN19 Boissy St Léger, France**  
**EcoStrap**  
**Limons traités à la chaux**  
**Hmax = 13,60 m**



**Ligne à grande vitesse**  
**LGV SEA,**  
**Fontaine le comte, France**  
**Armatures HA acier galvanisé**  
**Hmax = 12,30 m**  
**Vitesse commerciale 320 km/h**  
**Vitesse épreuve 352 km/h**  
**Ouvrage instrumenté en dynamique par l'UGE**

**Merci pour votre attention !**

