

# Les fondations

Philippe Laheurte – Cerema Sud-Ouest



# Sommaire

- Rôle des fondations
- Les familles de fondations
- Principes de dimensionnement
- Les difficultés rencontrées
- Exécution et contrôles d'exécution



# Le rôle des fondations

Les fondations sont des ouvrages géotechniques. Leur rôle est de transmettre aux terrains les efforts apportés par le pont.

- Nécessité que ces terrains puissent recevoir les efforts sans déformations excessives.
- Les fondations doivent être dimensionnées structurellement pour qu'elles résistent aux descentes de charge apportées par les appuis du pont et aux efforts engendrés par les déplacements éventuels des terrains.



- Rôle des fondations
- **Les familles de fondations**
- Principes de dimensionnement
- Les difficultés rencontrées
- Exécution et contrôles d'exécution



# Les familles de fondations

On distingue principalement 3 types de fondations :

- Les fondation superficielles
- Les fondations semi-profondes
- Les fondations profondes

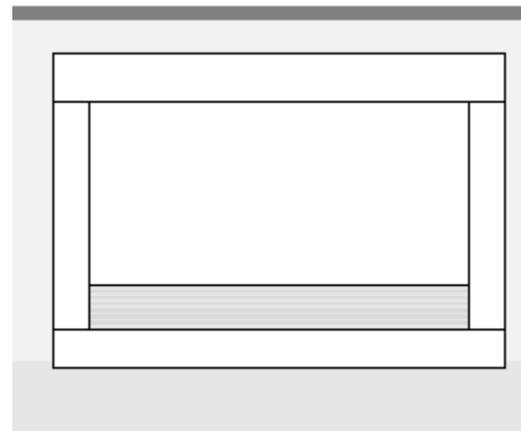
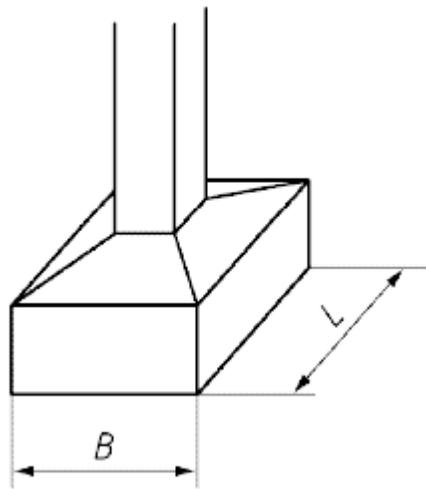
La distinction entre ces 3 types se fait selon le rapport profondeur d'encastrement relatif / largeur de la fondation, noté  $D_e/B$ .

Une quatrième famille : les fondations composites

# Les familles de fondations

Les fondations superficielles ( $D_e/B \leq 1,5$ )

- Les semelles isolées
- Les radiers



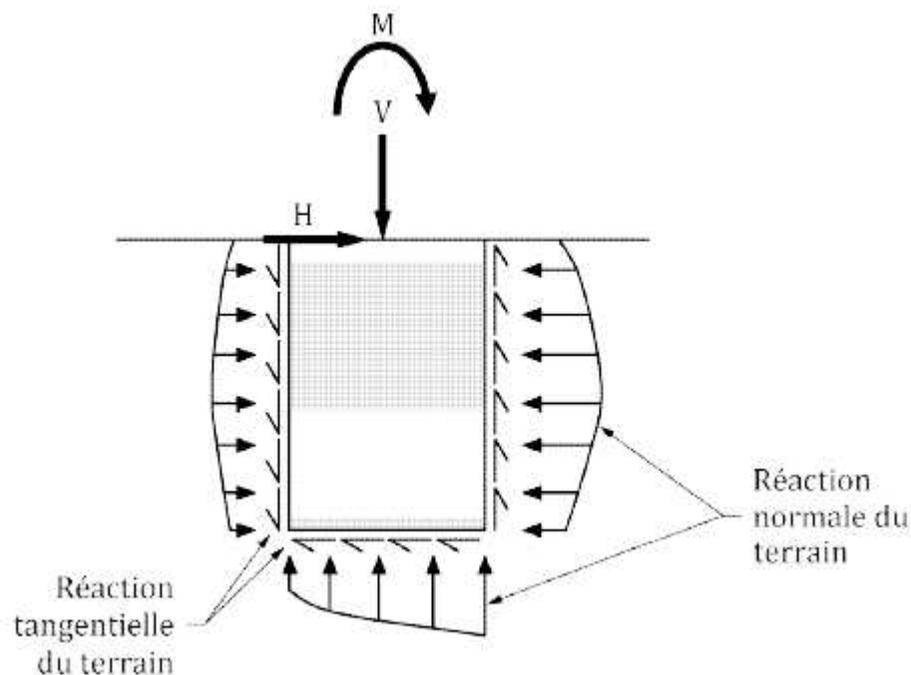
# Les familles de fondations

Les fondations semi-profondes ( $1,5 < D_e/B \leq 5$ )

- Les puits

Profondeur D de 3 à 6 m en général.

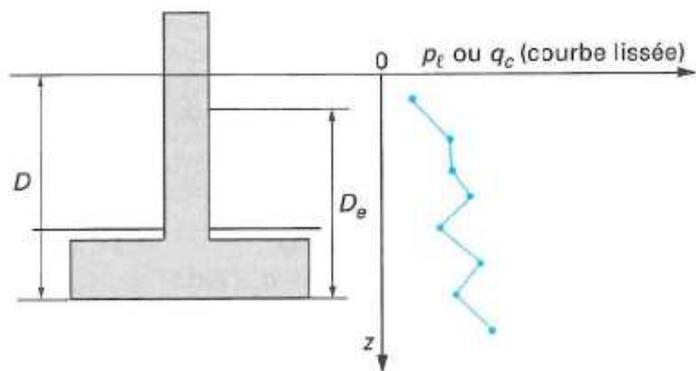
Peu employées pour fonder les ponts courants.





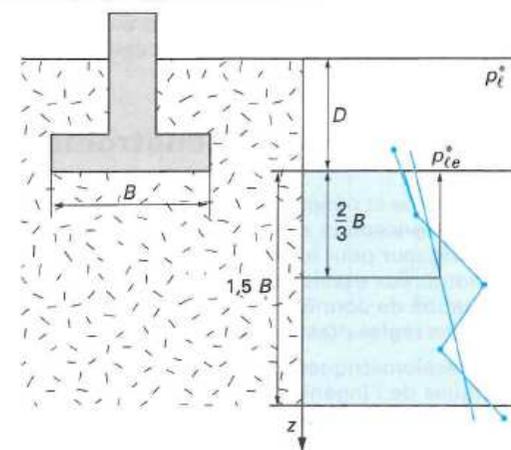
# Les familles de fondations

- $D_e$  est un paramètre conventionnel de calcul destiné à tenir compte du fait que les caractéristiques mécaniques des sols de couverture sont généralement plus faibles que celles du sol porteur.
- Il est défini à partir des résultats des essais de sols en place : soit au pénétromètre statique, soit au pressiomètre.



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

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





# Les familles de fondations

## Les fondations profondes ( $D/B > 5$ )

- Les pieux
- Les micropieux (pieux de diamètre  $B \leq 300$  mm)

Employées lorsqu'il les terrains de surface ne sont pas assez consistants pour y appuyer une fondation superficielle, ou bien pour éviter une aire de semelle superficielle prohibitive.

On cherche alors à atteindre une couche de sol ou de roches de meilleures caractéristiques, ou bien une géométrie élancée, afin d'avoir un contact sols-fondation important.

Le terme de *barrettes* est employé pour des pieux non circulaires.

Pieux/micropieux forés, pieux battus, pieux vissés .



# Les familles de fondations

Les différents types de pieux :

- 8 classes
- 20 catégories
- Il sont classés selon leur technique de mise en œuvre

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de référence
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS	NF EN 1536
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
	3	Foré tubé (virole perdue)	FTP	
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR	
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU	
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
3	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
	10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	BE	
	11	Battu moulé	BM	
	12	Battu acier fermé	BAF	
5	13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN 12699
6	14	Profilé H battu	HB	NF EN 12699
	15	Profilé H battu injecté	HBi	
7	16	Palplanches battues	PP	NF EN 12699
1 bis	17	Micropieu type I	M1	NF EN 1536/14199/12699
	18	Micropieu type II	M2	
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	NF EN 1536/14199/12699
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS	

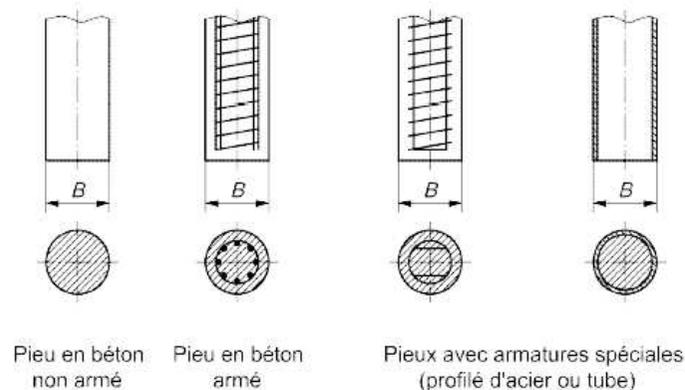


# Les familles de fondations

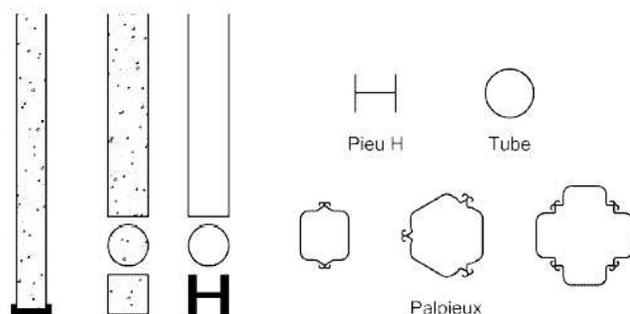
## Les fondations profondes

- Exemples de section de pieux

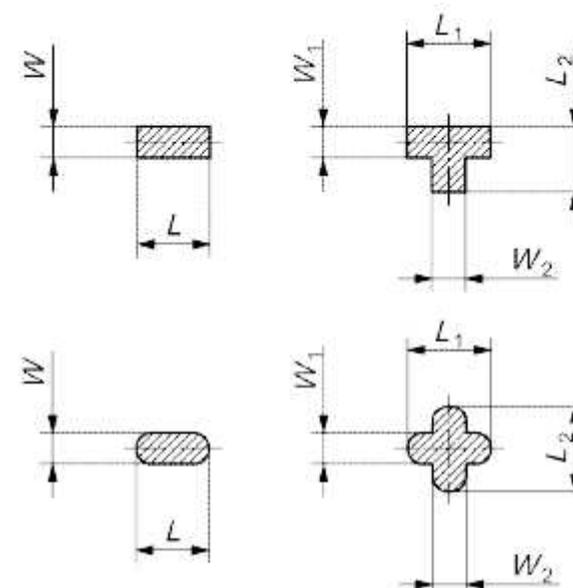
forés



battus



En général :  
 $0,5 \text{ m} < w < 1,5 \text{ m}$   
 $1,8 \text{ m} < L < 2,8 \text{ m}$

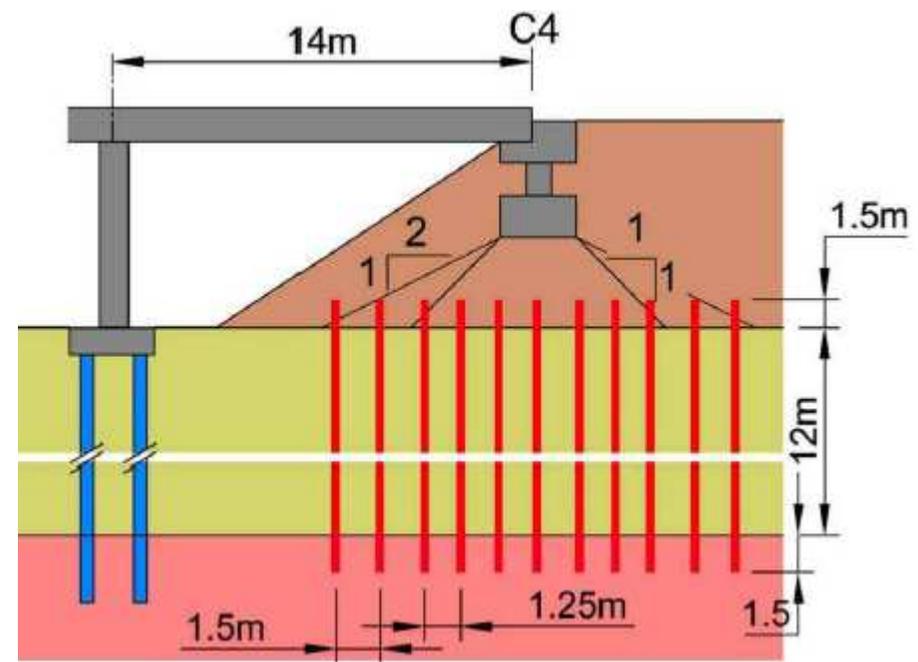
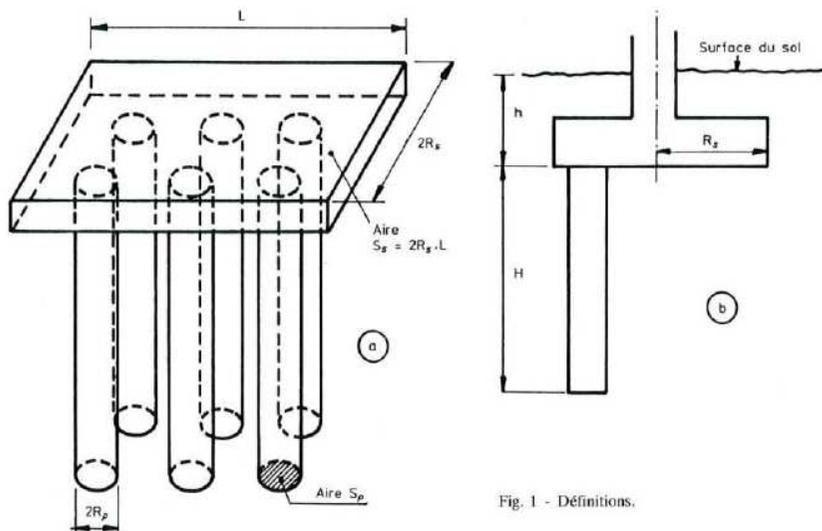




