

# **Pieu isolé - Capacité portante** **(chargement axial)**

Brice lecampion



# 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
3. Frottement négatif

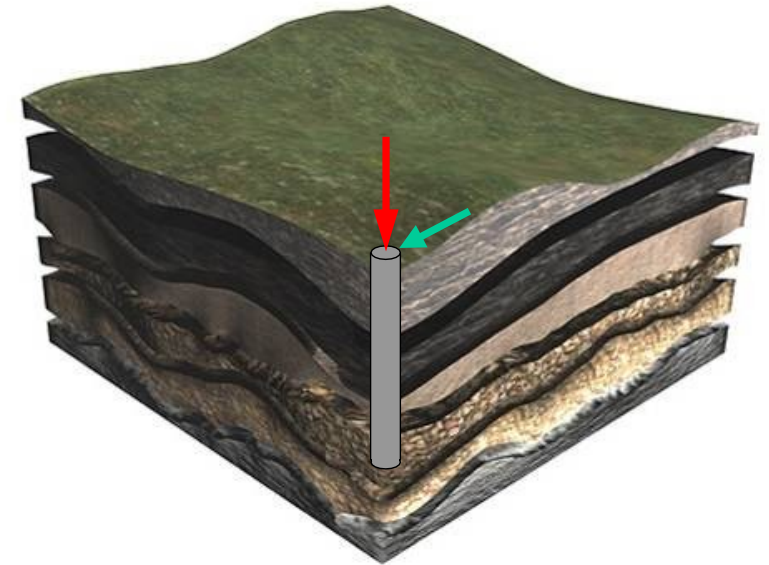
## 2. Groupe de pieux

## 3. Sollicitations inclinés

# 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



ELS

- **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)



# 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

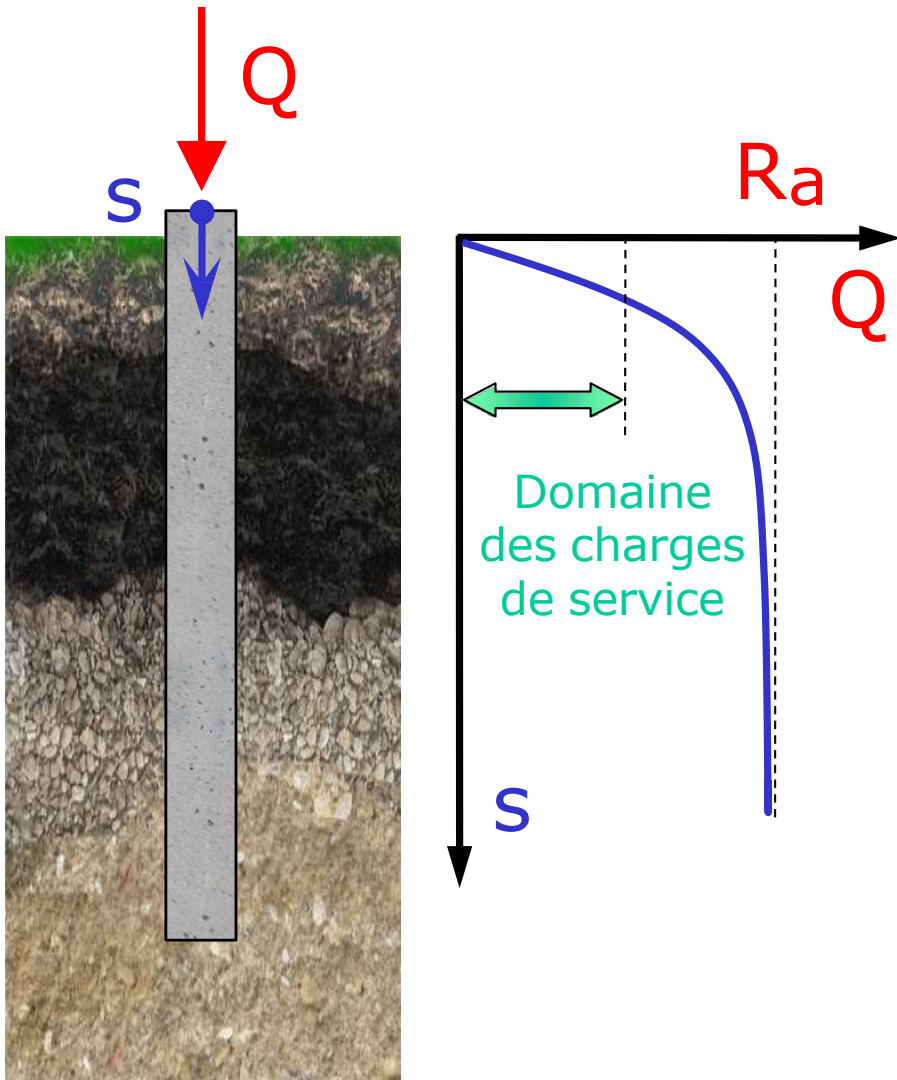
2.2.3 Calcul à partir d'essais in situ

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 :

$$R_a \equiv Q_l \equiv Q_u$$

- 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  $k = k_{crit} = 2 \text{ mm}$

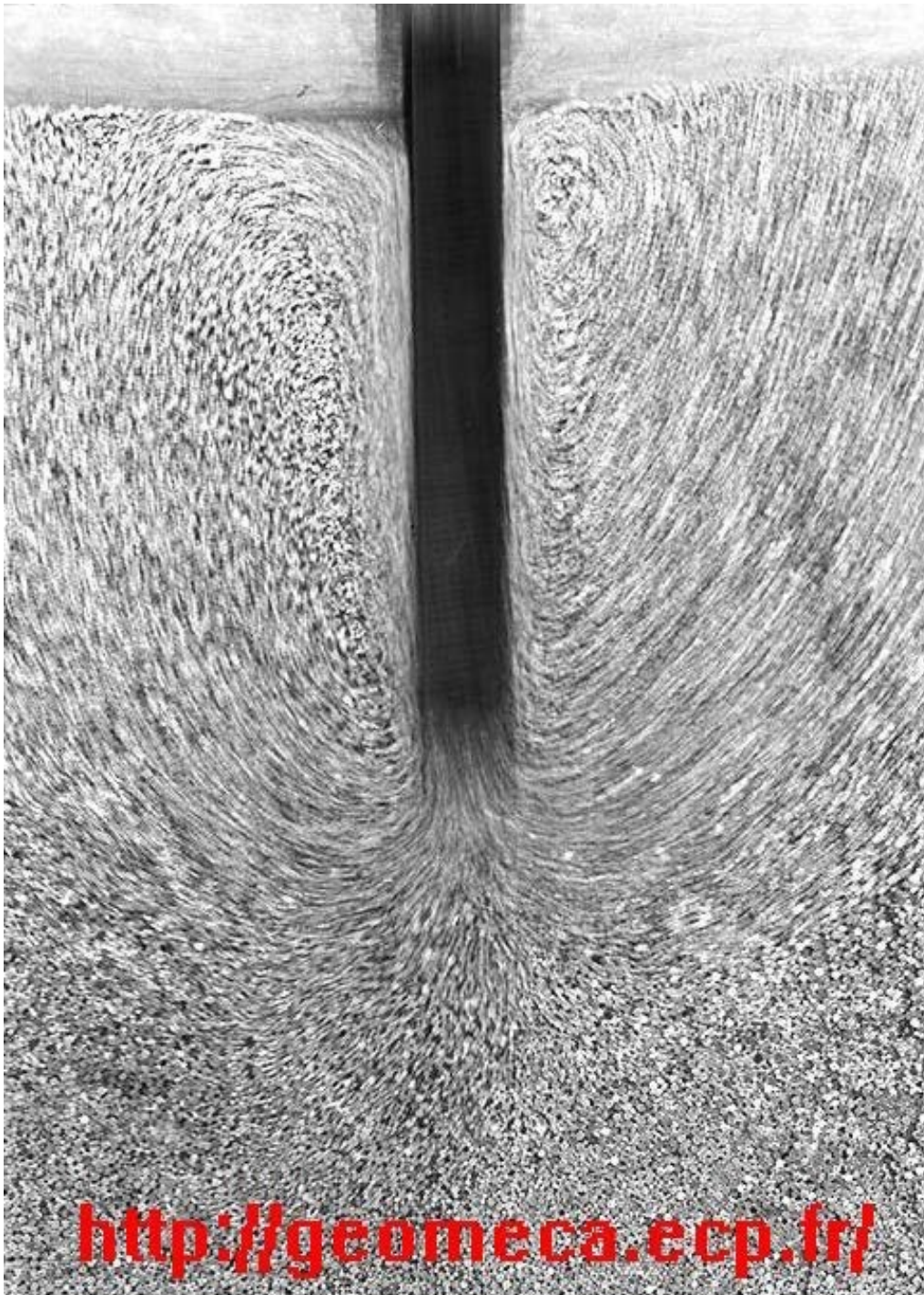
## ELS externe (mobilisation du sol)

Aptitude au service si  $s \leq s_{adm}$



# 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<sup>er</sup> type de modèles (Prandtl, Caquot, Buisman, Terzaghi)

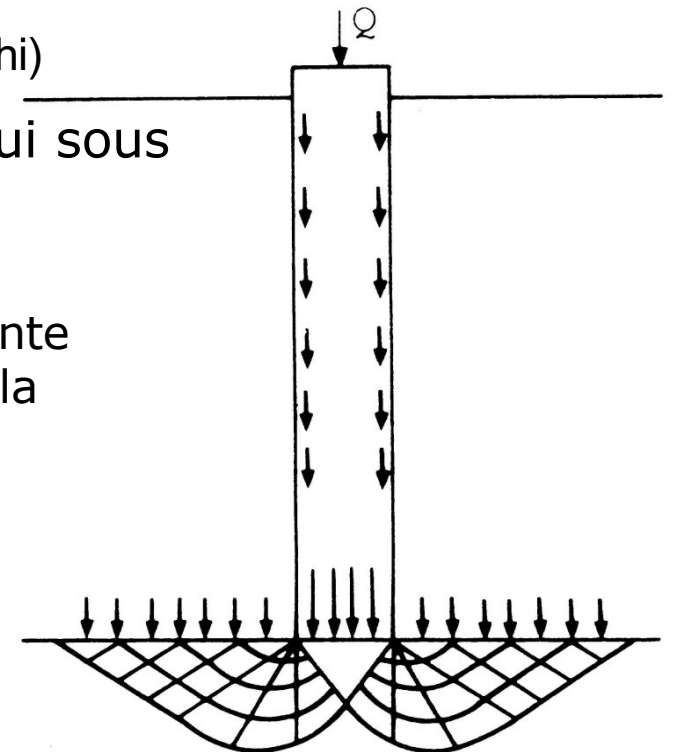
- Mécanisme de rupture sous la pointe inspiré de celui sous une fondation superficielle.

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

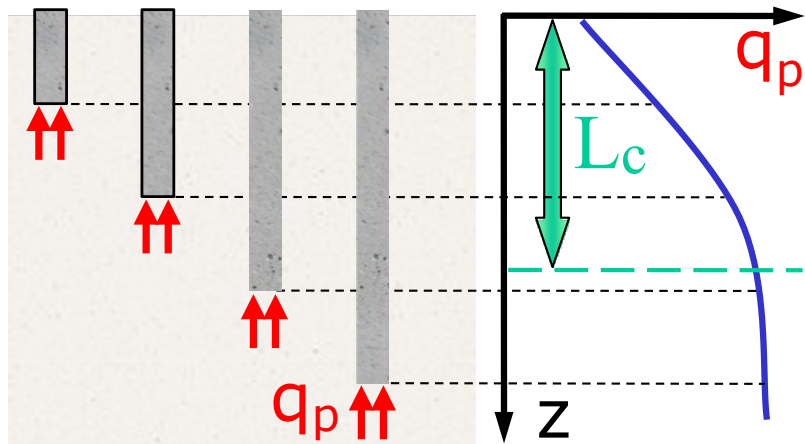
- Lorsque la longueur du pieu augmente, la contrainte verticale effective à la base du pieu augmente et la résistance de pointe augmente
- Formule de Lang & Huder:

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

- + Frottement latéral le long du fût



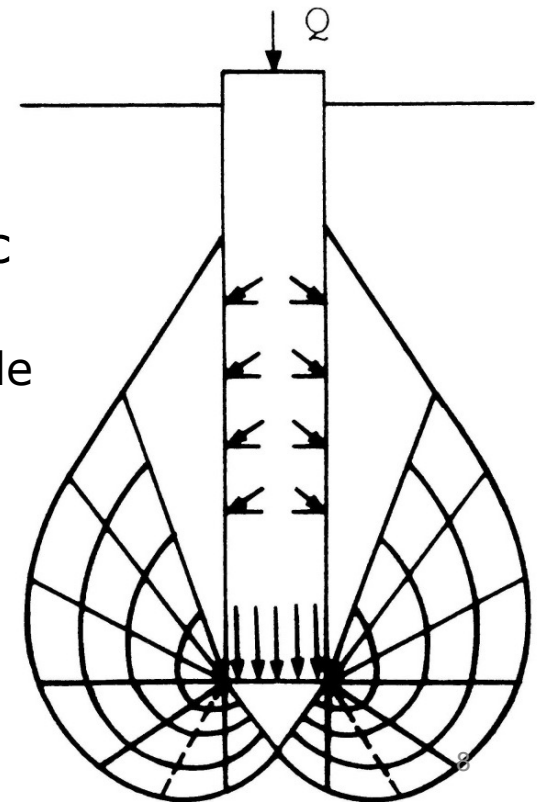
# Mécanisme de rupture du sol autour des pieux



- 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.

