



Journée scientifique et technique du 1^{er} Juin 2022
Restitution du GT Modélisation numérique

Chapitre 7 : Stratégie de dimensionnement

Sébastien Burlon
(Setec - Terrasol)

Liens avec l'Eurocode 7 : ELS et ELU

Pour les ELS, la modélisation numérique est un outil assez naturel à utiliser. Elle pose principalement le problème du choix de la loi de comportement en fonction de l'ouvrage analysé : la complexité des modèles doit être en adéquation avec les données disponibles et les vérifications à réaliser.

Pour les ELU, la modélisation numérique est un outil plus délicat à utiliser car elle oblige à mettre en œuvre d'une manière ou d'une autre les approches de calcul et les facteurs partiels proposés par l'Eurocode 7 et l'Eurocode 0.

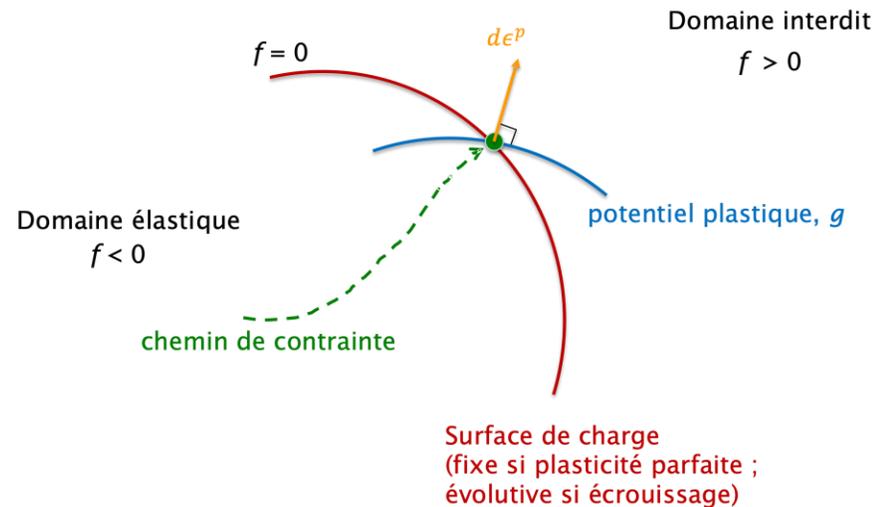
→ Le Chapitre 7 du guide répond à cette question en prenant en compte les dernières discussions tenues au niveau européen sur ce sujet pour l'élaboration de l'Eurocode 7.

Quelles vérifications réaliser ?

Dans les éléments structuraux (tirant, poutre, plaque, coque, etc.), il est aisé de connaître à la fois le torseur d'efforts appliqués et le torseur d'efforts maximal :

$$\begin{aligned} N_{\text{mob}} &- N_{\text{lim}} \\ V_{\text{mob}} &- V_{\text{lim}} \\ M_{\text{mob}} &- M_{\text{lim}} \end{aligned}$$

Dans le terrain, le problème est plus complexe. On connaît l'état de contraintes mais on ne sait rien dire sur les contraintes limites mobilisables et encore moins sur les efforts limites mobilisables. On sait seulement que les contraintes sont limitées par une surface de charge qui peut éventuellement évoluer.



→ **Comment procéder ?**

Les approches de calcul selon l'Eurocode 7

Approches	Combinaisons
1	A1 "+" M1 "+" R1 A2 "+" M2 "+" R1
2	A1 "+" M1 "+" R2
3	"A1 ou A2 "+" M2 "+" R3

Action (γ_F)	Symbole	Jeu A1	Jeu A2
Permanente			
Défavorable	γ_G	1.35	1.00
Favorable	γ_G	1.00	1.00
Variable			
Défavorable	γ_Q	1.50	1.30
Favorable	γ_Q	0	0

Paramètre de sol (γ_M)	Symbole	Jeu M1	Jeu M2
Résist. au cisaillement	γ_ϕ	1.00	1.25
Cohésion drainée	$\gamma_{c'}$	1.00	1.25
Cohésion non drainée	γ_{cu}	1.00	1.40
Résist. non confinée	γ_{qu}	1.00	1.40
Masse volumique	γ_γ	1.00	1.00

Résistance (γ_R)	Symbole	Jeu R1	Jeu R2	Jeu R3
Portance	γ_{Rv}	1.00	1.4	1.00
Glissement	γ_{Rh}	1.00	1.1	1.00
Butée des terres	γ_{Re}	1.00	1.4	1.00

→ Les approches de calcul 2 ou 2* sont complexes à mettre en œuvre car elles obligent à identifier une réaction mobilisée

→ L'approche 3 est plus accessible

Différentes situations – Résistance limite

Trois cas sont à distinguer

L'ouvrage est soumis à des efforts structuraux
(une fondation superficielle, un groupe de
fondations profondes, etc.) :

- Déterminer la courbe charge-enfoncement de l'ouvrage avec les valeurs caractéristiques c_k et ϕ_k des propriétés de résistance

- Mettre en évidence une résistance limite

- Comparer cette résistance limite aux actions réellement appliquées en prenant en compte les coefficients partiels sur les actions et les résistances :

$$\gamma_A A < R / \gamma_R$$

- Augmenter le chargement et démontrer que la marge de sécurité est suffisante vis-à-vis du chargement appliqué

L'ouvrage n'est pas soumis à des efforts structuraux
(excavation, etc.) :

- Mettre en évidence une résistance limite est plus complexe

- Raisonner seulement sur des parties du modèle :
 - pieux, tirants
 - butée

Différentes situations – Résistance limite

Trois cas sont à distinguer

L'ouvrage est soumis à des efforts structuraux
(une fondation superficielle, un groupe de
fondation profonde, etc.) :

- Déterminer la courbe charge-enfoncement de l'ouvrage avec les valeurs caractéristiques c_k et ϕ_k des propriétés de résistance

- Mettre en évidence une résistance limite

- Comparer cette résistance limite aux actions réellement appliquées en prenant en compte les coefficients partiels sur les actions et les résistance :

$$\gamma_A A < R / \gamma_R$$

- Augmenter le chargement et démontrer que la marge de sécurité est suffisante vis-à-vis du chargement appliqué

L'ouvrage n'est pas soumis à des efforts structuraux
(excavation, etc.) :

