

*Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique  
Paris, 26 janvier 2005*

-----  
**Les règles de calcul des fondations  
selon l'Eurocode 7**

Roger Frank  
*Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols  
C.E.R.M.E.S (ENPC-LCPC)  
Cité Descartes, Champs-sur-Marne*

-----  
Yves Canépa  
*Direction Régionale de l'Équipement Ile de France  
D.R.E.I.F (LREP)  
Melun*



## Présentation

1. Contexte général
2. Clauses concernant les fondations superficielles (Section 6)
3. Clauses concernant les fondations profondes (Section 7)



## EN 1997-1 - Table des matières

Section 1 - Généralités

Section 2 - Bases du calcul géotechnique



Section 3 - Données géotechniques

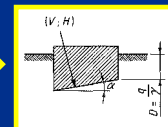
Section 4 - Surveillance de l'exécution des travaux, suivi et entretien

Section 5 - Mise en œuvre des remblais, rabattement de nappe et renforcement des terrains



## EN 1997-1 - Table des matières (suite)

Section 6 - Fondation superficielles



Section 7 - Fondations profondes



Section 8 - Ancrages

Section 9 - Ouvrages de soutènement

Section 10 - Rupture d'origine hydraulique

Section 11 - Stabilité d'ensemble

Section 12 - Remblais



## EN 1997-1 : Liste des annexes

A - Facteurs partiels de sécurité pour les états limites ultimes (Normative)

B - Éléments de base concernant les Approches de Calcul 1, 2 et 3 (Informative)

C - Procédures pour déterminer les poussées des terres sur les murs verticaux (Informative)

D - Méthode analytique de calcul de la capacité portante (Informative)

E - Méthode semi-empirique pour l'estimation de la capacité portante (Informative)



## EN 1997-1 : Liste des annexes (suite)

F - Méthodes d'évaluation du tassement (Informative)

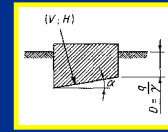
G - Méthode de détermination de la capacité portante présumée des fondations superficielles sur rocher (Informative)

H - Déplacements limites des fondations et déformation des structures (Informative)

J - Aide-mémoire pour la surveillance des travaux et le suivi du comportement des ouvrages (Informative)



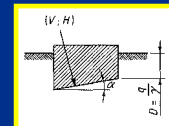
## Section 6 - Fondations superficielles



- 6.1 Généralités
- 6.2 États limites (liste à considérer)
- 6.3 Actions et situations de calcul (liste à considérer)
- 6.4 Considérations relatives au calcul et à la construction (conception : gel ..., méthode de calculs)
- 6.5 Calcul à l'état limite ultime (stabilité générale, portance, glissement)
- 6.6 Calcul à l'état limite de service (tassement, soulèvement, vibrations)
- 6.7 Fondations au rocher (considérations complémentaires pour le calcul)
- 6.8 Calcul de la structure des fondations superficielles
- 6.9 Préparation du sol d'assise



## Vérifications à effectuer - article 6.4



- Méthode directe :
  - vérifier chacun des états limites (ELU et ELS)
  - calculer le tassement pour les ELS
- Méthode indirecte :
  - calcul à l'ELS uniquement, en se basant sur l'expérience
- Méthode prescriptive :
  - exemple de la pression de contact présumée sur les roches (Annexe G)

pour vérifier qu'aucun état limite pertinent n'est atteint, l'une des 3 méthodes de calcul doit être utilisée

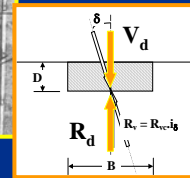
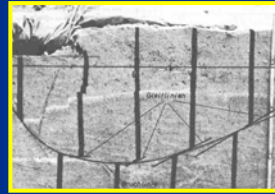


## Etats limites ultimes (ELU) - article 6.5

- Capacité portante : article 6.5.2

$$\rightarrow V_d \leq R_d$$

$R_d$  : méthode analytique ou semi-empirique ou prescriptive

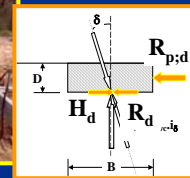


- Glissement sur la base : article 6.5.3

$$\rightarrow H_d \leq R_d + R_{p;d}$$

$R_d = V'_d \tan \delta_d$  ou  $(V'_d \tan \delta_k) / \gamma_{R;h}$

$R_d = A_c c_{u;d}$  ou  $R_d = (A_c c_{u;k}) / \gamma_{R;h}$   
 [+  $R_d \leq 0,4 V_d$ ]



