

Applications de l'Eurocode 7



Calcul des écrans de soutènement

CFMS 26/01/2005

Calcul des écrans de soutènement selon l'Eurocode 7

- Etat des lieux (5 mn)
- Lecture du chapitre 9 (20 mn)
- Calcul aux états limites ultimes (C.Plumelle, 35 mn)
- Quelques interrogations (10 mn)

CFMS 26/01/05

Etat des lieux

- Les tentatives en matière de réglementation
 - Guide Technique Soutènement (Tcheng, 1981)
 - Projet de DTU 13.3 (Tcheng, 1992)
 - Commission de normalisation Ecrans (Plumelle, 1997)
 - GEEC7
 - CNJOG / Groupe Ecrans

CFMS 26/01/05

Etat des lieux

- Les usages de la profession
 - Diversité certaine
 - Références fréquentes au Fascicule 62
 - Pratique centrée sur l'ELS
 - => nombreux retours d'expérience
 - => vérification non systématique des ELU
 - => critères de dimensionnement presque exclusivement basés sur le calcul des déformations

CFMS 26/01/05

•
•
•

Lecture du chapitre 9

- Chapitre 9 :
 - 9.1 : Domaine d'application / Définitions
 - 9.2 : Etats Limites
 - 9.3.1 : Actions
 - 9.3.2 : Données géométriques
 - 9.3.3 : Situations de calcul
 - 9.4 : Considérations générales (calcul et construction)
 - 9.5 : Détermination de la pression des terres
 - 9.6 : Pression de l'eau
 - 9.7 : Calcul à l'état limite ultime
 - 9.8 : Calcul à l'état limite de service

CFMS 26/01/05 • • • • •

•
•
•

Lecture du chapitre 9

- Chapitre 10 : Rupture d'origine hydraulique
 - 10.1 : Généralités
 - 10.2 : Rupture par soulèvement hydraulique dû à la poussée d'Archimède
 - 10.3 : Rupture par annulation des contraintes effectives verticales
 - 10.4 : Erosion interne
 - 10.5 : Rupture par érosion régressive

CFMS 26/01/05 • • • • •

Lecture du chapitre 9

- Chapitre 11 : Stabilité générale
 - 11.5.1 : Analyse de la stabilité des pentes
 - 11.5.3 : Stabilité des excavations
- Chapitre 8 : Ancrages
- Annexes
 - Annexe C : Exemples de procédures pour déterminer les valeurs limites de la pression des terres sur les murs verticaux
 - Annexe H : Valeurs limites des déformations des structures et des mouvements des fondations
 - Annexe J : Aide-mémoire pour la surveillance des travaux et le suivi du comportement des ouvrages

CFMS 26/01/05

Section 9.1

Généralités et définitions

- 9.1.2.1 : Murs-poids
- 9.1.2.2 : Ecrans de soutènement
- 9.1.2.3 : Ouvrages de soutènement composites
gabions, murs cloués, ...
- Limitations propres à la Norme Française :
 - Ouvrages de catégorie 2
 - Ecrans plans
 - Ecrans continus

CFMS 26/01/05

•
•
•

Section 9.2

Etats limites

- Instabilité d'ensemble
- Rupture d'un élément de la structure
- Rupture combinée dans le terrain et les éléments de structure
- Rupture par soulèvement hydraulique et érosion régressive
- Mouvements susceptibles de provoquer la ruine ou d'affecter l'utilisation des ouvrages voisins

CFMS 26/01/05

• • • • • • • •

•
•
•

Section 9.2

Etats limites

- Fuites inacceptables à travers ou par-dessus l'écran
- Transport inacceptable de particules de sol à travers ou par-dessous l'écran
- Modifications inacceptables de l'écoulement de l'eau souterraine
- Rupture par rotation ou translation de l'écran ou de certaines de ses parties
- Rupture par défaut d'équilibre vertical
- Combinaison des états limites précédents, lorsqu'approprié

CFMS 26/01/05

• • • • • • • •

•
•
•

Section 9.2

Etats limites

- 11.5.3 : Stabilité des excavations
Le soulèvement du fond des excavations profondes à cause du déchargement doit être considéré
- 8.2 : Ancrages : états limites
 - Rupture de l'armature ou de la tête d'ancrage
 - Distorsion ou corrosion de la tête d'ancrage
 - Rupture à l'interface entre le coulis et le terrain
 - Rupture de la liaison entre l'armature et le coulis
 - Perte de la force d'ancrage par déplacement excessif, fluage ou relaxation