- Mettre en évidence une résistance limite est plus complexe

- Raisonner seulement sur des parties du modèle :
 - pieux, tirants
 - butée

Différentes situations – Résistance limite

Trois cas sont à distinguer

L'ouvrage est soumis à des efforts structuraux
(une fondation superficielle, un groupe de
fondation profonde, etc.) :

- Déterminer la courbe charge-enfoncement de l'ouvrage avec les valeurs caractéristiques c_k et ϕ_k des propriétés de résistance

- Mettre en évidence une résistance limite

- Comparer cette résistance limite aux actions réellement appliquées en prenant en compte les coefficients partiels sur les actions et les résistance :

$$\gamma_A A < R / \gamma_R$$

- Augmenter le chargement et démontrer que la marge de sécurité est suffisante vis-à-vis du chargement appliqué

L'ouvrage n'est pas soumis à des efforts structuraux
(excavation, etc.) :

- Mettre en évidence une résistance limite est plus complexe

- Raisonner seulement sur des parties du modèle :
 - pieux, tirants
 - butée

Différentes situations – Propriétés de cisaillement

Deux cas sont à distinguer

Pondération à la source :

- réduire les valeurs des propriétés de résistance avec les coefficients partiels appropriés ($c_d = c_k / \gamma_M$ et $\tan \varphi_d = \tan \varphi_k / \gamma_M$)
- lancer le calcul et vérifier que le calcul converge (ELU GEO)
- Vérifier que les valeurs de calcul des efforts sont admissibles vis-à-vis des critères ELU (ELU STR)

→ Le champ de déplacement n'a aucune signification – Pratique quasi abandonnée

Procédure de réduction de la résistance au cisaillement (« c-phi reduction ») :

- lancer le calcul avec les valeurs caractéristiques c_k et φ_k jusqu'à un état d'équilibre,
- réduire les propriétés de résistance pour vérifier l'ELU GEO ($R_f > \gamma_M - 1.5$ en général)
- Vérifier que les valeurs de calcul des efforts sont admissibles vis-à-vis des critères ELU

→ quand R_f est trop grand, les efforts n'ont plus de sens sauf si des éléments structuraux élastoplastiques sont utilisés

Différentes situations – Propriétés de cisaillement

Deux cas sont à distinguer

Pondération à la source :

- diviser les valeurs des propriétés de résistance par les coefficients partiels appropriés ($c_d = c_k / \gamma_M$ et $\tan \varphi_d = \tan \varphi_k / \gamma_M$)
- lancer le calcul et vérifier que le calcul converge (ELU GEO)
- Vérifier que les valeurs de calcul des efforts sont admissibles vis-à-vis des critères ELU (ELU STR)

→ Le champ de déplacement n'a aucune signification – Pratique quasi abandonnée

Procédure de réduction de la résistance au cisaillement (« c-phi reduction ») :

- lancer le calcul avec les valeurs caractéristiques c_k et φ_k jusqu'à un état d'équilibre,
- dégrader les propriétés de résistance pour vérifier l'ELU GEO ($R_f > \gamma_M - 1.3$ à 1.5 en général)
- Vérifier que les valeurs de calcul des efforts sont admissibles vis-à-vis des critères ELU

→ quand R_f est trop grand, les efforts n'ont plus de sens sauf si des éléments structuraux élastoplastiques sont utilisés

Différents procédures

Dans certains cas, on peut raisonner sur des parties du modèle numérique : par exemple, un tirant ou un pieu, etc. ou certains mécanismes comme la butée.

On peut aussi augmenter la charge jusqu'à obtenir la divergence du modèle.

La technique la plus utilisée consiste à réduire les paramètres de résistance jusqu'à obtenir la divergence des calculs (c-phi reduction).

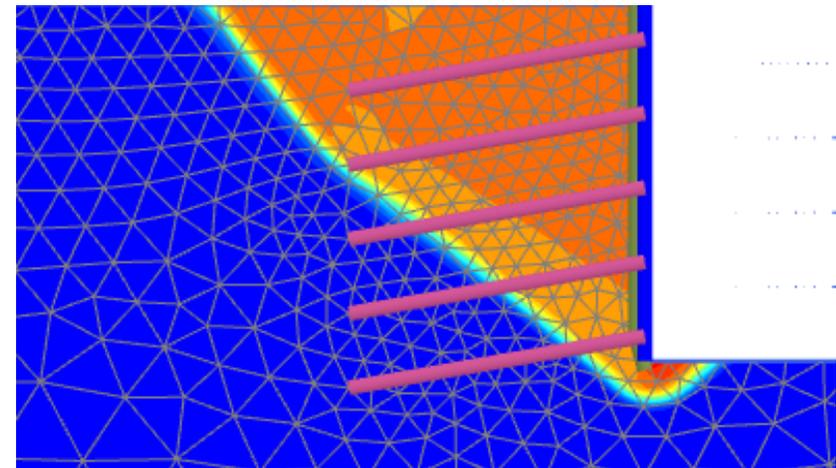
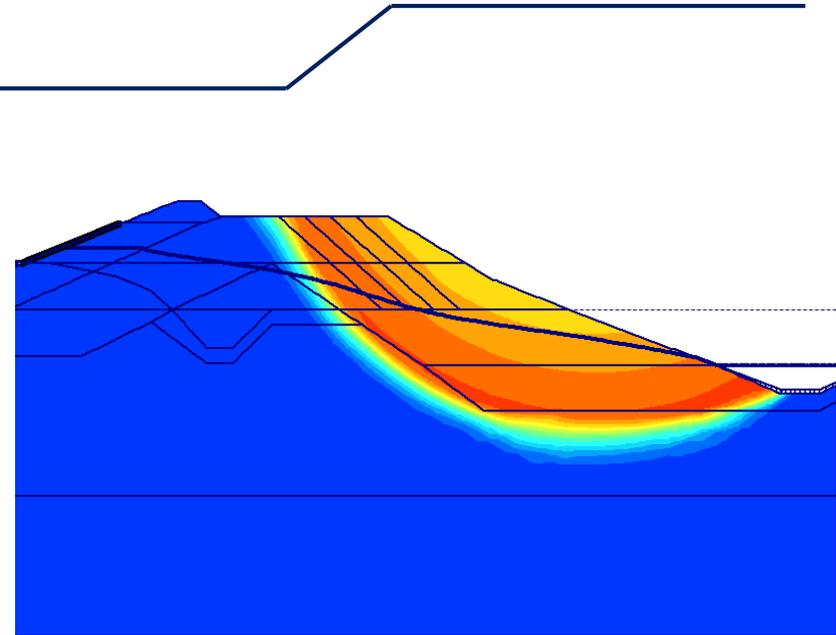
→ Comment mettre en œuvre les approches de calcul ?

