

# **ENPC / MASTER GCE**

## **COURS DE PROJET DE PONTS**

----

### **LES FONDATIONS DE PONTS**

**Conception / Technologie / Dimensionnement**

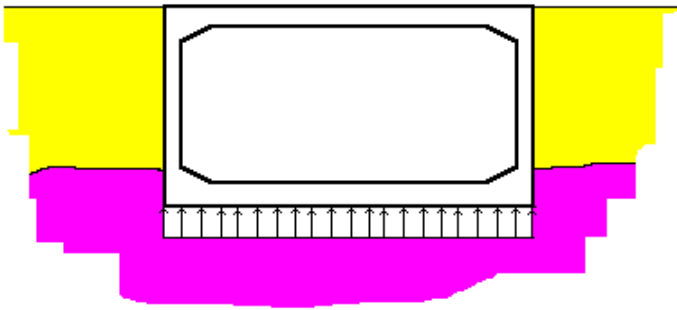
# SOMMAIRE

- **Généralités**
- **Les fondations superficielles**
- **Les fondations profondes**
- **Les cas particuliers**

# GÉNÉRALITÉS

- **Les types de fondations**
- **La reconnaissance géotechnique**
- **Les paramètres de choix**

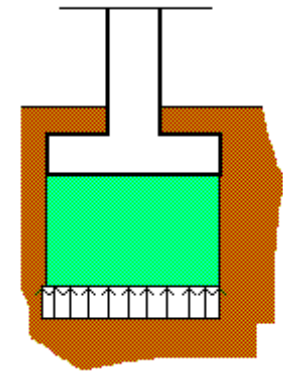
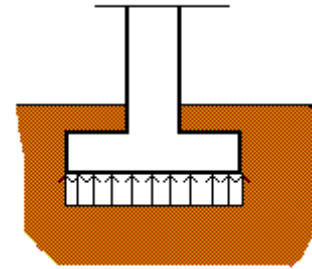
# LES PRINCIPAUX TYPES DE FONDATIONS DES PONTS



## LES RADIERS

(Ponts-cadres, réservoirs, etc.)

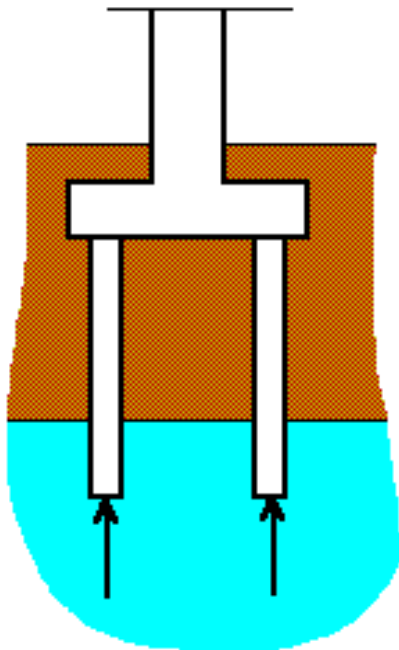
Pression au sol (ELS) : 0,1 MPa



## FONDATIONS SUPERFICIELLES

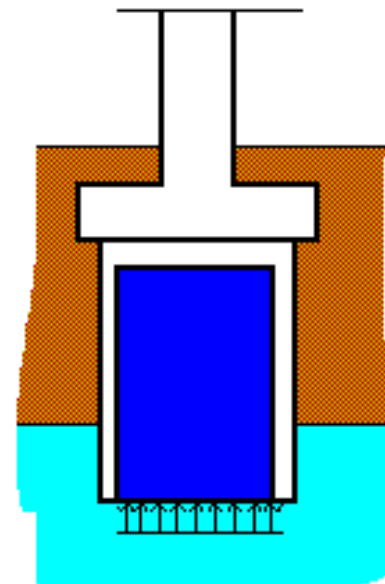
(Ouvrages d'art, murs de soutènement, etc.)

Pression au sol (ELS) : 0,3 MPa



## PIEUX ET PUIITS

Pression en pointe (ELS) supérieure à 2 MPa environ, sauf pieux flottants.

