



***Journée technique CFMS-CFG du 30/9/2015  
« Les Géosynthétiques et leurs applications »***

**«Ouvrages de soutènement en sol renforcé par géosynthétiques»**

**Moulay ZERHOUNI (FONDASOL)**

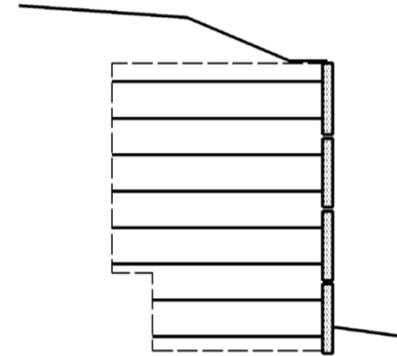


# **OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT EN REMBLAI RENFORCE PAR GEOSYNTHETIQUES**

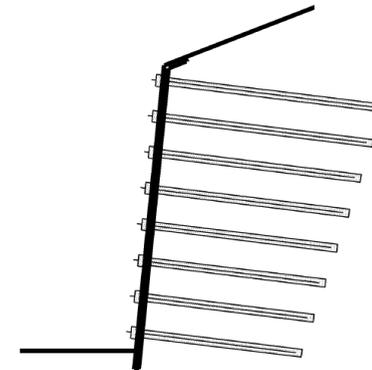
- Norme NF P94-270 – justification des ouvrages**
- Exemples et études de cas**

## Domaine d'application

Calcul des ouvrages en remblai renforcé



Calcul des massifs en sol cloué



Remplace les précédentes normes :

-XP P94-240 (sols cloués)

-NF P94-210 et la série des NF P94-220-0, 1 et 2 (remblais renforcés, T.A. ...)

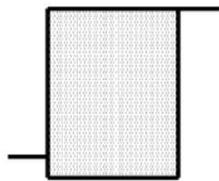
-Nota sur la terminologie : « Ouvrage en sol renforcé » = [Remblai renforcé](#) ou [massif en sol cloué](#)

## Domaine d'application

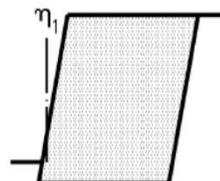
### Ouvrages en remblai renforcé :

- avec renforcements sensiblement horizontaux;
  - Métalliques (bandes, barres, treillis soudés, grillage)
  - Géosynthétiques (bandes ou nappes)

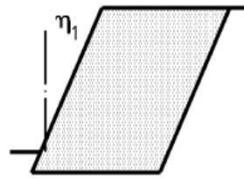
-Murs verticaux ou avec fruit



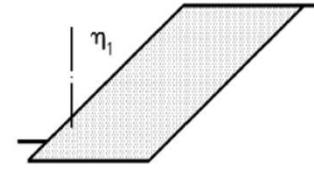
a) Mur vertical



b) Mur à fruit  
 $0 < \tan \eta_1 \leq 1/4$



c) Mur ou talus renforcé  
incliné  $1/4 < \tan \eta_1 \leq 1$



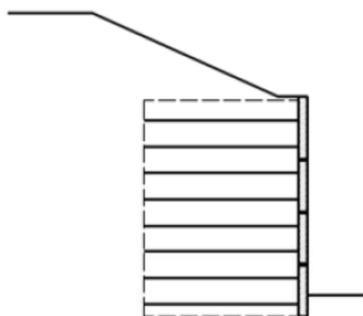
d) Talus renforcé  
très incliné  $\tan \eta_1 > 1$

Figure 1.2 — Catégories d'ouvrage en remblai renforcé

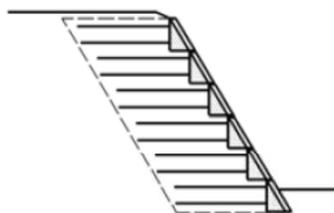
-Attention : pour les murs inclinés ou très inclinés avec nappes GSY, c'est la norme XP G38-064 qui s'applique.

## Domaine d'application

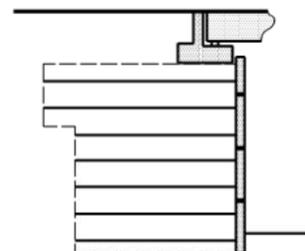
### Ouvrages en remblai renforcé (exemples)



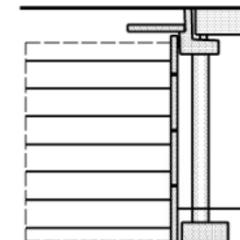
a) Ouvrage à  
parement vertical



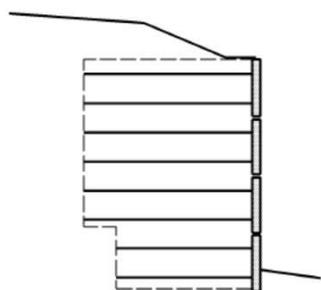
b) Ouvrage à  
parement incliné



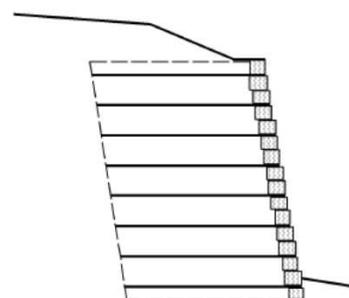
c) Culée porteuse



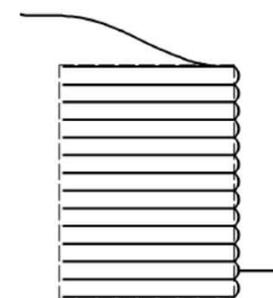
d) Culée mixte



e) Ouvrage avec parement  
d'éléments de hauteur partielle



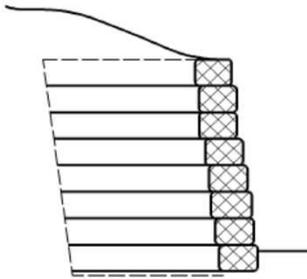
f) Ouvrage avec parement de  
blocs modulaires



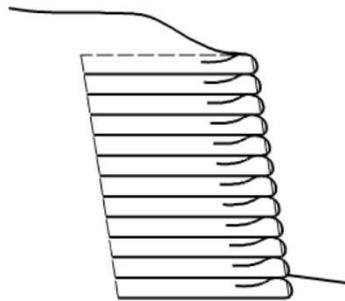
g) Ouvrage avec parement  
semi-elliptique en acier

