

Pieu isolé - Capacité portante (chargement axial)

Brice lecampion

EPFL



Fondations sur pieux

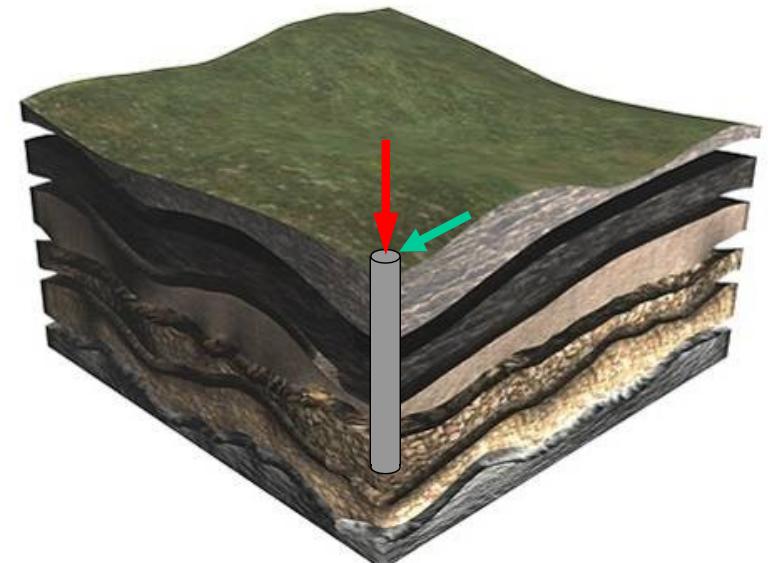
1. Calcul d'un pieu isolé

1. Introduction
2. Capacité portante
 - 2.2.1 Mécanisme de rupture et facteurs influents
 - 2.2.2 Calcul à partir d'essais de laboratoire
 - 2.2.3 Calcul à partir d'essais in situ
 - 2.2.4 Estimation par formules de battage
 - 2.2.5 Vérification de la capacité portante
 - 2.2.6 Exemples de calcul

Vérifications de la sécurité structurale (ELU) et de l'aptitude au service (ELS) d'un pieu isolé

ELU

- **Type 2 externe**
 - Capacité portante du sol
- **Type 2 interne**
 - Résistance du matériau constitutif (sollicitations axiale et/ou latérale)
 - Stabilité au flambement
- **Type 3**
 - Glissement généralisé
- **Externe**
 - Tassements instantanés et différés, totaux et différentiels
 - Mouvement horizontal (sollicitation latérale)
- **Interne**
 - Durabilité du matériau constitutif du pieu
 - Pourriture des pieux en bois
 - Corrosion des pieux en acier
 - Attaque du béton dans des milieux agressifs (sulfates)



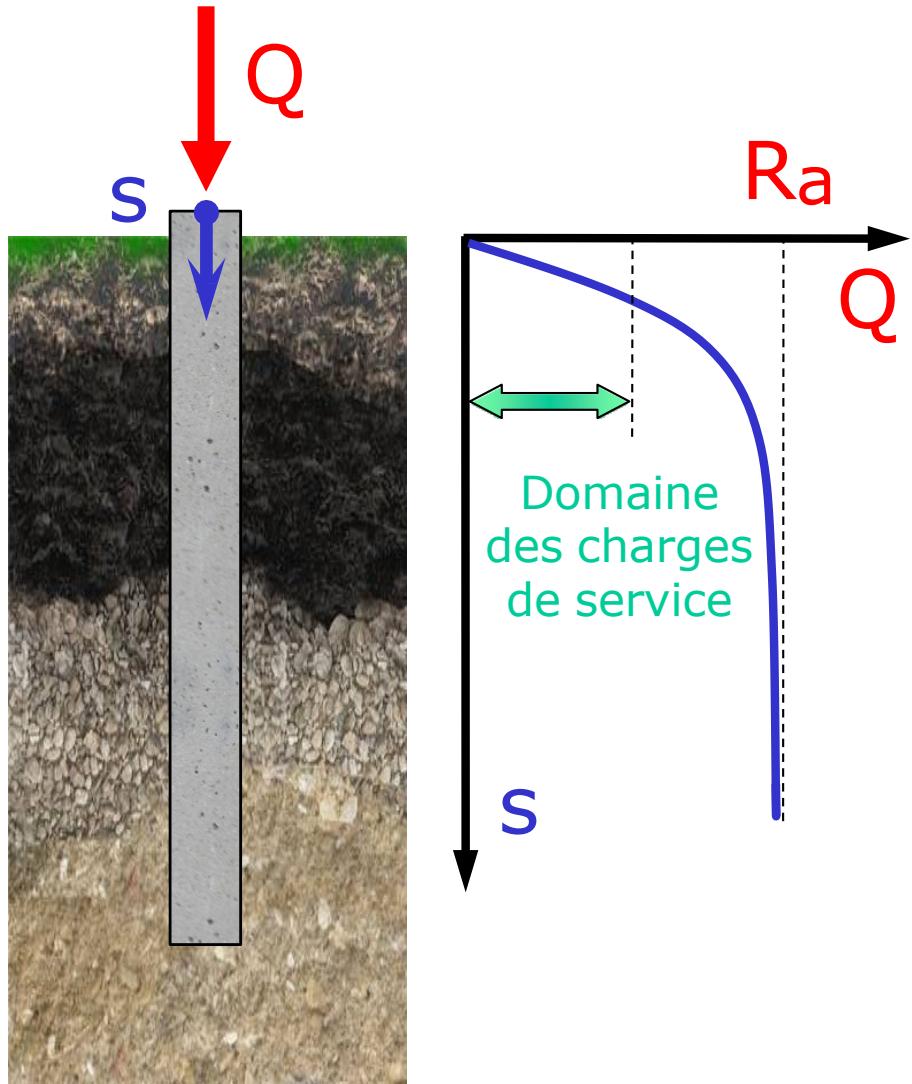
ELS



Fondations sur pieux

1. Introduction
2. Calcul d'un pieu isolé
 1. Introduction
 2. Capacité portante
 - 2.2.1 Mécanisme de rupture et facteurs influents
 - 2.2.2 Calcul à partir d'essais de laboratoire
 - 2.2.3 Calcul à partir d'essais in situ
 - 2.2.4 Estimation par formules de battage
 - 2.2.5 Vérification de la capacité portante
 - 2.2.6 Exemples de calcul

Sollicitation axiale d'un pieu



ELU type 2 externe

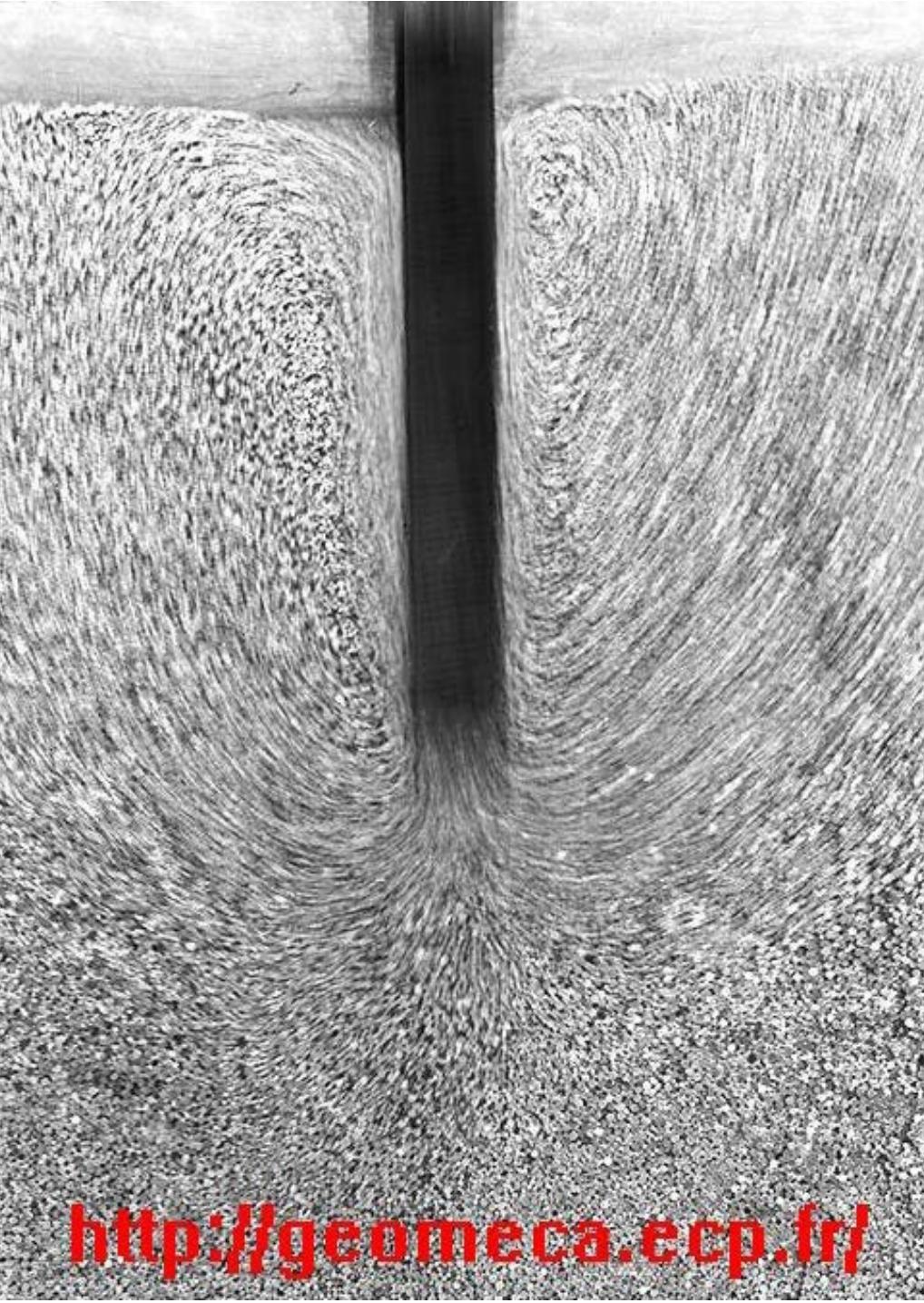
Résistance ultime axiale externe :

$$R_a \equiv Q_I \equiv Q_u$$

- L'enfoncement ne se stabilise plus sous la charge et la vitesse d'enfoncement est relativement grande
 - $R_a \equiv Q$ telle que $s = D/10$
 - $R_a \equiv Q$ telle que $k = k_{\text{crit}} = 2 \text{ mm}$

ELS externe (mobilisation du sol)

Aptitude au service si $s \leq s_{\text{adm}}$ (C_d)



Mécanisme de rupture du sol autour des pieux

- Mécanisme de rupture pas aussi net que celui sous une fondation superficielle.
 - Divers modèles de rupture ont dès lors été proposés.
 - L'incertitude est plutôt sur le mécanisme de rupture que sur les propriétés mécaniques du sol
- dimensionnement différent des fondations superficielles dans la SIA 267 / Eurocode etc.

Mécanisme de rupture du sol autour des pieux

- Mécanisme de rupture pas aussi net que celui sous une fondation superficielle.
- Divers modèles de rupture et théories ont dès lors été proposés.
- L'incertitude est plutôt sur le mécanisme de rupture que sur les propriétés mécaniques du sol.

1^{er} type de modèles (Prandtl, Caquot, Buisman, Terzaghi)

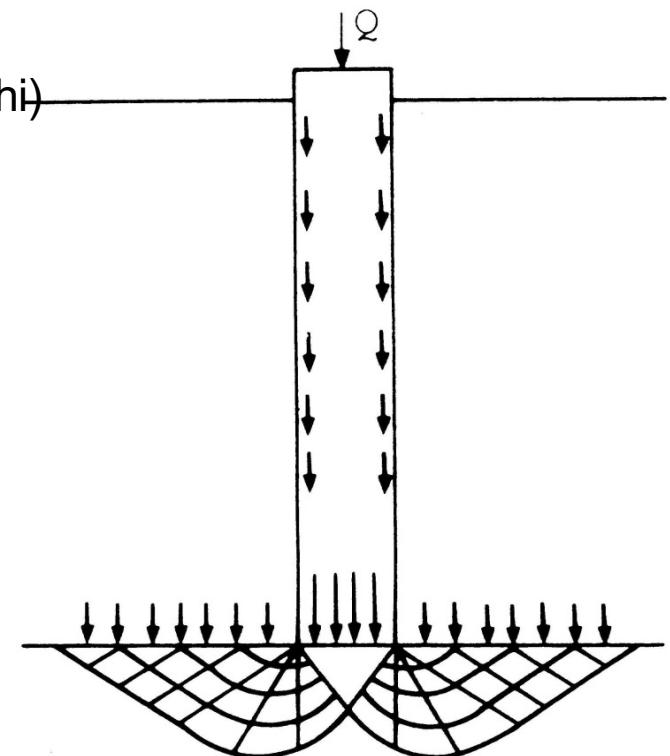
- Mécanisme de rupture sous la pointe inspiré de celui sous une fondation superficielle.

$$q'_p = c' N_c s_c + q' N_q s_q + \frac{1}{2} b \gamma N_y s_y$$

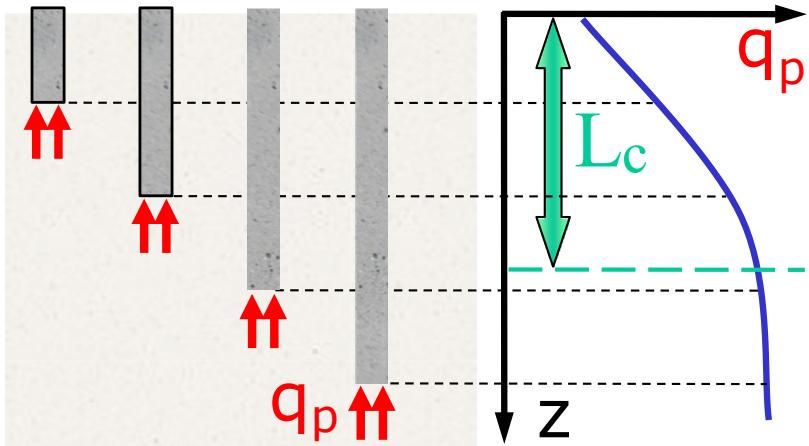
- Lorsque la longueur du pieu augmente, la contrainte verticale effective à la base du pieu augmente et la résistance de pointe augmente
- Formule de Lang & Huder:

$$q'_p = (c' N_c + \sigma'_{v, \text{pointe}} N_q) \chi$$

- + Frottement latéral le long du fût



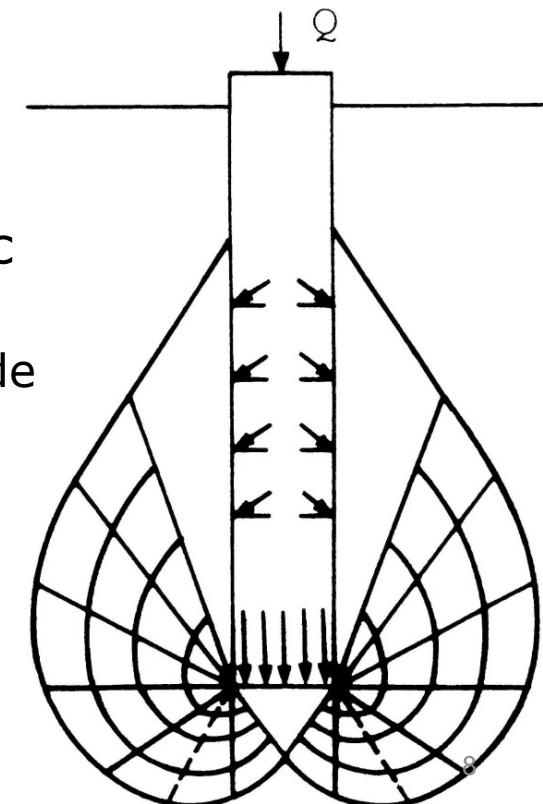
Mécanisme de rupture du sol autour des pieux



- En réalité, la résistance de pointe n'augmente plus en dessous d'une certaine profondeur L_c qualifiée de critique.
- La profondeur critique dépend du diamètre du pieu, de la nature et de la compacité du sol.