CFMS 26/01/05 • • • • • • • •

•
•
•

Section 9.2

Etats limites

- Perte d'équilibre global du terrain retenu et de l'ouvrage de soutènement
- Interaction de groupes d'ancrage avec le terrain et les structures voisines
- 8.4 : Considérations relatives au calcul et à la construction : la force d'ancrage doit agir dans le terrain à une distance suffisamment grande du volume retenu pour que la stabilité de ce volume ne soit pas affectée

CFMS 26/01/05 • • • • • • • •

Section 9.3.1

Actions

- Cf. § 2.4.2 :
- 9.3.1.2 : Poids du remblai
- 9.3.1.3 : Surcharges
- 9.3.1.4 : Poids de l'eau
- 9.3.1.5 : Vagues et glace
- 9.3.1.6 : Forces d'écoulement
- 9.3.1.7 : Forces de collision

(4) Pour les calculs géotechniques, il convient d'examiner le classement comme actions des forces, pressions ou déplacements suivants :

- le poids des sols, des roches et de l'eau ;
- les contraintes existant dans le terrain ;
- les pressions des terres et les pressions de l'eau présente dans le terrain ;
- les pressions de l'eau libre, y compris celle des vagues ;
- les pressions de l'eau interstitielle ;
- les forces d'écoulement ;
- les charges permanentes et les charges provenant des structures ;
- les surcharges ;
- les forces d'amarrage ;
- l'enlèvement de charges ou l'excavation du terrain ;
- les charges de circulation ;
- les mouvements provoqués par les activités minières ou les autres activités liées aux caves ou aux activités de creusement de tunnels ;
- le gonflement et le retrait provoqués par la végétation, le climat ou les variations d'humidité ;
- les mouvements dus au fluage ou au glissement ou au tassement d'une masse de terrain ;
- les mouvements dus à la dégradation, à la dispersion, à la décomposition, à l'auto-compaction et à la dissolution ;
- les mouvements et accélérations dus aux tremblements de terre, aux explosions, aux vibrations et aux charges dynamiques ;
- les effets de la température, y compris l'action du gel ;
- les charges de glace ;
- la précontrainte imposée dans les ancrages ou les butons ;
- le frottement négatif.

CFMS 26/01/05

Section 9.3.2

Données géométriques

- 9.3.2.1 : Données de base => Cf. § 2.4.6.3 :
 - γ_F et γ_M tiennent déjà compte de variations mineures des données géométriques
 - Si déviation => effet significatif : $a_d = a_{\text{nom}} \pm \Delta a$
- 9.3.2.2 : Surfaces du terrain
 - Excavations et affouillements
 - Incidence sur la butée : $\Delta a = \min(10\% \cdot H ; 0,50\text{m})$
 - $\Delta a >$ si niveau incertain
 - $\Delta a = 0$ si contrôle fiable

CFMS 26/01/05

•
•
•

Section 9.3.2

Données géométriques

- 9.3.2.3 : Niveaux d'eau
 - Doivent résulter de données sur les conditions hydrauliques et hydrogéologiques du site
 - Tenir compte des variations de perméabilité sur le régime des eaux souterraines
 - Nappes perchées et niveaux artésiens

CFMS 26/01/05

•
•
•

Section 9.3.3

Situations de calcul

- Tenir compte des évolutions possibles des paramètres de calcul (actions et résistances)
- Notamment : effet des futurs ouvrages et des chargements déchargements prévus
- Affouillements, érosion
- Subsidence, gel
- 8.3 (Ancrages) : Conséquences de la rupture d'un ancrage

CFMS 26/01/05

•
•
•

Section 9.4

Considérations relatives au calcul et à la construction

- Il convient que la conception protège contre l'occurrence d'une rupture fragile
- Les méthodes de calcul et de construction usuelles, et les valeurs prescrites des coefficients de sécurité sont normalement suffisantes pour éviter l'occurrence d'un ELU dans une structure voisine, sauf dans certaines argiles surconsolidées
- La complexité de l'interaction sol structure rend parfois difficile le calcul détaillé avant travaux