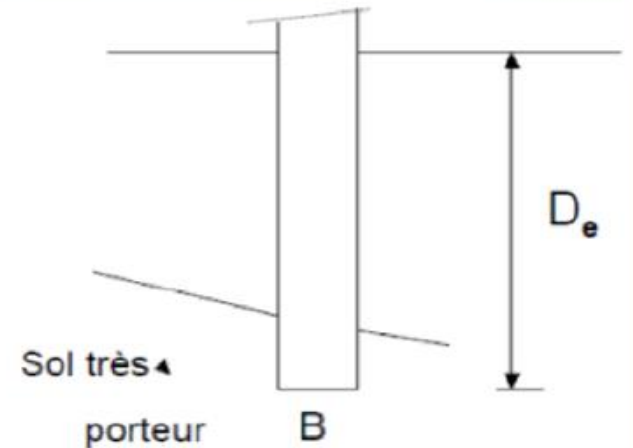
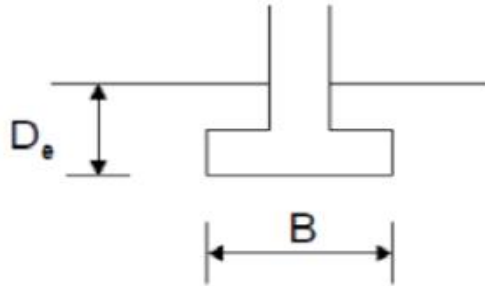


## FONDATIONS MASSIVES

(grands ouvrages d'art)  
Pression au sol de l'ordre de 1 MPa et d'avantage (ELS)



# LES PRINCIPAUX TYPES DE FONDATIONS DES PONTS



## Superficielles : $D_e/B < 1.5$

- Si bon sol en surface
- Plus facile à réaliser, peu coûteuse
- De préférence au dessus de la nappe

## Profondes : $D_e/B > 5$

- Encastrés dans des sols porteurs
- Coûts variables en fonction de la technique, des longueurs et diamètres

# RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE

## · OBJECTIFS

**Dimensionner les fondations**

**Préciser les conditions d'exécution**

**Aider à la conception de l'ouvrage**

**Minimiser le coût de l'ouvrage**

## · PRINCIPE

**Progressivité des études**

**Phasage de la reconnaissance**

---

**Missions G1(ES-PGC), G2 (AVP-PRO-DCE) cf norme NFP94500**



# RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE

## MOYENS

Enquête, collecte de données existantes : géologie, ouvrages voisins...

Méthodes de reconnaissance globales : géophysique, cartes géologiques, photographies aériennes

### Sondages et essais :

Coupe géologique

Caractéristiques mécaniques du sol : résistance, déformabilité

Hydrogéologie : nappes, perméabilités

Autre : failles, cavités souterraines ( karsts, galeries, mines)

...

---

# RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE

## VOLUME

Pas de règle universelle mais des préconisations dans la norme EN 1997-2


**Phase avant-projet** : nombre et type de sondages suffisant pour cerner modèle géologique et points durs

**Phase projet** : nombre et profondeur des sondages adaptés au dimensionnement des fondations et des ouvrages provisoires

---

# RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE

## Indications de reconnaissances selon EN 1997-2:

- .Ouvrage de grande hauteur, quadrillage de 15 à 40 m
  - .Ouvrage de grande surface, quadrillage de moins de 60 m
  - .Ouvrage linéaire, espacement entre 20 et 200 m
  - .Ouvrage spécial (ponts, cheminées,...), au moins 2 sondages par fondation
  - .Ouvrage spécial (barrage), espacement entre 25 et 75 m
- 
- 

# RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE

Indications de reconnaissances selon EN 1997-2:

Ouvrage de soutènement,

Profondeur du sondage :  $z_a = t + 5\text{m}$

t : hauteur de la fiche

Ouvrage de type pieu,

Profondeur du sondage :  $z_a = \text{Max} (b_g; 5\text{m}; 3d_f)$

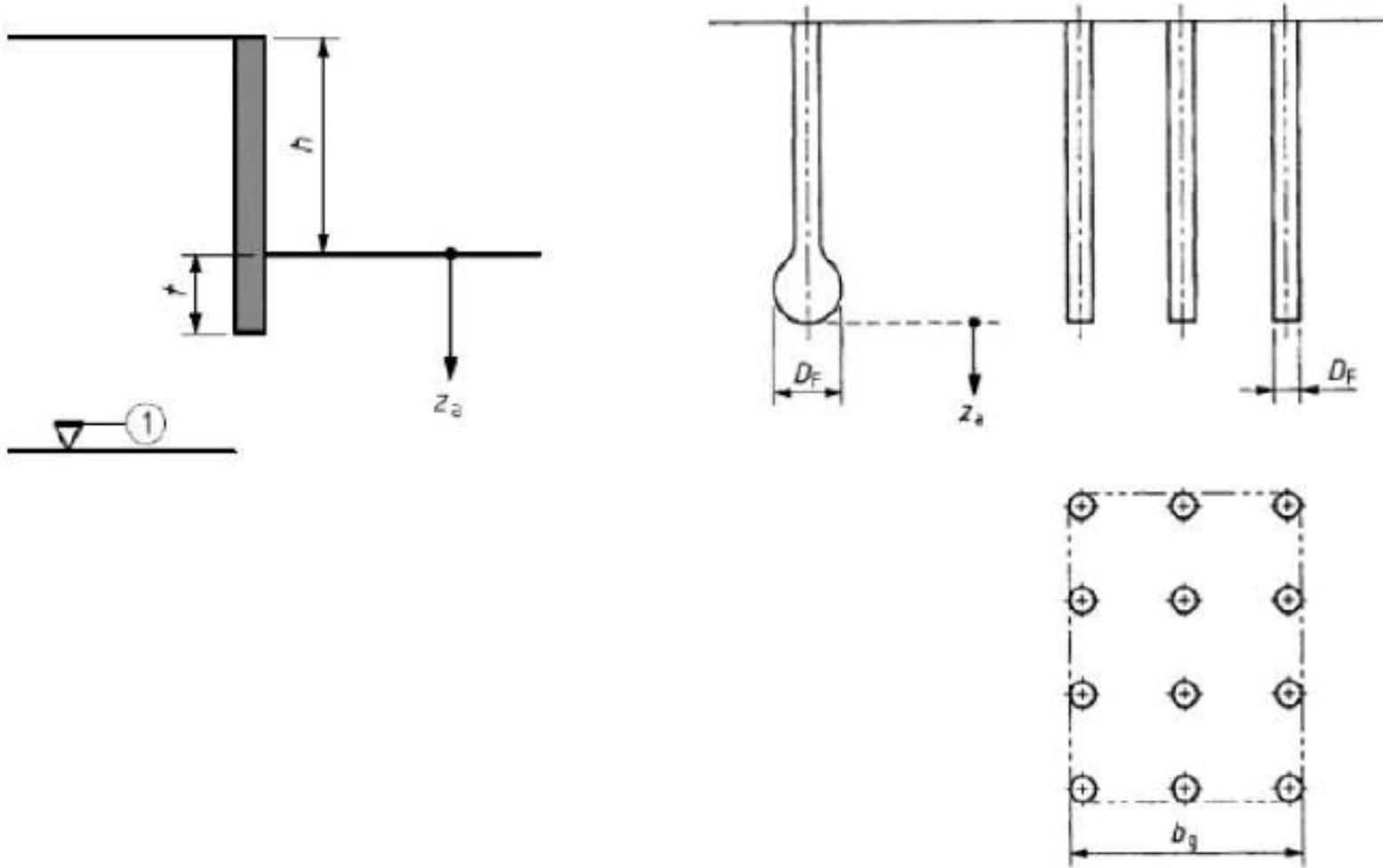
$b_g$ : largeur du rectangle du groupe de pieux

$d_f$ : largeur pieu

---



# RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE



# RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE

Indications de reconnaissances selon EN 1997-2:

Ouvrage type GC,

Profondeur du sondage :  $z_a = \text{Max}(6\text{m}; 3b_f)$

$b_f$ : plus petite dimension de la fondation

Ouvrage de type radier,

Profondeur du sondage :  $z_a = 1.5b_b$

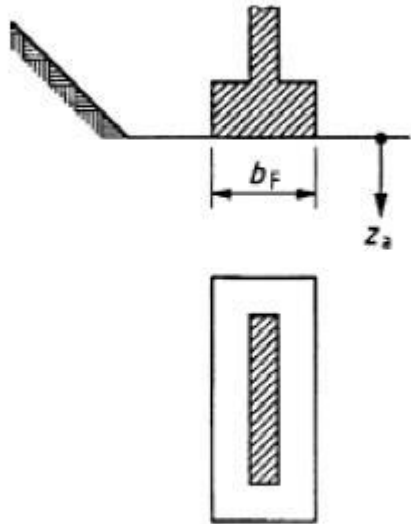
$b_b$ : plus petite dimension de l'ouvrage

