



Journée technique CFMS-CFG
« Les Géosynthétiques et leurs applications »

**Dimensionnement à court et à long terme de
structure renforcée par
géosynthétique sur cavités potentielles**

Philippe DELMAS (Cnam)
Pascal VILLARD (3SR – Université de Grenoble Alpes)
Audrey HUCKERT (Egis Géotechnique)



Contexte



(P. Villard)

Contexte

Tallinn-Narva section Kukruse Jõhvi (Estonie) (2009)

à proximité du tracé



lors des terrassements



(J. Tankéré)

Dimensionnement des géosynthétiques sur cavité

Journée technique CFG /CFMS
30 Septembre 2015

P. Villard, Ph. Delmas, A. Huckert 3

Contexte

LGV EST lot 42 – (2011-2012)

lors des terrassements



à proximité du tracé

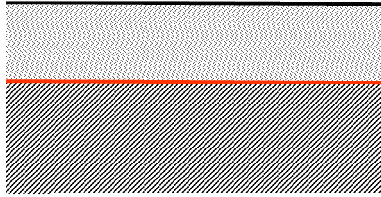
(A. Nancey)

Journée technique CFG /CFMS
30 Septembre 2015

Dimensionnement des géosynthétiques sur cavité

P. Villard, Ph. Delmas, A. Huckert 4

Renforcement par géosynthétique



diamètre cavité D (m)

effort de traction
géosynthétique (kN/m)

flèche du géosynthétique
(cm)

tassement
en surface (cm)

