

MURS EN SOL RENFORCÉ PAR GÉOGRILLES – APPLICATION DE L'EC 7 AUX OUVRAGES DE LA ROCADE MÉDITERRANÉENNE AU MAROC

EARTH WALLS REINFORCED WITH GEOGRIDS – EC 7 APPLIED ON THE PROJECT “MEDITERRANEAN HIGHWAY” IN MOROCCO

Alain HÉRAULT¹, Sabihi ABDELHAK², Chakib EL IRAKI³.

¹ Colbond Geosynthetics, Saint-Denis, France.

² Groupement Arab Contractors-Houar-Elhajji-Lrn-Seprob, Maroc

³ Valtech, Maroc.

RÉSUMÉ – La nouvelle norme française NF P 94-270 établit les règles à suivre pour la justification des géosynthétiques et autres matériaux de renforcement utilisés dans les murs et remblais en sol renforcé. Ces règles, issues de l'Eurocode 7 (EN 1997) à travers ses facteurs partiels, ont été appliquées sur le grand projet de rocade méditerranéenne au Maroc, pour déterminer les résistances en traction, les longueurs et espacements des nappes de géogrille. On se propose de décrire dans cette communication le projet de rocade, les données spécifiques d'un tel dimensionnement, les combinaisons d'actions, les propriétés spécifiques à considérer pour le matériau de renforcement, la procédure de mise en œuvre et enfin le système de contrôle qualité.

Mots clefs : géogrille, renforcement, actions, traction, facteurs partiels.

ABSTRACT – The new French standard NF P 94-270 establishes rules for the design of geosynthetics and other reinforcing materials in reinforced earth walls and steep slopes applications. These rules, derived from Eurocode 7 (EN 1997) through its partial factors, were applied for the huge project of the Mediterranean highway in Morocco, to determine tensile strengths, lengths and spacing of geogrids. We describe in this paper the bypass project, the specific data of such design, the load combinations, specific input of the reinforcement material properties, installation process and to finish, the quality management system.

Keywords: geogrid, reinforcement, actions, tensile, partial factors.

1. Présentation du projet

1.1 Introduction

Après plusieurs années d'attente, la rocade méditerranéenne reliant Tanger à Saïdia (Maroc) est devenue une réalité. Son dernier tronçon qui relie Tétouan à Jebha a été inauguré le 11 Août 2012 par le Roi du Maroc. Les travaux pour ce tronçon de 120 km ont démarré en 2007 et le coût total a atteint, selon le ministère de l'équipement, 2,5 milliards de DH. L'aménagement de cette liaison routière s'insère dans le cadre de la politique de développement du Nord que le gouvernement marocain s'est fixé comme objectif prioritaire. Les objectifs principaux escomptés de la réalisation de la rocade sont de trois types :

- désenclavement de la côte nord méditerranéenne, tout en améliorant le niveau d'équipement du territoire et d'accessibilité de la population aux infrastructures de base ;
- valorisation des potentialités de la zone, notamment touristiques et maritimes. Celles-ci constitueront une des composantes locomotives de tout projet de développement ;
- amélioration de l'encadrement administratif, surtout dans sa fonction de surveillance du territoire.

Cette route emprunte un terrain plat au départ de Tétouan pour aborder très rapidement des reliefs montagneux (Figure 1). Elle traverse des zones instables caractérisées par des glissements de talus, des sapements de la plate-forme par la mer et éboulements. Les travaux ont consisté à améliorer les caractéristiques de la route existante tout en adoptant un nouveau tracé pour certains tronçons.



Figure 1. Illustration du contexte géotechnique

1.2 Contexte sismique

Le domaine rifain est la zone de plus forte activité sismique au Maroc, il est le siège du plus grand nombre de séismes. Historiquement, quatre séismes ont causé de 1910 à 1926 des dégâts notables à Melilla. Mais le séisme le plus important survenu dans le Nord du Maroc est celui du 21-1-1909 dans la région de Tétouan avec une magnitude de l'ordre de 6,2. L'activité sismique est considérée parmi une des causes majeures des phénomènes d'instabilité. C'est un facteur perturbateur de l'équilibre et de la stabilité des talus, des pentes et des versants qui nécessitait le choix de techniques de soutènement très souples aptes à résister aux secousses sismiques, d'où le recours aux murs en sol renforcé par géogrille.