## Domaine d'application

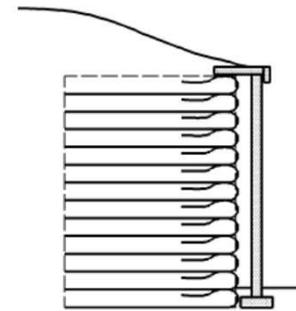
### Ouvrages en remblai renforcé (exemples)



h) Ouvrage avec parement constitué de gabions



i) Ouvrage à parement à fruit avec retours de nappe

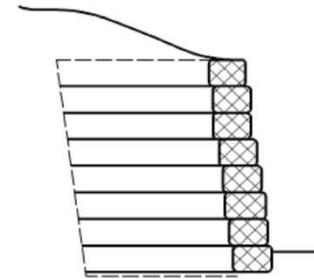


j) Ouvrage à parement vertical avec retours de nappes et écran désolidarisé



## Domaine d'application

### Ouvrages en remblai renforcé (exemples 2)

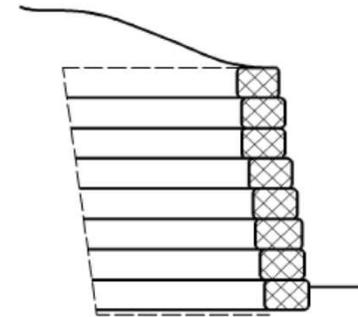


**h) Ouvrage avec parement constitué de gabions**



## Domaine d'application

### Ouvrages en remblai renforcé (exemples 3)



h) Ouvrage avec parement constitué de gabions



## Domaine d'application

### Catégorie géotechnique :

(1) Le présent document ne s'applique pleinement qu'aux projets relevant de la catégorie géotechnique 2 (voir Annexe B) c'est-à-dire aux ouvrages courants qui ne présentent pas de risque exceptionnel et ne sont pas exposés à des conditions de terrain ou de chargement difficiles (voir Notes 1 à 3).

NOTE 1 – En règle générale, la catégorie géotechnique d'un ouvrage est fixée par le maître d'ouvrage ou son représentant avant le début de l'étude du projet. Le cas échéant, elle est précisée au fur et à mesure de l'avancement des études.

(3) Les spécifications du présent document peuvent être appliquées aux ouvrages de catégorie géotechnique 3, mais il importe dans ce cas de vérifier leur pertinence et de les adapter ou de les compléter, en tenant compte, le cas échéant, des indications du présent document.

L'annexe B (normative) fournit les règles pour déterminer la catégorie géotechnique

## Domaine d'application

### Catégorie géotechnique :

A partir des : Classe de conséquence + conditions de site

**Tableau B.1 - Classes de conséquences**

Classe de conséquences	Conséquences en termes sociaux, économiques ou d'environnement	
	... sur les personnes	... sur les ouvrages à construire ou les construction avoisinantes
CC1 (conséquences faibles)	faibles ou négligeables	faibles ou négligeables
CC2 (conséquences moyennes)	modérées	importantes
CC3 (conséquences élevées)	importantes	très importantes

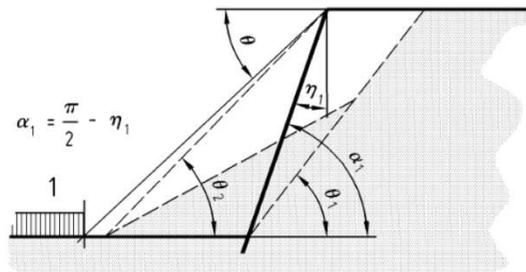
**Tableau H.1 - - Catégories géotechniques en fonction des classes de conséquence et des conditions de site et bases des justifications**

CLASSE DE CONSÉQUENCE	CONDITIONS DE SITE	CATÉGORIE GÉOTECHNIQUE <sup>a</sup>	BASES DES JUSTIFICATIONS
CC1	Simple et connues	1	Expérience et reconnaissance géotechnique qualitative admises
	Complexes	2	Reconnaissance géotechnique et calculs nécessaires
CC2	Simple	2	Reconnaissance géotechnique et calculs approfondis
	Complexes	3	
CC3	Simple ou complexes	3	

## Domaine d'application

### Catégorie géotechnique :

Appréciation de la classe de conséquence en présence de surcharges en haut ou en pied de mur

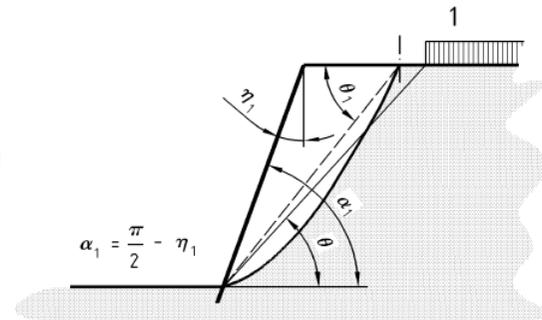


$\theta$	CLASSE DE CONSEQUENCE
$\theta < \theta_2 = \frac{\alpha_1 + 2\varphi_1}{3}$	CC1 ou CC2
$\theta \geq \theta_2 = \frac{\alpha_1 + 2\varphi_1}{3}$	CC3

#### Légende

1 Exemples "d'équipement" en pied : voie ferrée, bâtiment, école, etc... ; possibilité de mise en place rapide d'une protection

Figure B.3.3 - Cas d'un équipement en pied de mur



$\theta$	CLASSE DE CONSEQUENCE
$\theta < \theta_1 = \frac{2\alpha_1 + \varphi_1}{3}$	CC1 ou CC2
$\theta \geq \theta_1 = \frac{2\alpha_1 + \varphi_1}{3}$	CC3

#### Légende

1 Exemple de surcharge mobile : trafic routier; possibilité de mise en place rapide d'une déviation ou d'un rétrécissement

Figure B.3.1 - Cas d'une surcharge mobile en haut du mur

## Domaine d'application

### vs Exécution des ouvrages :

La réalisation des travaux doit s'effectuer conformément aux normes «Exécution des travaux géotechniques» :

-Norme : Remblais renforcés NF EN 14475 (P94-326)

FA141072	ISSN 0335-3931
<b>norme européenne</b>	<b>NF EN 14475</b>
<b>norme française</b>	<b>Janvier 2007</b>
	Indice de classement : P 94-326
	ICS : 93.020
<b>Exécution des travaux géotechniques spéciaux</b>	
<b>Remblais renforcés</b>	
E : Execution of special geotechnical works — Reinforced fill	
D : Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) — Bewehrte Schüttkörper	

-Il existe aussi les **recommandations du CFG**, notamment le fascicule No.9 «Emploi des géotextiles dans le renforcement des ouvrages en terre» :

## 4.7 Mécanismes de ruine

### 4.7.1 Généralités

(1) Un ouvrage en sol renforcé peut périr du fait de la défaillance ou de la déformation excessive de ses éléments de renforcement ou de parement, ou du sol support sur lequel il est établi, ou du site dans lequel il est construit.