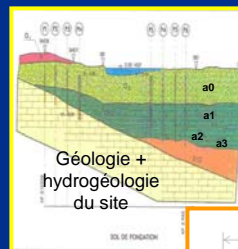
## Etats limites ultimes ELU (suite)

- Stabilité générale  
(art. 6.5.1  $\Rightarrow$  section 11)

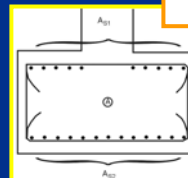
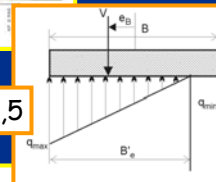
- Renversement (art. 6.5.4)  
 $e/B < 1/3$  ( ou  $0,6 D$  )

- Résistance structurale  
(article 6.8  $\Rightarrow$  EN 1992 à 6 et 9)

- Déplacements à considérer  
(article 6.5.5)



$$A_c/A > 0,5$$



## Etats limites de service ELS - article 6.6

- Tassement
  - Tenir compte des tassements immédiats et des tassements différés
  - Estimer les tassements différentiels et les rotations relatives
- Soulèvement
- Vibrations

Vérifier que les valeurs limites  $C_d$  pour la structure ne sont pas atteintes

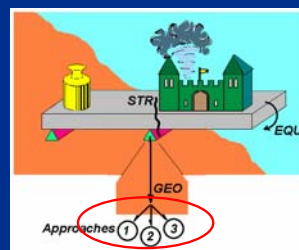
→  $E_d \leq C_d$  ou faible mobilisation de la résistance du terrain



## Les vérifications à faire sont pratiquement les mêmes que celles effectuées aujourd'hui

par exemple selon le Fascicule 62 titre V les états limites à vérifier sont :

- Mobilisation du sol (ELU & ELS)
- Renversement (ELU)
- Décompression du sol (ELS)
- Glissement (ELU)
- Matériaux constitutifs de la fondation
- Stabilité d'ensemble



## Valeur caractéristique et valeur de calcul en géotechnique - article 2.4

Valeur caractéristique  $X_k$  : estimation prudente de la valeur affectant l'état limite considéré



### Valeur de calcul

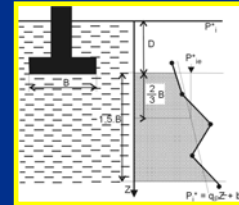
- d'un paramètre :  $X_d = X_k / \gamma_M$
- et, pour les actions et les résistances

$$E_d = E \{ \gamma_F \cdot F_k \} \quad ; \quad R_d = R \{ X_k / \gamma_M \}$$

(coefficients partiels "à la source")

ou

$$E_d = \gamma_E \cdot E \{ F_k \} \quad ; \quad R_d = R \{ X_k \} / \gamma_R$$



Errements actuels

$$X_d = X_k$$

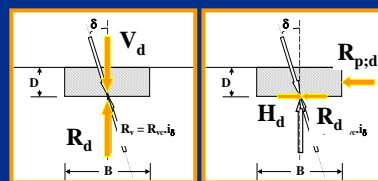
$$E_d = E \{ \gamma_F \cdot F_k \}$$

$$R_d = R \{ X_k \} / \gamma_R$$

+ combinaisons

## Fondations superficielles : influence des actions sur la résistance

La résistance dépend des actions, par l'intermédiaire de l'inclinaison et de l'excentricité des charges



Pour les cas " $\gamma_E$  et  $\gamma_R$ " (effet des actions, résistance), on peut choisir (approche 2, uniquement) :

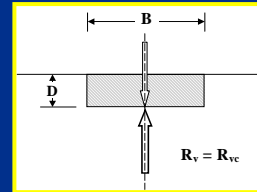
$$R_d = R \{ \gamma_F \cdot F_k ; X_k \} / \gamma_R \quad (\text{AC 2})$$

$$\text{ou} \quad R_d = R \{ F_k ; X_k \} / \gamma_R \quad (\text{AC 2*})$$

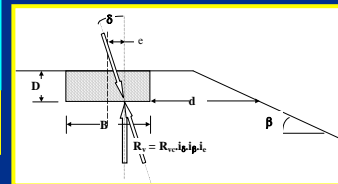
(avec AC\* on a  $F = \gamma_E \times \gamma_R$  !....)