Type d'ELU	1 – ELU structuraux	2 - ELU structuraux et géotechniques	3 – ELU géotechniques	4 – ELU géotechniques
Type de procédures	Multiplication des effets des actions par 1,35	Réduction des propriétés de cisaillement des terrains	Estimation de la résistance mobilisée autour d'un ouvrage géotechnique spécifique (pieu, tirant, etc.	Augmentation des charges appliquées sur l'ouvrage géotechnique
Commentaires	A combiner avec la vérification des ELU géotechniques	A combiner avec la vérification des ELU structuraux	A combiner avec la vérification des ELU structuraux	A combiner avec la vérification des ELU structuraux

Exemples des pentes – ELU#2

Procédure de réduction des propriétés de cisaillement (c-phi reduction)

- (i) d'atteindre la valeur de 1.25 (au moins) (1.3 à 1.5 en France) pour les vérifications géotechniques,
- (ii) de vérifier les aspects structuraux avec les valeurs issues de cette procédure de réduction (valeurs de calcul).

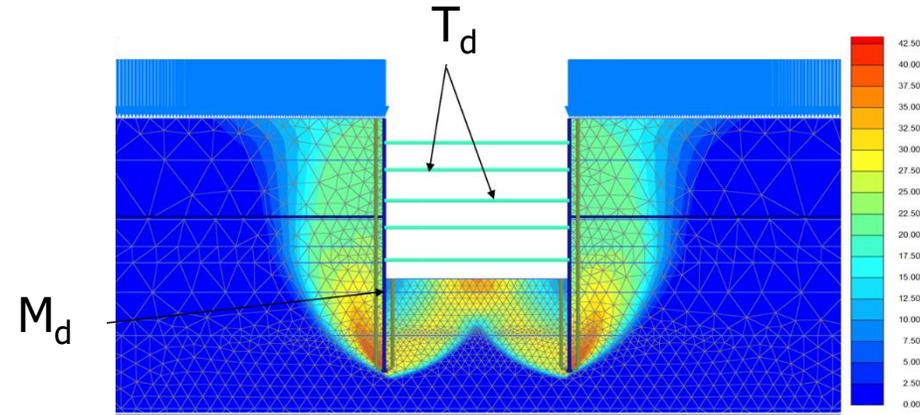


Exemples des écrans – ELU#1 et #2

Procédure de réduction des propriétés de cisaillement (c-phi reduction) :

Locale → vérification de la butée

Globale → vérification de la stabilité globale



ELU#1

$$F_d = 1.35F_k$$

$$F_d = 1.35F_k$$

$$F_d = 1.35F_k$$

Phase 1

Phase 2

Phase n

ELU#2

Procédure de réduction des propriétés de cisaillement (MFA)

Procédure de réduction des propriétés de cisaillement (MFA)

Procédure de réduction des propriétés de cisaillement (MFA)

$$R_f > 1.25 \\ F_d$$

$$R_f > 1.25 \\ F_d$$

$$R_f > 1.25 \\ F_d$$

Exemples des écrans – ELU#1 et #3

Calcul avec les valeurs représentative des charges et des propriétés de terrain pour chaque phase

ELU#1 et #3

$$F_d = 1.35F_k$$

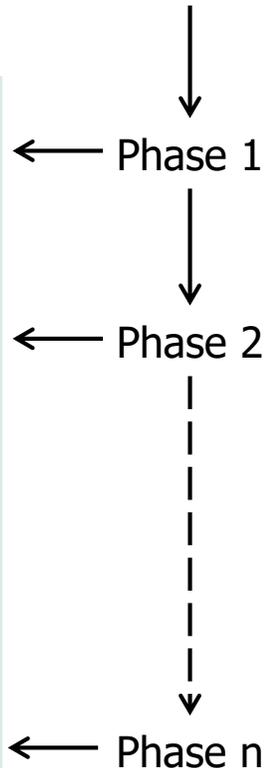
$$R_{mob} \leq R_{ult}/\gamma_R$$

$$F_d = 1.35F_k$$

$$R_{mob} \leq R_{ult}/\gamma_R$$

$$F_d = 1.35F_k$$

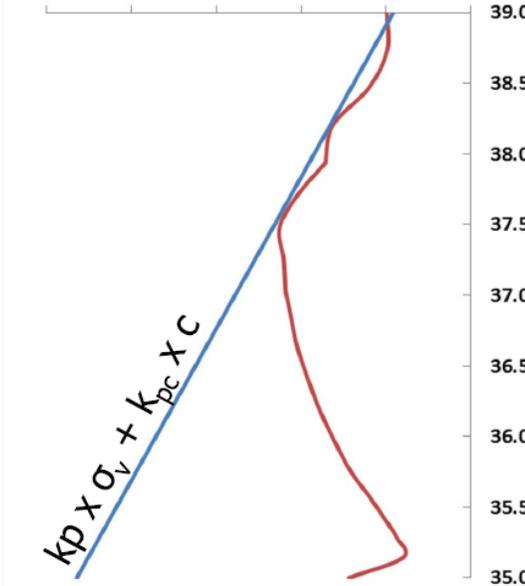
$$R_{mob} \leq R_{ult}/\gamma_R$$



— Résistance mobilisée
— Butée des terres

Contraintes horizontales (kPa)