fin de
construction

début
ouverture
cavité

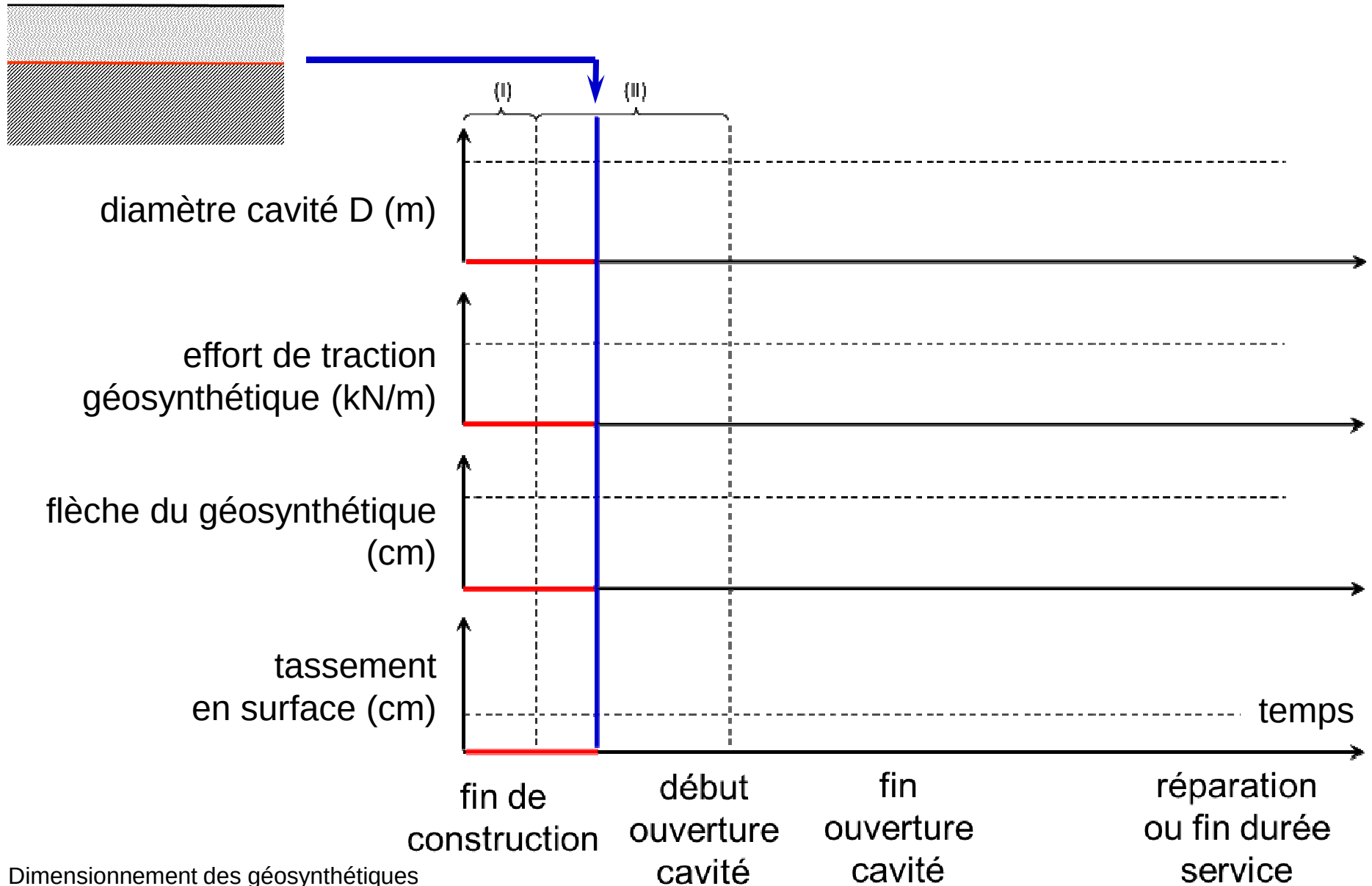
fin
ouverture
cavité

réparation
ou fin durée
service

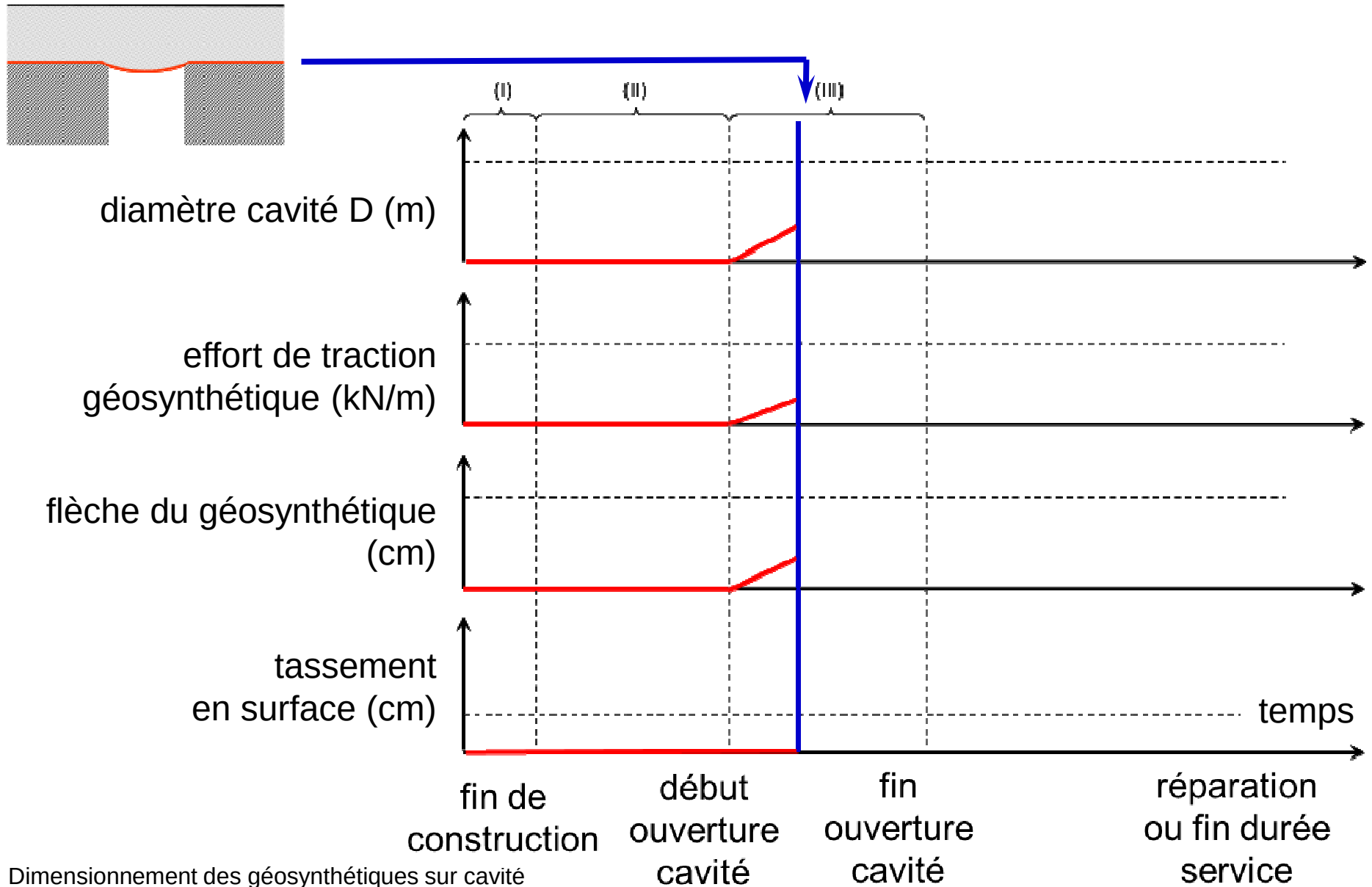
temps

Dimensionnement des géosynthétiques

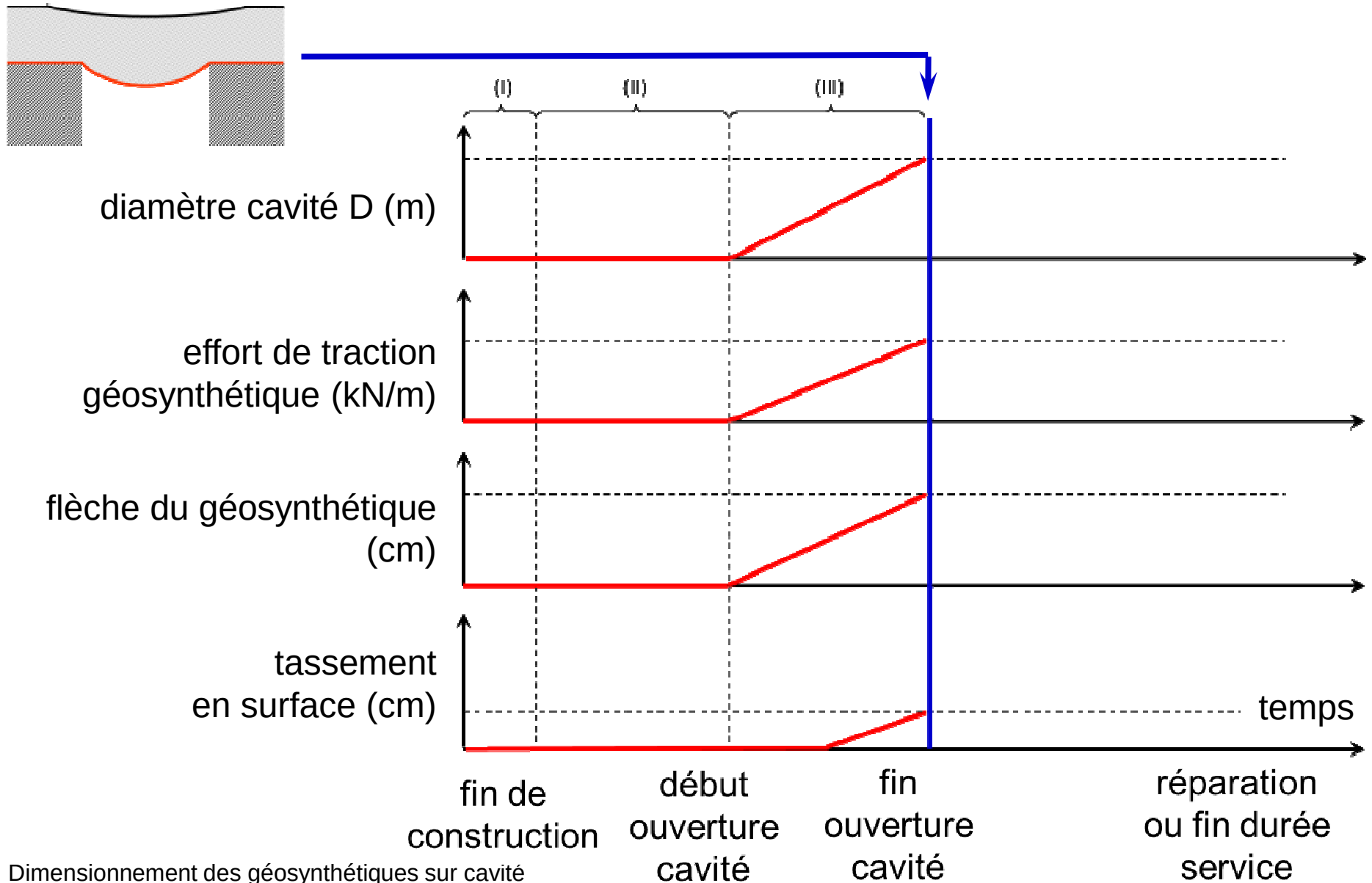
Renforcement par géosynthétique



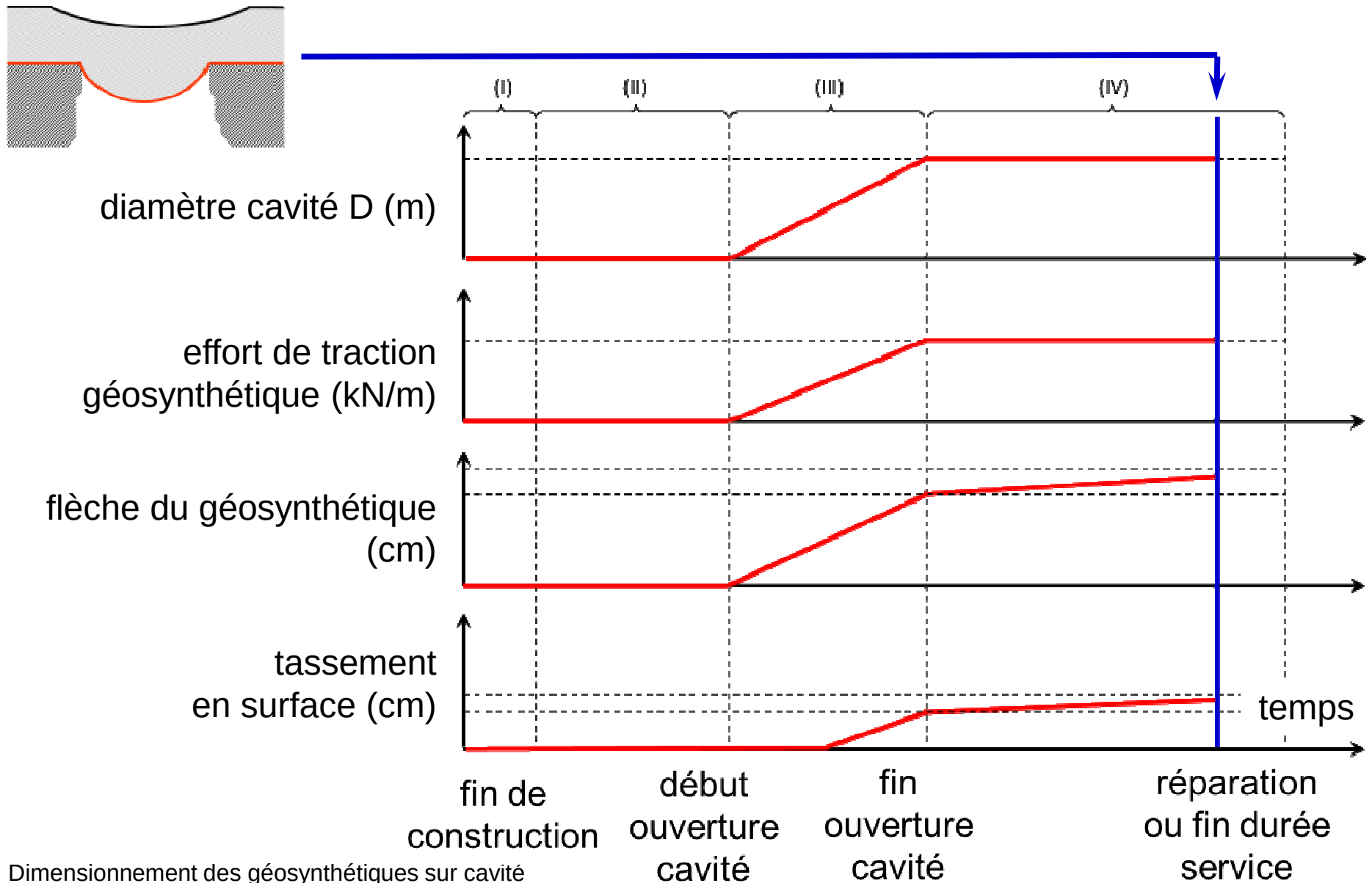
Renforcement par géosynthétique



Renforcement par géosynthétique

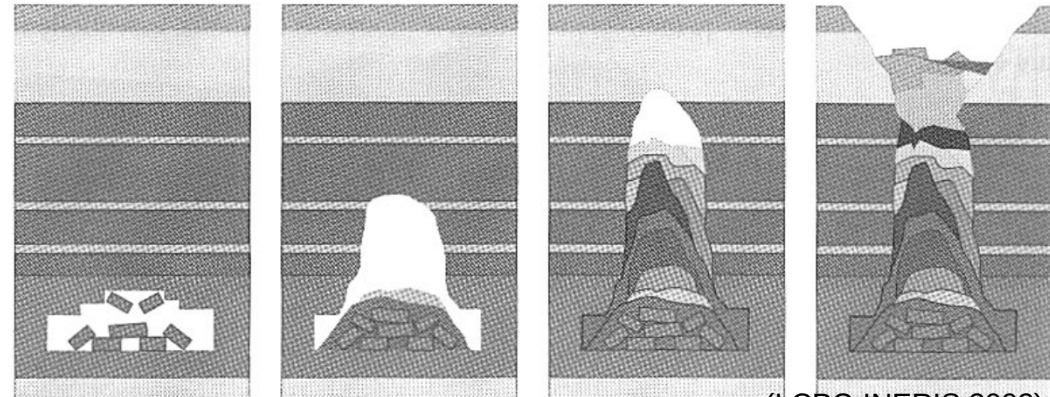


Renforcement par géosynthétique



Renforcement par géosynthétique

Diamètre de la cavité



*Exemple Carrières de gypse
Déviation de Meaux*

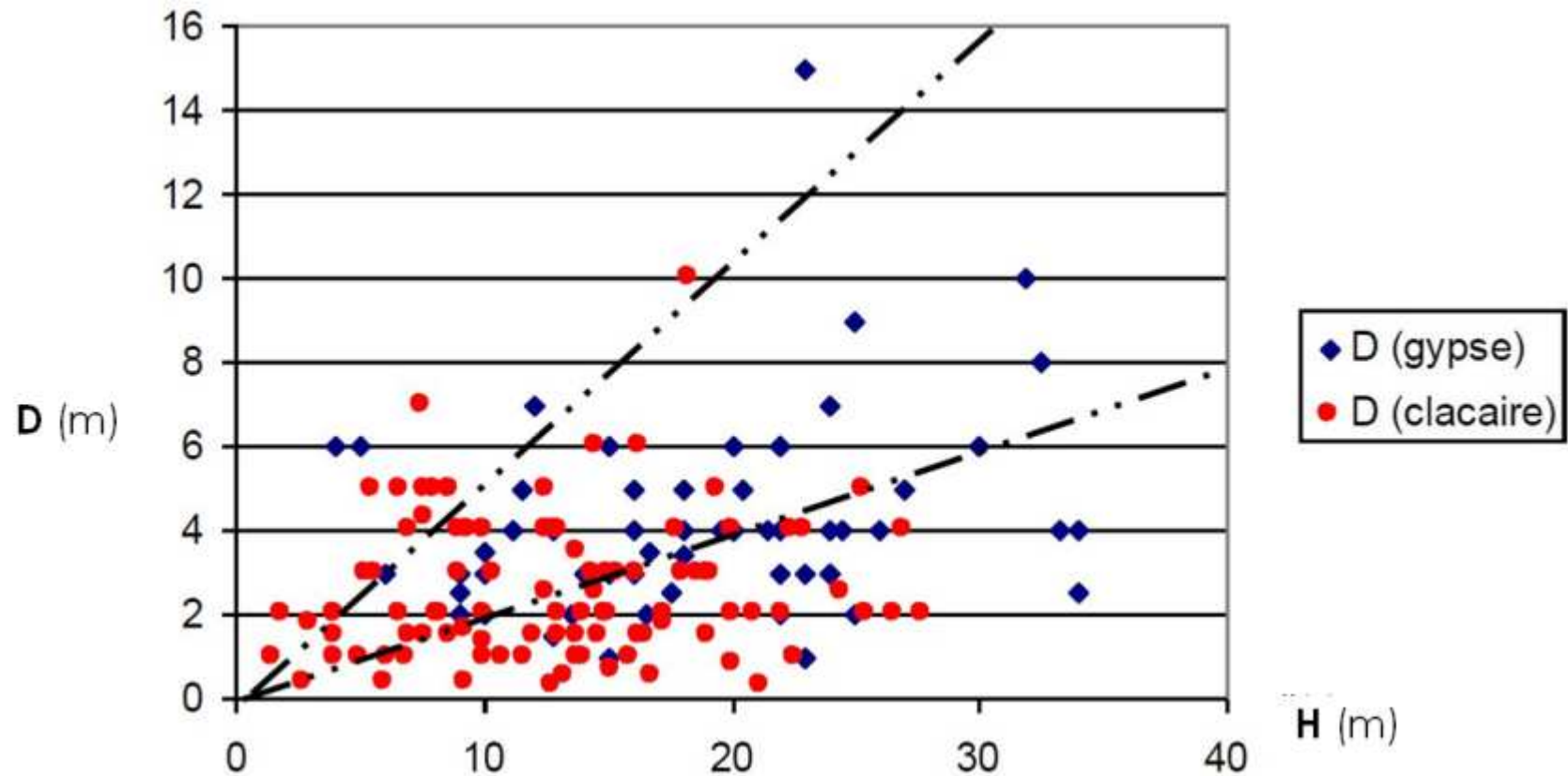


Renforcement par géosynthétique

Diamètre de la cavité Al Heib (2001)

Estimation diamètres de fontis en fonction de la profondeur de la cavité initiale (gypse et calcaire grossier)

Diamètre moyen ~ 3 m & ~ 80% diamètre < 4 m



Quelques références

Projet Rafael

(Thèse H. Giraud, 1997)

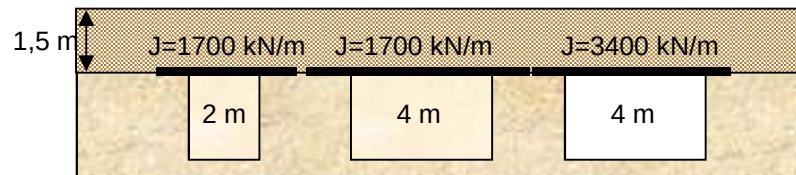
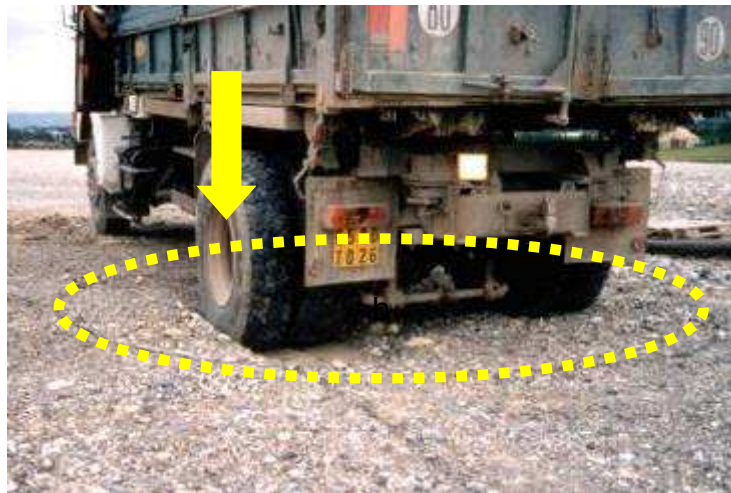
Renforcement des Assises Ferroviaires et Autoroutières contre les Effondrements Localisés (1998)

(SNCF, Scétauroute, LCPC & LRPC
LIRIGM Grenoble, Bidim Geosynthetics)

Route

Route (4m)

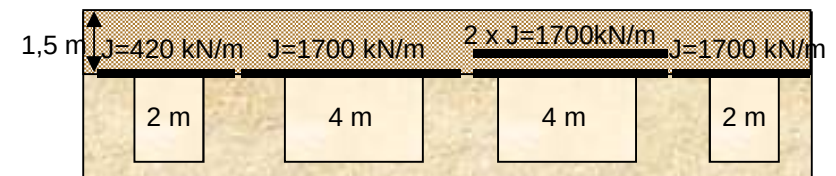
Passage d'un camion de 20 t



Voie ferrée

Voie ferrée (4m)

Chargement dynamique



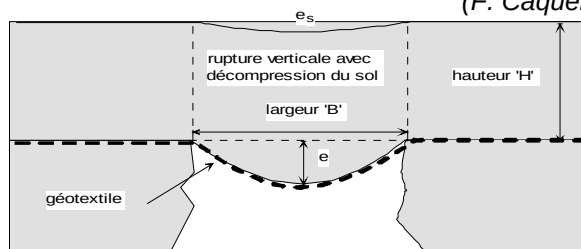
Quelques références

Projet Nancy

Déformation des ancrages



(F. Caquel)

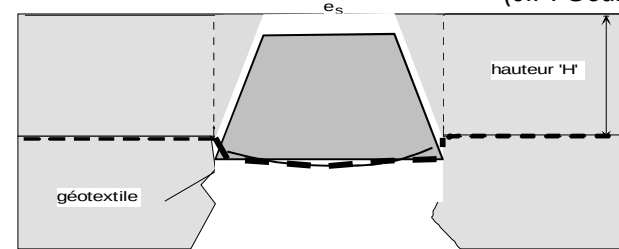


Projet Torcy

Sol cohésif



(J.P. Gourc)



Quelques références

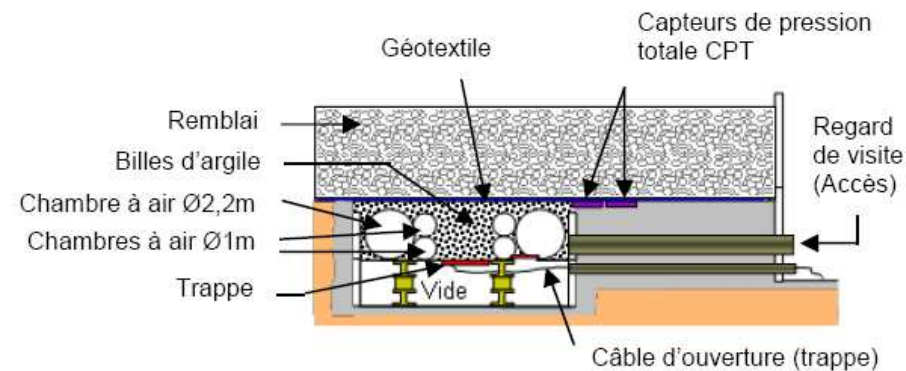
Projet Geolnov



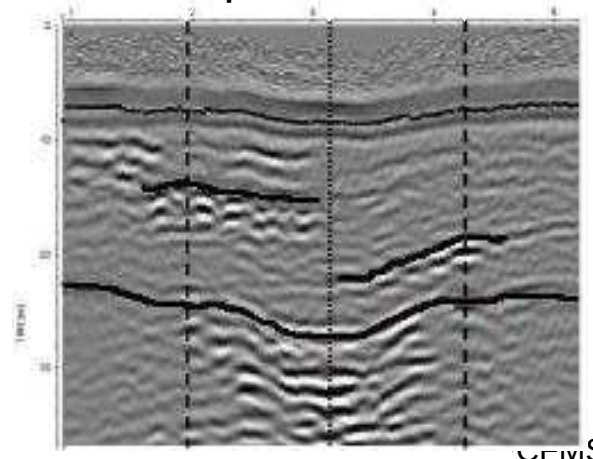
Conception de Géotextiles hautes performances sous contraintes environnementales (2014)

Cavités (Texinov, Egis, L3SR, Cnam)

labélisé par pôles de compétitivité Techtera et Fibres



Sols pulvérulents

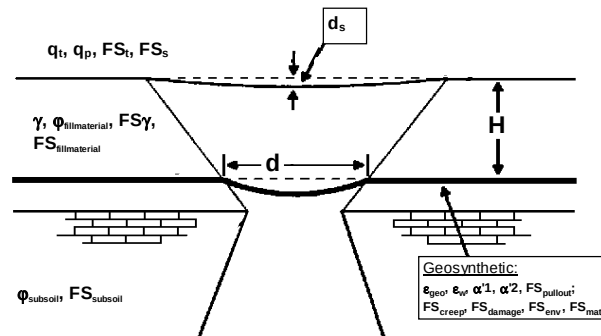


Sols traités

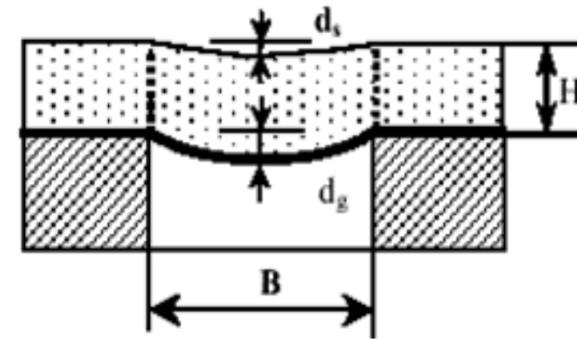


Quelques références

Normes et réglementations

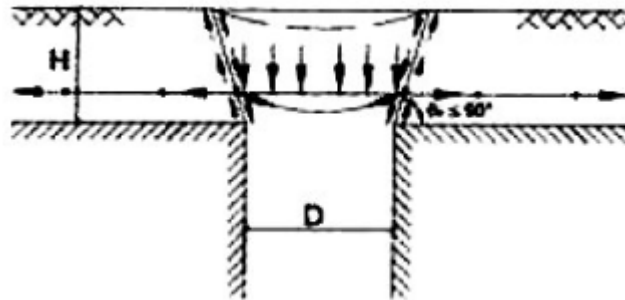


British standard 8006



$$d_g = d_s + f(H, C_e)$$

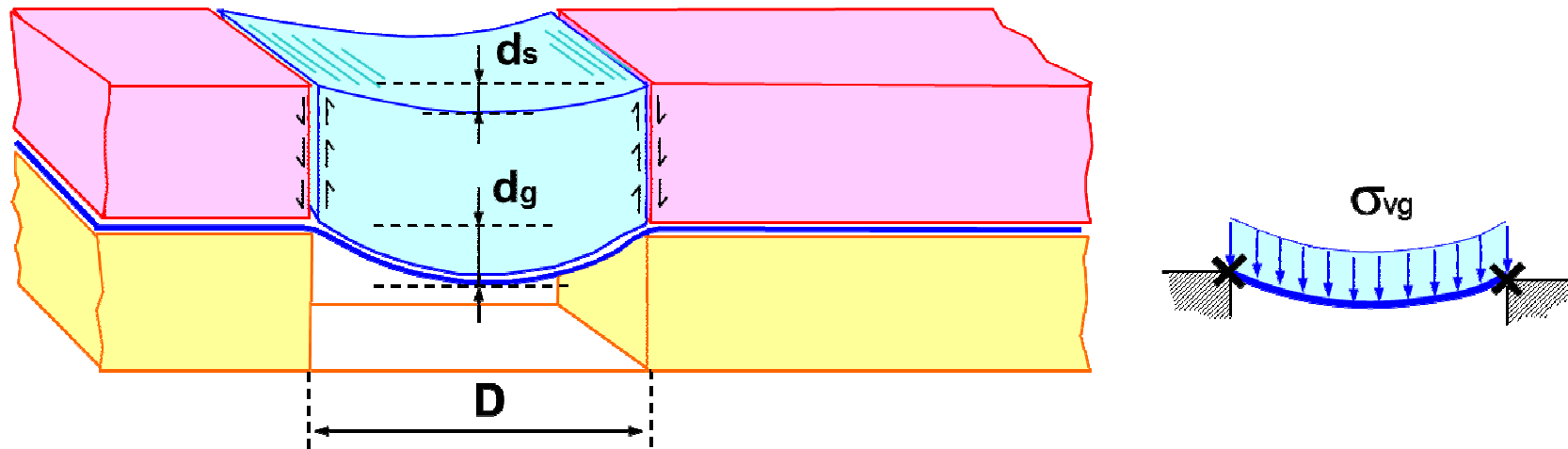
(Rafael 1998)



EBGEO
(2011)

Hypothèses de base (Rafael)

(Giraud, 1997 ; Villard et al., 2002)



- Effondrement du sol au droit de la cavité
- Transfert de charge par frottement
- Charge sur la nappe uniformément répartie
- Foisonnement du sol granulaire ($d_s < d_g$)
- Nappe ancrée aux extrémités
- Renforcement unidirectionnel
- Comportement en membrane de la nappe

Renforcement par géosynthétique

Paramètres dimensionnant :

Critère de tassement maximum

exemples de valeurs en absence de critère du Maître d'Œuvre

Voies ferrées	$\frac{d_s}{D_s} \leq 0,2 \%$ et $d_s \leq 1 \text{ cm}$ ⁽¹⁾ $\frac{d_s}{D_s} \leq 0,5 \%$ ⁽²⁾
Autoroutes (vitesses élevées)	$1,0 \% \leq \frac{d_s}{D_s} \leq 1,7 \%$ ⁽¹⁾ $\frac{d_s}{D_s} \leq 1 \%$ ⁽²⁾
Routes secondaires (vitesses faibles)	$1,7 \% \leq \frac{d_s}{D_s} \leq 2,5 \%$ ⁽¹⁾ $\frac{d_s}{D_s} \leq 2 \%$ ⁽²⁾
Autres routes urbaines, parking, etc.	$2,5 \% \leq \frac{d_s}{D_s} \leq 7 \%$ ⁽¹⁾
Parcs et zones piétonnes	$\frac{d_s}{D_s} \leq 5 \%$ ⁽²⁾

⁽¹⁾(EBGEO, 2011), ⁽²⁾(Lawson et Yee, 2011)

'CFMS

Equations à résoudre

$$d_g = d_s + 2 H (C_e - 1)$$

Equations à résoudre

$$d_g = d_s + 2 H (C_e - 1)$$

$$\varepsilon_g = \frac{8}{3} \left(\frac{d_g}{D} \right)^2$$

Equations à résoudre

$$d_g = d_s + 2 H (C_e - 1)$$

$$\epsilon_g = \frac{8}{3} \left(\frac{d_g}{D} \right)^2$$

$$\sigma_{vg} = \frac{\frac{D}{2} \left(\gamma - \frac{4c'}{D} \right)}{2K_a \tan \varphi'} \left[1 - e^{-K_a \tan \varphi' \left(\frac{4H}{D} \right)} \right] + p \left[e^{-K_a \tan \varphi' \left(\frac{4H}{D} \right)} \right] + q \left[e^{-K_a \tan \varphi' \left(\frac{4H}{D} \right)} \right]$$

Equations à résoudre

$$d_g = d_s + 2 H (C_e - 1)$$

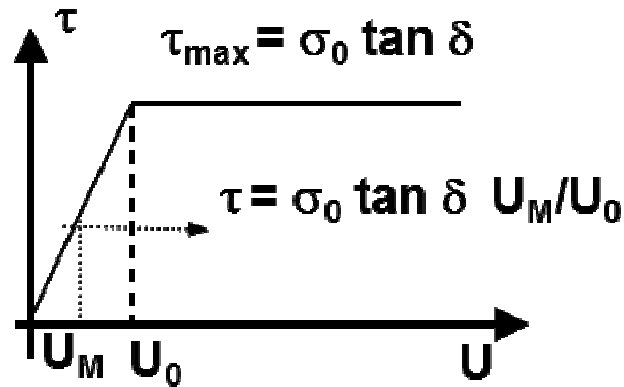
$$\epsilon_g = \frac{8}{3} \left(\frac{d_g}{D} \right)^2$$

$$\sigma_{vg} = \frac{\frac{D}{2} \left(\gamma - \frac{4c'}{D} \right)}{2K_a \tan \varphi'} \left[1 - e^{-K_a \tan \varphi' \left(\frac{4H}{D} \right)} \right] + p \left[e^{-K_a \tan \varphi' \left(\frac{4H}{D} \right)} \right] + q \left[e^{-K_a \tan \varphi' \left(\frac{4H}{D} \right)} \right]$$