2^{ème} type de modèles (De Beer, Jaky, Meyerhof)

- Poinçonnement généralisé du sol autour du pieu, mais avec un mécanisme qui se « referme » sur le pieu.
 - Au-delà d'une certaine profondeur (critique L_c), la résistance de pointe est indépendante de la longueur du pieu
 - Estimation analytique par De Beer:
$$L_c = D \exp(\pi \tan \phi') \tan (\pi/4 + \phi'/2)$$
 - Estimation empirique par Ménard:
$$L_c = D (2 + \phi'/8)$$
 - Couramment: $L/D > 6$ et $L > 3$ m (« fondation profonde »)
- + Frottement latéral le long du fût



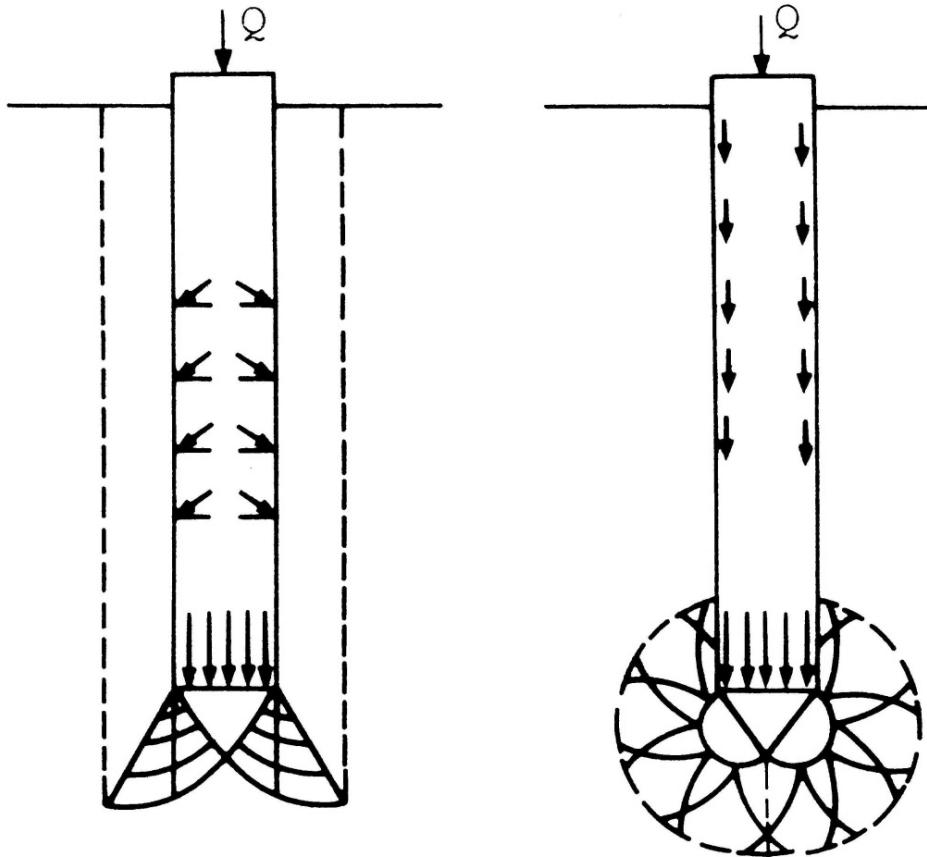
Mécanisme de rupture du sol autour des pieux

3ème type de modèles

- Poinçonnement localisé du sol sous la pointe du pieu.
 - Le terme de résistance de pointe est indépendant de la longueur du pieu.
 - Estimation selon le document technique unifié français (DTU):

$$q'_p = \lambda c' N_c + 50 N_{q,\max}$$

- + Frottement latéral le long du fût



Berezantsev
Yaroshenko
Vesic

Bishop, Hill & Mott
Skempton, Yassin &
Gibson

Facteurs influençant la capacité portante des pieux

Fondations sur pieux

1. Introduction

2. Calcul d'un pieu isolé

1. Introduction

2. Capacité portante

2.2.1 Mécanisme de rupture et facteurs influents

2.2.2 Calcul à partir d'essais de laboratoire

- Document Technique Unifié
- Lang & Huder (ETHZ)

2.2.3 Calcul à partir d'essais in situ

2.2.4 Estimation par formules de battage

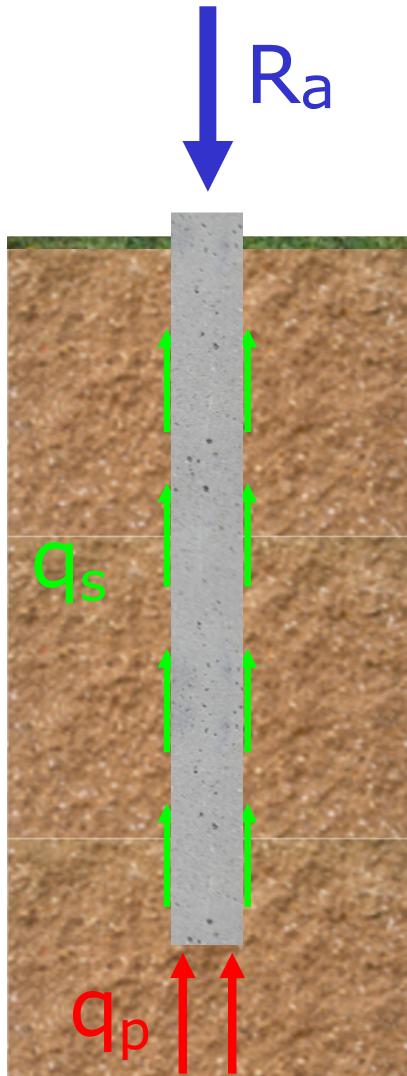
2.2.5 Vérification de la capacité portante

2.2.6 Exemples de calcul

Capacité portante d'un pieu isolé : DTU

Sols pulvérulents (& Sols cohérents pour long terme)

- Résistance de pointe unitaire q_p



$$q_p = 50 \cdot N_{q\max} + \lambda \cdot c' \cdot N_c$$

avec $N_{q\max} = 10^{3.04 \tan \phi'}$ (selon Tcheng)

$$N_c = (N_{q\max} - 1) \cot \phi'$$

$$\lambda = 1 + 0.3 \cdot \frac{B}{D} \quad \text{coefficients de forme}$$

- Résistance au frottement latéral unitaire q_s

$$q_s = \sigma'_v \cdot K \cdot \tan \delta$$

pieux forés : $K_a < K < K_0$

$$\delta = \phi'$$

pieux battus : $K_0 < K < K_p$

$$\delta = \frac{2}{3} \phi'$$

(béton)

$$\delta = \frac{1}{2} \phi'$$

(acier)

En pratique, il est fréquent d'utiliser des valeurs courantes de résistance au frottement latéral unitaire fonction du type de terrain.

- $R_a = Q_u = R_b + R_s = A_p q_p + U_p \cdot L \cdot q_s$

Capacité portante d'un pieu isolé : DTU

Sols cohérents (court terme)

- Résistance de pointe unitaire q_p

$$q_p = 7 \cdot \lambda \cdot C_u$$

avec $\lambda = 1 + 0.3 \cdot (B/D)$ coefficient de forme

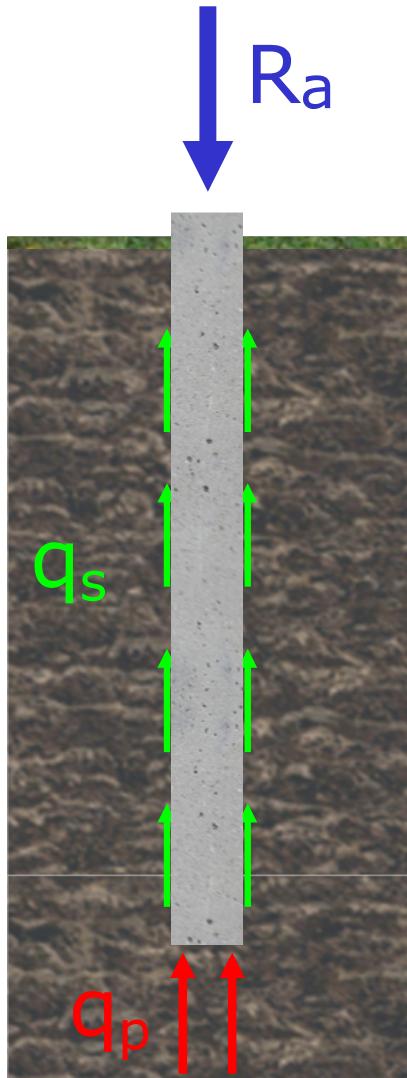
- Résistance au frottement latéral unitaire q_s

$$q_s = \beta \cdot C_u$$

pieux forés : $\beta = 0.5 \div 0.7$

pieux battus : $\beta = 0.7 \div 1.0$

- $R_a = Q_u = R_b + R_s = A_p q_p + U_p \cdot L q_s$

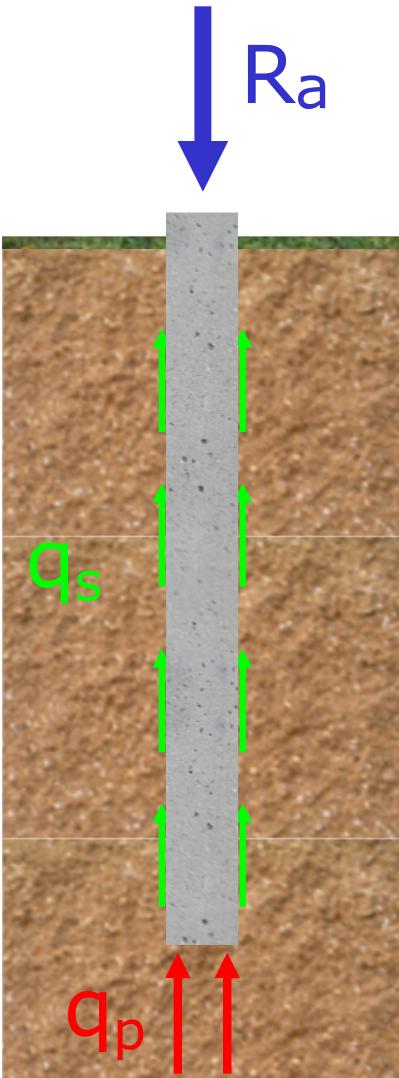


Capacité portante selon Lang & huder (ETHZ)

Sols pulvérulents (& Sols cohérents pour long terme)

- Résistance de pointe unitaire q_p

$$q_p = (c' \cdot N_c + \sigma' v, \text{pointe} \cdot N_q) \cdot \chi$$



avec

$$N_q = e^{\pi \tan \varphi' \tan^2 (\pi/4 + \varphi'/2)}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cotan \varphi'$$

χ facteur de forme et de profondeur

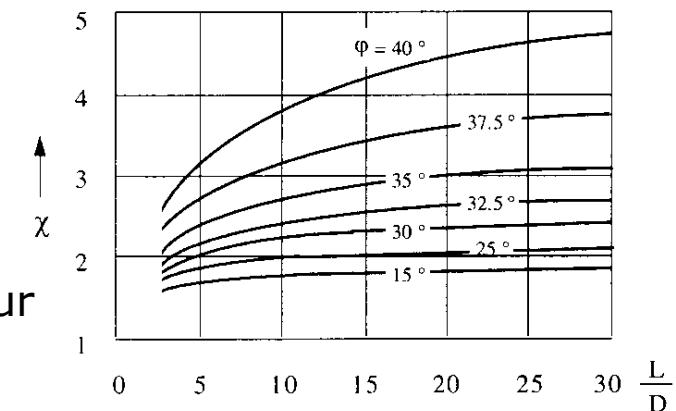
- Résistance au frottement latéral unitaire q_s

$$q_s = c' + \sigma' v, \text{moyen} \cdot K \cdot \tan \delta$$

pieux forés : $K \tan \delta \approx 0.4$

pieux battus : $K \tan \delta \approx 0.8$

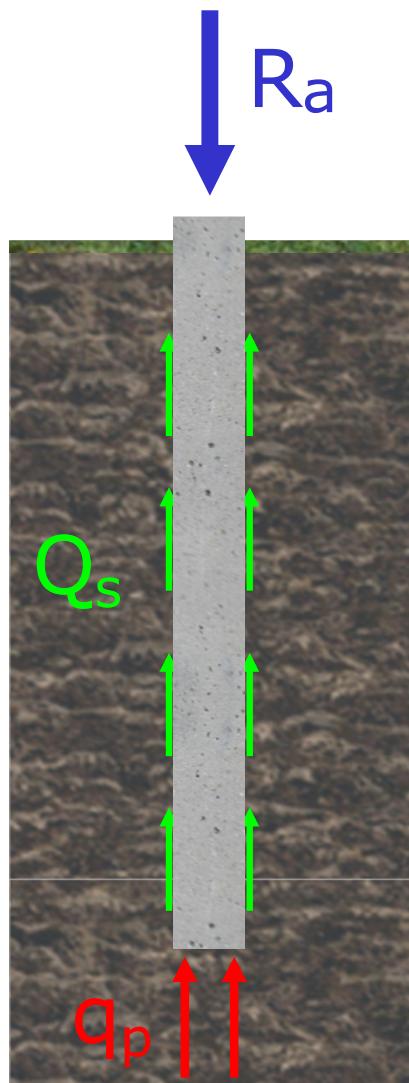
- $R_a = Q_u = R_b + R_s = A_p q_p + U_p L q_s$



Capacité portante selon Lang & huder (ETHZ)

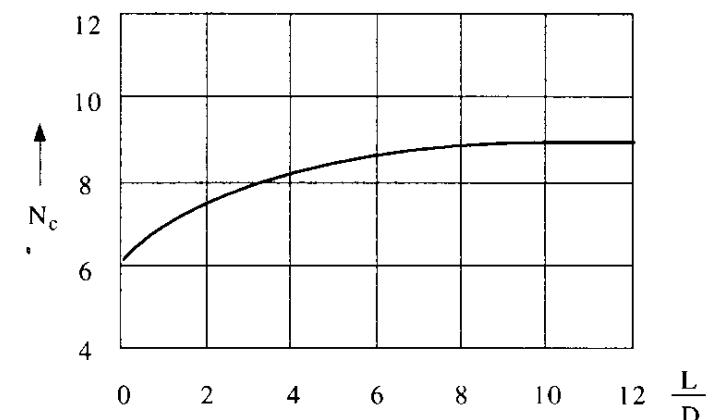
Sols cohérents (court terme)

- Résistance de pointe unitaire q_p



$$q_p = C_u \cdot N_c$$

N_c facteur de portance et de profondeur



- Résistance au frottement latéral unitaire q_s

$$q_s = \bar{s}$$

pieux forés : $s \approx 0.6 \div 0.9 C_u$

pieux battus : $s \approx C_u$

adhésion pieu - sol

$$R_a = Q_u = R_b + R_s = A_p q_p + U_p L q_s$$

Fondations sur pieux

1. Introduction

2. Calcul d'un pieu isolé

1. Introduction

2. Capacité portante

2.2.1 Mécanisme de rupture et facteurs influents

2.2.2 Calcul à partir d'essais de laboratoire

2.2.3 Calcul à partir d'essais in situ

2.2.4 Estimation par formules de battage

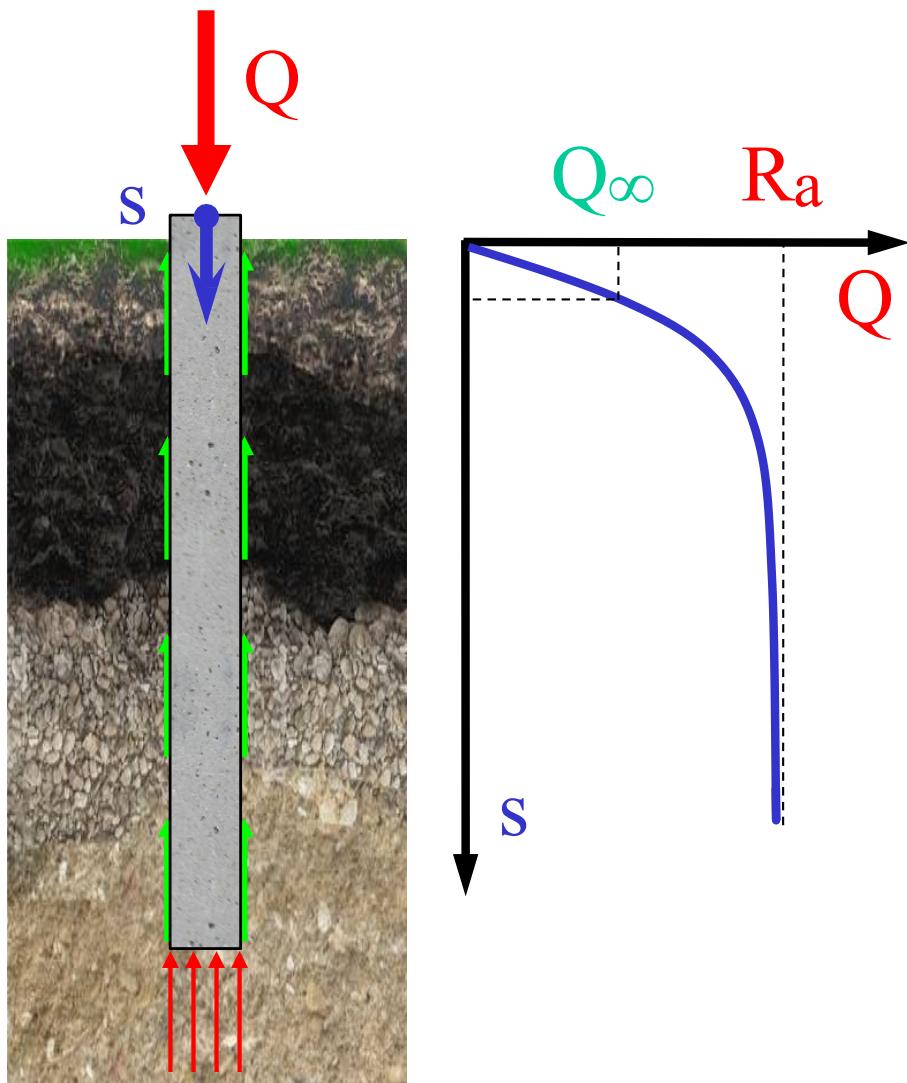
2.2.5 Vérification de la capacité portante