## ELU fondamentaux STR/GEO (fondations superficielles sans actions géotechniques)

Approche de calcul	Actions sur/de la structure $\gamma_F$ ou $\gamma_E$	Résistance Géotechnique $\gamma_M$ ou $\gamma_R$
1	1,35 et 1,5	1,0
	1,0 et 1,3	$\gamma_M = 1,25$ ou 1,4
2	1,35 et 1,5	$\gamma_{Rv} = 1,4$ $\gamma_{Rh} = 1,1$
3	1,35 et 1,5	$\gamma_M = 1,25$ ou 1,4



Errements actuels  
 $\gamma_F = 1,35$  et 1,5  
 $\gamma_{Rv} = 2$  ;  $\gamma_{Rh} = 1,2$



## Section 7 - Fondations profondes

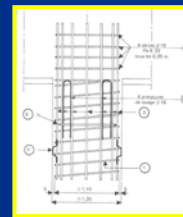
- 7.1 Généralités
- 7.2 Etats limites
- 7.3 Actions et situations de calcul
- 7.4 Méthodes de calcul et considérations sur le calcul
- 7.5 Essais de chargement de pieux (statique, dynamique)
- 7.6 Pieux sous charge axiale (compression, traction, déplacements verticaux à l'ELS)
- 7.7 Pieux chargés latéralement
- 7.8 Calcul de la structure des pieux
- 7.9 Surveillance de l'exécution des travaux





## Etats limites - article 7.2 Vérifications à l'ELU : art. 7.6, 7.7 et 7.8

- stabilité d'ensemble
- mobilisation du sol (capacité portante, arrachement et résistance transversale)
- matériaux du pieu : compression, traction, flexion, flambement et cisaillement
- tassement, soulèvement, déplacement transversal



## Etats limites (suite) - article 7.2 Vérifications à l'ELS : art. 7.6, 7.7

- déplacement vertical
  - tassement (pieu en compression)
  - soulèvement (pieu en traction)
- déplacement transversal

Vérifier que les valeurs limites  $C_d$  pour la structure ne sont pas atteintes

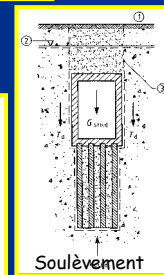
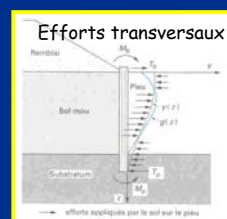
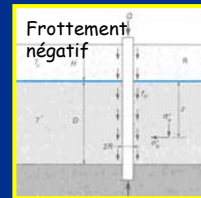
→  $E_d \leq C_d$  ou faible mobilisation de la résistance du terrain



## Particularités des fondations profondes (1) (actions dues au terrain - article 7.3)

Prise en compte des actions dues au déplacement du terrain :

- frottement négatif
- soulèvement
- efforts transversaux



## Particularités des fondations profondes (2) (actions dues au terrain - article 7.3)

- \* prendre, en général, des valeurs hautes de la résistance et de la raideur du terrain se déplaçant
  - \* considérer le déplacement comme une action et mener une étude d'interaction,
- ou
- \* estimer une borne supérieure de la force transmise qui est considérée comme l'action.

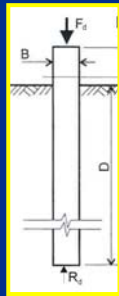


2 possibilités



## Principe de calcul des fondations profondes (article 7.4)

les calculs  
doivent être  
basées  
soit sur :



- les résultats d'essais de chargement statique
- des méthodes empiriques ou analytiques validées par des essais de chargement statique dans des situations comparables
- les résultats d'essais de chargement dynamique dont la validité a été démontrée par des essais de chargement statique dans des situations comparables
- le comportement observé de fondations sur pieux comparables (à étayer par la reconnaissance et les essais de sols).

