



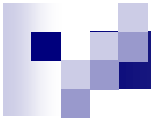
FONDATIONS SUPERFICIELLES

Stéphan BERNHARD
LRPC de LYON



Sommaire

1. Essais de mécanique des sols in situ
 - Essai pressiométrique*
 - Essai au pénétromètre statique*
 - Essai au pénétromètre dynamique*
2. Portance des fondations superficielles
 - Méthode « c-φ »*
 - Méthode pressiométrique*
 - Méthode pénétrométrique*
3. Justification des fondations superficielles
 - Capacité portante*
 - Stabilité au glissement*
 - Stabilité au renversement*
 - Stabilité d'ensemble*
4. Exercice d'application



1. Essais in situ

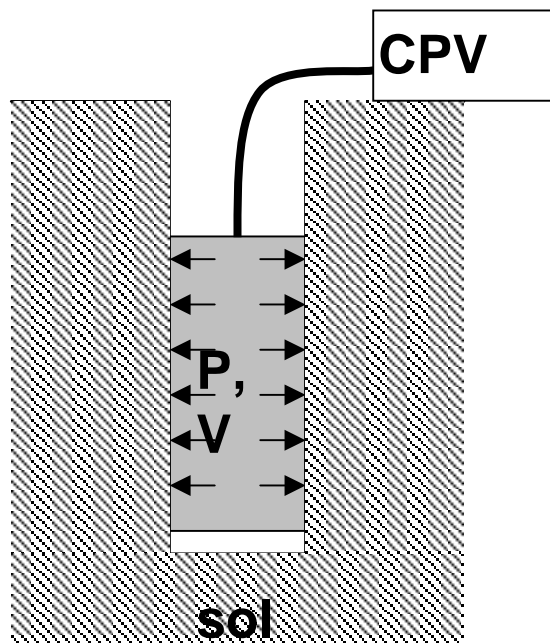


Essai pressiométrique (1)

■ Principe :

- introduction dans un forage préalablement établi d'une sonde cylindrique
- dilatation de la sonde par pression
- mesure de la déformation volumique de la sonde.

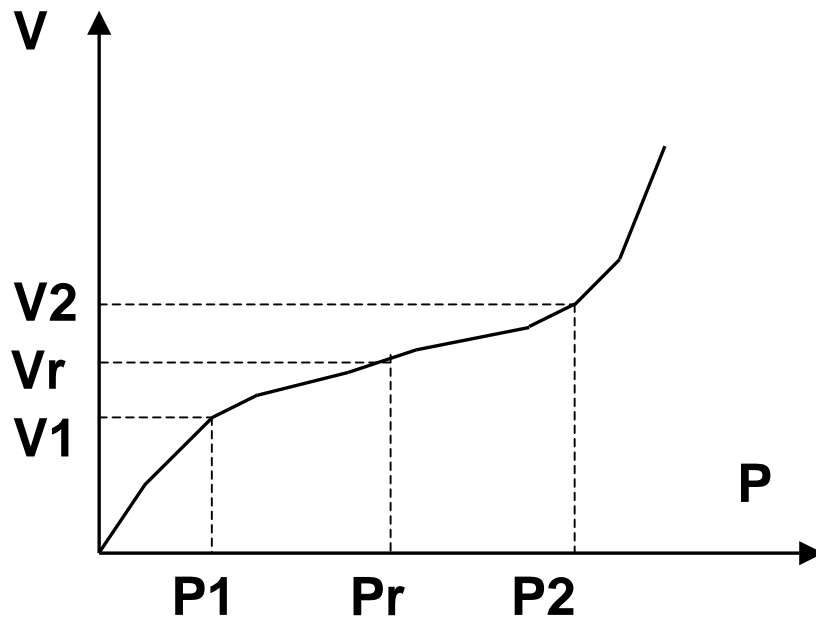
Essai pressiométrique (2)



- Réalisation de paliers de chargement de pression

=> enregistrement du volume de la sonde à l'aide du contrôleur pression-volume CPV

Essai pressiométrique (3)



- Dans une certaine plage de pression, le sol a un comportement élastique :
=> enregistrement du volume de la sonde à l'aide du contrôleur pression-volume CPV
- L'essai permet de mesurer deux paramètres du sol en place :
 - p_l : pression limite
 - E_m : module pressiométrique



Essai pressiométrique (4)

- Le sol réagit en cisaillement à la sollicitation due à l'expansion de la sonde (théorie des cylindres de Lamé) :

Le module de déformation vaut donc :

$$E_M = 2(1 + \nu)V \frac{P_2 - P_1}{V_2 - V_1}$$

ν : coefficient de Poisson du sol, pris égal à 0,33 par convention

V : volume de la cavité au point d'inflexion de la courbe



Essai pressiométrique (5)

- La pression limite est par convention égale à la pression de la sonde pour laquelle le volume de la sonde vaut V_s+2V_1 , V_s étant le volume initial de la sonde :

$$p_l = p(V=V_s+2.V_1)$$

- Dans la pratique, on introduit :

$$p_l^* = p_l - p_0$$

où p_0 est la pression du sol au repos



Essai pressiométrique (6)

- Corrélations connues :

$$\underline{c_u} = \underline{pl^*/5,5}$$

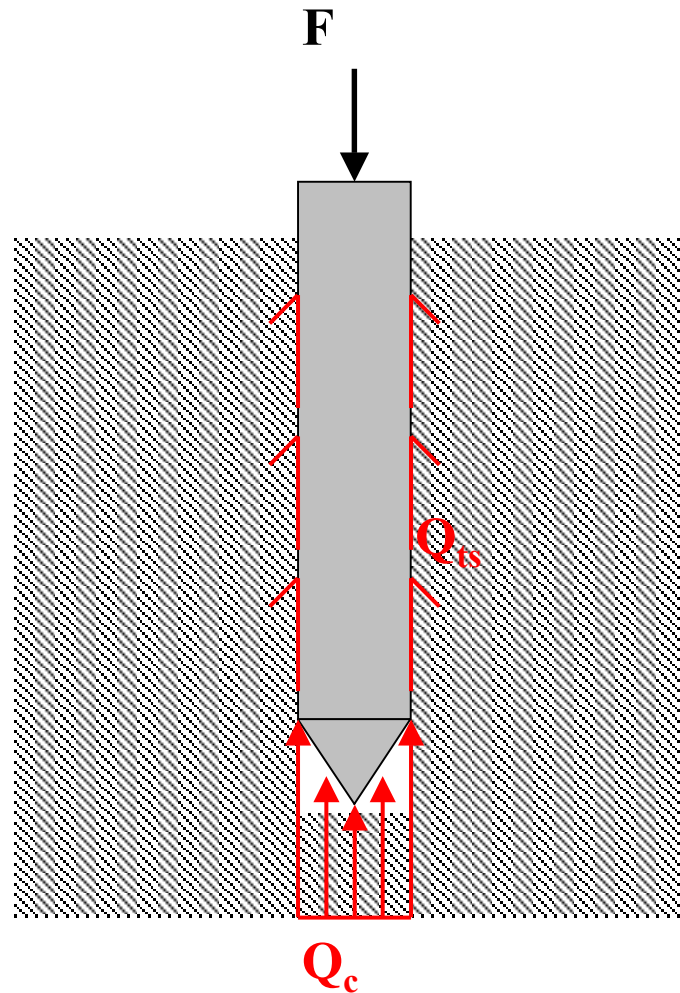
pour les sols peu consistants ($pl^* < 0.05$ MPa)



Pénétrromètre statique (1)