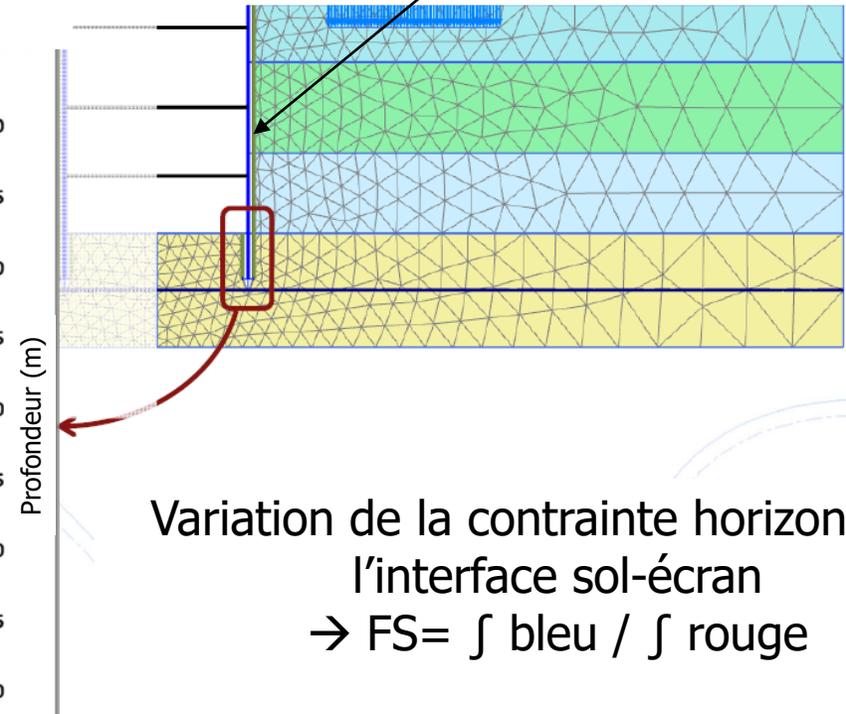
-1000.0 -800.0 -600.0 -400.0 -200.0 0.0



Facteurs partiels appliqués aux effets des actions:

$$M_d = 1.35M_k$$

$$T_d = 1.35T_k$$



Variation de la contrainte horizontale à l'interface sol-écran
→ FS = \int bleu / \int rouge

Exemples des écrans – ELU#1 et #3

Calcul avec les valeurs représentative des charges et des propriétés de terrain pour chaque phase

ELU#1 et #3

$$F_d = 1.35F_k$$

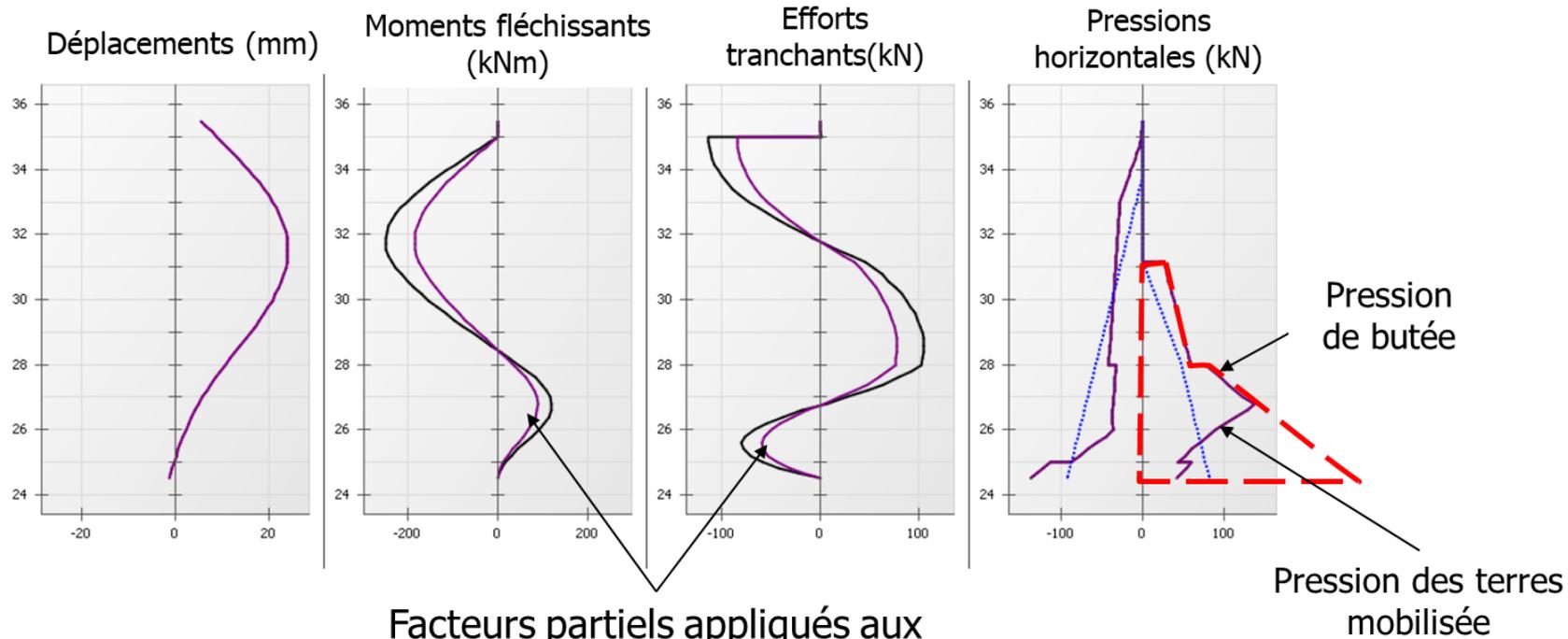
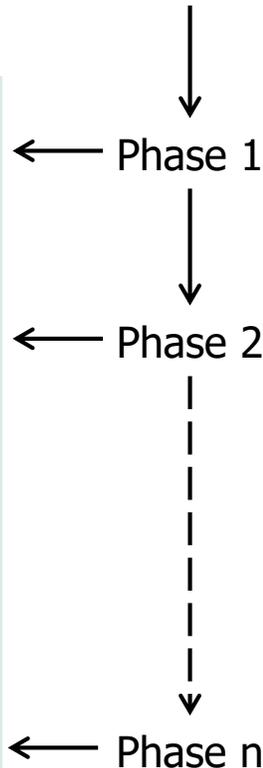
$$R_{mob} \leq R_{ult}/\gamma_R$$

$$F_d = 1.35F_k$$

$$R_{mob} \leq R_{ult}/\gamma_R$$

$$F_d = 1.35F_k$$

$$R_{mob} \leq R_{ult}/\gamma_R$$



Facteurs partiels appliqués aux effets des actions:

$$M_d = 1.35M_k$$

$$T_d = 1.35T_k$$

Facteur de sécurité (FS) =

$$\text{Pression de butée} / \int \text{Pression des terres mobilisée}$$

Exemples des écrans

Calcul avec les valeurs représentatives des charges et des propriétés des terrains :