# Les familles de fondations

## Les fondations composites

- Fondations mixtes, fondations sur inclusions rigides ou souples





# Les familles de fondations

Quelques exemples





# Les familles de fondations

Quelques exemples



Cadres pour ouvrage hydraulique



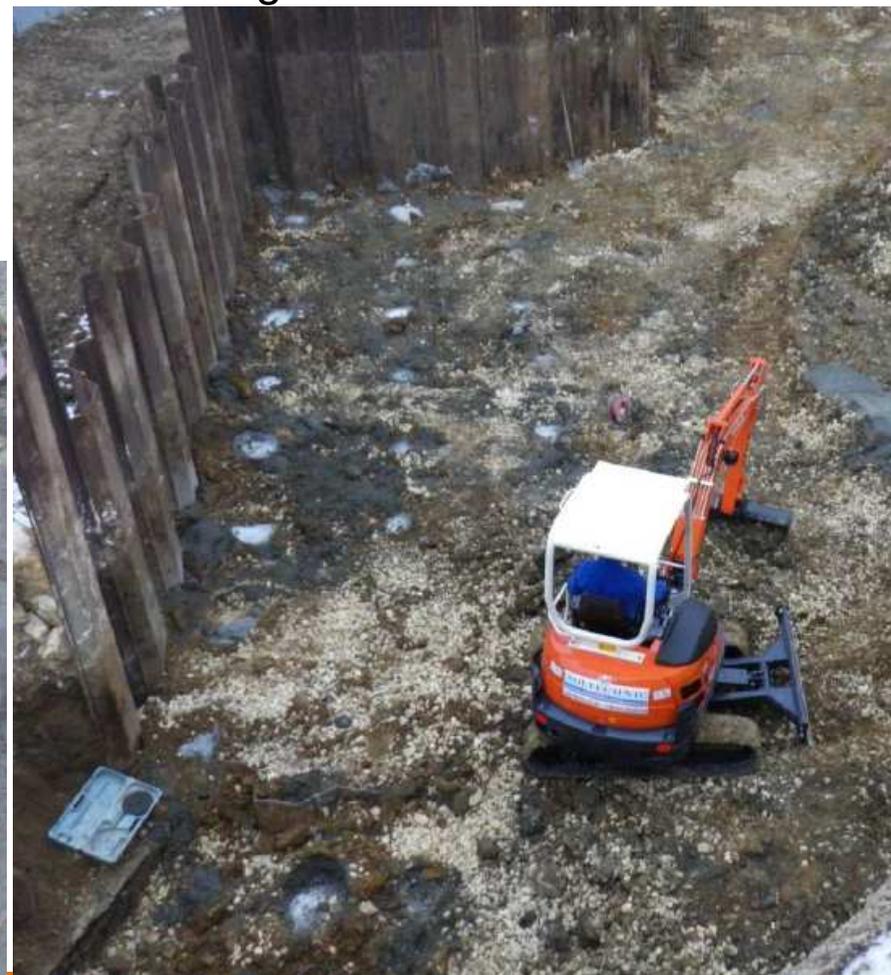
# Les familles de fondations

## Quelques exemples

Ferrailage d'une semelle superficielle pour pile



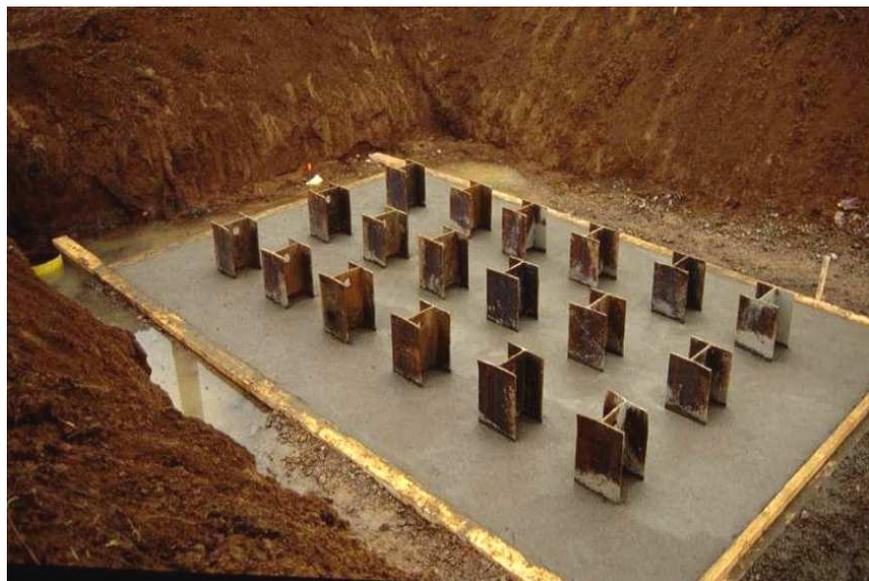
Inclusions rigides  $\Phi$  400 mm sous culée





# Les familles de fondations

Quelques exemples

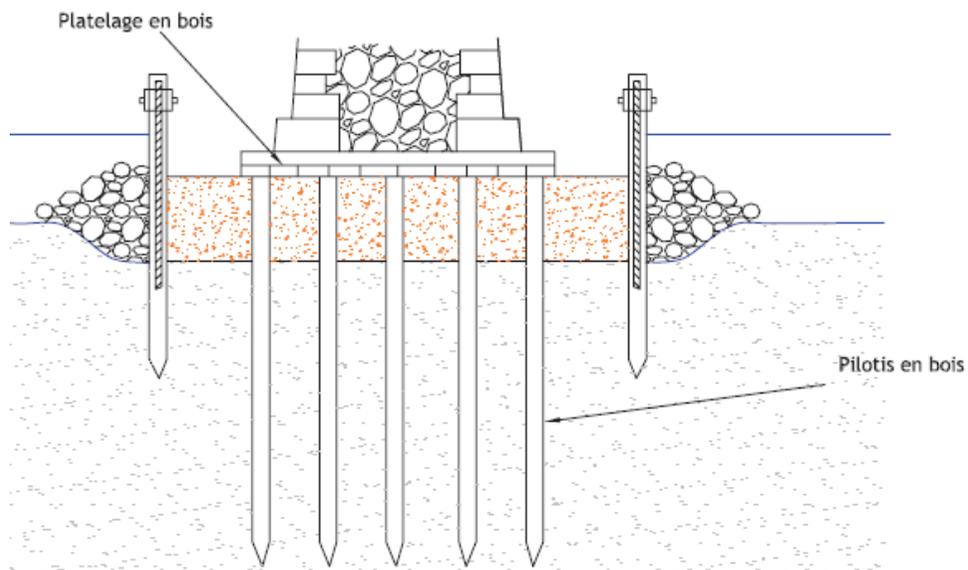


Fondations de piles de pont (pieux H à gauche et micropieux à droite)

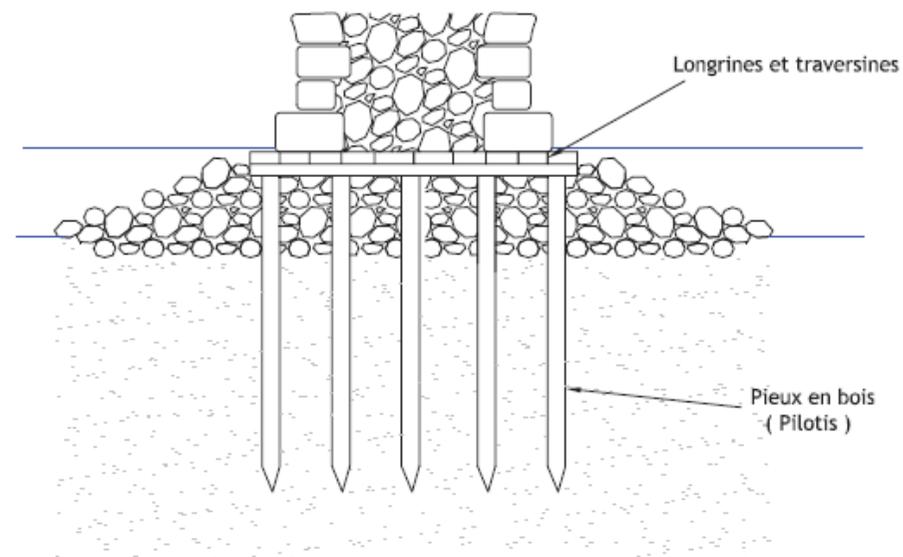


# Les familles de fondations

## Quelques exemples



Fondations sur plateforme en charpente et pieux en bois



Fondations en pieux bois avec  
platelage bois et béton



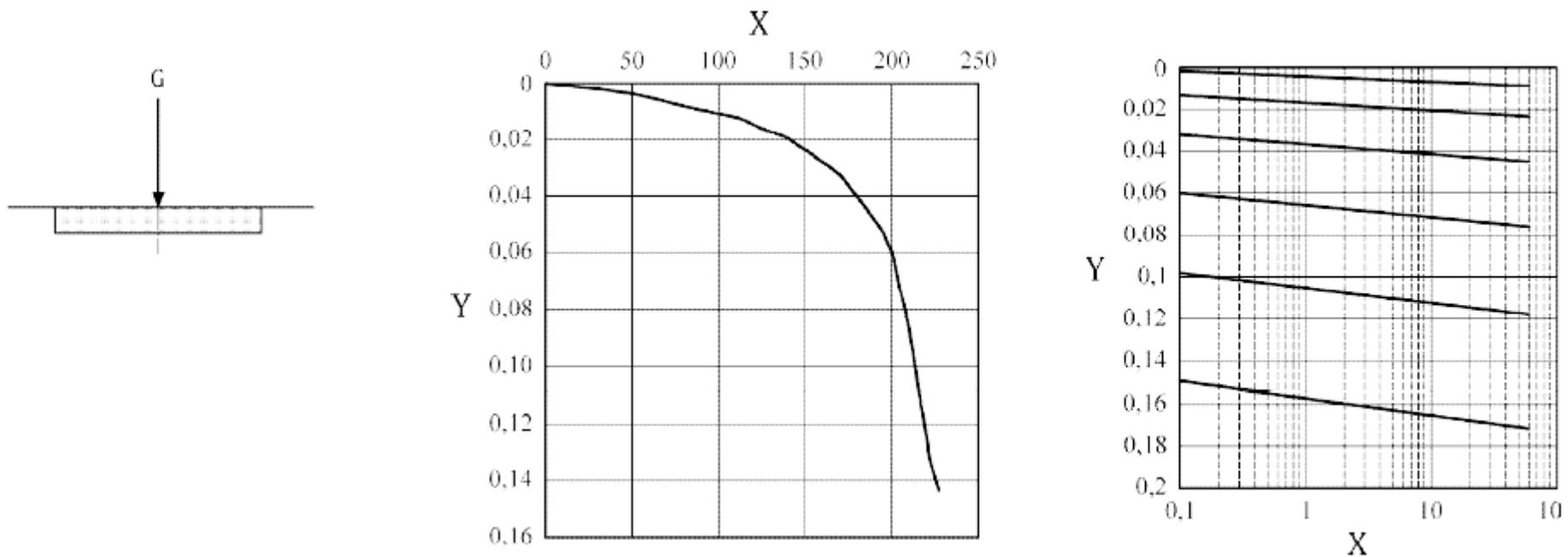
- Rôle des fondations
- Les familles de fondations
- **Principes de dimensionnement**
- Les difficultés rencontrées
- Exécution et contrôles d'exécution