- Le principe de cet essai est de foncer à vitesse constante un train de tige et une pointe de section normalisée.
- La résistance à l'enfoncement est composée de :
 - Q_c : résistance de pointe
 - Q_{ts} : résistance par frottement latéral

Pénétrromètre statique (2)





Pénétrromètre statique (3)

- Q_c est mesurée soit par des capteurs de contrainte installés dans la pointe, soit par un dispositif permettant d'enfoncer la pointe indépendamment du train de tige.
- La grandeur retenue est la résistance de pointe surfacique :

$$\underline{q_c = Q_c/A,}$$

où A est la section de la pointe



Pénétrromètre statique (4)

- Corrélations connues :

$$\underline{c_u} = \frac{(q_c - q_0)}{N_c}$$

Où $N_c = 12$ si $q_c < 1$ MPa

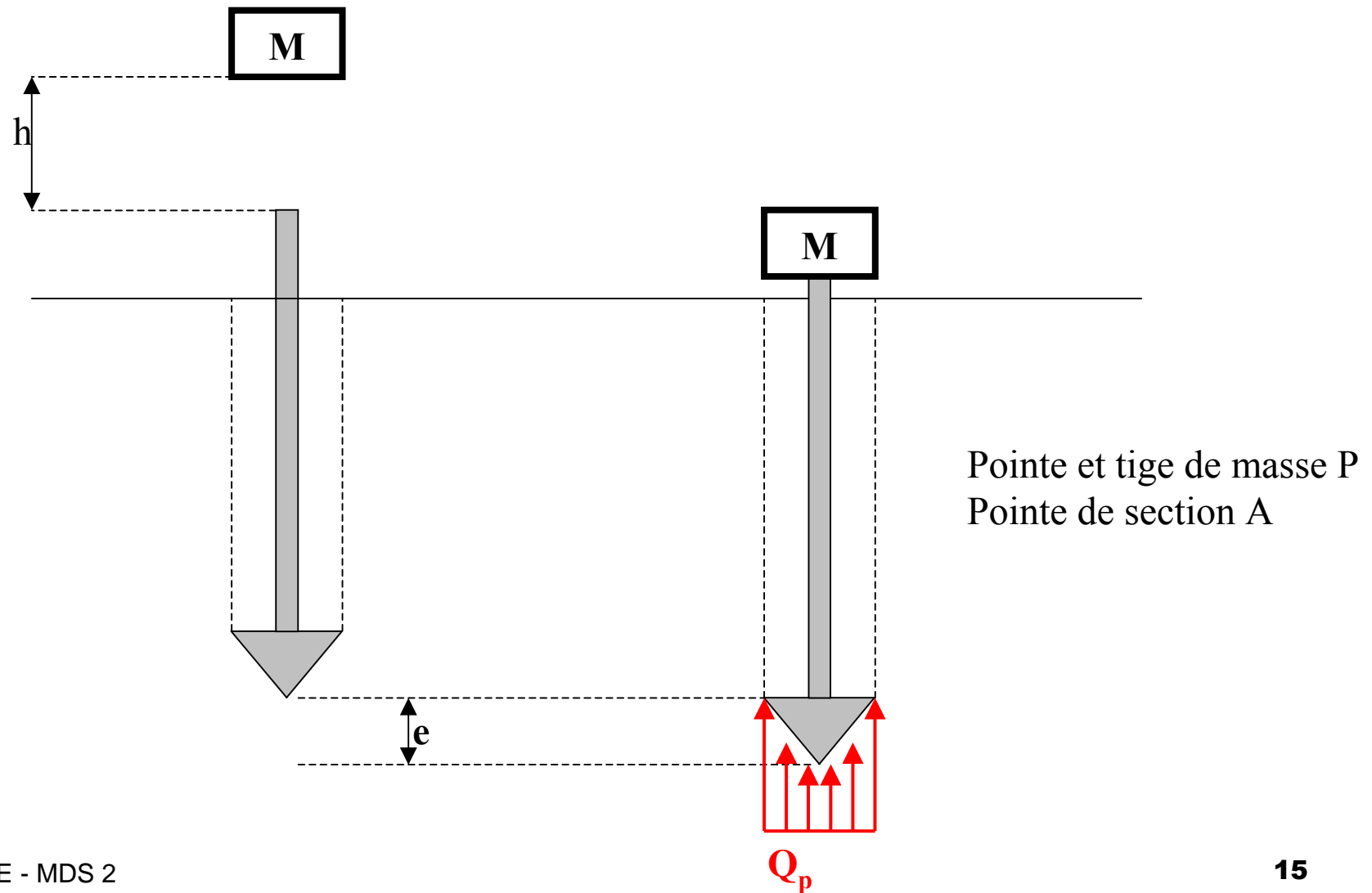
$N_c = 20$ si $q_c > 1$ MPa



Pénétromètre dynamique (1)

- Enfoncement d'un train de tige avec pointe à l'aide de la chute d'une masse (mouton).
- Pointe évasée => pas de frottement latéral.
- Mesure de l'enfoncement e par coup de mouton.

Pénétromètre dynamique (2)



Pénétromètre dynamique (3)

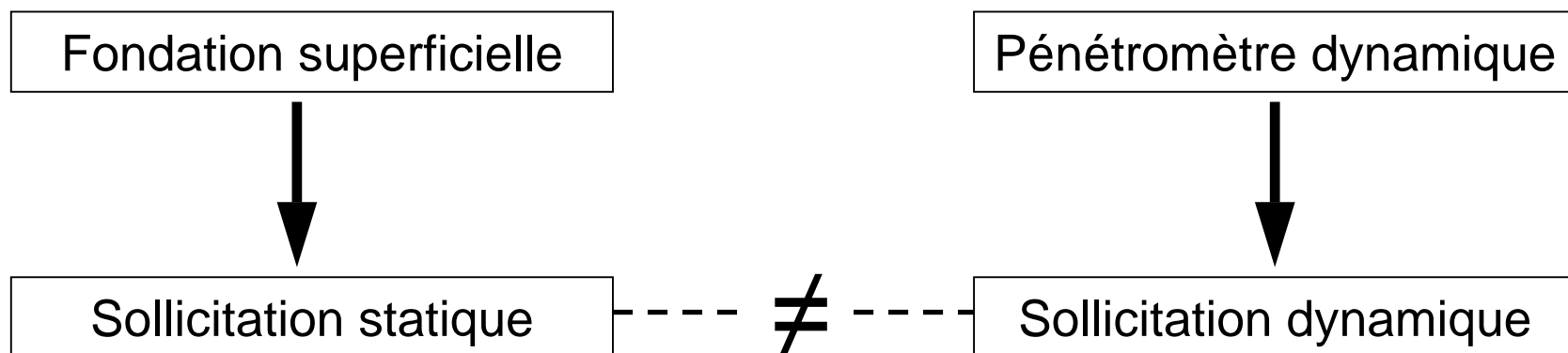
- On détermine la résistance de pointe dynamique à partir de la formule des Hollandais :

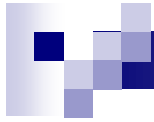
$$q_d = \frac{M}{e.(M + P)} \frac{Mgh}{A}$$

- Formule limitée en cas de rebond élastique ou en cas de refus (sol très compact ou rocher)

Pénétrromètre dynamique (4)

- Attention à ne pas confondre q_d et q_c , qui peuvent être différents notamment dans les sols fins saturés.
- L'essai ne doit pas être utilisée pour un calcul de fondation