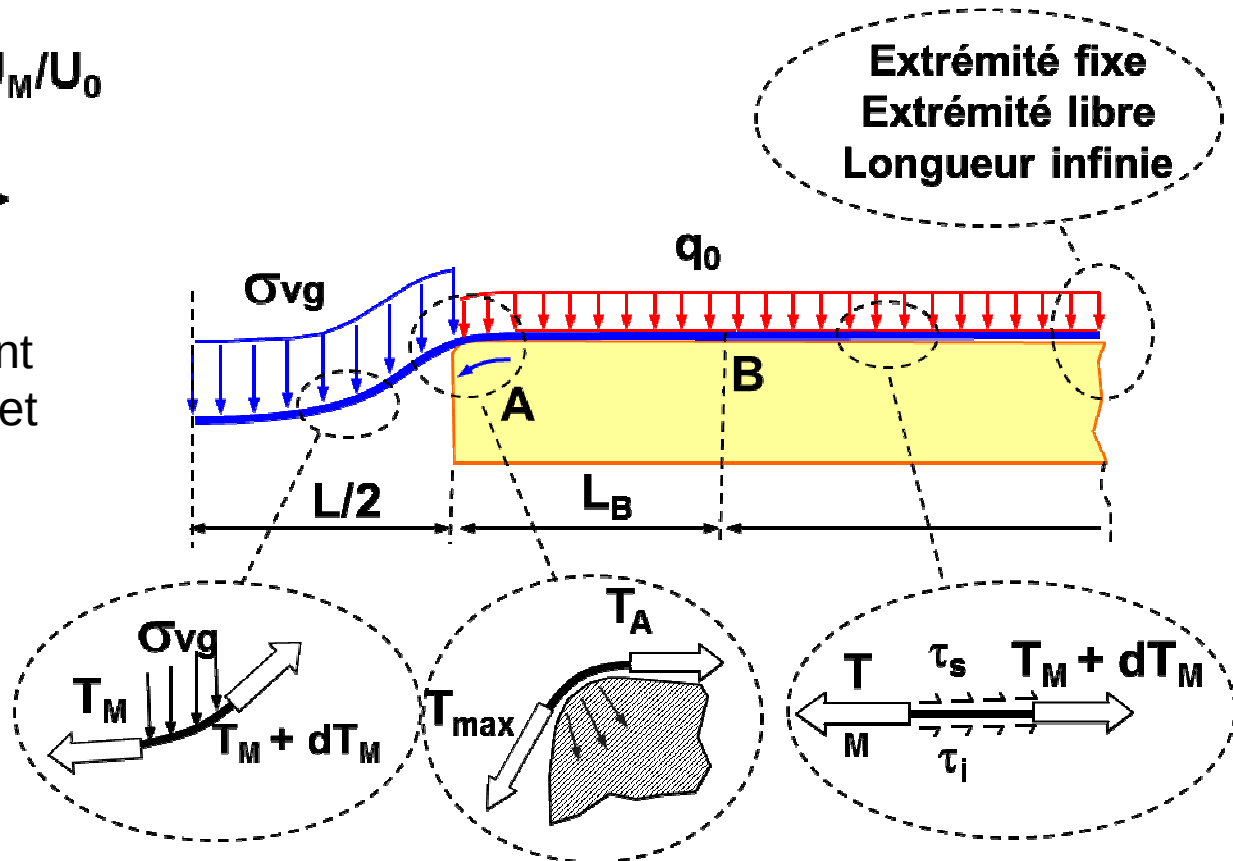
$$T_{\max} = \frac{\sigma_{vg} D}{2} \sqrt{1 + \frac{1}{6 \epsilon_{\max}}} \quad \longrightarrow \quad J = T_{\max} / \epsilon_{\max}$$

Mécanismes complémentaires

(Briançon et Villard, 2006)



Frottement et glissement dans les zones de part et d'autre de la cavité



Équations à résoudre

(Briançon et Villard, 2006)

$$\frac{D}{4\beta} \left(\beta \sqrt{1 + \beta^2} + \text{ArgSh} \beta \right) - \frac{D}{2} = U_A + \sigma_{vg} D^2 \frac{3 + \beta^2}{12\beta J}$$

$$U_A = T_A / Jr \text{ si } U_A \leq U_0 \quad \text{et} \quad U_A = U_0 + (T_A^2 - T_B^2) / 2J \tau_0 \text{ si } U_A > U_0$$

$$\text{avec} \quad r = \sqrt{q_0 (\tan \delta_i + \tan \delta_s) / (JU_0)}$$

Équations à résoudre

(Briançon et Villard, 2006)

$$\frac{D}{4\beta} \left(\beta \sqrt{1 + \beta^2} + \text{ArgSh } \beta \right) - \frac{D}{2} = U_A + \sigma_{vg} D^2 \frac{3 + \beta^2}{12\beta J}$$

$$U_A = T_A / Jr \text{ si } U_A \leq U_0 \quad \text{et} \quad U_A = U_0 + (T_A^2 - T_B^2) / 2J \tau_0 \text{ si } U_A > U_0$$

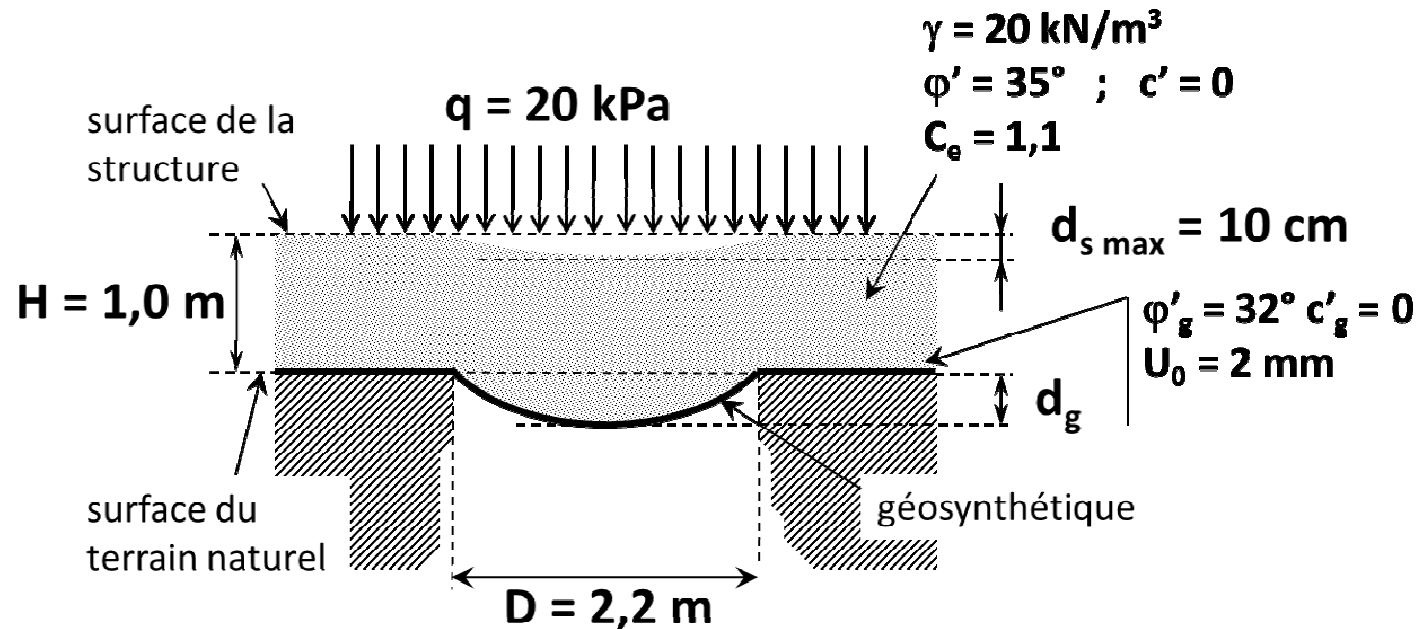
$$\text{avec} \quad r = \sqrt{q_0 (\tan \delta_i + \tan \delta_s) / (JU_0)}$$

$$T_A = \left[\sigma_{vg} D \frac{\sqrt{1 + \beta^2}}{2\beta} \right] / \left[e^{\alpha A \tan \beta \tan \delta_i} \right] \quad \text{et} \quad T_B = U_0 Jr$$

$$\text{avec} \quad \alpha = U_A / U_0 \text{ si } U_A \leq U_0 \quad \text{et} \quad \alpha = 1 \text{ si } U_A > U_0$$

$$\boxed{T_{\max}} = \frac{\sigma_{vg} D}{2\beta} \sqrt{1 + \left(\frac{2\beta x}{D} \right)^2} \quad \text{et} \quad \boxed{d_g} = \beta \frac{D}{4}$$

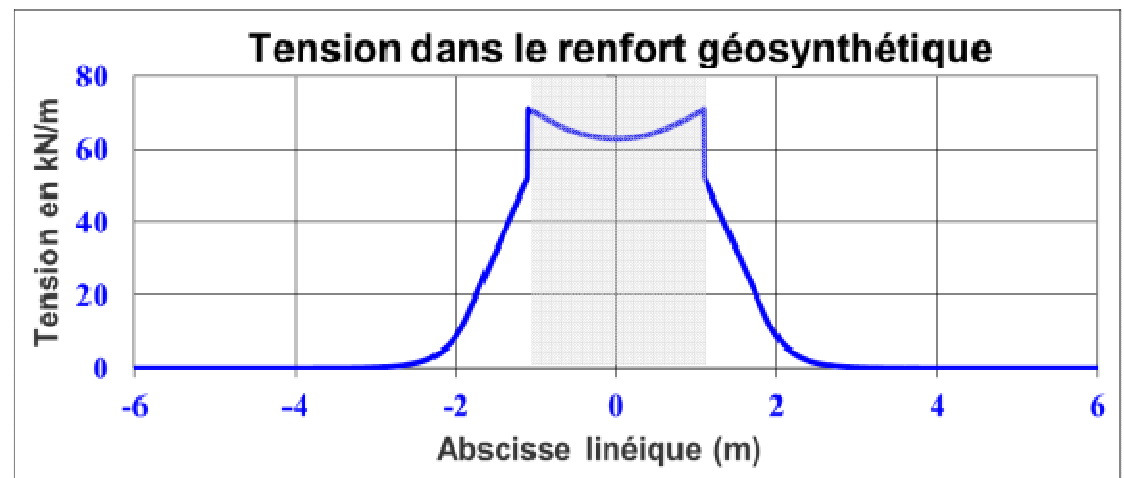
Application : cavité circulaire



Raideur du GSY = 2000 kN/m

Tension du GSY = 71 kN/m

d_g = 30 cm



Application : cavité circulaire

Incidence d'une variation de diamètre de la cavité

	Raideur du GSY (kN/m)	Diamètre de la cavité (m)	Tassement en surface (cm)	Tension du GSY (kN/m)
	2000	1,54	0	51
référence	2000	2,20	10	71
	2000	2,86	23	91

Application : cavité circulaire

Incidence du coefficient de foisonnement (diamètre 2,20 m)

	Raideur du GSY (kN/m)	Coefficient de foisonnement (C _e)	Tassement en surface (cm)	Tension du GSY (kN/m)
	2000	1,00	30	71
	2000	1,03	24	71
	2000	1,05	20	71
référence	2000	1,10	10	71

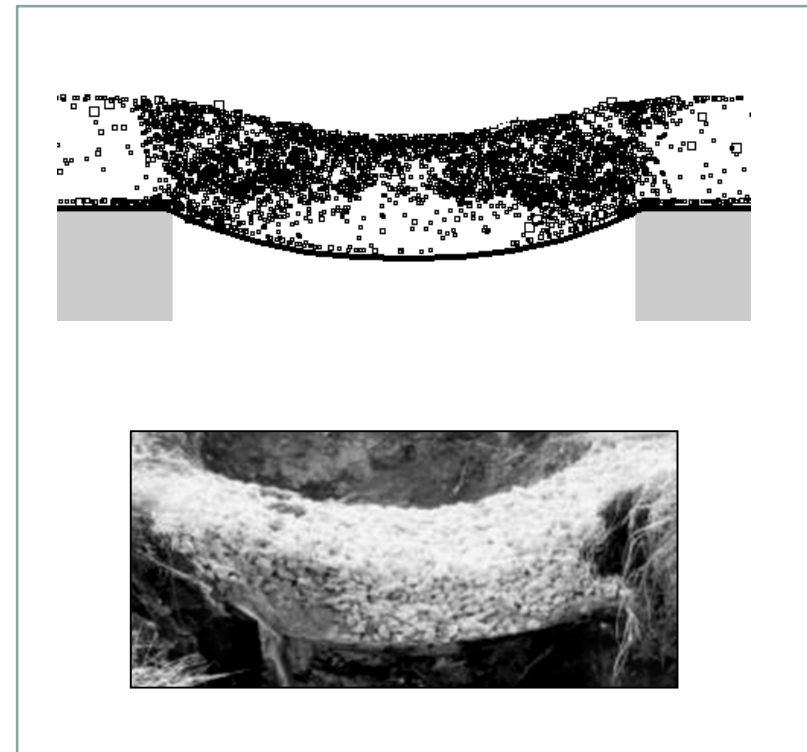
Application : cavité circulaire

Incidence de la mobilisation des frottements en ancrage

	Raideur du GSY (kN/m)	Mobilisation ancrage	Tassement en surface (cm)	Tension du GSY (kN/m)
	2000	$\varphi'_{\text{géo}} = 26^\circ$ $U_0 = 2$ mm	11	69
	2000	$\varphi'_{\text{géo}} = 29^\circ$ $U_0 = 2$ mm	11	70
	2000	$\varphi'_{\text{géo}} = 32^\circ$ $U_0 = 5$ mm	10	71
référence	2000	$\varphi'_{\text{géo}} = 32^\circ$ $U_0 = 2$ mm	10	71
	2000	$\varphi'_{\text{géo}} = 34^\circ$ $U_0 = 2$ mm	10	72
	1450	sans glissement	10	71
	2000	sans glissement	6,7	78

Points particuliers

- Foisonnement
- Répartition de charge sur la nappe
- Structures « bi-couches »
- Cavité circulaire
- Longueur d'ancrage
- Recouvrement longitudinal
- Recouvrement transversal
- Rechargement

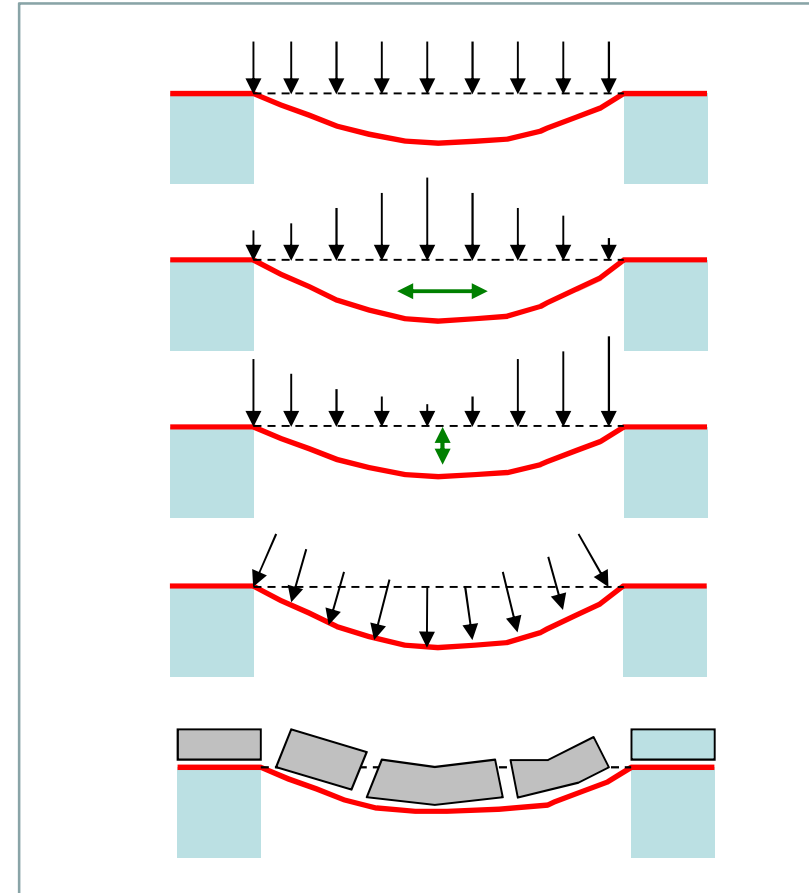


Détermination du coefficient de foisonnement?

Uniformité du coefficient de foisonnement?

Points particuliers

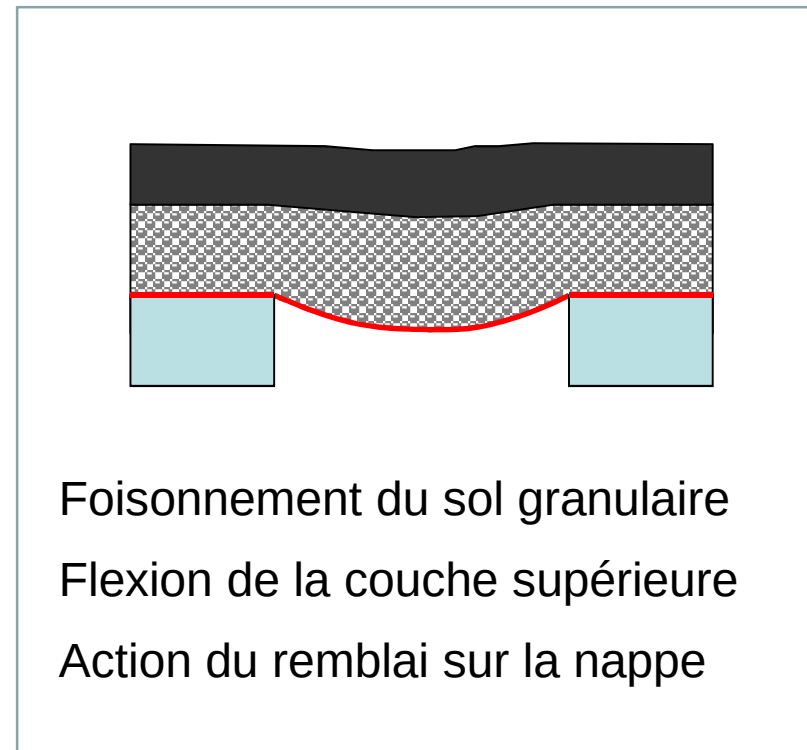
- Foisonnement
- Répartition de charge sur la nappe
- Structures « bi-couches »
- Cavité circulaire
- Longueur d'ancrage
- Recouvrement longitudinal
- Recouvrement transversal
- Rechargement



Géométrie de la distribution des charges
sur la nappe ?

