

JUSTIFICATION DU DIMENSIONNEMENT DES MURS INCLINÉS ET TALUS RAIDIS EN SOLS RENFORCÉS PAR NAPPES GÉOSYNTHÉTIQUES - PROJET DE NORME

DESIGN JUSTIFICATION OF GEOSYNTHETIC SHEETS REINFORCED INCLINED RETAINING WALL – DRAFT STANDARD

Elisabeth HAZA-ROZIER¹, Philippe DELMAS²

¹ Animatrice du groupe de travail XP G 38064 de la Commission de Normalisation des Géosynthétiques; CER / CETE Normandie-Centre, Rouen, France

² Président de la Commission de Normalisation des Géosynthétiques, CNAM, Paris, France

RÉSUMÉ – Cet article présente les principes de justification du dimensionnement des murs inclinés et talus raidis en sol renforcé par nappes géosynthétiques, détaillés dans le projet de norme française XP G 38064. Ce projet passe à l'enquête AFNOR au premier trimestre 2009.

Mots-clés : Mur de soutènement, Justification, Dimensionnement, Nappes Géosynthétiques.

ABSTRACT – This paper presents the principles of design justifications for geosynthetic sheets soil reinforced inclined wall or steep slopes. These principles are detailed in the French standard XP G 38064. Its draft was sent to AFNOR for formal vote in 2009.

Keywords: retaining wall, Justification, Design, Geosynthetic sheets.

1. Introduction

Depuis plus de 15 ans, la profession du génie civil ressent le besoin de disposer d'un référentiel normatif indiquant les principes de justification du dimensionnement des massifs de soutènement en sol renforcé par géosynthétiques. La rédaction d'un tel document a été mise en œuvre au sein du BNSR (Bureau de Normalisation Sols et Routes). Ce projet de norme expérimentale XP G 38064 va être soumis par l'AFNOR à l'enquête publique au premier trimestre 2009.

Les renforcements en géosynthétiques concernés par ce projet sont les nappes géotextiles et les géogrilles, disposées en lit de renforcement, dans des talus d'inclinaison inférieure ou égale à 1H:4V. La justification du dimensionnement des autres murs de soutènement (verticaux ou renforcés par d'autres types d'armature) est définie dans la norme NF P 94 270.

2. Éléments généraux de construction

Pour justifier le dimensionnement d'un massif en sol renforcé par nappes géosynthétiques, il est nécessaire de disposer des données géométriques et géotechniques, du chargement prévu de l'ouvrage, ainsi que du phasage de construction. Les données climatiques, hydrologiques, hydrogéologiques et environnementales de la zone d'implantation de l'ouvrage doivent également être connues.

La durée d'utilisation de l'ouvrage doit être définie (elle est provisoire si inférieure ou égale à 10 ans). Le projet de norme XP G 38064 concerne exclusivement les ouvrages de catégorie géotechnique 2 (c'est à dire sans risques exceptionnels, sans conditions de terrain ou de chargement difficiles).

3. Principes de justification

Le dimensionnement d'un talus en sol renforcé par nappes géosynthétiques relève de justifications aux États Limites Ultimes (ELU) et aux États Limites de Service (ELS). La justification de l'ouvrage aux ELU concerne ses stabilités externe, générale, mixte et interne. De manière générale, on considère que la stabilité interne est satisfaite si la distribution, avec la profondeur, des efforts de traction mobilisables en un point d'un renforcement ($T_{\max ; d}$, cf. 5.2) suit la même évolution que la poussée des terres.

Les déplacements et les déformations qui pourraient être préjudiciables à l'ouvrage et, le cas échéant, aux constructions voisines doivent être définis au début de l'étude d'un projet. Par des modèles appropriés, la justification aux ELS consiste à vérifier que ces déplacements et déformations ne sont pas atteints. Comme tous les modèles de calcul existants à ce jour ne permettent que d'évaluer des valeurs approchées de la réalité, il peut être utile de procéder à des mesures en cours de construction.