(2) Il découle des comportements décrits en 4.3, 4.4 et 4.5 que les différents états limites ultimes à considérer pour les ouvrages en sol renforcé sont :

- les états limites d'instabilité externe locale, par glissement sur la base du massif ou par poinçonnement du sol de fondation (voir 4.7.2) ;
- l'état limite d'instabilité externe générale, par grand glissement le long d'une ligne de rupture extérieure au massif renforcé (voir 4.7.3) ;
- les états limites d'instabilité interne du massif :
  - par défaillance des renforcements, soit par insuffisance de leur résistance structurelle à la traction (voir 4.7.4), soit par insuffisance de la résistance de l'interaction entre les renforcements et le terrain (voir 4.7.5) ;
  - par défaillance du parement, soit par insuffisance de résistance de celui-ci, soit par insuffisance de résistance des dispositifs de liaison aux renforcements (voir 4.7.6).
- l'état limite d'instabilité mixte, par un mécanisme de grand glissement le long d'une ligne de rupture interceptant des lits de renforcement (voir 4.7.7).

(3) On doit vérifier qu'aucun de ces états limites ne peut être atteint au cours de la construction d'un ouvrage en sol renforcé ni pendant sa durée d'utilisation prévue.

## -Instabilité Externe locale

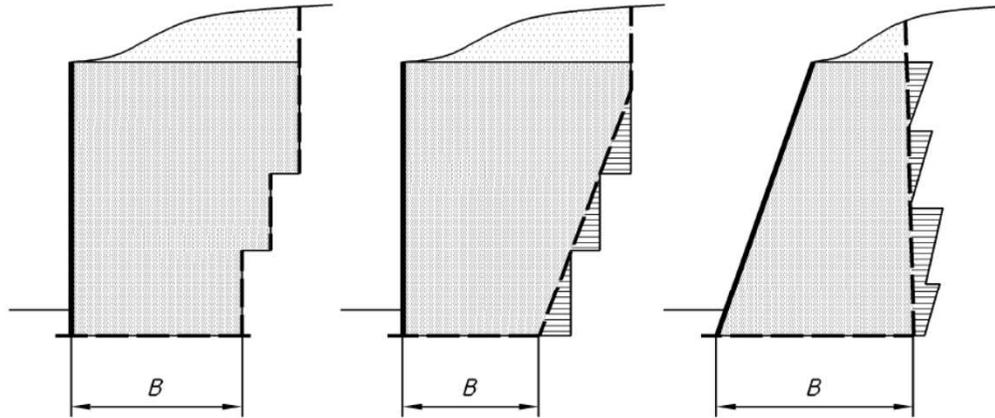
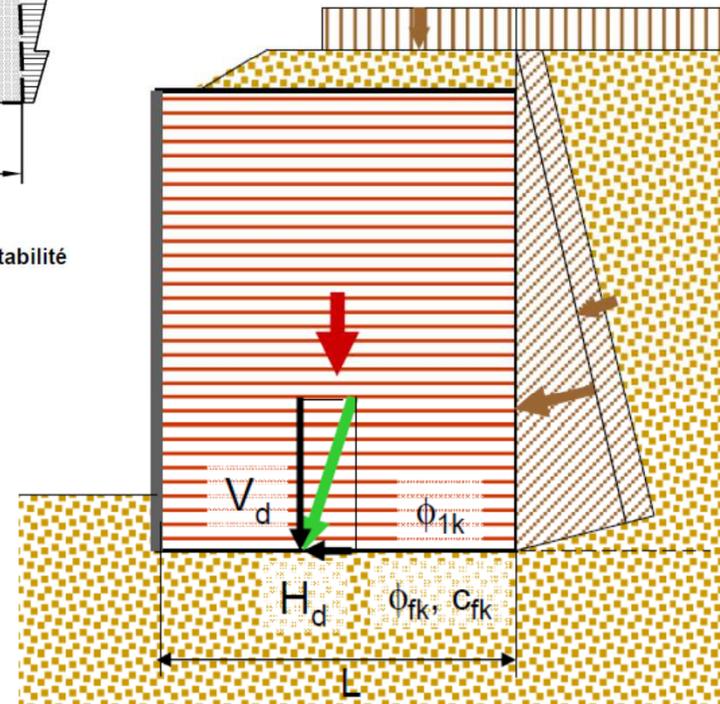


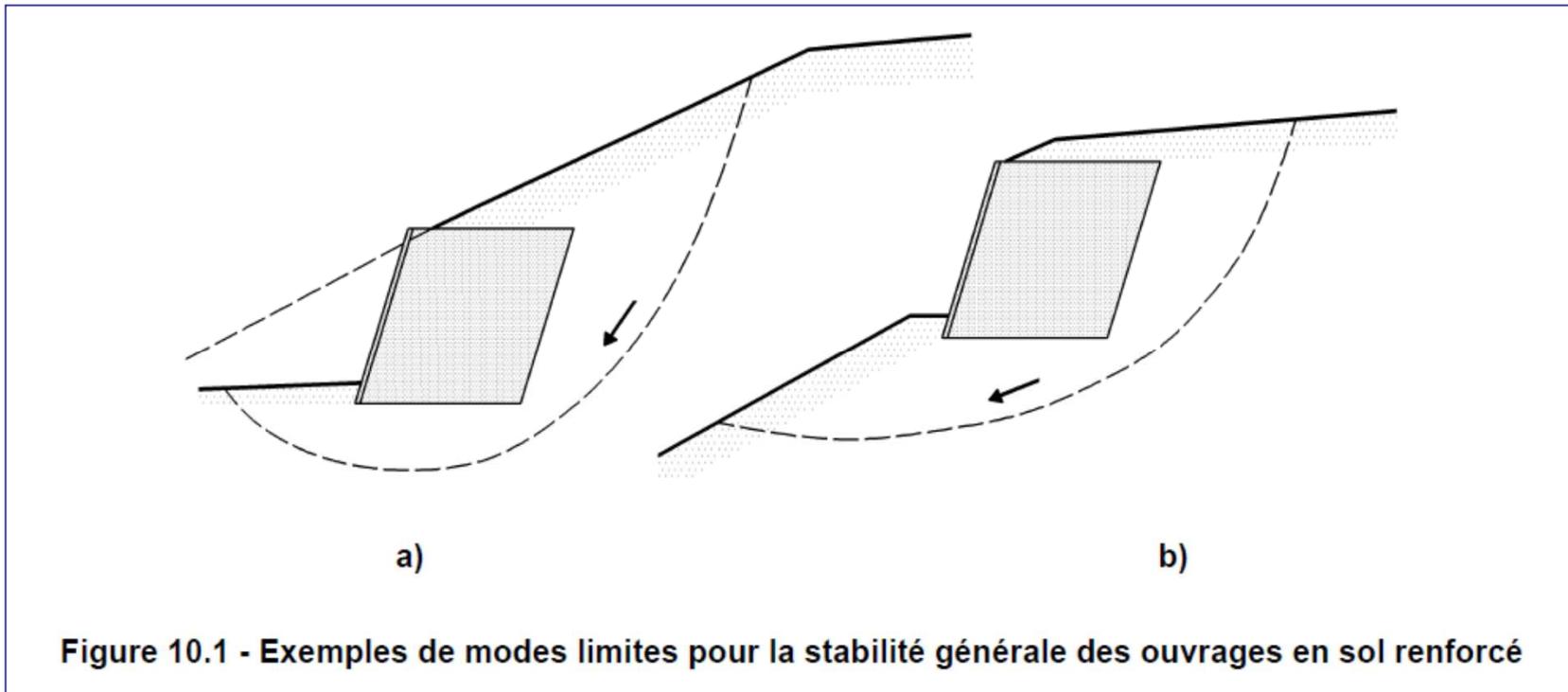
Figure D.2.1 - Exemples de contours à prendre en compte pour la vérification de la stabilité externe d'un ouvrage en sol renforcé