1.3 Murs en sol renforcé par géogrilles

Le mur en sol renforcé par géogrille le plus imposant s'étend sur 380 m, avec une hauteur maximale de 31 m. C'est ainsi près de 800 000 m² de géogrilles de renforcement Enkagrid® PRO qui ont été mis en œuvre sur ce tronçon de rocade. Leur parement est incliné à 63 degrés (1H/2V) et est constitué de gabions de 1 m x 1 m x 1 m remplis sur site (Figures 2 et 3). Un géocomposite de drainage choisi pour ses performances hydrauliques élevées sous très forte contrainte (400 kPa) et son certificat de qualité volontaire délivré par l'ASQUAL, assure le drainage des talus de déblais à l'arrière des murs.



Figure 2. Vue des géogrilles de renforcement et du parement en gabions incliné à 63 degrés



Figure 3. Vue générale d'un mur fini

2. Contexte normatif européen - Eurocodes

2.1 Introduction

Le calcul géotechnique des structures est régi par l'Eurocode 7 (EC7) depuis 2010, terme de la période transitoire de coexistence avec les normes nationales fixé par la commission européenne. Afin de mettre le dimensionnement des ouvrages en sol renforcé en conformité avec cette exigence, la Commission française de Normalisation « Justification des Ouvrages Géotechniques » (CNJOG) a rédigé la norme NF P 94-270 publiée par l'AFNOR en Juillet 2009. Cette nouvelle norme applique les principes du calcul aux états limites avec facteurs partiels, définis dans l'Eurocode 0 (EN 1990/A1) et l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1), au calcul des armatures de renforcement de sol, et notamment aux géosynthétiques.

2.2 Combinaisons d'actions

Les Eurocodes instituent une approche semi-probabiliste de la sécurité : par exemple, les effets des actions sont désormais déterminés à travers des combinaisons d'actions différentes si l'on est en situations de projet durables ou transitoires ou en situations de projet accidentelles voire sismiques. Les facteurs partiels figurant dans le tableau 1 s'appliquent par exemple aux situations de projet durables ou transitoires pour les vérifications de stabilité interne et externe, le facteur partiel à appliquer dépend du type d'action, permanente ou variable, et de son effet sur la stabilité, défavorable ou favorable. C'est ainsi que l'on ne majorera pas une charge permanente ($\gamma_{Ginf} = 1,0$) sur un ouvrage et que l'on ne prendra pas en compte de charge variable ($\gamma_{Qinf} = 0$) pour une vérification au glissement de l'ouvrage puisqu'elles améliorent toutes les deux la résistance au glissement de l'ouvrage. Par contre, on majorera ces charges d'un coefficient $\gamma_{Gsup} = 1,35$ pour la charge permanente et d'un coefficient $\gamma_{Qsup} = 1,50$ pour les surcharges d'exploitation si elles se situent à l'arrière de l'ouvrage car elles sont alors défavorables à la stabilité au glissement de l'ouvrage.

Tableau 1. Facteurs partiels pour les actions ou les effets des actions

Action		Symbole	A1
Permanente	Défavorable	γ_{Gsup}	1,35
	Favorable	γ_{Ginf}	1,0
Variable	Défavorable	γ_{Qsup}	1,5
	Favorable	γ_{Qinf}	0

La situation de projet sismique fut étudiée avec l'approche pseudo-statique de la méthode de Mononobe-Okabe pour une accélération maximale de référence de 2,2 m/s². Elle a parfois conduit à augmenter la résistance caractéristique de la nappe de géogridde, le supplément de sollicitation induit étant plus élevé que la marge laissée par la non prise en compte pour cette situation du phénomène de fluage. Pour les ouvrages de moindre hauteur, le calcul au séisme conduisait à rallonger les nappes en tête d'ouvrage.