2.2.6 Exemples de calcul

Dispositifs d'essai et de mesure

**ESSAI DE CHARGEMENT
STATIQUE**

Buts de l'essai de chargement statique



- **détermination de la courbe charge - tassement**

Résistance ultime axiale externe :

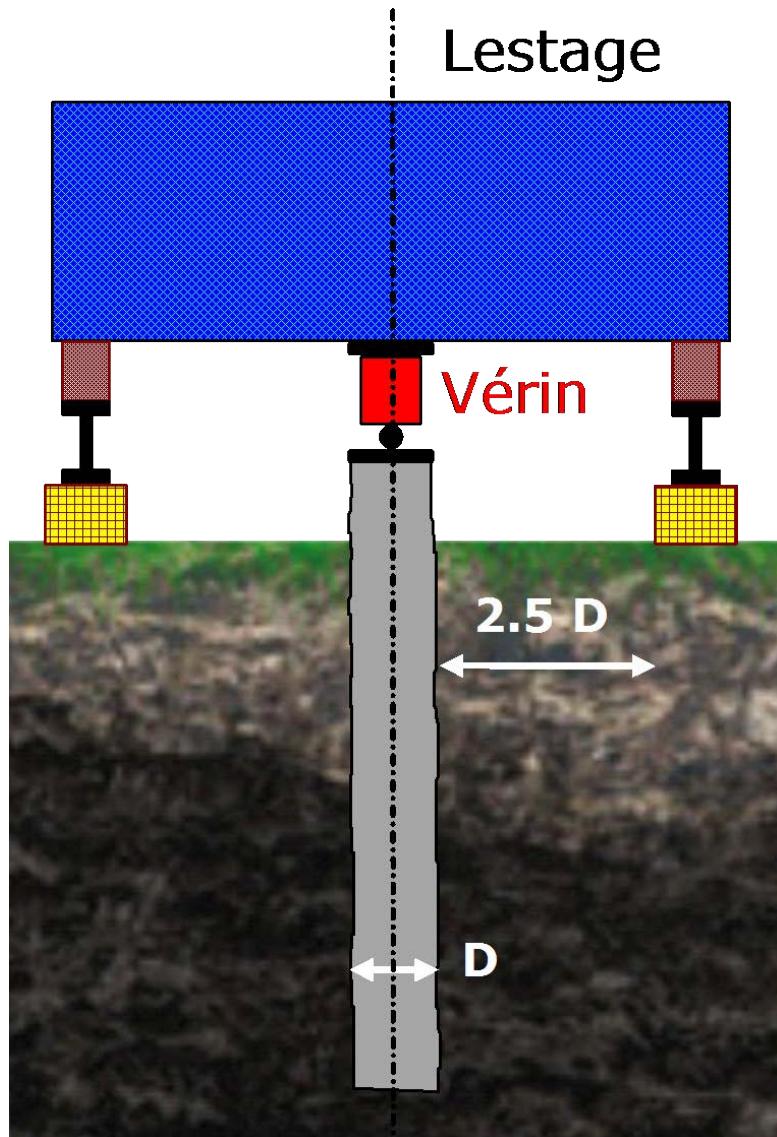
$$R_a \equiv Q_I \equiv Q_u$$

- $R_a \equiv Q$ telle que $k = k_{\text{crit}} = 2 \text{ mm}$
- $R_a \equiv Q$ telle que $s = D/10$

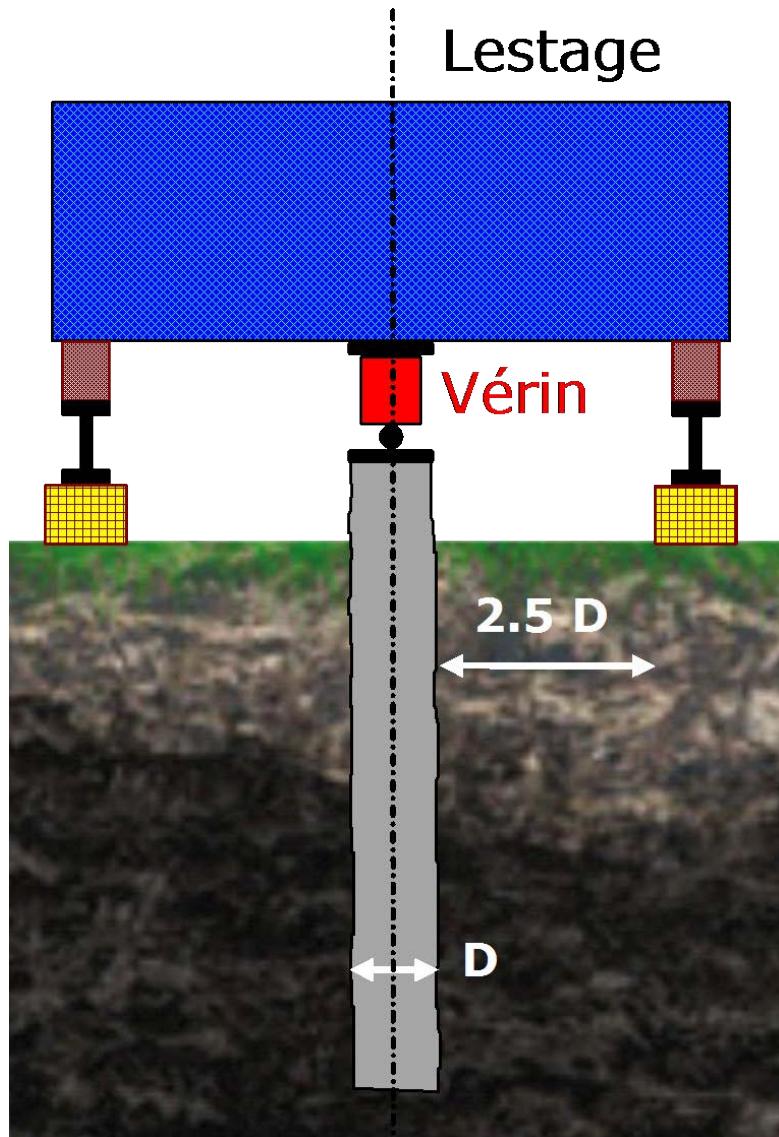
Tassement sous charge de service de longue durée : $Q_\infty \rightarrow s$

- **(et si possible) répartition des efforts dans le pieu**

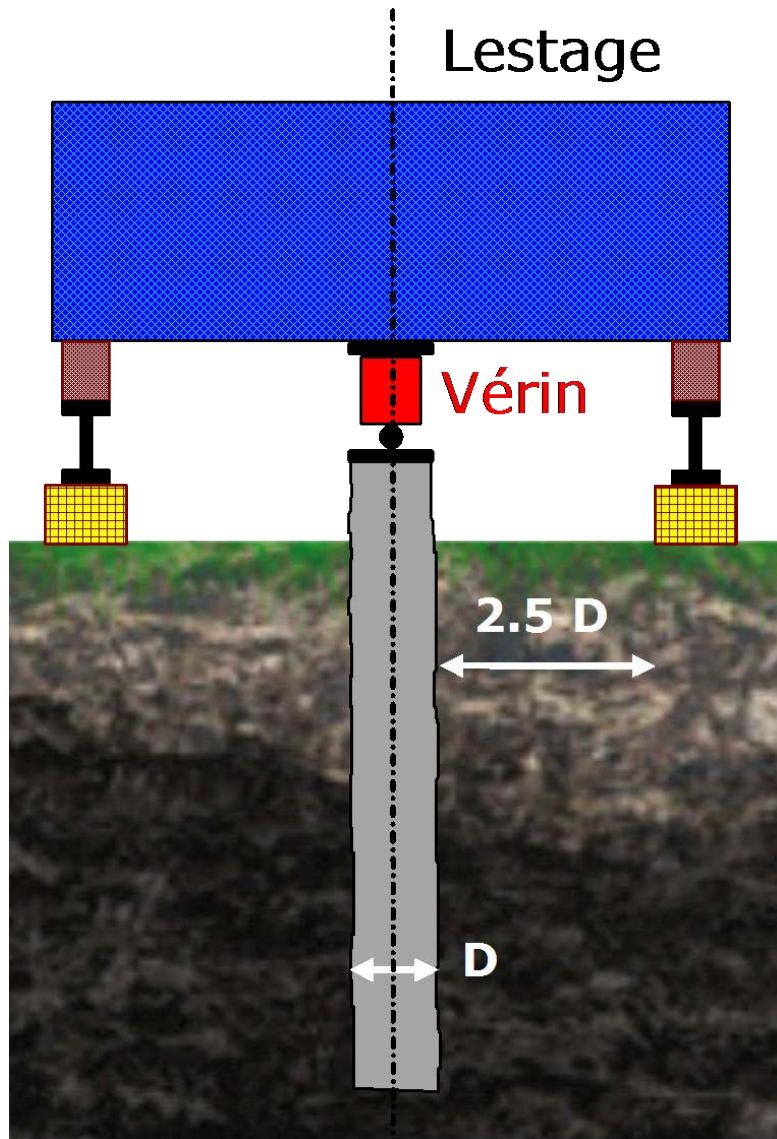
Chargement par lestage



Chargement par lestage



Chargement par lestage

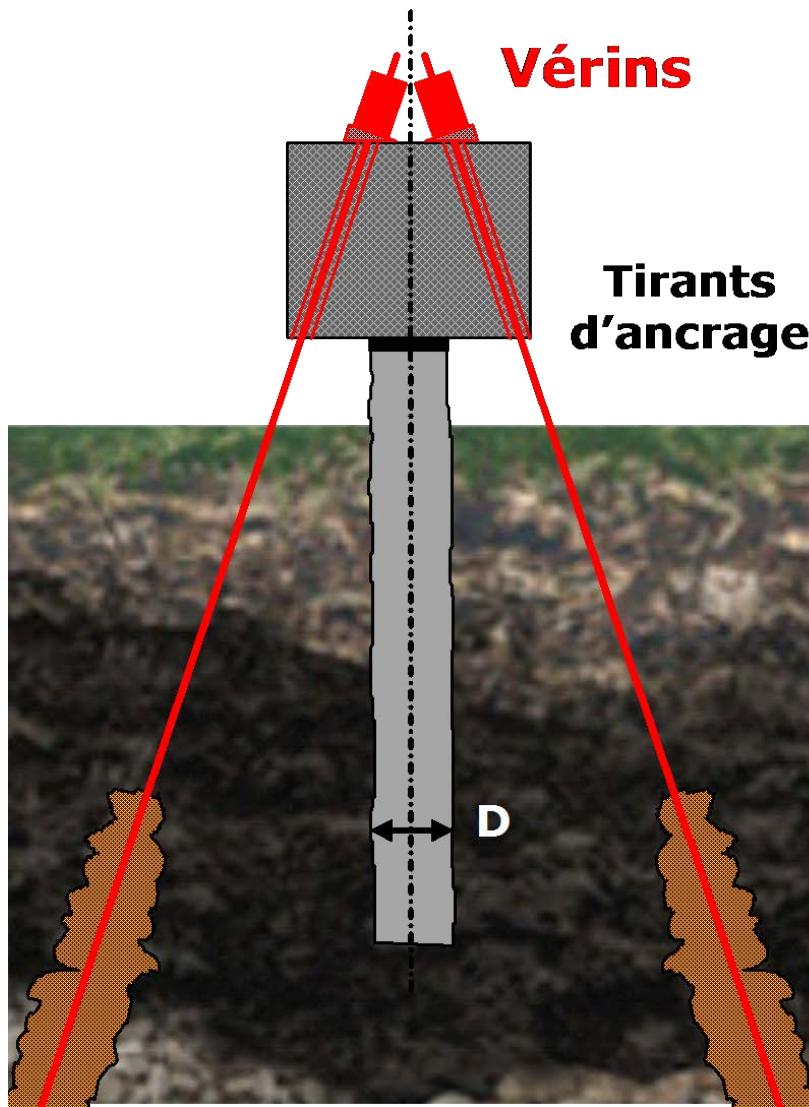


Chargement par lestage (kentledge)

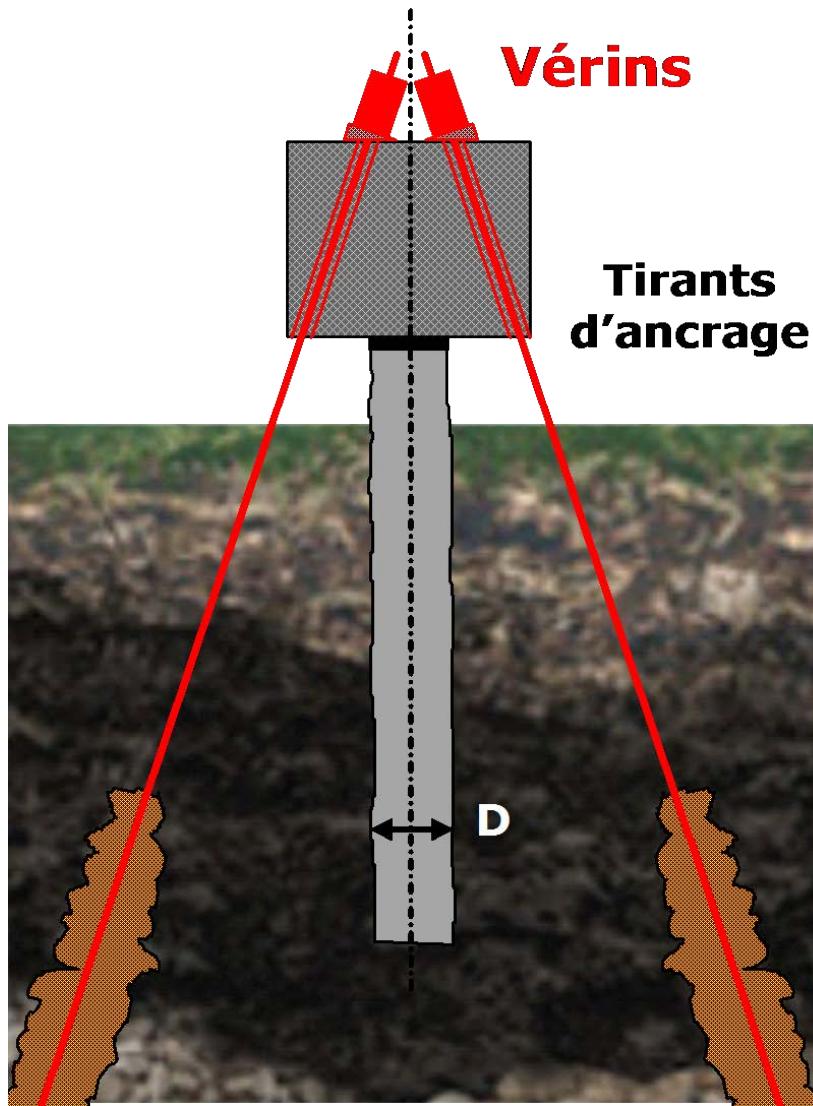


Basculement d'un massif de lestage à Newton Singapore
Vidéo de gerdesia25 sur www.youtube.com

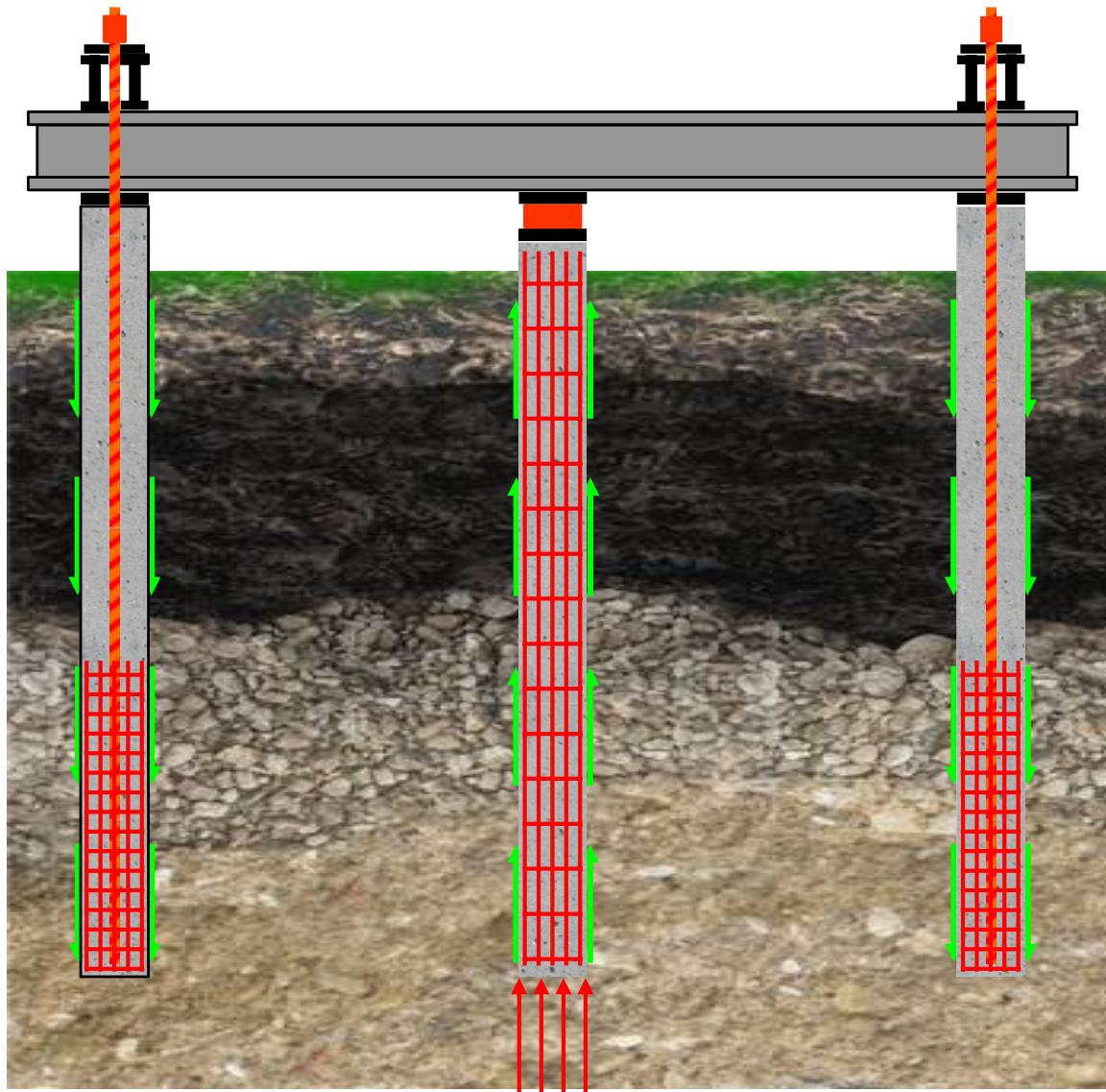
Chargement à l'aide de tirants d'ancrage