3.1. La stabilité externe

Les massifs renforcés courants sont conventionnellement considérés comme monolithiques pour le calcul de leur stabilité externe. Celle-ci comprend les vérifications de la stabilité vis-à-vis du glissement à l'interface avec le sol support et du poinçonnement de celui-ci (défaut de capacité portante).

3.2. La stabilité générale

La vérification de la stabilité générale consiste à évaluer l'impact de l'ouvrage sur la stabilité du site, en comparant le niveau de stabilité avant travaux avec celui après réalisation du projet. Elle doit s'effectuer en considérant un nombre suffisant de lignes de rupture potentielle par grand glissement, extérieures au massif (Figure 1).

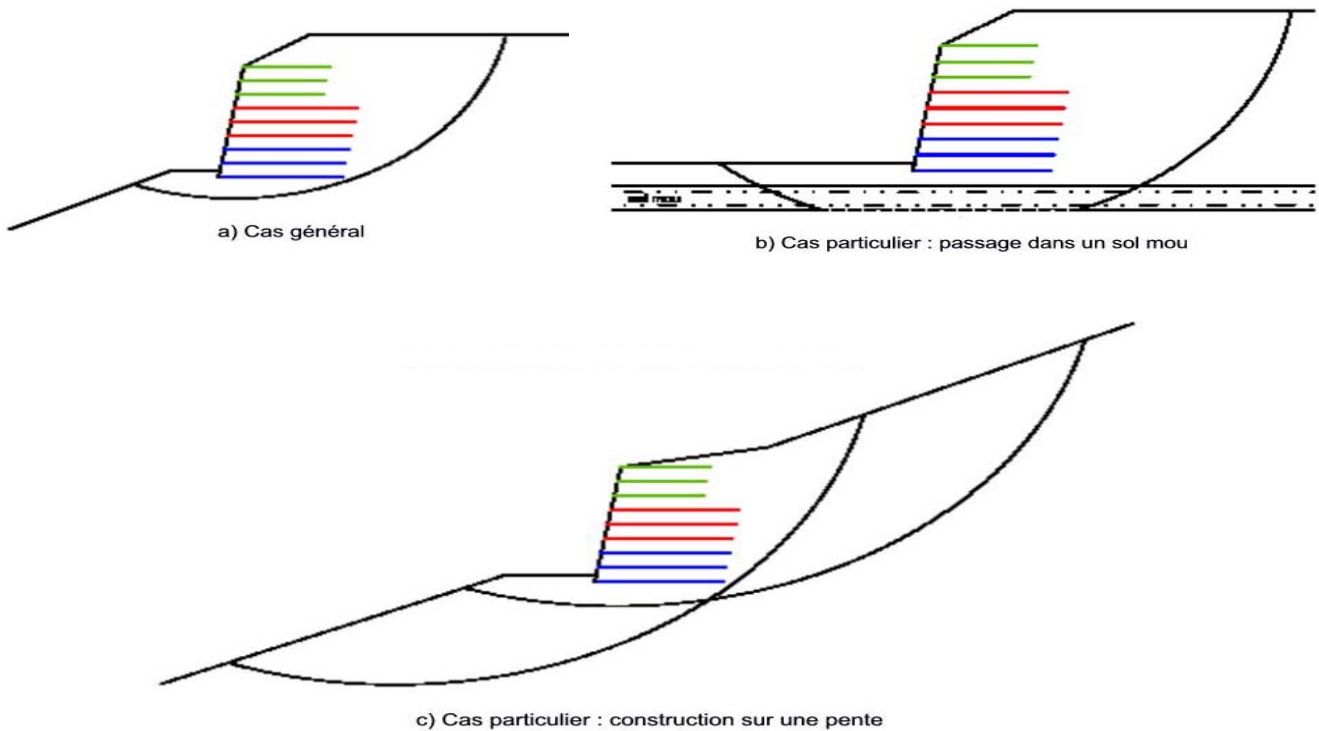


Figure 1. Stabilité générale : exemples de surfaces de rupture potentielles (source : Pr XP G 38-064)..