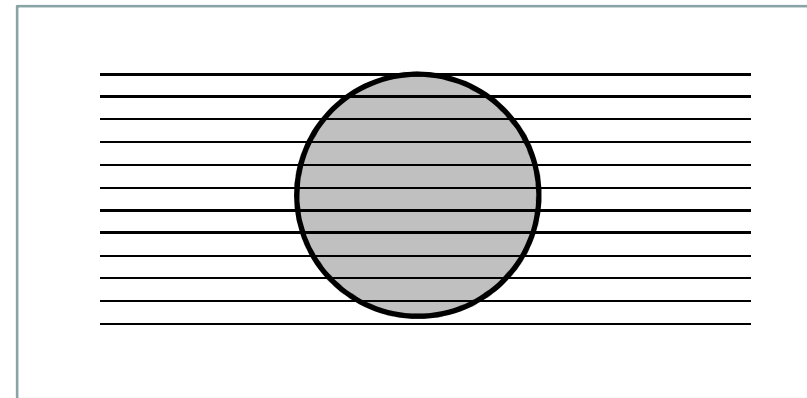
Points particuliers

- Foisonnement
- Répartition de charge sur la nappe
- Structures « bi-couches »
- Cavité circulaire
- Longueur d'ancrage
- Recouvrement longitudinal
- Recouvrement transversal
- Rechargement



Points particuliers

- Foisonnement
- Répartition de charge sur la nappe
- Structures « bi-couches »
- Cavité circulaire
- Longueur d'ancrage
- Recouvrement longitudinal
- Recouvrement transversal
- Rechargement



Cavité circulaire :

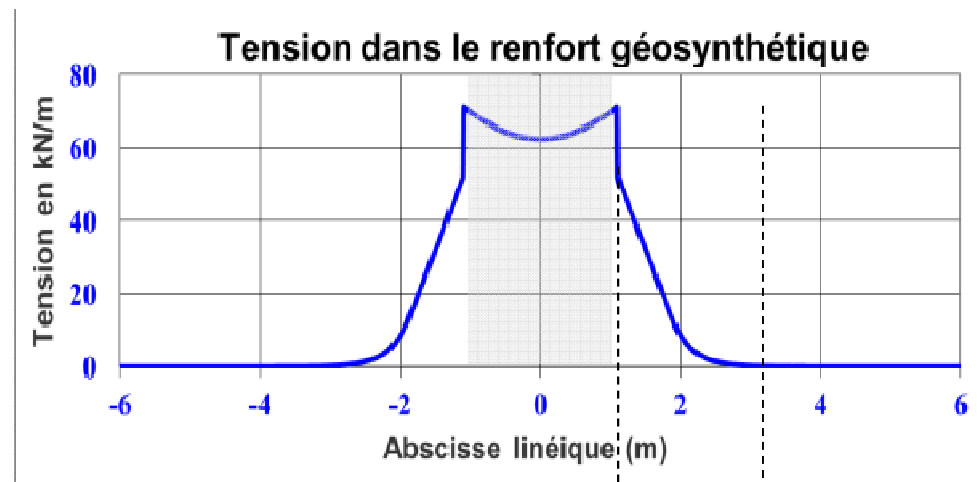
Une seule direction de renforcement requise

Ancrage dans une seule direction possible

Une nappe de raideur J équivalente à deux nappes de raideur $J/2$ croisées

Points particuliers

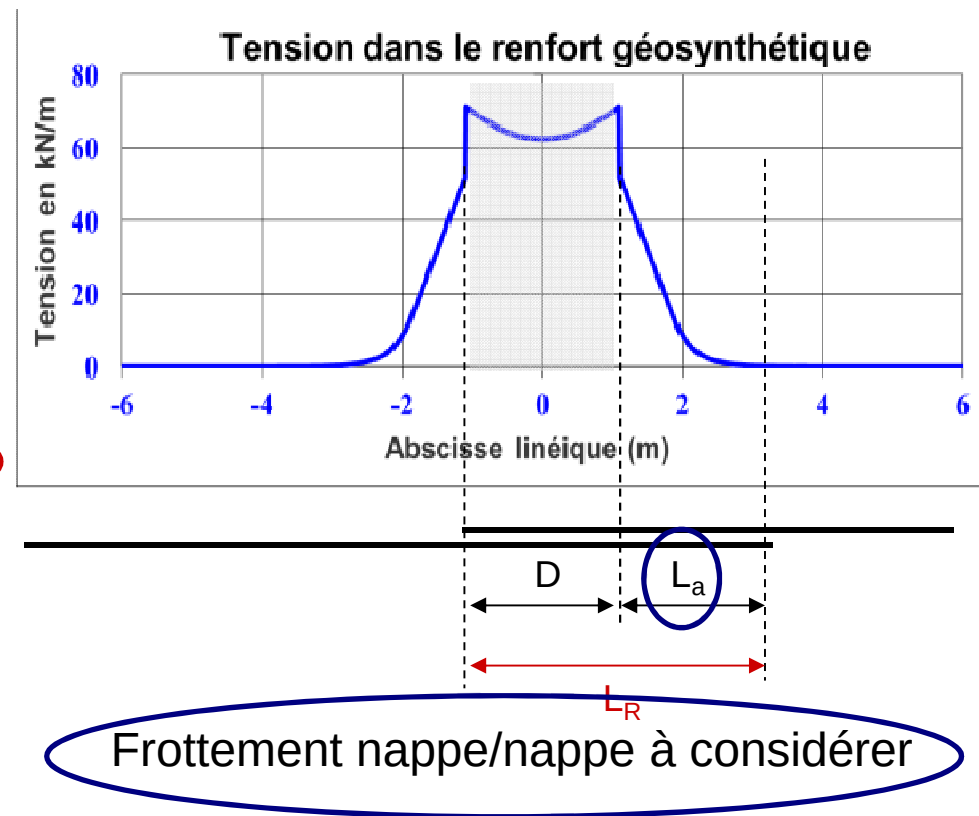
- Foisonnement
- Répartition de charge sur la nappe
- Structures « bi-couches »
- Cavité circulaire
- Longueur d'ancrage
- Recouvrement longitudinal
- Recouvrement transversal
- Rechargement



Longueur de nappe nécessaire pour équilibrer par frottement les tensions en bord de cavité

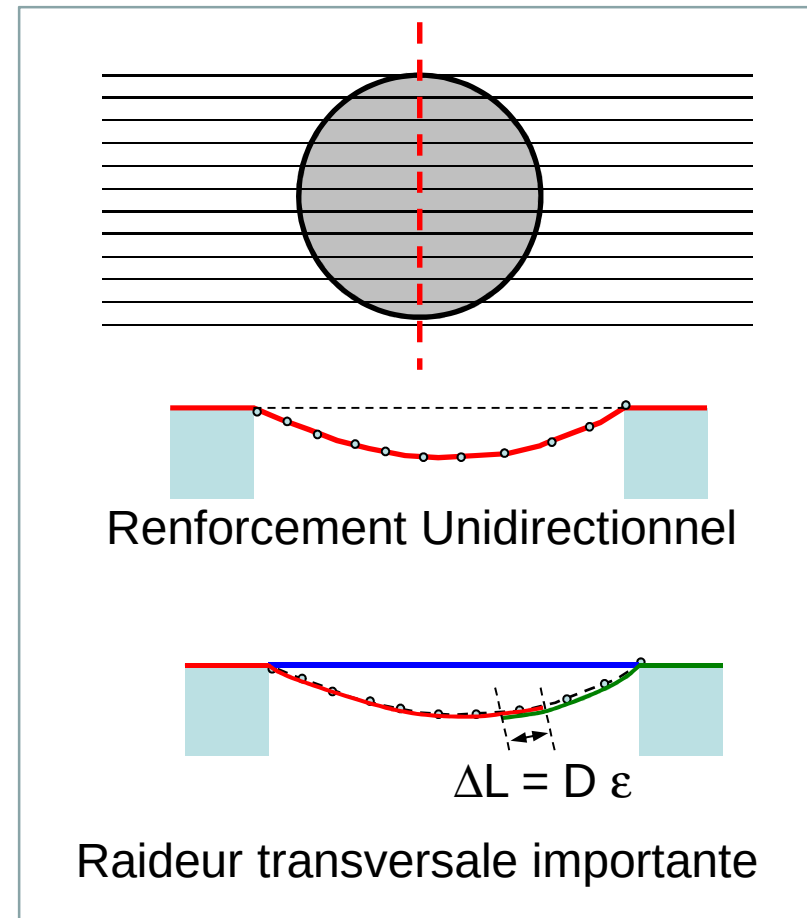
Points particuliers

- Foisonnement
- Répartition de charge sur la nappe
- Structures « bi-couches »
- Cavité circulaire
- Longueur d'ancrage
- Recouvrement longitudinal
- Recouvrement transversal
- Rechargement



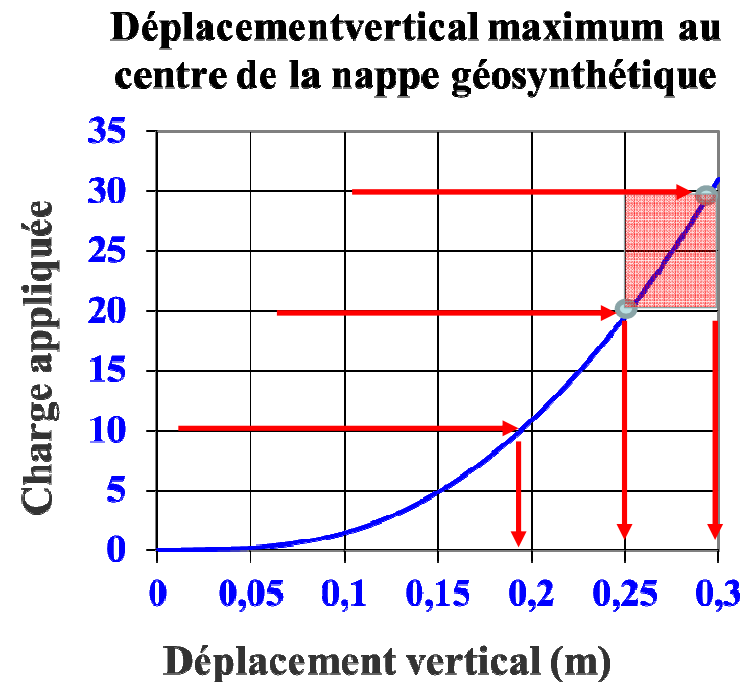
Points particuliers

- Foisonnement
- Répartition de charge sur la nappe
- Structures « bi-couches »
- Cavité circulaire
- Longueur d'ancrage
- Recouvrement longitudinal
- **Recouvrement transversal**
- Rechargement



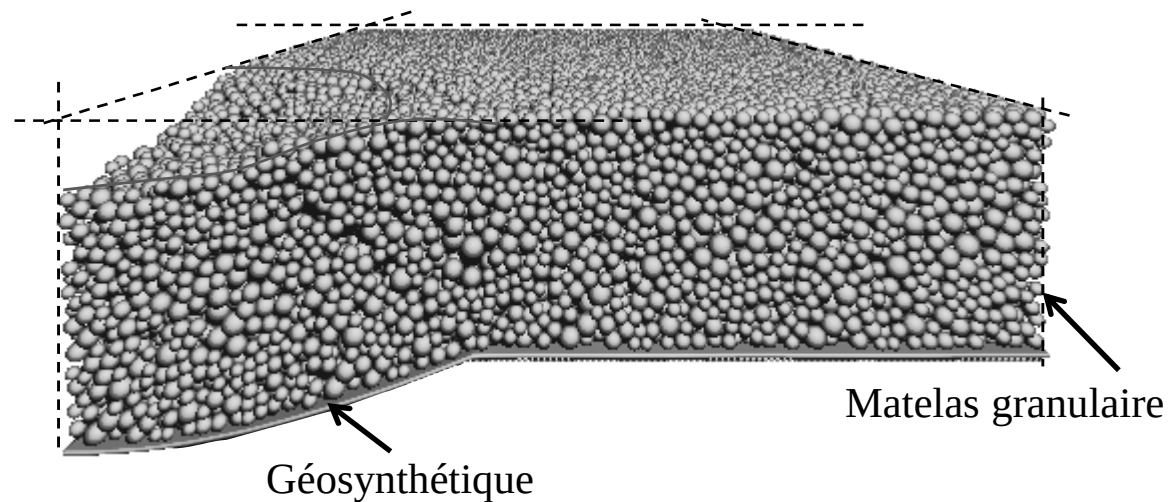
Points particuliers

- Foisonnement
- Répartition de charge sur la nappe
- Structures « bi-couches »
- Cavité circulaire
- Longueur d'ancrage
- Recouvrement longitudinal
- Recouvrement transversal
- Rechargement



Modélisation numérique discrète

- Objectif : Mettre en évidence les mécanismes impliqués lors de l'effondrement

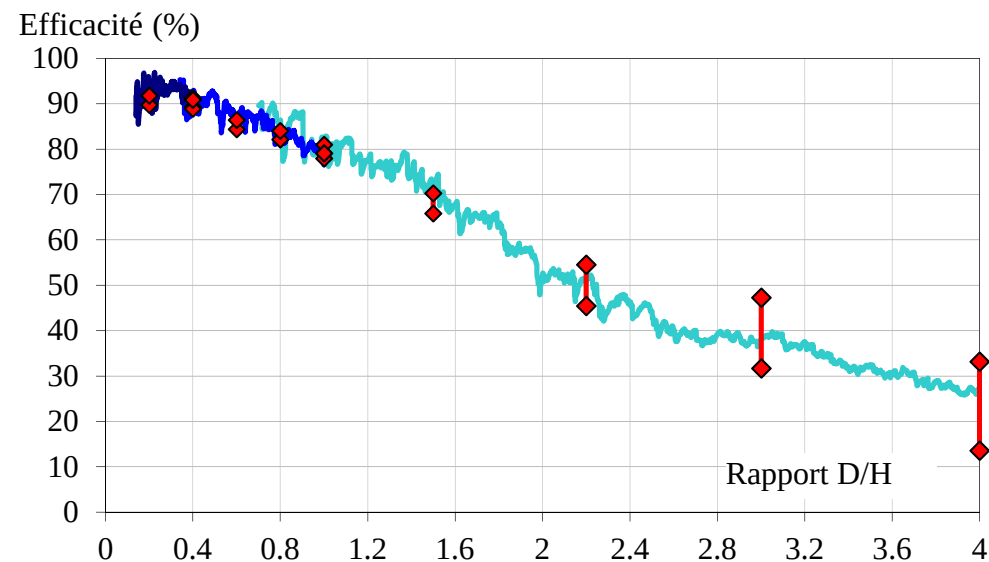


Mécanisme de transfert de charge

- Charge transmise de part et d'autre de la cavité en fonction du mode d'ouverture et du rapport D/H

Affaisssement progressif à un diamètre de cavité donné

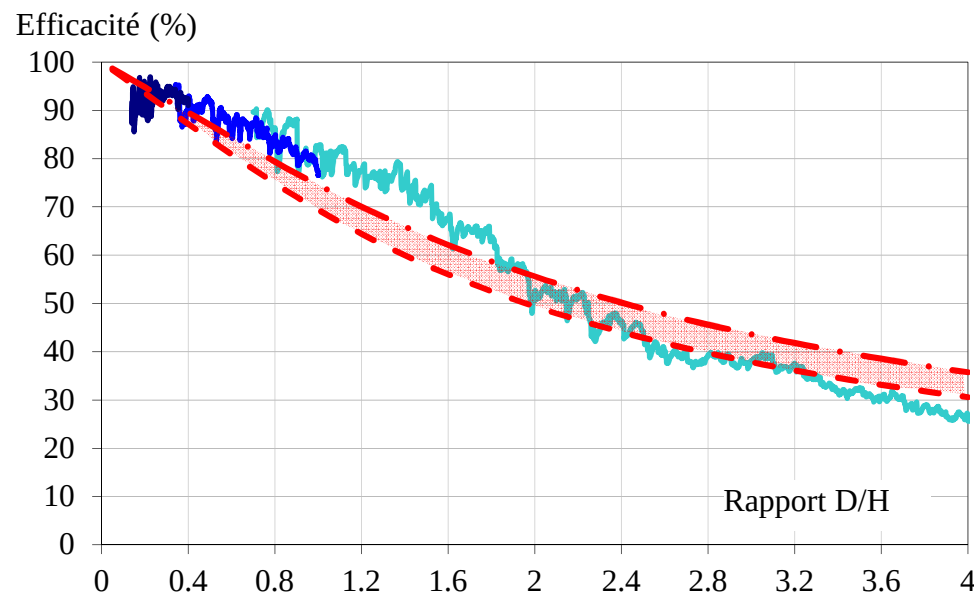
Augmentation progressive du diamètre de la cavité