# Principes de dimensionnement

## Fonctionnement des fondations superficielles

### Fondation superficielle isolée soumise à une charge verticale centrée

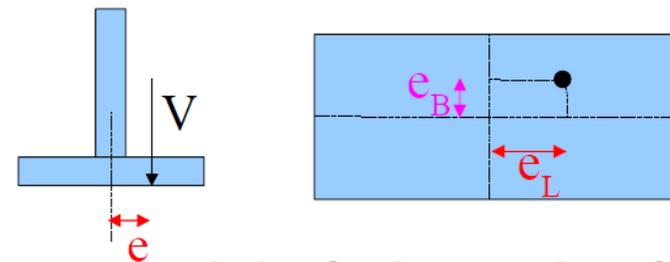
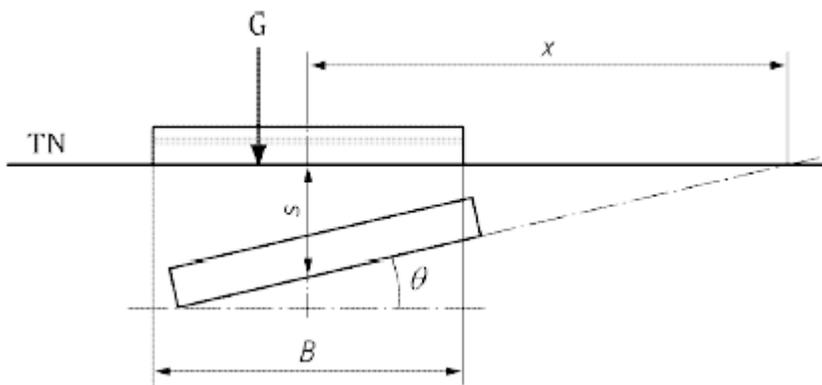




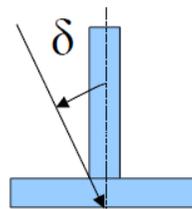
# Principes de dimensionnement

## Fonctionnement des fondations superficielles

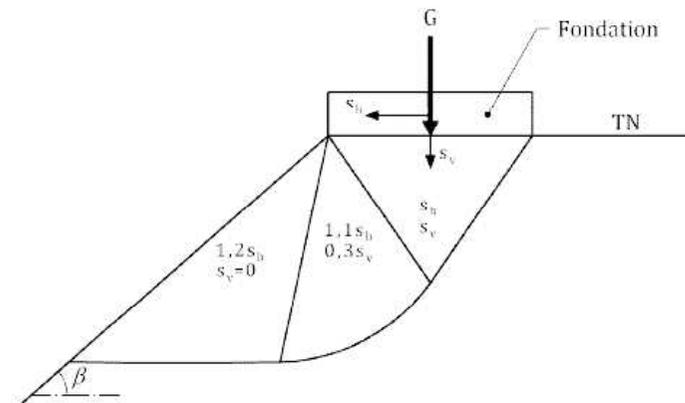
Fondation superficielle isolée soumise à une charge verticale excentrée



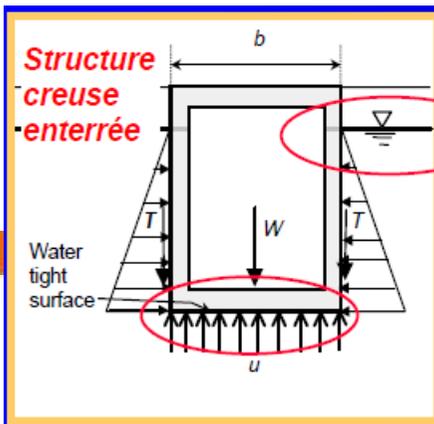
Excentrement de la résultante des efforts



Inclinaison des efforts



Fondation superficielle établie en bord de pente

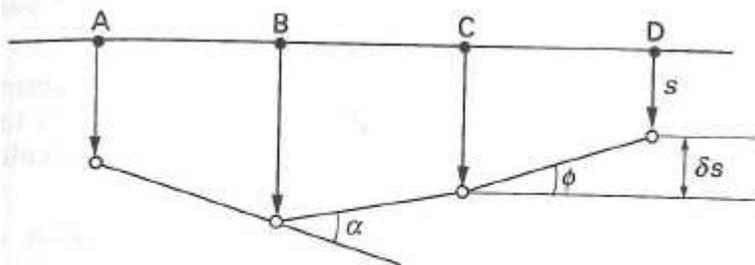


— Les ponts courants

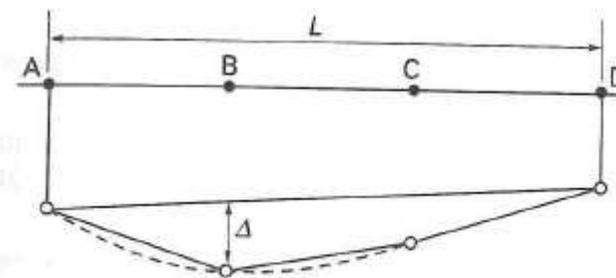


# Principes de dimensionnement

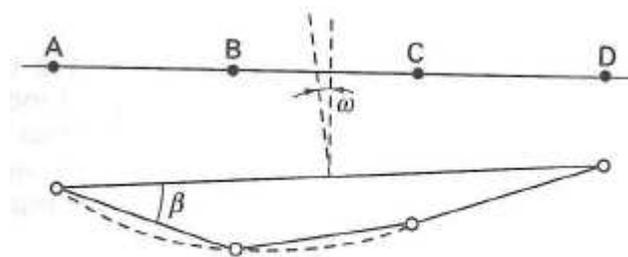
## Fonctionnement des fondations superficielles



(a) tassement  $s$ , tassement différentiel  $\delta s$ , rotation  $\phi$  et déformation angulaire  $\alpha$



(b) déflexion  $\Delta$  et déflexion relative  $\Delta/L$



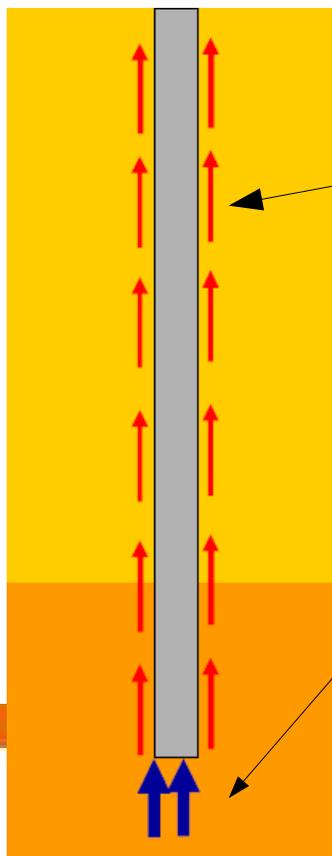
(c) inclinaison  $\omega$  et rotation relative (distorsion angulaire)  $\beta$



# Principes de dimensionnement

## Fonctionnement des fondations profondes

### Fondation profonde isolée soumise à une charge axiale



Résistance de frottement axial  $R_s$

Résistance en pointe  $R_b$

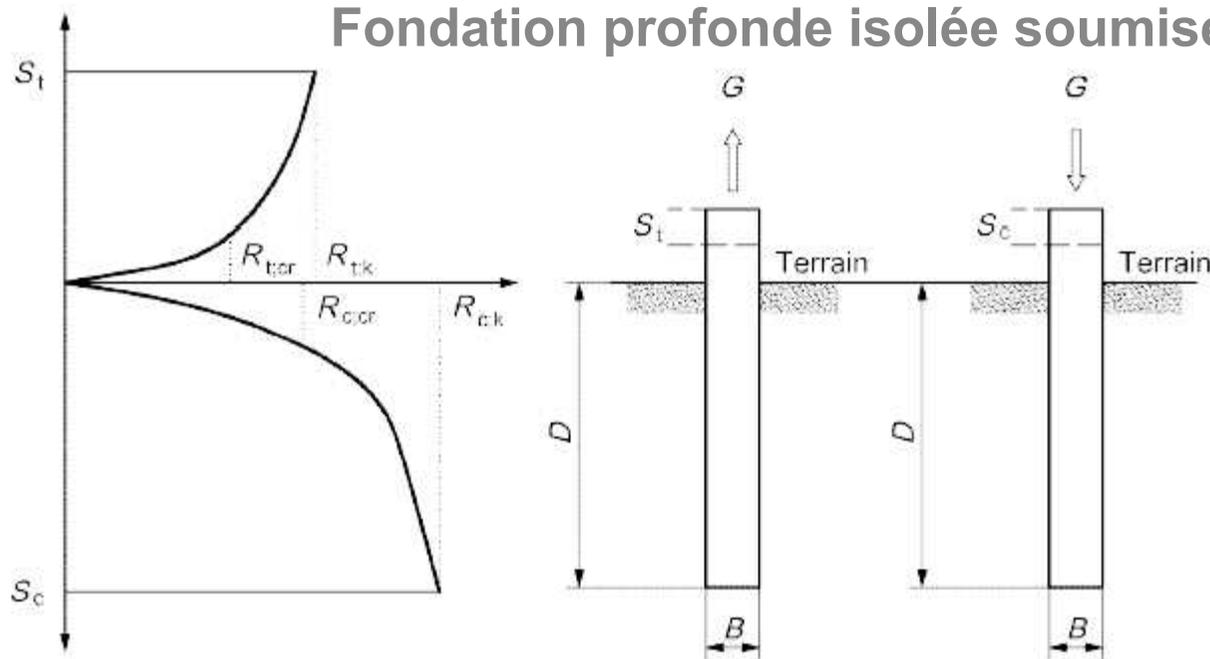
Résistance limite en compression :  $R_c = R_b + R_s$   
(Portance)



# Principes de dimensionnement

## Fonctionnement des fondations profondes

Fondation profonde isolée soumise à une charge axiale



Modèle de comportement sous charge axiale compression ou traction

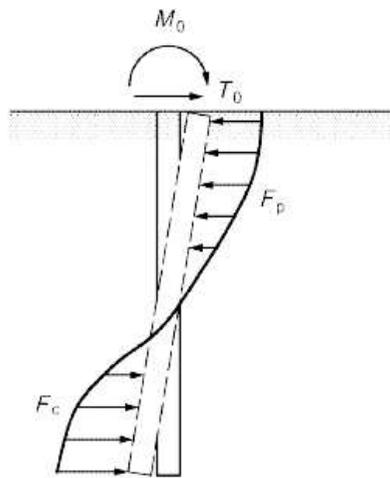
Charges de fluage de compression  $R_{c;cr}$  ou de traction  $R_{t;cr}$

Résistances limites caractéristiques, de compression  $R_{c;k}$  ou de traction  $R_{t;k}$



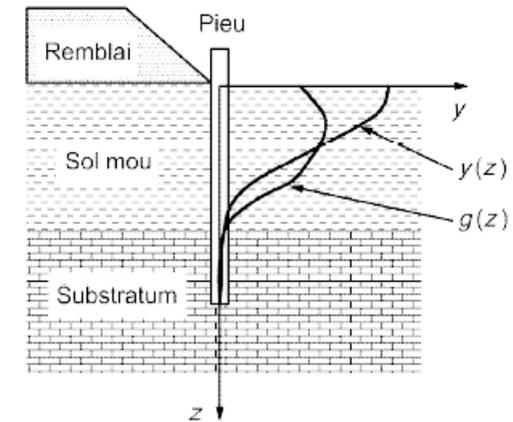
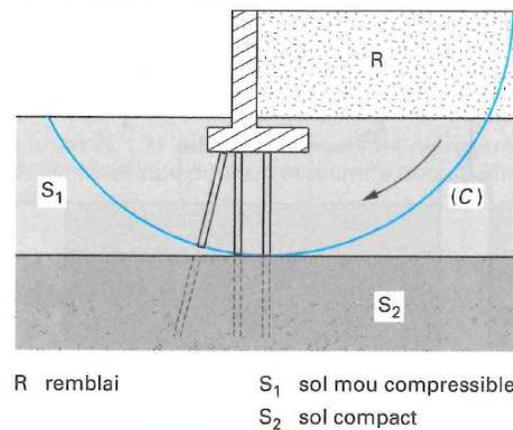
# Principes de dimensionnement

