

## **PREALABLES D'UTILISATION DE LA TECHNIQUE DE LA TERRE ARMEE AU CAS DE LA ROCADE MEDITERRANEENNE**

**Saïd JAFRANE:** Chef d'Aménagement de la Rocade Méditerranéenne

**Khalid Abdellaoui:** Chef de la Division des Ouvrages d'Art à la DRCR

**Lahcen Aït Brahim:** Directeur Régional de l'Équipement d'Al Hoceïma

### **PLAN DE LA COMMUNICATION**

#### ■ **Résumé**

- 1. Conditions géologiques et caractéristiques mécaniques des sols de fondation**
- 2. Genèse de la proposition de la terre armée**
- 3. Acceptation de la solution par le Maître d'Ouvrage**
- 4. Définition du projet de terre armée Freyssisol**
- 5. Définition du prix de soutènement**

#### ■ **Conclusion**

## **Résumé**

La technique de la terre armée date des années 60 et depuis elle n'a pas cessé d'évoluer tant au niveau des outils de dimensionnement qu'au niveau des matériaux et esthétique du parement de protection.

Le thème a pour objectif de présenter la technique des soutènement des remblais par des murs en terre armée, les justifications de son utilisation dans le cadre du projet de construction de la Rocade Méditerranéenne reliant Jebha à Bni Boufrah et la démarche adoptée par la DRCR pour la mise en œuvre du projet.

On passera en revue la genèse de la proposition à l'appui des conditions géologiques et géotechniques du site, une comparaison de coût entre les murs prévus au contrat ; murs voile à contreforts ; et la solution variante adoptée et les différentes étapes suivies avant l'acceptation de la solution « terre armée » ainsi que les exigences demandées par le Maître d'Ouvrage pour la durabilité et la pérennité des ouvrages. La définition du prix de mise en œuvre sera exposée.

**Mots-clé: soutènement- remblai – paramètres géotechniques- portance–terre armée – dimensionnement –garantie décennale-**

### **Principe de la terre armée**

Le principe de la terre armée repose sur l'association d'armatures synthétiques à un remblai mis en œuvre par couches successives.

Les efforts de poussée des terres sont repris par frottement sol armatures.

Les armatures sont solidarisiées à un parement généralement en béton.

La technique est constituée de trois éléments :

- Le parement, généralement réalisé à l'aide de panneaux en béton armé, ayant une forme particulière et limité en poids pour des raisons de manutention.

Des demi panneaux de bas de mur ainsi que des panneaux cruciformes pour les hauts de mur complètent la gamme et permettent de s'ajuster au mieux au projet.

Ces panneaux sont imbriqués les uns dans les autres avec des goujons assurant la continuité du parement.

Des plots en élastomère maintiennent l'écartement vertical entre panneaux.

Les joints verticaux et longitudinaux sont obturés sur des bandes de non tissé.

Le parement peut être traité et adapté aux choix des Architectes et des Maîtres d'oeuvre.

- Les armatures synthétiques « incorrodables » "Paraweb 2S" sont la force et l'originalité du système « freyssinet ».

Insensibles aux courants vagabonds, elles se présentent sous la forme de bandes de 90 x 5 mm constituées de faisceaux de fils de polyester, partie résistante de l'armature, protégés par une couche de polyéthylène.

Elles sont solidarisiées au parement par un système de boucles et goupilles galvanisées, également protégées par du polyéthylène.

- Des remblais naturels de granulométrie 0/250 mm ayant moins de 15% d'éléments inférieurs à 80 microns ;

L'emploi d'armatures synthétiques incorrodables, "Paraweb 2S", autorise l'utilisation de matériaux de remblai présentant des caractéristiques chimiques très larges ( $2 < PH < 13$ ) tels que sables de mer, ou cendres volantes.

Le projet de construction de la Rocade Méditerranéenne entre EL JEBHA et AJDIR sur 103 kilomètres prévoit la construction de plus de 11 kilomètres de murs de soutènement de différents types adaptés en fonction de la hauteur du talus de remblai à soutenir : des murs en gabions pour les hauteurs n'excédent pas 5 m, des mur voile en béton armé pour les hauteurs de 5 à 12 m et des murs voile à contreforts en béton armé pour les hauteurs de 12 à 16 m. Pour les murs voile, les investigations géotechniques et particulièrement pressiométriques ont permis de réaliser les dimensionnements les plus optimaux sous effet de séisme.