---

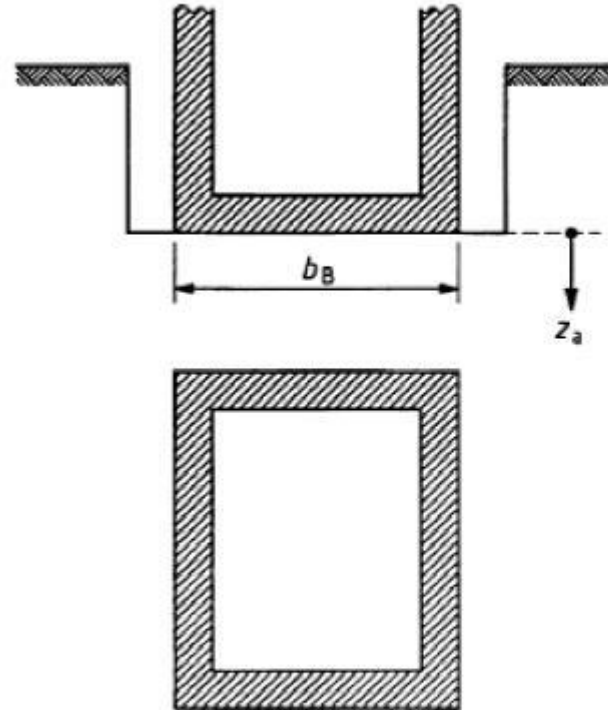




# RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE



a) Fondation



b) Ouvrage

Reconnaitances préliminaires investigations		Reconnaitances pour la conception du projet investigations			Reconnaitances pour le calcul du projet investigations	
<p>Étude en bureau des cartes topographiques, historiques, géologiques et hydrogéologiques</p> <p>Extraction de minéraux</p> <p>Interprétation des photos aériennes</p> <p>Archives des ouvrages et des reconnaitances antérieurs</p> <p>Inspection du site</p> <p>Reconnaitances géophysiques préliminaires</p> <p>Reconnaitances intrusives préliminaires</p>	<p><b>Sol fin</b></p> <p>CPT, SS, DP, SE</p> <p>FVT ou SPT</p> <p>OS TP, PS, OS</p> <p>GW</p>	<p>Choix préliminaire d'une méthode de fondation</p>	<p>Fondations sur pieux</p>	<p>SS, CPT, DP, SR</p> <p>FVT, SPT, PIL</p> <p>PS, OS, CS, PMT</p> <p>GWC</p>	<p>Vérification du choix de la méthode de fondation et de la procédure de calcul, contrôle des travaux d'amélioration des terrains et de la stabilité au cours de la construction</p>	<p>PIL, Essais de battage de pieux, Mesurages des ondes mécaniques (sismiques)</p> <p>GWC, tassements, Inclinomètres</p>
	<p><b>Sol grenu pulvérulent</b></p> <p>SS, CPT, DP, SR</p> <p>SPT</p> <p>AS, OS, TP</p> <p>GW</p>		<p>Fondations superficielles</p>	<p>SS ou CPT, DP</p> <p>FVT, DMT ou PMT, BJT</p> <p>PS, OS, CS, TP</p> <p>GWC</p>		<p>Vérification du type de sol</p> <p>Vérification de la raideur (CPT) Tassements, Inclinomètres, GWC</p> <p>Potential de variation de volume dû à la variation de la teneur en eau</p>
	<p><b>Roche</b></p> <p>SR, CPT, MWD</p> <p>PLT</p> <p>CS, AS, TP</p> <p>GW</p>	<p>Choix préliminaire d'une méthode de fondation</p>	<p>Fondations sur pieux</p>	<p>CPT, DP, SR</p> <p>SPT, DMT, PIL</p> <p>OS, TP</p> <p>GWO</p>		<p>PIL, Essais de battage de pieux, Mesurages des ondes mécaniques (sismiques) GWC, Tassements, Inclinomètres</p>
			<p>Fondations superficielles</p>	<p>CPT, DP</p> <p>SPT, PMT, BJT, DMT, PLT</p> <p>OS, TP</p> <p>GWO</p>		<p>Vérification du type de sol</p> <p>Vérification de la raideur (CPT, DP, SPT)</p> <p>Tassements</p>
		<p>Choix préliminaire d'une méthode de fondation</p>	<p>Fondations sur pieux ou superficielles</p>	<p>SR, MWD, cartographie des fractures</p> <p>RDT, PMT, BJT</p> <p>TP, CS</p> <p>GWO</p>	<p>Vérification de l'inclinaison et des discontinuités dans la roche et dans sa surface</p> <p>Vérification du contact entre la pointe du pieu/fondation et la surface rocheuse</p> <p>Vérification des conditions hydrauliques (débit et pression)</p>	
<p><b>Abréviations</b></p> <p><b>Essais en place</b></p> <p>BJT Essai de vérinage en forage</p> <p>DP Essai de pénétration dynamique</p> <p>SR Sondage de reconnaissance sol/roche</p> <p>SS Sondage statique (par exemple, sondage par poids, WST)</p> <p>CPT(U) Essai de pénétration statique au cône (avec enregistrement de la pression interstitielle recording)</p> <p>SPT Essai de pénétration au carottier</p> <p>PMT Essai pressiométrique</p> <p>DMT Essai au dilatomètre plat</p> <p>FVT Essai au scissomètre de chantier</p> <p>PLT Essai de chargement à la plaque</p> <p>MWD Enregistrement des paramètres de forage</p> <p>SE Mesurages sismiques</p> <p>PIL Essai de chargement de pieux</p> <p>RDT Essai au dilatomètre</p>					<p><b>Prélèvement</b></p> <p>PS Carottier à piston</p> <p>CS Carottier</p> <p>AS Tarière</p> <p>OS Carottier à tube ouvert</p> <p>TP Prélèvement depuis une tranchée de reconnaissance</p> <p><b>Mesurages piézométriques</b></p> <p>GW Mesurages piézométriques</p> <p>GWO Mesurages piézométriques avec système ouvert</p> <p>GWC Mesurages piézométriques avec système fermé</p>	