Efficacité du transfert de charge

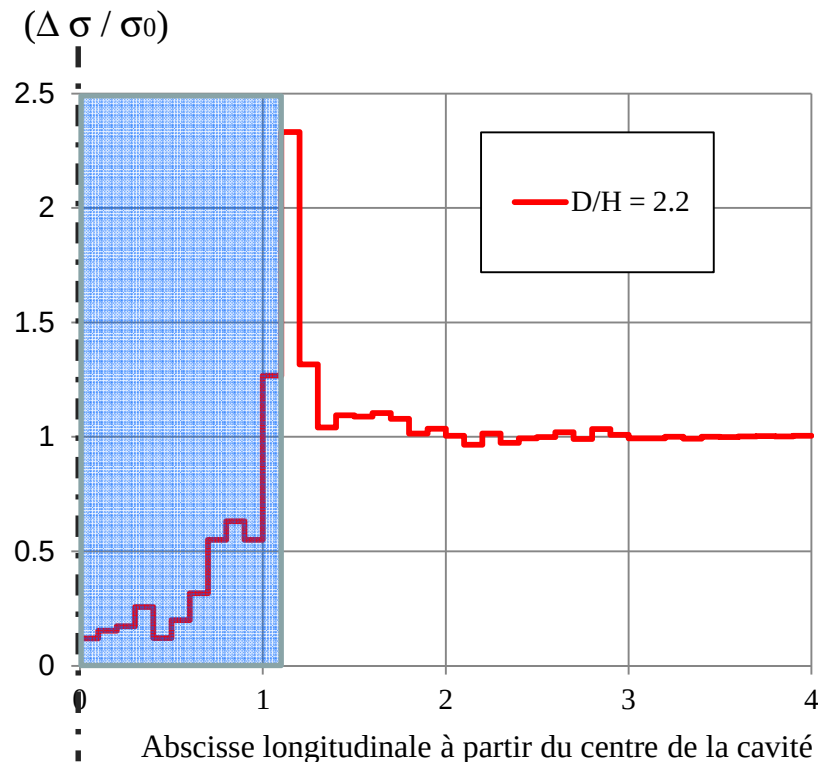
- Comparaison avec la formule usuelle de Terzaghi pour $K_a \Rightarrow K = 1,3$

$$\sigma_{vg} = \frac{\frac{D}{2}(\gamma)}{2K_a \tan \varphi'} \left[1 - e^{-K_a \tan \varphi' \left(\frac{4H}{D} \right)} \right]$$

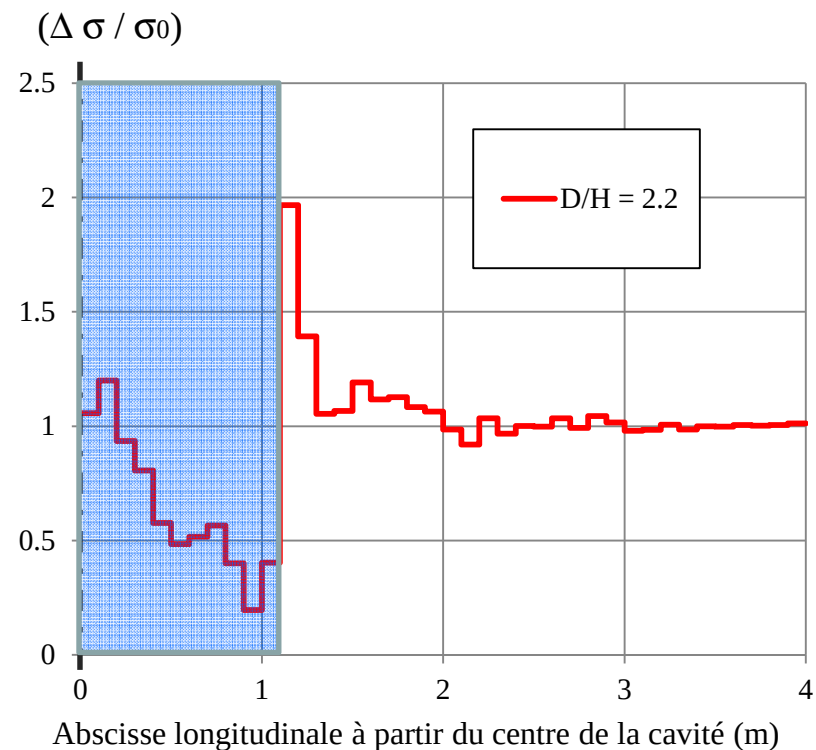


Répartition de la charge au dessus de la cavité

Affaissement progressif à un diamètre de cavité donné



Ouverture progressive du diamètre de la cavité



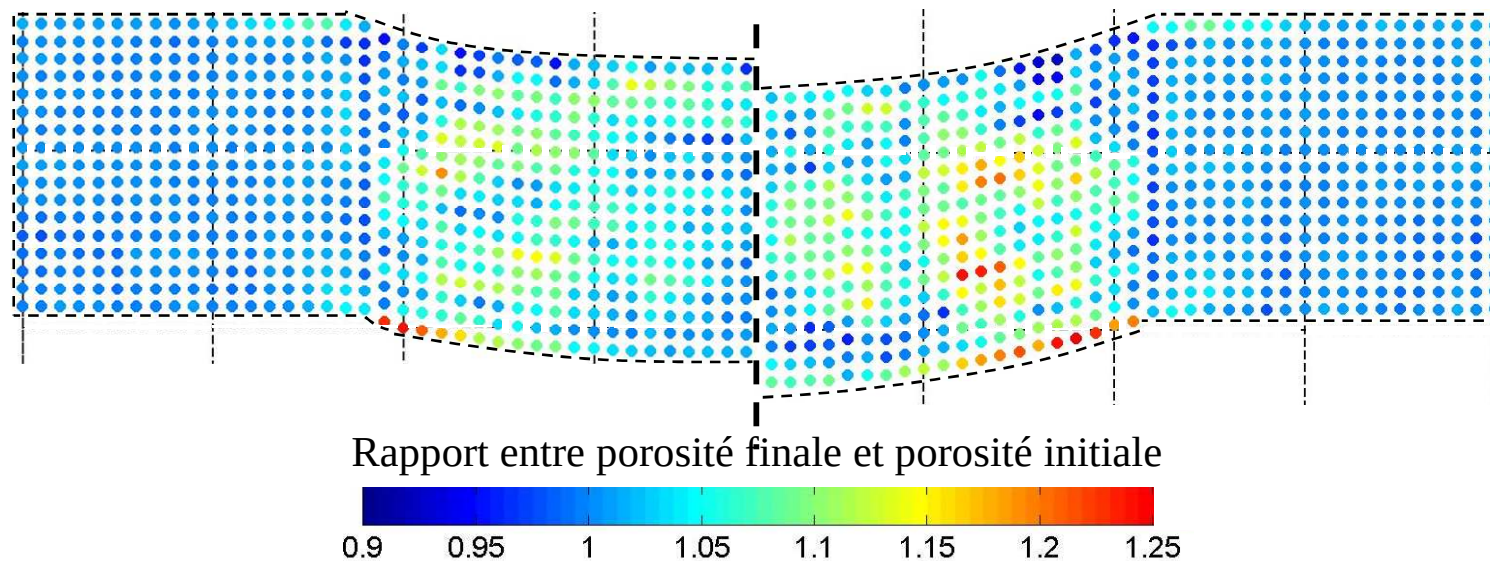
Répartition parabolique inversée

Répartition Tronconique

Foisonnement du matériau granulaire

Affaissement progressif à un
diamètre de cavité donné

Ouverture progressive du
diamètre de la cavité



$$C_e = 1,036$$

$$C_e = 1,048$$

Stratégie de dimensionnement

Comportement du géosynthétique dans le temps

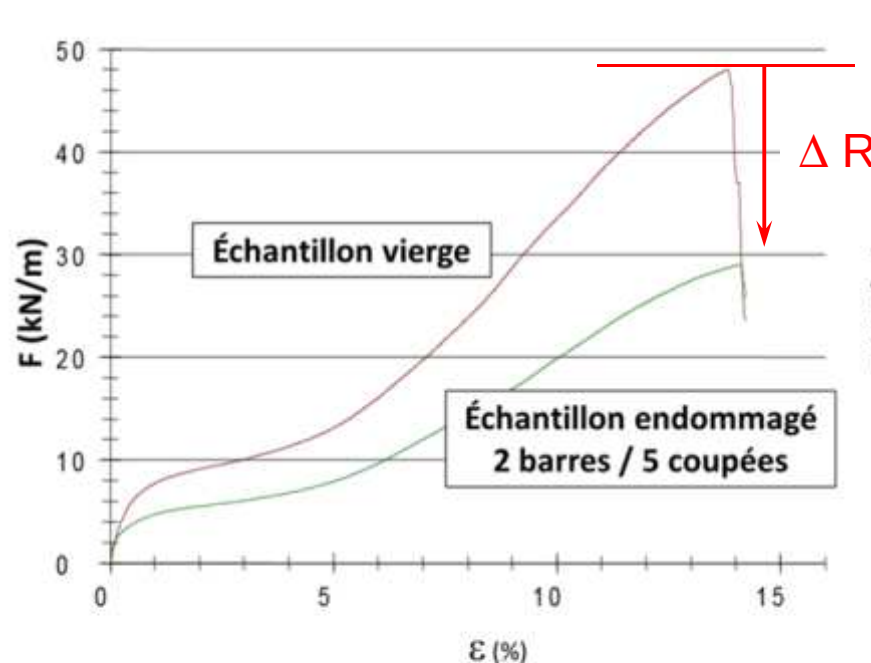
Stratégie de dimensionnement

Comportement du géosynthétique dans le temps

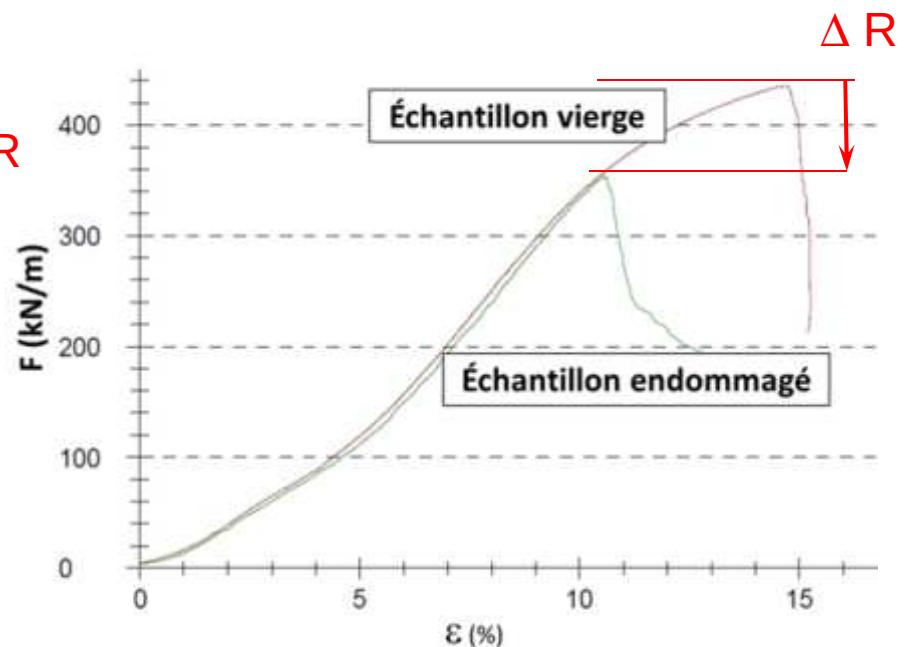
- Endommagement à la mise en oeuvre

(Müllerrochholz, 2003)

Résistance



géosynthétiques subissant
des endommagements externes



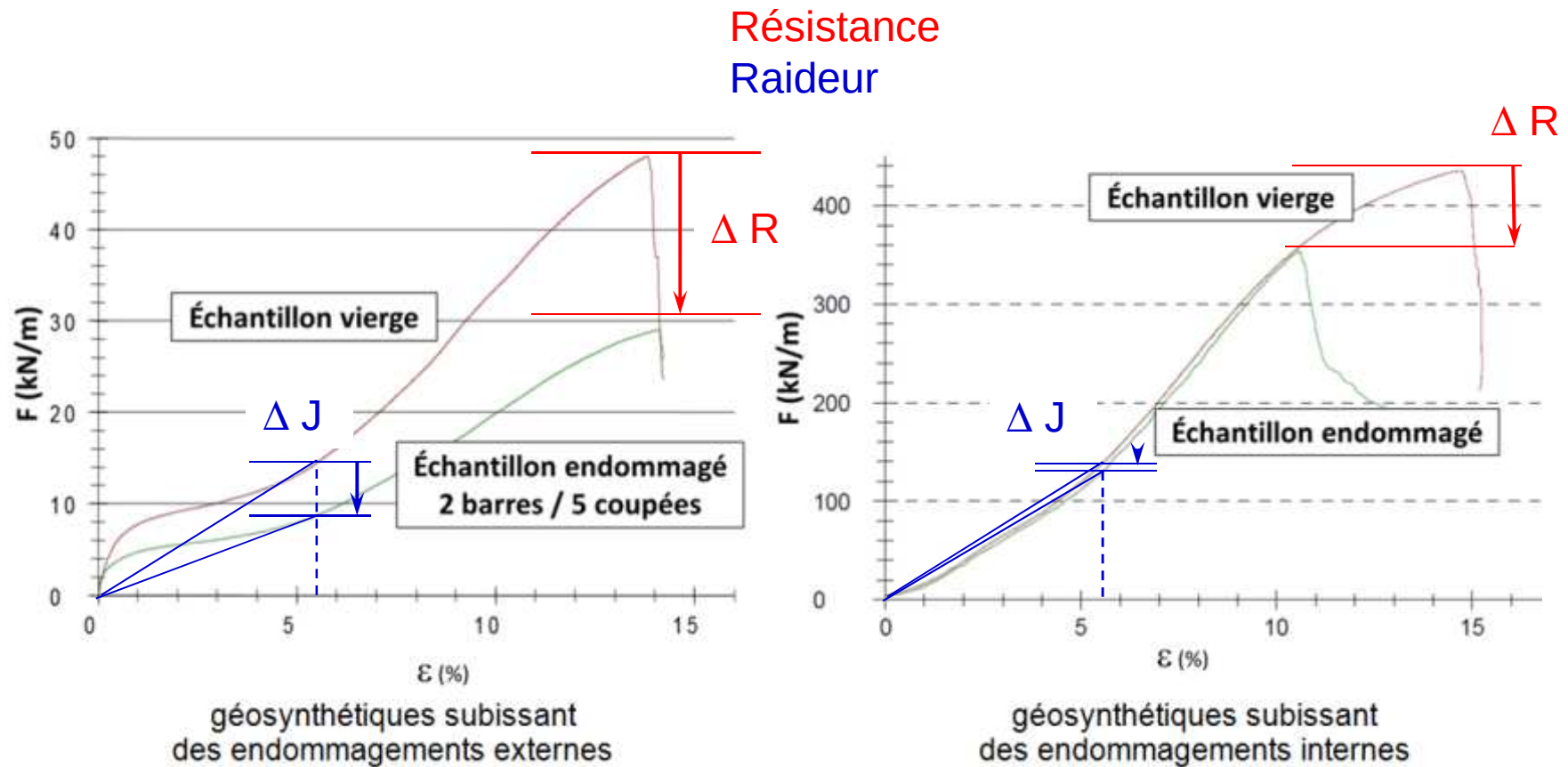
géosynthétiques subissant
des endommagements internes

Stratégie de dimensionnement

Comportement du géosynthétique dans le temps

- Endommagement à la mise en oeuvre

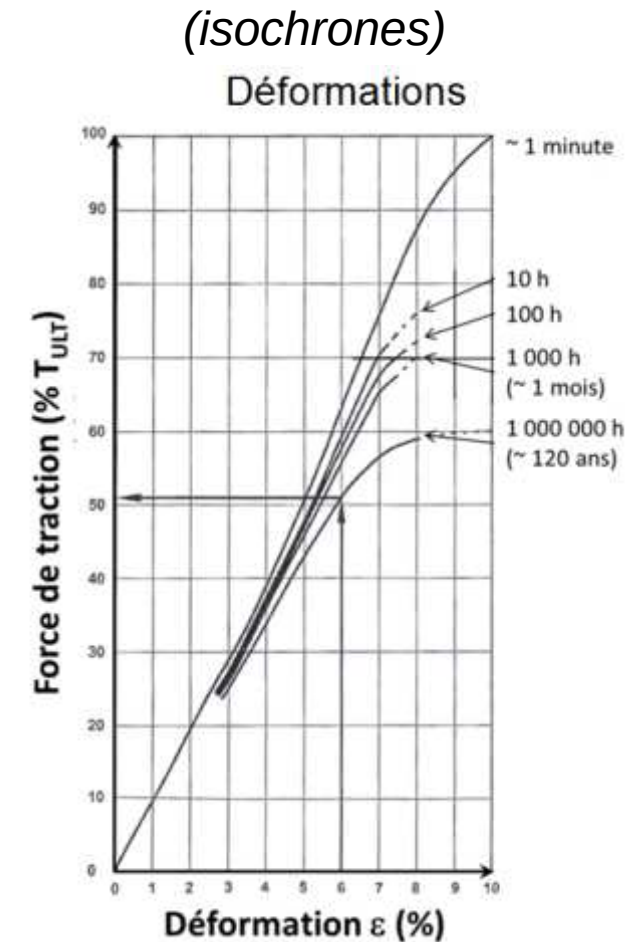
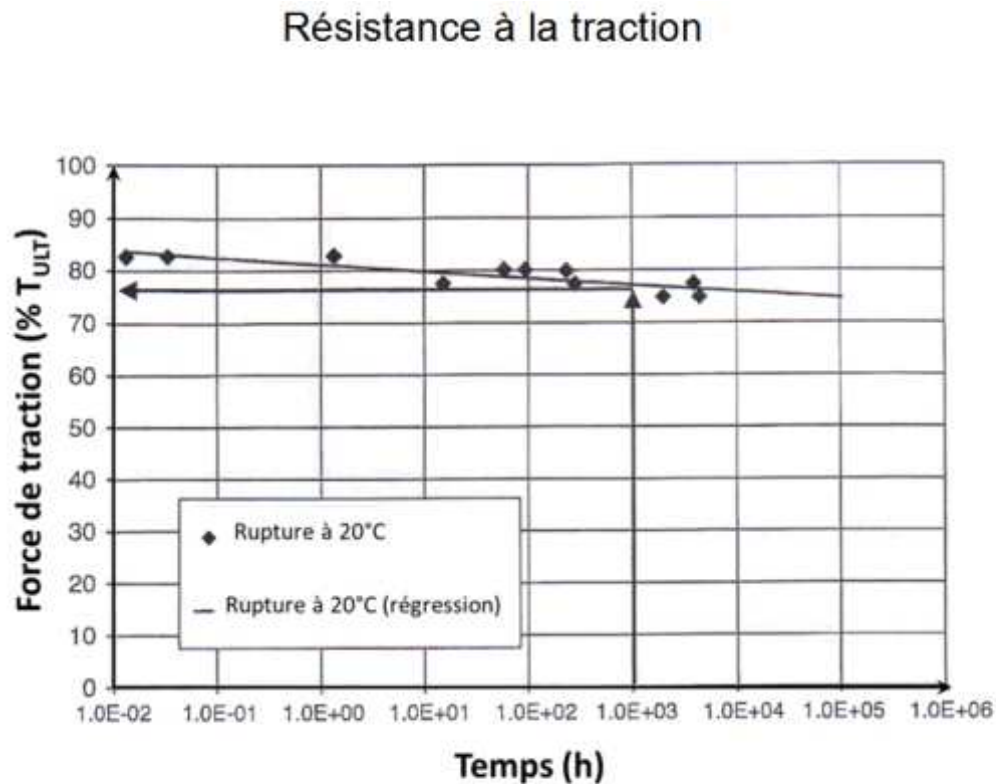
(Müllerrochholz, 2003)



Stratégie de dimensionnement

Comportement du géosynthétique dans le temps

- Fluage



- (Vieillessement)

Stratégie de dimensionnement

états-limites ultimes

- *états-limites d'instabilité par défaillance du renforcement,*
 - résistance à la traction,
 - résistance de l'interaction entre le renforcement et le sol,
- *états-limites d'instabilité par déformation excessive de la structure.*

état-limite de service

particularité cavités / autres ouvrages de renforcement

- vérification tassement de surface :
 - poursuite bon fonctionnement ouvrage même après ouverture cavité.