## Fonctionnement des fondations profondes



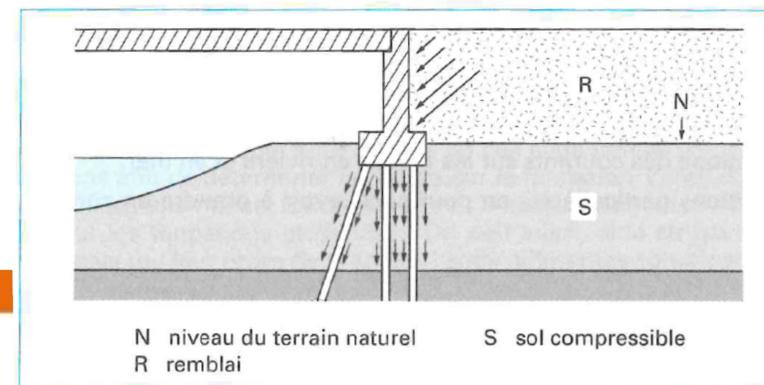
Légende :  $F_c$  : contre butée –  $F_p$  : butée

### Poussées latérales



### Sollicitations transversales en tête

### Frottement négatif sur les pieux



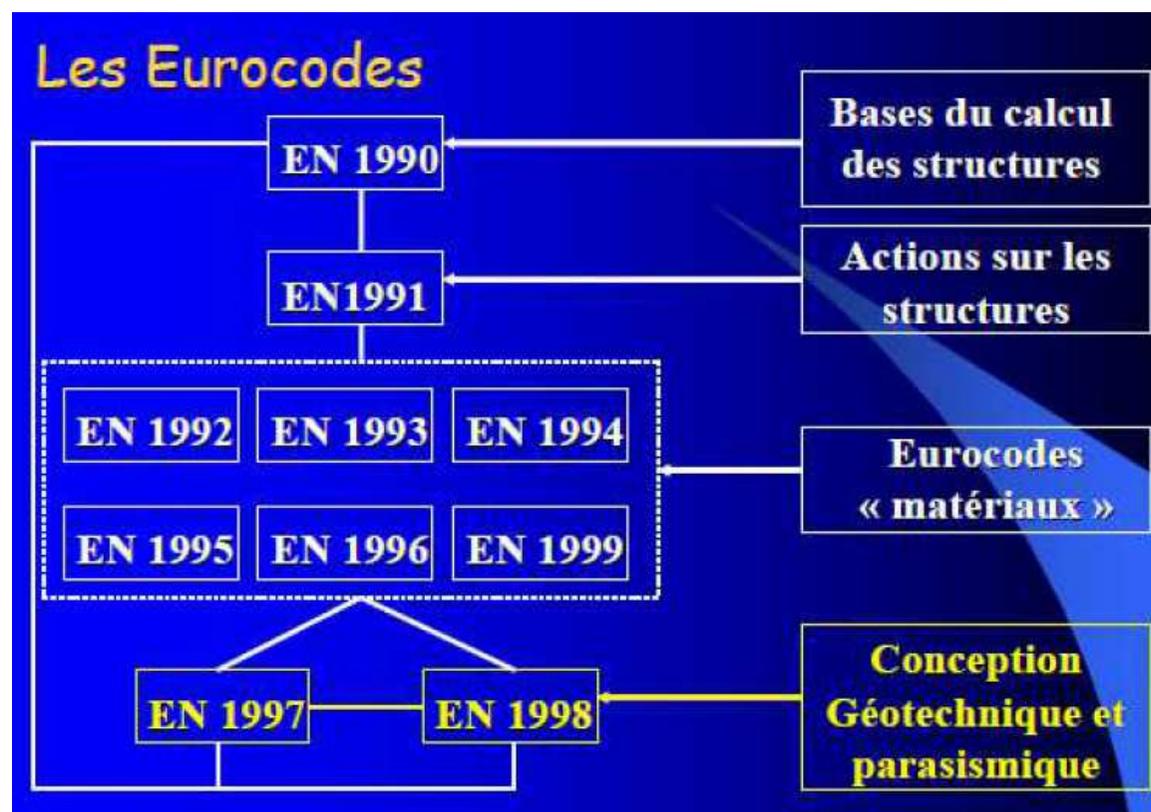
21 novembre 2019 – Les ponts courants



# Principes de dimensionnement

## Principe de dimensionnement aux états-limites

- Les 10 Eurocodes structuraux :





# Principes de dimensionnement

## Principe de dimensionnement aux états-limites

Niveau	Dimensionnement	Essais TC341	Exécution TC288	Admi- nistr.												
1	NF EN 1997-1 (Eurocode 7) + <u>Annexe nationale + NF EN 1997-2</u>	Normes	Normes	Textes officiels												
2	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Normes</th> <th>Complément.</th> <th>Nationales</th> <th>de la norme</th> <th colspan="2">NF EN 1997-1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P94-261 Fondations Superfic.</td> <td>P94-262 Fondations Profondes</td> <td>P94-270 Ouvrages en sols renforcés</td> <td>P94-281 Murs de soutènement</td> <td>P94-282 Écrans de soutènement</td> <td>P94-290 Ouvrages en terre</td> </tr> </tbody> </table>	Normes	Complément.	Nationales	de la norme	NF EN 1997-1		P94-261 Fondations Superfic.	P94-262 Fondations Profondes	P94-270 Ouvrages en sols renforcés	P94-281 Murs de soutènement	P94-282 Écrans de soutènement	P94-290 Ouvrages en terre			
Normes	Complément.	Nationales	de la norme	NF EN 1997-1												
P94-261 Fondations Superfic.	P94-262 Fondations Profondes	P94-270 Ouvrages en sols renforcés	P94-281 Murs de soutènement	P94-282 Écrans de soutènement	P94-290 Ouvrages en terre											
DTU/CCTG Anciens règlements	Documents traitant des divers aspects des projets et de l'exécution des ouvrages, y compris les relations contractuelles (exemples : ouvrages simples, fondation de bâtiment, etc..)															

Fascicule 68 : Exécution des travaux géotechniques des ouvrages de génie civil



# Principes de dimensionnement

## Approches de calcul

L'Eurocode 0 introduit 3 approches de calcul pour la justification des ELU dans les situations durables et transitoires.

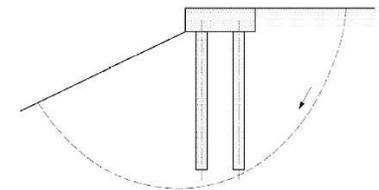
- **Approche de calcul 1**  
« A1 » + « M1 » + « R1 » combinaison structurelle  
« A1 ou A2 » + « M2 » + « R1 » combinaison géotechnique

- **Approche de calcul 2**  
« A1 » + « M1 » + « R2 »

- **Approche de calcul 3**  
« A1 ou A2 » + « M2 » + « R3 »



Uniquement pour vérifier la stabilité générale du site.



« A » pour actions ou effets des actions, « M » pour les paramètres du sol, « R » pour les résistances



# Principes de dimensionnement

## Justifications aux états limites

il convient de vérifier pour les ELU et ELS appropriés, que la résistance de calcul ou le critère d'aptitude au service est supérieur aux valeurs de calcul des actions ou effets des actions :

$$E_d \leq R_d \text{ aux ELU et } E_d < C_d \text{ aux ELS}$$

E peuvent être verticales, horizontales, inclinées, provenir de la structure, des sols, dues à l'eau, aux charges d'exploitation, aux effets climatiques, aux chocs, aux séismes...

→ Actions permanentes G, variables Q, accidentelles A et sismiques.



# Principes de dimensionnement

## Justifications aux états limites

- Les **actions** sont combinées entre elles pour vérifier les ELU et ELS selon les situations de projet.
- Aux ELU, les **combinaisons** à mettre en œuvre sont
  - durables et transitoires (ou fondamentales)
  - accidentelles
  - sismiques
- Aux ELS, en situations durables et transitoires seulement, les combinaisons sont :
  - caractéristiques (ELS irréversibles)
  - fréquentes (ELS réversibles)
  - quasi-permanentes



# Principes de dimensionnement

## Justifications aux états limites

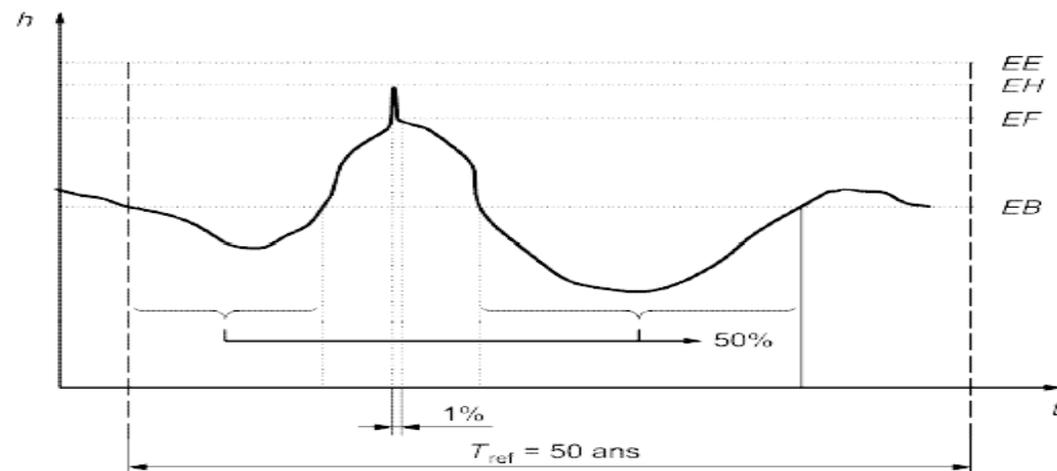
- Les **valeurs de calcul** ( $E_d$ ,  $R_d$ ,  $C_d$ ) sont obtenus à partir de valeurs caractéristiques que l'on pondère par un facteur partiel ; le principe est de majorer les efforts et de diminuer les résistances.
- Les **valeurs caractéristiques** ( $E_k$ ,  $R_k$ ,  $E_k$ ) sont obtenus à partir de valeurs mesurées, de valeurs d'essai des matériaux, auxquelles peuvent être appliquées des coefficients de modèle ou méthode.



# Principes de dimensionnement

## Propriétés des terrains et niveaux d'eau

Etape	Propriétés des terrains	Base de calculs
1	Valeurs mesurées et/ou valeurs dérivées	Reconnaissance géotechnique et/ou corrélations et/ou expérience
2	Valeur moyenne, $X_m$ , Valeur basse, $X_b$	Géotechnique + Hydrogéologie
3	Valeur caractéristique, $X_m < X_k < X_b$	Géotechnique + Hydrogéologie + Etat-limite + Méthode de calcul
4	Valeur de calcul, $X_d = X_k / \gamma_M$	





# Principes de dimensionnement

## Justifications aux états limites

- Les ELU et ELS à vérifier, les approches de calcul à considérer, les méthodes pour calculer les résistances sont données dans les normes relatives aux fondations (normes d'applications de l'Eurocode 7).
- Pour les fondation superficielles :

Projet	Etat-limite	Situation de projet (caractère)	Combinaisons d'action
Tous les projets	GEO : stabilité générale du site	Exécution (Transitoire)	Fondamentale
	GEO : poinçonnement		
	GEO : excentrement du chargement	et	
	GEO : glissement	Exploitation (Durable)	
	STR : structure de la fondation	et/ou	
Selon le cas	GEO : tassement / rotation	Exploitation (Transitoire)	
	UPL : soulèvement		
Selon le cas	GEO / STR	Accidentelle (choc)	Accidentelle

Projet	Etat-limite	Situation de projet (caractère)
Tous les projets	GEO : tassement / rotation / tassement différentiel	Quasi-permanent
	GEO : excentrement du chargement	
	GEO : limitation de la charge transmise au terrain	et/ou
	STR : structure de la fondation	Caractéristique



# Principes de dimensionnement

## Justifications aux états limites

- Pour les fondation profondes :

		ELU type	Approche de calcul
<b>Fondations profondes sous charge axiale</b>			
	Portance (Note 1)	GEO	2
	Résistance de traction (Notes 1 et 2)	GEO/UPL	2
	Résistance structurale (Note 3)	STR	2
<b>Fondations profondes sous charge transversale</b>			
	Résistance structurale (Note 4)	STR	2
	Déplacement en tête (Note 5)	GEO	2
<b>Site des travaux</b>			
	Stabilité générale (Note 6)	GEO	2 (ou 3)

**Notes :**

- (1) La vérification peut porter sur plusieurs mécanismes de rupture (fondation profonde isolée et groupe de fondations profondes).
- (2) La vérification du groupe de fondations profondes considéré comme un bloc se fait selon un ELU de type GEO/STR et UPL.
- (3) Selon la norme de calcul appropriée au matériau constitutif de la fondation profonde.
- (4) La vérification porte uniquement sur le respect des états-limites concernant les matériaux constitutifs de la fondation.
- (5) La vérification porte uniquement sur le respect des états-limites concernant la structure portée
- (6) Voir clause (3) Note 4 de l'article 8.1.



# Principes de dimensionnement

## Justifications aux états limites

- Exemple de combinaison pour les ELU en situation de projet durables et transitoires :

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj, \text{sup}} G_{kj, \text{sup}} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj, \text{inf}} G_{kj, \text{inf}} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\}$$

- Les combinaisons d'actions à prendre en compte et les facteurs partiels sont données dans les normes relatives aux fondations sup. et prof.