Laboratoire Régional Est Parisien

LIAISON A.140 - R.D.5

DEVIATION DE MEAUX

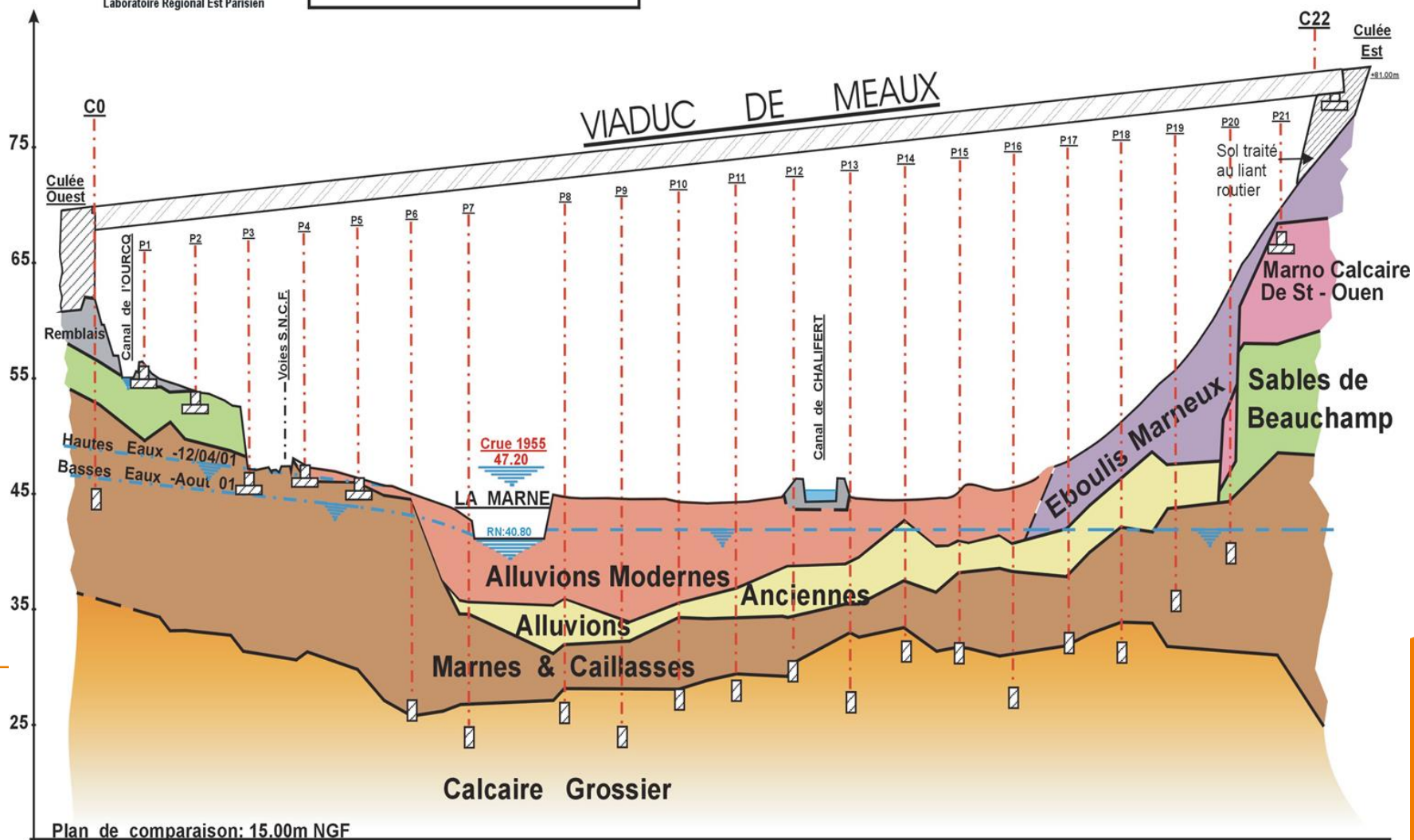
VIADUC DE FRANCHISSEMENT  
DE LA VALLEE DE LA MARNE

## PROFIL EN LONG GEOLOGIQUE

### Modes de Fondation

- Fondations sur Pieux 1800mm

- Semelles superficielles



# RÉFÉRENTIEL

**EC7 partie 1 + normes d'application nationales**

**NF P 94261 Fondations superficielles (juin 2013)**

**NF P 94262 Fondations profondes (juillet 2012)**

**+ additif de juillet 2018**

**Calcul des fondations superficielles et profondes (R. Frank, ENPC)**

**Micropieux : PN Forever**

---

...