- Glissement sur la base du massif
- Poinçonnement du sol de fondation



## -Instabilité Externe générale

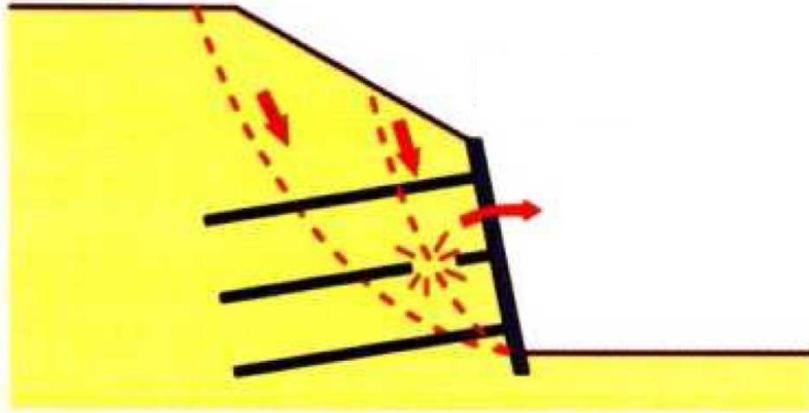
(1) La construction d'un massif en sol renforcé peut provoquer une instabilité générale du site des travaux, en entraînant une rupture de grand glissement dans les terrains avoisinant l'ouvrage.



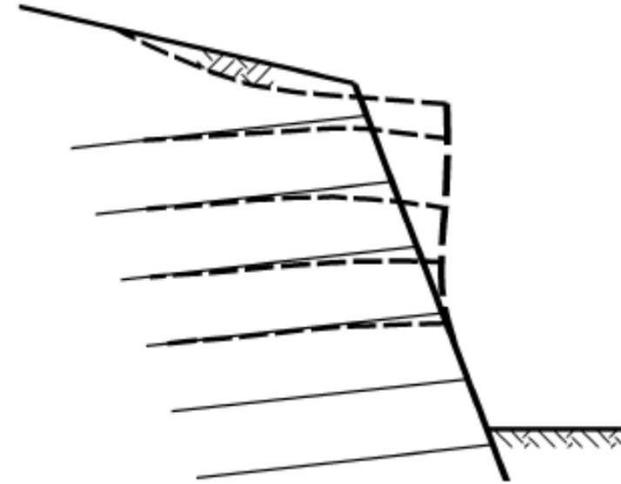
NOTE 1 – Les excavations préliminaires à la construction d'ouvrages en remblai renforcé sur des pentes ou des versants peuvent elles-mêmes être à l'origine de ruptures de grand glissement.

NOTE 2 – Les lignes de glissement potentiel considérées au titre de l'instabilité générale ne recoupent ni ne longent aucun lit de renforcement de l'ouvrage. Les ruptures potentielles le long de lignes qui interceptent des lits de renforcement relèvent de l'instabilité mixte (voir 4.7.7).

-Instabilité **Interne** du massif (1/2)

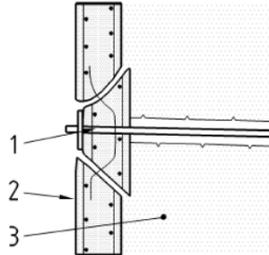


Rupture du renforcement  
(défaillance structurelle)



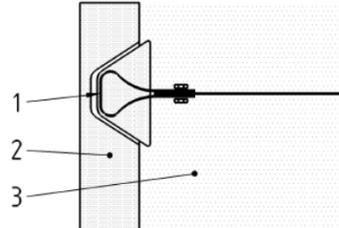
Insuffisance de la résistance  
d'interaction sol/renforcement

## -Instabilité Interne du massif (2/2)



### Légende

- 1 Clou
- 2 Parement
- 3 Terrain

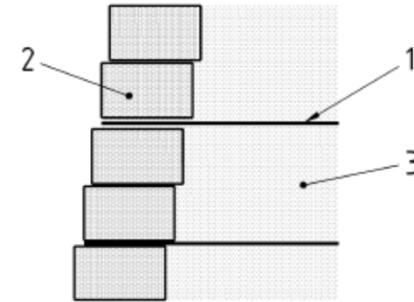


### Légende

- 1 Amorce d'armature
- 2 Parement
- 3 Terrain

Figure 4.7.6.1 - Exemples de ruine de la liaison parement / renforcement

Rupture de l'attache au  
parement



a) – Glissement d'une nappe de renforcement

Rupture de la liaison d'une nappe GSY  
(ex. glissement de nappe pincée)

## -Instabilité Mixte

(3) Une surface de glissement potentiel d'instabilité mixte (Figure 4.7.7.1) peut passer à la fois dans le massif et à l'extérieur du massif (lignes ① ou ②), ou uniquement dans le massif (ligne ③). Elle peut longer un lit de renforcement (ligne ④).