Stratégie de dimensionnement

Coefficients partiels

ELU Approche 2

		ELU
Combinaison	Symbole	A1 + M1 + R2
Action		A1
permanente défavorable (favorable)	$\gamma_{G\text{Sup}} (\gamma_{G\text{Inf}})$	1,35 (1)
temporaire défavorable (favorable)	$\gamma_{Q\text{Sup}} (\gamma_{Q\text{Inf}})$	1,5 (0)
Paramètres		
Sol		M1
Angle de frottement effectif	$\gamma_{\phi'}$	1
Cohésion effective	$\gamma_{c'}$	1
Cohésion non-drainée	γ_{cu}	1
Poids volumique	γ_{γ}	1
Géosynthétique		R2
Résistance à la traction	$\gamma_{M_{\text{st}}}$	1,25
Interaction		
Résistance au glissement	$\gamma_{R_{\text{st}}}$	1,35

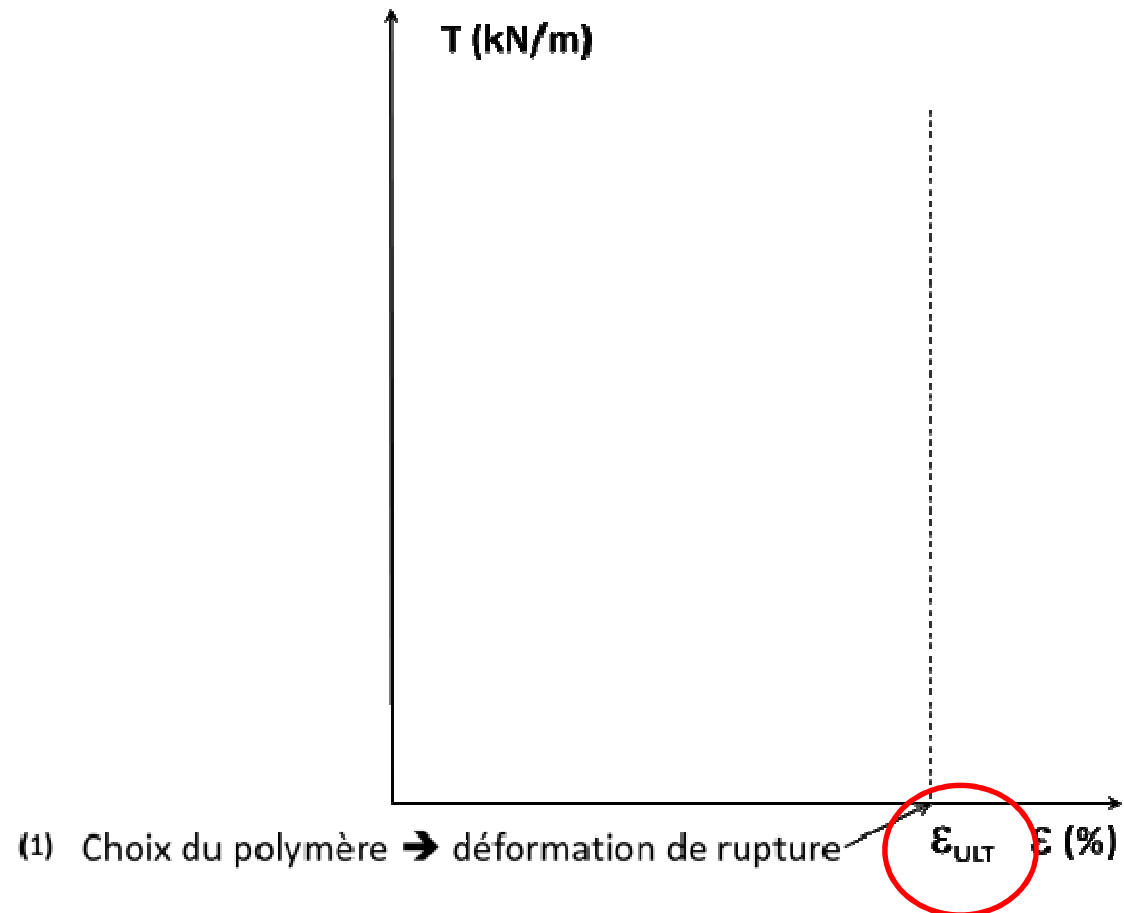
ELS (coefficients 1)

Stratégie de dimensionnement

états-limites ultimes

(1) choix du polymère

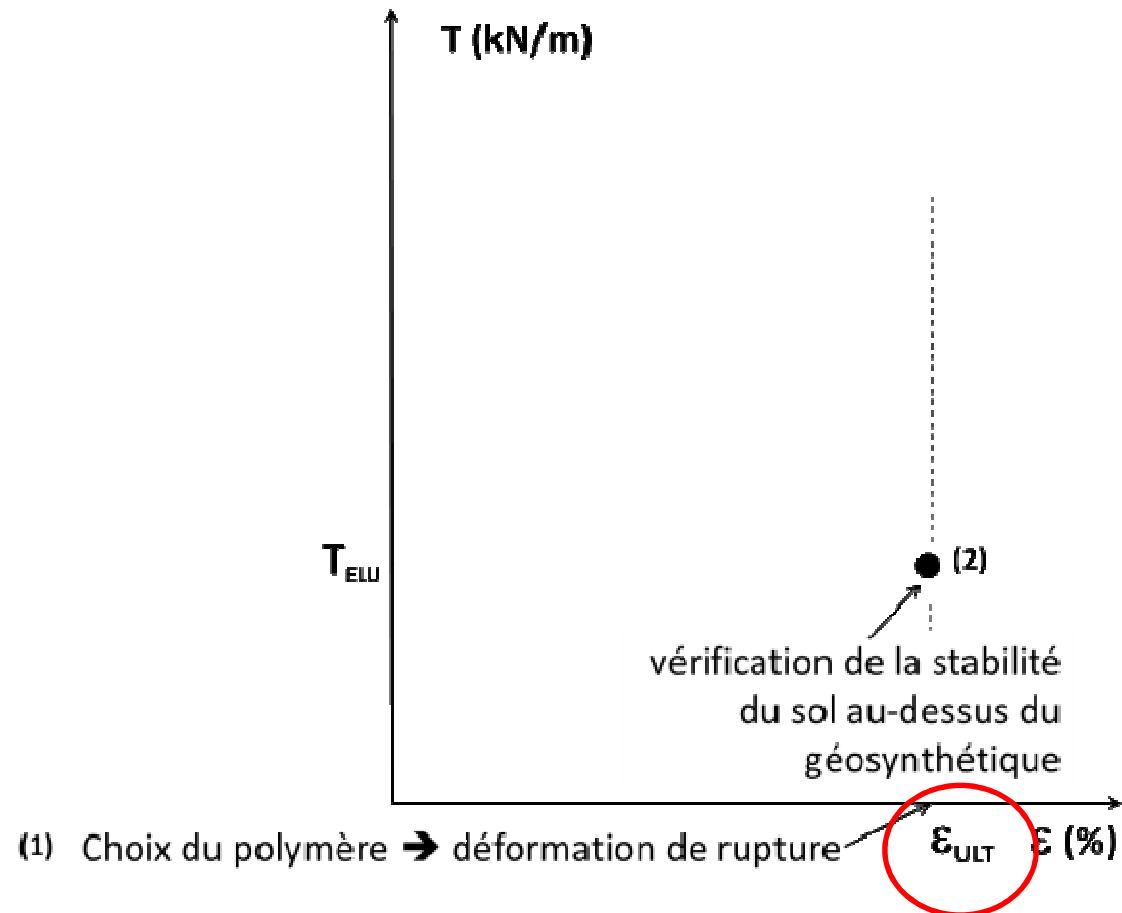
→ *déf. à effort max. (ϵ_{UTL})*



Stratégie de dimensionnement

états-limites ultimes

- (1) choix du polymère
→ *déf. à effort max. (ϵ_{UTL})*
- (2) vérification stabilité



Stratégie de dimensionnement

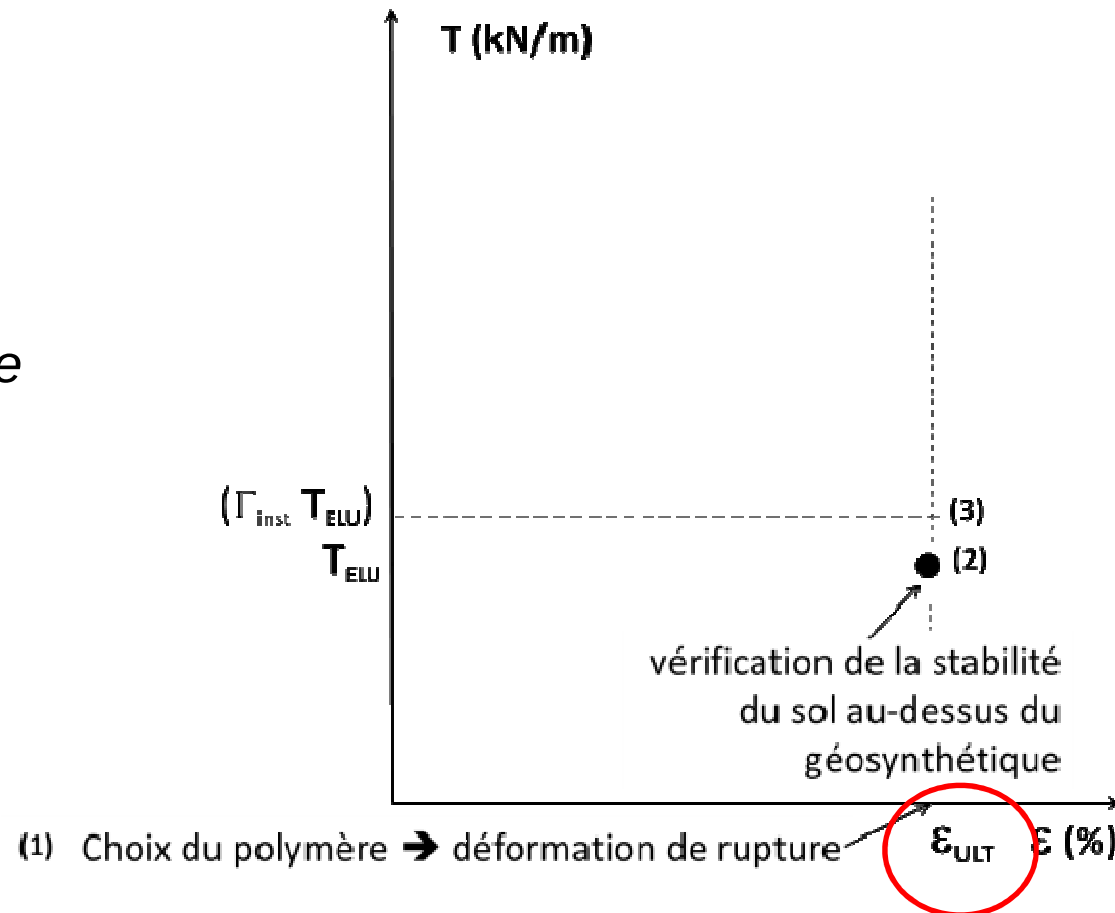
états-limites ultimes

(1) choix du polymère

→ *déf. à effort max. (ϵ_{UTL})*

(2) vérification stabilité

(3) endo. mise en œuvre



Stratégie de dimensionnement

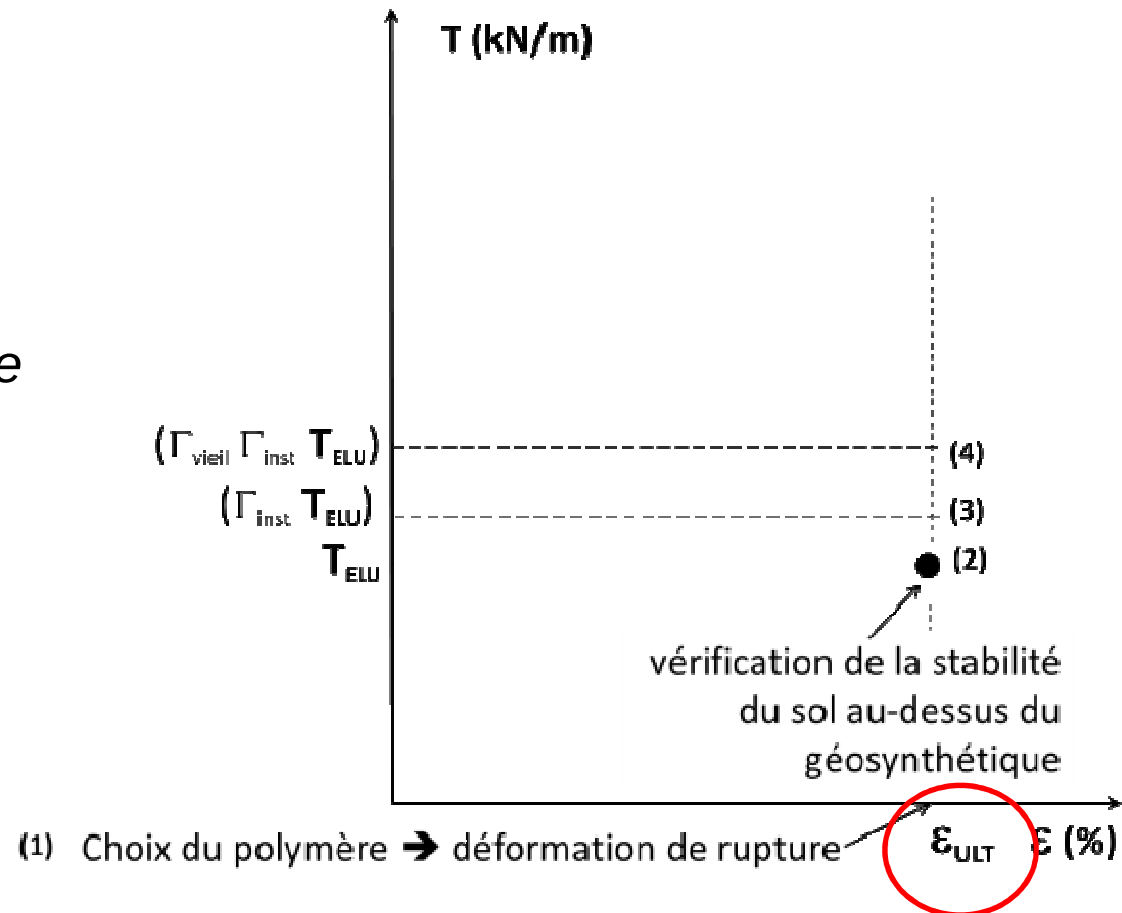
états-limites ultimes

(1) choix du polymère
→ *déf. à effort max. (ϵ_{ULT})*

(2) vérification stabilité

(3) endo. mise en œuvre

(4) vieillissement (t_s)



Stratégie de dimensionnement

états-limites ultimes

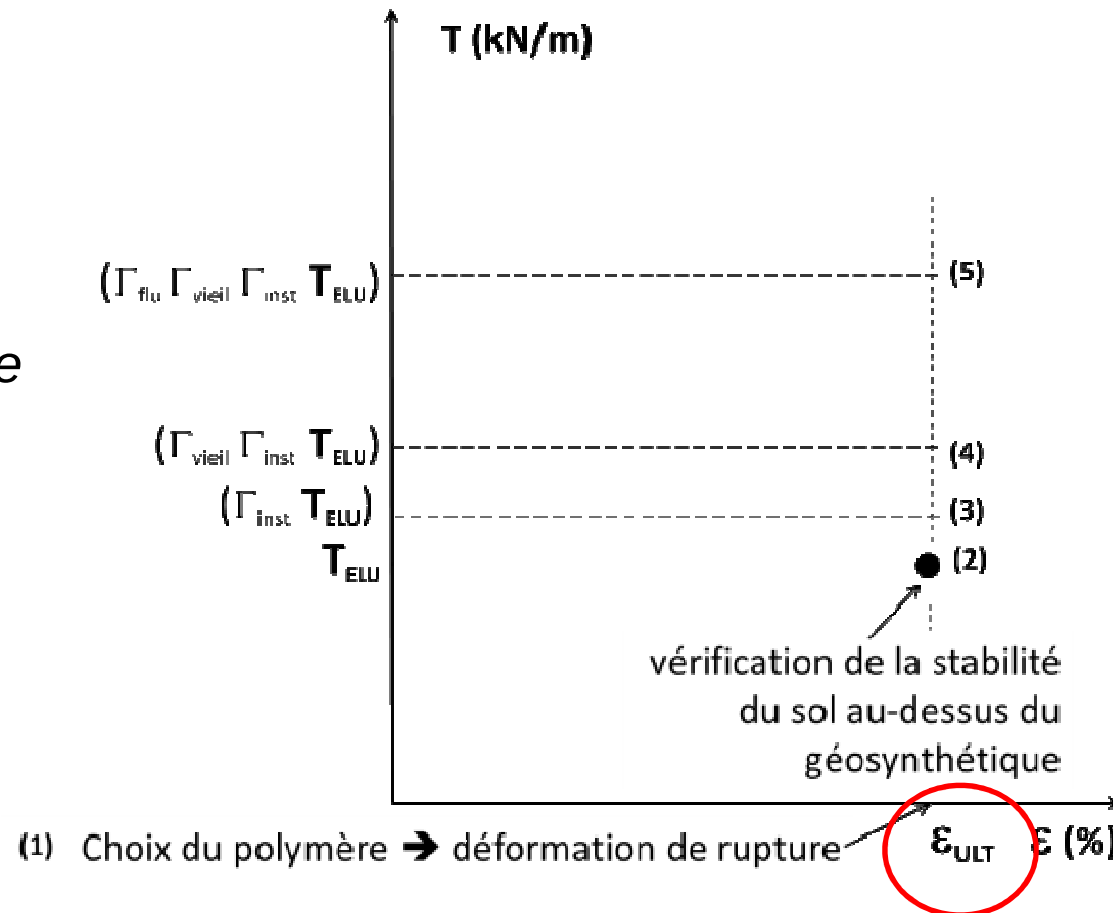
(1) choix du polymère
 → *déf. à effort max. (ϵ_{UTL})*