2.3 Facteurs partiels matériaux

La valeur de calcul de la résistance de traction à long terme $R_{t;d}$ est déduite (équation 1) de la résistance en traction caractéristique à court terme $R_{t;k}$ du produit de renforcement, déterminée pour un niveau de probabilité de 95%, à partir d'essais de traction réalisés conformément à la norme NF EN ISO 10319 :

$$R_{t;d} = \rho_{flu} \cdot \rho_{end} \cdot \rho_{deg} \cdot \frac{R_{t;k}}{\gamma_{M,t}} \quad (1)$$

ρ : facteurs partiels sur le matériau géosynthétique, déduits de résultats d'essais décrits dans le guide ISO/TR 20432,

ρ_{flu} : facteur lié au comportement au fluage,

ρ_{end} : facteur lié à l'endommagement de mise en œuvre,

ρ_{deg} : facteur lié à la dégradation chimique ou vieillissement,

$\gamma_{M,t}$ = 1,25 : facteur partiel sur tous matériaux de renforcement.

En l'absence de résultats d'essais spécifiques, des valeurs par défaut sont proposées dans la norme NF P 94-270, elles conduisent à des valeurs de ρ comprises entre 5 et 12 selon les polymères pour des conditions de mise en œuvre courantes.

2.3.1. Comportement au fluage

Le comportement au fluage en traction d'un géosynthétique doit être examiné selon deux critères : sa capacité à résister à une force de traction donnée pendant toute la durée d'utilisation de l'ouvrage et l'allongement du produit entre sa mise en service, conventionnellement fixée 10 heures après sa mise en tension et le terme de la durée d'utilisation de l'ouvrage, en général fixée à 100 ans. Ces deux critères conduisent à déterminer deux coefficients partiels, le plus défavorable des deux fixe le niveau de sollicitation admissible vis-à-vis du comportement au fluage. La géogrille proposée pour la rocade méditerranéenne offre un taux de sollicitation admissible très élevé : il est supérieur à 68% pour une durée d'utilisation de 120 ans et une déformation post-construction limitée à 1%. Ce fut l'un des critères de choix de la maîtrise d'œuvre avec la bonne résistance du produit à l'endommagement de mise en œuvre.

2.3.2. Endommagement de mise en œuvre

Ce facteur partiel dépend de l'agressivité mécanique du matériau de remblai utilisé, de l'énergie de compactage (moyenne, intense) et du type de géosynthétique de renforcement, notamment de la taille de ses composants : un produit constitué de bandes de polymère extrudé comme le produit posé sur la rocade méditerranéenne est beaucoup plus résistant qu'un produit constitué de filaments. Les essais d'endommagement in situ réalisés en France ont montré que la géogrille proposée, constituée de bandes de polyester extrudé, ne subissait aucune perte de résistance sous des conditions de mise en œuvre considérées comme « très sévères » par la norme NF P 94-270.

2.3.3. Dégradation chimique

L'hydrolyse est considérée comme étant le principal processus de dégradation chimique du polyester. Dans un environnement où le pH est compris entre 4 et 9, l'hydrolyse interne endommage les chaînes moléculaires du polymère.

La résistance à l'hydrolyse de la géogrille a été étudiée en Allemagne par le BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) dans un environnement neutre. Il s'agit d'une procédure d'essai complexe portant sur les sujets suivants :

- résistance à l'hydrolyse à différentes températures,
- résistance à l'hydrolyse sous contrainte,
- hydrolyse et résistance à la fissuration.

3. Assurance de la qualité

L'usine de production des géogrilles est certifiée ISO 9001:2000. Le contrôle interne de production est réalisé par Colbond bv et supervisé par le tBU lors de l'audit annuel du marquage CE. Un certificat de conformité était fourni au responsable qualité du groupement d'entreprises marocaines.

Le contrôle qualité effectué sur chantier comprenait selon la phase (figure 4) une validation du compactage de chaque couche de remblai après le contrôle de sa densité, qui devait être supérieure à 95% de l'OPM, et un contrôle topographique. La pose des géogrilles a fait l'objet d'un contrôle visuel avec compte-rendu écrit pour chaque couche comprenant :

- N° de redan
- N° de section (de 4,80 m de largeur)
- Classe de géogrille (Résistance en traction)
- Longueur d'ancrage inférieur
- Longueur d'ancrage supérieur (conforme/non conforme)
- État de la nappe de géogrille (conforme/non conforme)