=> méthode observationnelle

CFMS 26/01/05

•
•
•

Section 9.4

Considérations relatives au calcul et à la construction

- Tenir compte des effets de l'exécution des travaux (fonçage, forage,...)
- Tenir compte de l'effet barrage éventuel
- Vérifier la possibilité de mettre en place des tirants dans les terrains adjacents
- Vérifier la faisabilité des terrassements entre les butons
- Accessibilité pour entretien
- Stabilité des panneaux de paroi moulée
- Programme d'entretien du système de drainage

CFMS 26/01/05

•
•
•

Section 9.4

Considérations relatives au calcul et à la construction

- 11.4 (Stabilité générale) :

Si l'on ne peut pas facilement vérifier la stabilité d'un site ou si les mouvements sont trouvés être inacceptables pour l'usage prévu du site, le site devra être jugé inadapté sans mesures de stabilisation

- 8.4 (Ancrages) :

- Inclure dans les reconnaissances la zone concernée par les scellements
- Permettre détentes et remises en tension si nécessaire

CFMS 26/01/05

•
•
•

Section 9.4

Considérations relatives au calcul et à la construction

- 8.4 (Ancrages) :

- Tenir compte des effets défavorables sur le terrain ou les fondations existantes
- Intervalle d'1,5 m entre scellements si possible
- Les systèmes d'ancrage doivent avoir fait l'objet d'essais préalables
- Ra;k doit être déterminée sur la base d'essais de contrôle ou d'expériences comparables, et la valeur de calcul (à l'ELS) doit être vérifiée par des essais de réception

CFMS 26/01/05

Section 9.5

Détermination de la pression des terres

- 9.5.1 : Généralités
 - Tenir compte des modes et amplitudes des mouvements
 - Tenir compte de l'équilibre vertical
 - $\delta_d = k \cdot \Phi_{cv;d}$
- 9.5.2 : Pressions des terres au repos
 - $y < 5 \cdot 10^{-4} \cdot h$
 - $K_0 = (1 - \sin \Phi')$. $R_{oc}^{1/2}$, sauf pour R_{oc} élevé
 - $K_{0;\beta} = K_0 \cdot (1 + \sin \beta)$

CFMS 26/01/05

Section 9.5

Détermination de la pression des terres

- 9.5.3 : Valeurs limites de la pression des terres
 - Tenir compte du mouvement relatif et de la forme correspondante de la surface de rupture
 - L'hypothèse d'une rupture plane n'est pas sécuritaire, notamment pour Φ et δ élevés
 - Les valeurs limites ne sont pas les plus défavorables
 - Annexe C...
- 9.5.4 : Valeurs intermédiaires de la pression des terres => Coefficients de réaction ou éléments finis

CFMS 26/01/05

•
•
•

Section 9.5

Détermination de la pression des terres

- 9.5.5 : Effet du compactage

CFMS 26/01/05

• • • • • • • •

•
•
•

Section 9.6

Pressions d'eau

- k moyen à faible => toit de la nappe = surface du massif soutenu
... sauf drainage ou prévention des infiltrations
- 2.4.6.1 : Valeurs de calcul des actions
Les valeurs de calcul des pressions interstitielles peuvent être établies en appliquant des facteurs partiels aux pressions d'eau caractéristiques, ou en appliquant une marge de sécurité aux niveaux d'eau caractéristiques

CFMS 26/01/05

• • • • • • • •

Section 9.7

Calcul à l'état limite ultime

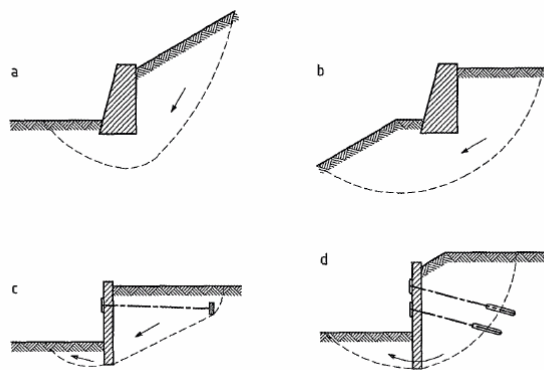
- 7.2 : Généralités
 - La compatibilité des modes de déformations des matériaux doit être prise en compte lors de l'estimation des valeurs de calcul des résistances
 - Pour les sols fins, on doit tenir compte du comportement à court terme et du comportement à long terme