## Essais de chargement (article 7.5.1)

ils doivent être effectués si :

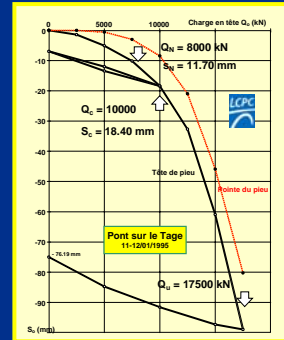
- nouveau type de pieu
- sols ou conditions de chargement non connus
- la théorie ou l'expérience manque pour ce type de chargement
- lorsque le comportement durant l'installation n'était pas prévisible et qu'une campagne complémentaire ne clarifie pas les raisons



## Essais de chargement statique (article 7.5.2)

La procédure d'essai doit permettre de déterminer :

- le déplacement
- la charge de fluage
- le retour « élastique »
- la charge de rupture ultime (pieux d'essais)

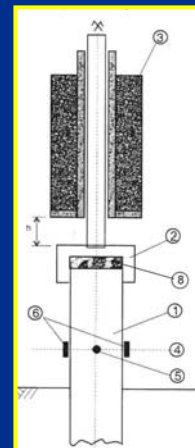


Essais de pieux en traction :  
il est recommandé de mener  
les essais à la rupture.

## Essais de chargement dynamique (article 7.5.3)

ils peuvent être utilisés pour  
estimer la capacité portante si :

- reconnaissance appropriée
- méthode étalonnée avec des essais statiques sur le même type de pieu, de longueur et section comparables et dans des conditions de sol comparables



## Justification des pieux sous charges axiales (article 7.6)

\* ELU de capacité portante d'un pieu isolé (en compression et en traction)

- "résistance ultime"

\* ELU de capacité portante de la fondation dans son ensemble

\* ELU de ruine ou dommages sévères à la structure portée par déplacement ou déplacements différentiels de la fondation sur pieux

\* ELS dans la structure portée par déplacement de la fondation sur pieux

capacité portante

déplacement



## ELU de capacité portante en compression/traction

Pour toutes les combinaisons :  $F_d \leq R_d$   
avec  $F_d$  : valeur de calcul de la charge de compression/traction à l'ELU

et  $R_d$  : valeur de calcul de la capacité portante à l'ELU

\*\*\*\*\*

Pour les groupes de pieux, on doit examiner les deux mécanismes :

- capacité portante des pieux isolés (avec réductions) ou arrachement
- capacité portante des pieux et du sol "en bloc" ou arrachement



## Portance ultime caractéristique : $R_{c;k} = R_{b;k} + R_{s;k}$

La portance ultime caractéristique d'un pieu isolé sous charge axiale peut être déduite :

- a) d'essais de chargement statique de pieux
- b) d'essais sur les sols
  - méthode du pieu modèle
  - méthode alternative
- c) d'essais d'impacts dynamiques de pieux



## Portance ultime caractéristique déduite d'essais de chargement statique

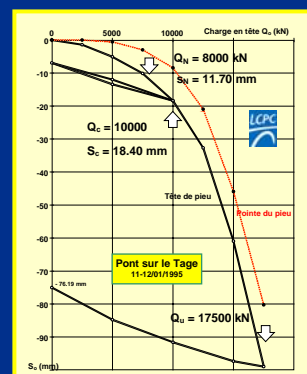
$$R_k = \text{Min} \{ R_{m,\text{moyen}} / \xi_1 ; R_{m,\text{min}} / \xi_2 \}$$

$R_m$  : résistance(s) mesurée(s) en compression ou en traction

avec  $\xi = \xi_1$  sur la moyenne, ou  
 $\xi = \xi_2$  sur valeur la plus basse  
fonction du nombre d'essais (n)

Tableau A.9 : Facteur  $\xi$  pour  $R_k$   
à partir de n - essais de pieux

$\xi$ pour n =	1	2	3	4	$\geq 5$
$\xi_1$	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
$\xi_2$	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00



## Portance ultime caractéristique déduite d'essais sur les sols - règles semi-empiriques

### Méthode du pieu 'modèle'

$$R_k = (R_{b,cal} + R_{s,cal}) / \xi = R_{c,cal} / \xi$$

$$= \text{Min} \{ R_{cal,moyen} / \xi_3 ; R_{cal,min} / \xi_4 \}$$

$R_{cal}$  : résistance(s) calculée(s) en compression ou en traction

avec  $\xi = \xi_3$  sur la moyenne, ou

$\xi = \xi_4$  sur la valeur la plus basse

fonction du nombre de profils d'essais de sol (n)

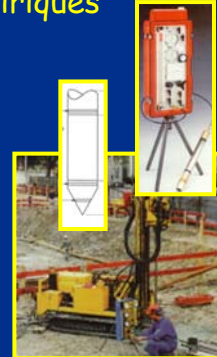


Tableau A.10 : Facteur  $\xi$  pour  $R_k$  à partir de n - profils d'essais de sol