## 2ème 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:
$$L_c = D \exp(\pi \tan \varphi') \tan (\pi/4 + \varphi'/2)$$
  - Estimation empirique par Ménard:
$$L_c = D (2 + \varphi'/8)$$
  - Couramment:  $L/D > 6$  et  $L > 3$  m (« fondation profonde »)
- + Frottement latéral le long du fût





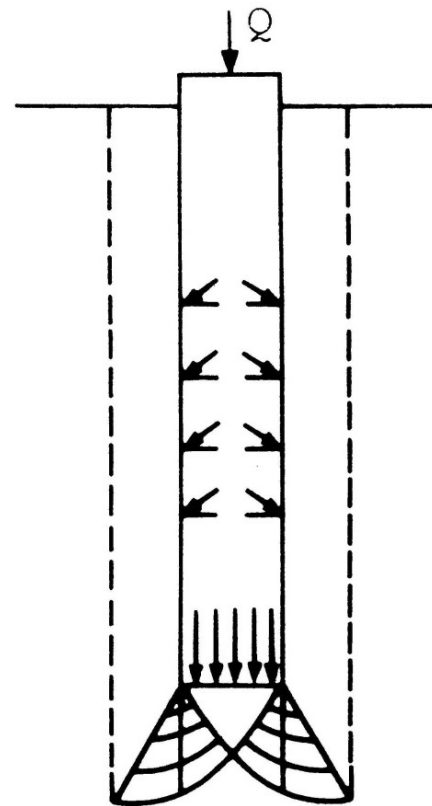
# Mécanisme de rupture du sol autour des pieux

## 3ème type de modèles

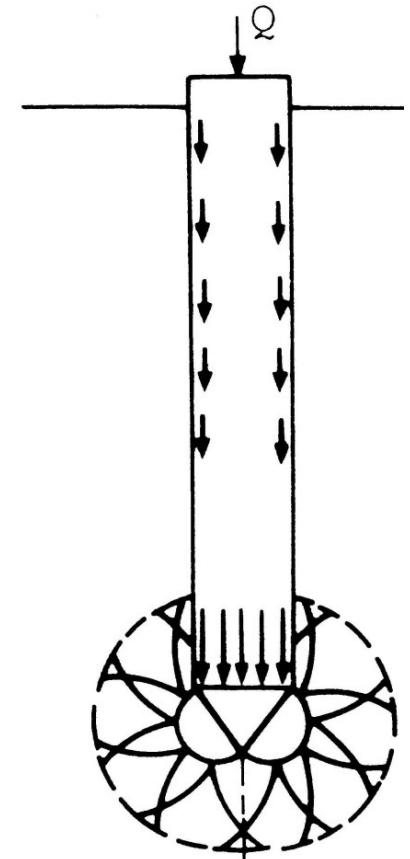
- Poinçonnement localisé du sol sous la pointe du pieu.
  - Le terme de résistance de pointe est indépendant de la longueur du pieu.
  - Estimation selon le document technique unifié français (DTU):

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

- + 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  $N_{q\max} = 10^{3.04 \tan \varphi'}$  (selon Tcheng)  
 $N_c = (N_{q\max} - 1) \cotan \varphi'$   
 $\lambda = 1 + 0.3 (B/D)$  coefficient de forme

- Résistance au frottement latéral unitaire  $q_s$

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

pieux forés :  $K_a < K < K_0$

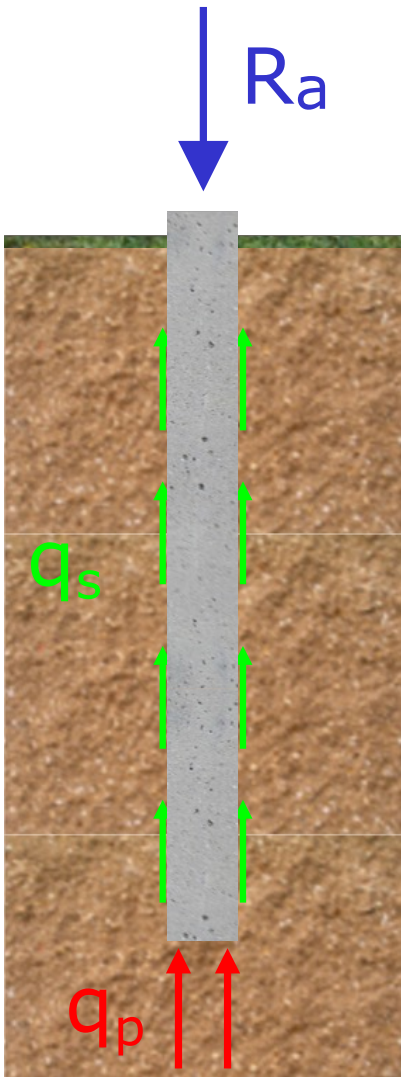
$$\delta = \varphi'$$

pieux battus :  $K_0 < K < K_p$

$$\delta = \frac{2}{3} \varphi' \quad (\text{béton})$$

$$\delta = \frac{1}{2} \varphi' \quad (\text{acier})$$

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



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

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

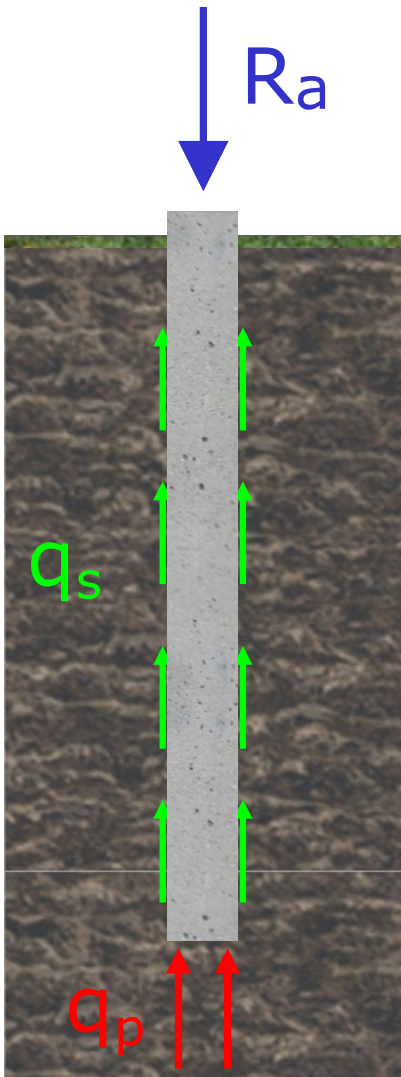
- Résistance au frottement latéral unitaire  $q_s$

$$q_s = \beta \cdot c_u$$

pieux forés :  $\beta = 0.5 \div 0.7$

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

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





# Capacité portante selon Lang & huder (ETHZ)

## Sols pulvérulents (& Sols cohérents pour long terme)

- Résistance de pointe unitaire  $q_p$

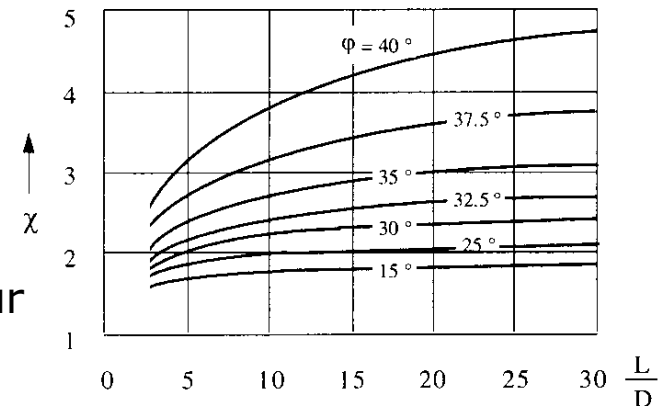
$$q_p = (c' \cdot N_c + \sigma'_{v,\text{pointe}} \cdot N_q) \cdot \chi$$

avec

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right)$$

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

$\chi$  facteur de forme et de profondeur



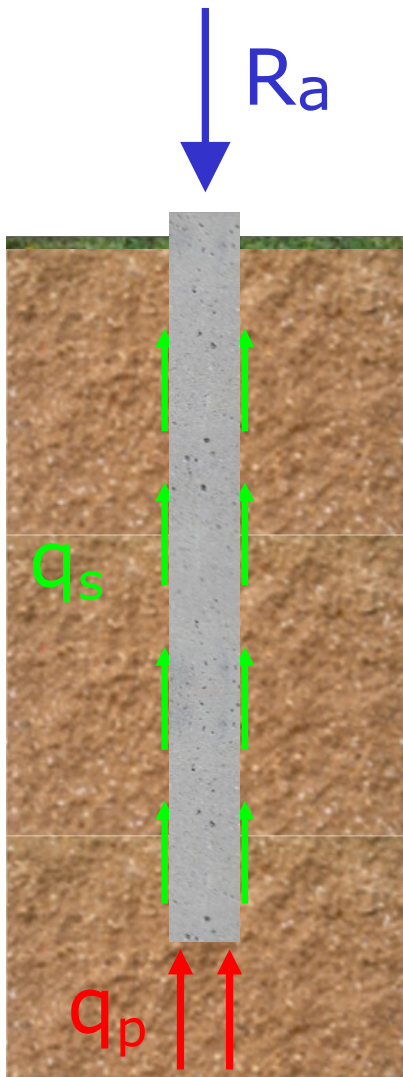
- Résistance au frottement latéral unitaire  $q_s$

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

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

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

$$R_a = Q_u = R_b + R_s = A_p q_p + U_p \int q_s$$



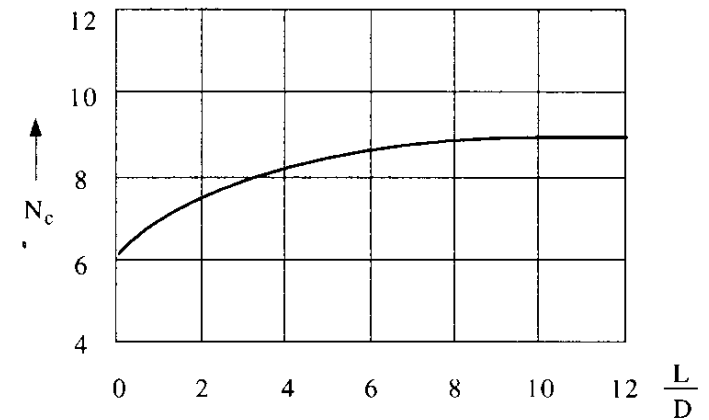
# Capacité portante selon Lang & huder (ETHZ)

## 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  $q_s$

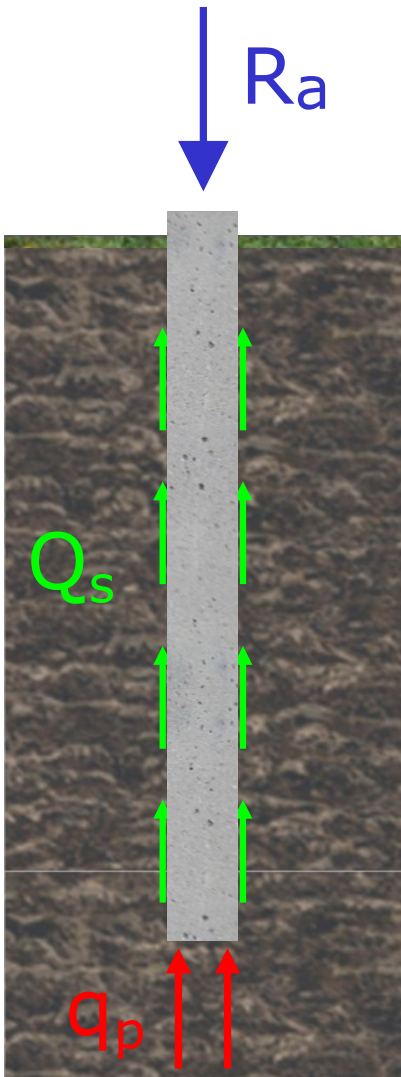
$$q_s = \beta c_u$$

pieux forés :  $\beta \approx 0.6 - 0.9$

pieux battus :  $\beta \approx 1$

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

# A partir des mesures obtenues au pressiomètre

---

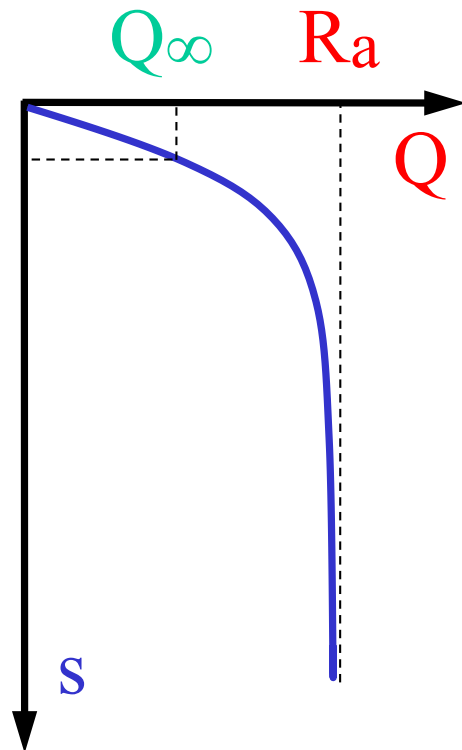
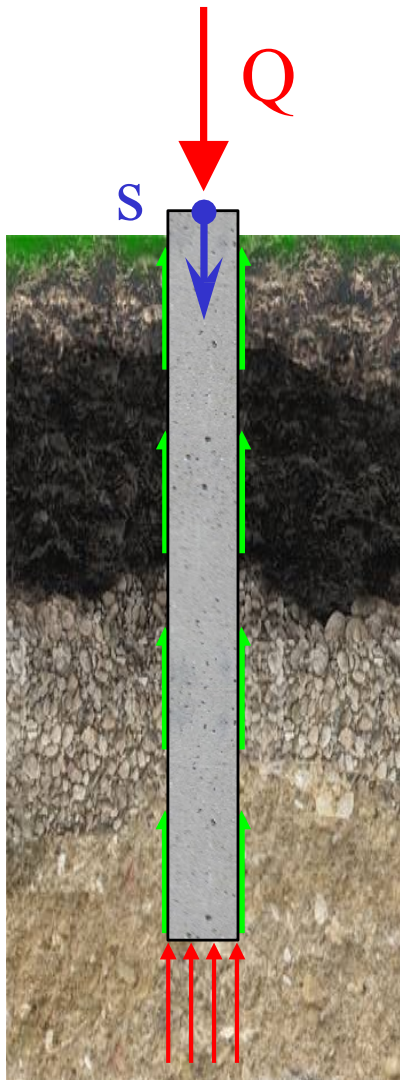
- CF exercice de cette semaine