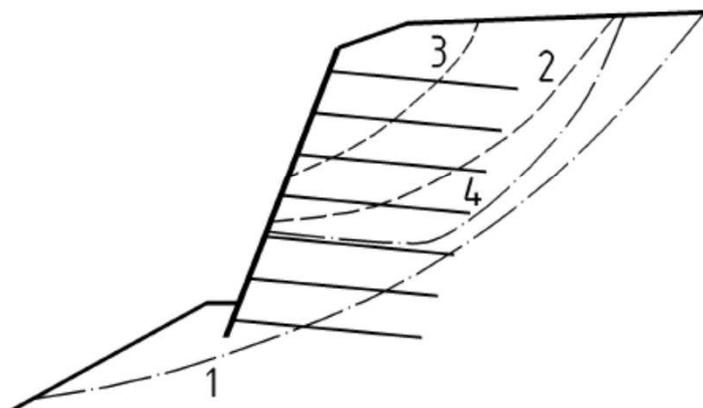
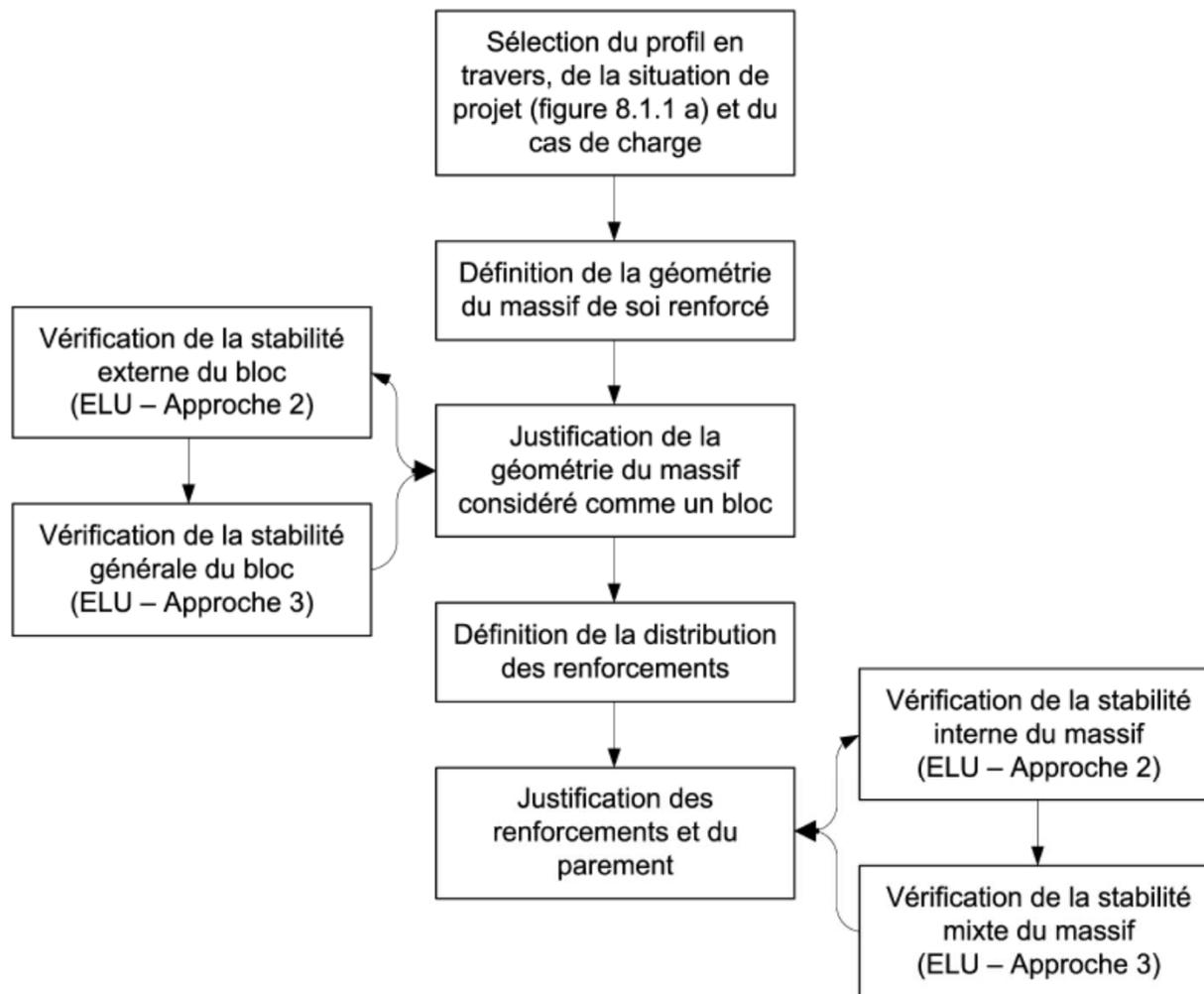


Figure 4.7.7.1 - Surfaces de glissement d'instabilité mixte

(2) Les résistances mises à contribution comprennent : le cisaillement des sols (sols en place, remblais), la résistance d'interaction (ou d'adhérence) des renforcements, leur résistance à la traction et la résistance du parement au point d'accrochage des renforcements.

## - Règles de justification des ouvrages (section 8 de la norme)



b) Étude aux états limites ultimes d'un profil en travers représentatif

Figure 8.1.1 – Principe général de la justification d'un ouvrage en sol renforcé

## - Règles de justification des ouvrages (section 8 de la norme)

Tableau 8.5.1 – Vérifications minimales à faire aux états limites ultimes pour les situations de projet durables ou transitoires les plus défavorables en cours de construction et d'exploitation

		ELU type	Approche	Remblai renforcé	Sol cloué
<b>Justification de la géométrie du massif</b>					
<b>Stabilité externe</b>					
	Glissement sur le sol support	GEO	2	oui	oui
	Poinçonnement du sol support	GEO	2	oui	oui (2)
<b>Stabilité générale</b>					
		GEO	3	oui (1)	oui
<b>Justification de la distribution des renforcements et du parement</b>					
<b>Stabilité interne</b>					
	Distribution des renforcements				
	Résistance de traction	STR	2	oui	oui
	Résistance d'interaction	STR	2	oui	oui
	Résistance du parement	STR	2	oui	oui
<b>Stabilité mixte</b>					
		GEO/STR	3	oui (3)	oui
Notes					
(1) Sauf cas simple de massif établi sur un site tabulaire favorable.					
(2) Sauf exception (justification intégrée dans la stabilité mixte).					
(3) Sauf mur "classique", $CC < 3$ , conditions de site simples et connues.					

- **Rappel des approches et coefficients partiels** (annexe C - normative)

En France :

ELU : **GEO** ou **STR**

**Approche 2** : (A1 + M1 + R2)

**Approche 3** : (A1\* ou A2\*\* + M2 + R3)

*\*sur actions de la structure*

*\*\*sur actions géotechniques*

# Les approches de calcul (annexe A normative)

Approches	Combinaisons	Action ( $\gamma_F$ )	Symbol e	Jeu A1	Jeu A2
1	A1 "+" M1 "+" R1	Permanente Défavorable	$\gamma_G$	1,35	1,00
	A2 "+" M2 "+" R1	Favorable	$\gamma_G$	1,00	1,00
2	A1 "+" M1 "+" R2	Variable Défavorable	$\gamma_Q$	1,50	1,30
3	A1 ou A2 "+" M2 "+" R3	Favorable	$\gamma_Q$	0	0

## Équilibres STR & GEO

Paramètre de sol ( $\gamma_M$ )	Symbole	Jeu M1	Jeu M2
Résist. au cisaillement	$\gamma_\phi$	1,00	1,25
Cohésion drainée	$\gamma_{c'}$	1,00	1,25
Cohésion non drainée	$\gamma_{c_u}$	1,00	1,40
Résist. non confinée	$\gamma_{q_u}$	1,00	1,40
Masse volumique	$\gamma_\gamma$	1,00	1,00

Résistance ( $\gamma_R$ )	Symbole	Jeu R1	Jeu R2	Jeu R3
Portance	$\gamma_{Rv}$	1,00	1,4	1,00
Glissement	$\gamma_{Rh}$	1,00	1,1	1,00

Approche 3 :  
coefficients modèle

## - Contribution des renforcements

### 12.7 Contribution des éléments de renforcement

(1) L'effort de traction mobilisable en un point d'un lit de renforcement est limité au maximum, par mètre de parement, par (Figure 12.7) :

- la valeur de calcul de la résistance ultime de traction dans la section courante du lit de renforcement,  $R_{tc;d}$  ;
- la valeur de calcul de la résistance ultime d'interaction sol - lit de renforcement mobilisable à l'extérieur de la surface de rupture potentielle,  $R_{fe;d}$  ;
- la valeur de calcul de la résistance ultime du point d'attache au parement,  $Min\left\{R_{ta;d}; R_{a;d}; \left(s_v \sigma_{par;d}\right)\right\}$ , augmentée de la valeur de calcul de la résistance ultime d'interaction mobilisable à l'intérieur de la surface de rupture potentielle, entre le point d'attache et cette surface,  $R_{fi;d}$ .