ELU#1 et #3

$$F_d = 1.35 F_k \leftarrow$$

$$R_{mob} \leq R_{ult} / \gamma_R$$

$$F_d = 1.35 F_k \leftarrow$$

$$R_{mob} \leq R_{ult} / \gamma_R$$

$$F_d = 1.35 F_k \leftarrow$$

$$R_{mob} \leq R_{ult} / \gamma_R$$

Phase 1

Phase 2

Phase n

Éléments structuraux élastiques ou élastoplastiques

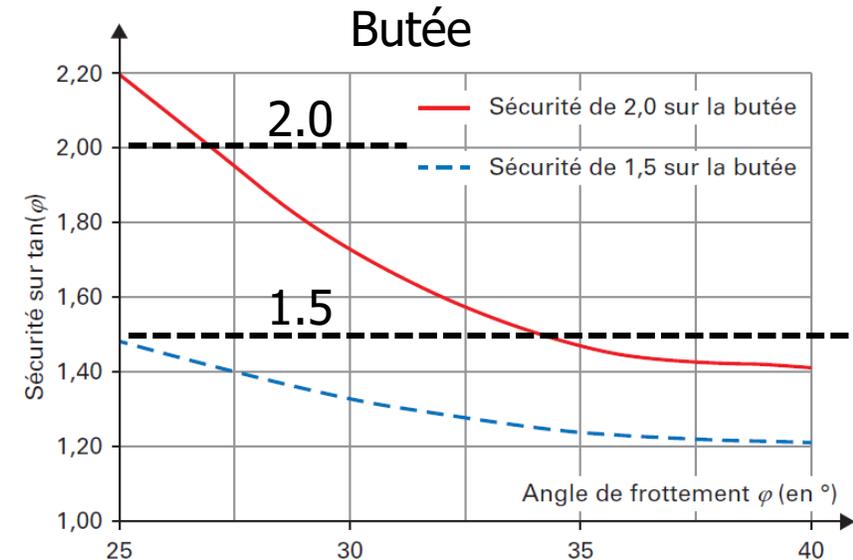
ELU#2

$$R_f > 1.25 \frac{F_d}{F_d}$$

$$R_f > 1.25 \frac{F_d}{F_d}$$

$$R_f > 1.25 \frac{F_d}{F_d}$$

Valeurs des coefficients partiels :

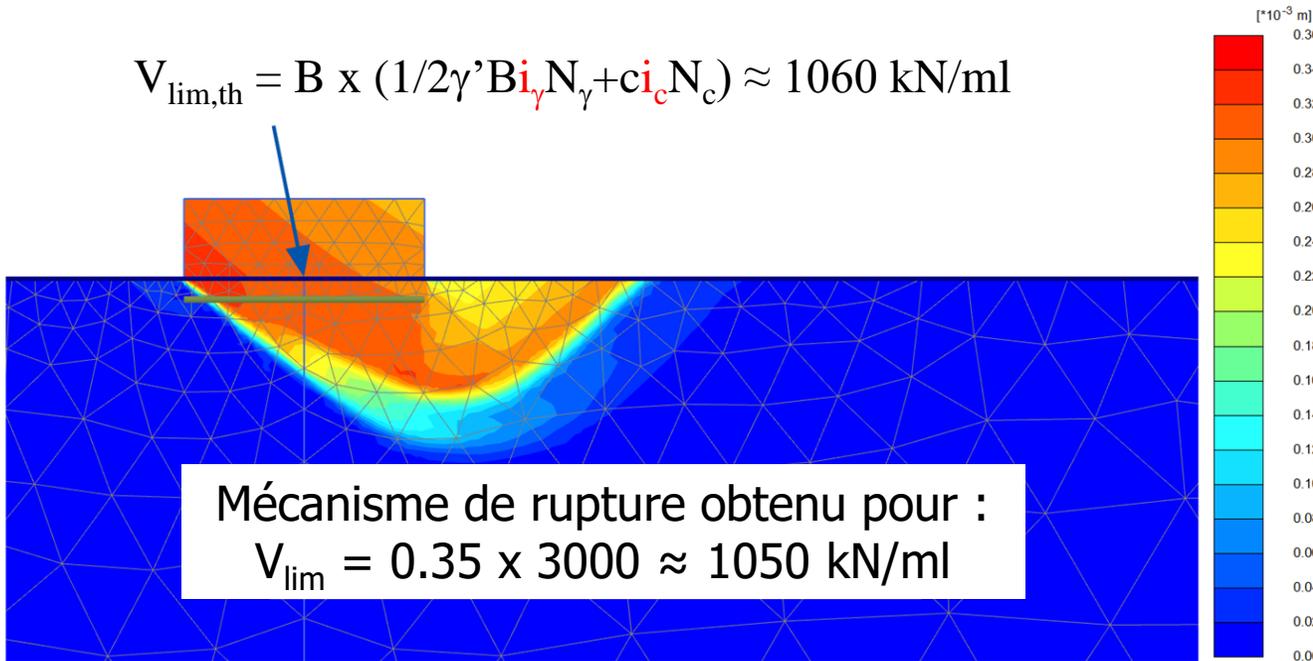


Stabilité Globale
1.3 à 1.5

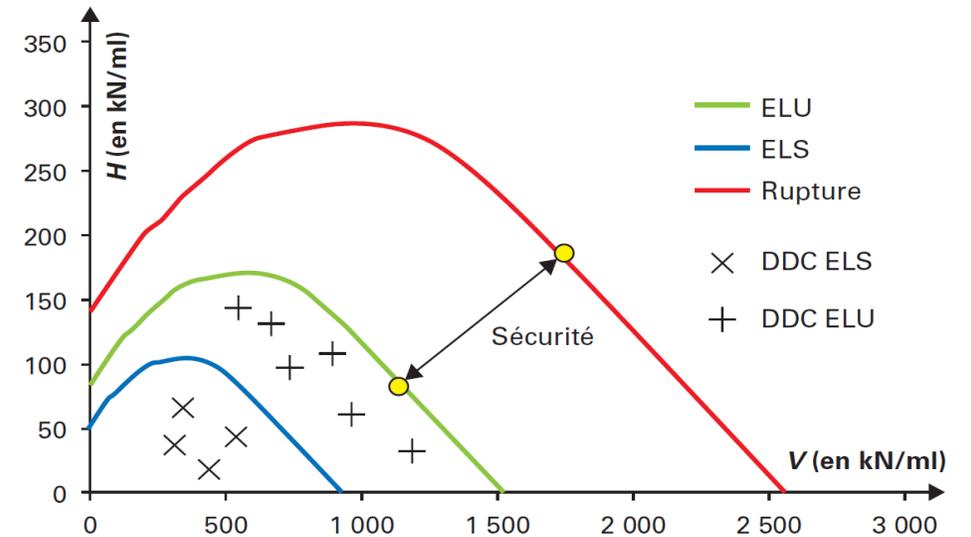
- A chaque étape, la valeur maximale des efforts est considérée.
- Cette approche sera probablement celle recommandée par l'Eurocode 7.