**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 :

$$R_a \equiv Q_l \equiv Q_u$$

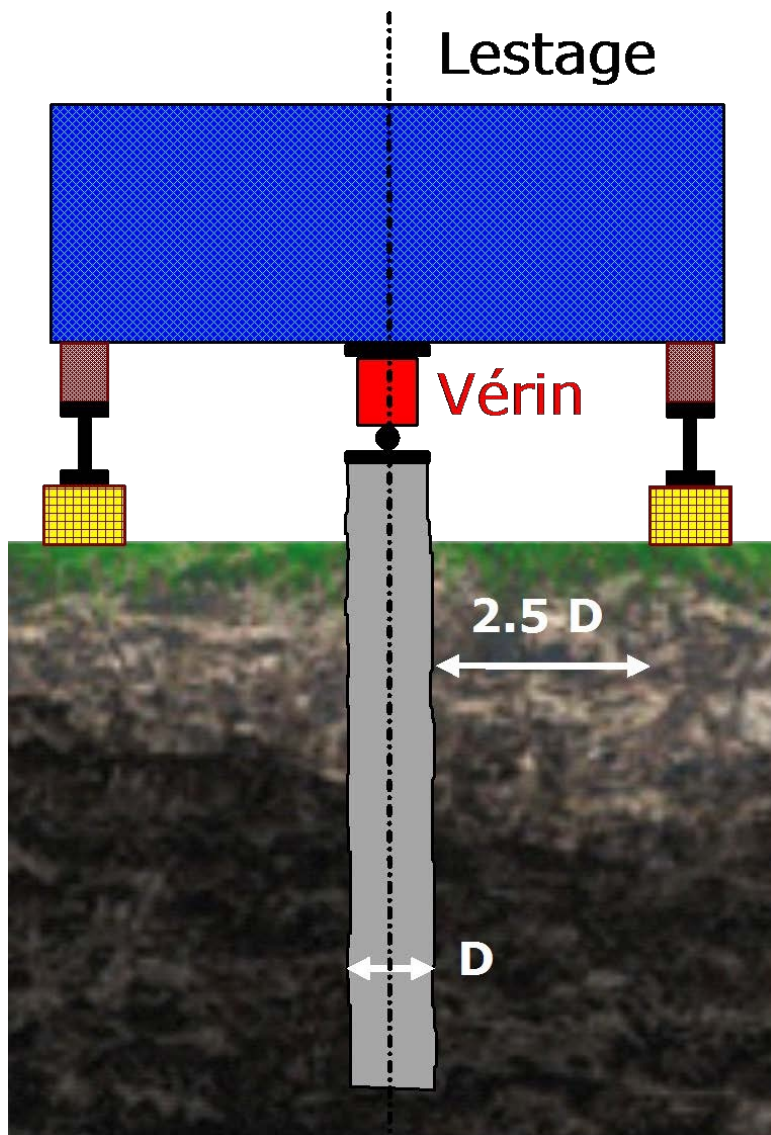
- $R_a \equiv Q$  telle que  $k = k_{crit} = 2 \text{ mm}$
- $R_a \equiv Q$  telle que  $s = D/10$

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

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

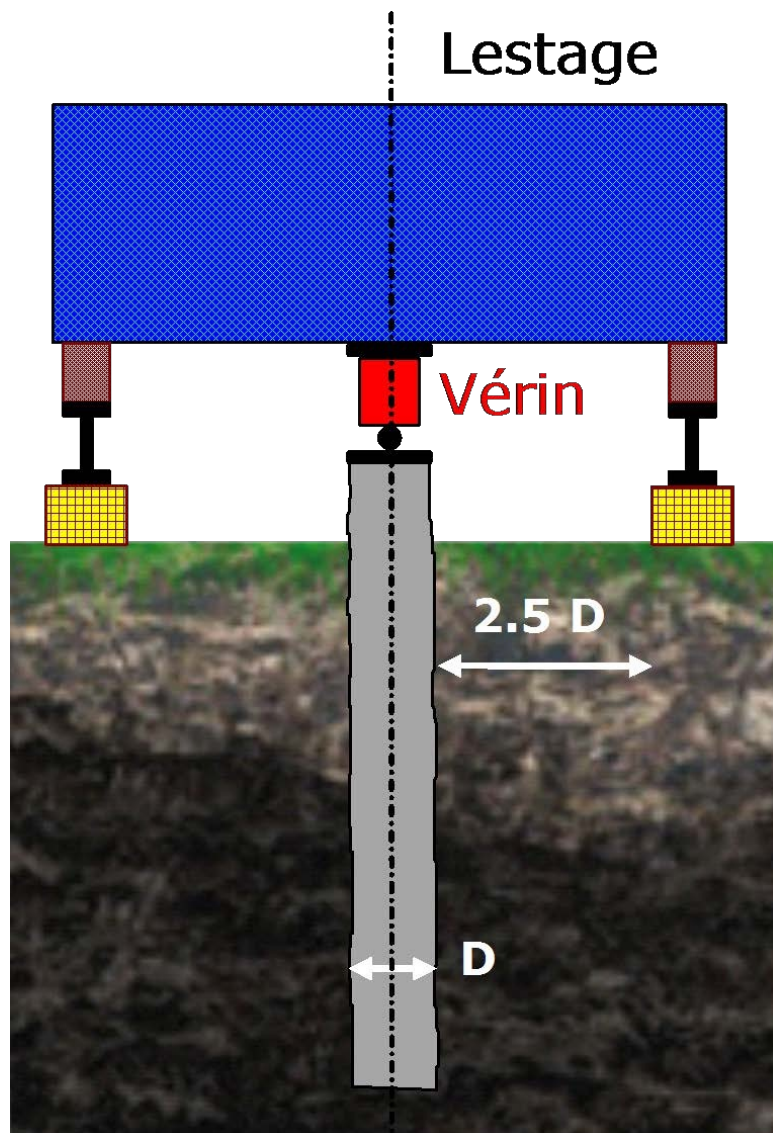
# Chargement par lestage

---



# Chargement par lestage

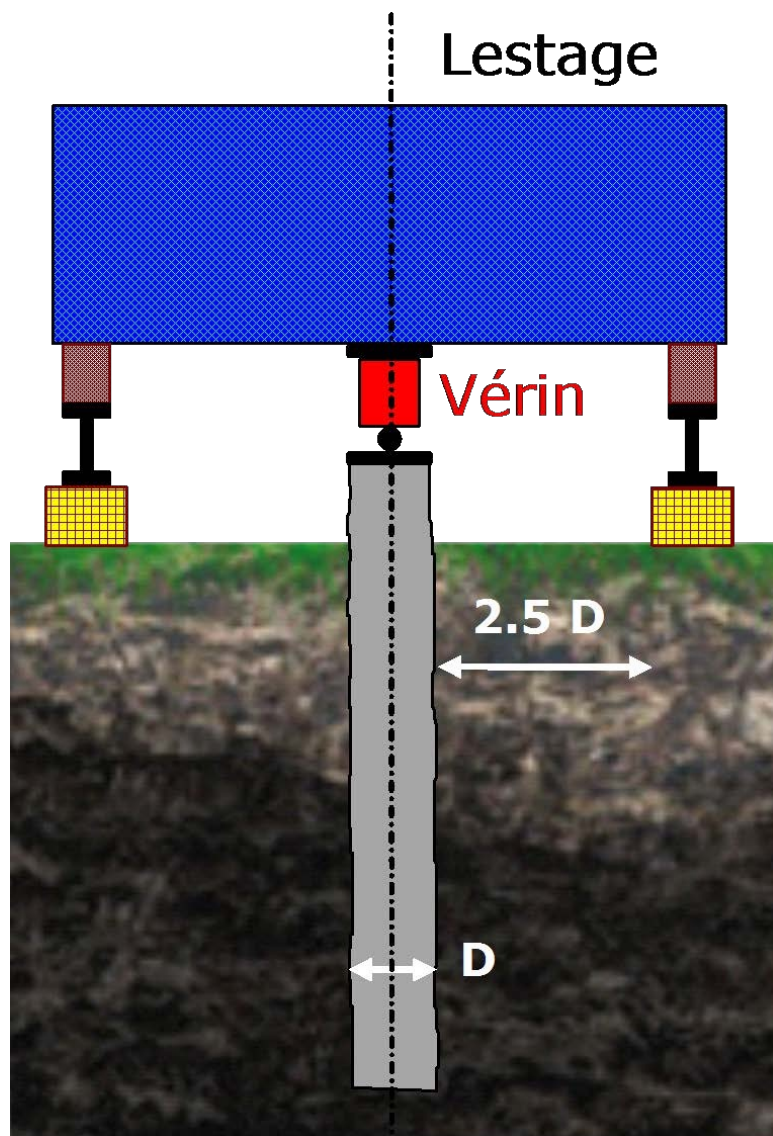
---





# Chargement par lestage

---



# Chargement par lestage (kentledge)

---

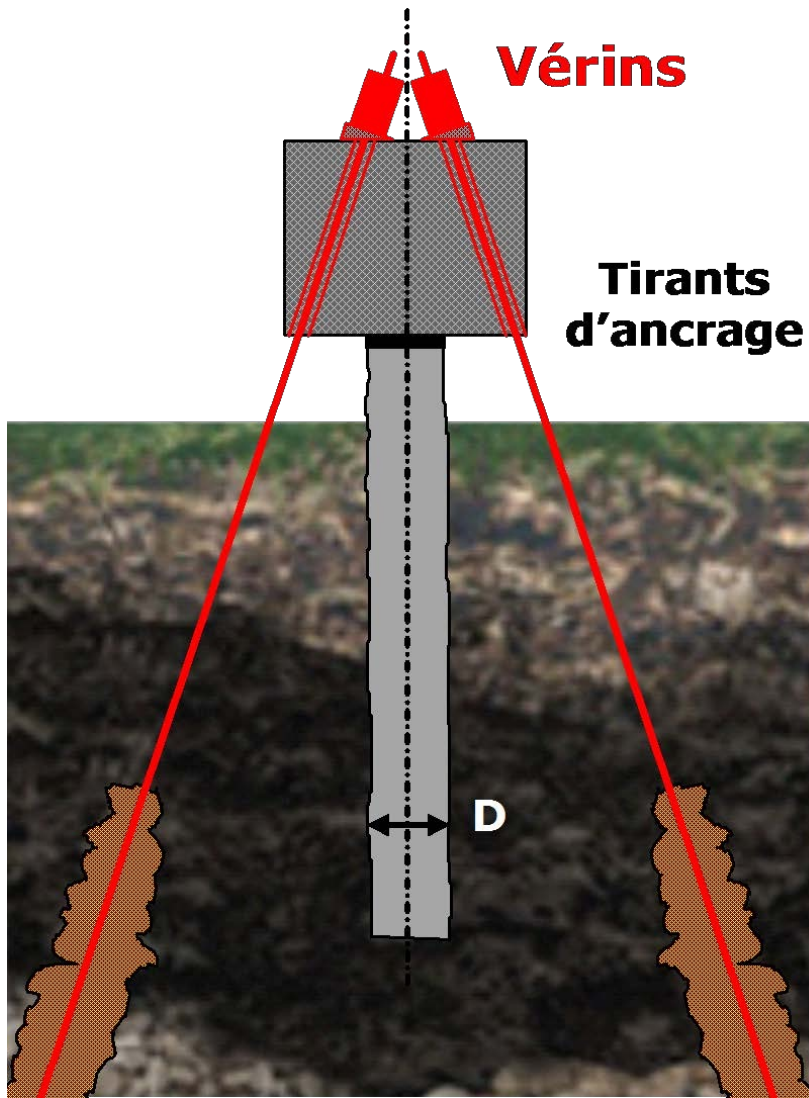


Basculement d'un massif de lestage à Newton Singapore  
Vidéo de [gerdesia25](https://www.youtube.com/user/gerdesia25) sur [www.youtube.com](https://www.youtube.com)



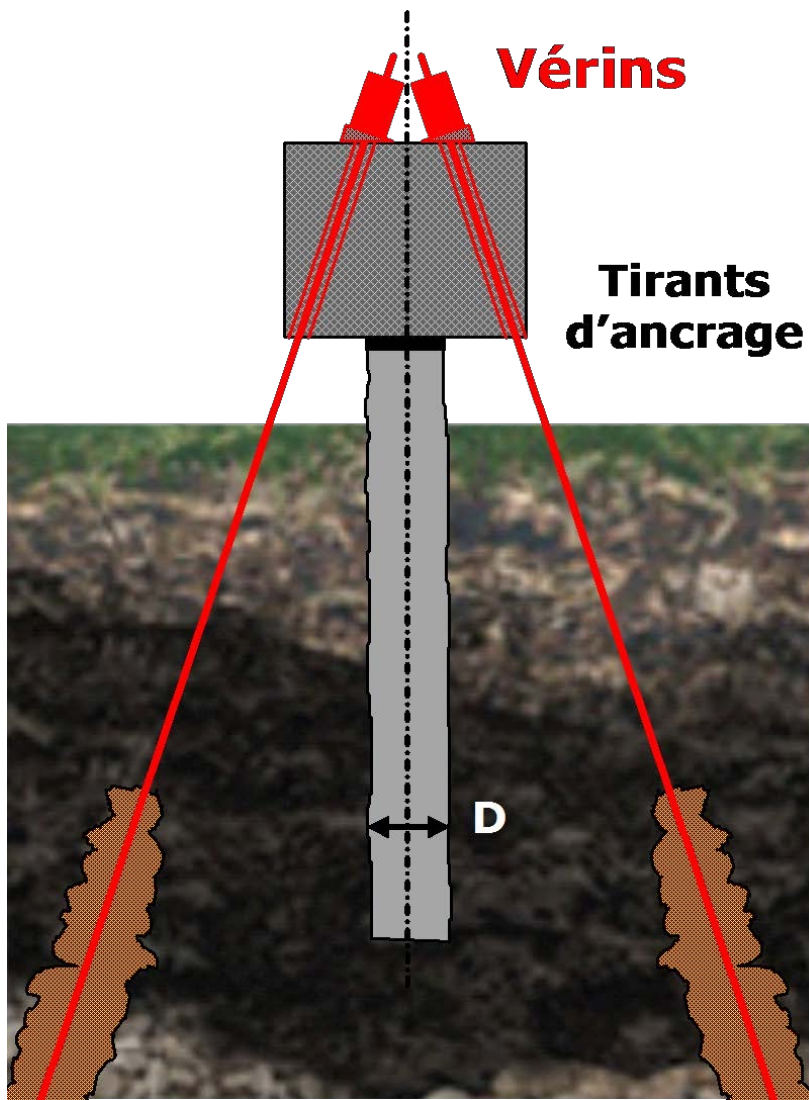
# Chargement à l'aide de tirants d'ancrage