3.3. La stabilité mixte

La justification de la stabilité mixte consiste à vérifier le choix des géosynthétiques en type, nombre, longueur et disposition à l'intérieur du massif, de façon à assurer l'équilibre, pour toutes les surfaces de rupture qui coupent un ou plusieurs renforcements et/ou suivent le plan d'un renforcement (Figure 2). Celle-ci est menée dans la « zone d'influence du projet », où toutes les lignes de rupture potentielles sont étudiées (Figure 3).

Pour des raisons pratiques la vérification de la stabilité mixte peut s'effectuer en même temps que celle de la stabilité générale.



a) courbes de ruptures coupant un ou plusieurs lits de renforcement

b) courbes de ruptures empruntant le plan d'un lit de renforcement

Figure 2. Stabilité mixte : exemples de surfaces de ruptures potentielles (source : Pr XP G 38-064).

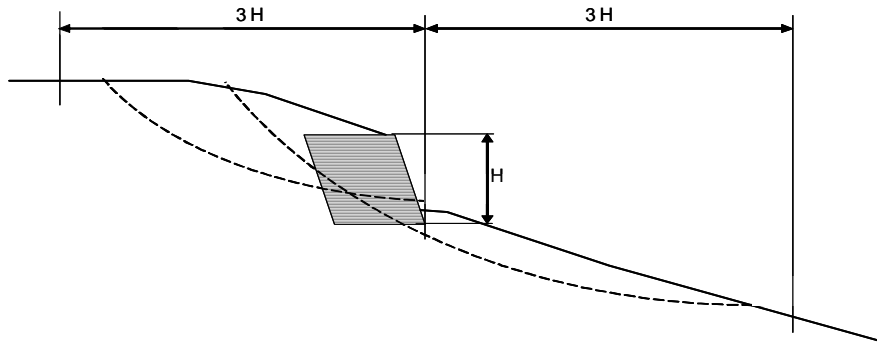


Figure 3. Zone d'étude de la stabilité mixte d'un ouvrage (« zone d'influence du projet »).

Notons qu'en stabilité mixte, des modèles de calcul dits « sans déplacement » ou « avec déplacement » peuvent être appliqués. Le premier consiste à prendre en compte à la fois la résistance au cisaillement ultime du sol et la résistance ultime de traction des renforcements (limitée toutefois, le cas échéant, à leur résistance ultime d'interaction). En faisant l'hypothèse que ces résistances sont mobilisées simultanément, on suppose que tous les matériaux et mécanismes mis en jeu présentent une ductilité adéquate. Le deuxième modèle consiste, en partant d'un état où les renforcements ne seraient pas sollicités, à déterminer quel déplacement le long de la surface de glissement étudiée permettrait de mobiliser une résistance des nappes de renforcement suffisante pour assurer l'équilibre. Est fixée à l'avance une limite à l'amplitude de ce déplacement, au-delà de laquelle la rupture serait considérée comme atteinte. La contribution des renforcements prise en compte dans les équations d'équilibre est celle qui résulterait de ce déplacement.

3.4. Les états limites ultimes à vérifier

Suivant la stabilité étudiée, conformément aux vérifications recommandées par la norme NF EN 1997-1, les états limites à vérifier sont (Tableau 1) :

- GEO « géotechnique » : rupture ou déformation excessive du terrain ;
- STR « structurelle » : rupture interne ou déformation excessive des éléments constituant la structure.

Le Tableau 1 résume les vérifications minimales aux états limites ultimes pour justifier la stabilité d'un ouvrage renforcé par nappes géosynthétiques, en cours de construction et d'exploitation. Le paragraphe suivant explicite le contenu des « approches 2 ou 3 », en expliquant les combinaisons d'actions à considérer.

Tableau 1. Vérifications minimales à mener aux ELU pour justifier la stabilité d'un ouvrage renforcé par nappes géosynthétiques.