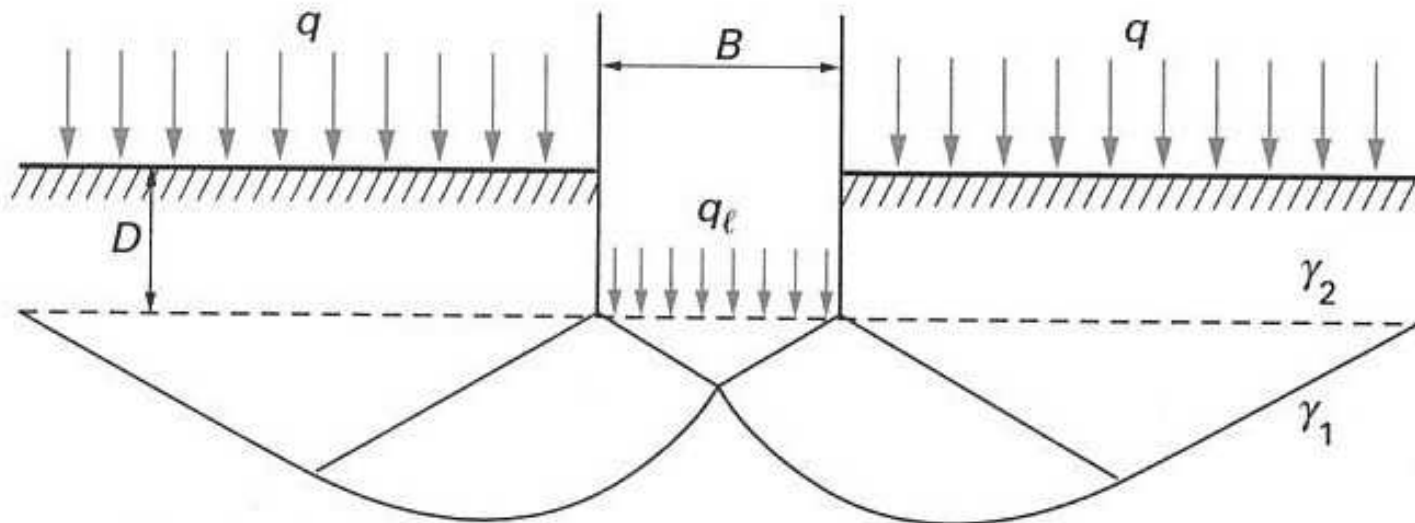
2. Portance des fondations superficielles



Méthode « c-φ »(1)

- Détermination de la capacité portante d'une fondation superficielle à l'aide des caractéristiques mécaniques intrinsèques des sols :
 - Calcul en conditions non drainées ou court terme :
 $c=c_u, \varphi = \varphi_u=0$
 - Calcul en conditions drainées ou long terme :
 $c=c', \varphi = \varphi'$

Méthode « c-φ »(2)



$$q_l' = c \cdot N_c \cdot s_c + (q + \gamma_2 \cdot D) \cdot N_q \cdot s_q + 0,5 \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma$$

$s_{c,q,\gamma}$: facteurs réducteurs dus à la forme de la semelle

$N_{c,q,\gamma}$: facteurs de portance, ne dépendant que de l'angle de frottement φ du sol sous la fondation.



Méthode « c-φ »(3)

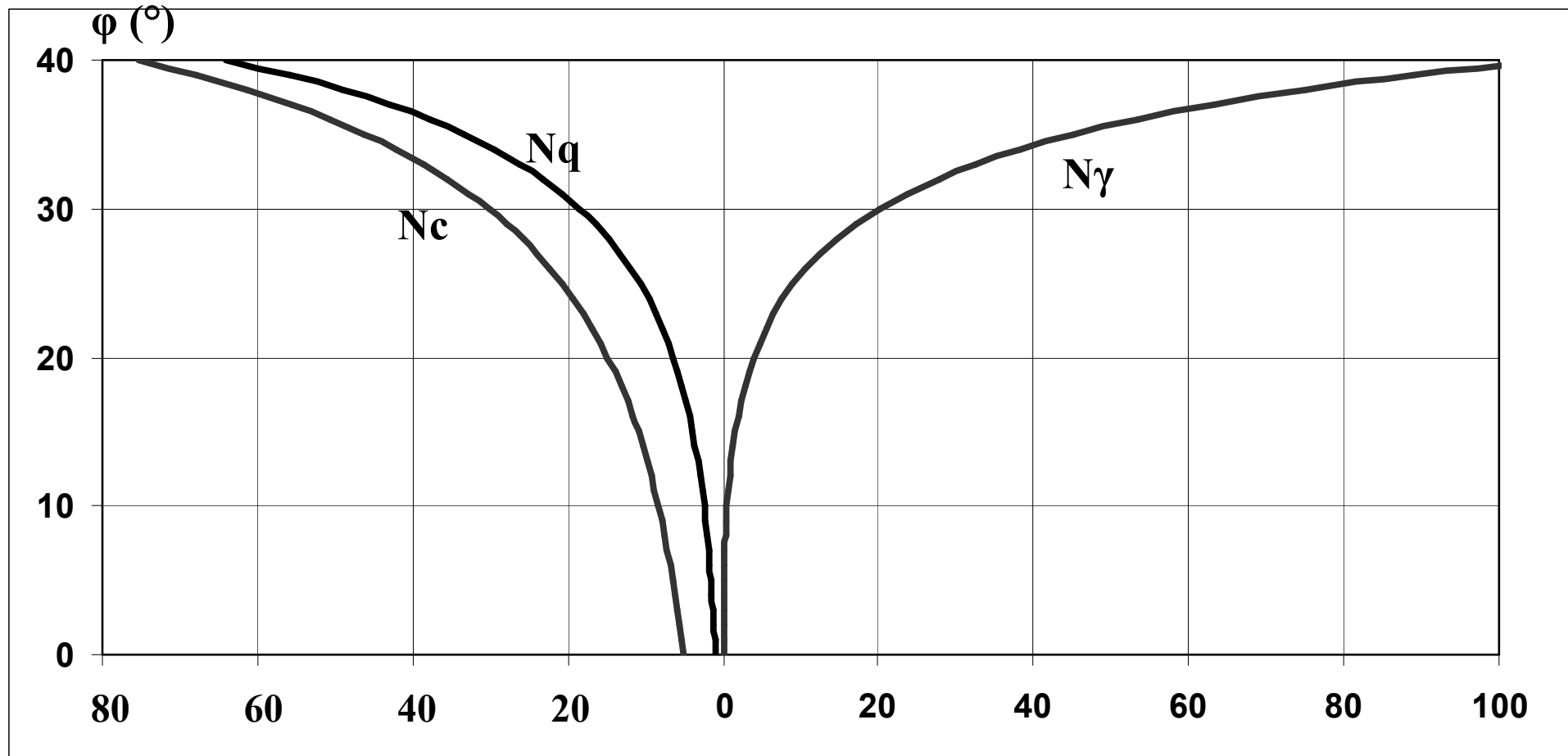
- Attention pour le calcul à long terme avec présence d'une nappe :
 - $Y_{1\cdot} \rightarrow Y_{1\cdot} - Y_w$



Méthode « c-φ »(4)

φ (°)	N_{γ}	N_q	N_c
0	0.00	1.00	5.14
5	0.10	1.57	6.49
10	0.52	2.47	8.34
15	1.58	3.94	10.98
20	3.93	6.40	14.83
25	9.01	10.66	20.72
30	20.09	18.40	30.14
35	45.23	33.30	46.12
40	106.05	64.20	75.31
45	267.75	134.87	133.87

Méthode « c-φ » (5)



Méthode « c-φ » (6)