# SOMMAIRE

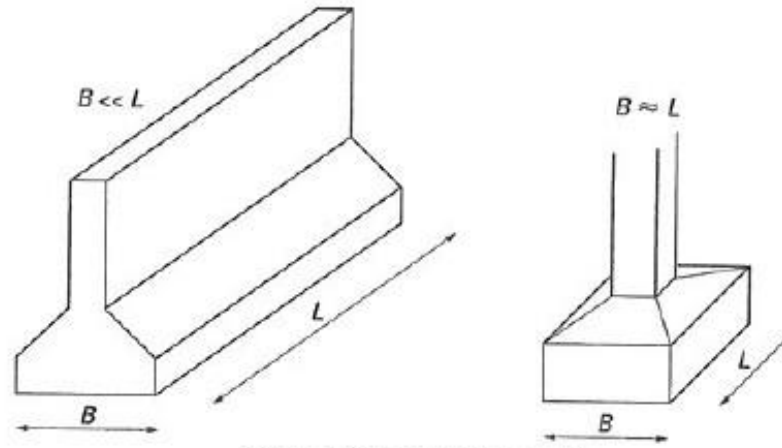
**Généralités**

**Les fondations superficielles**

**Les fondations profondes**

**Les cas particuliers**

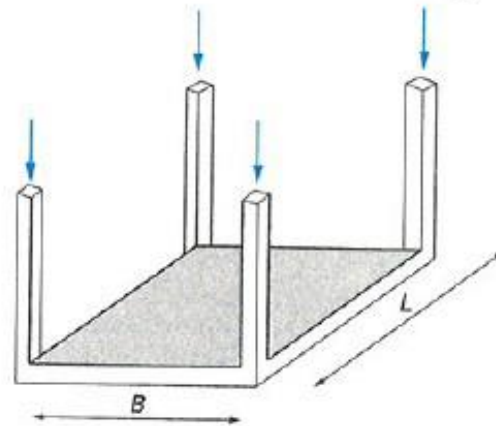
# TYPES DE FONDATIONS SUPERFICIELLES



$B \times L <$  aire de l'ouvrage porté

(a) semelle filante

(b) semelle isolée



$B \times L$  : aire de l'ouvrage porté

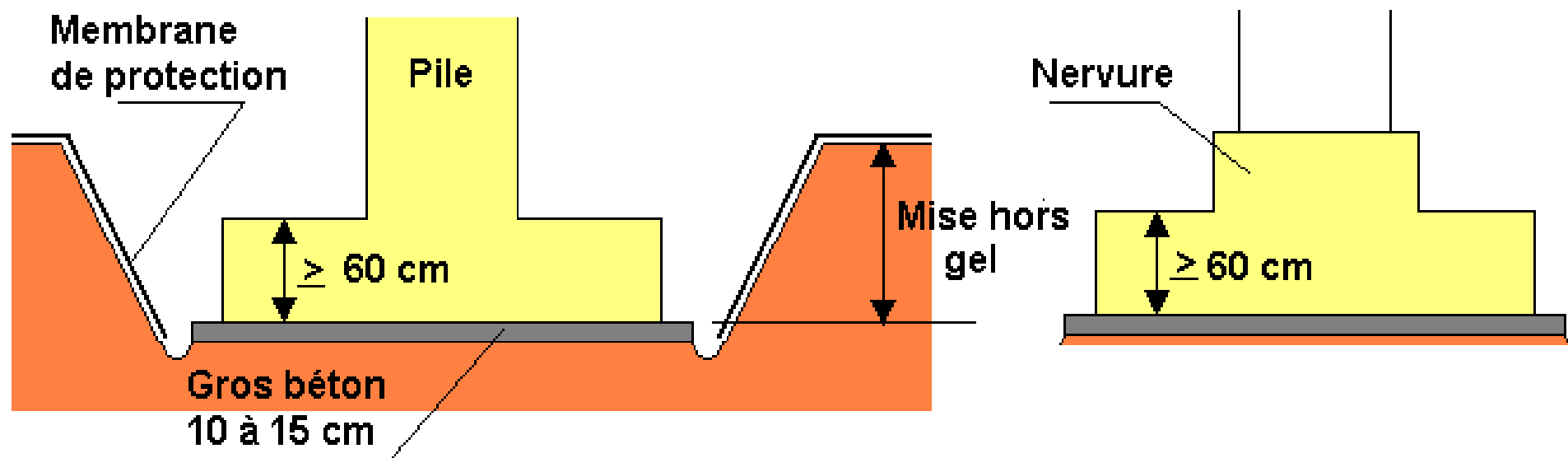
(c) radier (ou dallage)