Exemples des fondations – ELU#4

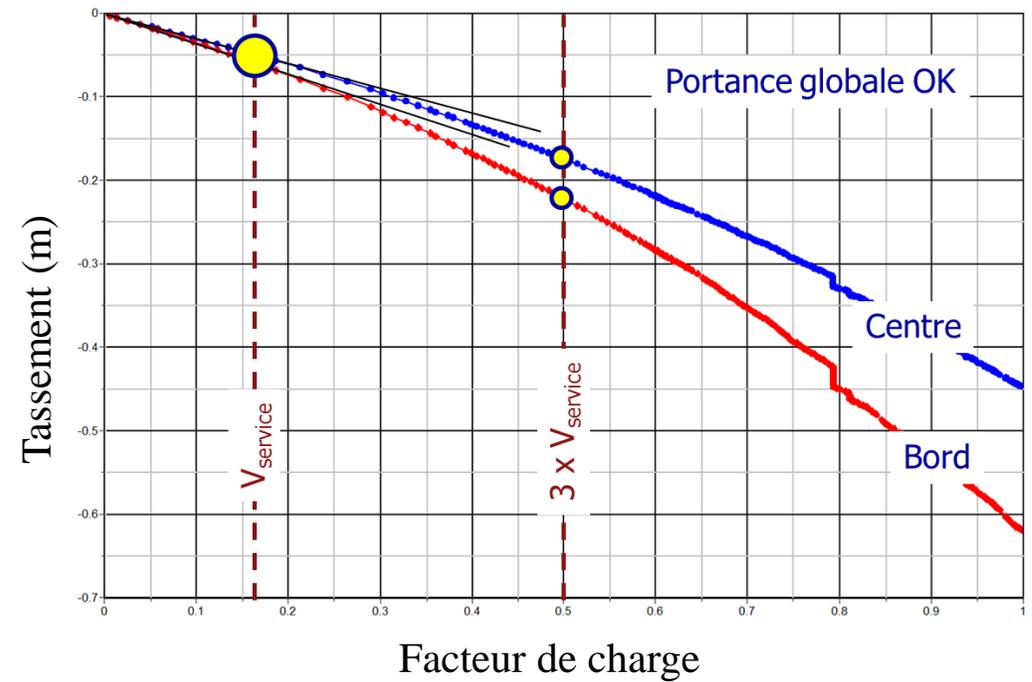
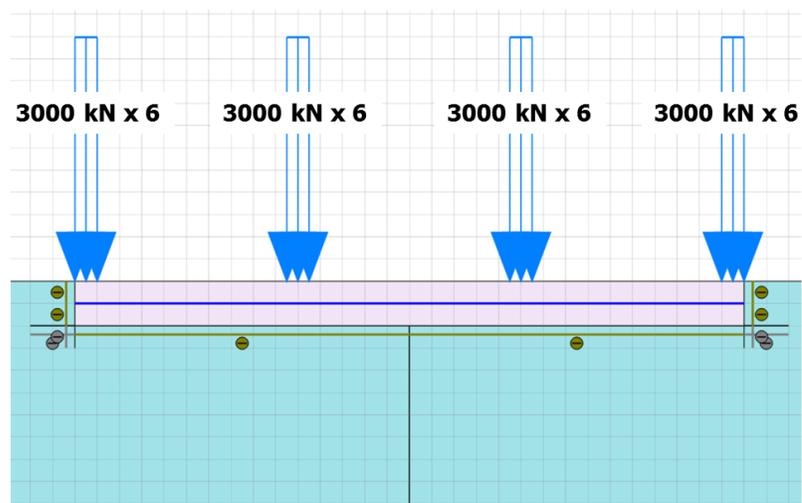
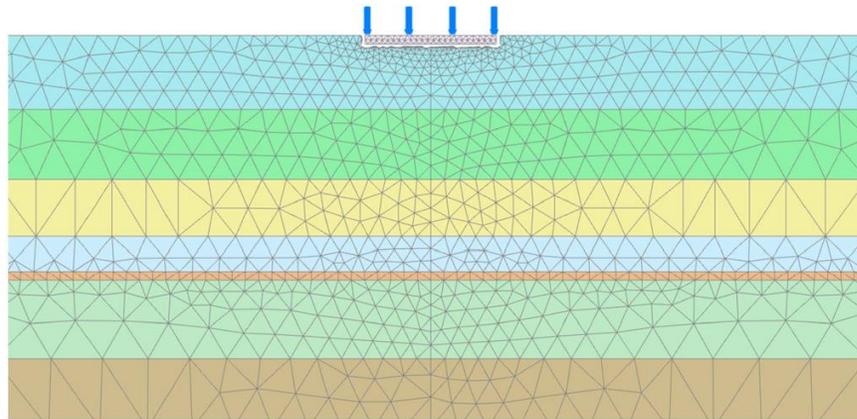
$$V_{lim,th} = B \times (1/2\gamma' B i_{\gamma} N_{\gamma} + c_i N_c) \approx 1060 \text{ kN/ml}$$



Mécanisme de rupture obtenu pour :
 $V_{lim} = 0.35 \times 3000 \approx 1050 \text{ kN/ml}$



Exemples des fondations – ELU#4



Exemples des fondations

Deux options peuvent être mises en œuvre pour les fondations :