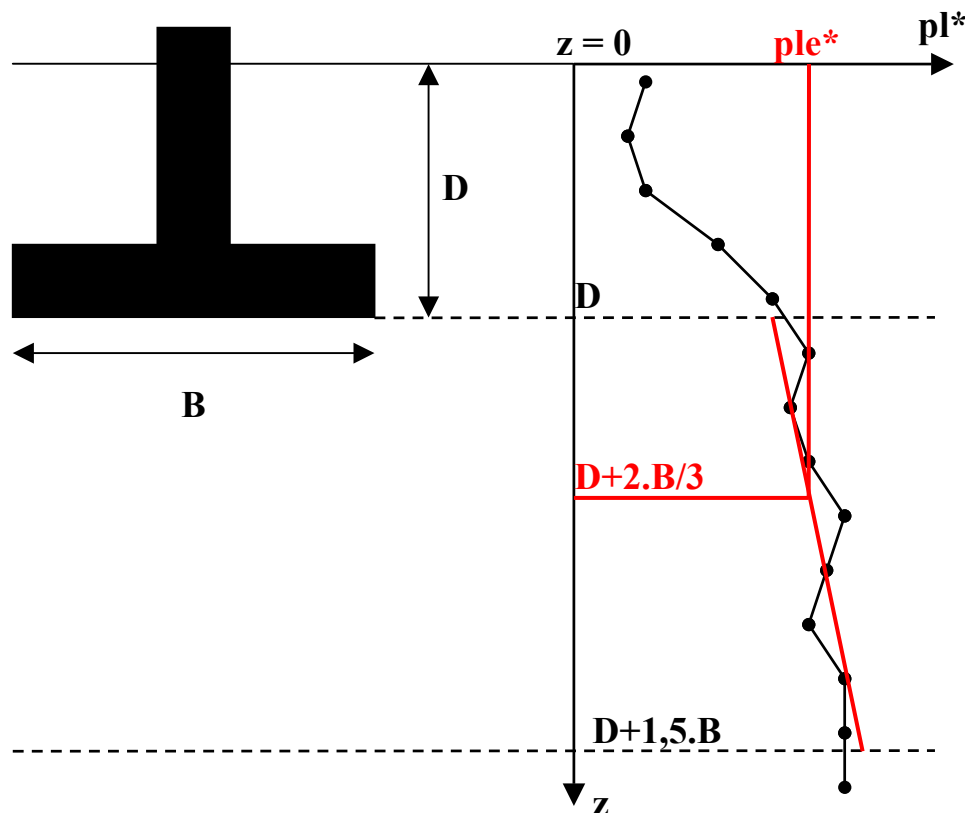
- Les facteurs de forme ont pour expression :
 - $s_\gamma = 1 - 0,3.B/L$
 - $s_q = 1 + (B/L).\sin(\varphi)$
 - $s_c = (s_q.N_q - 1)/(N_q - 1)$
- L'inclinaison de la charge est prise en compte par des coefficients réducteurs $i_{c,q,\gamma}$
- L'excentrement de la charge est prise en compte par les dimensions réduites de la fondation :
 - $L' = L - 2.e_L$
 - $B' = B - 2.e_B$

où e_L et e_B sont respectivement l'excentrement dans le sens de la longueur et de la largeur

Méthode pressiométrique(1)

- Pression limite nette équivalente :

Si le terrain est homogène entre la base de la fondation et $1,5B$ sous la base de la fondation :



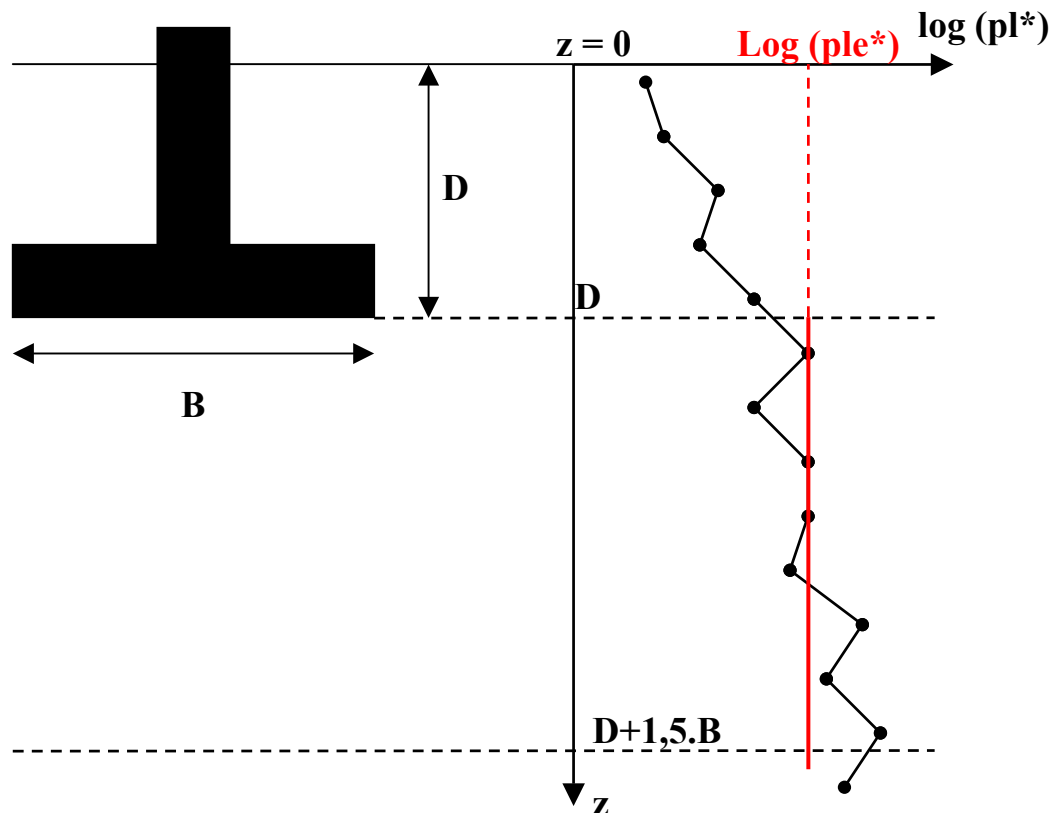
Linéarisation de la courbe pressiométrique sur l'intervalle $[D; D+1,5.B]$, puis calcul de ple^* sur la droite obtenue :

$$\underline{ple^* = pl^* (D+2.B/3)}$$

Méthode pressiométrique(2)

- Pression limite nette équivalente :

Si le terrain est constitué de matériaux de natures différentes entre la base de la fondation et $1,5B$ sous la base de la fondation :



Moyenne harmonique des pl^* sur l'intervalle $[D; D+1,5.B]$, en éliminant les valeurs singulières :

$$p_{le}^* = \sqrt[n]{(p_{l1}^* \cdot p_{l2}^* \cdot \dots \cdot p_{ln}^*)}$$

On définit également l'encastrement équivalent :

$$D_e = \frac{1}{p_{le}^*} \int_0^D p_1^*(z) dz$$

Méthode pressiométrique(3)

- Capacité portante du sol de fondation :

$$\underline{q_l'} = \underline{q_0'} + k_p \cdot \underline{p_{le}^*}$$

Où :

- q_0' est la contrainte verticale effective au niveau de la fondation après travaux.
- k_p est le facteur de portance pressiométrique, déterminé en fonction de la forme de la fondation, de la nature et des caractéristiques pressiométriques du terrain en place