## 1-Conditions géologiques et caractéristiques mécaniques des sols de fondation

Les investigations géologiques et géotechniques réalisées tout le long du tracé ont permis de dégager les paramètres de dimensionnement. Le tableau suivant donne une synthèse de ces conditions et paramètres:

| PK     | Pente naturelle du TN                 | stratigraphie                                                                                        | C' en KPa | $\Phi'$ en ° | Pression admissible du sol de fondation en KPa |
|--------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|------------------------------------------------|
| 3+897  | 32° à 36°                             | Blocs de calcaire stratifié<br>Roches à matrice calcaire<br>Limons sableux                           | 30        | 35           | 155                                            |
| 6+664  | 32° à 36°                             | Calcaire gréseux                                                                                     | 30        | 35           | 194                                            |
| 7+070  | 30° à 35°                             | Limon rougeâtre avec des blocs de grés<br>Limon alterné de sable et argile marneuse<br>Grés fracturé | 30        | 35           | 154                                            |
| 7+250  | 30° à 34°                             | Calcaire gréseux avec des joints marneux gréseux feuilletés                                          | 30        | 35           | 165                                            |
| 7+464  | 30° à 34°                             | Blocs de grés quartzitiques avec joints marneux                                                      | 30        | 35           | 170                                            |
| 8+291  | 25°                                   | Marnes gréseuses avec intercalation de schiste argilo gréseux                                        | 0         | 40           | 155                                            |
| 9+685  | 30° à 35°                             | Limon rougeâtre<br>Marne limoneuse<br>Limon schisteux                                                | 30        | 17           | 155                                            |
| 11+787 | Amont : 35° à 50°<br>Aval : 25° à 35° | Calcaire gréseux avec joints argilo marneux ou argilo gréseux de 40 à 50 cm d'épaisseur              | 85        | 43           | 200                                            |
| 14+307 | 25° à 30°                             | Flysch fortement plissé                                                                              | 50        | 22           | 144                                            |
| 14+864 | 25° à 30°                             | Grés fracturé avec des joints argilo gréseux                                                         | 40        | 35           | 178                                            |
| 15+175 | 26°                                   | Limon argileux rougeâtre<br>Marne avec des blocs de grés<br>Grés fracturé                            | 30        | 35           | 156                                            |
| 20+275 | 26°                                   | Argile limoneuse<br>Limon argileux graveleux avec des blocs de grés                                  | 30        | 30           | 154                                            |
| 22+750 | 20°                                   | Marne gréseuse<br>Bancs de calcaire marneux                                                          | 30        | 30           | 185                                            |
| 23+050 | 22° à 25°                             | Calcaires marneux gris avec joints marneux gréseux très feuilletés                                   | 20        | 30           | 123                                            |
| 23+167 | Amont : 26° à 30°<br>Aval : 12° à 16° | Calcaires marneux gris avec joints marneux gréseux très feuilletés                                   | 45        | 29           | 360                                            |
| 23+400 | Amont : 26° à 30°<br>Aval : 12° à 16° | Calcaires marneux gris dur                                                                           | 45        | 29           | 210                                            |
| 23+839 | 32°                                   | Calcaire avec joints de marne argileuse<br>Blocs de calcaires fragmentés                             | 30        | 35           | 135                                            |
| 24+138 | 32°                                   | Marnes calcaires plissées                                                                            | 40        | 30           | 209                                            |

|        |                       | Calcaire marneux dur                                                           |           |              |                                                |
|--------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|------------------------------------------------|
| PK     | Pente naturelle du TN | stratigraphie                                                                  | C' en KPa | $\Phi'$ en ° | Pression admissible du sol de fondation en KPa |
| 25+338 | 28° à 30°             | Calcaire marneux gris verdâtre<br>Schistes argilo marneux                      | 40        | 30           | 234                                            |
| 27+787 | 16° à 22°             | Calcaire marneux gris verdâtre<br>Argile rouge avec des blocs calcaire gréseux | 30        | 25           | 120                                            |
| 30+625 | 19° à 24°             | Marnes argileuses feuilletées                                                  | 40        | 27           | 160                                            |
| 33+750 | 35°                   | Calcaire gréseux                                                               | 12        | 45           | 199                                            |
| 41+681 | 22°                   | Limon argileux rougeâtre<br>Argile rouge<br>Grès et limon                      | 30        | 30           | 157                                            |
| 57+825 | 18° à 24°             | Marne beige<br>Calcaire marneux grisâtre                                       | 80        | 24           | 111                                            |

On constate la complexité du site qui présente des conditions de fondation très défavorables tant en hétérogénéité des sols rencontrés qu'en caractéristiques mécaniques des sols de fondation dont l'angle de frottement interne moyen  $\Phi'$  est de l'ordre de **32°** avec une cohésion **C'** moyenne de **40 KPa** et une capacité portante variable de **150 KPa à 350 KPa**.