(2) vérification stabilité

(3) endo. mise en œuvre

(4) vieillissement (t_s)

(5) fluage (t_s)



Stratégie de dimensionnement

états-limites ultimes

(1) choix du polymère

→ *déf. à effort max. (ϵ_{ULT})*

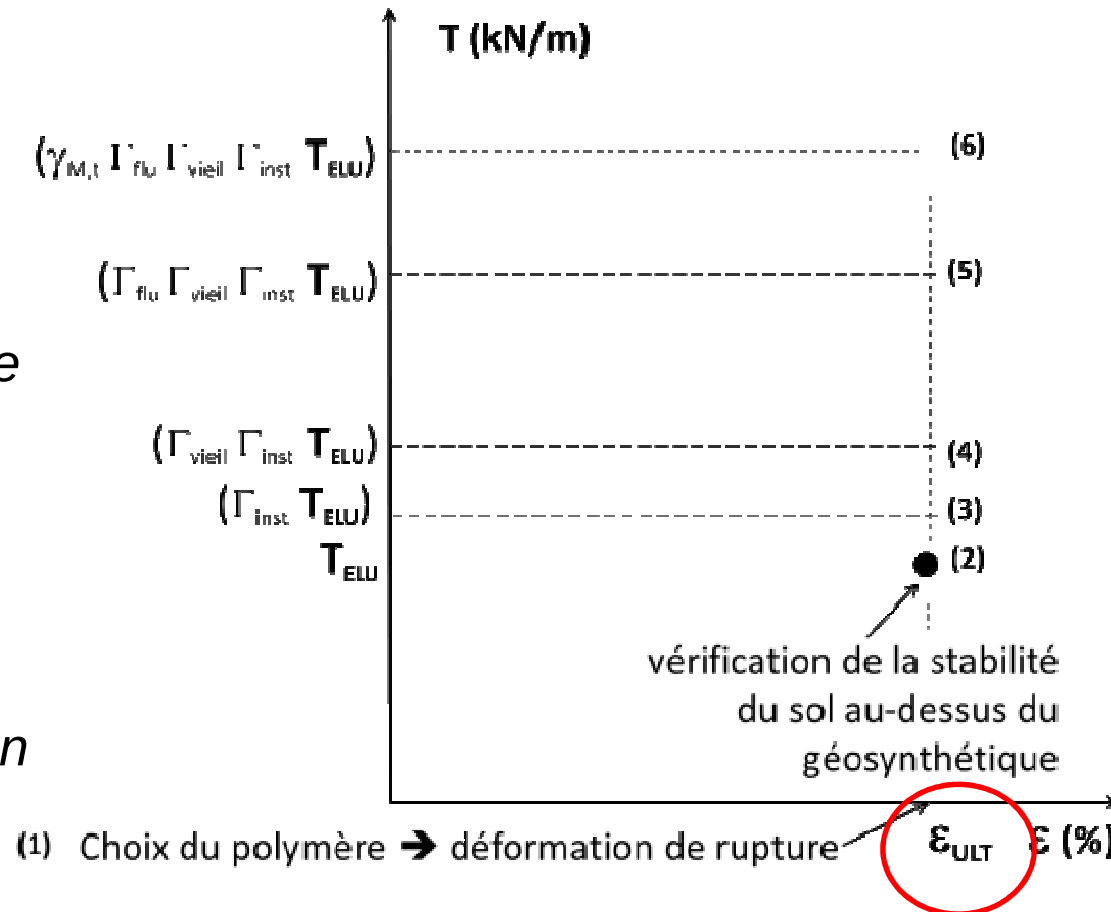
(2) vérification stabilité

(3) endo. mise en œuvre

(4) vieillissement (t_s)

(5) fluage (t_s)

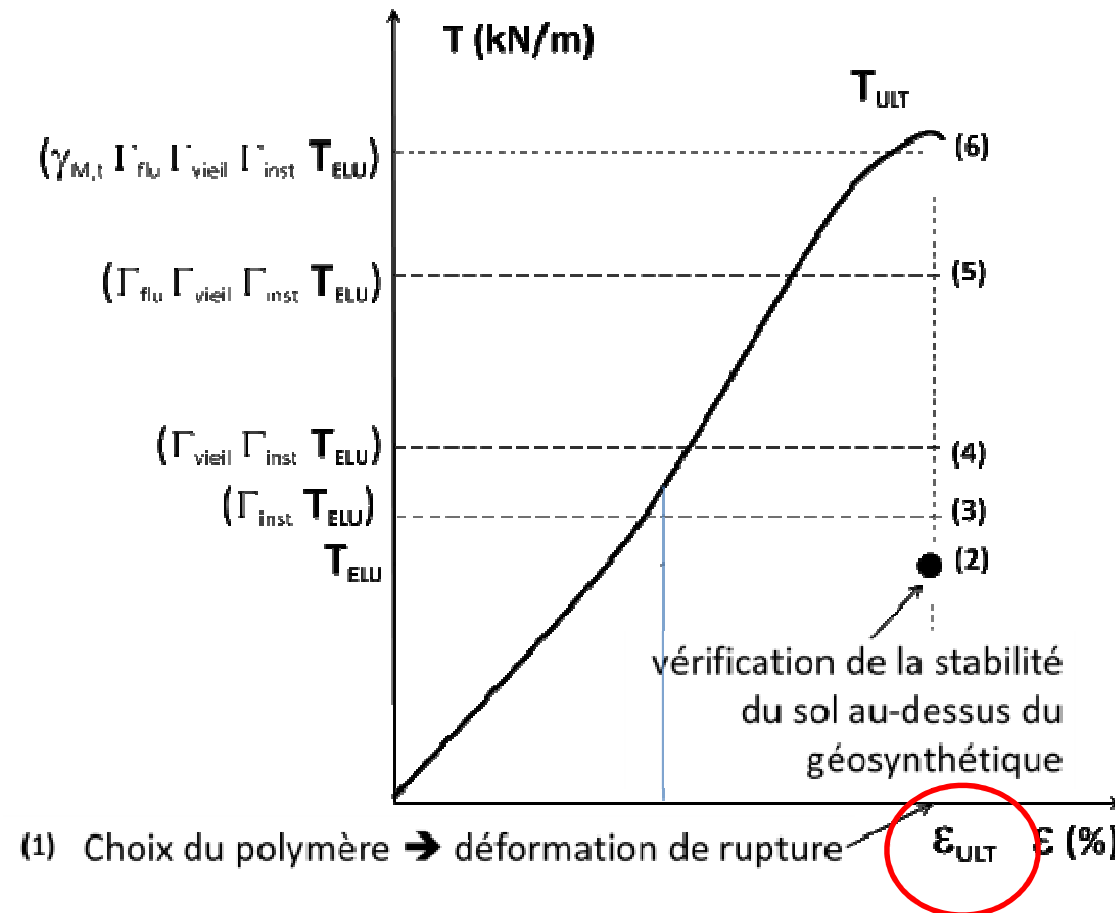
(6) facteur partiel traction



Stratégie de dimensionnement

états-limites ultimes

$$T_{adm} \leq (1/\gamma_{géo}) T_{ULT}$$

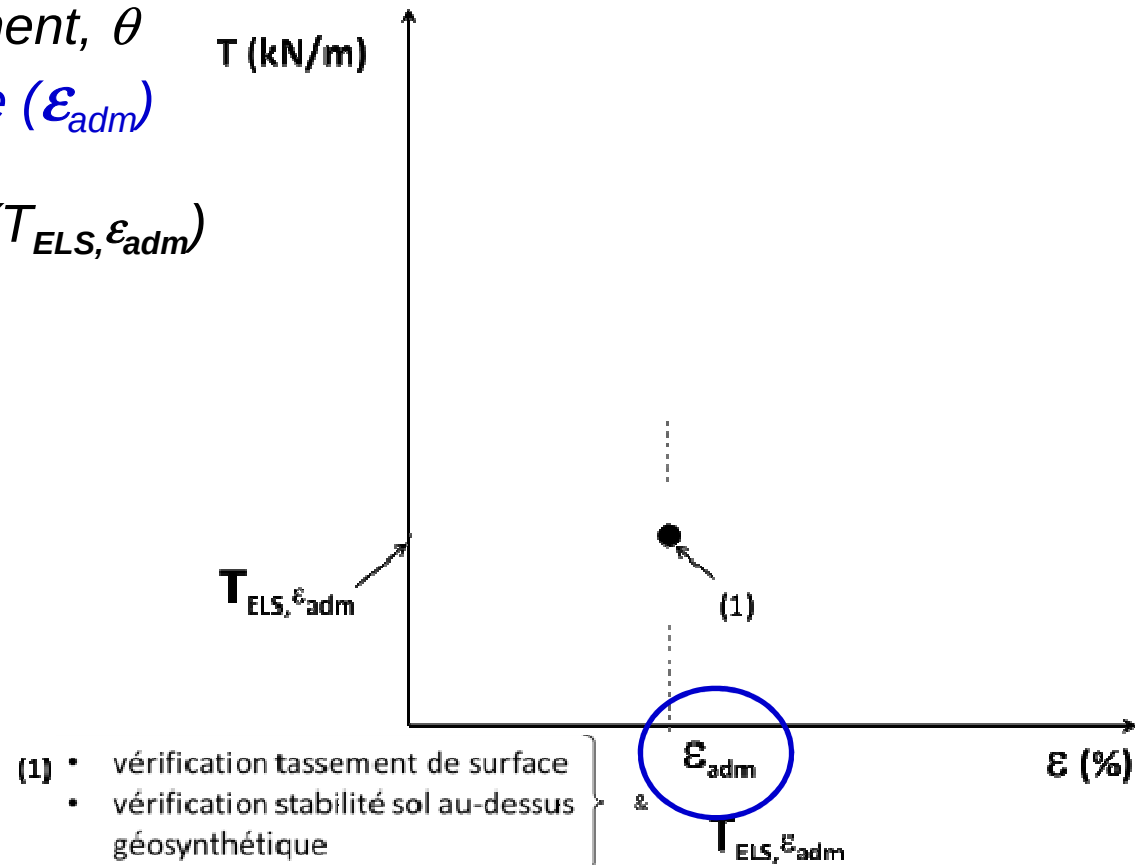


Stratégie de dimensionnement

états-limites de service

(1) tassement, foisonnement, θ
→ *déformation admissible* (ϵ_{adm})

(1) vérification stabilité ($T_{ELS, \epsilon_{adm}}$)



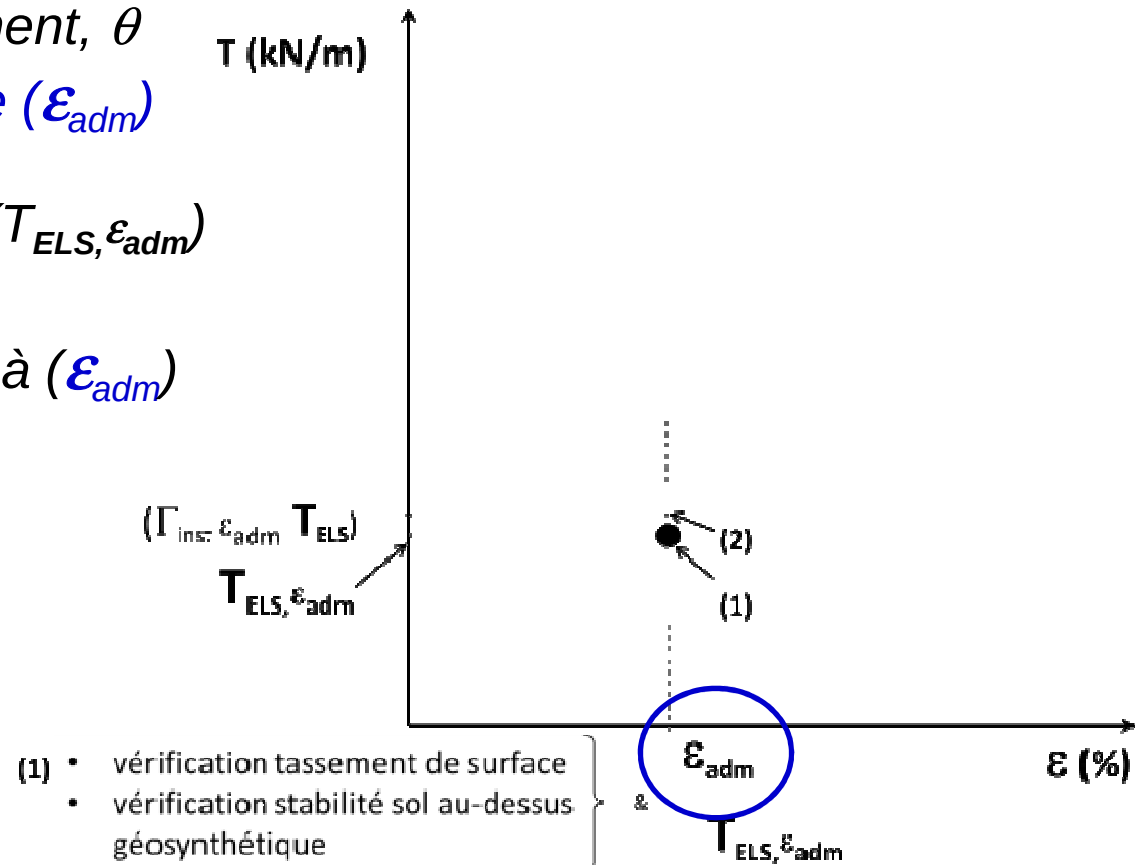
Stratégie de dimensionnement

états-limites de service

(1) tassement, foisonnement, θ
→ *déformation admissible* (ϵ_{adm})

(1) vérification stabilité ($T_{ELS, \epsilon_{adm}}$)

(2) endo. mise en œuvre à (ϵ_{adm})



Stratégie de dimensionnement

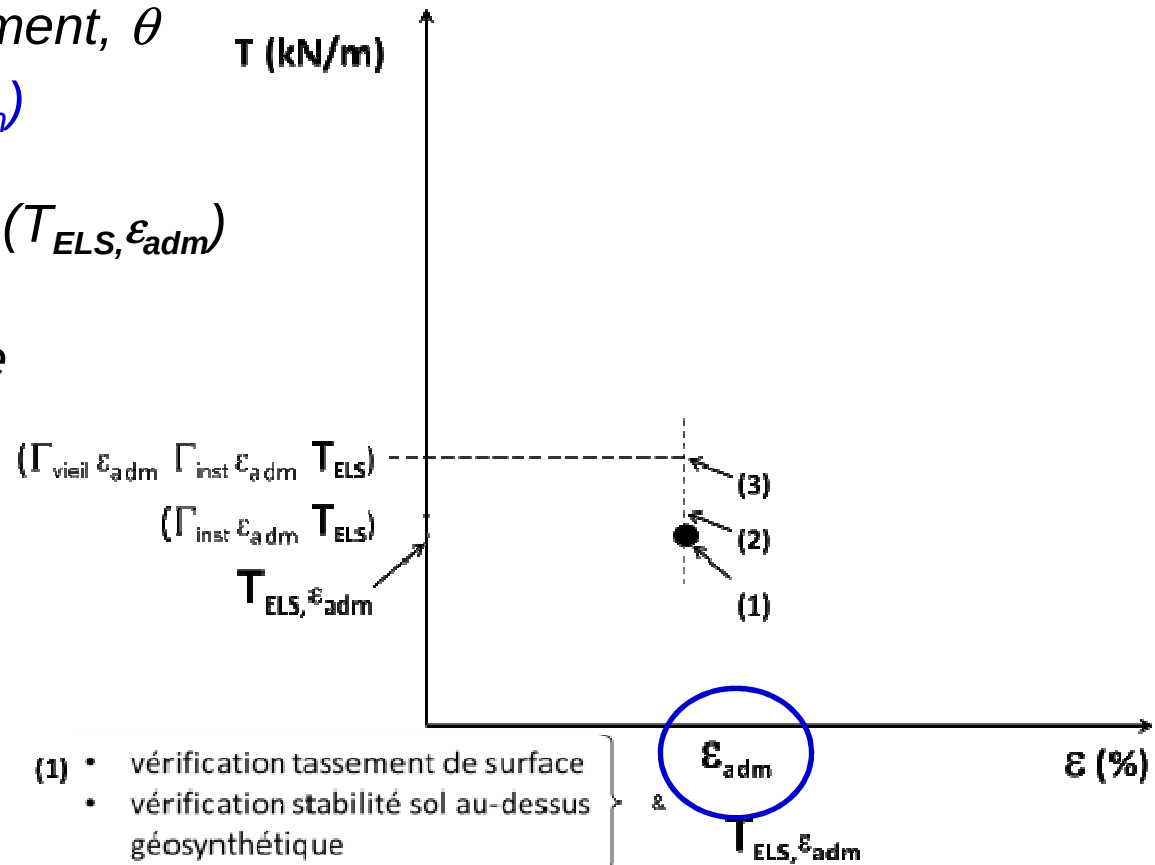
états-limites de service

(1) tassement, foisonnement, θ
 → déf. à effort max. (ϵ_{adm})

(1) vérification stabilité ($T_{ELS, \epsilon_{adm}}$)

(2) endo. mise en œuvre

(3) vieillissement (t_s)
 à (ϵ_{adm})