Action		Symbole	Ensemble <sup>b</sup>	
			A1 <sup>a</sup>	A2
Permanente	Défavorable	$\gamma_{G\text{sup}}$	1,35	1,0
	Favorable	$\gamma_{G\text{inf}}$	1,0	1,0
Variable	Défavorable	$\gamma_{Q\text{sup}}$	1,5	1,3
	Favorable	$\gamma_{Q\text{inf}}$	0	0

<sup>a</sup> la valeur de 1,5 pour les charges défavorables est en général réduite à 1,35 pour les ponts.

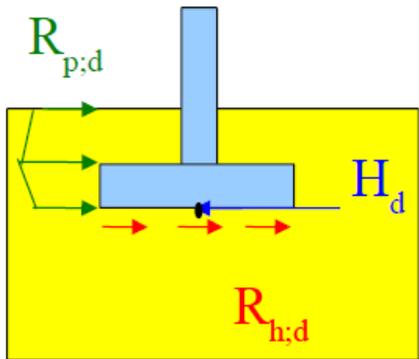
<sup>b</sup> le jeu A1 concerne les approches 2 ou 3 et le jeu A2 seulement l'approche 3.



# Principes de dimensionnement

## Justifications aux états limites

- Exemple pour les fondation superficielles : vérification au non-glissement d'une semelle selon l'approche de calcul 2



$$H_d \leq R_{h;d} + R_{p;d}$$

$$R_{h;d} = \min \left\{ \frac{1}{\gamma_{R,h} \gamma_{R,d}} (A' c_{u,k}); 0,4 V_d \right\} \quad R_{p;d} = \frac{R_{p,k}}{\gamma_{R,p}}$$

Tableau B.3.3 – Facteurs partiels de résistance ( $\gamma_R$ ) pour les fondations superficielles

Résistance	Symbole	Ensemble	
		R2 <sup>a</sup>	R3 <sup>b</sup>
Portance	$\gamma_{R,v}$	1,4	1,0
Glissement	$\gamma_{R,h}$	1,1	1,0

a conforme au Tableau A.5 de l'Annexe A de NF EN 1997-1 – Ensemble R2. Ces valeurs sont applicables à la résistances des terres pour l'approche de calcul 2.

b conforme au Tableau A.5 de l'Annexe A de NF EN 1997-1 – Ensemble R3. Ces valeurs sont applicables à la résistances des terres pour l'approche de calcul 3.

Paramètres du sol	Symbole	Ensemble <sup>b</sup>	
		M1	M2
Angle de frottement interne <sup>a</sup>	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Cohésion effective	$\gamma_c$	1,0	1,25
Cohésion non drainée	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Compression simple	$\gamma_{qu}$	1,0	1,4
Poids volumique	$\gamma_r$	1,0	1,0

<sup>a</sup> ce facteur est appliqué à  $\tan \varphi'$ .

<sup>b</sup> le jeu M1 concerne l' approches 2 et le jeu M2 l'approche 3.

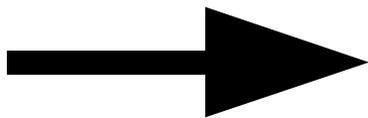


# Principes de dimensionnement

Afin de pouvoir justifier les fondations il est nécessaire de définir un **modèle géologique et géotechnique**

cf Normes :

- Eurocode 7 (parties 1 et 2)
- NF P 94-500 : Missions géotechniques





# Principes de dimensionnement

## Comment travaille un géotechnicien ?

**Reconnaissance du terrain** ⇨ **modèle géologique**

**Échantillonnage et/ou essais in situ**

*Représentativité d'après le modèle*

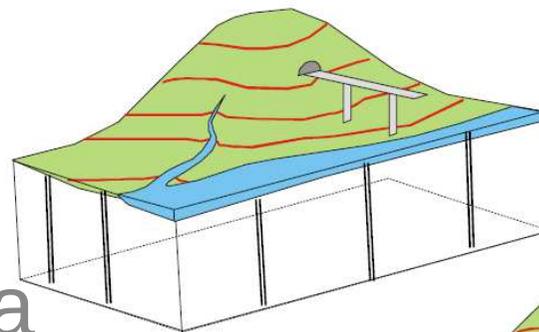
*Essais de laboratoire* ⇨ *propriétés physiques et mécaniques*

⇨ *Modèle physique, mécanique et hydraulique*

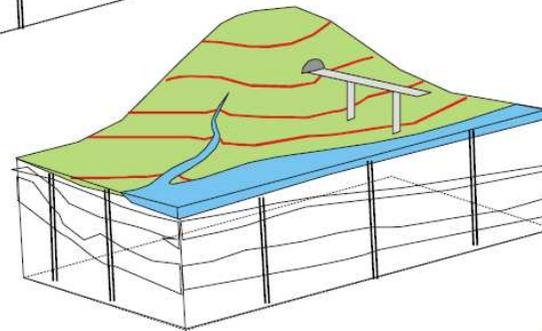
⇨ *Dimensionnement / justification*

# Principes de dimensionnement

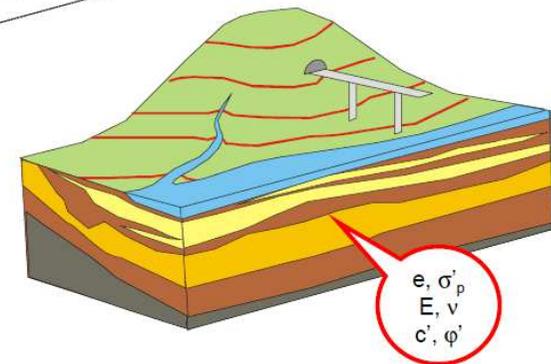
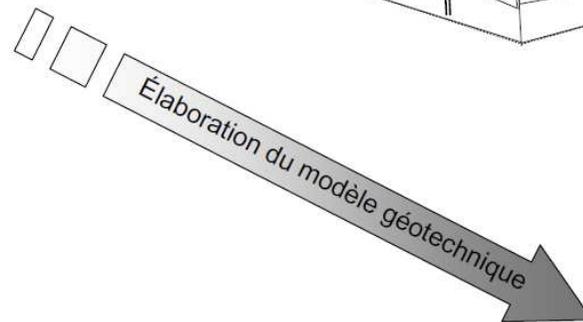
Progressions de la reconnaissance géotechnique



Observations, sondages, géophysique



Essais en place et en laboratoire

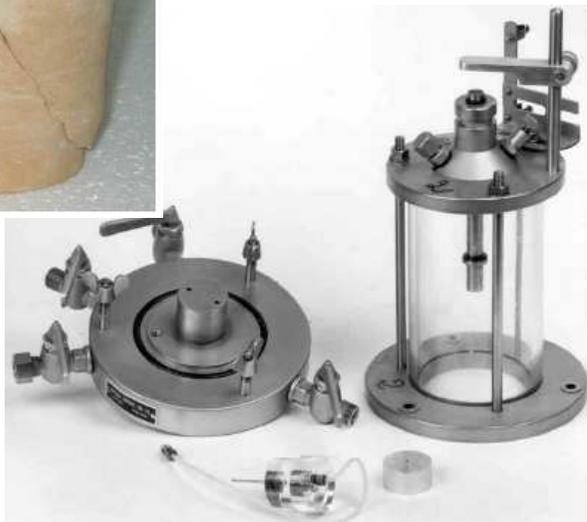




# Principes de dimensionnement

Quels essais ?

- Pour la capacité portante :  $p_l$ ,  $q_c$ ,  $c'$ ,  $\varphi'$ ,  $c_u$



Paramètres de sortie :  
Module pressiométrique  
ou module Ménard :  $E_M$   
Pression Limite :  $p_{LM}$



Paramètres de sortie :  $c'$ ,  $\varphi'$

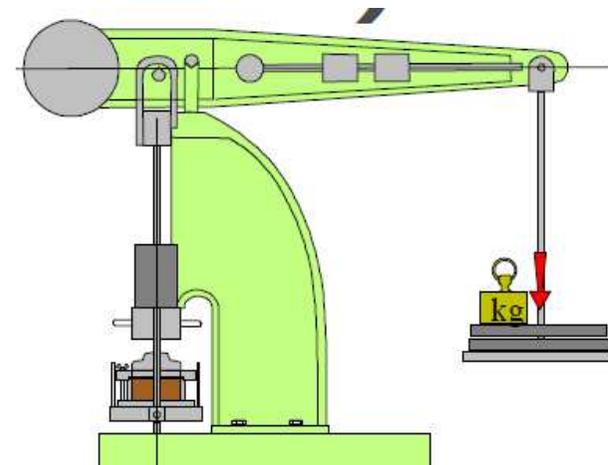
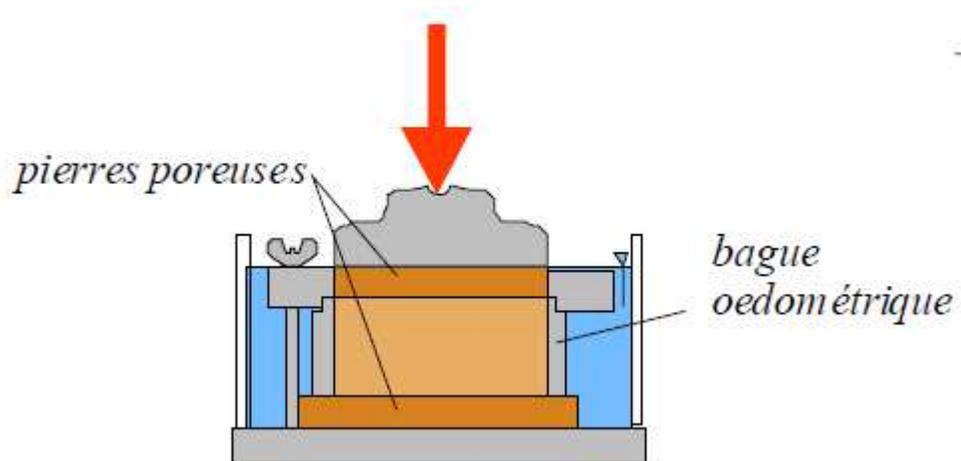
21 novembre 2019 – Les ponts courants



# Principes de dimensionnement

Quels essais ?

- Pour les tassements :  $E_M$ ,  $c_c$ ,  $c_v$ ,  $e_0$





# Principes de dimensionnement

Sondages in-situ : un sondage au moins par ligne d'appui ou par semelle.

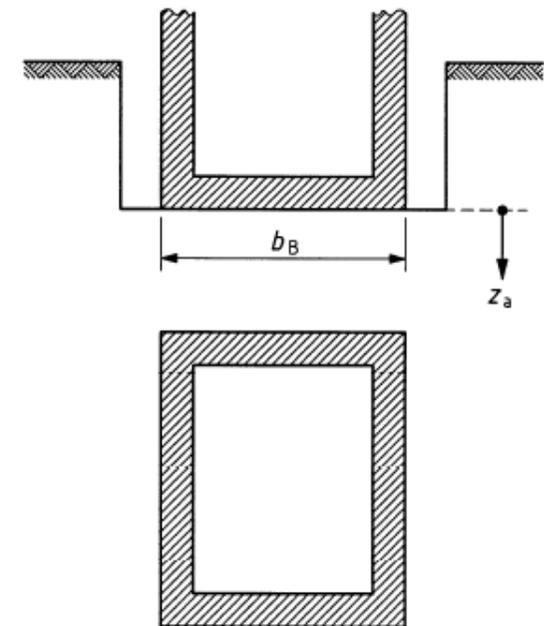
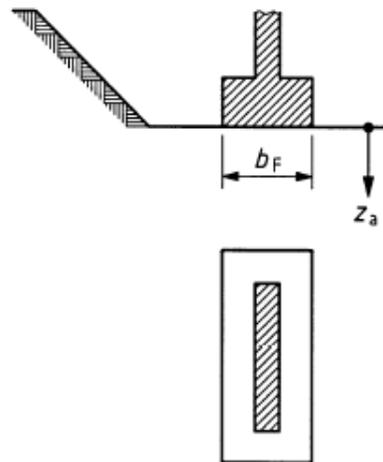
- Sondages carottés
- Sondages destructifs de reconnaissance (tarière)
- Sondages destructifs avec essais pressiométriques
- Sondages au pénétromètre statique

Ces reconnaissances peuvent être complétés par des méthodes géophysiques : sismique réfraction, panneaux électriques, radar géologique...



# Principes de dimensionnement

Les profondeurs de reconnaissances recommandées pour les fondations superficielles



$$z_a = \max (6\text{m} ; 3B_f ; 1,5B_b)$$

$z_a$  peut être limité à 2 m si le terrain est bon, mais il faut au moins un sondage à 5 m si la géologie n'est pas précise.