Chargement à l'aide de tirants d'ancrage

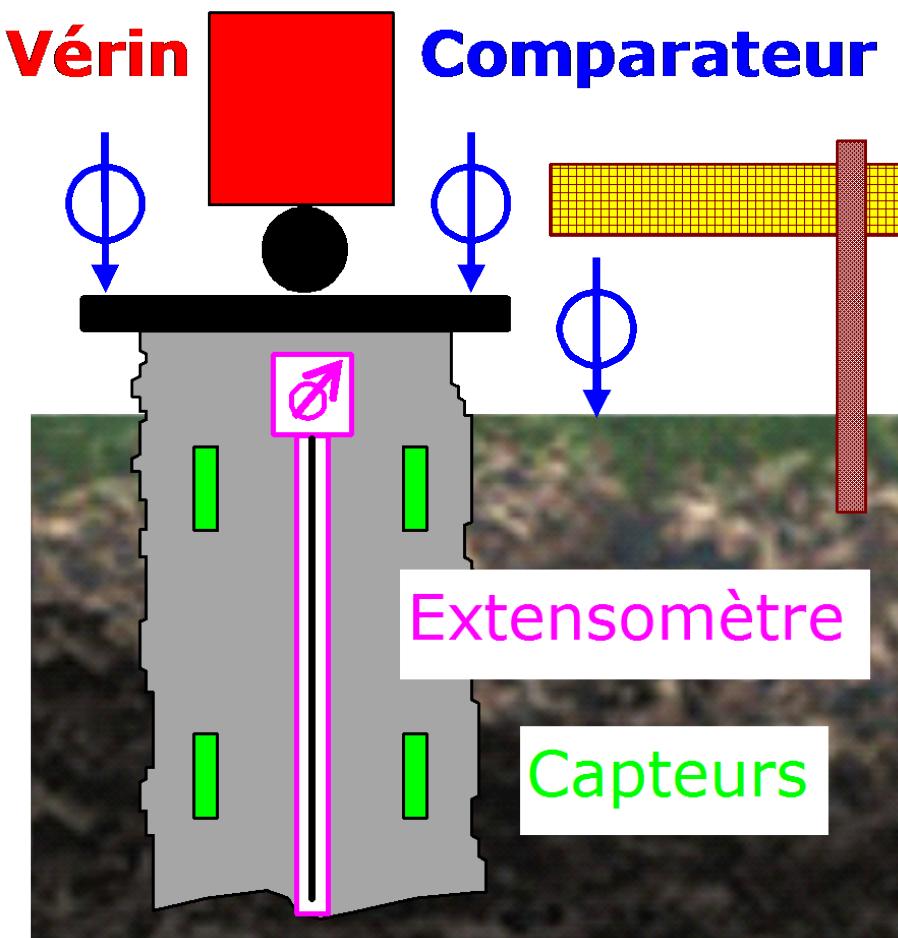


Chargement à l'aide de pieux en traction



Dispositif de mesure

But : - détermination de la courbe charge - tassement
- (et si possible) répartition des efforts dans le pieu



Vérin

Effort en tête de pieu

Niveau

Nivellement de la tête

Comparateurs

Tassement en tête

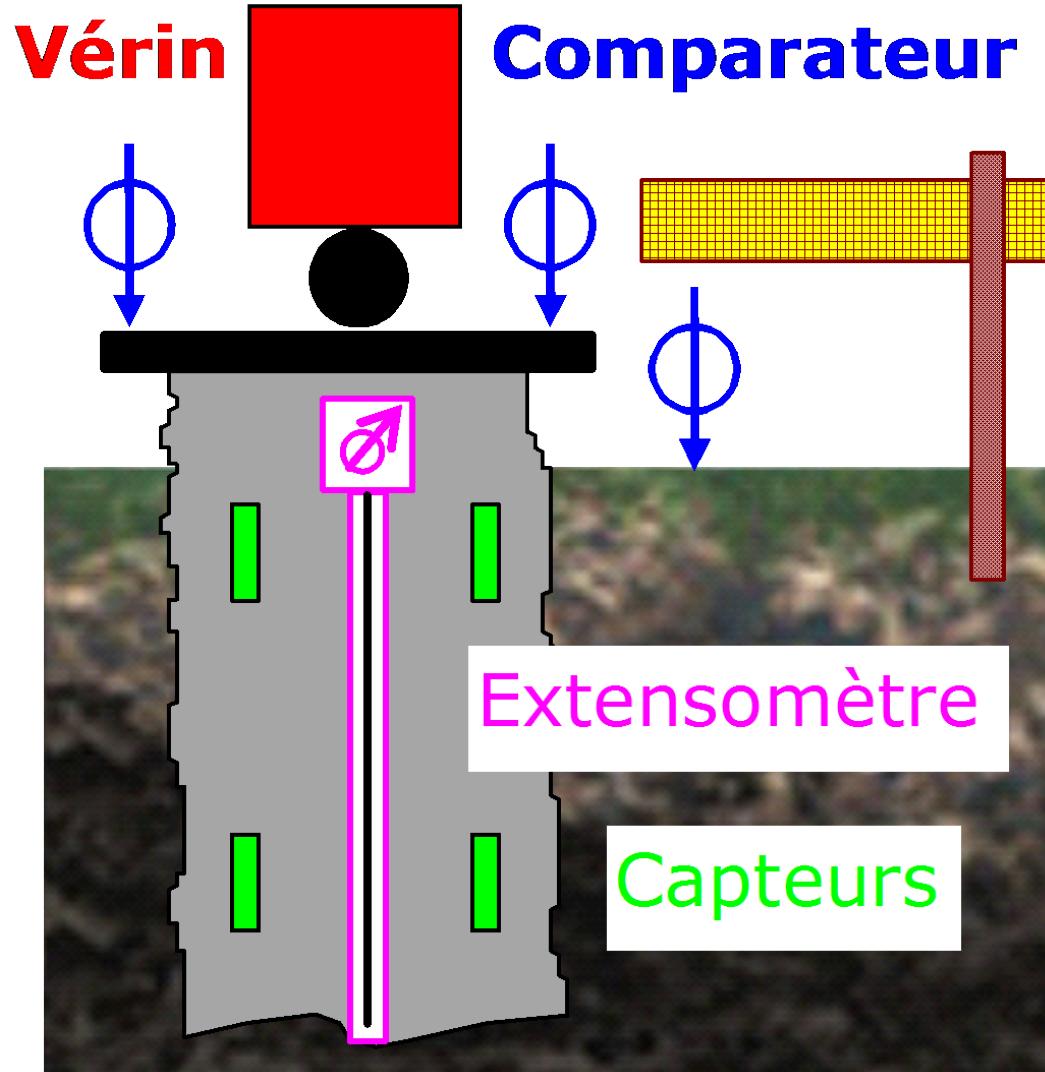
Tassement du sol

Extensomètre

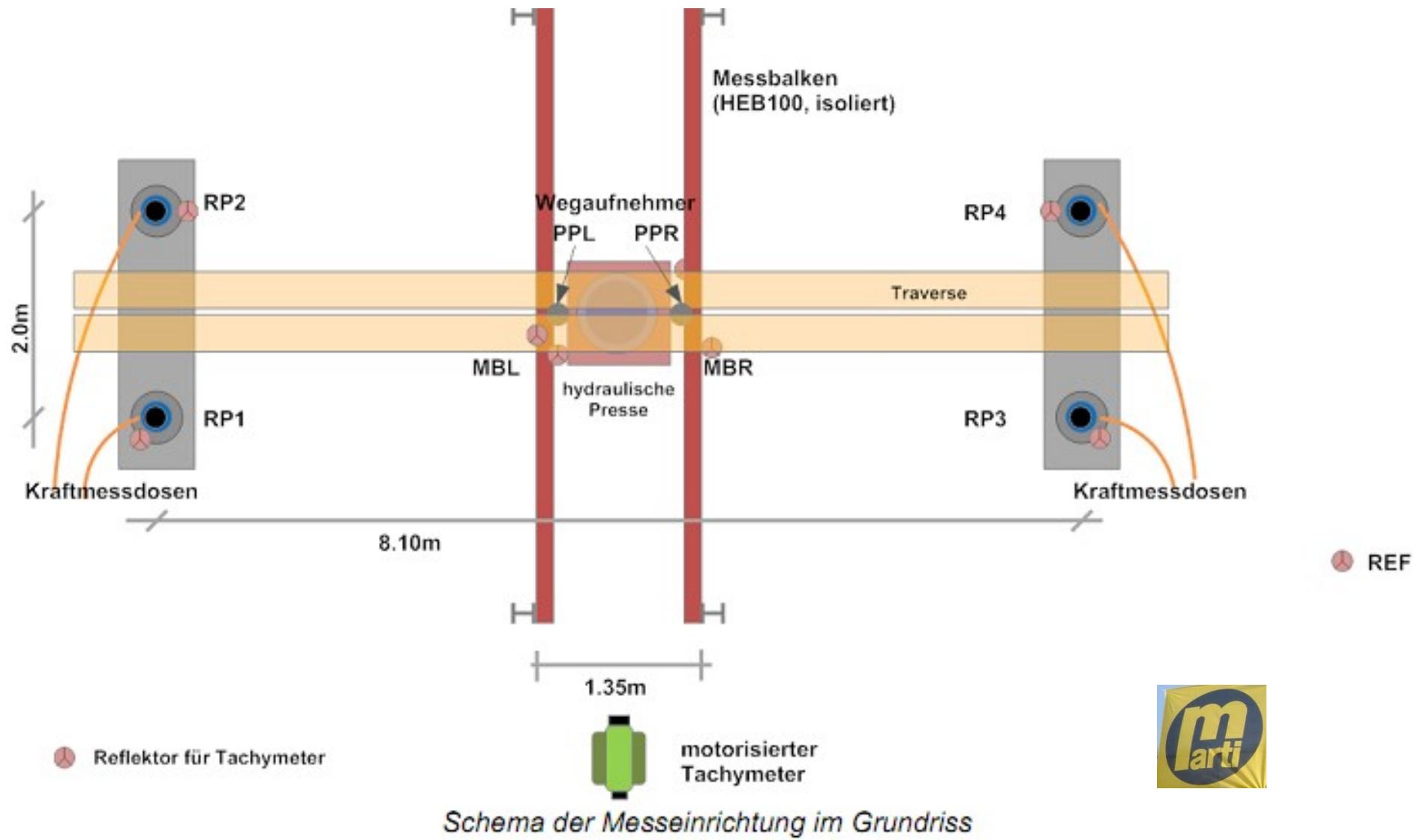
Déformations dans le pieu
⇒ répartition des efforts

Capteurs

Dispositif de mesure



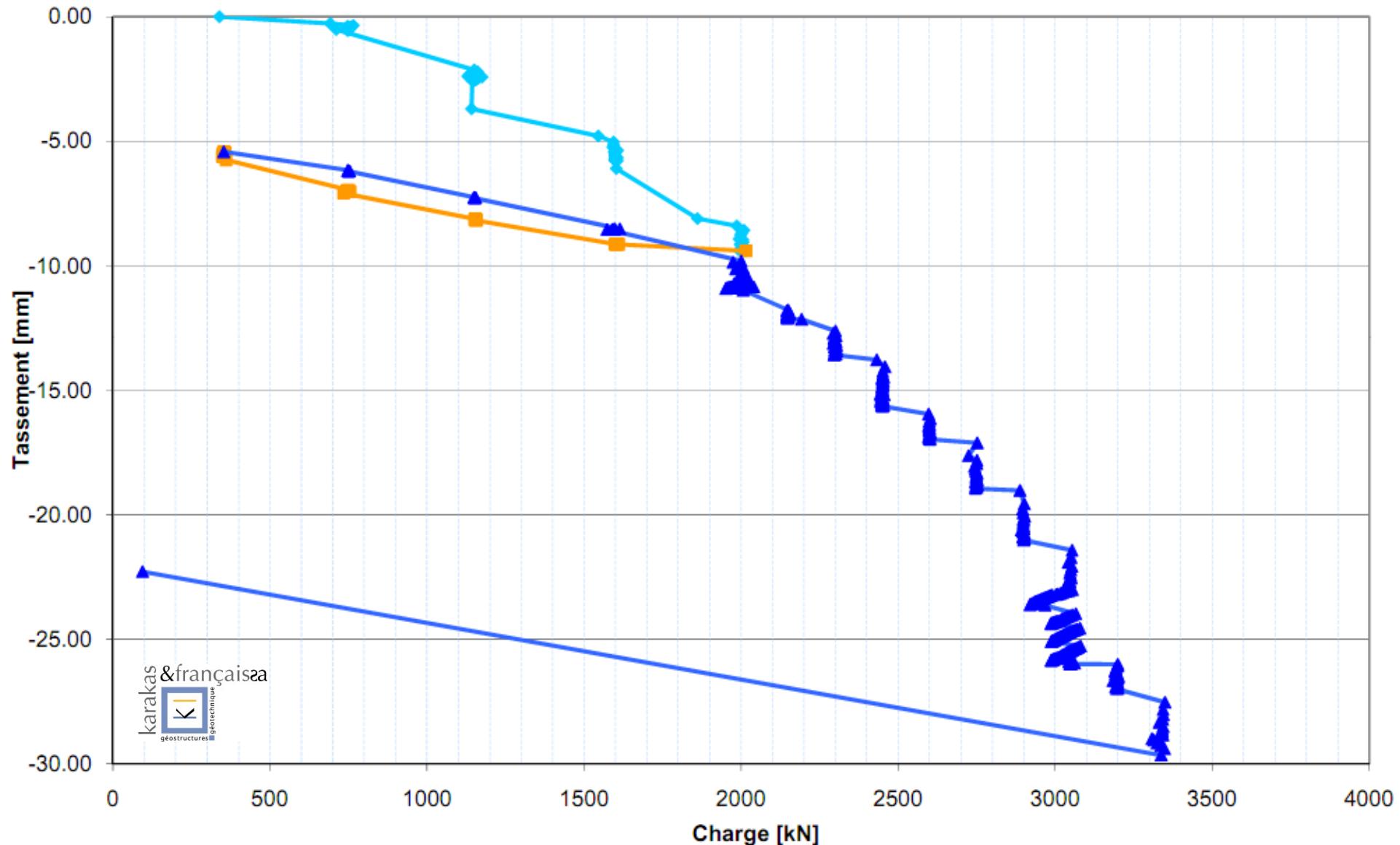
Dispositif de mesure (CCR – EPFL)