Stratégie de dimensionnement

états-limites de service

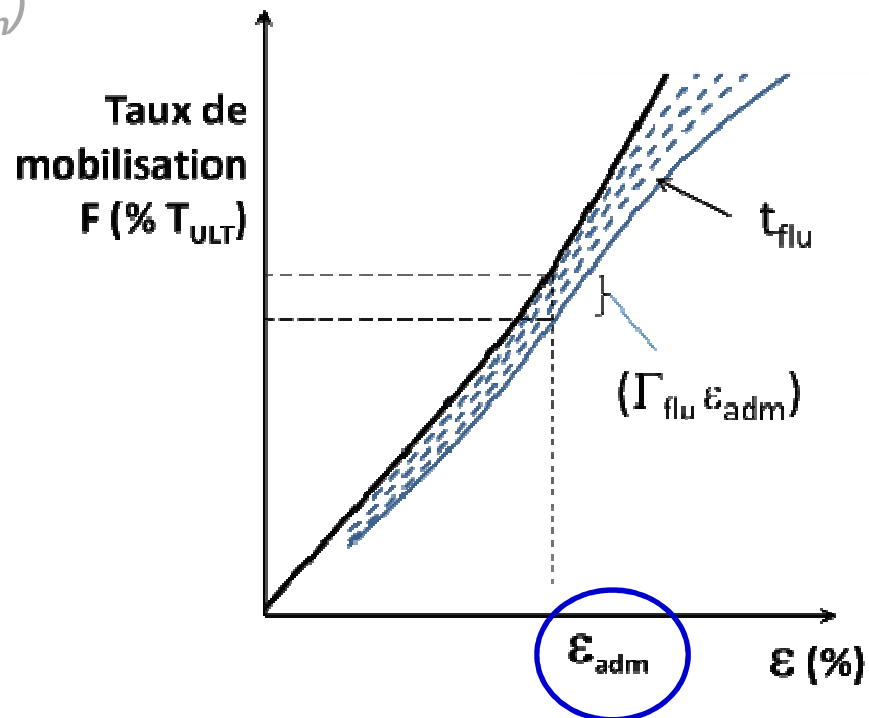
(1) *tassement, foisonnement, θ*
→ *déformation admissible (ϵ_{adm})*

(1) *vérification stabilité ($T_{ELS, \epsilon_{adm}}$)*

(2) *endo. mise en œuvre à (ϵ_{adm})*

(3) *vieillesissement (t_s)*

(4) *fluage (t_s) à (ϵ_{adm})*



Stratégie de dimensionnement

états-limites de service

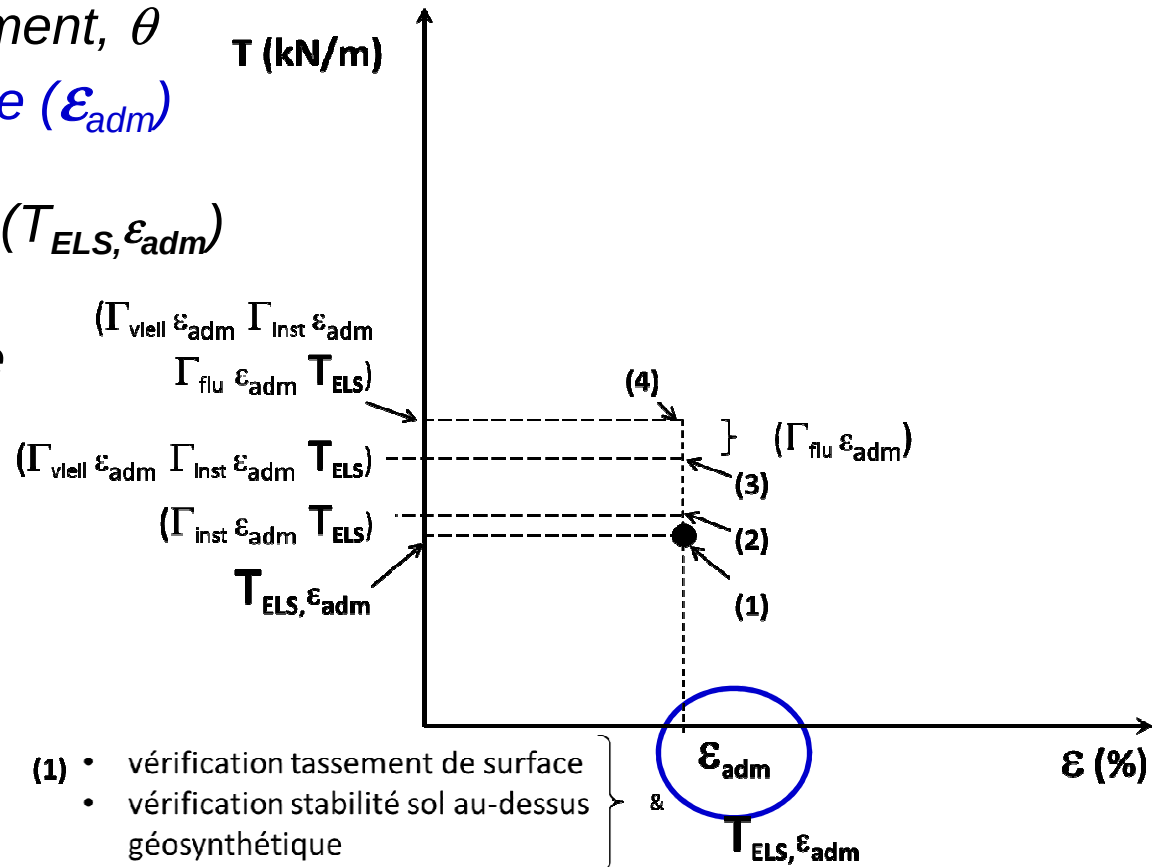
(1) tassement, foisonnement, θ
 → *déformation admissible* (ϵ_{adm})

(1) vérification stabilité ($T_{ELS, \epsilon_{adm}}$)

(2) endo. mise en œuvre

(3) vieillissement (t_s)

(4) fluage (t_s)



Stratégie de dimensionnement

états-limites de service

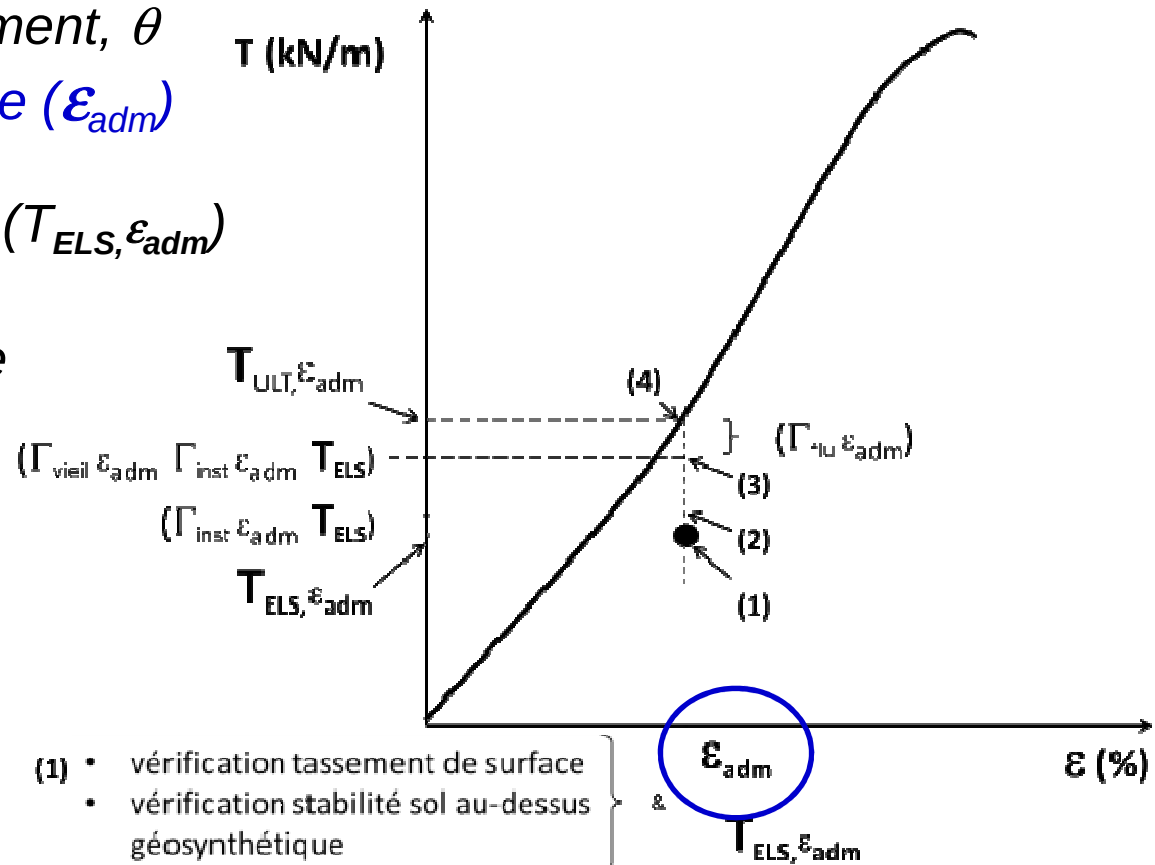
(1) tassement, foisonnement, θ
 → *déformation admissible* (ϵ_{adm})

(1) vérification stabilité ($T_{ELS, \epsilon_{adm}}$)

(2) endo. mise en œuvre

(3) vieillissement (t_s)

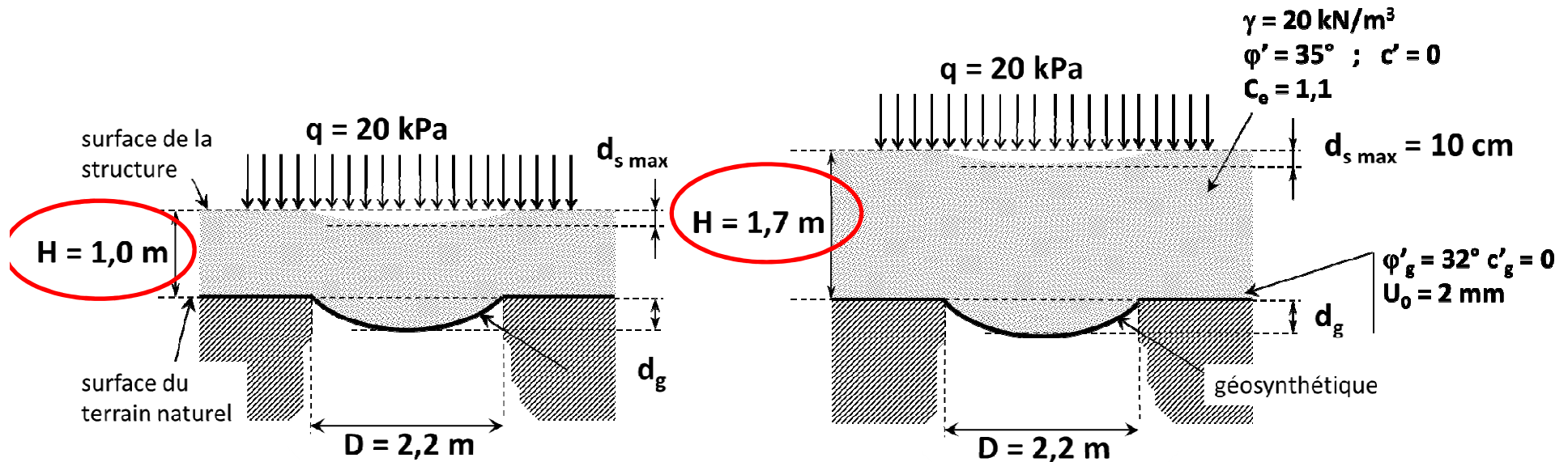
(4) fluage (t_s)



$$T_{adm, \epsilon_{adm}} \leq (1/\gamma_{géo}) T_{ULT, \epsilon_{adm}}$$

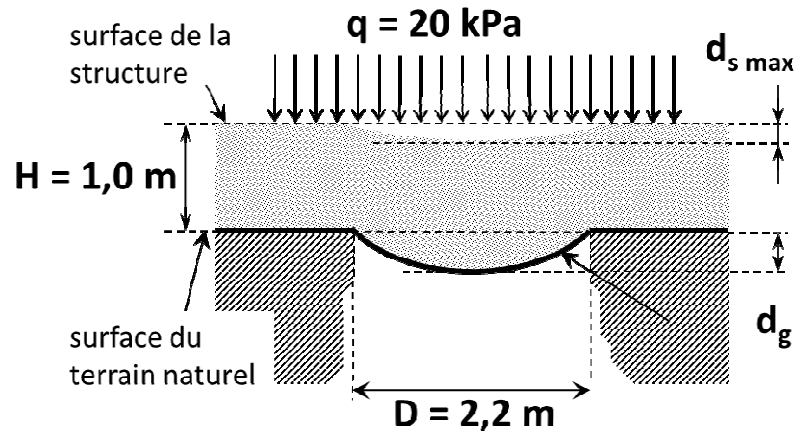
- (1) • vérification tassement de surface
- vérification stabilité sol au-dessus géosynthétique

Quelques réflexions (exemples)



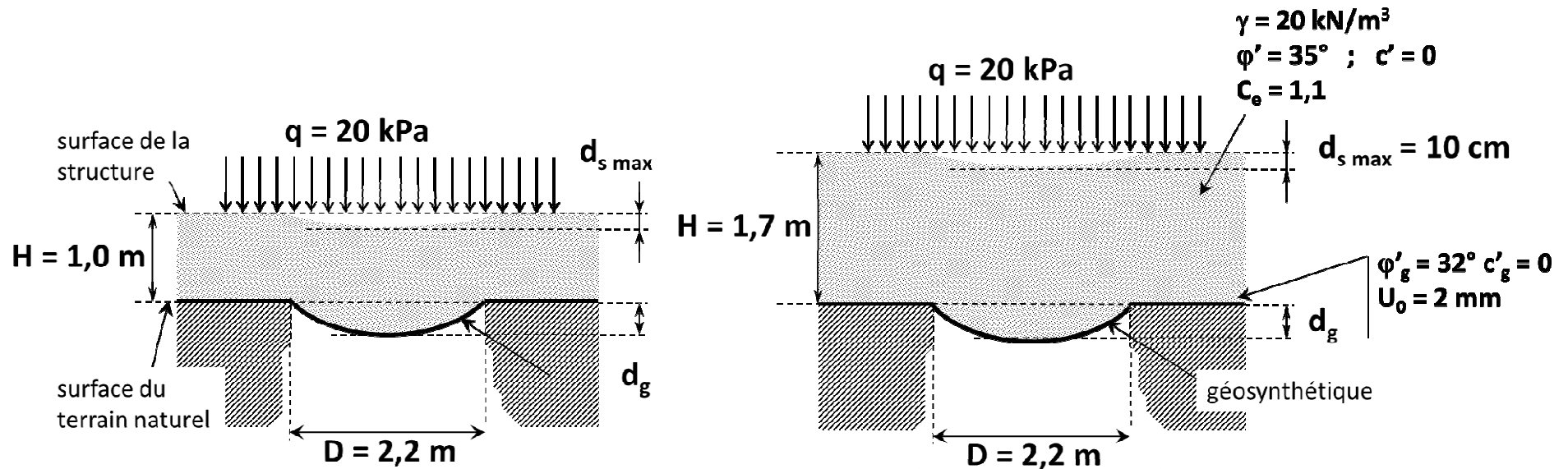
	ELU	ELS
polymère	polyester	polyester
durée de service	120 ans	120 ans ⁽¹⁾
déformation à l'effort maximum	ε_{ult} (10%)	-
tassement de surface		$d_s = 10 \text{ cm}$
endommagement	Γ_{instal} (1,50)	$\Gamma_{instal, \varepsilon_{adm}}$ (1,50)
vieillessement	Γ_{vieil} (1,20)	$\Gamma_{vieil, \varepsilon_{adm}}$ (1,20)
fluage	Γ_{flu} (1,67)	$\Gamma_{flu, \varepsilon_{adm}}$ (1,14)
facteur partiel résistance en traction	$\gamma_{M:t}$ (1,25)	$\gamma_{M:t}$ (1,00)
pois volumique du remblai $\gamma_{GSup} \gamma_s$	(1,35 * 20)	(1 * 20)
trafic $\gamma_{QSup} q$	(1,5 * 20)	(1 * 20)

Quelques réflexions (exemples)



	H = 1 m
ELU	ELS
$\varepsilon_{ult} \text{ (10\%)}$	$\varepsilon_{adm} = 3,6 \%$
$T_{ELU} = 74 \text{ kN/m}$	$T_{ELT, \varepsilon_{adm}} = 71 \text{ kN/m}$
	$T_{ULT, \varepsilon_{adm}} = 146 \text{ kN/m}$
$T_{ULT} = 278 \text{ kN/m}$	$T_{ULT} = 405 \text{ kN/m}$

Quelques réflexions (exemples)



	H = 1 m	H = 1,7 m	
ELU	ELS	ELU	ELS
$\varepsilon_{ult} (10\%)$	$\varepsilon_{adm} = 3,6 \%$	$\varepsilon_{ult} (10\%)$	$\varepsilon_{adm} = 9 \%$
$T_{ELU} = 74 \text{ kN/m}$	$T_{ELT, \varepsilon_{adm}} = 71 \text{ kN/m}$	$T_{ELU} = 86 \text{ kN/m}$	$T_{ELT, \varepsilon_{adm}} = 65 \text{ kN/m}$
	$T_{ULT, \varepsilon_{adm}} = 146 \text{ kN/m}$		$T_{ULT, \varepsilon_{adm}} = 133 \text{ kN/m}$
$T_{ULT} = 278 \text{ kN/m}$	$T_{ULT} = 405 \text{ kN/m}$	$T_{ULT} = 325 \text{ kN/m}$	$T_{ULT} = 148 \text{ kN/m}$

Conclusion et perspectives

Principaux mécanismes du renforcement GSY de structures sur cavités

Démarche de conception des ouvrages

intègre les principales méthodes de calcul existantes
approche pas à pas avec comportement dans le temps dans le
contexte normatif des états limites
vérifications vis-à-vis ruine et déplacements

Ouvre possibilité à nouvelles optimisations, voire nouveaux
développements de produits

Possibilités d'améliorations méthodes de dimensionnement

- répartition des contraintes sur le géosynthétique
- mécanismes d'effondrement pour différents types de remblai, en particulier cohérents.

Conclusion et perspectives

Exemple traité

→ influence de différents paramètres

incidence	résistance en traction	tassement surface
diamètre cavité	++	++
coefficient de foisonnement	(-)	++
(temps d'ouverture cavité)	(-)	(-)
comportement ancrage	(-)	++
paramètres interface	(-)	(-)

Merci de votre attention