→ Option 1 :

définir R_{ult} et vérifier: $1.35G + 1.5Q \leq R_{ult}/\gamma_R$

→ Option 2 : Augmenter la charge pour montrer qu'elle induit des déplacements modérés (B/10) :

$$\alpha \cdot V < R_{ult}$$

et α peut être écrit : $\alpha = (1.35 \text{ à } 1.5) \cdot \gamma_R$ soit 2 à 3 :

$$(1.35 \text{ à } 1.5) \cdot \gamma_R \cdot V \leq R_{ult}$$

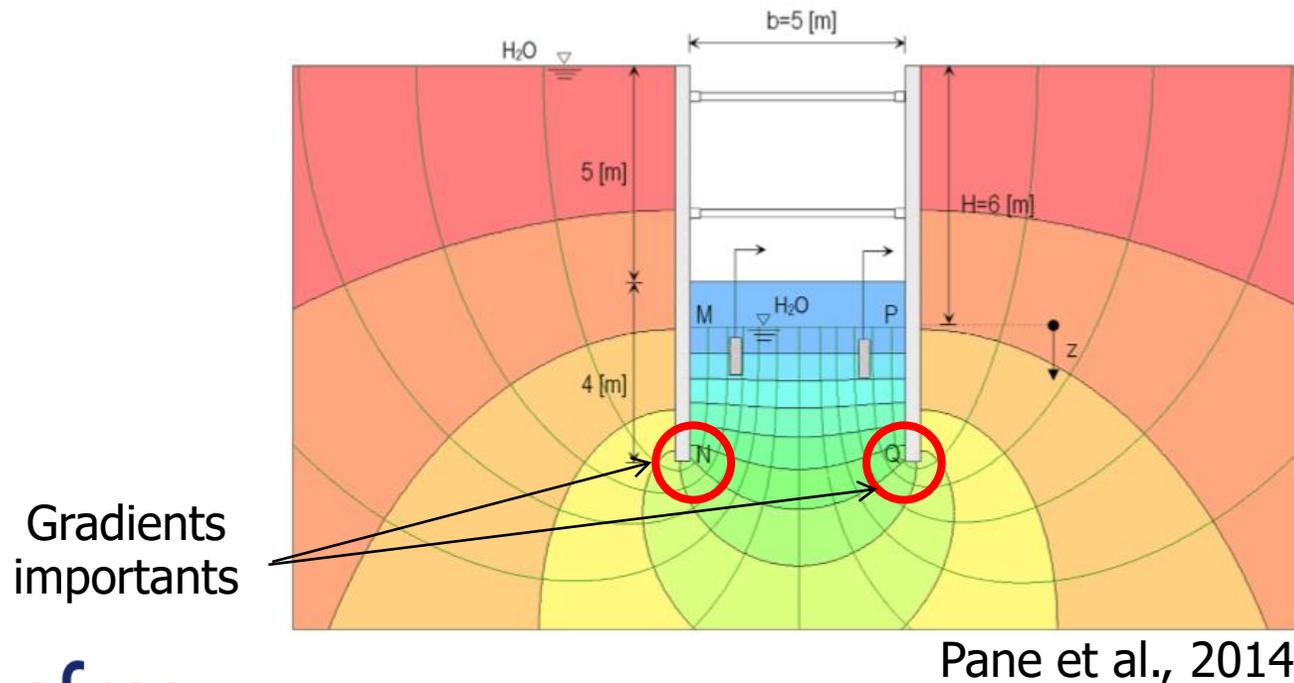
$$(1.35 \text{ à } 1.5) \cdot V \leq R_{ult}/\gamma_R$$

$$1.35G + 1.5Q \leq R_{ult}/\gamma_R$$

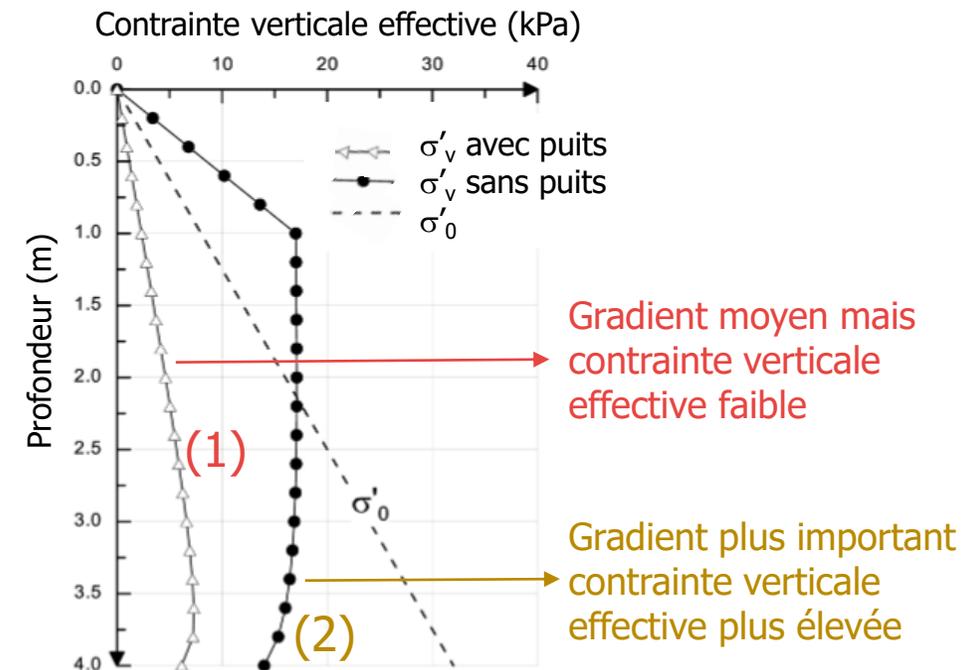
Vérifications hydrauliques

Le guide sur la base des nouvelles recommandations de l'Eurocode 7 propose deux vérifications antagonistes :

- la première concerne le gradient hydraulique : $i < i_c$ (vérification locale – mise en mouvement des particules de sol) ;
- la seconde concerne l'annulation des contraintes effectives : $\sigma' > 0$ (vérification globale – conditions nécessaires pour mobiliser de la résistance).



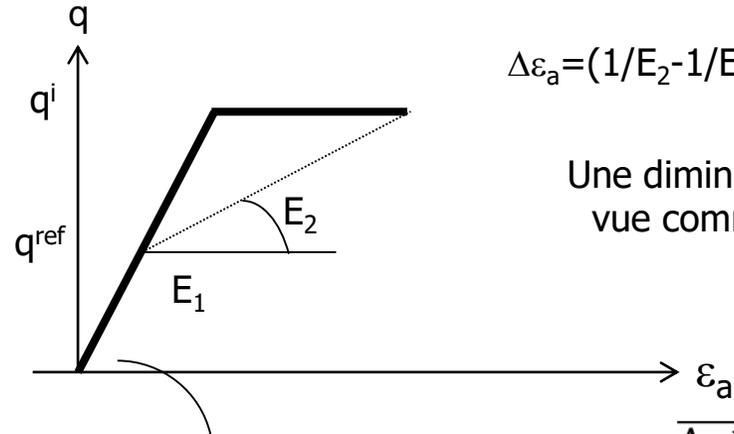
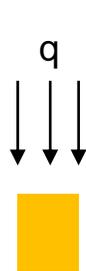
Gradients importants



Diminution des modules d'élasticité

Diminuer le module d'élasticité revient aussi à injecter des forces nodales dans le calcul. Il ne suffit pas de modifier les valeurs des modules de déformation. Le code de calcul doit bien « comprendre » qu'il s'agit en fait de générer des déformations dues à une modification des valeurs des modules de déformation.