Les conditions de pente du terrain naturel ; dont la pente varie de **12° à 50°** avec une valeur moyenne autour de **35°** ; posent également des problèmes de calage des ouvrages dont la stabilité devient précaire et plus particulièrement pour les murs voile à contreforts.

## 2-Genèse de la proposition de remplacer les murs voile à contreforts par des murs enterrés armés

Avec des conditions sismiques de  $a_h/g=0,16$  et  $a_v/g=0,064$ , les caractéristiques intrinsèques des matériaux de fondation ont imposé des dimensionnements conséquents et la longueur des plots indépendants des murs voile à contrefort fixée à 17,5m a fortement conditionné le Design des ouvrages dont le calcul a été mené par le logiciel ROBOT.

Pour 12 ouvrages prévus en mur voile à contreforts répartis par hauteur d'ouvrage, le calcul mené sur 3 d'entre eux a conduit à des volumes de béton de 25 à 30 m<sup>3</sup> de béton B30 par ml avec un dosage d'acier moyen de 130 kg/m<sup>3</sup>, soit des volumes variant entre 2000 et 3000 m<sup>3</sup> de béton par ouvrage.

Afin de pallier à un dépassement certain dans les quantités de béton B30 et acier prévues au contrat, il a été suggéré de rechercher des solutions alternatives d'où la proposition de l'entreprise de remplacer certains murs voile à contrefort par des murs en terre armée.

Une première proposition a été faite mais a été rejetée eu égard à :

- a) l'absence de normes pour justifier le dimensionnement avec des armatures synthétiques,
- b) et la non représentativité des paramètres géotechniques de calcul, en particulier : l'angle de talus n'est pas pris en compte, l'angle de frottement interne du sol de fondation est trop élevé ( $\Phi'=36^\circ$ ), la valeur  $\Phi'$  choisie pour les terrains poussant est

trop optimiste et les sollicitations admissibles ; variant de 4,5 bars à 5,5 bars sur les sols de fondation ; ne correspondent pas à la réalité des lieux où ces sollicitations sont limitées à 2 bars.

D'une part, cela veut dire que ces paramètres ne pouvaient que conduire à un dimensionnement **paraissant** plus économique et donc à des **coûts** de la technique « Terre Armée » plus **compétitifs** mais l'avantage financier attendu restait incertain.

D'autre part, les armatures proposées du type Freyssisol Paraweb-2S n'étant pas métalliques, l'adoption de ces armatures était conditionnée par la présentation d'un agrément et leur conformité à la norme NF P 94 220-0.

Compte tenu des coûts exorbitants obtenus sur certains projets de murs voile à contrefort et plus particulièrement les murs 24,68 et 70 et ce par rapport à l'estimation des dossiers d'Appel d'Offres, les propositions faites, pour la variante « terre armée », paraissaient compétitives tant en coût qu'en délai d'exécution en tenant compte de paramètres réalistes du terrain.

| N° du Mur | Coût béton armé de base en €/ml | Coût béton armé actualisé en €/ml | Coût Terre armé en €/ml |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 24        | 940                             | 1176                              | 1250                    |
| 68        | 3550                            | 6746                              | 3020                    |
| 70        | 1796                            | 2690                              | 1938                    |

Le coût des murs voile à contreforts, dicté par les conditions réelles de site, s'est vu varier de **49%** par rapport à sa valeur estimée aux DAO alors que la solution « terre armée » limite le surcoût à **20%** du coût initial.

Pour le mur 24, le coût du ml de terre armée est supérieur au coût du ml de béton armé mais le coût global de l'ouvrage est similaire à celui de la solution de base par réduction de la longueur du mur qui passe de 150 m à 112 m avec une surface de 503 m<sup>2</sup>.

### **3-Acceptation de la solution variante par le Maître d'Ouvrage**

Eu égard aux avantages que présente la technique des soutènements en terre armée :

- a) rapidité d'exécution et encombrement moindre,
- b) possibilité d'exécution sous circulation,
- c) murs souples et plus allégés donc conditions de comportement et de portance moins restrictives,
- d) et enfin, résorption du surcoût induit par l'économie sur la réduction des déblais et sur l'élimination des murs voile et à contreforts puisque l'on comprime le dépassement par rapport à la solution de base,

Le Maître d'ouvrage a accepté d'examiner la proposition de l'entreprise conditionnée par :

**1-l'introduction de la garantie décennale :** La Société Terre Armée a remis un engagement de garantie décennale, 2 polices d'assurances et un mémoire technique pour l'exécution des travaux appuyé de la norme NF 94-220

**2-l'approbation technique de la proposition :** La procédure présentée par le sous-traitant « Terre Armée » a été reformulée en y incluant l'assistance de la Société aux phases de réception et plus particulièrement à la réception du fond de fouille.