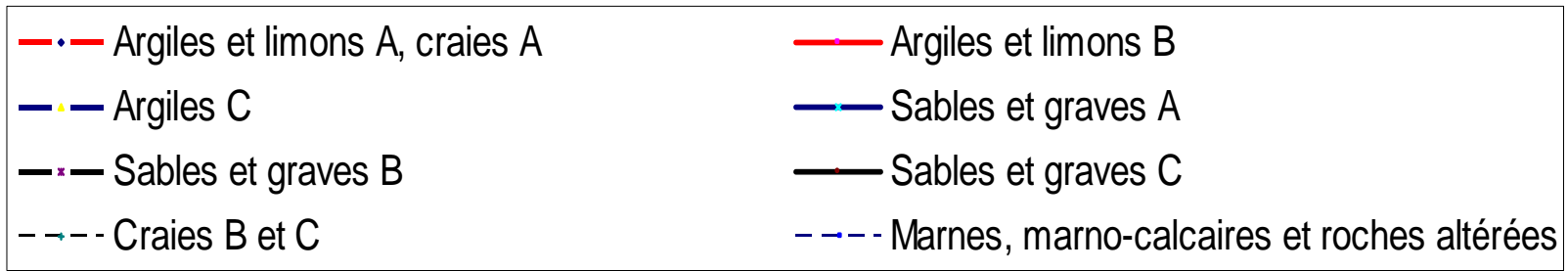
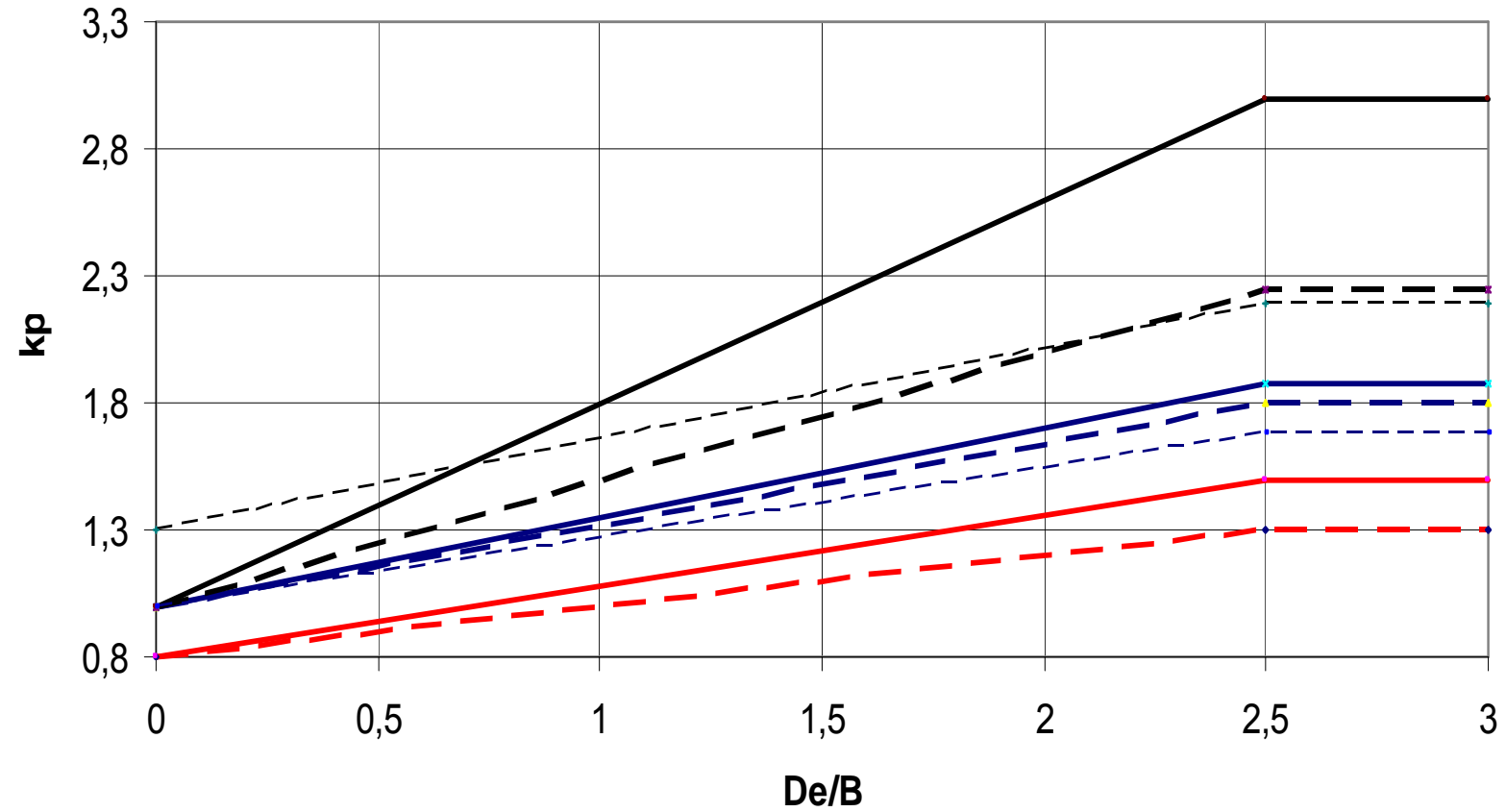
Méthode pressiométrique(4)

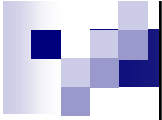
■ Classification des sols :

<i>Classes de sols</i>		<i>p_r (MPa)</i>	<i>q_c (MPa)</i>
Argiles, limons	A – mous	< 0,7	< 3,0
	B – fermes	1,2 à 2,0	3,0 à 6,0
	C – très fermes à durs	> 2,5	> 6,0
Sables, graves	A – lâches	< 0,5	< 5,0
	B – moyennement compacts	1,0 à 2,0	5,0 à 15,0
	C – compacts	> 2,5	> 20,0
Craies	A – molles	< 0,7	< 5,0
	B – altérées	1,0 à 2,5	> 5,0
	C – compactes	> 3,0	-
Marnes, marno-calcaires	A – tendres	1,5 à 4,0	-
	B – compacts	> 4,5	-
Roches	A – altérées	2,5 à 4,0	-
	B – compactes	> 4,5	-