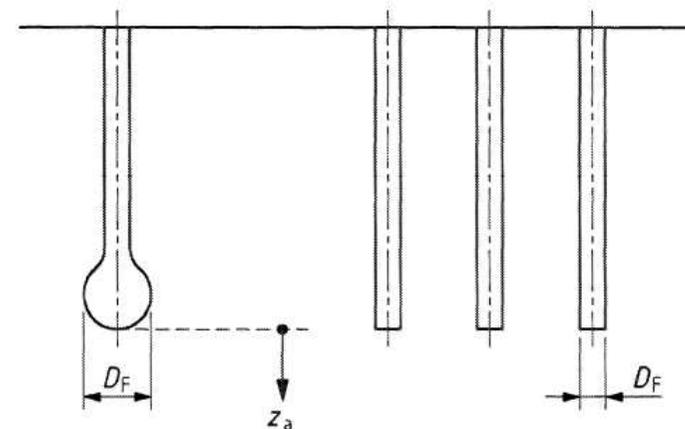


# Principes de dimensionnement

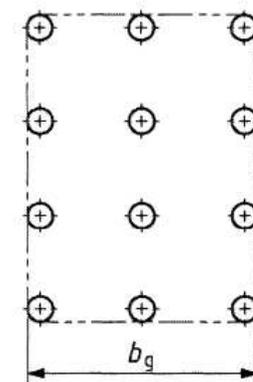
Les profondeurs de reconnaissances recommandées pour les fondations profondes

Le maximum de :

- $z_a \geq b_g$
- $z_a \geq 5 \text{ m}$
- $z_a \geq 3 D_F$

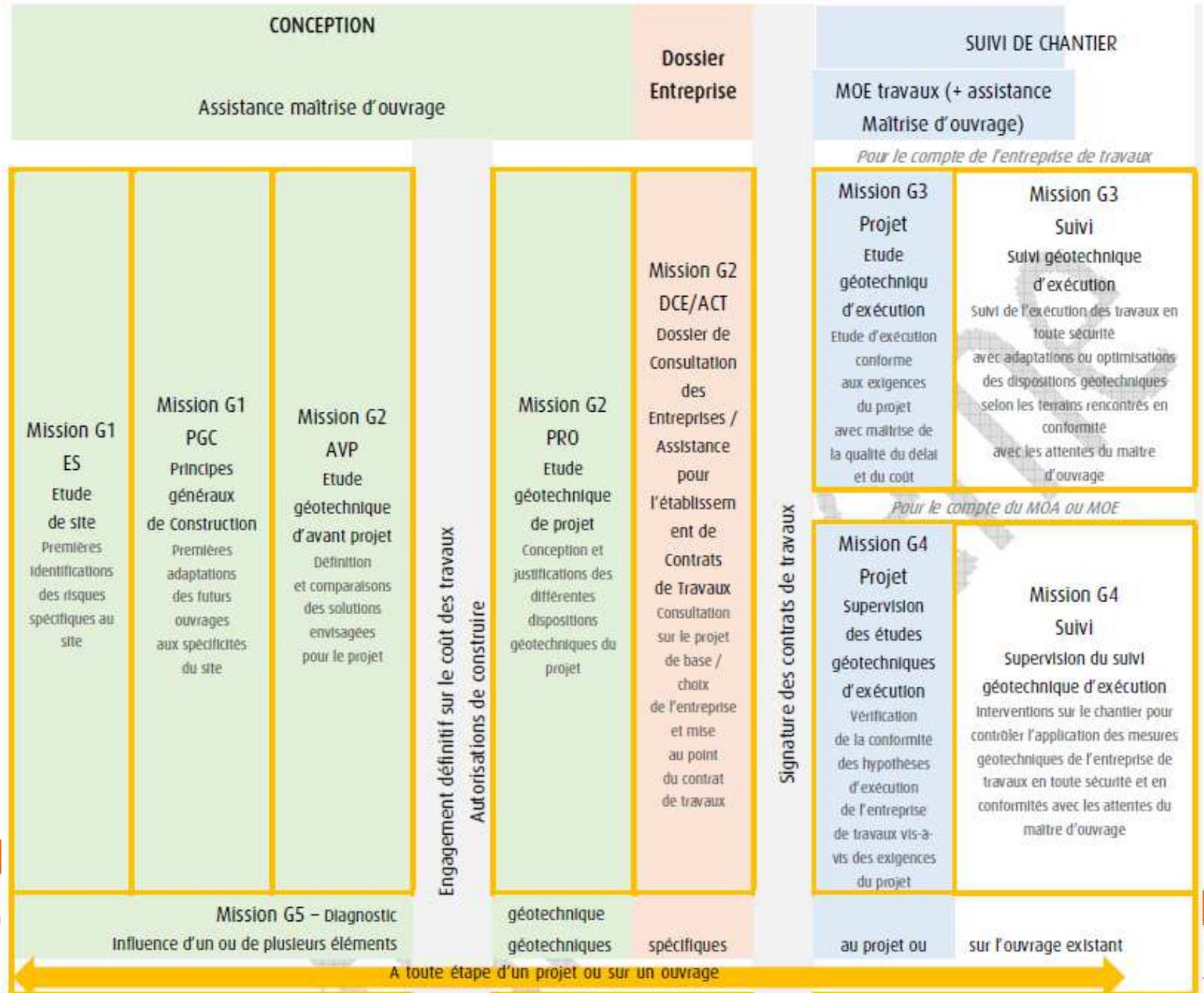


Groupe de pieux



# Principes de dimensionnement

Les missions d'ingénierie géotechnique décrites par NF P 94-500





# Principes de dimensionnement

Organisation des vérifications pour une fondation superficielle

Définition du modèle géologique et géotechnique

Détermination des efforts de calcul  
à partir des combinaisons d'action

Calcul de l'excentrement  
pour les différentes combinaisons

*Dans tous les cas :*

Limitation de l'excentrement   Capacité portante   Glissement   Stabilité générale   Résistance structurale   Tassements

*Selon le cas :*

Soulèvement hydraulique / gel / gonflement   Sismique   Répartition des efforts sous la semelle



# Principes de dimensionnement

Organisation des vérifications pour une fondation profonde

Définition du modèle géologique et géotechnique

Détermination des efforts de calcul  
à partir des combinaisons d'action

Calcul de l'effort de pointe + frottement axial

*Dans tous les cas :*

Portance / traction

Stabilité  
générale

Résistance  
structurale

Sollicitations  
transversales

*Selon le cas :*

Déplacement / déformation du pieu ou groupe de pieux

sismique



- Rôle des fondations
- Les familles de fondations
- Principes de dimensionnement
- **Les difficultés rencontrées**
- Exécution et contrôles d'exécution



# Les difficultés rencontrées

Des difficultés rencontrées éventuellement :

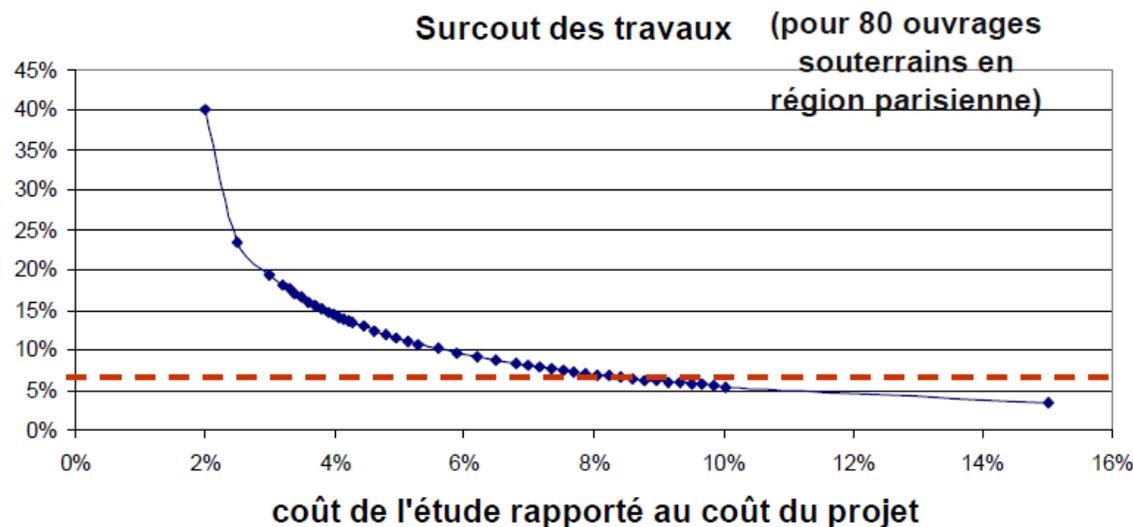
- Suite aux études,
- Lors de l'exécution des travaux.



# Les difficultés rencontrées

Des problèmes rencontrés suite aux études :

- Mission géotechnique G1 commandée, mais qui vaudra Projet car « on est pressé » ou bien « budget limité ».
- Étude de site (G1) souvent négligée, pas d'analyses des avoisinants ni de recherches sur des incidents ayant pu survenir dans le passé.





# Les difficultés rencontrées

## Des problèmes identifiés :

- Mission géotechnique G2 incomplète vis-à-vis du projet ;
- Mission G3 (Entreprise) orientée vers la remise en cause des hypothèses du projet ; développement d'arguments contentieux.
- La géotechnique permet d'évoquer certains phénomènes difficiles à réfuter en absence de reconnaissances adaptées (écoulements d'eau souterrains par exemple).
- Intérêt à valider préalablement les programmes d'investigations et leurs résultats (essais pressiométriques) afin d'avoir un modèle géotechnique fiable et cohérent.



# Les difficultés rencontrées

## En phase d'exécution :

- Problèmes lors des terrassements (compactage de remblai, purges incomplètes), stabilité des fouilles
- Mauvaise conception de la plate-forme de travail
- Problèmes lors de la foration des pieux, technicité de l'entreprise, adéquation des puissances des machines
- Problème pour descendre les cages d'armatures pour les pieux à la tarière continue
- Mauvais centrage des armatures entraînant un défaut d'enrobage
- Qualité des matériaux (béton, aciers)
- Etc...



Importance des contrôles d'exécution



- Rôle des fondations
- Les familles de fondations
- Principes de dimensionnement
- Les difficultés rencontrées
- **Exécution et contrôles d'exécution**



# L'exécution des travaux

Plusieurs textes réglementaires, notamment :

- Normes d'exécution des travaux géotechniques :
  - NF EN 1536 : Pieux forés (2015)
  - NF EN 12699 : Pieux avec refoulement du sol (2015)
  - NF EN 14199 : Micropieux (2015)
- Fascicules du CCTG :
  - Fascicule 68 : Exécution des travaux géotechniques des ouvrages de GC (2018)
- Normes de produits et d'essai :
  - NF EN 206/CN (2014 ; +A1 de 2016) : Béton
  - NF EN 10080 (2005) : Aciers pour l'armature du béton



# Les contrôles d'exécution

Pour les fondations superficielles :

- Implantation, achèvement des coffrages et ferrillages, mise en place des remblais autour des fondations (PC)
- Conformité des fonds de fouille (niveau, réglage, nature et portance du sol (essais in-situ ou labo si besoin)) (PA)
- Conformité des massifs de substitution (niveau, réglage, qualité de mise en œuvre) avant mise en œuvre (PA) :
  - du béton de propreté
  - du ferrillage de la semelle
- Contrôle de remblaiement de purges (PA)
- Autorisation de bétonnage d'une semelle de fondation (PA)



# Les contrôles d'exécution

## Pour les fondations superficielles :





# Les contrôles d'exécution

Pour les fondations profondes :

- Implantation des emplacements des pieux (PC)
- Forage / battage (rebattage) du premier pieu (PC)
- Acceptation du forage (curage du fond), des armatures avant mise en place et bétonnage (PA)
- Acceptation des pieux après auscultations (PA)
- Contrôle du refus, des entures pour pieux métal. (PA)
- Acceptation après recépage (PA)
- Acceptation des fouilles d'éléments de liaison (PA)



# Les contrôles d'exécution

Pour les fondations profondes :



Prélèvement du béton de la toupie avant le bétonnage du pieu



Essai d'affaissement au cône d'Abrams





# Les contrôles d'exécution

Contrôle des pieux finis exécutés en place :

- Le but est de s'assurer de la qualité :
  - du béton du fût (*béton âgé d'au moins 7 jours*)
  - du contact en pointe entre le béton et le sol
- Des méthodes de contrôle non destructives pour mesurer l'intégrité du béton des pieux forés :
  - Auscultation sonore par **transparence**
  - Auscultation par écho d'impulsions mécaniques (**réflexion / impédance**)
  - Gammamétrie, sismique parallèle



# Les contrôles d'exécution

Contrôle des pieux finis exécutés en place :