CFMS 26/01/05

Section 9.7

Calcul à l'état limite ultime

- 9.7.2 : Stabilité globale

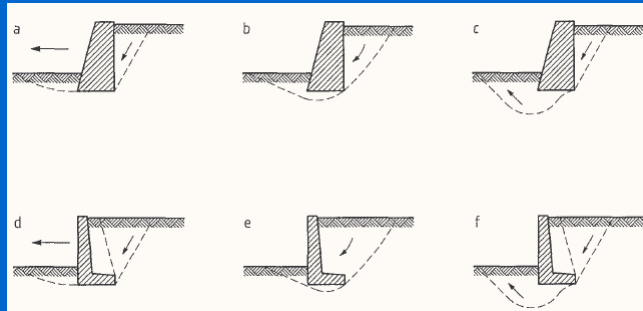


CFMS 26/01/05

Section 9.7

Calcul à l'état limite ultime

- 9.7.3 : Rupture du sol de fondation des murs-poids

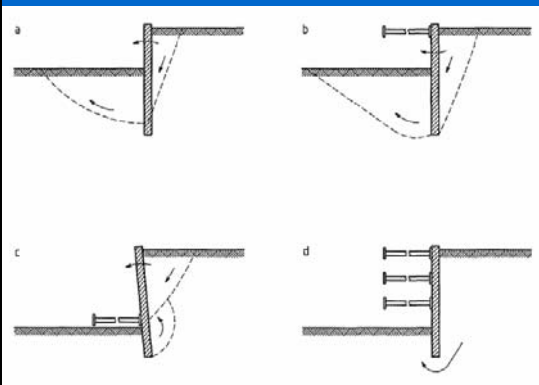


CFMS 26/01/05

Section 9.7

Calcul à l'état limite ultime

- 9.7.4 : Rupture rotationnelle des écrans de soutènement



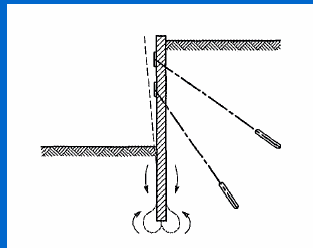
L'intensité et la direction de la contrainte de cisaillement de calcul doit être compatible avec le déplacement relatif vertical

CFMS 26/01/05

Section 9.7

Calcul à l'état limite ultime

- 9.7.5 : Rupture verticale des écrans de soutènement



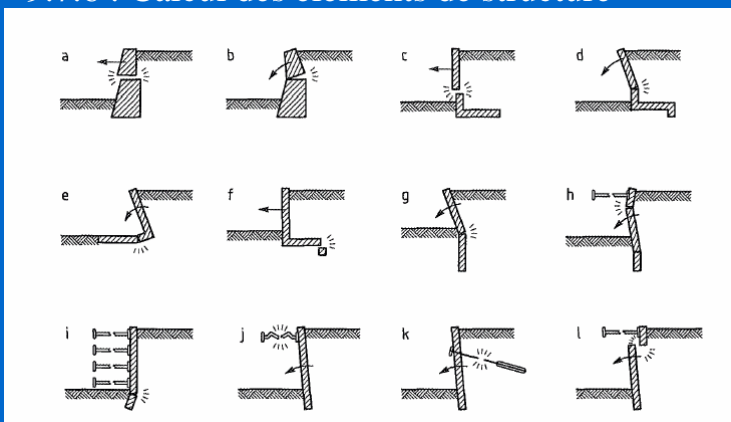
L'amplitude et la direction des contraintes de cisaillement de calcul doivent être compatibles avec celles utilisées pour la vérification de l'équilibre rotationnel