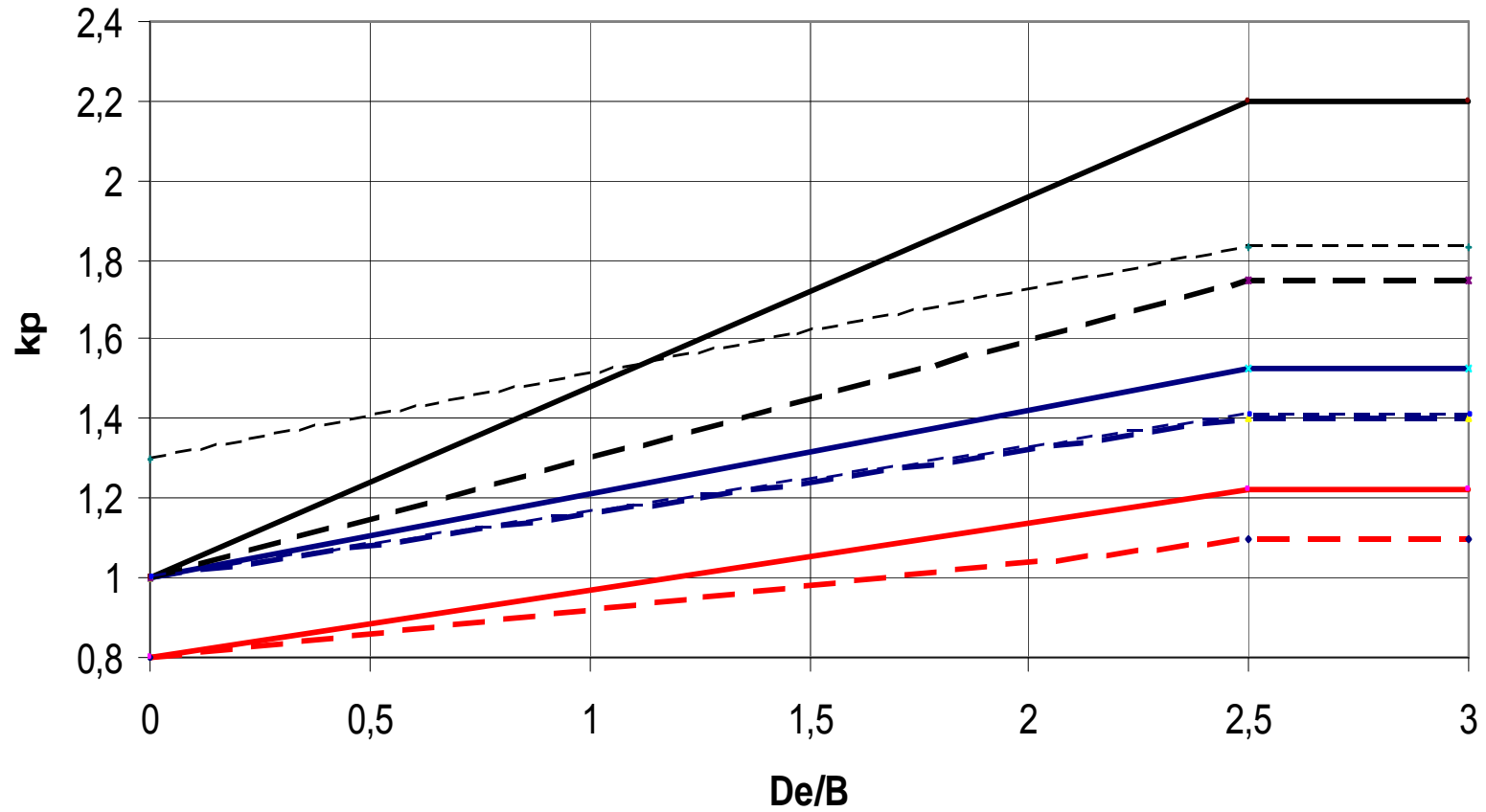


semelle carrée





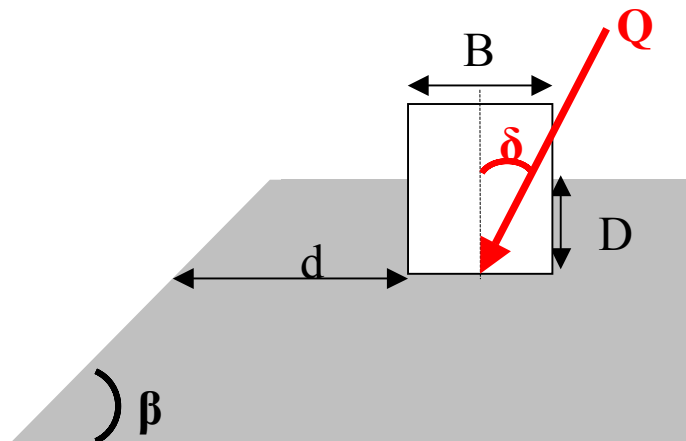
semelle filante



- Argiles et limons A, craies A
- Argiles et limons B
- Argiles C
- Sables et graves A
- Sables et graves B
- Sables et graves C
- Craies B et C
- Marnes, marno-calcaires et roches altérées

Méthode pressiométrique(7)

- Influence de l'inclinaison et de la proximité d'un talus :



d : distance entre le
pieds de la fondation
et le talus

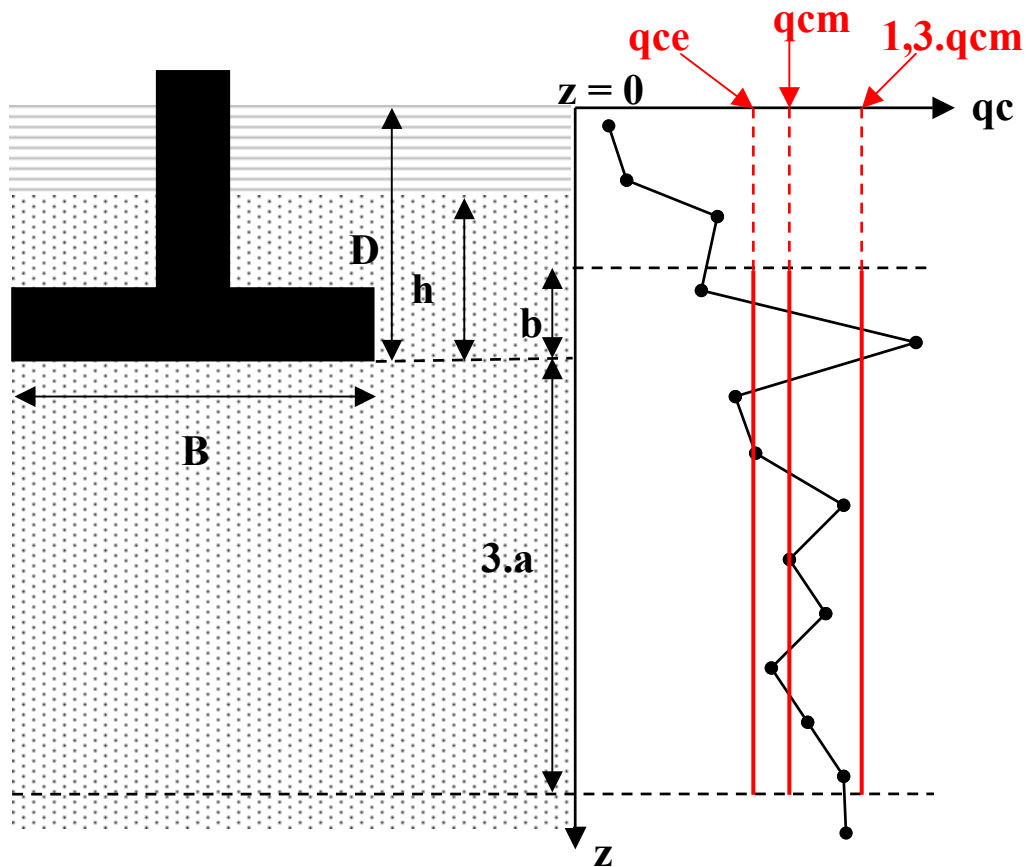
Ajout d'un coefficient réducteur :

$$\underline{q_l'} = \underline{q_0'} + \underline{i_{\delta\beta}} \cdot \underline{k_p} \cdot \underline{p_{le}^*}$$

La méthode de calcul de $i_{\delta\beta}$ est explicitée dans le Fascicule 62 – Titre V du CCTG et ne fait pas l'objet du cours.

Méthode pénétrométrique(1)

- Résistance de pointe équivalente :



$$q_{ce} = \frac{1}{3a + b} \int_{D-b}^{D+3a} q_{cc}(z) dz$$

où q_{cc} est une moyenne de q_c ,
écrêtée à $1,3q_{cm}$, avec :

$$q_{cm} = \frac{1}{3a + b} \int_{D-b}^{D+3a} q_c(z) dz$$

où $a = B/2$ si $B > 1m$,
 $a = 0,5m$ si $B < 1m$,
 $b = \min(a; h)$,

h étant la profondeur
d'encastrement de la fondation dans
la couche porteuse.