---



# Chargement à l'aide de tirants d'ancrage

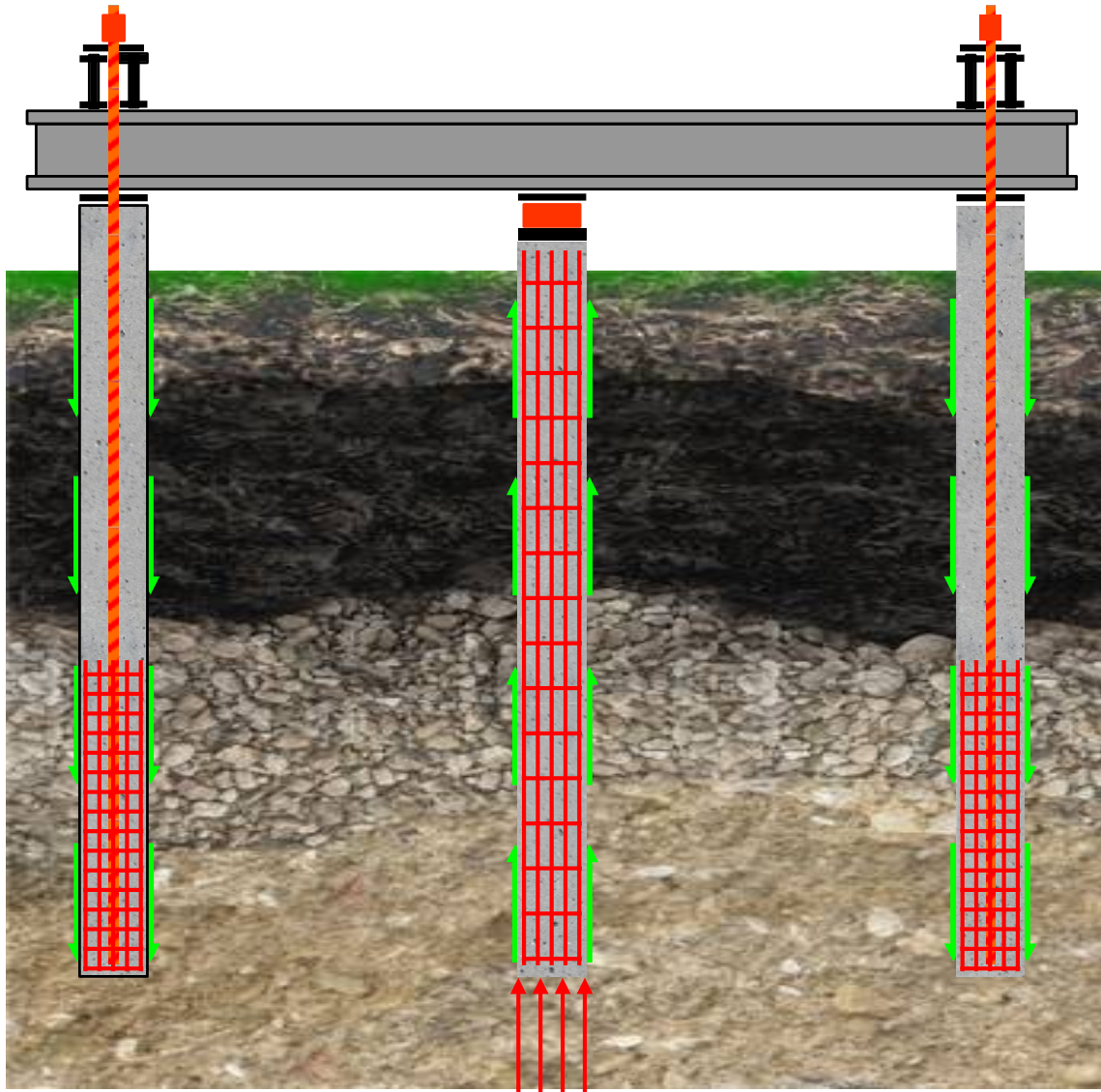
---





# Chargement à l'aide de pieux en traction

---

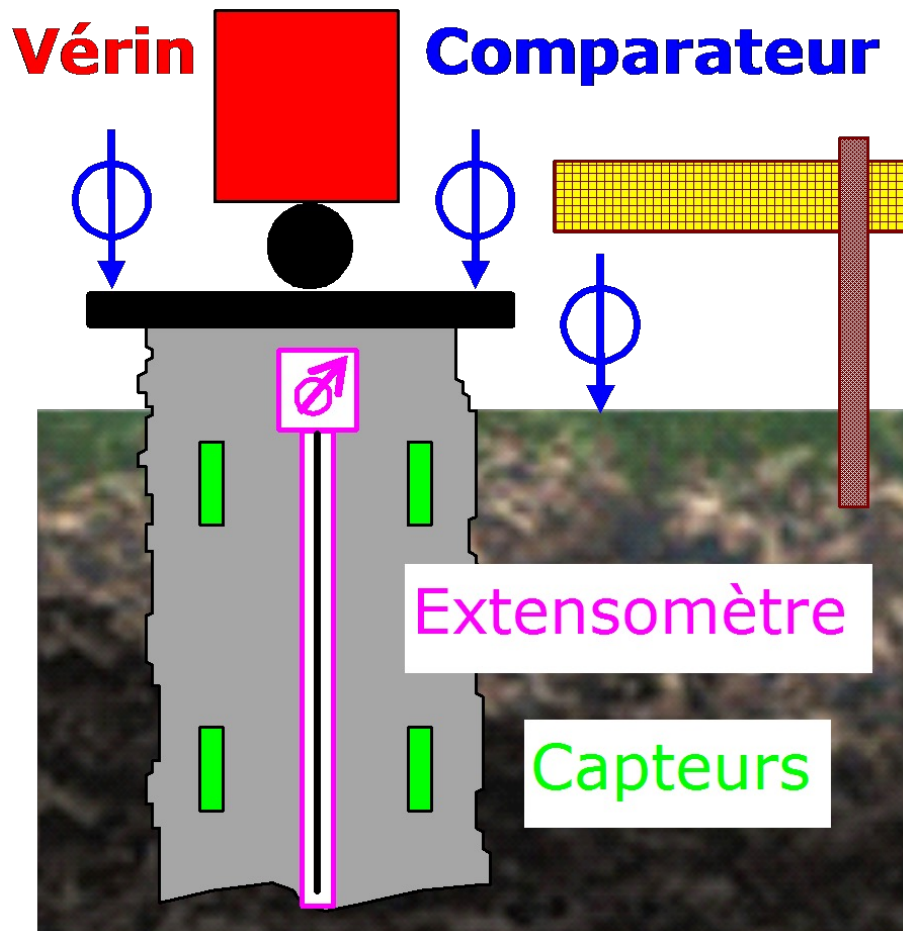


CCR - EPFL

# 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

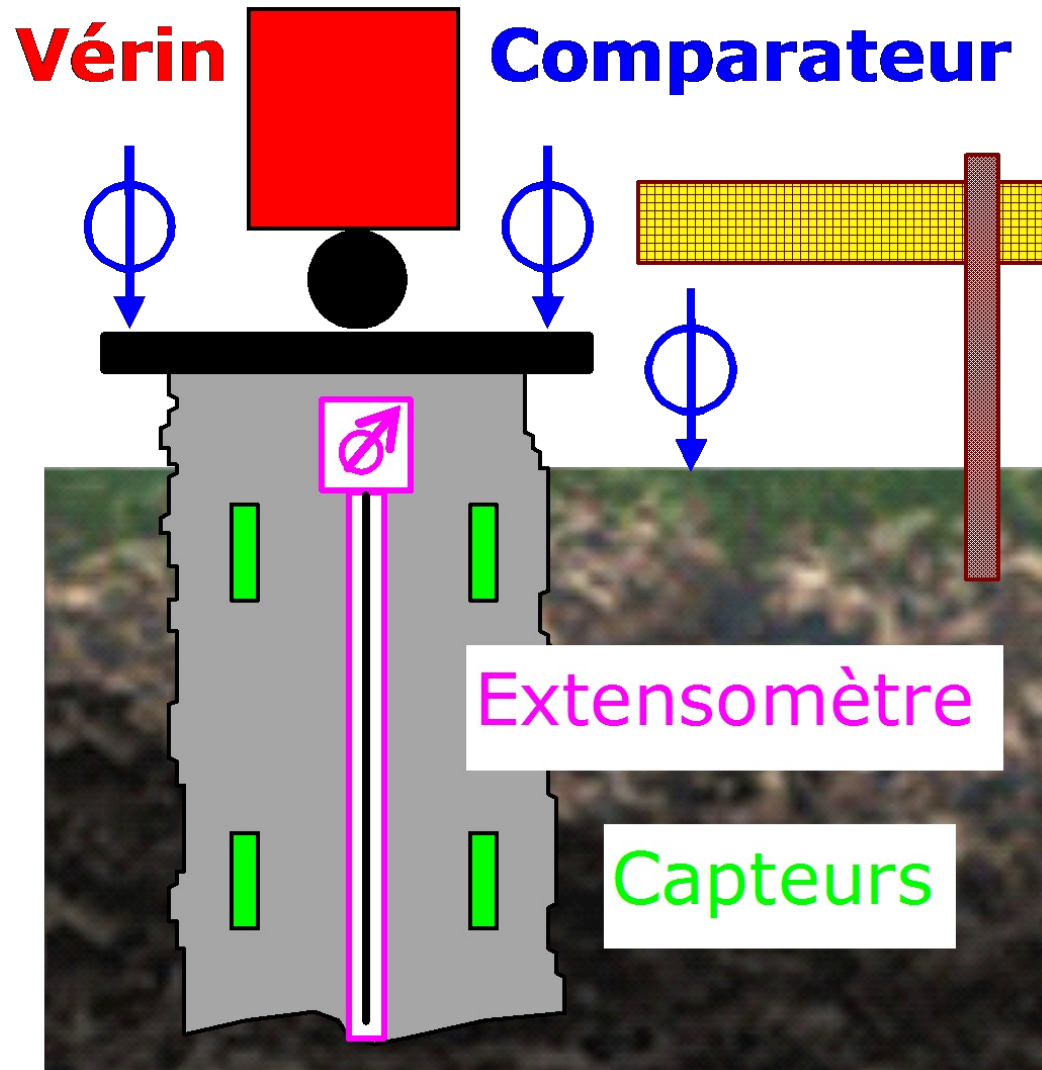
**Extensomètre**

Déformations dans le pieu  
⇒ répartition des efforts

**Capteurs**

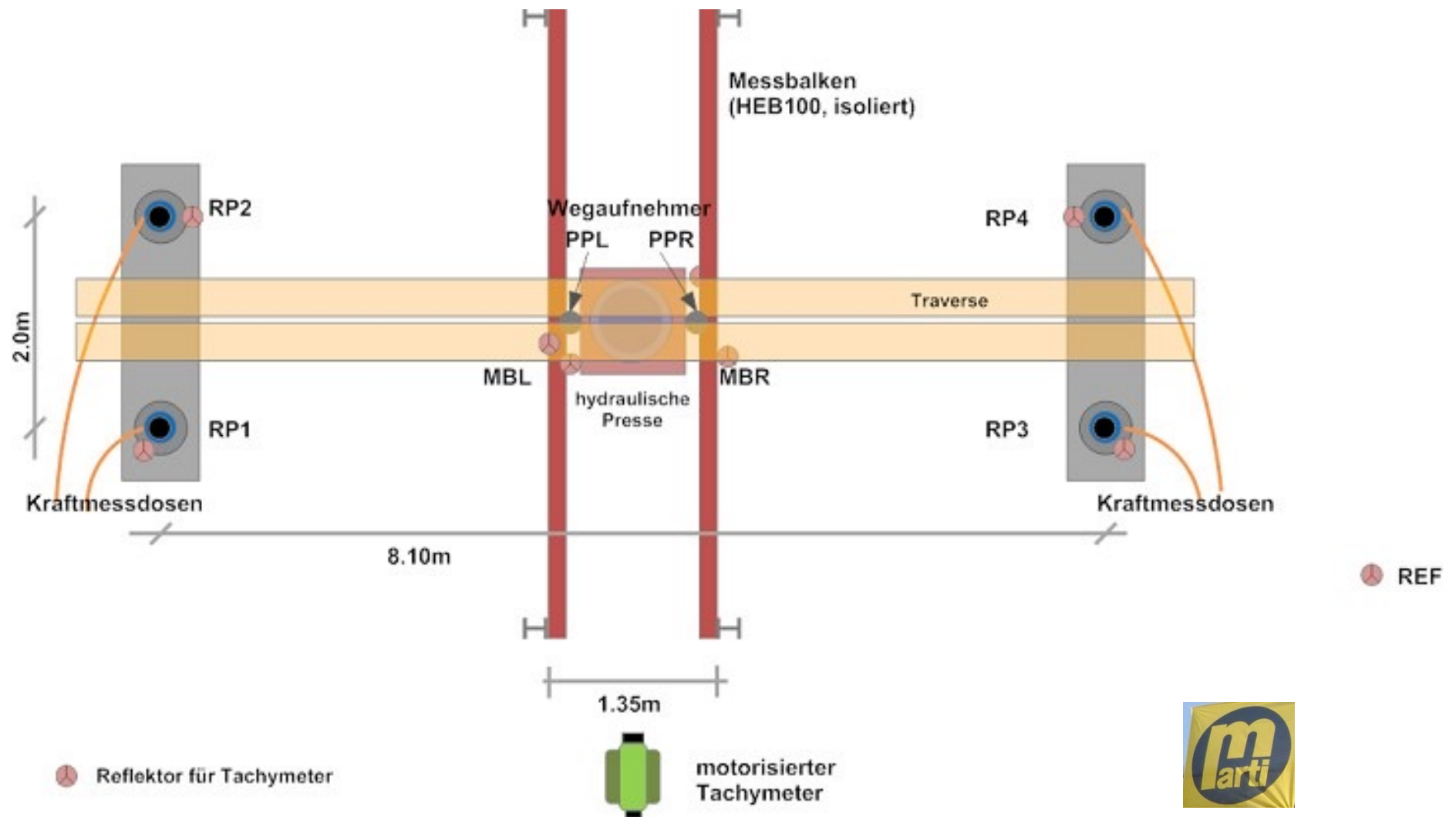


# Dispositif de mesure





# Dispositif de mesure (CCR – EPFL)



Schema der Messeinrichtung im Grundriss



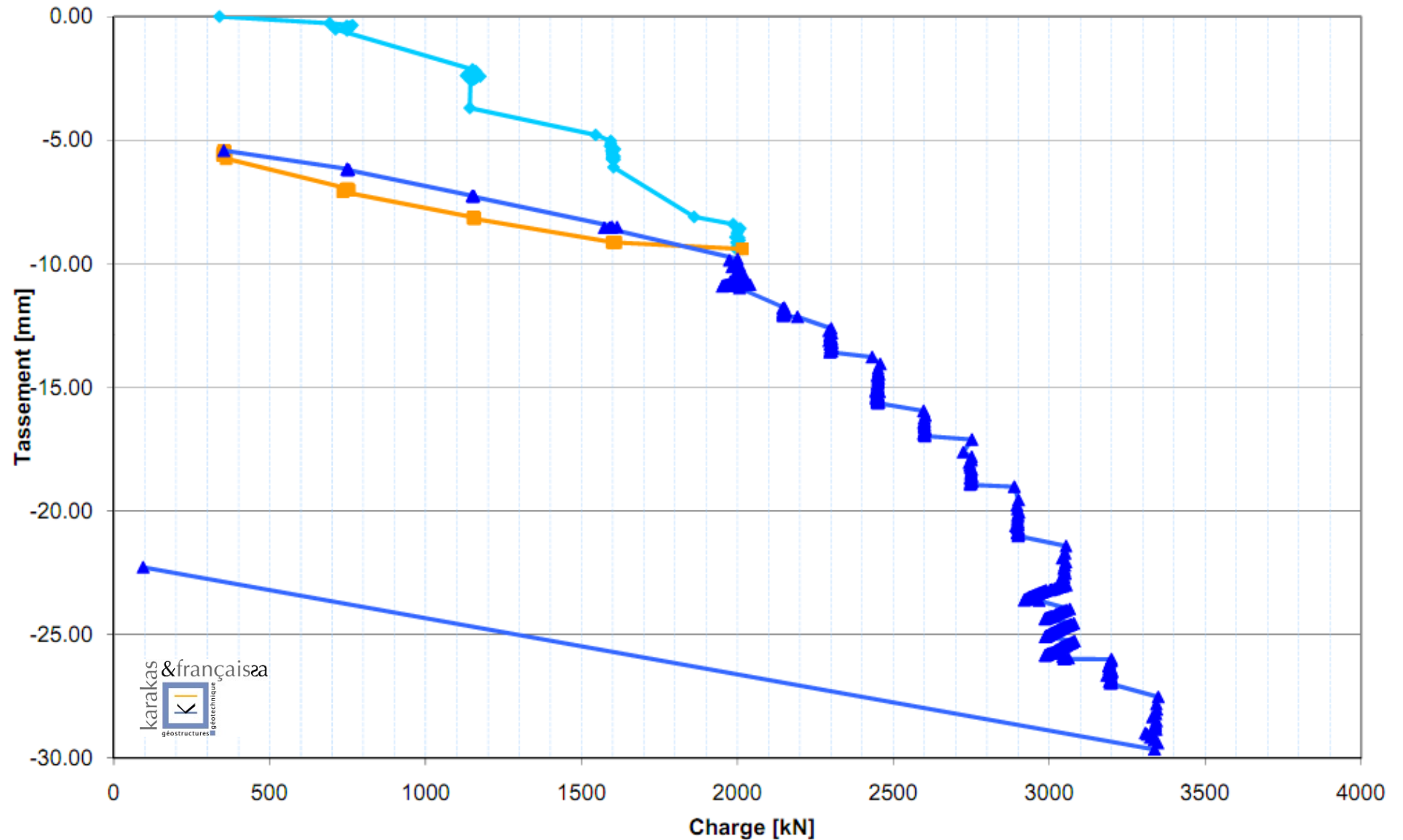