CFMS 26/01/05

Section 9.7

Calcul à l'état limite ultime

- 9.7.6 : Calcul des éléments de structure



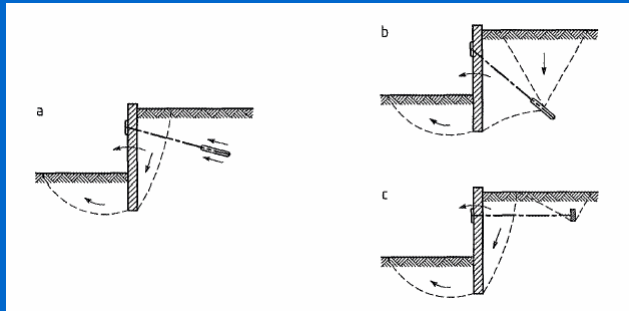
Cf. EN
1992
1993
1995
1996

CFMS 26/01/05

Section 9.7

Calcul à l'état limite ultime

- 9.7.7 : Rupture par arrachement des ancrages

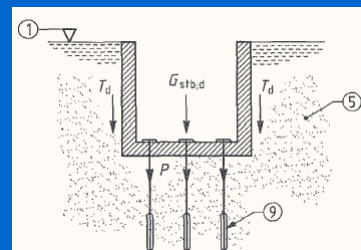
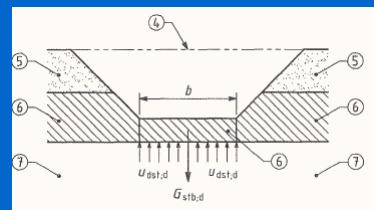
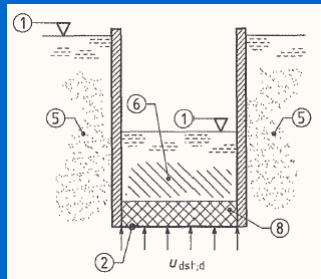


CFMS 26/01/05

Section 9.7

Calcul à l'état limite ultime

- 10.2 : Rupture par soulèvement hydraulique



CFMS 26/01/05

Section 9.7

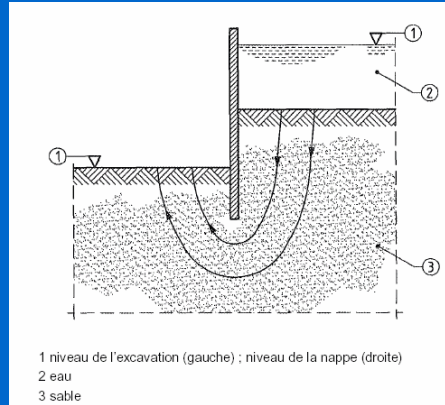
Calcul à l'état limite ultime

- 10.3 : Rupture par annulation des contraintes effectives verticales

. 2 vérification possible :

- contraintes totales / pressions interstitielles
- contraintes effectives / gradient hydraulique

. Sans objet si cohésion importante => § 10.2



CFMS 26/01/05

Section 9.7

Calcul à l'état limite ultime

- 10.4 : Erosion interne

- . Pas nécessairement couvert par 10.3
- . Dépend de :
 - direction de l'écoulement
 - granulométrie
 - stratigraphie
- . Susceptible de déboucher sur :

- 10.5 : Rupture par érosion régressive

Peut néanmoins être évité par une sécurité suffisante sur 10.3
...et évidemment par des dispositions constructives appropriées

CFMS 26/01/05

•
•
•

Section 9.8

Calcul à l'état limite de service

- 9.8.1 : Généralités
 - Valeurs de calcul = valeurs caractéristiques
- 9.8.2 : Déplacements (cf. 2.4.8)
 - $E_d < C_d$
 - Exemples d'ELS : fissuration inacceptable, blocage de porte
 - Une estimation prudente du déplacement doit être faite sur la base d'expérience comparables (comprenant l'effet des travaux de construction)

CFMS 26/01/05 • • • • • • • •

•
•
•

Section 9.8

Calcul à l'état limite de service

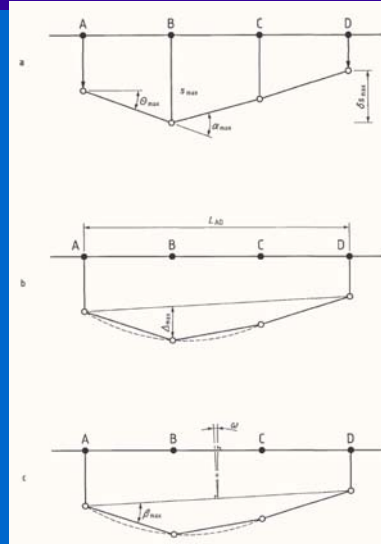
- Calcul nécessaire si ouvrage anormalement sensible ou absence d'expérience comparable
- Egalement si épaisseur significative d'argile plastique
- Si calcul linéaire, rigidité adaptée au niveau déformation
- Tenir compte des effets des vibrations
- 6.6.1 (fondations superficielles) : ne pas considérer comme précis les calculs de tassement, ils donnent seulement une indication approchée

CFMS 26/01/05 • • • • • • • •

Section 9.8

Calcul à l'état limite de service

- Annexe H
 - Rotation relative 1/500 acceptable par beaucoup de structures
 - ELU probable à partir de 1/150
 - Tassements totaux = 50 mm et différentiels = 20 mm souvent acceptables