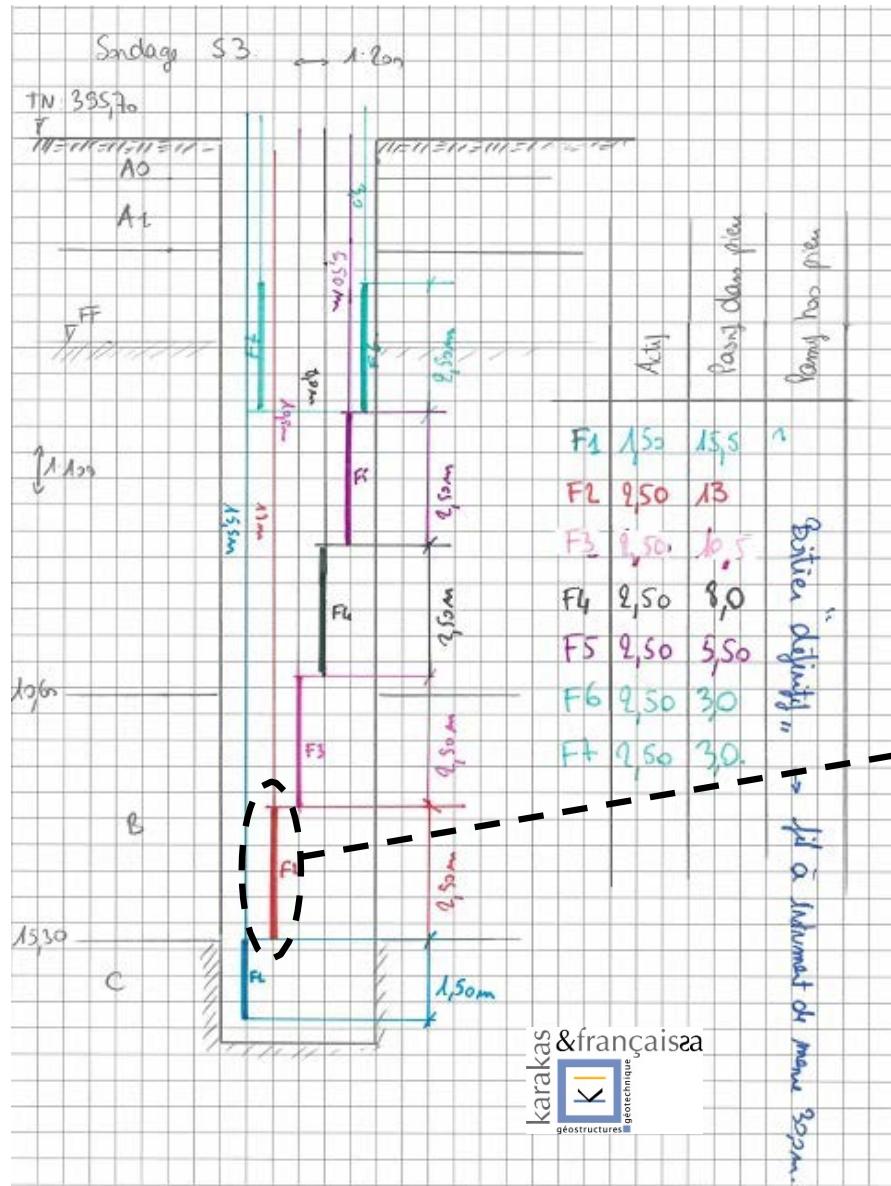
Dispositif de mesure (CCR – EPFL)



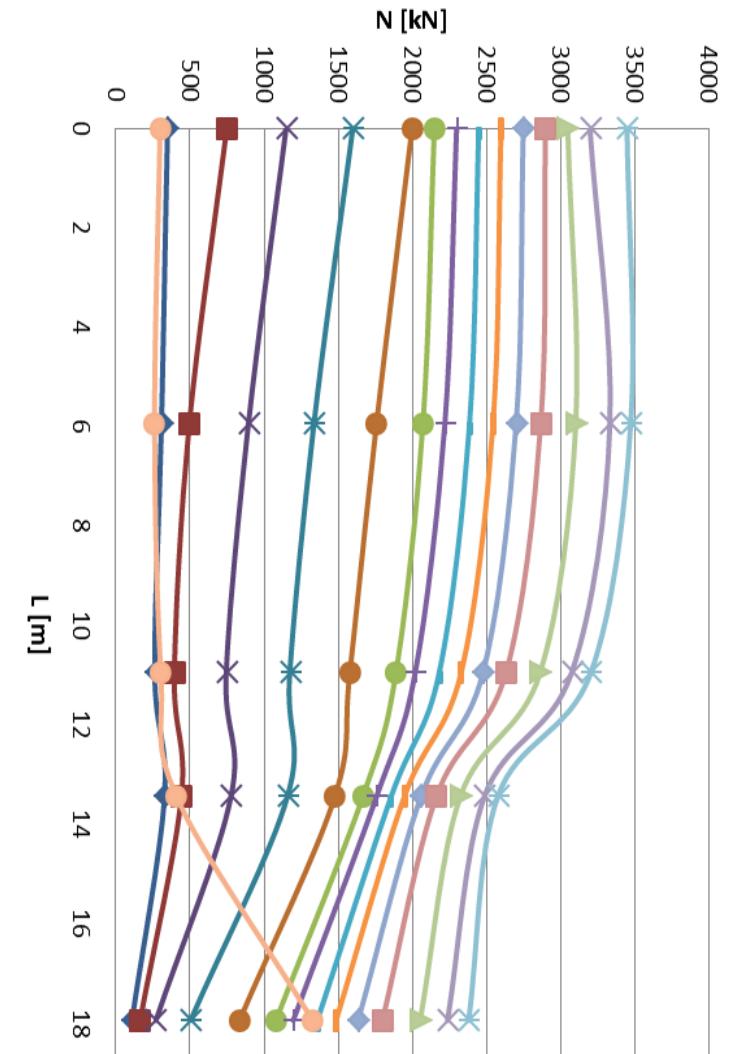
Courbe charge - tassement (CCR – EPFL)



Dispositif de mesure (CCR - EPFL)



Fibre optique



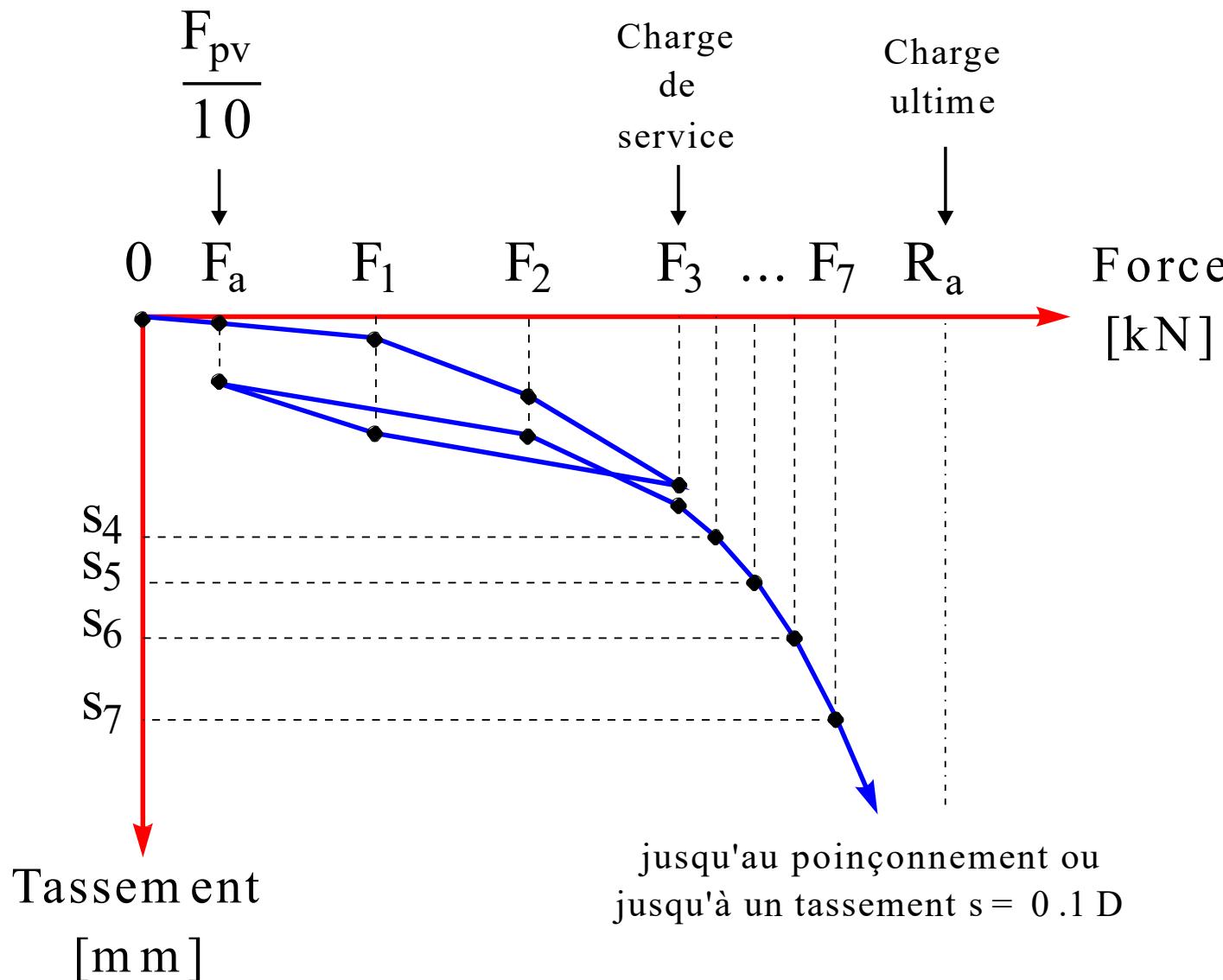
Effort en fonction de la profondeur

Essai de chargement statique

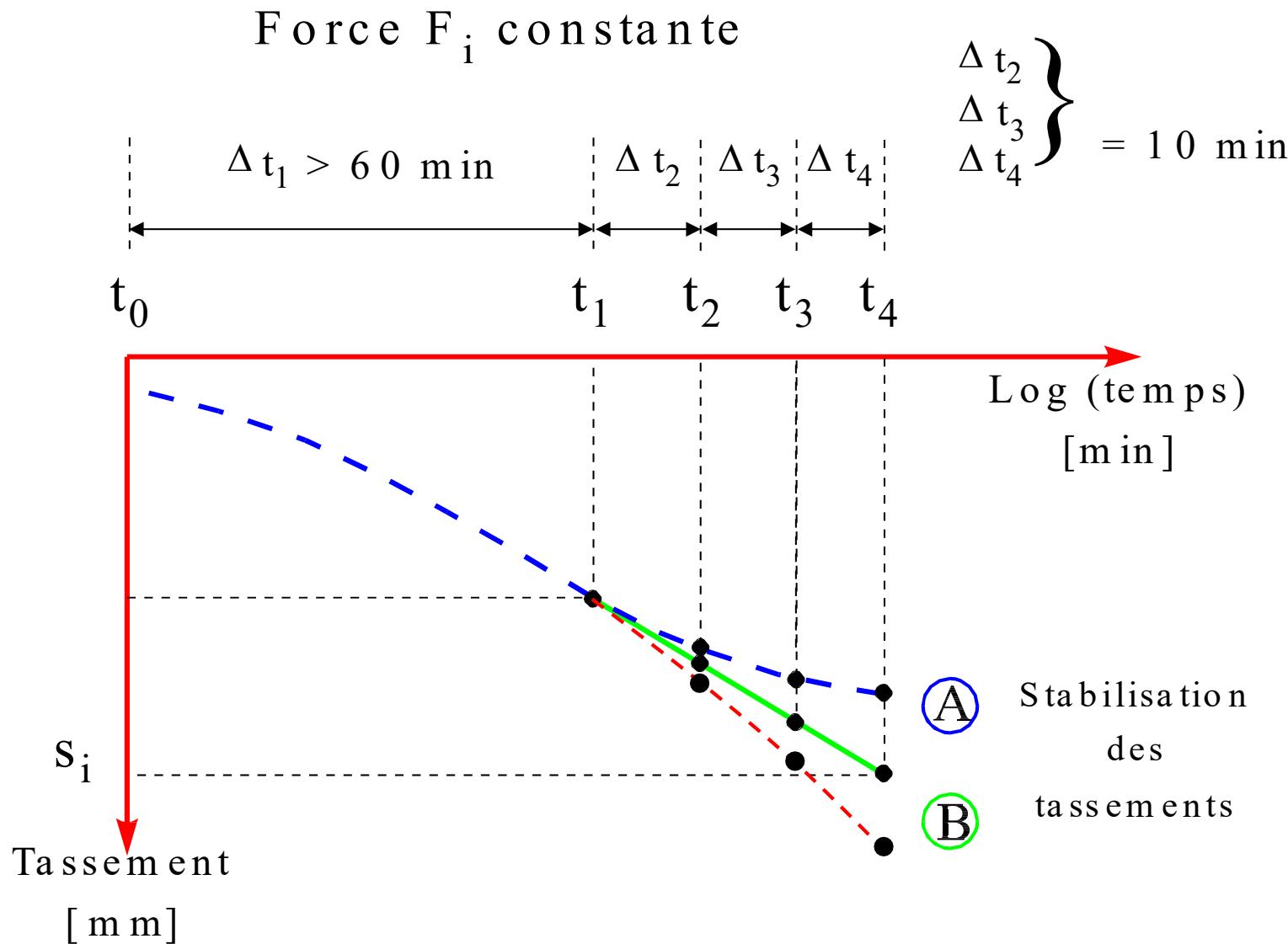
Déroulement de l'essai selon la SIA 267/1

Ouvrages géotechniques

Déroulement de l'essai de chargement statique (selon SIA 267/1)



Déroulement de l'essai de chargement statique (selon SIA 267/1)

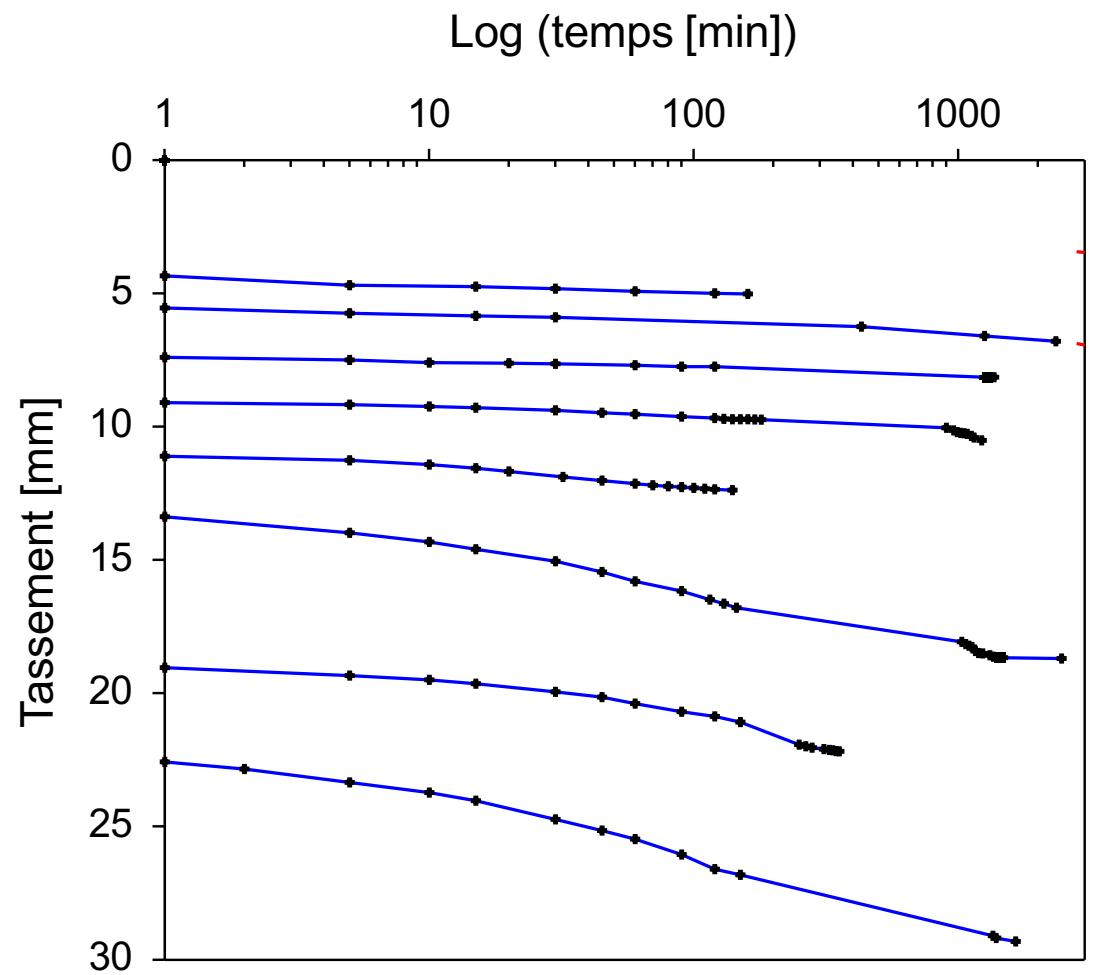
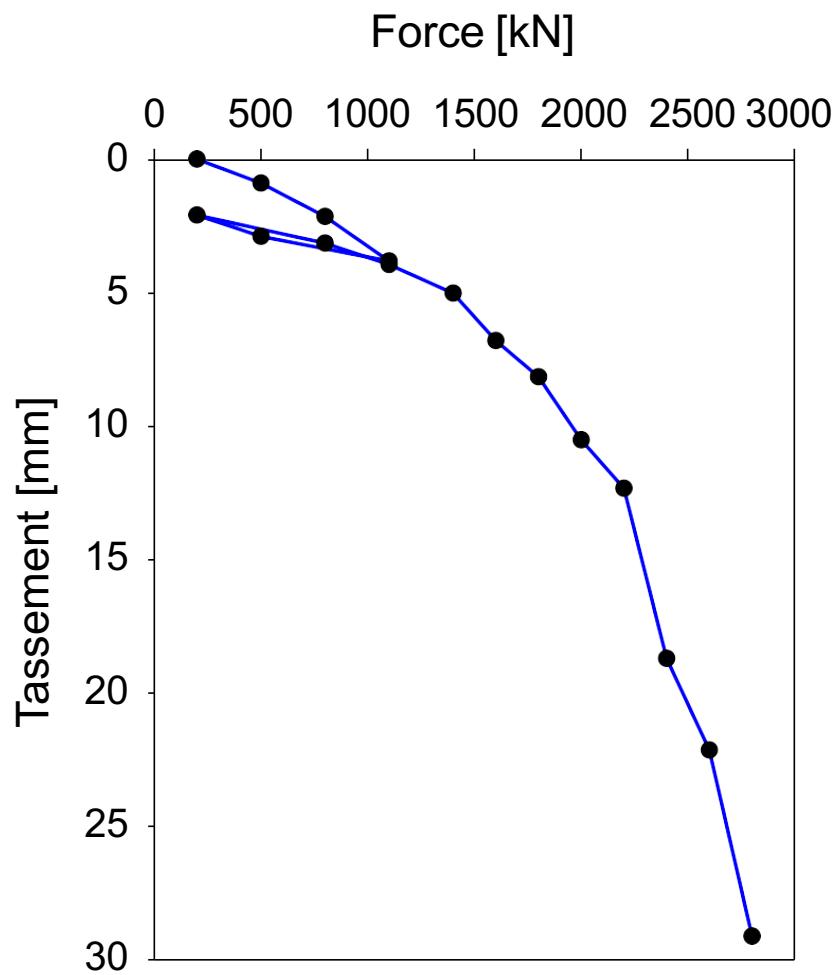