	ELU type	Approche
Stabilité externe		
Glissement sur le sol support	GEO	2
Poinçonnement du sol support	GEO	2
Stabilité générale	GEO	3
Stabilité mixte	GEO et STR	3

4. Calcul de l'effort de traction maximal aux ELU

4.1. Combinaison d'actions

Les effets des actions sont déterminés en combinant les actions conformément aux dispositions de l'article 6.4.3 de la norme NF EN 1990. Dans une combinaison donnée, par souci de cohérence, les différents termes doivent désigner des actions d'origine et de nature différentes. Ceci exclut, par exemple, de considérer la composante verticale de la poussée des terres comme une action stabilisante et sa composante horizontale comme une action déstabilisante, lors de la vérification d'un état limite ultime de glissement sur la base.

Les actions géotechniques de même origine doivent être calculées dans une combinaison donnée, à partir des mêmes valeurs représentatives des propriétés de base. Ceci exclut donc d'affecter à un terrain deux masses volumiques différentes selon que l'on évalue une action de poussée ou une action pondérale de ce terrain.

4.2. Approches de calcul

Deux approches de calculs sont considérées dans la justification aux ELU des massifs renforcés (Tableau 1). Elles se distinguent en considérant des facteurs partiels différents appliqués aux actions ou à leurs effets, aux paramètres de sols et aux résistances géotechniques. Ces approches sont cohérentes avec celles recommandées par la norme NF EN 1997-1.

Dans l'approche 3, un facteur partiel propre au matériau géosynthétique, $\gamma_{M;t} = 1,25$, est appliqué pour la vérification structurelle des éléments de renforcement, et un autre facteur partiel est appliqué sur la résistance d'interaction sol-renforcement, $\gamma_{Mf} = 1,1$.

4.3. Effort de traction maximal calculé aux ELU

En appliquant les combinaisons d'actions décrites ci-dessus, lors du calcul en stabilité générale et mixte, la valeur de l'effort de traction maximal $R_{t;d}$, par mètre, nécessaire pour justifier la stabilité de l'ensemble des surfaces de rupture potentielle, est calculée. Pour ce faire, l'inégalité suivante doit être vérifiée :

$$\lambda_R T_{dst;d} \leq R_{st;d} \quad (1)$$

où :

λ_R coefficient de mobilisation de la résistance au cisaillement du sol, pris égal à 1,1,

$T_{dst;d}$ valeur de calcul de l'effet déstabilisant des actions qui agissent sur le massif limité par la surface de glissement étudiée,

$R_{st;d}$ valeur de calcul de la résistance stabilisatrice ultime mobilisée le long de la surface de glissement correspondante.

5. Calcul des résistances des nappes

5.1. Contribution des éléments de renforcement à la stabilité de l'ouvrage

L'effort de traction mobilisable en un point d'un renforcement est limité au maximum, par mètre de parement, par la condition :

$$T_{max;d} \leq \min(R_{fe;d}, R_{t;d}) \quad (2)$$

où :

$R_{fe;d}$ valeur de calcul de la résistance ultime d'interaction sol / renforcement mobilisable à l'extérieur de la surface de rupture potentielle (cf. 5.2.),

$R_{t;d}$ valeur de calcul de la résistance ultime en traction caractéristique dans la section courante du renforcement (cf. 5.3.).

5.2. Résistance en ancrage des nappes

Le frottement sol / géosynthétique τ_{sg} est défini par l'équation :

$$\tau_{sg} = c_{sg} + \sigma'_v \tan \varphi_{sg} \quad (3)$$

où :

- τ_{sg} résistance au cisaillement à l'interface sol / géosynthétique,
 σ'_v contrainte verticale effective,
 c_{sg} adhérence à l'interface sol / géosynthétique,
 φ_{sg} angle de frottement à l'interface sol / géosynthétique (déterminé soit en arrachement, norme NF EN 13738, soit en cisaillement direct, norme NF EN ISO 12957-1).

La valeur de calcul de la résistance ultime d'interaction à l'extérieur de la surface de rupture (résistance en ancrage extérieur) $R_{fe,d}$ est déterminée comme suit :

$$R_{fe,d} = \frac{\tau_{sg} P_s L_a}{\gamma_{M,f}} \quad (4)$$

où :

- P_s deux fois le taux de couverture de la nappe par mètre de parement,
 L_a longueur d'ancrage entre la surface de rupture et de l'extrémité arrière de la nappe,
 $\gamma_{M,f}$ facteur partiel de la résistance d'interaction sol / renforcement.