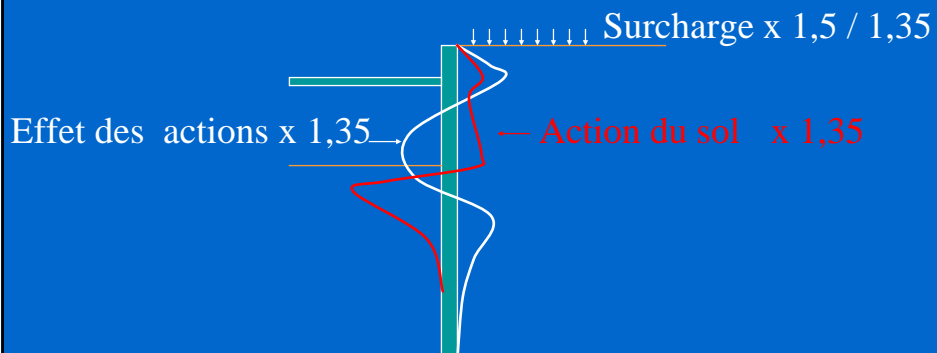


CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

ELU « STRU »



CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

ELU « STRU »

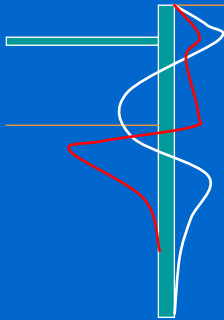
Question :

- le coefficient 1,35 est-il suffisant pour couvrir l'incertitude inhérente à l'action du sol ?

Réponse :

- oui a priori, sous réserve que :

- . on utilise de vraies valeurs caractéristiques résultant d'une vraie reconnaissance ;
- . on dispose de coefficients de sécurité suffisants vis-à-vis des ELU « GEO ».

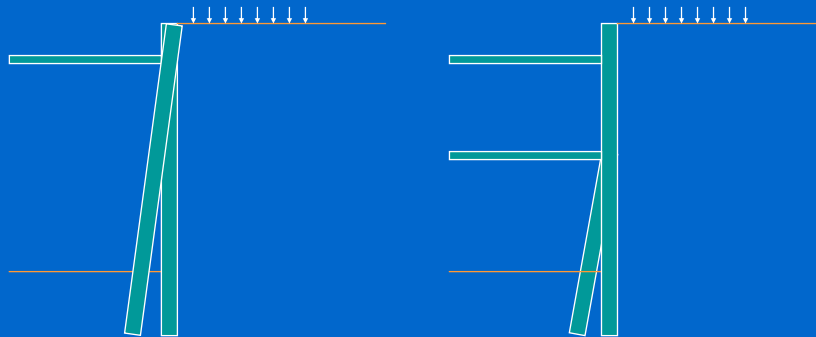


CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

ELU « GEO » : défaut de butée



Instabilité rotationnelle

ELU² : GEO => STRU

CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

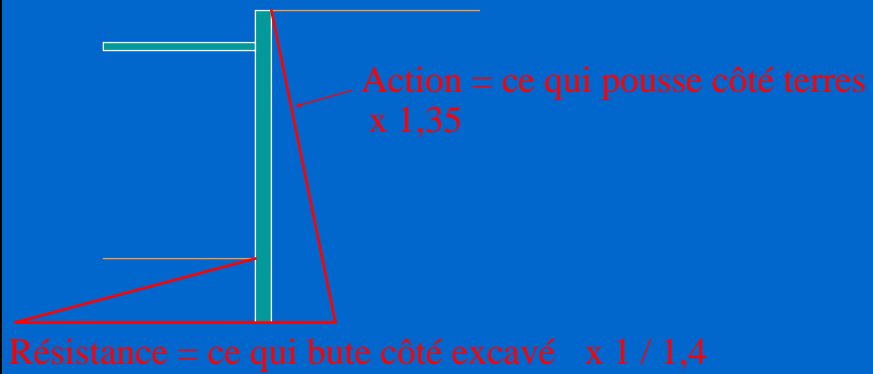
Lecture de l'approche 2
ELU « GEO » : défaut de butée



CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2
ELU « GEO » : défaut de butée