Essai de chargement statique

Exemple d'essai pour le centre Coop de Crissier

Données Bureau Karakas et Français

F = 2800 kN



$k > k_{crit} = 2\text{mm} \rightarrow R_a = 2800 \text{kN}$

Fondations sur pieux

1. Introduction
2. Calcul d'un pieu isolé
 1. Introduction
 2. Capacité portante
 - 2.2.1 Mécanisme de rupture et facteurs influents
 - 2.2.2 Calcul à partir d'essais de laboratoire
 - 2.2.3 Calcul à partir d'essais in situ
 - 2.2.4 Estimation par formules de battage
 - 2.2.5 Vérification de la capacité portante
 - 2.2.6 Exemples de calcul
 3. Tassement
 4. Vérification et contrôle
 5. Frottement négatif
3. Groupe de pieux

Fondations sur pieux

1. Introduction

2. Calcul d'un pieu isolé

1. Introduction

2. Capacité portante

2.2.4 Estimation par formules de battage

- Expression générale
- Hollandais et Crandall
- Hollandais modifiée et Stern
- Exemple d'application

2.3 Tassement

2.4 Vérification et contrôle

2.5 Frottement négatif

3. Groupe de pieux

Fondations sur pieux

1. Introduction

2. Calcul d'un pieu isolé

1. Introduction

2. Capacité portante

2.2.4 Estimation par formules de battage

- Expression générale
- Hollandais et Crandall
- Hollandais modifiée et Stern
- Exemple d'application