$\xi$ pour n =	1	2	3	4	5	7	10
$\xi_3$	1,40	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,25
$\xi_4$	1,40	1,27	1,23	1,20	1,15	1,12	1,08

## Portance ultime caractéristique déduite d'essais sur les sols - règles semi-empiriques

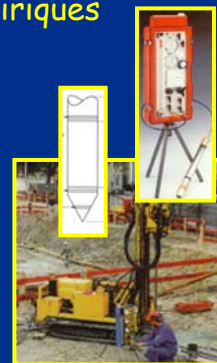
### Méthode alternative permise

$$R_{bk} = q_{bk} A_b$$

et  $R_{sk} = \sum q_{sik} A_{si}$

où des  $q_{bk}$  et  $q_{sik}$  sont les valeurs caractéristiques des résistances de pointe et de frottement latéral déduites valeurs (caractéristiques ?) des propriétés des terrains.

Note :  $q_{bk}$  et  $q_{sik}$  doivent être tels que l'on ait la même marge de « sécurité », ce qui peut nécessiter des facteurs de modèle pour une méthode donnée



## Portance ultime caractéristique déduite d'essais d'impact dynamique (résultats validés)

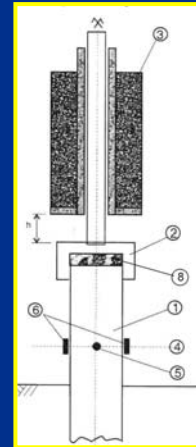
$$R_k = \text{Min} \{ R_{\text{cal,moyen}} / \xi_5 ; R_{\text{cal,min}} / \xi_6 \}$$

Tableau A.11 : Facteur  $\xi$  pour  $R_k$  à partir de n - essais de pieux

$\xi$ pour n =	$\geq 2$	$\geq 5$	$\geq 10$	$\geq 15$	$\geq 20$
$\xi_5$	1,60	1,50	1,450	1,42	1,40
$\xi_6$	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

La résistance ultime peut aussi être déterminée :

- par l'application de formules de battage
- à partir d'analyses de battage



Les résultats de re-battage doivent être pris en compte

## Portance ultime de calcul d'un pieu isolé

$$R_d = R_{bk} / \gamma_b + R_{sk} / \gamma_s$$

ou

$$R_d = R_k / \gamma_t$$

où  $\gamma_b$ ,  $\gamma_s$  et  $\gamma_t$  sont les coefficients de sécurité partiels respectivement pour la pointe, pour le frottement latéral et pour la résistance totale





## Portance ultime de calcul d'un pieu isolé (2)

ELU, situations durables et transitoires

Tableau 4 : Valeurs de  $\gamma_b, \gamma_s, \gamma_t$

Type de pieu	Approche 1						2	3*
	Calcul 1			Calcul 2				
	$\gamma_b$	$\gamma_s$	$\gamma_t$	$\gamma_b$	$\gamma_s$	$\gamma_t$	$\gamma_b = \gamma_s = \gamma_t$	$\gamma_b = \gamma_s = \gamma_t$
Pieux battus	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3	1,1	1,0
Pieux forés	1,25	1,0	1,15	1,6	1,3	1,5	1,1	1,0
Tarière continue	1,1	1,0	1,1	1,45	1,3	1,4	1,1	1,0

\* Pour l'approche 3 : des coefficients de sécurité sont à appliquer, par ailleurs, aux paramètres de résistance du sol

ELU, situations accidentelles

En principe :  $\gamma_b = \gamma_s = \gamma_t = 1,0$



## Portance ultime d'un pieu isolé - Résumé

Les relations de base de l'Eurocode 7 sont :

$$R_k = R_m / \xi \quad (1)$$

$$R_d = R_k / \gamma_t \text{ ou } R_d = R_{bk} / \gamma_b + R_{sk} / \gamma_s \quad (2)$$

- par ailleurs :  $F_d = \gamma_F \cdot F_k \quad (3)$

- la condition de base pour tous les ELU est :

$$F_d(\text{ULS}) \leq R_d \quad (4)$$

Les relations 1 à 4 conduisent à :

$$F_k \leq R_m / \gamma_F \cdot \gamma_t \cdot \xi = R_m / F_S \quad (5)$$



## Déplacements verticaux : états limites de service (ELS) de la structure portée

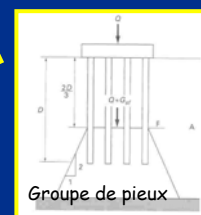
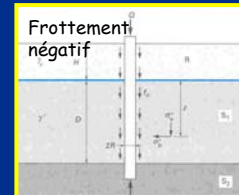
On doit calculer les déplacements verticaux sous ELS et les confronter aux valeurs limites :