Pourquoi ? → Le logiciel résout : $R \cdot \Delta U = F_{\text{nouveau}}$



$$\Delta \varepsilon_a = (1/E_2 - 1/E_1)(q^i - q^{\text{ref}})$$

Une diminution du module peut être vue comme une forme de fluage.

Des forces additionnelles sont injectées dans le calcul :

$$F_i = \int_{\Omega} {}^t B \overline{\Delta \sigma^*} d\Omega$$

$$\overline{\Delta \sigma} = \overline{\sigma}^i - \overline{\sigma}^{\text{ref}}$$

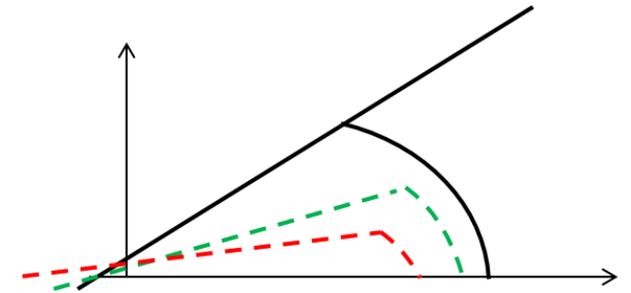
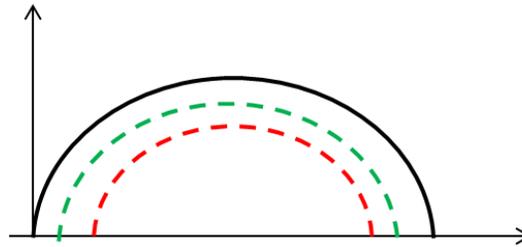
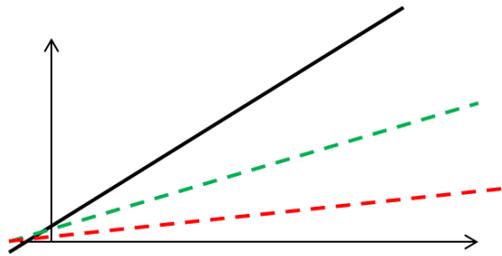
$$\Delta \varepsilon_a = (1/E_2 - 1/E_1)(q^i - q^{\text{ref}}) = (C_2 - C_1)(q^i - q^{\text{ref}}) = C_2 \cdot C_2^{-1}(C_2 - C_1)(q^i - q^{\text{ref}})$$

$$\overline{\Delta \sigma^*} = \left(1 - \frac{\mu_2}{\mu_1}\right) \overline{\Delta \sigma} + \left[\lambda_2 \left(\frac{1}{2\mu_2} - \frac{1}{2\mu_1} \right) + (3\lambda_2 + 2\mu_2) \left(\frac{\nu_1}{E_1} - \frac{\nu_2}{E_2} \right) \right] \text{tr} \overline{\Delta \sigma} \delta$$

Conclusions

L'ensemble des procédures semble cohérent et permet de couvrir les états limites les plus fréquents même si certaines questions demeurent :

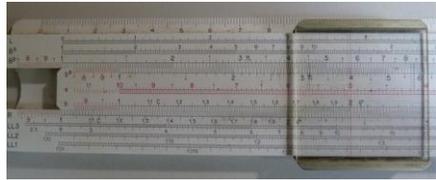
- 1/ En ce qui concerne la loi de comportement : influence de la procédure de réduction des paramètres de cisaillement et de la loi de comportement (règle d'écoulement, mécanisme d'écrouissage)



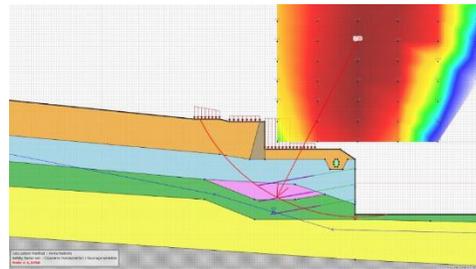
- 2/ En ce qui concerne le choix des facteurs partiels : faut-il chercher une continuité avec les méthodes traditionnelles ou peut-on se satisfaire de niveau générique par exemple 1.3 pour des situations de courte durée et 1.5 pour des situations de longue durée ?

Conclusions

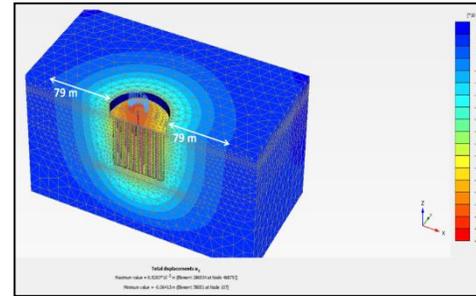
3/ Il est difficile d'anticiper l'évolution des méthodes de calcul et donc des procédures de vérifications sur des durées de 15 ou ans....



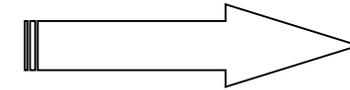
1975



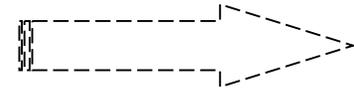
1995



2015



2035



2055

Conclusions

«L'art de dresser un projet ne consiste pas tant à résoudre un système d'équations par le calcul, que de bien les poser après avoir imaginé toutes les hypothèses plausibles. Si une culture mathématique sérieuse est utile et nécessaire pour formuler les résultats de l'expérience, il ne faut jamais oublier que l'on n'a aucune chance de retrouver à la fin d'un calcul ce que l'on aura oublié d'introduire initialement. En d'autres termes, si le projeteur a omis un effort ou une déformation en un point donné d'une structure, le calcul ne les lui fera pas retrouver. »

— Conférence sur l'art de construire prononcée par Nicolas Esquillan (concepteur du CNIT) lors de sa réception comme docteur honoris causa à l'université de Stuttgart en 1965

Merci de votre attention !