# TECHNOLOGIE



# CONCEPTION D'UNE FONDATION SUPERFICIELLE COURANTE EN SITE TERRESTRE





# EXEMPLE DE CONTRÔLE DE FOND DE FOUILLE



Blocs  
décimétriques  
à retirer



# COMPORTEMENT ÉTUDIÉ PAR ESSAIS EN VRAIE GRANDEUR

## Paramètres variables :

Type de chargement

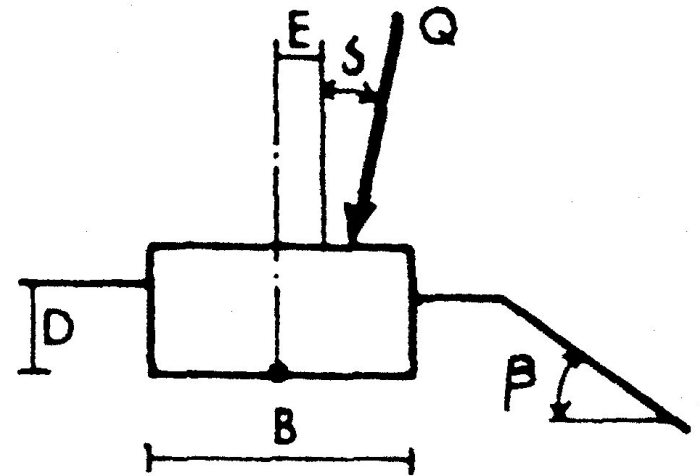
forme

encastrement

inclinaison

proximité d'un talus

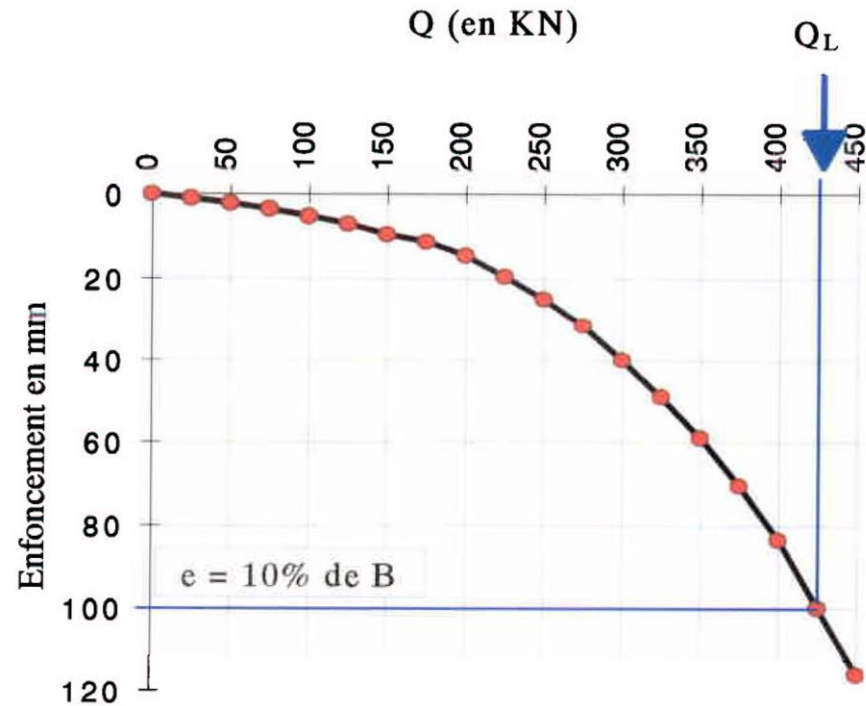
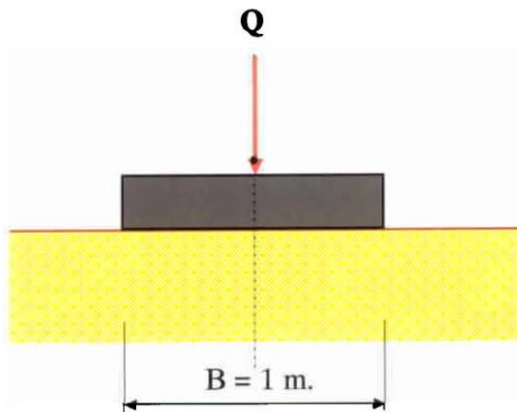
pente du talus