### \* Pieux en compression

- prendre en compte le frottement négatif
- prendre en compte le tassement dû à l'effet de groupe

### \* Pieux en traction

- vérifier les déplacements d'arrachement



## Justification des pieux chargés latéralement (article 7.7)

### ELU de résistance transversale

$$F_{tr} \leq R_{tr}$$

Un des mécanismes suivants sera pris en compte :

- pieux courts : rotation ou translation rigide
- pieux longs : rupture par flexion du pieu avec plastification locale et déplacement du sol près de la tête du pieu

+

Effet de groupe



## Justification des pieux chargés latéralement (suite)

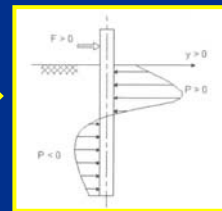
Résistance transversale ultime  $R_{tr}$  :

\* à partir d'essais de déplacement horizontal en tête de pieux →



\* à partir d'essais sur le sol et de paramètres de résistance du pieu

On peut utiliser la théorie des poutres avec module de réaction →

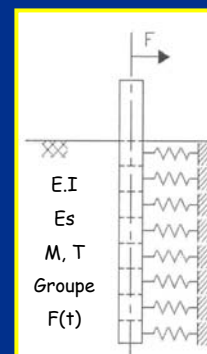


## Justification des pieux chargés latéralement (suite)

### Déplacement transversal

Prendre en compte :

- sol :  $E(\varepsilon)$
- pieu :  $EI$
- conditions d'encastrement
- effets de groupe
- effet de cycles



Merci de votre attention !



Les annexes de l'Eurocode 7  
relatives au calculs des fondations



## Portance et tassement des fondations EN 1997-1 annexes D, E, F

### Modèle "φ" (annexe D)

$$R/A' = c' \times N_c \times b_c \times s_c \times i_c$$

$$+ q' \times N_q \times b_q \times s_q \times i_q$$

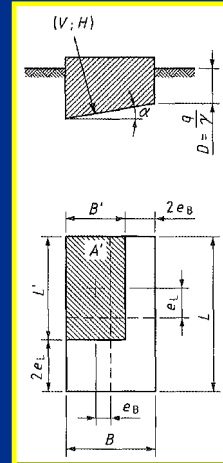
$$+ 0,5 \times \gamma' \times B' \times N_\gamma \times b_\gamma \times s_\gamma \times i_\gamma$$

### Modèle pressiométrique (annexe E)

$$R/A' = \sigma_{v0} + k \times p_{1e}^*$$

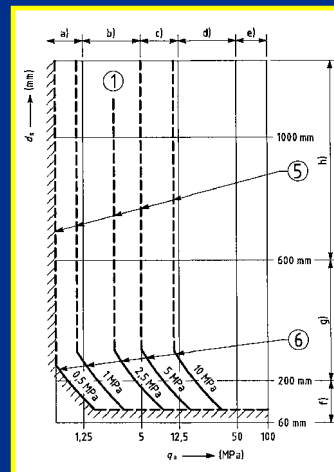
### Tassement des fondations (annexe F)

$$s = p \times b \times f / E_m$$



## Portance des fondations sur rocher EN 1997-1 annexe G

Groupe	Type de roche
1	Calcaires et dolomies purs Grès carbonatés de faible porosité
2	Roches ignées Calcaires oolithiques et marneux Grès bien cimentés Pélites carbonatées indurées Roches métamorphiques, y compris les ardoises et les schistes (clivage et foliation horizontaux)
3	Calcaires très marneux Grès faiblement cimentés Ardoises et schistes (clivage et foliation inclinés)
4	Pélites et schistes argileux non cimentés



5 La pression admissible ne doit pas excéder la résistance à la compression simple de la roche si les joints sont fermés ou 50% de cette valeur s'ils sont ouverts.

6 Pression admissible: a) roche très tendre, b) roche tendre, c) roche modérément tendre, d) roche modérément dure, e) roche dure

# Déplacements limites des fondations et déformations des structures

EN 1997-1 annexe H