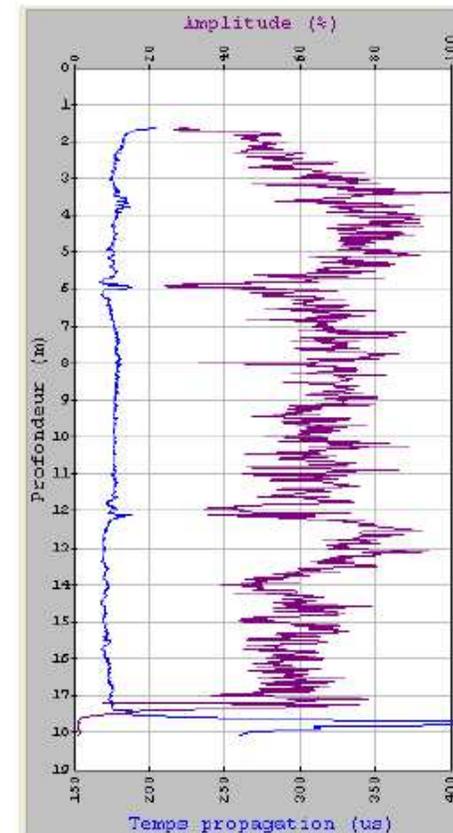
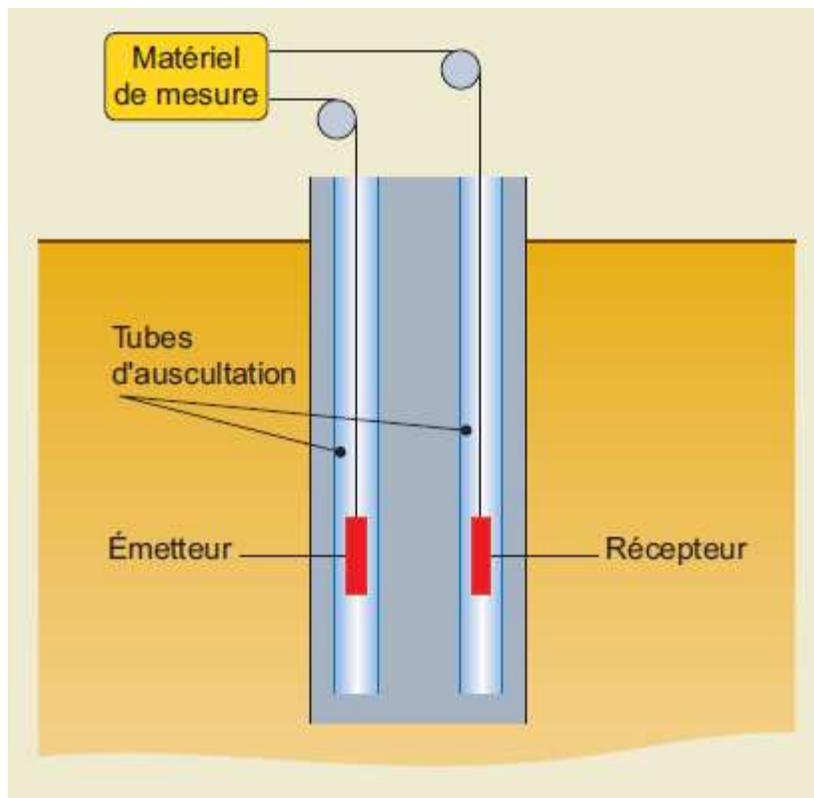
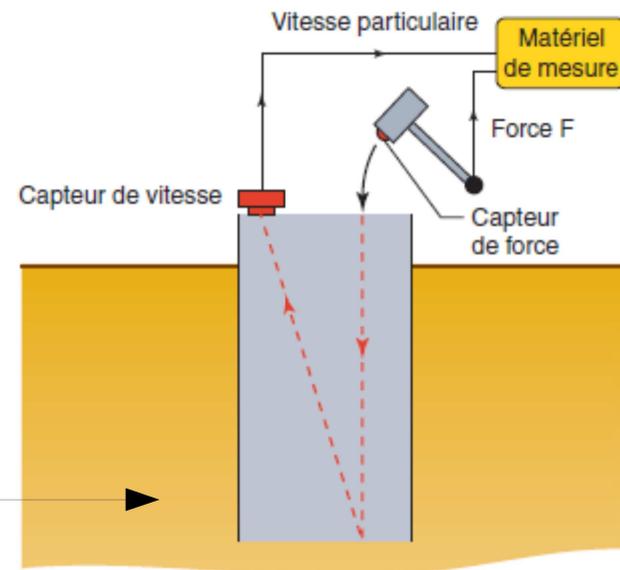
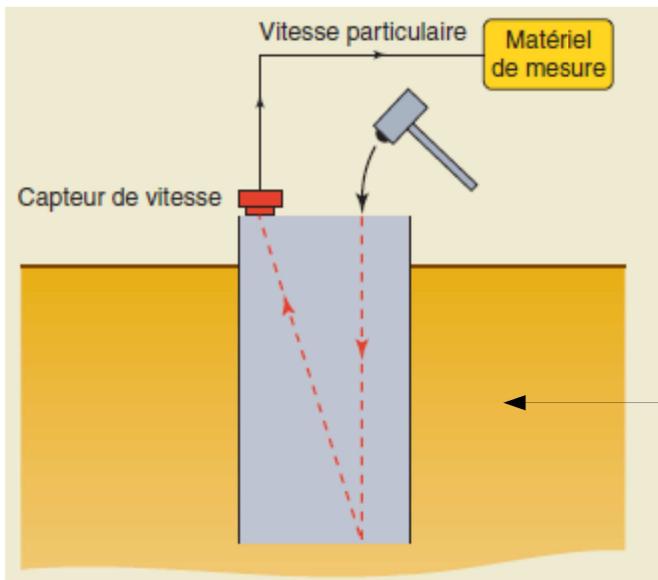


Schéma de principe de l'auscultation sonore



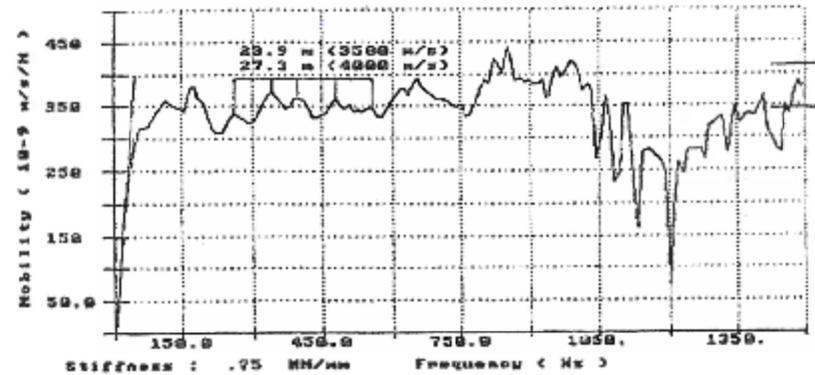
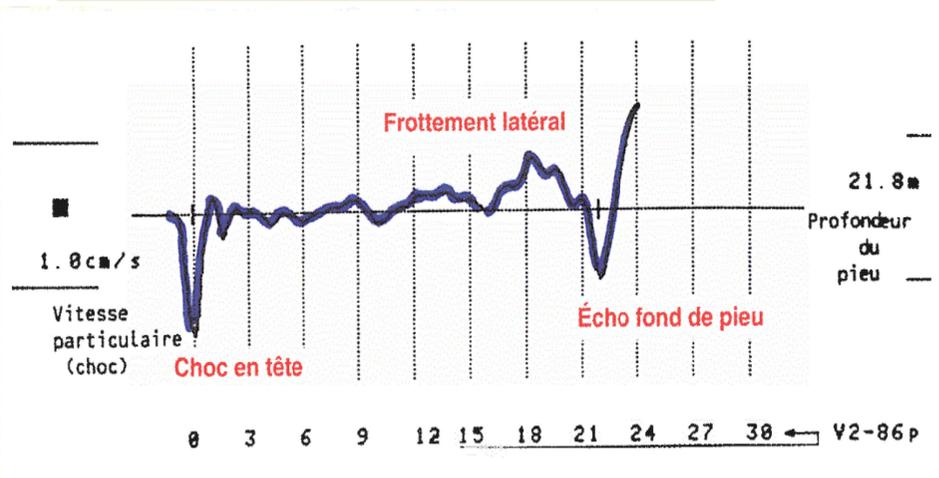
# Les contrôles d'exécution

Contrôle des pieux finis exécutés en place :



Schémas de principe

Réflexion Impédance





# Les contrôles d'exécution

Efficacité de la méthode d'auscultation / types de défauts

	Réduction de diamètre (sous-consommation/éboulement)	Discontinuité rupture du pieu ( <i>choc latéral</i> )	Coupure totale du pieu (désamorçage du bétonnage, éboulement)	Qualité/homogénéité du béton	Qualité de l'interface sol/pieu en pointe <sup>12</sup>	Sur-consommation
Sonique transparence <sup>13</sup>	+	++	+++	+++ <sup>a)</sup>	+ <sup>b)</sup>	
Réflexion	++	+++	++	+		++
Impédance	+	+++	++	+		++
Réflexion + Impédance	++ <sup>c)</sup>	+++	++	+		+++
Gammamétrie	+	+	++	+++		
Carottage <sup>d)</sup>		++	++	++	+++	
Essais sur carottes				+++		
Sismique parallèle		++	++	+ /		
Caméra		+++	++	++	+	

+++ : adapté et conseillé    ++ : adapté    + : possible

# Les contrôles d'exécution

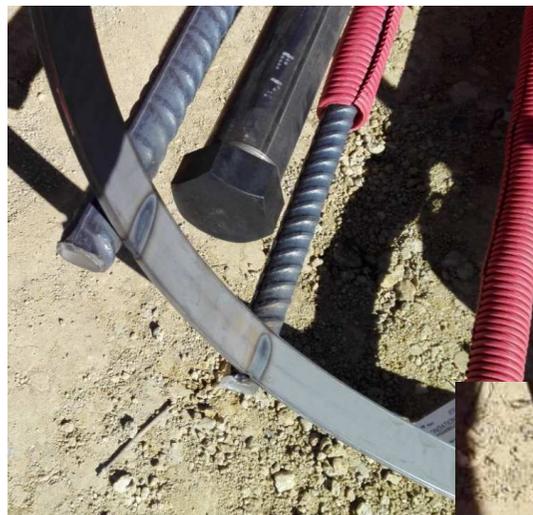
Contrôle des pieux finis exécutés en place



Auscultation sonique

# Les contrôles d'exécution

Contrôle des pieux finis exécutés en place



Tubes d'auscultation sonique et carottage

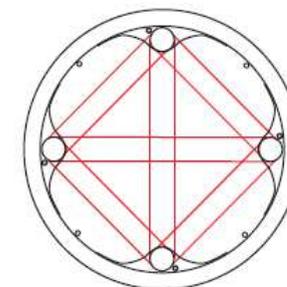
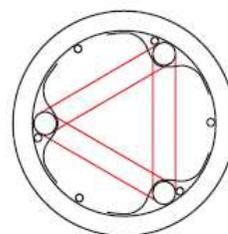


# Les contrôles d'exécution

## Contrôle des pieux finis exécutés en place

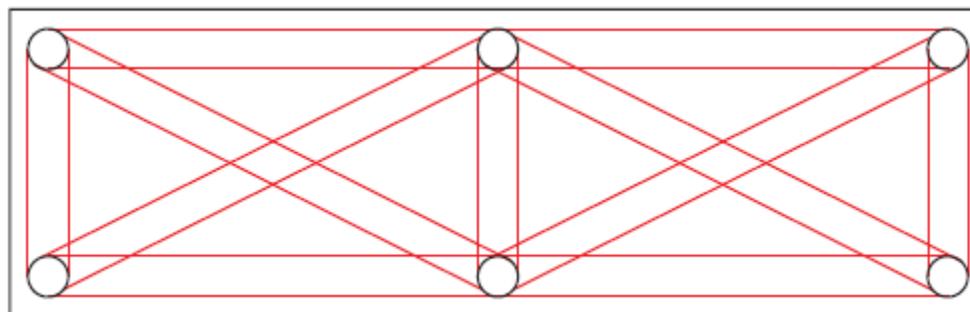
Pour les pieux :

- $B \leq 600$  mm : 2 tubes
- $600$  mm  $< B \leq 1\ 200$  mm : 3 tubes
- $B > 1200$  mm : 4 tubes au moins (entraxe maxi de 150 cm)



Pour les barrettes :

- tubes dans les angles et en périphérie (entraxe maxi de 150 cm)





# Les contrôles d'exécution

## Contrôle des pieux finis exécutés en place

Pieux forés		
Diamètre ↓ /Longueur →	L < 25 m	L ≥ 25 m
D ≤ 800 mm	Toutes <sup>a)</sup> exceptée cas b) et c)	Sonique <sup>c)</sup>
800 mm < D ≤ 1 000 mm	Sonique (si D < 1000 mm, réflexion, impédance sauf cas b)	
D > 1 000 <sup>c)</sup> mm		
Barrettes et parois moulées		
Sonique		
<p>a) L'utilisation des méthodes par réflexion et impédance nécessite obligatoirement de connaître les résultats de l'examen préalable du dossier géotechnique.</p> <p>b) La norme NF P 94 160-2 et la norme NF P 94 160-4 fixent dans le cas général la limite de D<sub>max</sub> à 1 000 mm et un élancement compris entre 10 et 30 fois le diamètre.</p> <p>c) Pour les petits diamètres D &lt; 600 mm, l'auscultation sonique n'est plus appropriée.</p>		