$R_{ta;d}$ ,  $R_{a;d}$  et  $\sigma_{par;d}$  sont définis respectivement en 11.2(1), 11.4(1) et 11.5(1).

- **Détermination des valeurs de calcul des résistances ultimes de traction (des inclusions)** (Annexe F - normative)

**Résistance en traction de calcul**

$$R_{t;d} = \rho_{\text{end}} \rho_{\text{flu}} \rho_{\text{deg}} \frac{R_{t;k}}{\gamma_{M;t}}$$

- $\rho_{\text{end}}$  : de l'endommagement dû aux agressions mécaniques lors de la construction ;
- $\rho_{\text{flu}}$  : de l'évolution physique du matériau sous l'effet du fluage ;
- $\rho_{\text{deg}}$  : des dégradations d'origine chimique ou biochimique dues à l'environnement.

**Les Coefficients de réduction  $\leq 1.0$**

(à noter  $\rho = 1/\Gamma$ )

**- Détermination des valeurs de calcul des résistances ultimes de traction (des inclusions) (Annexe F - normative)**

**- GSY**

**Pour les renforcements géosynthétiques (à défaut de valeurs « producteur »)**

$$\rho_{end} \leq 1.0$$

$$\rho_{flu} \leq 1.0$$

$$\rho_{deg} \leq 1.0$$

**Tableau F.4.2 - Valeurs forfaitaires du coefficient  $\rho_{end}$**

Conditions de mise en œuvre	Peu sévères	Moyennement sévères	Sévères	Très sévères
Coefficient $\rho_{end}$	0,87	0,80	0,67	0,40

**Tableau F.4.3 - Degré de sévérité des conditions de mise en œuvre**

Remblai	Sol fin, sable	Grave sableuse ou sol graveleux alluvionnaires	Grave sableuse ou sol graveleux concassés	Sols à gros éléments, roulés ou anguleux
Classification NF P 11-300	A, B, D1	B, D	B, D	C, CA, CB, D
Énergie de compactage	Conditions de mise en oeuvre			
Moyenne	Peu sévères	Moyennement sévères	Sévères	Très sévères
Intense	Moyennement sévères	Sévères	Très sévères	Non recommandées

**- Détermination des valeurs de calcul des résistances ultimes de traction (des inclusions) (Annexe F - normative)**

**- GSY**

**Pour les renforcements géosynthétiques (à défaut de valeurs « producteur »)**

$$\rho_{\text{end}} \leq 1.0$$

$$\rho_{\text{flu}} \leq 1.0$$

$$\rho_{\text{deg}} \leq 1.0$$

(8) En l'absence d'essais de fluage répondant aux spécifications du F.4.3(4), il convient d'appliquer les coefficients de réduction par défaut donnés par le Tableau F.4.4, suivant le type de polymère, pour les classes de durée d'utilisation 2 à 5 (Annexe B.4) et une température de service de 20 °C.

**Tableau F.4.4 - Valeurs par défaut de  $\rho_{\text{flu}}$**

Polymère	PET, PA	PEHD	PP
Valeurs forfaitaires de $\rho_{\text{flu}}$	1/3	1/5	1/6

**- Détermination des valeurs de calcul des résistances ultimes de traction (des inclusions) (Annexe F - normative)**

**- GSY**

**Pour les renforcements géosynthétiques (à défaut de valeurs « producteur »)**

$$\rho_{\text{end}} \leq 1.0$$

$$\rho_{\text{flu}} \leq 1.0$$

$$\rho_{\text{deg}} \leq 1.0$$

**Tableau F.4.5 - Valeurs par défaut du coefficient  $\rho_{\text{deg}}$**

pH	Classe de durée d'utilisation	PET	PEHD / PP	PA
$4 < \text{pH} \leq 8$	1 à 3	0.95	0.95	0.90
	4 ou 5	0.83	0.77	-
$8 < \text{pH} \leq 9$	1 à 3	0,90	0.95	0,90
	4 ou 5	0.77	0.77	-

**Tableau F.4.6 - Exemples de valeurs de pH**

pH	Type de remblai ou de milieu
$\leq 4$	Remblais d'origine industrielle. Quelques sols naturels
4 à 9	Grande majorité des sols naturels
9 à 9,5	Au contact du béton durci. Quelques sols naturels (dolomitiques)
9 à 11.5	Remblai traité ancien (chaux, ciment, laitier)
$\geq 11,5$	Au contact du béton frais, ou remblai traité récent

- Détermination des valeurs de calcul des résistances ultimes de traction (des inclusions) (Annexe F - normative)

- GSY

Pour les renforcements géosynthétiques (à défaut de valeurs « producteur »)

$$\rho_{end} \leq 1.0$$

$$\rho_{flu} \leq 1.0$$

$$\rho_{deg} \leq 1.0$$

Tableau F.4.5 - Valeurs par défaut du coefficient  $\rho_{deg}$

pH	Classe de durée d'utilisation	PET	PEHD / PP	PA
$4 < \text{pH} \leq 8$	1 à 3	0.95	0.95	0.90
	4 ou 5	0.83	0.77	-
$8 < \text{pH} \leq 9$	1 à 3	0,90	0.95	0,90
	4 ou 5	0.77	0.77	-

9.2 The above values has been calculated in accordance with PD ISO/TR 20432 : 2007, using the  $R_1$  and  $R_2$  values given in Table 7:

Table 7  $R_1$  and  $R_2$

Factor	Taking account of:	Design life (years)	
		60	120
$R_1$	Extrapolation of creep rupture data	1.05	1.05
$R_2$	Extrapolation of chemical data	1.05	1.10

0.95 0.95

0.95 0.91  $\rho_{deg}$

- Détermination des valeurs de calcul des résistances ultimes de traction (des inclusions) (Annexe F - normative)