# Dispositif de mesure (CCR – EPFL)

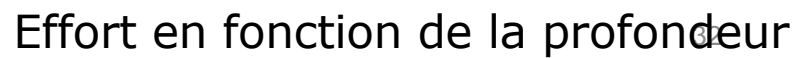
---



*Ansicht der Belastungseinrichtung am Versuchspfahl, Pressen*

# Courbe charge - tassement (CCR – EPFL)





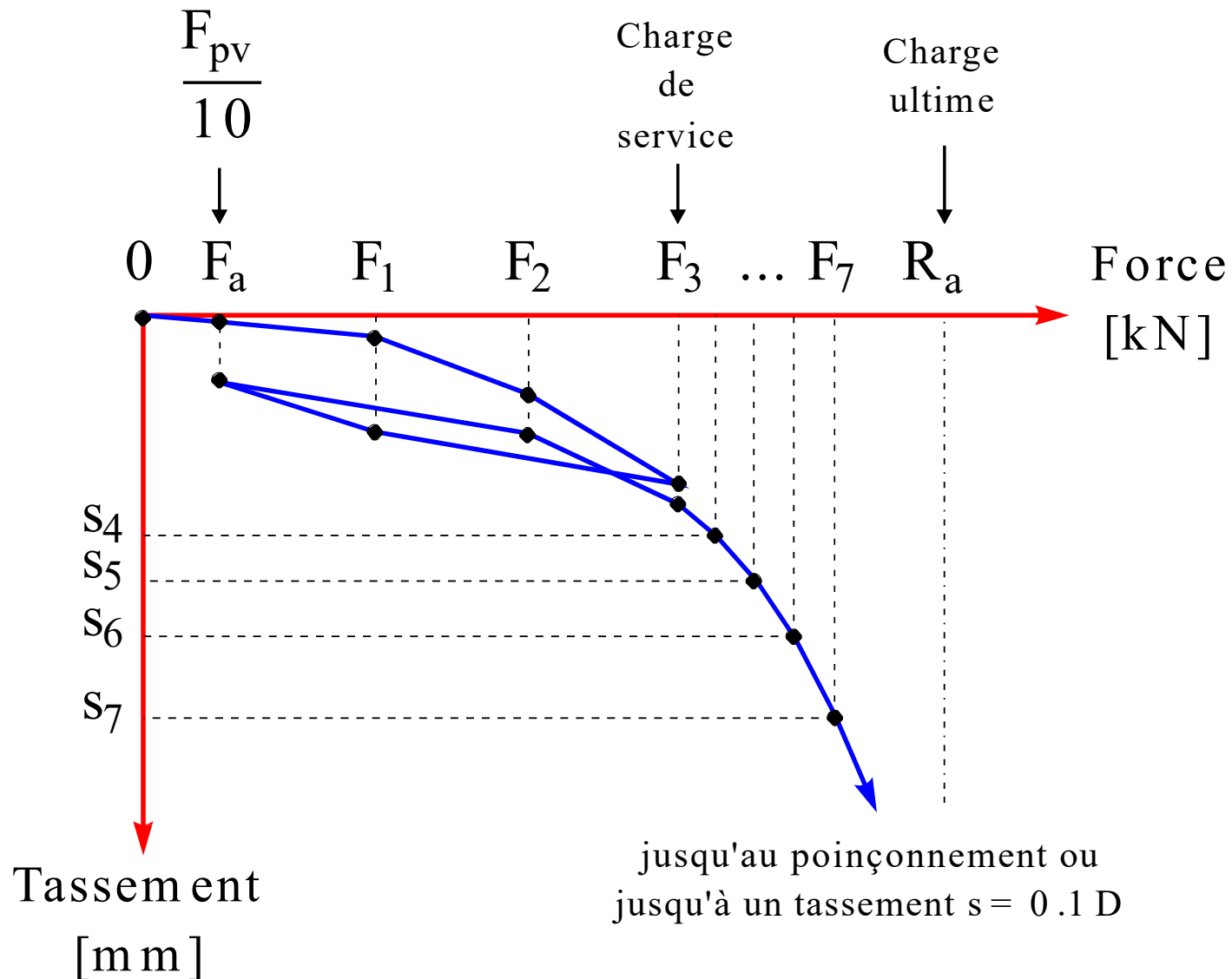
---

# Essai de chargement statique

**Déroulement de l'essai selon la SIA 267/1**

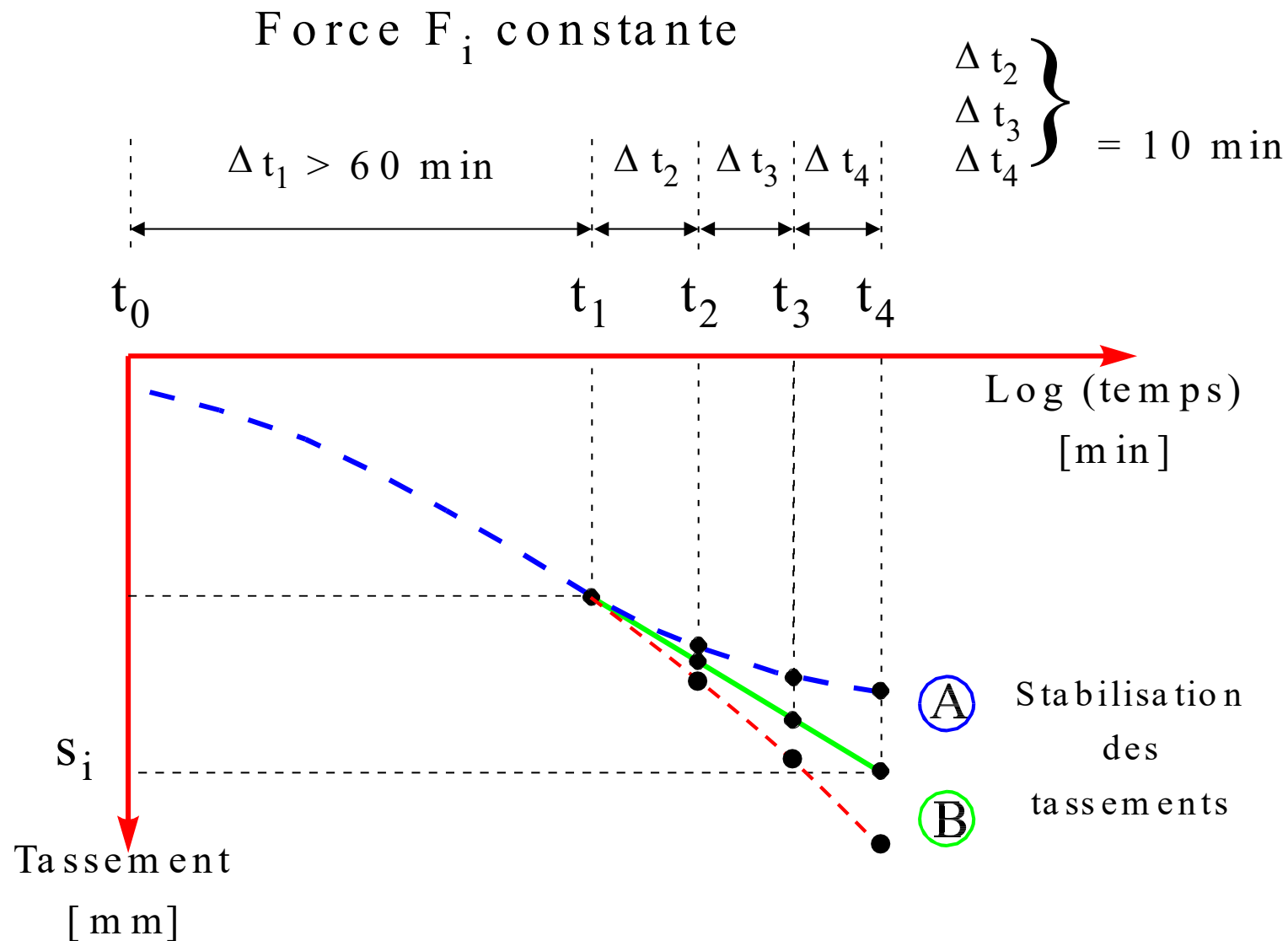
**Ouvrages géotechniques**

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





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



---

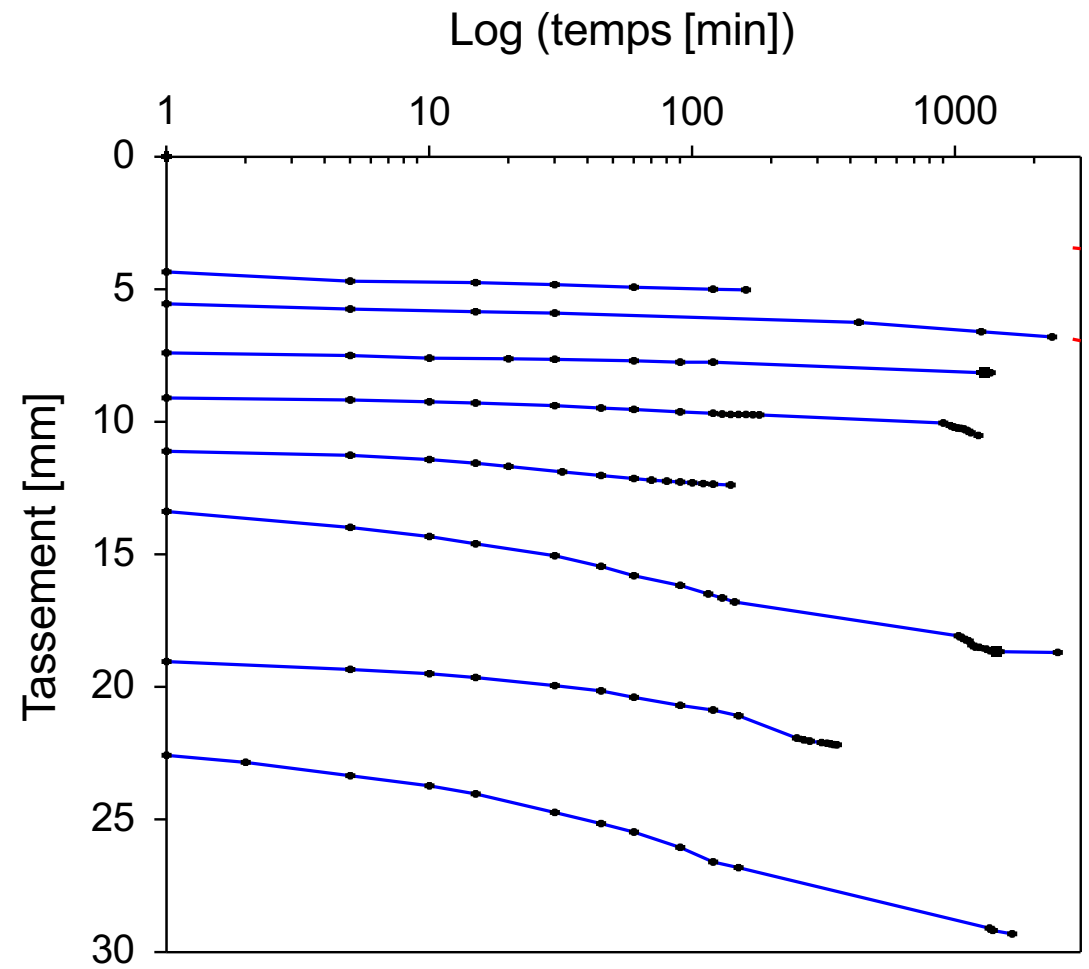
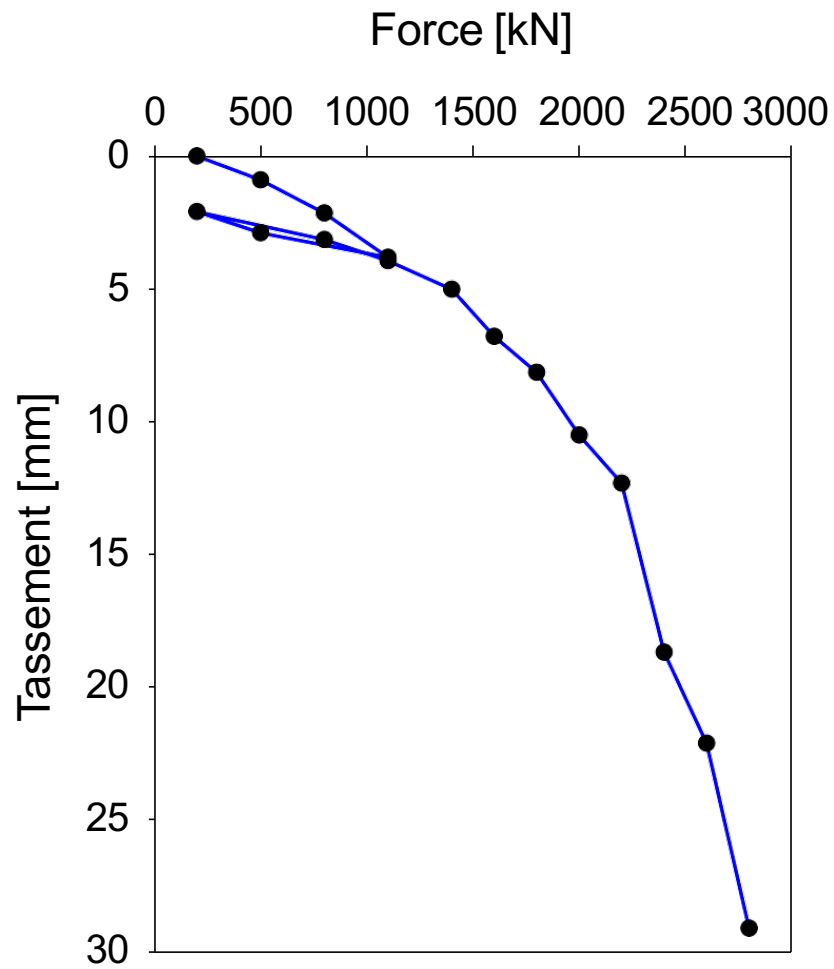
# Essai de chargement statique