Encastrement équivalent :

$$D_e = \frac{1}{q_{ce}} \int_0^D q_c(z) dz$$



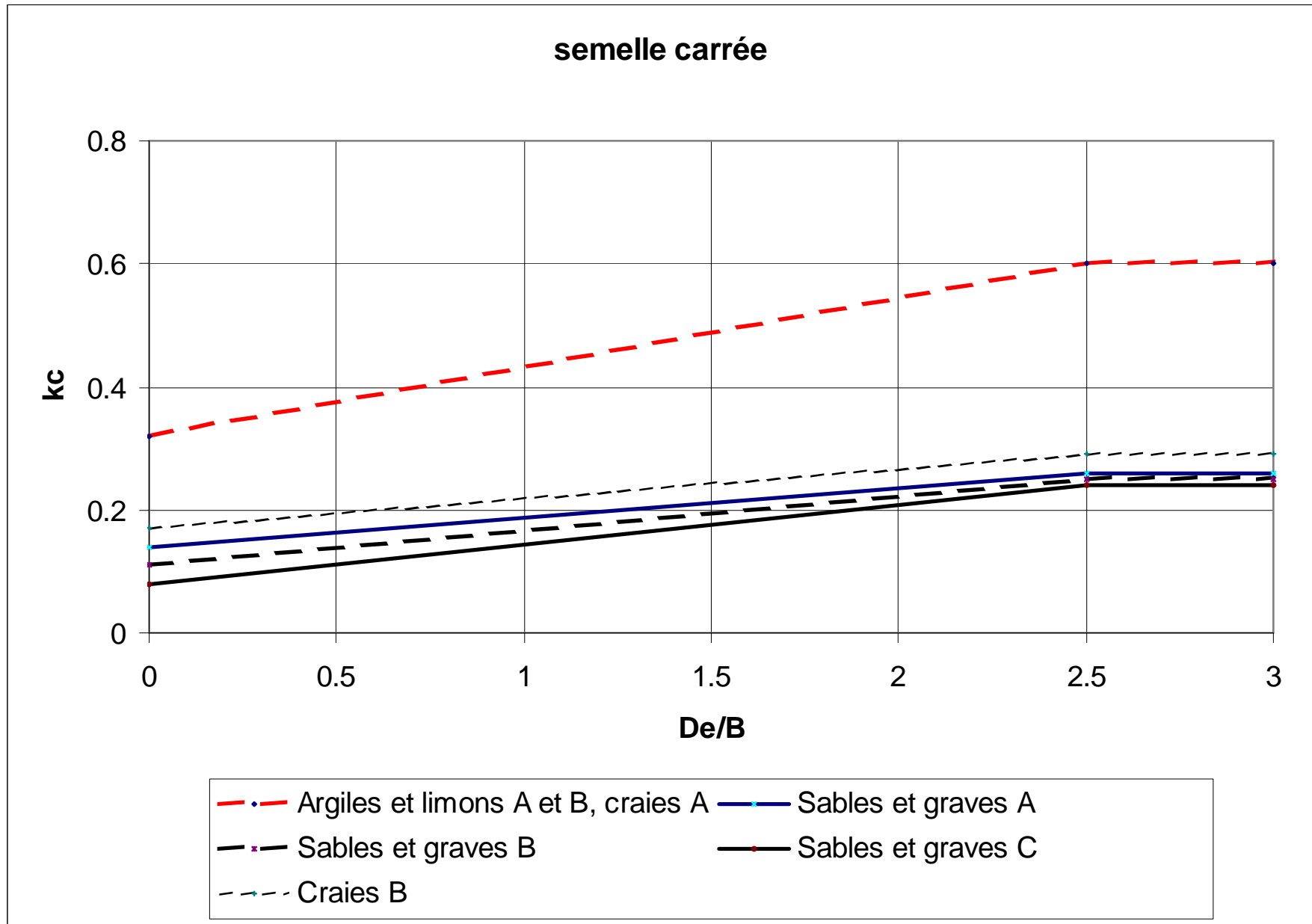
Méthode pénétrométrique(2)

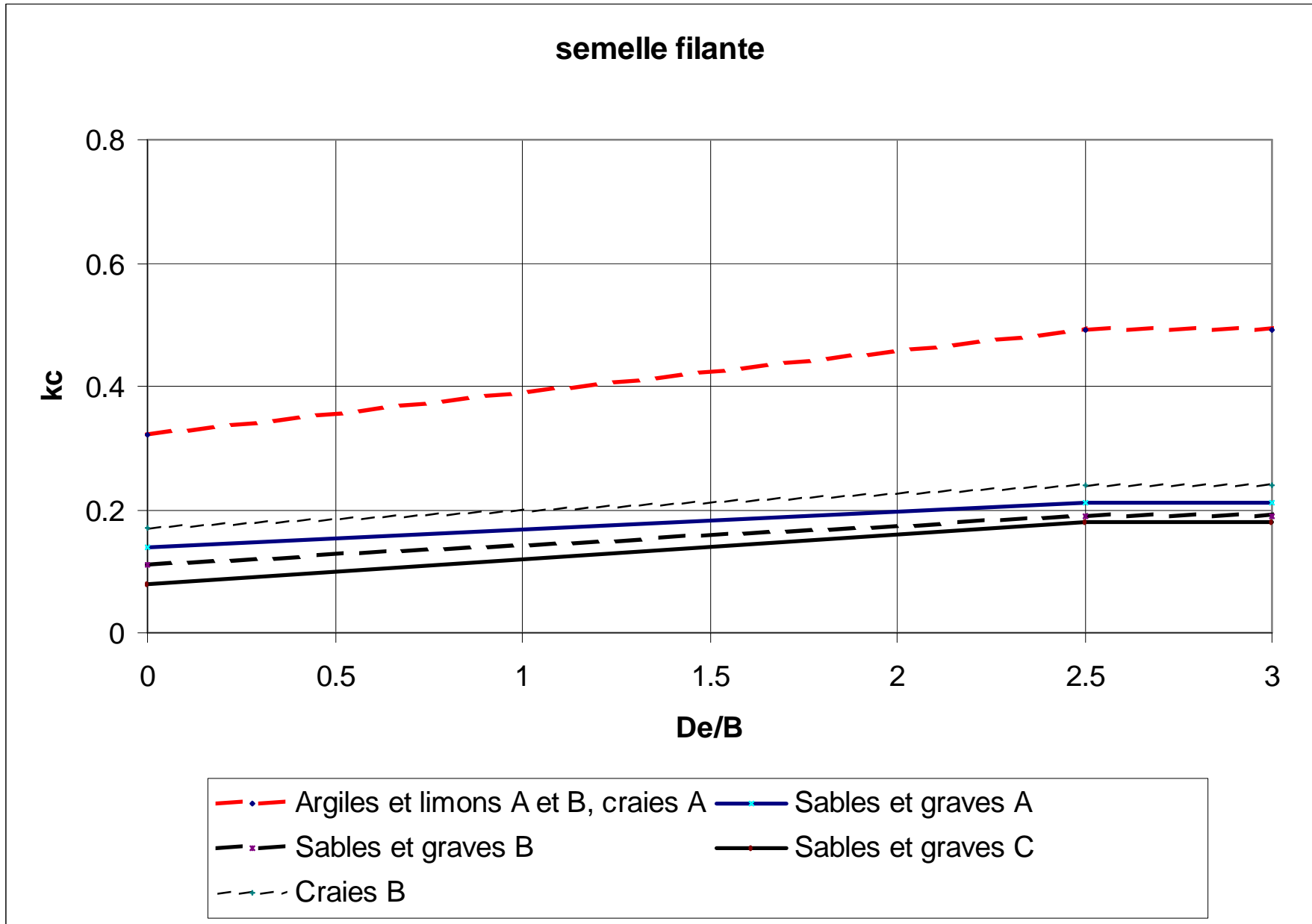
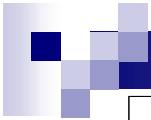
- Capacité portante du sol de fondation :

$$\underline{q_l} = \underline{q_0} + \underline{k_c} \cdot \underline{q_{ce}}$$

Où :