Le circuit de l'approbation des dossiers d'études d'exécution suivra le même principe que pour les autres ouvrages de soutènement : visa des dossiers par le représentant du Maître d'Oeuvre et une copie sera transmise au Maître d'Ouvrage; accompagnée de la note de vérification du représentant du Maître d'Oeuvre.

**3-aléas techniques et de délai:** Tout oubli d'un ou plusieurs éléments constitutifs du massif et nécessaires à l'exécution et/ou la tenue de l'ouvrage sera à la charge de l'entreprise étant entendu que les projets d'exécution sont réalisées sous sa responsabilité.

L'entreprise se doit de confirmer que la technique permet de réduire les aléas sur les délais d'exécution comparativement à la solution actualisée (murs à contrefort) en soumettant à l'approbation un programme cohérent.

Le phasage des travaux ; avec d'éventuelles coupures momentanées en cas d'impossibilité de déviation ; est à clairement expliciter par l'entreprise.

**4-examen des offres de prix:** Les éventuels sondages complémentaires seront rémunérés dans le cadre des provisions et la substitution éventuelle par du gros béton dans le cadre du prix gros béton inclus au BPDE .Ces prestations ne seront utilisées qu'après accord du maître d'oeuvre.

Pour les remblais techniques, ils seront rémunérés aux prix déjà existants au bordereau et ne doivent pas être tenus en compte dans la définition du prix du m2 de mur de terre armée en comparaison avec la définition des murs en béton qui n'inclut pas les remblais.

Le coût de l'encadrement doit être explicitement intégré dans les sous détail des prix.

#### **4-Définition du projet de soutènement en terre armée Freyssisol**

Le système des murs de soutènement en sol renforcé Freyssisol comporte des panneaux béton de 3.2 m<sup>2</sup> pour des épaisseurs comprise entre 14 et 16 cm. Ces panneaux sont tenus par des armatures géo synthétiques Paraweb-2S composées de fibres polyesters protégés par une enveloppe polyéthylène.

Le système de parement modulaire permet de caler les fondations au mieux avec le profil du TN contrairement au soutènement béton armé.

De plus la norme NFP 94-220 permet de limiter la fiche des murs dans le cas d'un substratum rocheux d'où une optimisation des surfaces de soutènement, ce qui est difficile avec la solution de base compte tenu du talon avant et des épaisseurs de semelle. Avec la solution terre armée, les volumes de déblai/remblai sont notablement plus faibles que pour les murs de soutènement traditionnel en béton armé.

Le dimensionnement des murs se fait, moyennant les résultats des investigations géotechniques, par un programme développé par « TERRE ARMEE » dénommé VALDEZ qui calcule :

-la stabilité au grand glissement des ouvrages,

- la vérification de la portance des sols de fondation,
- l'estimation des tassements.

Le projet se situant en grande partie en sites montagneux, il sera prévu un système de collecte des eaux à l'arrière des massifs. Ce système drainant sera composé d'un masque drainant d'environ 50 cm d'épaisseur (granulométrie 10/80mm) et d'un drain en pied de parement.

### **5-Définition du prix de soutènement en terre armée Freyssisol**

**Les** prix rémunèrent la construction du mètre carré de mur en terre armée dont la longueur est variable et la hauteur comprise entre 0,00m et 5,20m ; 5,20m et 6,80m ; 6,80m et 8,40m ; 8,40m et 10,00m ; 10,00m et 11,60m ; 11,60m et 13,20m ; 13,20m et 14,80m et entre 14,80m et 16,40m. Ils comprennent :

**\*la production des plans d'exécution et notes de calcul de dimensionnement interne des massifs par la Société « TERRE ARMEE » conformément à la norme NFP 94-220 et à son engagement n°7059-Rocade Méditerranéenne du 27/06/2006** y compris le calcul de la stabilité interne et stabilité externe globale des massifs en terre armée,