- GSY

Pour les renforcements géosynthétiques (à défaut de valeurs « producteur »)

$$\rho_{\text{end}} \leq 1.0$$

$$\rho_{\text{flu}} \leq 1.0$$

$$\rho_{\text{deg}} \leq 1.0$$

Tableau F.4.4 - Valeurs par défaut de  $\rho_{\text{flu}}$

Polymère	PET, PA	PEHD	PP
Valeurs forfaitaires de $\rho_{\text{flu}}$	1/3	1/5	1/6

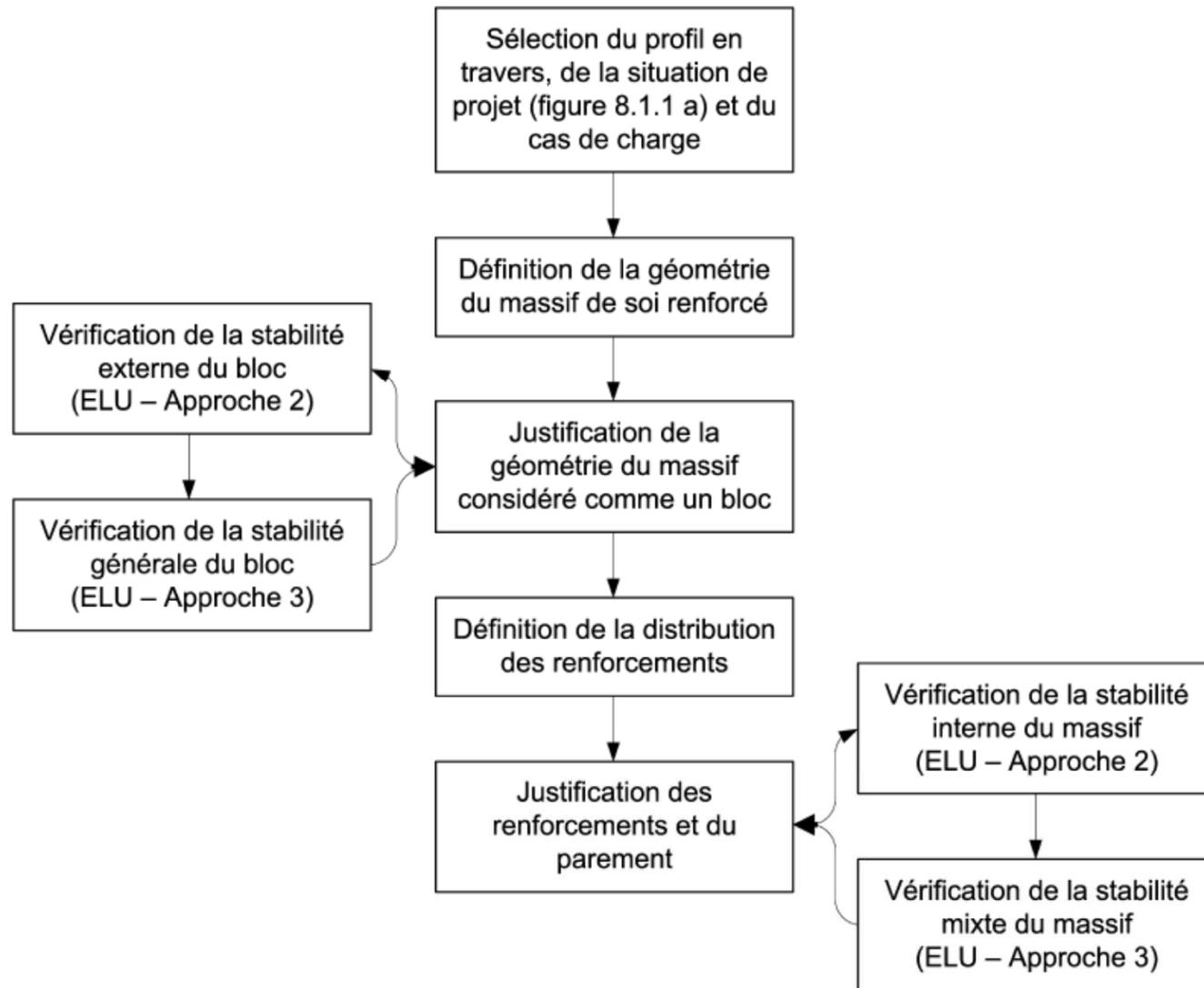
9.2 The above values has been calculated in accordance with PD ISO/TR 20432 : 2007, using the  $R_1$  and  $R_2$  values given in Table 7:

Table 7  $R_1$  and  $R_2$

Factor	Taking account of:	Design life (years)	
		60	120
$R_1$	Extrapolation of creep rupture data	1.05	1.05
$R_2$	Extrapolation of chemical data	1.05	1.10

0.95 0.95  $\rho_{\text{flu}}$   
0.95 0.91

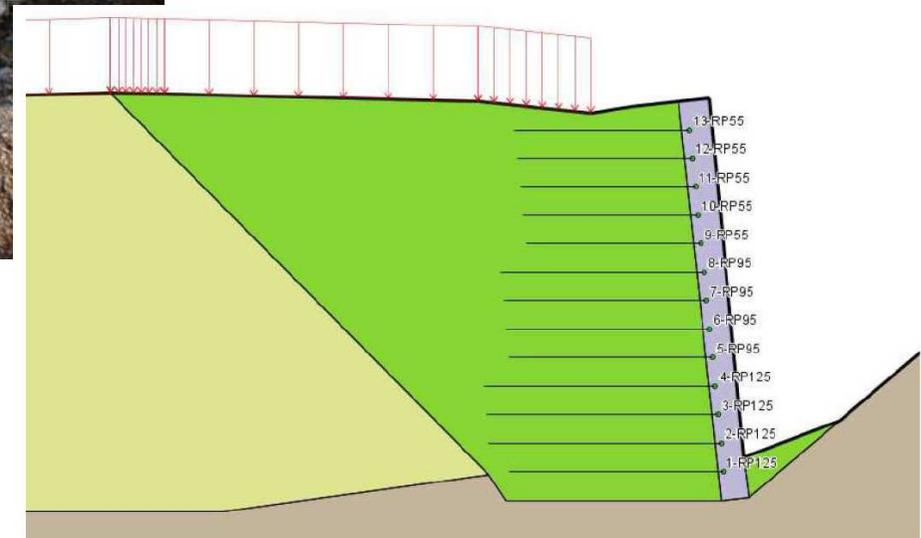
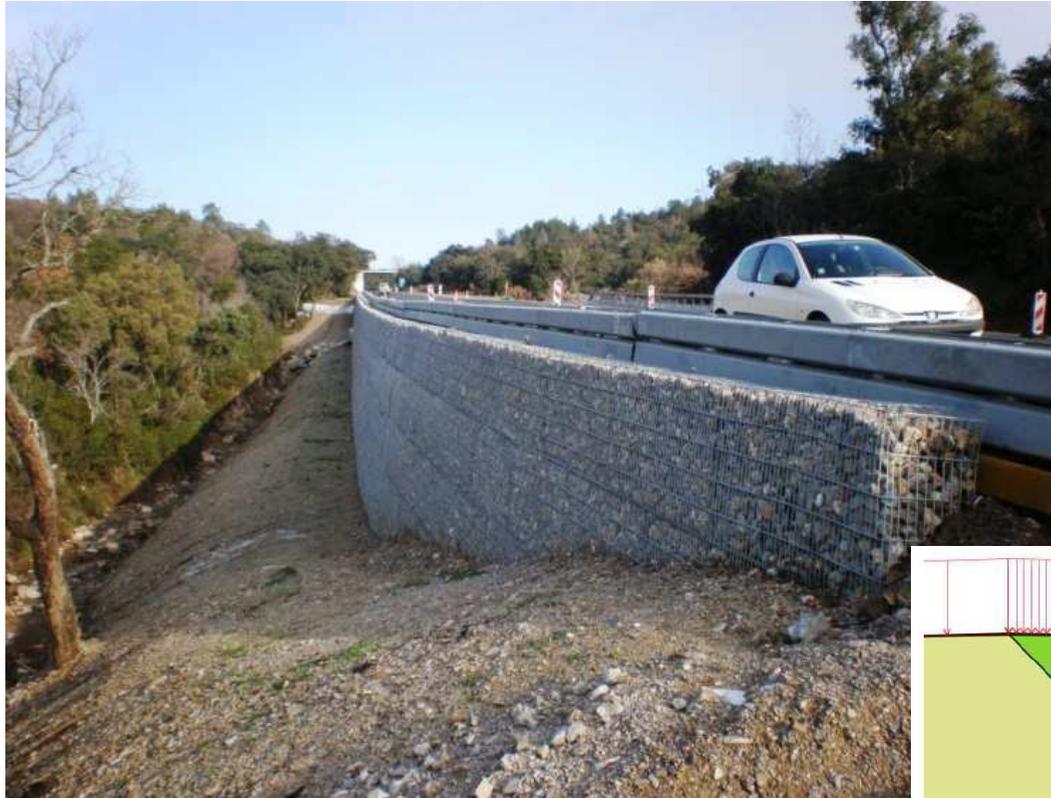
## - Règles de justification des ouvrages (section 8 de la norme)