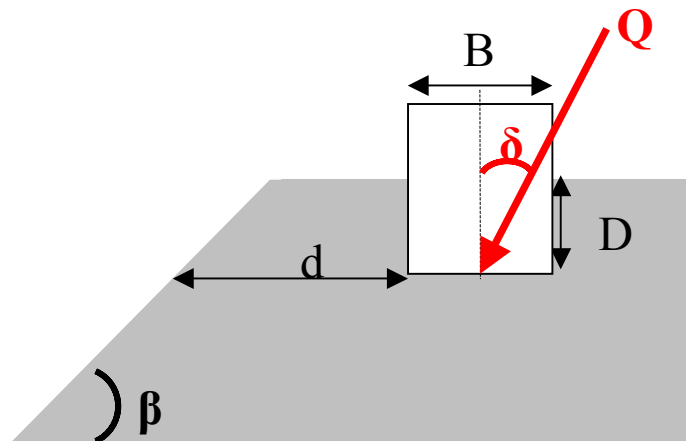
- q_0' est la contrainte verticale effective au niveau de la fondation après travaux.
- k_c est le facteur de portance pénétrométrique, déterminé en fonction de la forme de la fondation, de la nature et des caractéristiques pressiométriques du terrain en place





Méthode pénétrométrique(5)

- Influence de l'inclinaison et de la proximité d'un talus :



d : distance entre le
pieds de la fondation
et le talus

De la même façon que pour l'essai pressiométrique, facteur réducteur :

$$\underline{q_l'} = \underline{q_0'} + \underline{i_{\delta\beta}} \cdot \underline{k_c} \cdot \underline{q_{ce}}$$

La méthode de calcul de $i_{\delta\beta}$ est explicitée dans le Fascicule 62 – Titre V du CCTG et ne fait pas l'objet du cours.



3. Justification des fondations superficielles

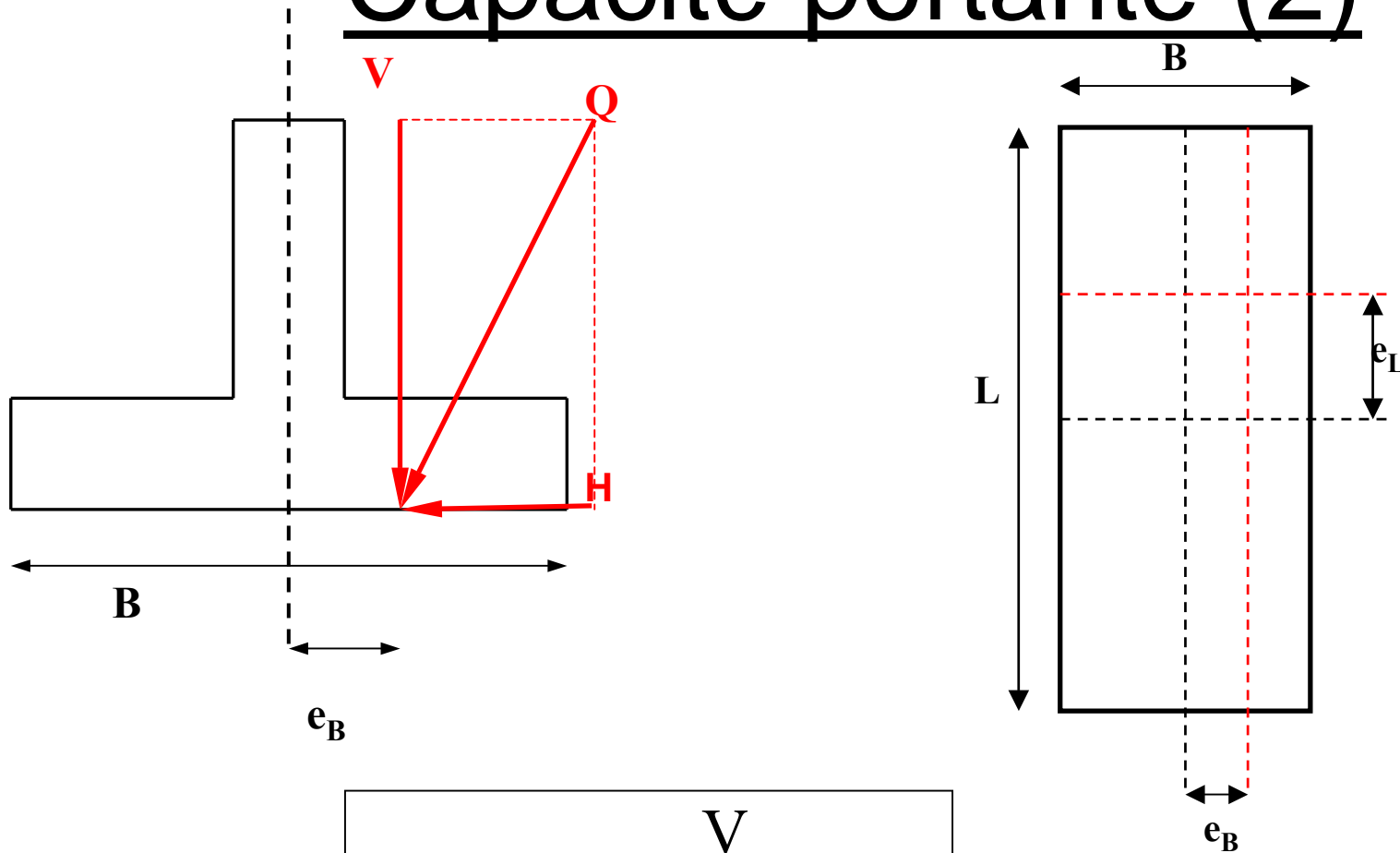
Capacité portante (1)

- La contrainte de référence de la fondation doit vérifier :

$$q_{\text{ref}}' \leq \frac{1}{\gamma_q} (q_1' - q_0') + q_0' \quad \text{ou} \quad q_{\text{ref}} \leq \frac{1}{\gamma_q} (q_1' - q_0') + q_0$$

- Où $\gamma_q = 2$ pour les ELU
 $\gamma_q = 3$ pour les ELS

Capacité portante (2)



$$q_{\text{ref}} = \frac{V}{(B - 2e_B)(L - 2e_L)}$$



Glissement

- L'inégalité à vérifier est la suivante :

$$H_d \leq \frac{V_d \cdot \tan(\varphi')}{1,2} + \frac{c' \cdot A'}{1,5}$$

Où :

- H_d et V_d sont les efforts horizontal et vertical calculés aux combinaisons ELU fondamentales et accidentelles,
- A' est l'aire de la surface comprimée



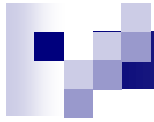
Renversement

- Voir cours « ouvrages de soutènement »



Stabilité d'ensemble

- Voir cours « stabilité des pentes »



4. Exercice d'application