5.3. Résistance en traction caractéristique

Pour accéder à la valeur de calcul de résistance ultime de traction à considérer dans la justification de la stabilité mixte, $R_{t,d}$, les coefficients de sécurité partiels Γ_{flu} , Γ_{vieil} , Γ_{instal} et le facteur partiel de matériau, spécifique à l'utilisation du produit géosynthétique $\gamma_{M,t}$ sont à considérer.

La justification de la résistance des renforcements choisis consiste à vérifier que le produit installé (dans un environnement de charge, de température fixés pour la durée d'utilisation de l'ouvrage) a des caractéristiques qui satisfont l'équation suivante :

$$T_{t,d} = \frac{T_{t,k}}{\gamma_{M,t} \Gamma_{flu} \Gamma_{vieil} \Gamma_{instal}} \quad (5)$$

où :

- $R_{t,k}$ résistance en traction "à court terme" caractéristique du produit (mesurée dans l'essai de traction, conformément à la norme NF EN ISO 10319),
 $\gamma_{M,t}$ facteur partiel de matériau, pris égal à 1,25,
 Γ_{flu} coefficient partiel lié au comportement en fonction du temps des géosynthétiques. L'application de ce coefficient permet, pour la durée d'utilisation de l'ouvrage, de considérer l'influence du fluage sur la résistance en traction des renforcements géosynthétiques et de limiter les déformations de l'ouvrage,
 Γ_{vieil} coefficient partiel lié au vieillissement des produits géosynthétiques, par exemple par hydrolyse ou oxydation, dépendant des conditions d'environnement du produit,
 Γ_{instal} coefficient partiel correspondant à l'endommagement des renforcements géosynthétiques produit par leur installation et le compactage des remblais.

La procédure de détermination des coefficients Γ_{flu} , Γ_{vieil} , Γ_{instal} est décrite dans les annexes du projet de norme XP G 38064.

Notons que des interactions peuvent exister entre les effets du fluage des géosynthétiques, du vieillissement et de l'endommagement à l'installation. Dans l'état actuel des connaissances, l'équation ci-dessus est considérée représenter une approche sécuritaire de ces interactions.

6. Conclusions

Les principes de justification du dimensionnement des murs inclinés ou talus raidis en sol renforcé par nappes géosynthétiques ou géogrilles, détaillés dans le projet de norme française XP G 38-064, sont présentés dans cet article. Le calcul de l'effort de traction maximal aux ELU que doit développer l'ensemble des renforcements, ainsi que le calcul des résistances des nappes sont également présentés de façon synthétique.

Nous tenons à remercier les membres actifs du groupe de travail de la Commission Géosynthétiques du BNSR pour le temps et les efforts passés à l'élaboration de ce document.

7. Références bibliographiques

- NF EN 13738 (2005). *Géotextiles et produits apparentés aux géotextiles : Détermination de la résistance à l'arrachement du sol*. AFNOR.
- NF EN 1990 (2003). *Eurocodes structuraux – base de calcul des structures*. AFNOR.
- NF EN 1997-1 (2005). *Eurocode 7 : calcul géotechnique – Partie 1 : règles générales*. AFNOR.
- NF EN ISO 12957-1 (2005). *Géosynthétiques - Détermination des caractéristiques de frottement Partie 1 : Essai de cisaillement direct*. AFNOR.
- Pr NF P 94 270 (2008). *Calcul géotechnique – Ouvrages de soutènement – Remblais renforcés et massifs cloués, Projet de norme*. AFNOR.
- Pr XP G 38064 (2009). *Utilisation des géotextiles et produits apparentés – murs inclinés et talus raidis en sols renforcés par nappes géosynthétiques – Justification du dimensionnement et éléments de conception, Projet de norme expérimentale*. AFNOR.