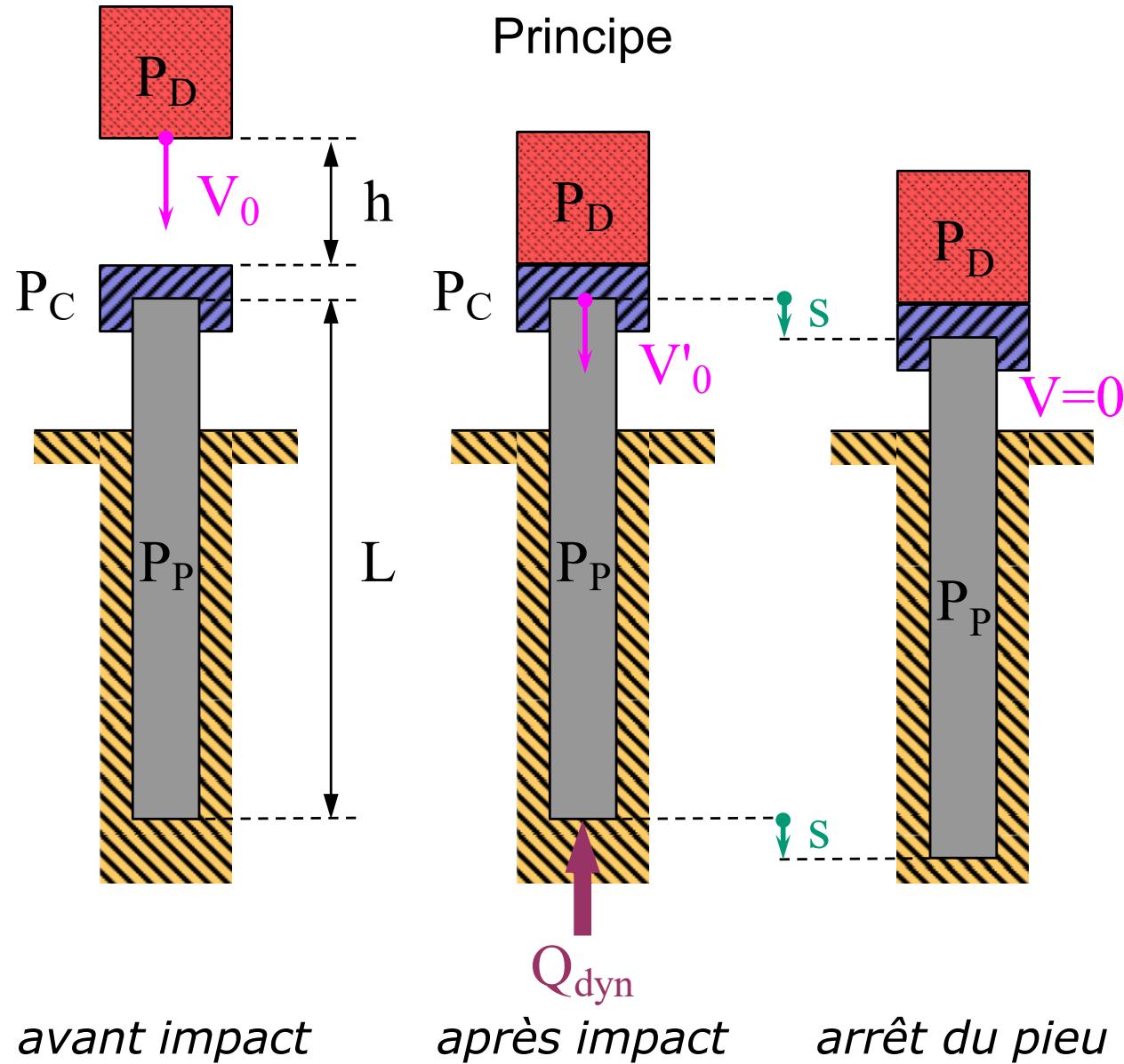
2.3 Tassement

2.4 Vérification et contrôle

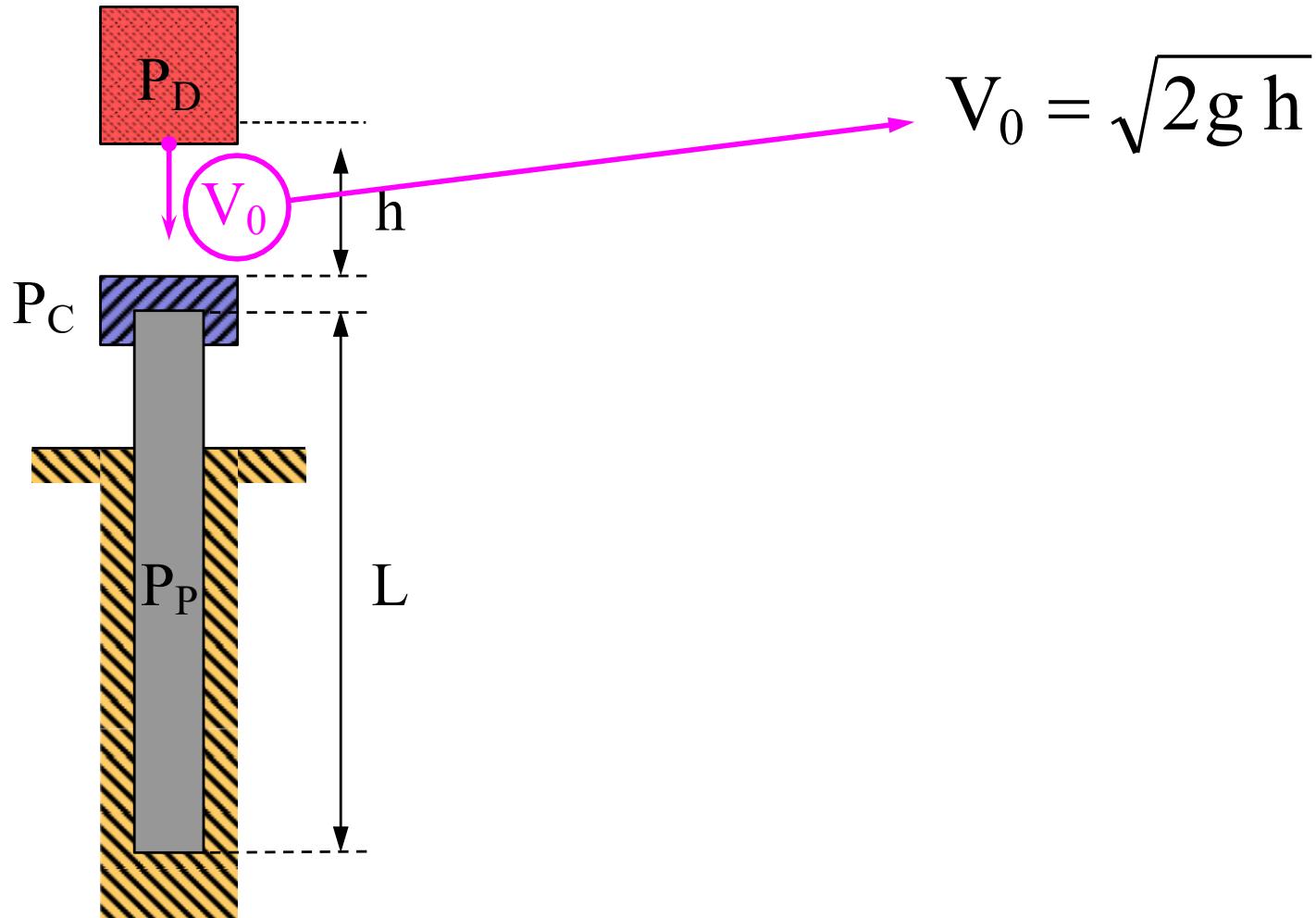
2.5 Frottement négatif

3. Groupe de pieux

Principe et hypothèses de la formule des Hollandais

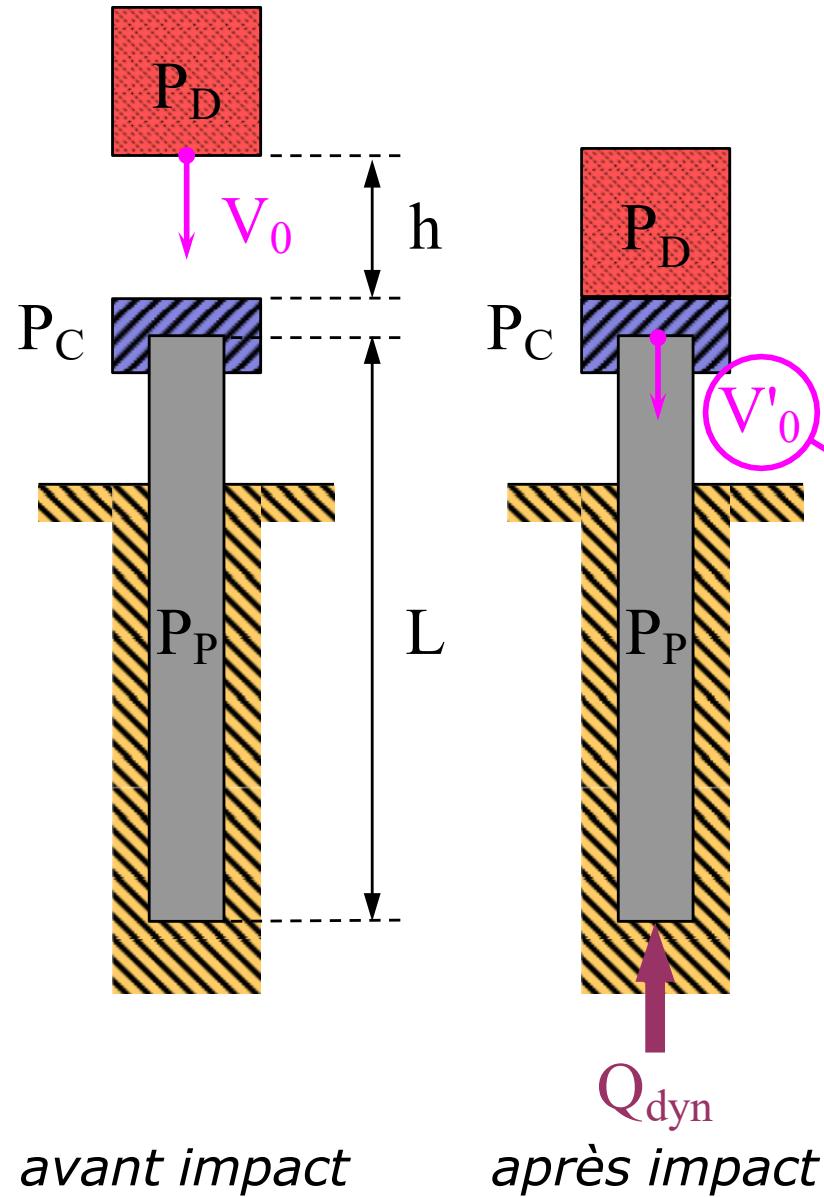


Situation avant impact



avant impact

Situation après impact

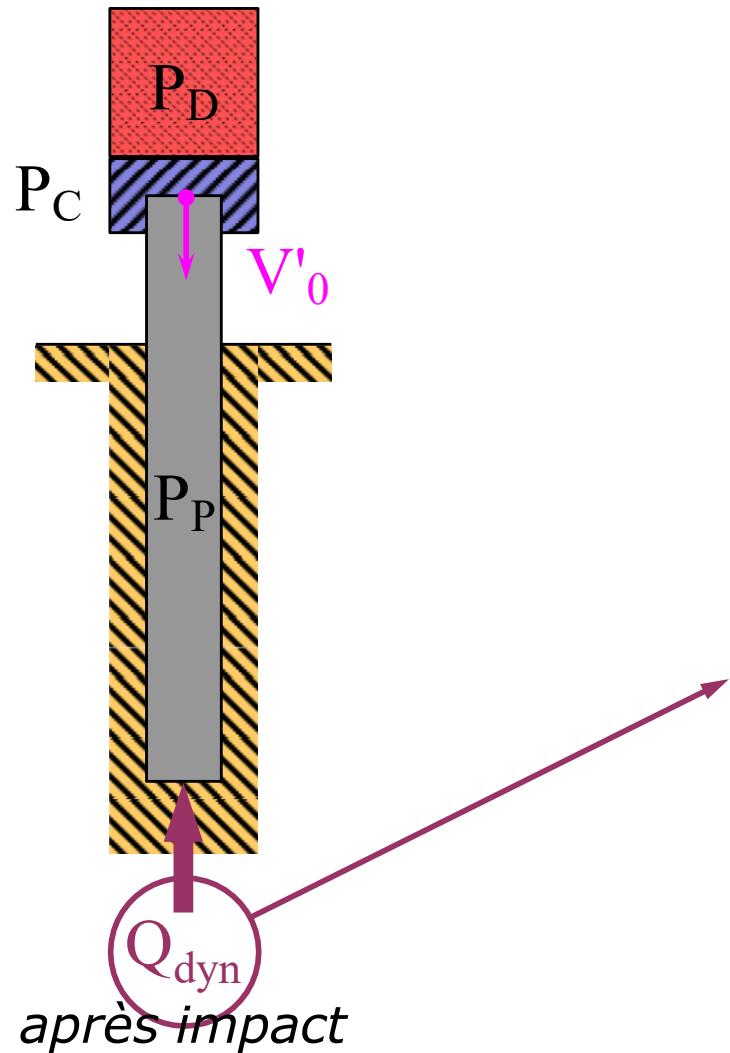


Conservation de la quantité de mouvement
+ Hypothèse d'un choc mou

$$P_D V_0 = (P_D + P_P + P_C) V'_0$$

$$V'_0 = V_0 \cdot \frac{P_D}{P_D + P_P + P_C}$$

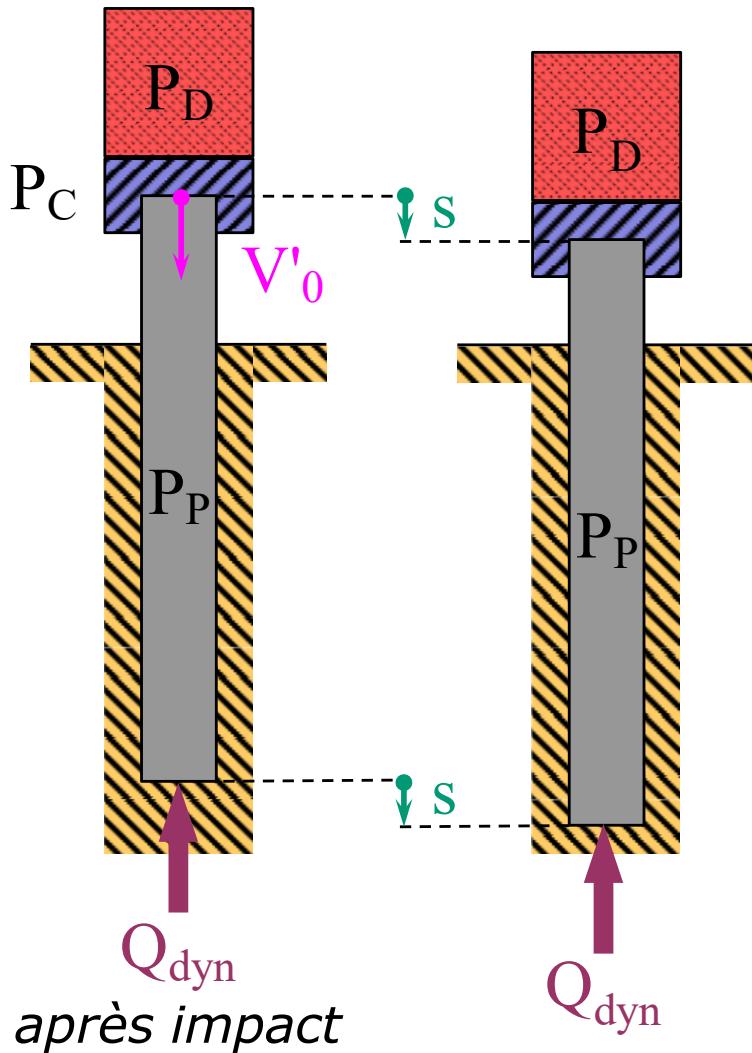
Décélération du pieu après impact



Réaction dynamique du sol à l'enfoncement

$$a = - \frac{Q_{dyn}}{(P_D + P_P + P_C)/g}$$

Décélération du pieu après impact



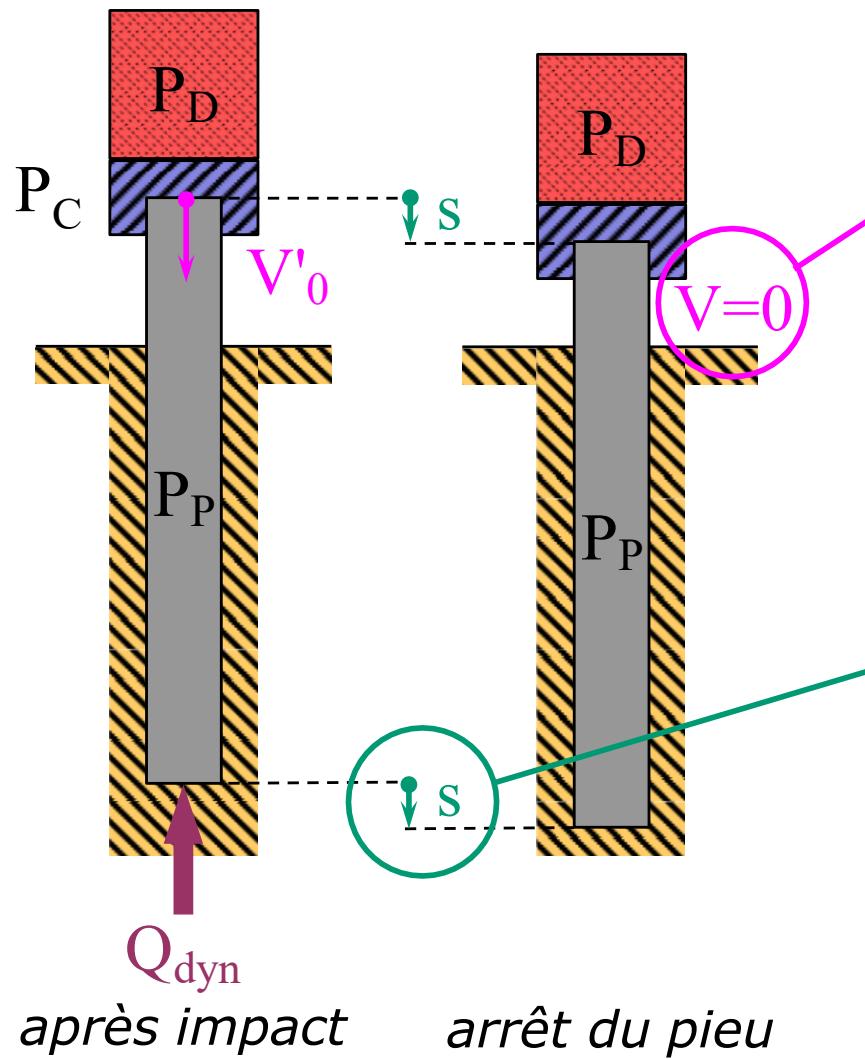
$$a = - \frac{Q_{dyn}}{(P_D + P_P + P_C)g}$$

Intégration de l'équation du mouvement

$$V(t) = V'_0 - \frac{g Q_{dyn}}{P_D + P_P + P_C} \cdot t$$

$$s(t) = V'_0 \cdot t - \frac{1}{2} \frac{g Q_{dyn}}{P_D + P_P + P_C} \cdot t^2$$

Arrêt du pieu



$V = 0$ (arrêt du pieu)

après $t = V'_0 \cdot \frac{P_D + P_P + P_C}{g Q_{dyn}}$

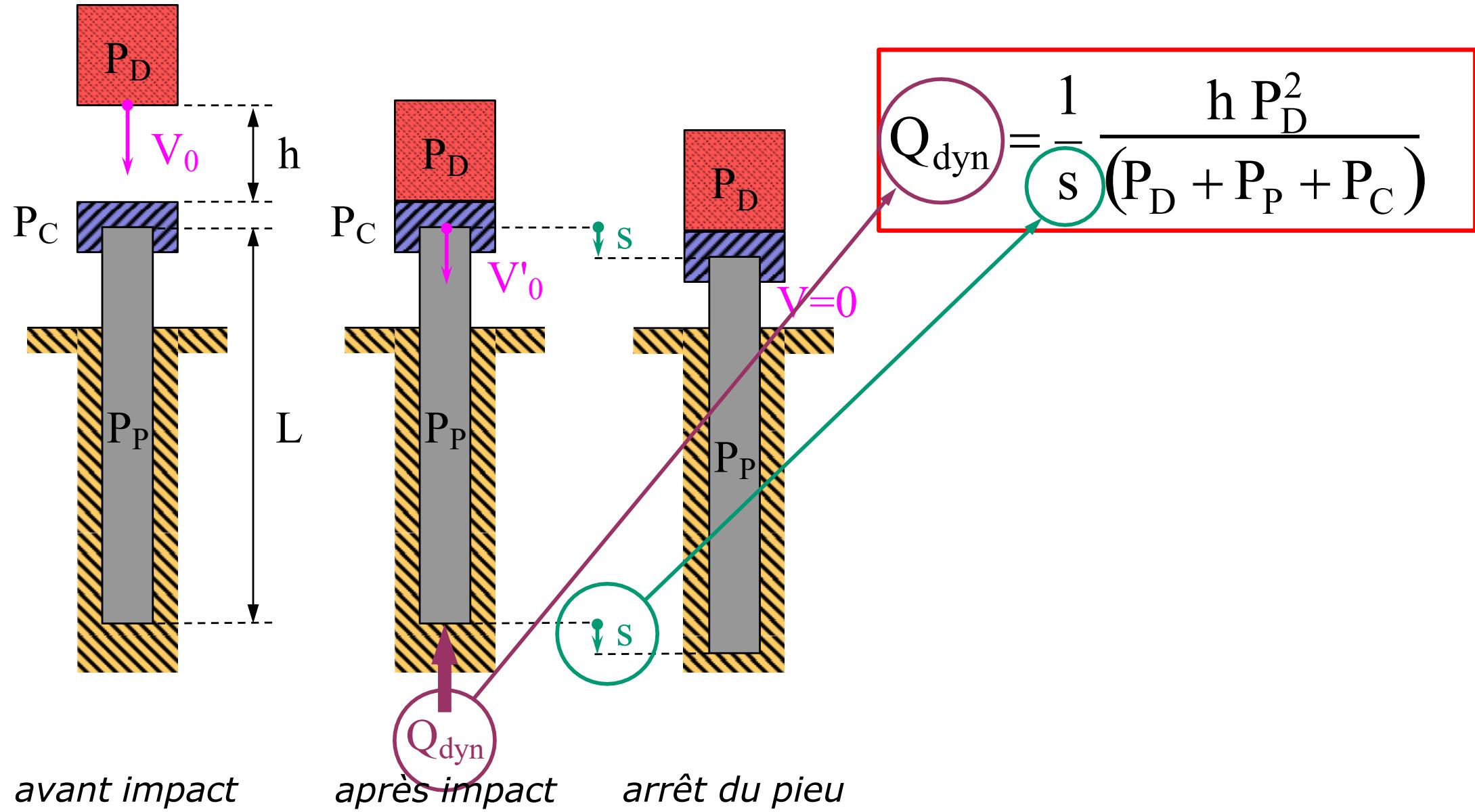
Dès lors ...

$$s = \frac{1}{2} V'_0^2 \cdot \frac{P_D + P_P + P_C}{g Q_{dyn}}$$

ou encore ...

$$s = \frac{h P_D^2}{(P_D + P_P + P_C) Q_{dyn}}$$

Formule de battage des Hollandais



Formule de battage des Hollandais

$$Q_{\text{dyn}} = \frac{1}{s} \frac{h P_D^2}{(P_D + P_P + P_C)}$$

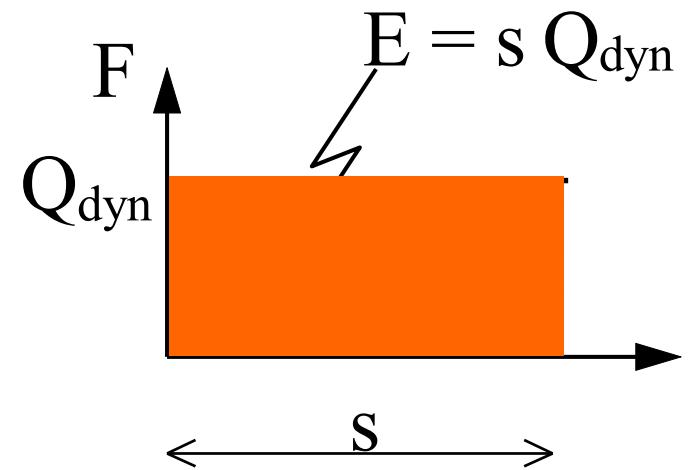
Réécriture en termes énergétiques :

$$P_D h = Q_{\text{dyn}} \cdot s \cdot \frac{P_D + P_P + P_C}{P_D}$$

$$P_D h = Q_{\text{dyn}} \cdot s + Q_{\text{dyn}} \cdot s \cdot \frac{P_P + P_C}{P}$$

Energie de battage Energie "utile" Perte d'énergie due au choc

$$P_D h = Q_{\text{dyn}} \cdot s + P_D h \frac{P_P + P_C}{P_D + P_P + P_C}$$



Fondations sur pieux

1. Introduction

2. Calcul d'un pieu isolé

1. Introduction

2. Capacité portante

2.2.4 Estimation par formules de battage

- Expression générale
- Hollandais et Crandall
- Hollandais modifiée et Stern
- Exemple d'application

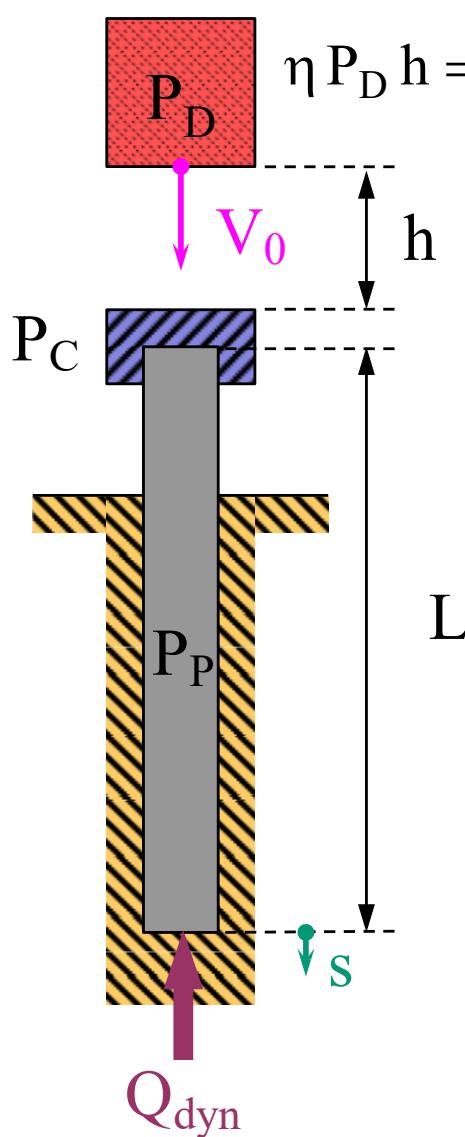
3. Tassement

4. Vérification et contrôle

5. Frottement négatif

3. Groupe de pieux

Équation générale



$$\eta P_D h = [Q_d - (P_D + P_P + P_C)] s + \eta P_D h \frac{(P_P + P_C)(1 - e^2)}{(P_D + P_P + P_C)} + \mu Q_d^2 \frac{L}{E_p A_p} + C_3 Q_d$$

$\eta P_D h$: Energie de battage

η : rendement de battage ($0.75 < \eta < 1$)

$[Q_d - (P_D + P_P + P_C)] s$: Energie utile

part de l'énergie induisant l'enfoncement du pieu

$\eta P_D h^{(...)} /_{(...)}$: Perte d'énergie due au choc

e : coefficient de restitution de Newton

$e = 1$: choc élastique

$e = 0$: choc mou

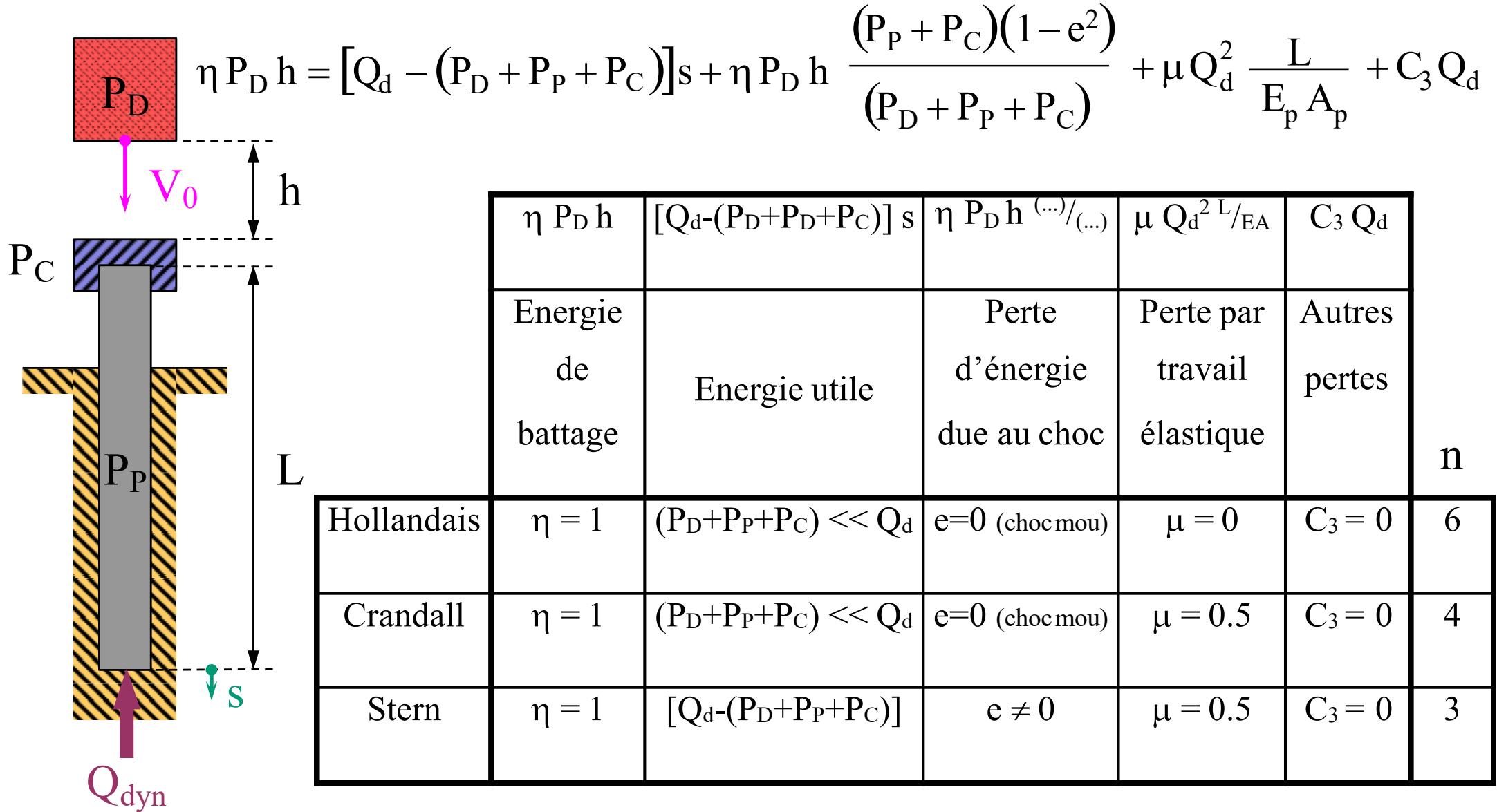
$\mu Q_d^2 \frac{L}{E_p A_p}$: Perte due à la déformation élastique (pieu+sol)

μ : coeff. de déformation élastique du pieu ($\mu = 0.5$)

$C_3 Q_d$: Autres pertes

vibrations, bruit, chaleur, endommagements divers...