Choix de la méthode d'auscultation selon le type de fondation et sa géométrie



# Les contrôles d'exécution

## Réparation des pieux forés

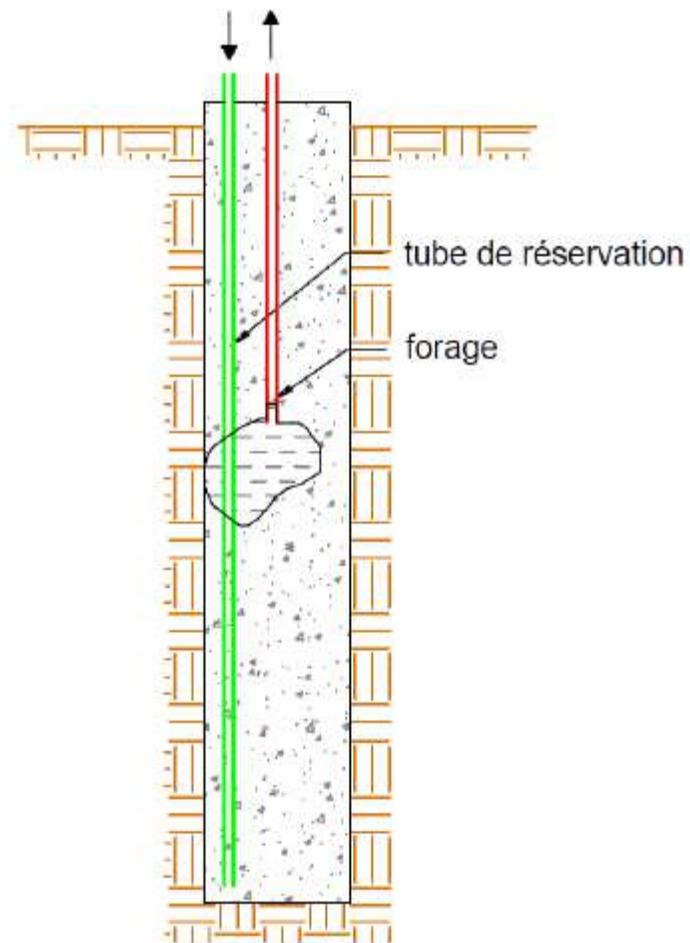
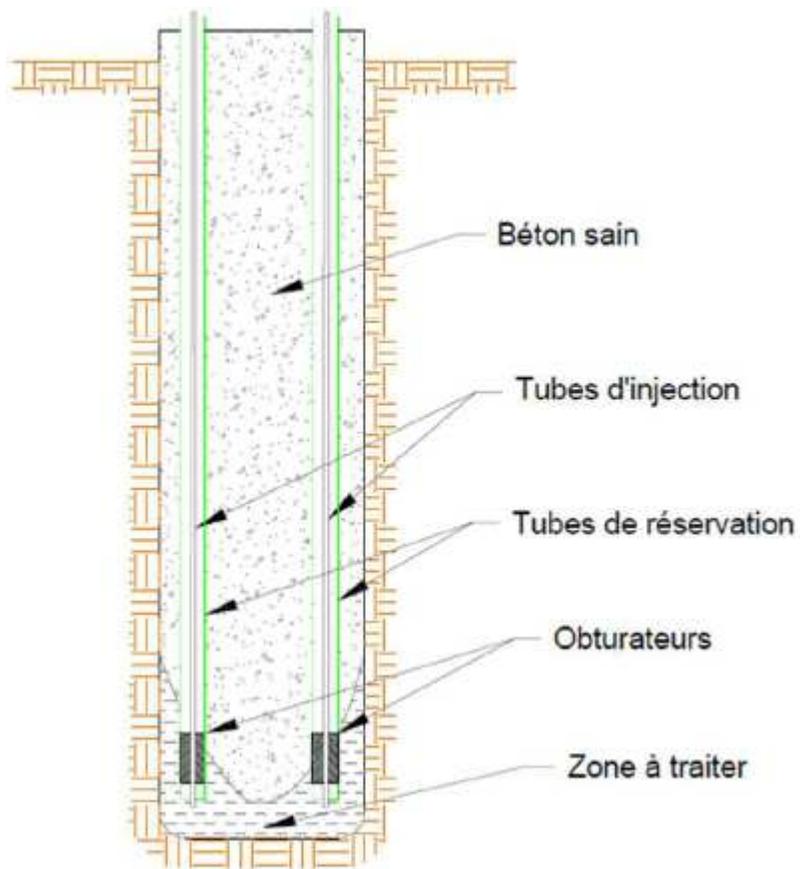
Différents mode de réparation :

- L'injection
- Scellement de barres d'acier dans les parties saines du fût
- Le jet-grouting
- Réparation à l'abri d'un tubage ou d'un blindage
- Réalisation de fondations additionnelles
- Micropieux en pointe (micropieux racines)



# Les contrôles d'exécution

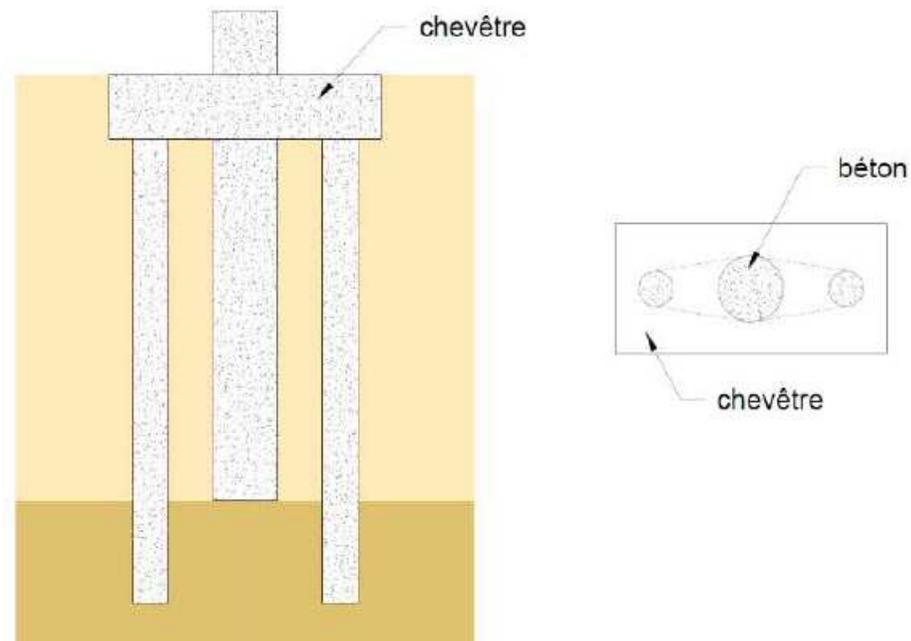
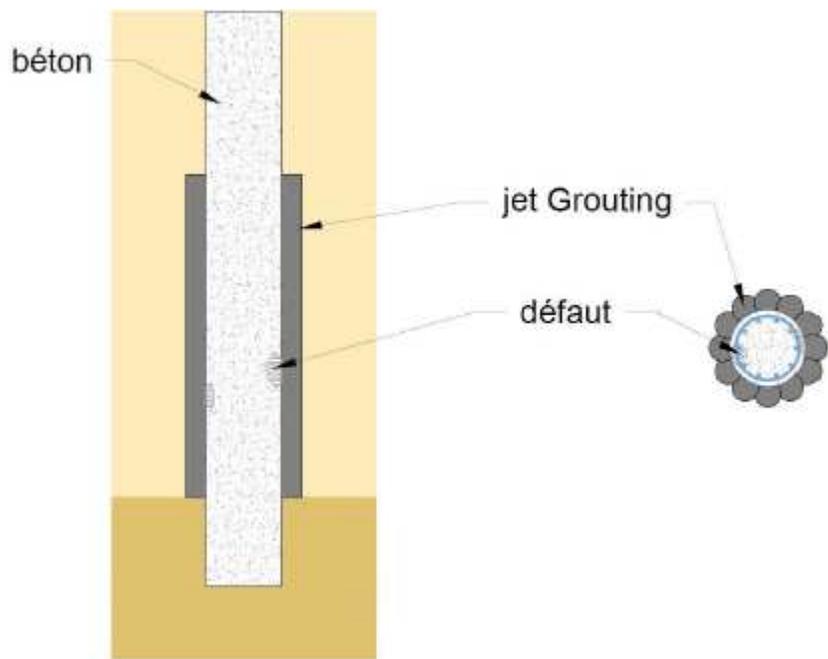
## Réparation des pieux forés



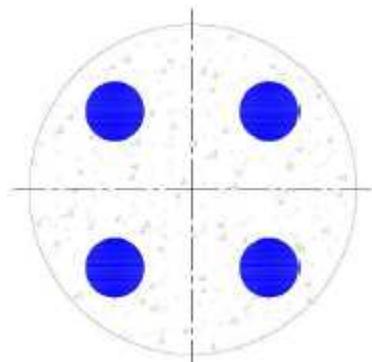


# Les contrôles d'exécution

## Réparation des pieux forés



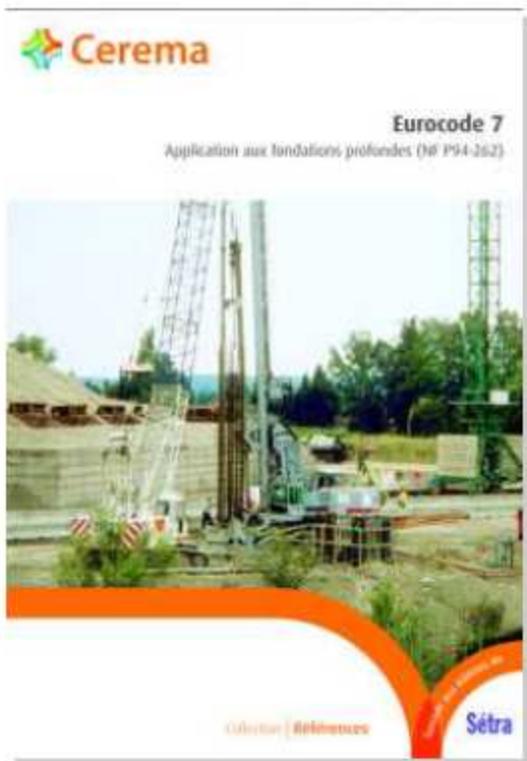
## Micropieux racines



## Pieux additionnelles



# Des référentiels Cerema



**Eurocode 7 - Application aux fondations profondes (NF P94-262)**



**Eurocode 7 : Application aux fondations superficielles (NF P94-261)**



# Des référentiels Cerema



techniques et méthodes  
des laboratoires des ponts et chaussées



Guide technique

**Contrôle de l'intégrité  
des éléments de fondations profondes  
de structures de génie civil et de bâtiment**  
Pieux forés, barrettes et parois moulées

*Méthodes d'auscultation*



**Fondations au rocher -  
Reconnaissance des massifs  
rocheux, conception et  
dimensionnement des  
fondations**



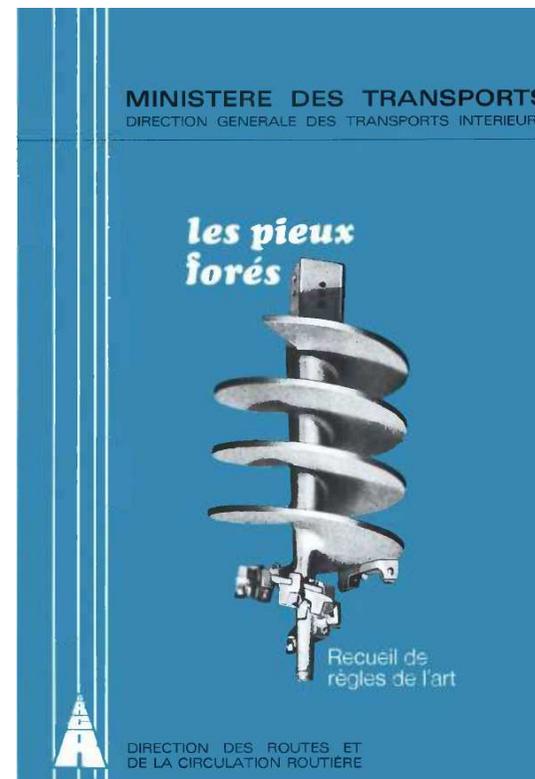


# Des référentiels Cerema

Deux guides en cours de réécriture :



Publication 2021 ?



Publication 2020 ?



Merci  
Questions ?