## **Exemple d'essai pour le centre Coop de Crissier**

*Données Bureau Karakas et Français*



**F = 2800 kN**



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

# 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

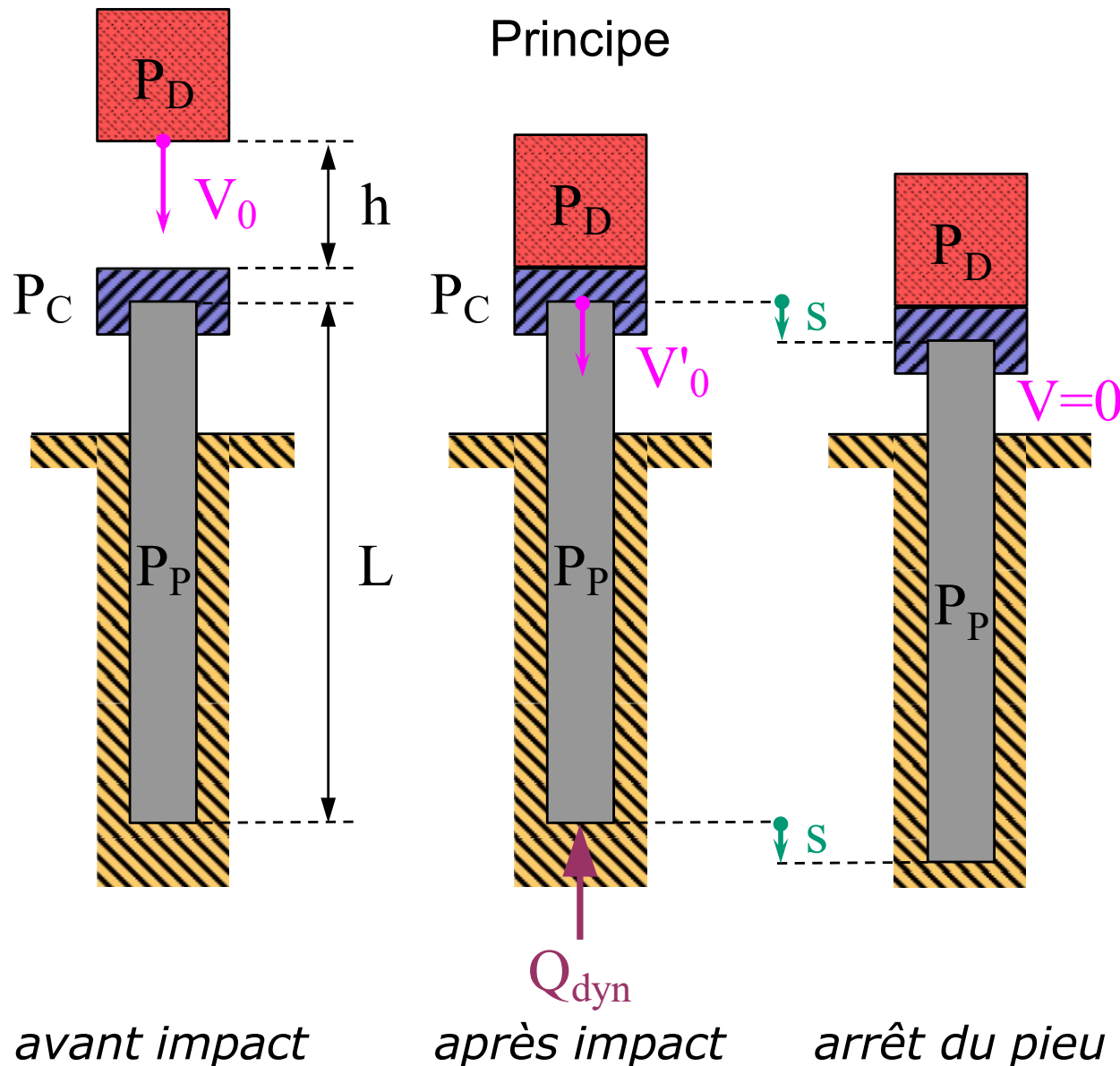
#### 2.3 Tassement

#### 2.4 Vérification et contrôle

#### 2.5 Frottement négatif

## 3. Groupe de pieux

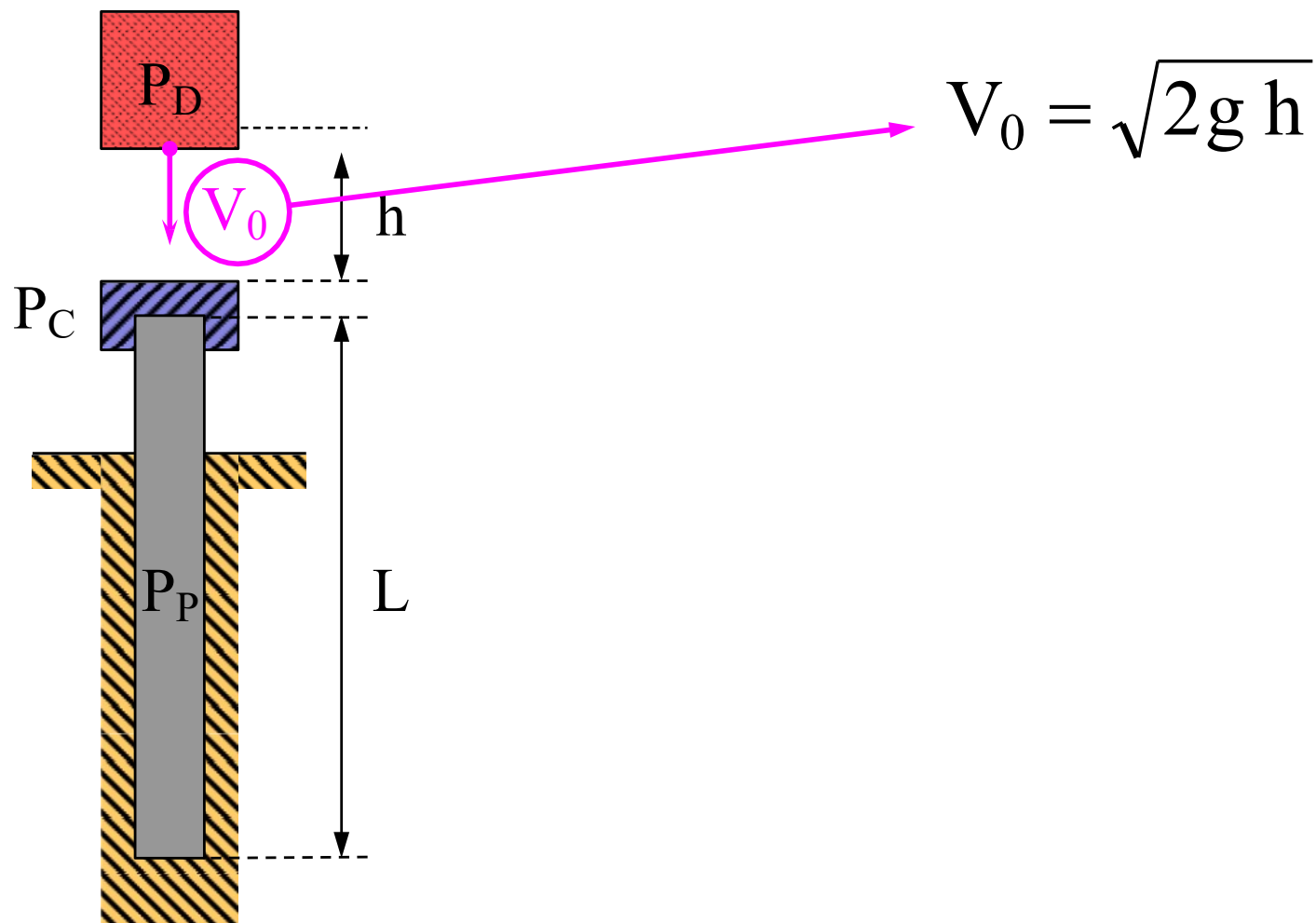
# Principe et hypothèses de la formule des Hollandais



## Hypothèses :

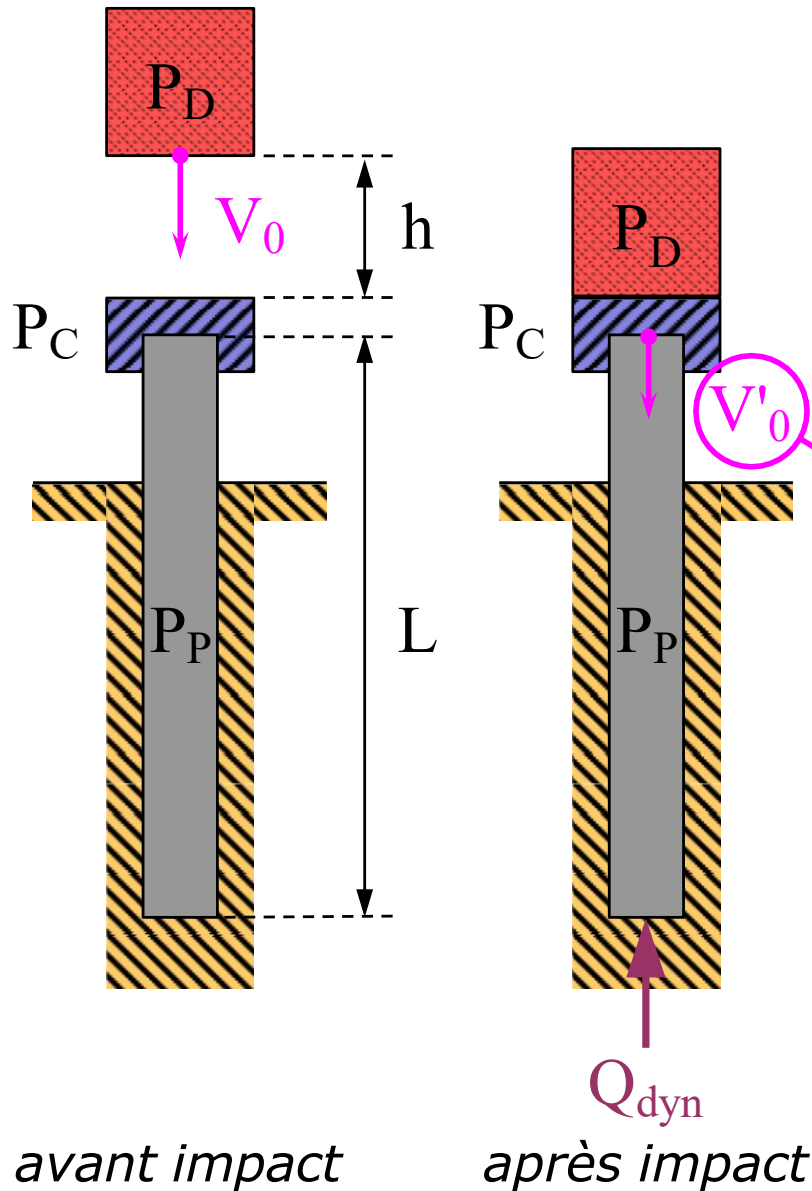
- chute libre du mouton
- choc mou (*pas de réaction élastique*)
- pieu infiniment rigide
- réaction dynamique du sol  $Q_{dyn}$  uniquement en pointe (*pas de résistance par frottement latéral*)
- aucunes autres pertes.