**\*l'exécution des fouilles en terrain de toute nature pour fondations des murs de soutènement en terre armée** y compris les piquetages, l'extraction et le chargement des matériaux, le transport quelque soit la distance, le déchargement au lieu d'utilisation ou de dépôt provisoire ou définitif, le fractionnement et/ou l'enlèvement des blocs, le réglage et le compactage du fond de fouille conformément aux prescriptions du CPT, la fourniture, le transport, le déchargement, le réglage, l'arrosage éventuel et le compactage des matériaux répondant aux spécifications du CPT pour le remblaiement des fouilles ainsi que tous les frais d'étalement, blindage, assainissement de la surface de travail, évacuation des eaux d'épuisement et de pompage,

**\*l'exécution d'une semelle de réglage de 0,35mx0,15m et devant recevoir la première ligne d'écaillles en béton B30** y compris la fourniture et la mise en œuvre d'un béton de propreté dosé à 250 kg/m<sup>3</sup> conformément aux plans types correspondants, le réglage, compactage à 95% de l'OPM du fond de fouille, le serrage et le lissage du béton de propreté,

**\*la fourniture et la mise en œuvre d'un drain de pied en PVC de diamètre Ø 150mm** y compris toutes sujétions de fourniture et pose,

**\*l'exécution de paroi drainante de granulométrie 10/80mm et d'épaisseur minimale 0,50m derrière et sous les remblais techniques suivant la longueur du mur.** La paroi sera constituée en matériaux d'apport tout-venant roulé et lavé y compris la fourniture, le chargement, le transport, le déchargement, la mise en œuvre sur toute la longueur de l'ouvrage et toutes sujétions de mise en œuvre

**\*la fabrication, le chargement, le transport, le déchargement et la mise en place des écaillles préfabriquées de dimensions 2,00mx1,60mx0,14m** y compris la fourniture de l'eau, du sable, des granulats, du ciment sur le lieu d'emploi, du coffrage, des aciers, le malaxage, la mise en place, le serrage, l'utilisation éventuelle d'adjuvants, la cure pour la confection du béton B30 armé suivant les spécifications du CPT, les ragréages éventuels ainsi que tous les éléments métalliques d'ancrage et toutes sujétions de fabrication, manutention, pose, ancrage et badigeonnage de la partie intérieure en contact avec les remblais techniques,

**\*la fourniture et la pose des armatures Fressysol Paraweb 2S constituées de fibres à haute ténacité groupées en dix brins distincts et revêtues de polyéthylène basse densité noir de haute qualité obtenu par un procédé d'extrusion sous vide et selon les quatre type de résistance caractéristique 30 (couleur bleue), 50 (couleur jaune), 75 (couleur brun) et 100 (couleur rouge) y compris la fourniture de boucles et de goupilles d'accrochage et toutes sujétions de manutention , pose , ancrage , protection et d'utilisation de remblais techniques ayant les mêmes caractéristiques géotechniques que ceux qu'on utilise avec les armatures à haute adhérence en acier,**

**\*l'assistance de la Société « TERRE ARMEE » pour l'exécution des murs en terre armée conformément à l'engagement n°7059-Rocade Méditerranéenne y compris la fourniture du PAQ de « TERRE ARME », le suivi et contrôle interne des travaux effectué par un technicien supérieur, dont le CV sera soumis à l'agrément du maître d'oeuvre. Ce technicien supervisera les activités de préfabrication et de réalisation des murs en terre armée, organisera et participera à toutes les opérations de réception de matériaux, de fond de fouille, de mise en œuvre des écailles en béton B30, des armatures Fressysol, des remblais techniques et tous travaux connexes à la construction des murs en terre armée. Cette assistance comprend également le contrôle du responsable « Etudes et Qualité » au siège qui effectuera des missions ponctuelles sur le chantier tout au long de son déroulement.**

Sont exclues de la définition de prix :

\*les remblais techniques dont la rémunération se fera aux prix pour les remblais ordinaires et pour les remblais contigus,

\*les éventuelles substitutions du terrain de fondation après accord du gestionnaire de projet qui seront rémunérées au prix du BPDE,

\*les sondages éventuels soumis à l'accord du gestionnaire de projet qui seront rémunérés au prix du BPDE,

\*et les sujétions de couronnement (cunette et géo membrane) en tête de mur en terre armée qui seront rémunérées aux prix du BPDE.

## **Conclusion**

L'opportunité d'exécuter des soutènements en terre armée, dans le cadre du projet de construction de la Rocade Méditerranéenne , permettra à la Direction des Routes et de la Circulation routière d'avoir un retour d'expérience qui pourrait engendrer des changements dans les techniques de soutènement et l'adoption de la technique terre armée comme solution alternative particulièrement dans les sites où les solutions classiques de béton armé s'avéreraient trop chers ou difficilement réalisables.