b) Étude aux états limites ultimes d'un profil en travers représentatif

Figure 8.1.1 – Principe général de la justification d'un ouvrage en sol renforcé

## Ouvrages en remblai renforcé (exemple 1)



## Ouvrages en remblai renforcé (exemple 1)



## Ouvrages en remblai renforcé (exemple 2)



## Ouvrages en remblai renforcé (exemple 2)



Murs superposés,  
décalés

Attention au sens de  
pose des nappes



## Ouvrages en remblai renforcé (exemple 3)



## Ouvrages en remblai renforcé (exemple 3)



Glissement sur la base

Ouvrages en remblai renforcé (exemple 4)



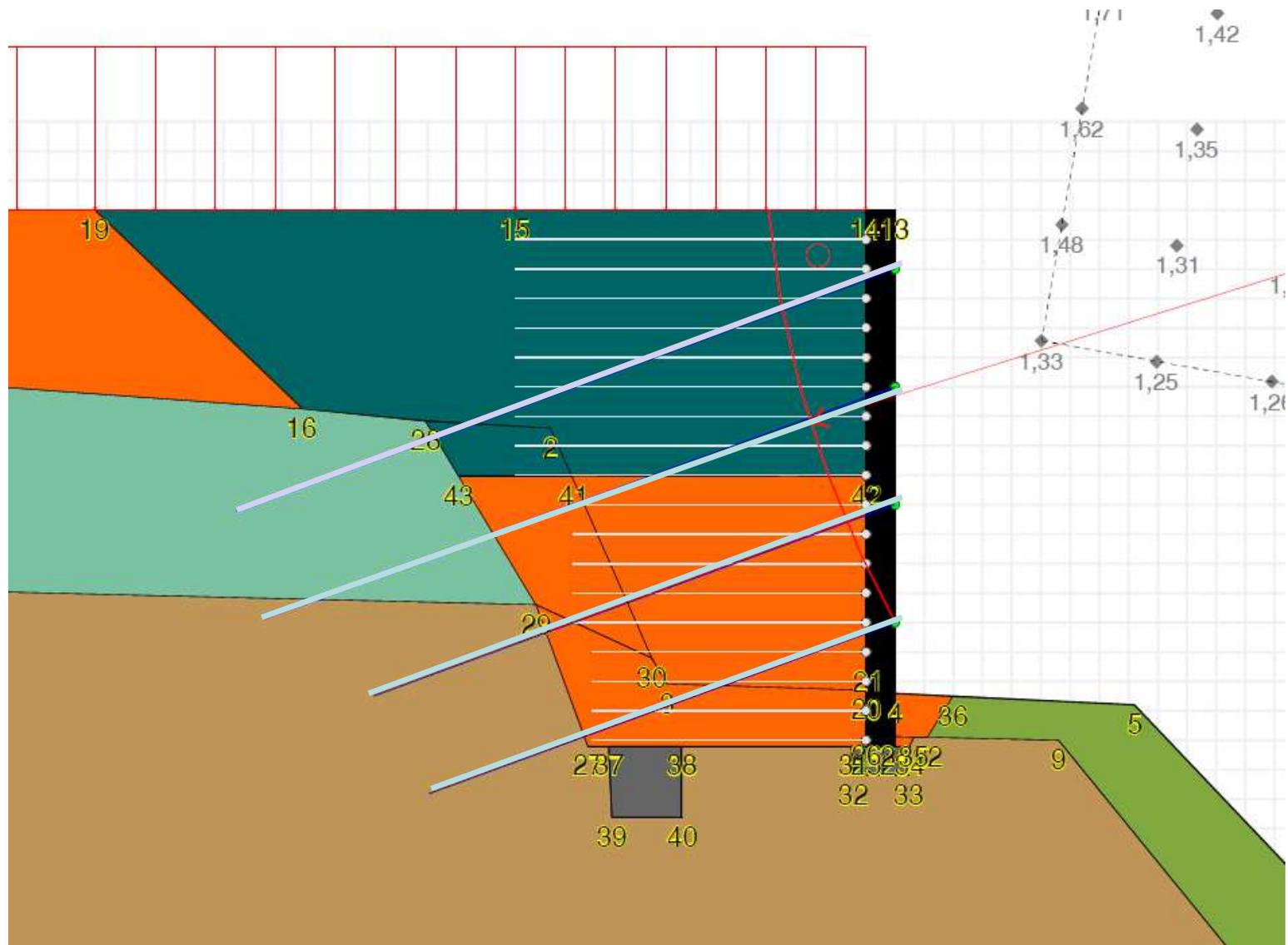
## Ouvrages en remblai renforcé (exemple 5)



## Ouvrages en remblai renforcé (exemple 5)



## Ouvrages en remblai renforcé (exemple 5)





***Journée technique CFMS-CFG du 30/9/2015  
« Les Géosynthétiques et leurs applications »***

**Merci pour votre attention !**

**Moulay ZERHOUNI (FONDASOL)**