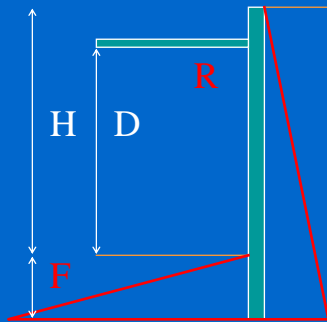


CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

ELU « GEO » : défaut de butée



$$P = K_a \gamma \cdot \gamma \cdot (H+F)^2 / 2$$

$$B = K_p \gamma \cdot \gamma \cdot F^2 / 2$$

$$P = B + R$$

$$P \cdot (H+F) / 3 = B \cdot F/3 + R \cdot (D+F)$$

$$K_a \gamma \cdot \gamma \cdot [(H+F)^3/6 - (H+F)^2/2 \cdot (D+F)]$$

$$= K_p \gamma \cdot \gamma \cdot [F^3/6 - F^2/2 \cdot (D+F)]$$

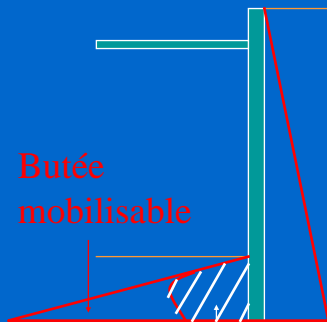
$$F(K_a \gamma \times 1,35 ; K_p \gamma / 1,4) = F(K_a \gamma ; K_p \gamma / 1,9)$$

CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

ELU « GEO » : défaut de butée



Approche française actuelle :

- calcul ELS (coefficients de réaction)

- butée mobilisable / butée mobilisée

= 1,7 à 2 en phase définitive

= 1,5 en phase provisoire

- avantage : calcul unique

Butée mobilisée => ELS => STRU => GEO

CFMS 26/01/05

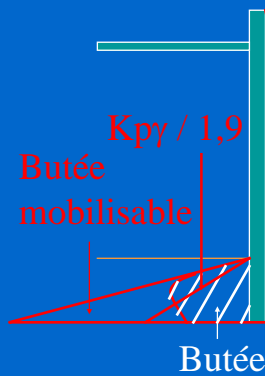
Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

ELU « GEO » : défaut de butée

Problèmes posés par l'approche actuelle :

- L'EC7 demande de justifier l'équilibre avec une réduction de la butée mobilisable
- . plus défavorable vis-à-vis des sollicitations (on augmente la portée entre appuis)
- . plus favorable vis-à-vis de la fiche (pour une fiche donnée, la butée agit plus efficacement sur l'équilibre rotationnel)



CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

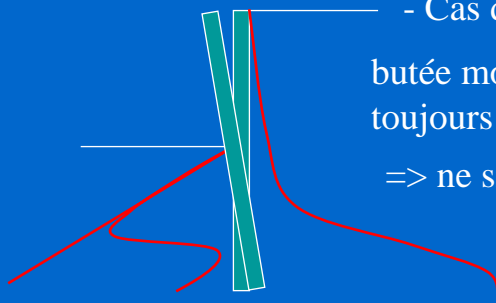
ELU « GEO » : défaut de butée

Problèmes posés par l'approche actuelle :

- Cas des écrans en console :

butée mobilisable / butée mobilisée
toujours > 1

=> ne signifie rien !



CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

ELU « GEO » : défaut de butée

Proposition actuelle :

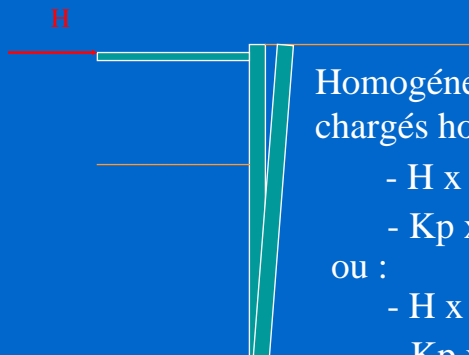
- Vérifier que la fiche permet de satisfaire aux équations d'équilibre avec $K_p / 1,9$
 - ⇒ Approche unique pour écrans en console ou appuis supérieurs
 - ⇒ Privilégier prédimensionnements selon calcul à la rupture
- Considérer les sollicitations associées comme accidentelles ?
- Accepter l'approche « ELS » dans le cas d'appuis supérieurs

CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

ELU « GEO » : défaut de butée



Homogénéité avec le calcul des pieux chargés horizontalement :

- $H \times 1,35$

- $K_p \times 1 / 1,4$

ou :