Équation générale



Fondations sur pieux

1. Introduction

2. Calcul d'un pieu isolé

1. Introduction

2. Capacité portante

2.2.4 Estimation par formules de battage

- Expression générale
- Hollandais et Crandall
- Hollandais modifiée et Stern
- Exemple d'application

3. Tassement

4. Vérification et contrôle

5. Frottement négatif

3. Groupe de pieux

Diagramme de battage : Application

Projet

- Charge statique admissible Q_{adm} par pieu: 800 kN

$$Q_{adm} = 800 \text{ kN}$$

Pieu en BA préfabriqué

- 12 m de longueur
- 40 x 40 cm de section
- 40 GN/m² de module

$$P_p = 48 \text{ kN}$$

$$E_p = 40 \text{ GN/m}^2$$

$$P_D = 40 \text{ kN}$$

$$h = 1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$$

$$P_C = 4 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{2} (P_p + P_C) < P_D < (P_p + P_C) \quad \text{OK}$$

$$Q_{adm} = Q_{dyn} / 4 \rightarrow Q_d = 3200 \text{ kN}$$

Critère de refus

- Capacité portante dynamique Q_d d'après Crandall = 3200 kN

$$s = \frac{1}{Q_{dyn}} \frac{h P_D^2}{(P_D + P_p + P_C)} - \frac{s_0}{2}$$

- avec tassement élastique calculé $s_0 = 8.1 \text{ mm}$

→ enfoncement permanent (refus) sous un coup de mouton $s = 1.38 \text{ mm}$

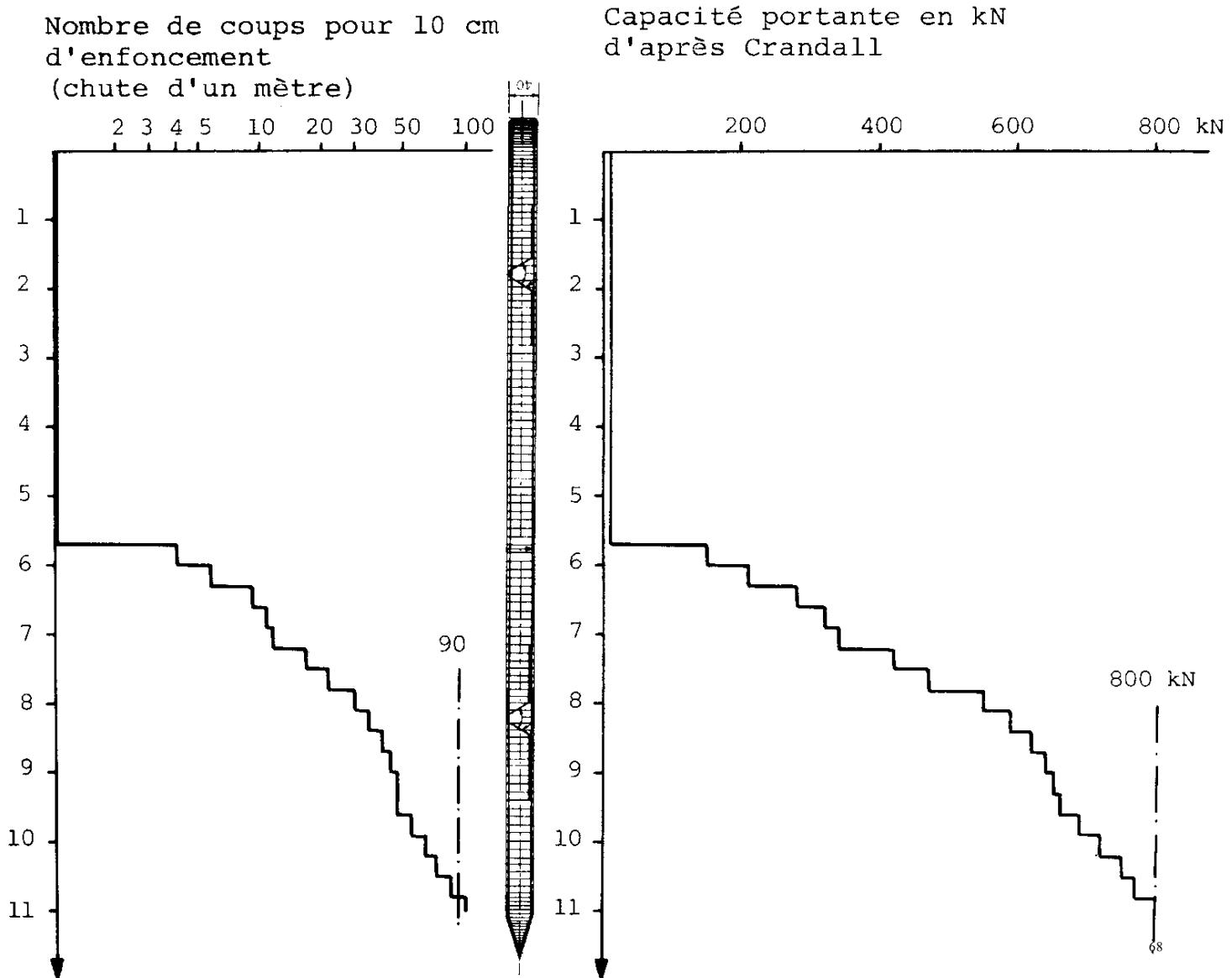
- avec tassement élastique mesuré $s_0 = 9 \text{ mm}$

→ enfoncement permanent (refus) sous un coup de mouton $s = 0.93 \text{ mm}$

→ Critère de refus adopté par l'entreprise : $s < 1.15 \text{ mm} / \text{coup} \Leftrightarrow 90 \text{ coups} / 10 \text{ cm}$

Diagramme de battage :Application

- Pieu en BA préfabriqué
- 12 m de longueur
- 40 x 40 cm de section
- Battage
- mouton à chute libre de 40 kN
- hauteur de chute de 1 m
- casque en acier avec coussin de bois de 4 kN
- Critère de refus adopté
- $s < 1.15 \text{ mm / coup}$
- $\Leftrightarrow > 90 \text{ coups / 10 cm}$
- Arrêt du battage lorsqu'il faut plus de 90 coups pour enfoncer le pieu de 10 cm



Fondations sur pieux

1. Introduction

2. Calcul d'un pieu isolé

1. Introduction

2. Capacité portante

2.2.1 Mécanisme de rupture et facteurs influents

2.2.2 Calcul à partir d'essais de laboratoire

2.2.3 Calcul à partir d'essais in situ

2.2.4 Estimation par formules de battage

2.2.5 Vérification de la capacité portante

2.2.6 Exemples de calcul

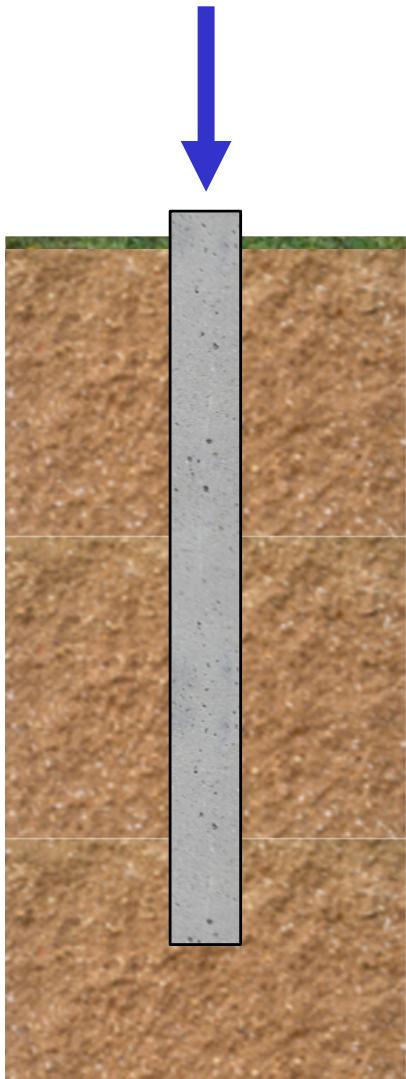
3. Tassement

4. Vérification et contrôle

5. Frottement négatif

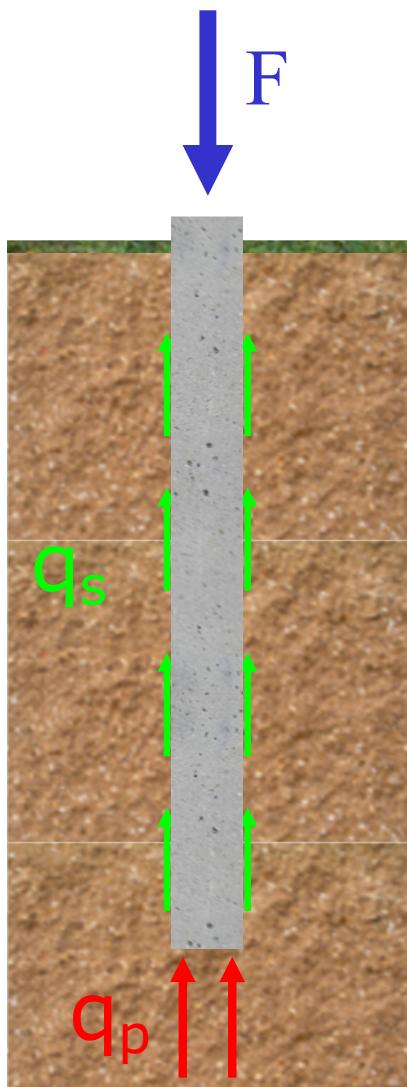
3. Groupe de pieux

Sources d'incertitude



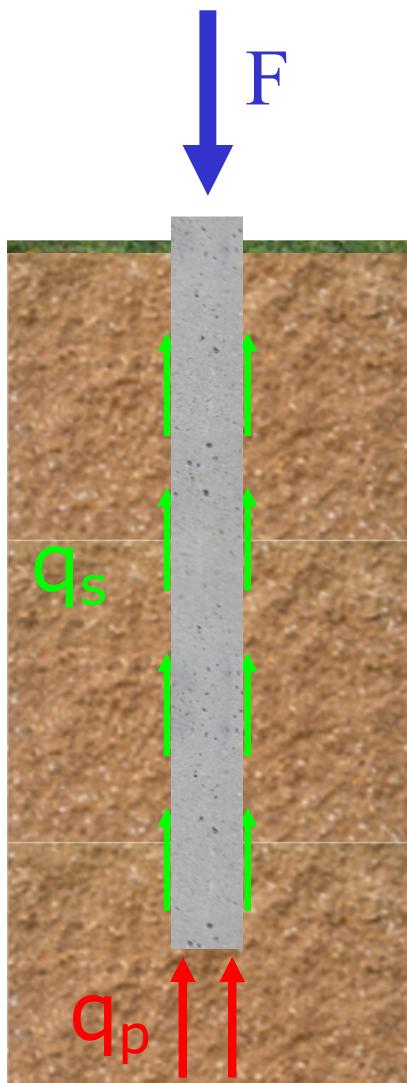
- Actions (sollicitations)
- Caractéristiques du terrain
- Matériau constitutif du pieu
- Qualité d'exécution du pieu
- Mécanisme de rupture et modèle de calcul

Vérification de la sécurité structurale externe selon la SIA 267



| $F_d = \gamma_F \cdot F_k$ | Facteur de charge γ_F | Type 1 | Type 2 | Type 3 |
|---|--|----------------------|----------------------|----------------------|
| Actions permanentes - à effet défavorable - à effet favorable | $\gamma_{G, \text{sup}} =$ $\gamma_{G, \text{inf}} =$ | 1,10 0,90 | 1,35 0,80 | 1,00 1,00 |
| Actions variables - en général - charges dues au trafic routier - charges dues au trafic ferroviaire | $\gamma_Q =$ $\gamma_Q =$ $\gamma_Q =$ | 1,50 1,50 1,45 | 1,50 1,50 1,45 | 1,30 1,30 1,25 |
| <i>Actions du sol de fondation</i> Poids des terres - à effet défavorable - à effet favorable | $\gamma_{G, \text{sup}} =$ $\gamma_{G, \text{inf}} =$ | 1,10 0,90 | 1,35 0,80 | 1,00 1,00 |
| Poussée des terres - à effet défavorable - à effet favorable | $\gamma_{G, Q, \text{sup}} =$ $\gamma_{G, Q, \text{inf}} =$ | 1,35 0,80 | 1,35 0,70 | 1,00 1,00 |
| Pression hydraulique - à effet défavorable - à effet favorable | $\gamma_{G, Q, \text{sup}} =$ $\gamma_{G, Q, \text{inf}} =$ | 1,05 0,95 | 1,20 0,90 | 1,00 1,00 |

Vérification de la sécurité structurale externe selon la SIA 267



$$E_d \leq R_{a,d} = \frac{\eta_a \cdot R_{a,k}}{\gamma_{M,a}}$$

$R_{a,d}$: valeur de calcul de la résistance ultime externe du pieu

$R_{a,k}$: valeur caractéristique de la résistance externe du pieu

η_a : facteur de conversion tenant compte des incertitudes de détermination de la résistance externe

$\gamma_{M,a}$: coefficient de résistance pour la résistance externe tenant compte des incertitudes suivantes :

- variations des propriétés du terrain dans la zone concernée par rapport aux valeurs caractéristiques admises
 - pertes minimes de résistance se produisant lors de l'exécution
 - imprécisions d'exécution inhérentes à la méthode d'exécution
- Rem. : Il est admis que les pieux sont exécutés selon les règles de l'art. Une limitation de la capacité portante due à une exécution déficiente n'est pas couverte par le facteur de résistance $\gamma_{M,a}$*
- imprécisions du modèle de résistance

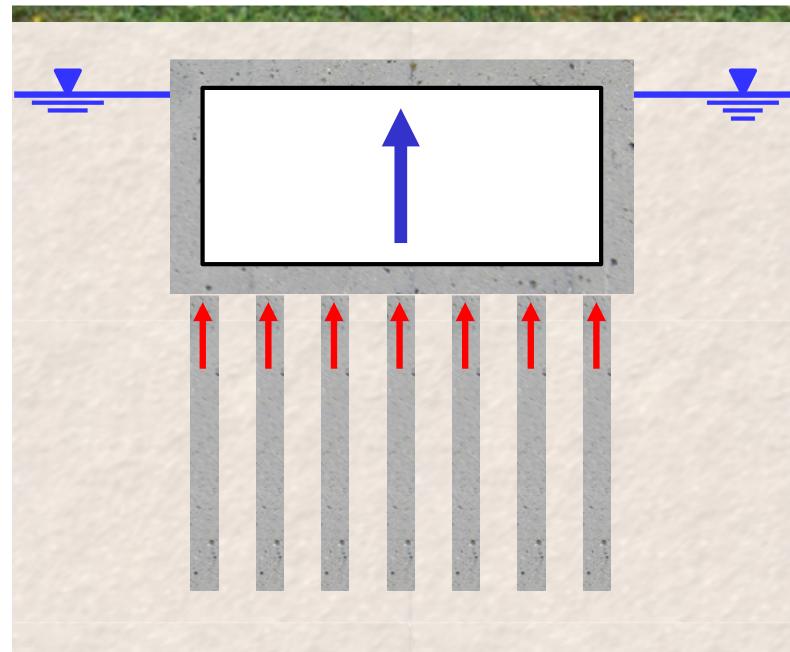
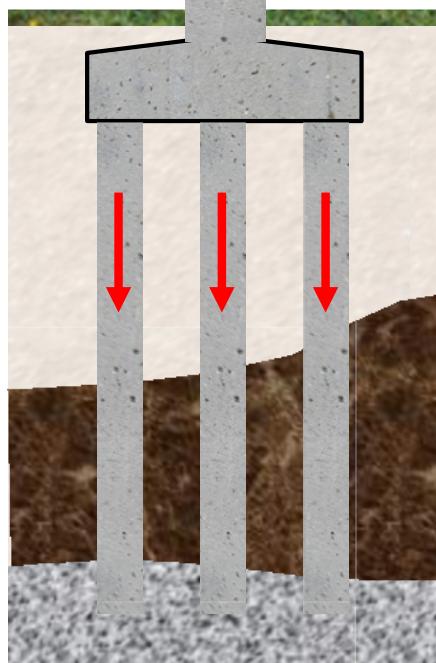
Facteur de conversion fonction du mode de détermination de la résistance ultime externe

- Essai de chargement statique : $\eta_a \leq 1.0$
 - Prise en considération d'expériences comparables (sols et pieux) : $\eta_a \leq 0.9$
 - Calcul de la capacité portante : $\eta_a \leq 0.7$
- (Détermination peu fiable : $\eta_{a,\min} = 0.5$)

Coefficient de résistance selon le mode de travail du pieu

pieux en
compression

$$\gamma_{M,a} = 1.3$$



pieux
en traction

$$\gamma_{M,a} = 1.6$$

pieux en cisaillement

$$\gamma_{M,a} = 1.4$$