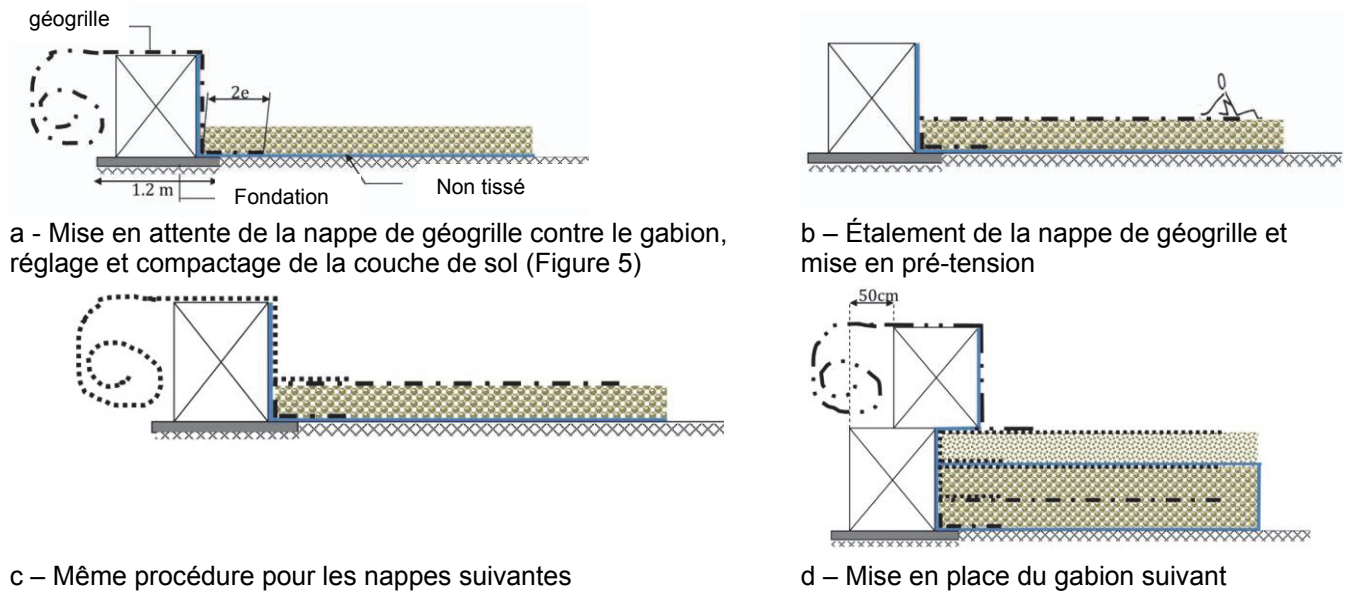


Figure 4. Phasage d'installation associé au contrôle qualité in situ



Figure 5. Réglage d'une couche de remblai

4. Conclusion

La géotechnique est entrée, au même titre que le bâtiment et le génie civil, dans le cadre réglementaire européen des Eurocodes instituant une approche semi-probabiliste de la sécurité via un certain nombre de facteurs partiels communs à tous les métiers de la construction. Il était souhaitable que les géosynthétiques, pour être crédibles, s'inscrivent également et rapidement dans cette évolution.

La norme française de dimensionnement NF P 94-270 fournit désormais à tous les concepteurs de murs en sol renforcé un outil de dimensionnement, conforme aux Eurocodes, qui leur permet de préciser et de sécuriser leurs choix d'avant-projet. Il les aide également dans leur tâche au moment de l'évaluation technique des solutions proposées par les entreprises, ce fut notamment le cas lors de l'examen des propositions techniques pour ce grand projet de « rocade méditerranéenne » au Maroc où plusieurs techniques de renforcement de sol étaient en compétition.

Cependant, aussi pointues et rigoureuses que puissent être les approches de calcul, elles ne permettent pas de s'affranchir du respect des règles de l'art au moment de l'exécution des travaux.

5. Références

- AFNOR - NF P 94-270. Norme de dimensionnement, Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement – Remblais renforcés et massifs en sol cloué.
- AFNOR - NF EN 1990/A1. Norme de dimensionnement, Eurocode – Bases de calcul des structures
- AFNOR - NF EN 1997-1. Norme de dimensionnement, Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : règles générales – Annexe Nationale à la NF EN 1997-1: 2005.
- AFNOR - NF EN ISO 10319. Norme de méthode d'essai, Géosynthétiques – Essai de traction des bandes larges.
- ISO/TR 20432. Guidelines to determination of long term strength of geosynthetics for reinforcement