- $H \times 1 ?$

- $K_p \times 1 / 1,9 ?$

CFMS 26/01/05

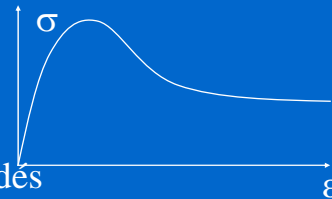
Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

ELU « GEO » : défaut de butée

Proposition = distinguer entre :

- cas où il est nécessaire de limiter la butée locale :
 - efforts permanents ou alternés (fluage, fatigue)
 - terrains surconsolidés
- cas où un dépassement local est sans conséquence :
 - phases provisoires
 - terrains normalement consolidés
 - prise en compte de l'état critique



CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

Lecture de l'approche 2

ELU « GEO » : défaut de butée

Intérêt de cette distinction :

- se rapprocher des niveaux de sécurité actuels pour les phases provisoires dans les cas courants

$$\text{ex. : } \gamma_R = 1,1 < 1,4 \Rightarrow K_p \times 1/1,5$$

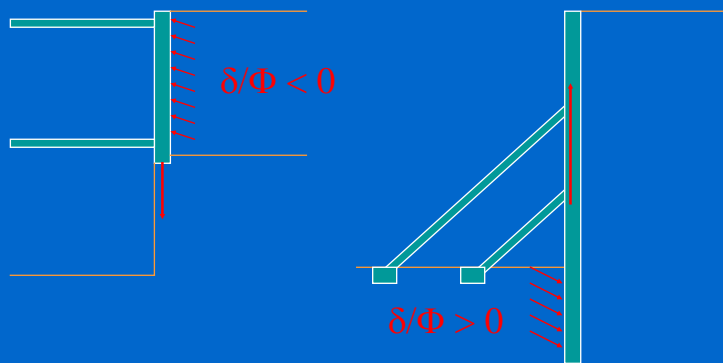
- inciter à une réflexion (et surtout à des mesures) sur le choix des paramètres géotechniques

CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

- Défaut de capacité portante

=> Incidence sur l'inclinaison des poussées / butées



CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

- Stabilité d'ensemble

Approche 2 :

- actions sur la ligne de glissement x 1,35
- résistance au cisaillement x 1/1,1

...soit $F = 1,5$

Cas d'une pente existante avec $F < 1,5$?

Recours à l'approche 3 ?

Homogénéité avec calcul des murs cloués ?

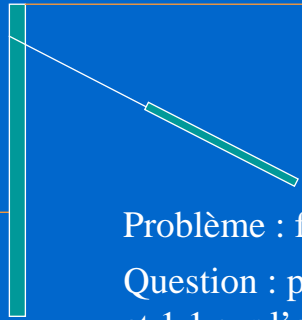
CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

• Arrachement d'un scellement

Approche 2 :

- actions sur le tirant $\times 1,35$
(cf. ELU « STRU »)
- frottement-limite $\times 1/1,1$
... soit $F = 1,5$



Problème : fluage assuré si $Q_L / Q_C > 1,5$

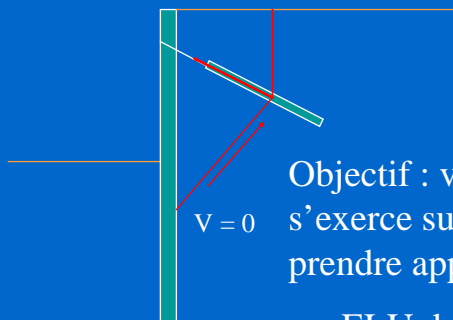
Question : pourquoi $\gamma_R = 1,4$ sur la butée et 1,1 sur l'adhérence ?

CFMS 26/01/05

Quelques interrogations

• Vérification de Kranz

- Pas explicite dans l'EC7
- Souvent assimilé à tort à la stabilité d'ensemble



Objectif : vérifier que la réaction d'ancrage s'exerce suffisamment loin pour ne pas prendre appui sur l'écran

=> ELU de cohérence du calcul ?

CFMS 26/01/05

•
•
•

Quelques interrogations

•Action de l'eau

NF P 06-100-2 « Bases de calcul des structures » :

$\gamma_{Fw} = 1,2 < 1,35$ vis-à-vis de EH

$\Rightarrow \gamma_{Fw} = 1,2$ vis-à-vis de EH et $1,35$ vis-à-vis de EF ?