## Situation avant impact



*avant impact*

## Situation après impact

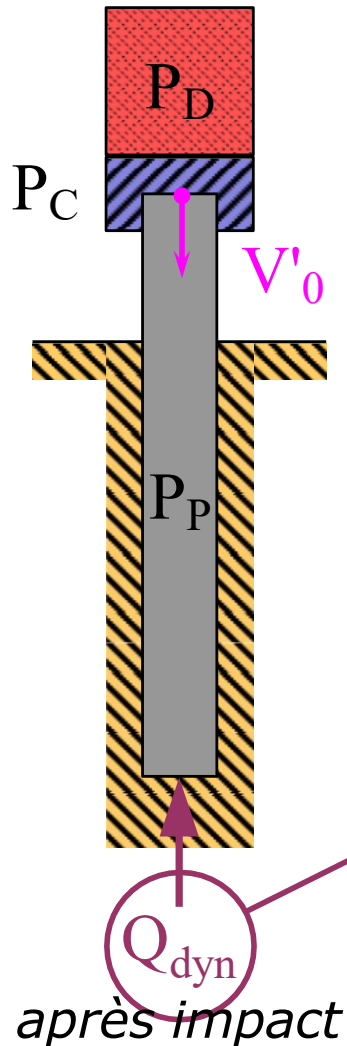


Conservation de la quantité de mouvement  
+ Hypothèse d'un choc mou

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

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

# Décélération du pieu après impact

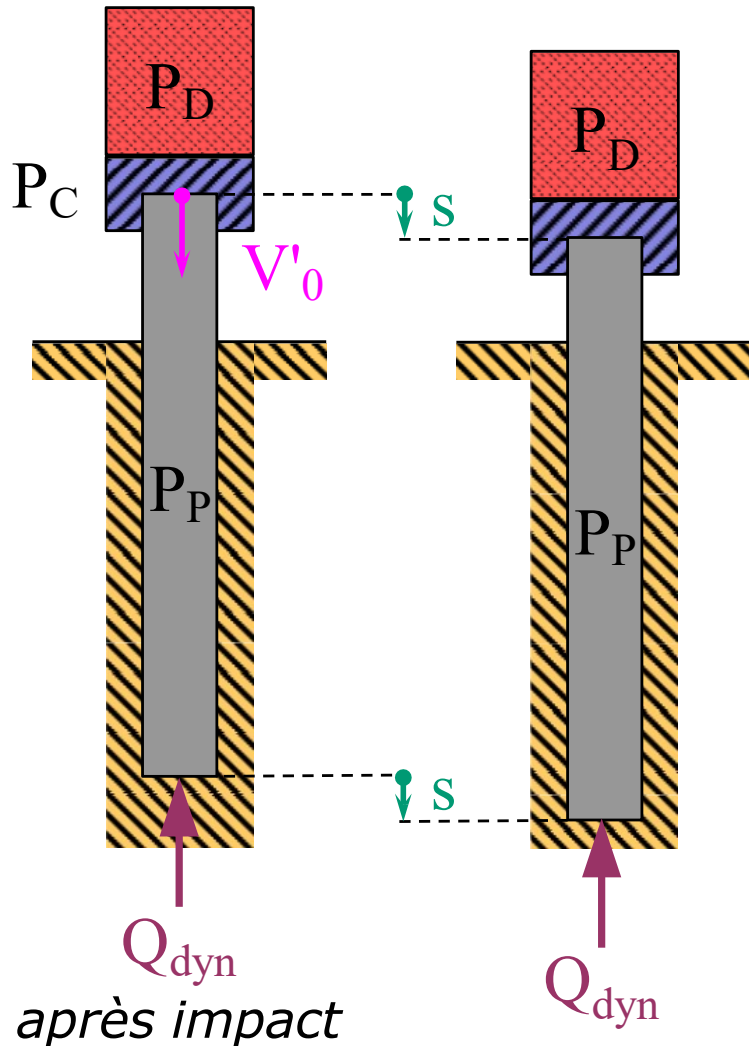


Réaction dynamique du sol à l'enfoncement

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



# Décélération du pieu après impact



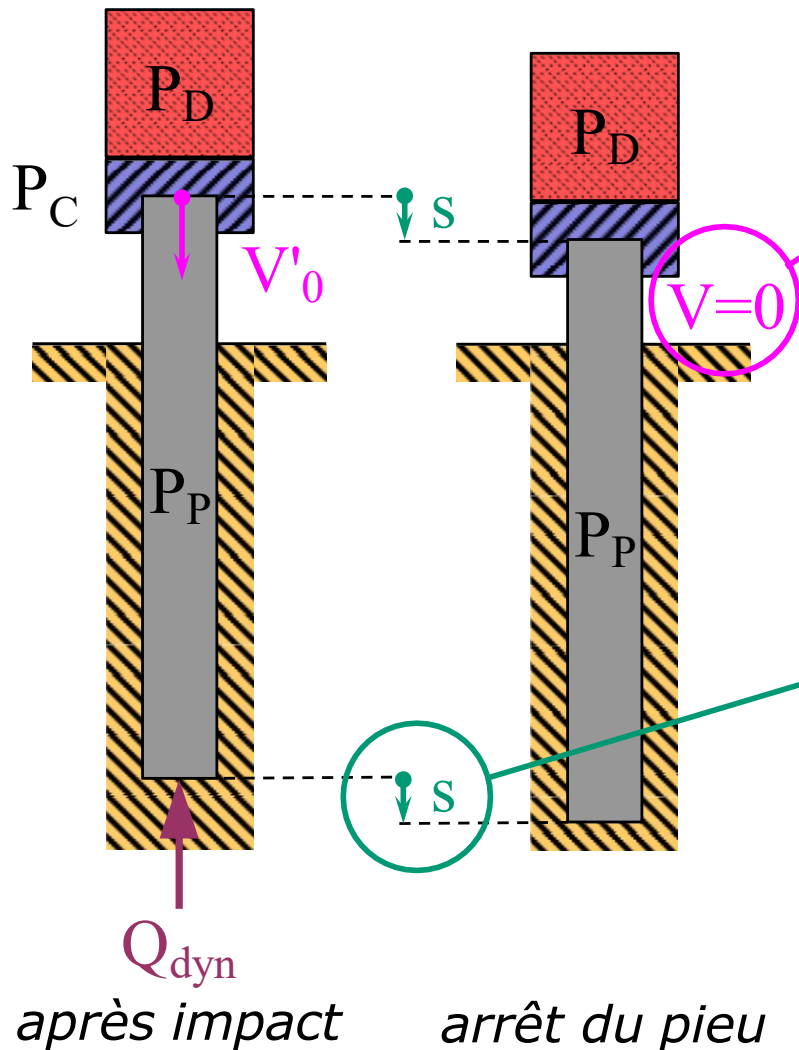
$$a = - \frac{Q_{\text{dyn}}}{(P_D + P_P + P_C)g}$$

Intégration de l'équation du mouvement

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

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

# Arrêt du pieu



$V = 0$  (arrêt du pieu)

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

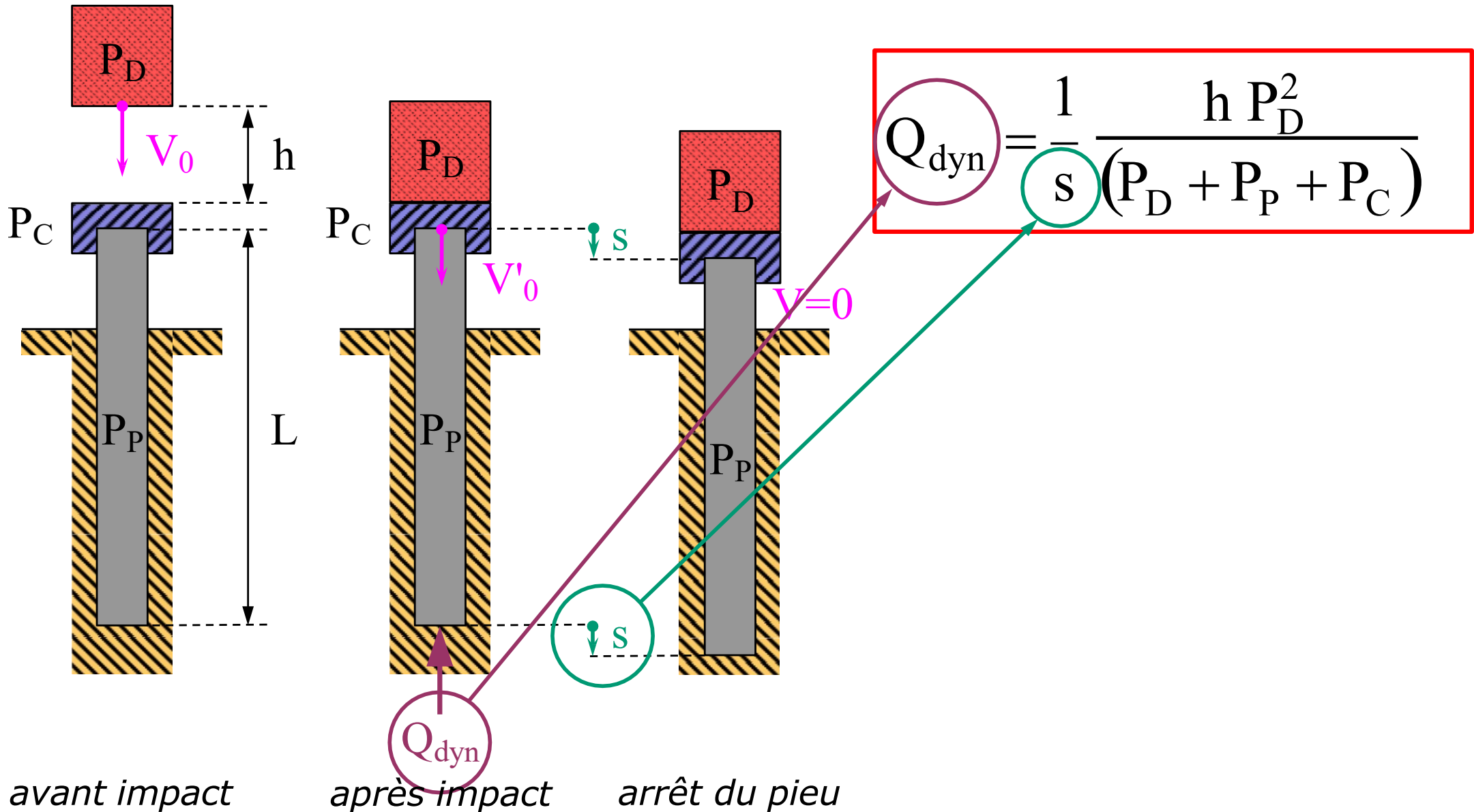
Dès lors ...

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

ou encore ...

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

# 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 :

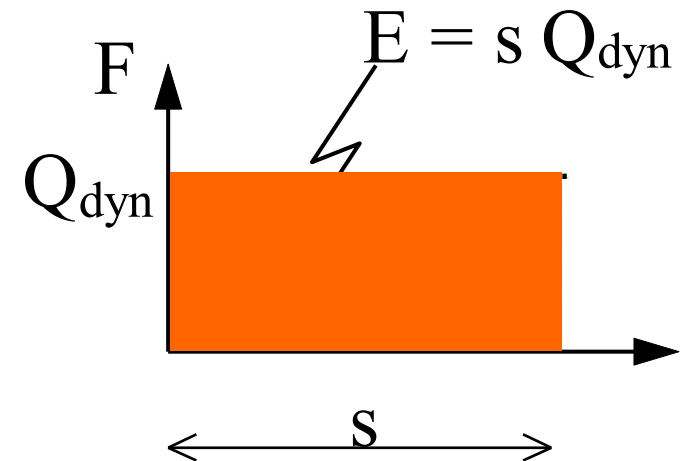
$$P_D h = Q_{\text{dyn}} \cdot s \cdot \frac{P_D + P_P + P_C}{P_D}$$

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

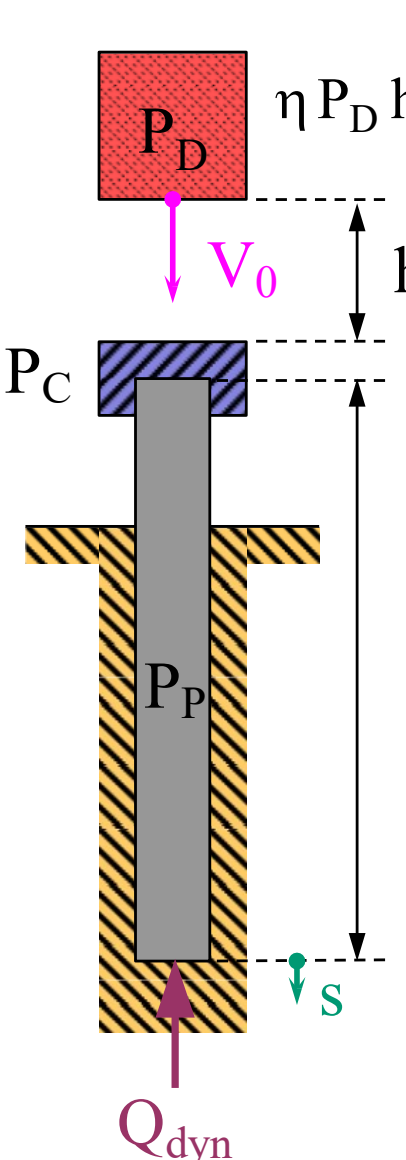
### 3. Tassement

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

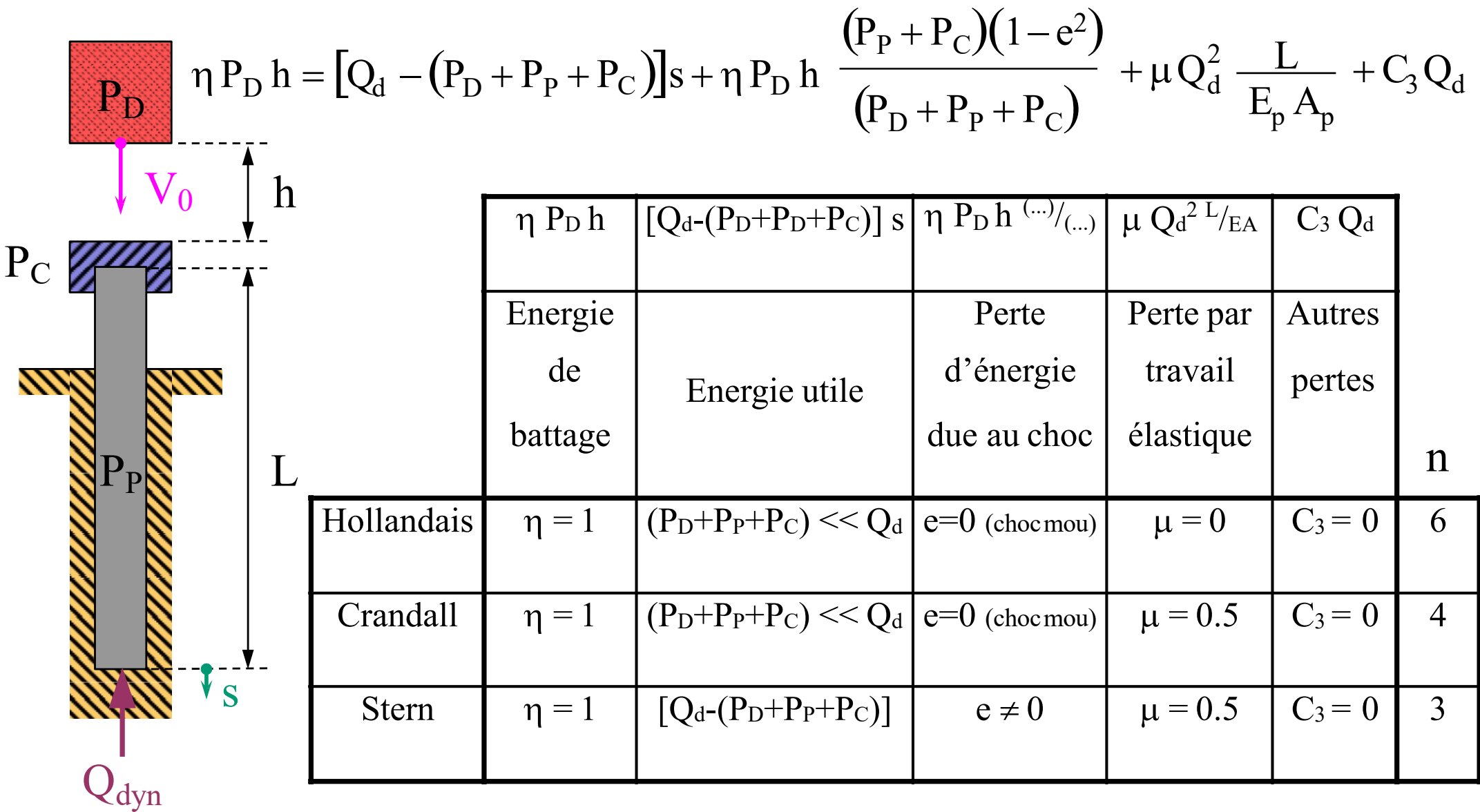
$[Q_d - (P_D + P_P + P_C)] s$  : Energie utile  
 part de l'énergie induisant l'enfoncement du pieu

$\eta P_D h^{(...)/(...)}$  : 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)  
 $\mu$  : 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

## Pieu en BA préfabriqué

- 12 m de longueur
- 40 x 40 cm de section
- 40 GN/m<sup>2</sup> de module

## 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

- Capacité portante dynamique  $Q_d$  d'après Crandall = 3200 kN
- avec tassement élastique calculé  $s_0 = 8.1$  mm  
→ enfoncement permanent (refus) sous un coup de mouton  $s = 1.38$  mm
- avec tassement élastique mesuré  $s_0 = 9$  mm  
→ enfoncement permanent (refus) sous un coup de mouton  $s = 0.93$  mm

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

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

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

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

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

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

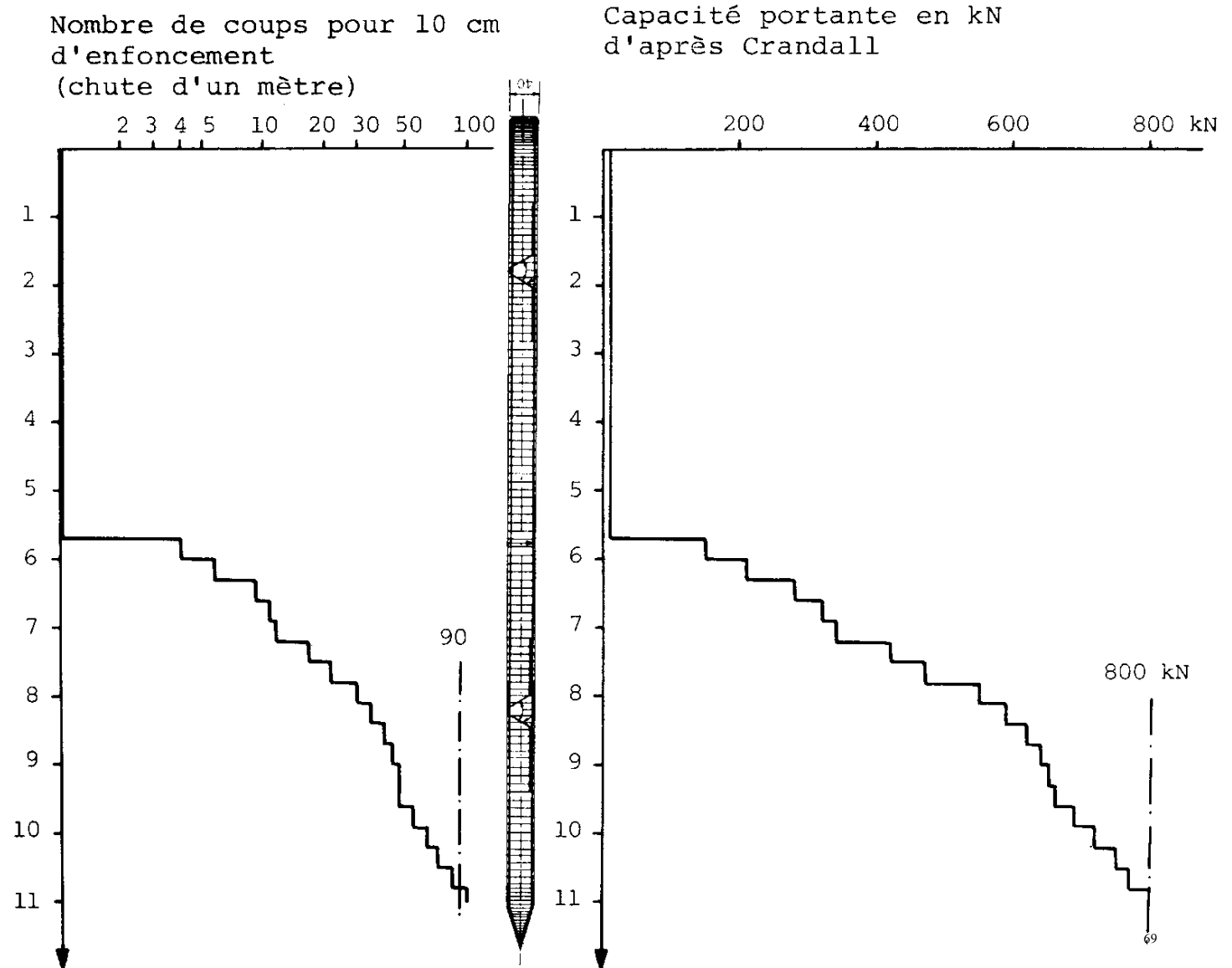
$$P_C = 4 \text{ kN}$$

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

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

# 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

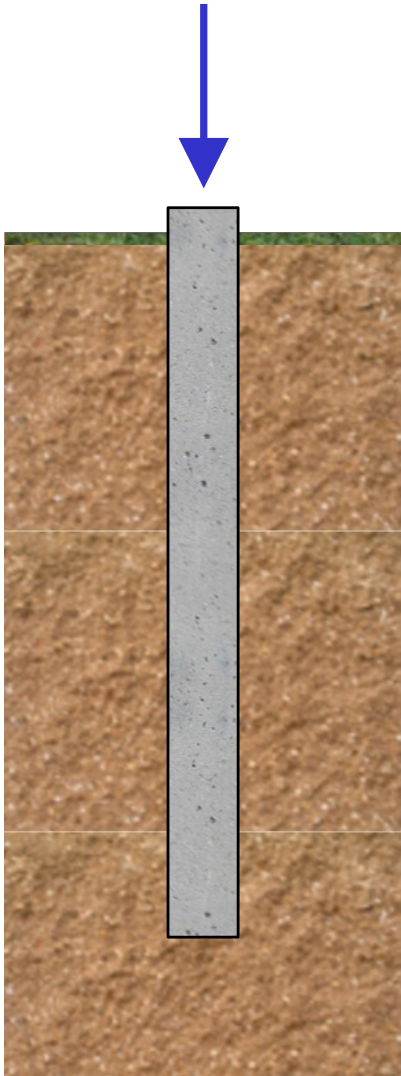
### 4. Vérification et contrôle

### 5. Frottement négatif

## 3. Groupe de pieux

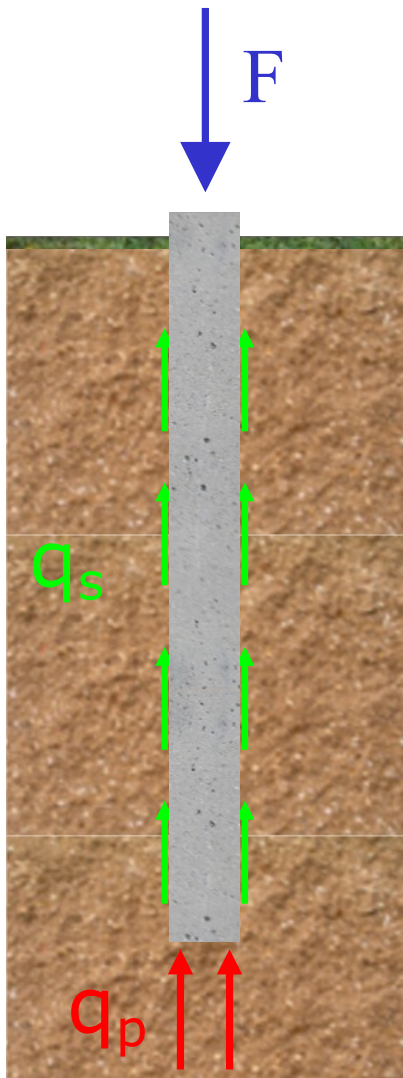
# Sources d'incertitude

---



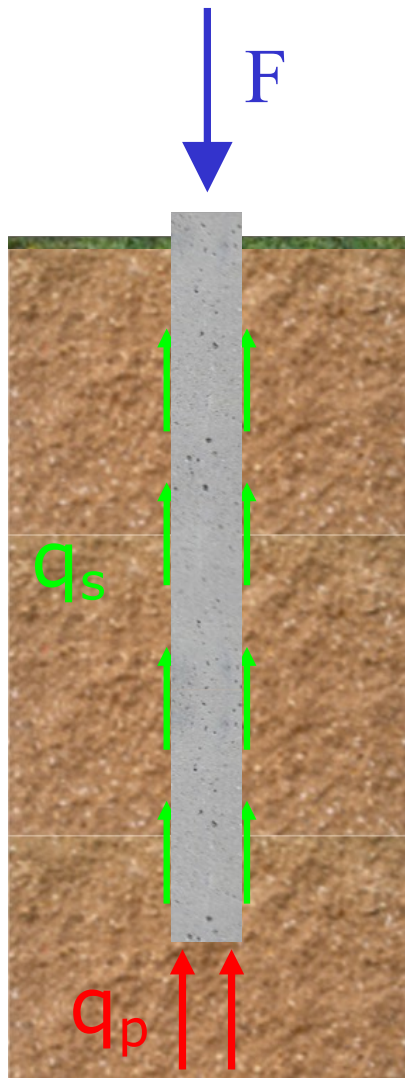
- Actions (sollicitations)
- Caractéristiques du terrain
- Matériau constitutif du pieu
- Qualité d'exécution du pieu
- Mécanisme de rupture et modèle de calcul

# Vérification de la sécurité structurale externe selon la SIA 267



$F_d = \gamma_F \cdot F_k$	Facteur de charge $\gamma_F$	Type 1	Type 2	Type 3
<b>Actions permanentes</b> - à effet défavorable - à effet favorable	$\gamma_{G,sup} =$ $\gamma_{G,inf} =$	1,10 0,90	1,35 0,80	1,00 1,00
<b>Actions variables</b> - 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
<b>Actions du sol de fondation</b> <b>Poids des terres</b> - à effet défavorable - à effet favorable	$\gamma_{G,sup} =$ $\gamma_{G,inf} =$	1,10 0,90	1,35 0,80	1,00 1,00
<b>Poussée des terres</b> - à effet défavorable - à effet favorable	$\gamma_{G,Q,sup} =$ $\gamma_{G,Q,inf} =$	1,35 0,80	1,35 0,70	1,00 1,00
<b>Pression hydraulique</b> - à effet défavorable - à effet favorable	$\gamma_{G,Q,sup} =$ $\gamma_{G,Q,inf} =$	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

$\eta_a$  : 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 minimales 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



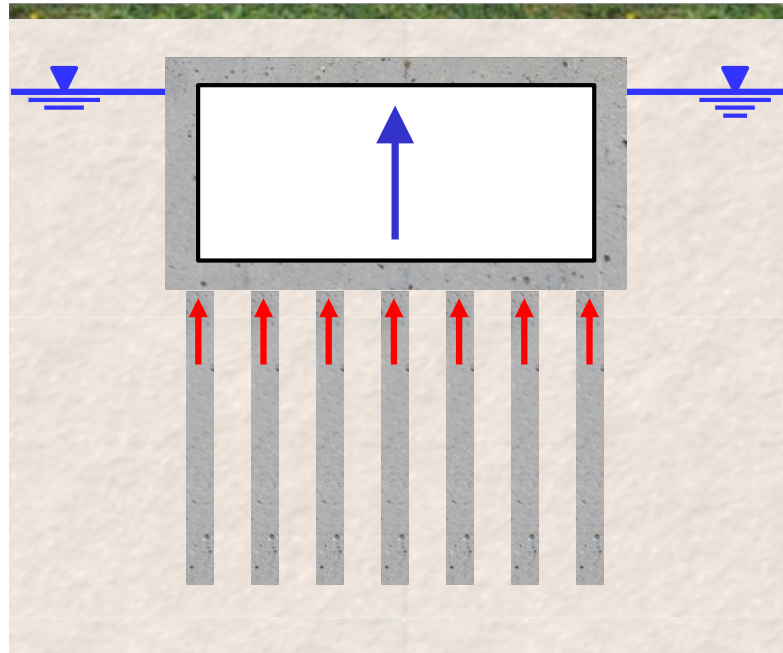
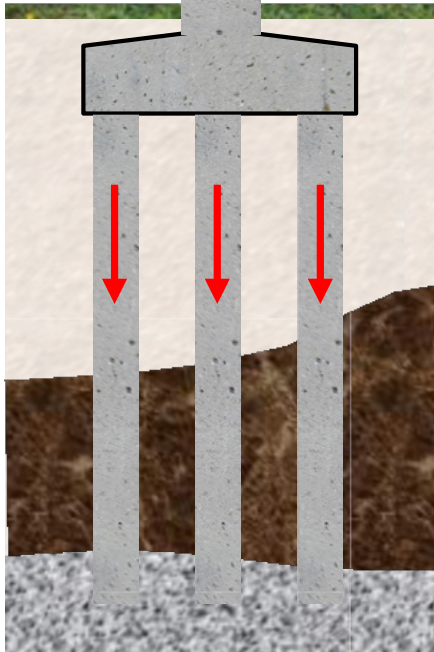
# Facteur de conversion fonction du mode de détermination de la résistance ultime externe

- 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

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