Paramètres étudiés

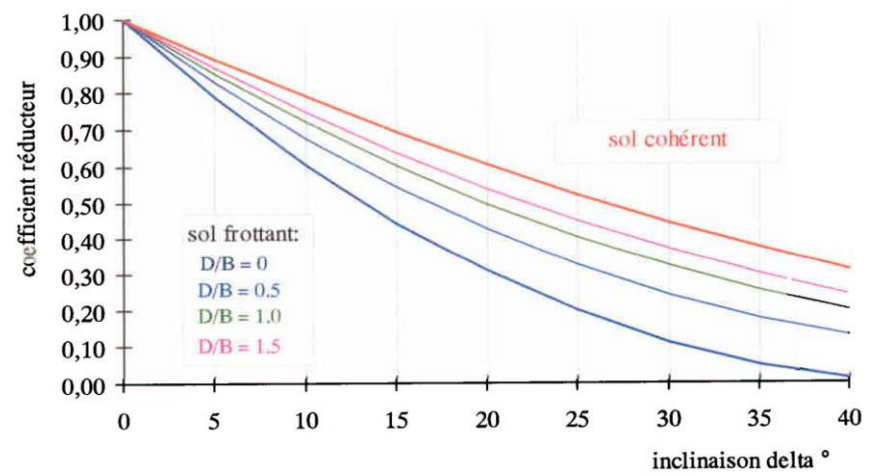
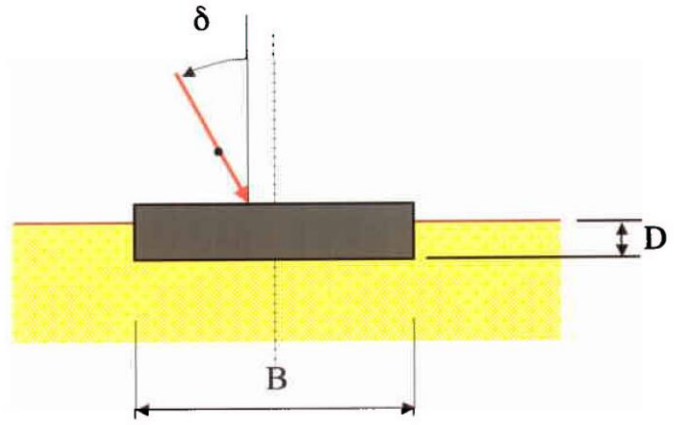
# COMPORTEMENT DES FONDATIONS

## • Charge limite d'une fondation superficielle

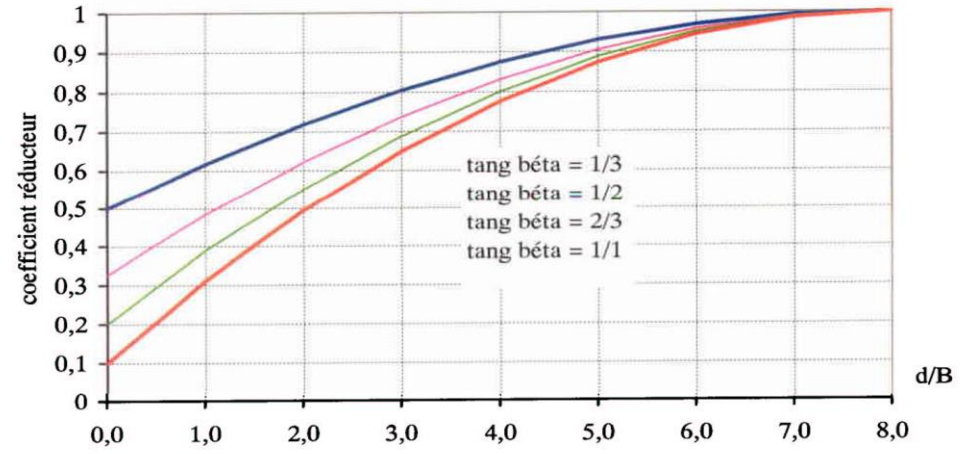
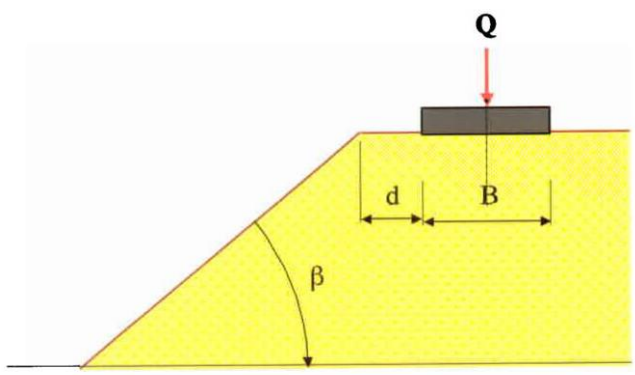




# EFFET DE L'INCLINAISON : COEFFICIENT RÉDUCTEUR $I_\delta, I_\beta$



coefficient minorateur pour un encastrement nul ( $D/B=0$ )



# JUSTIFICATION DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

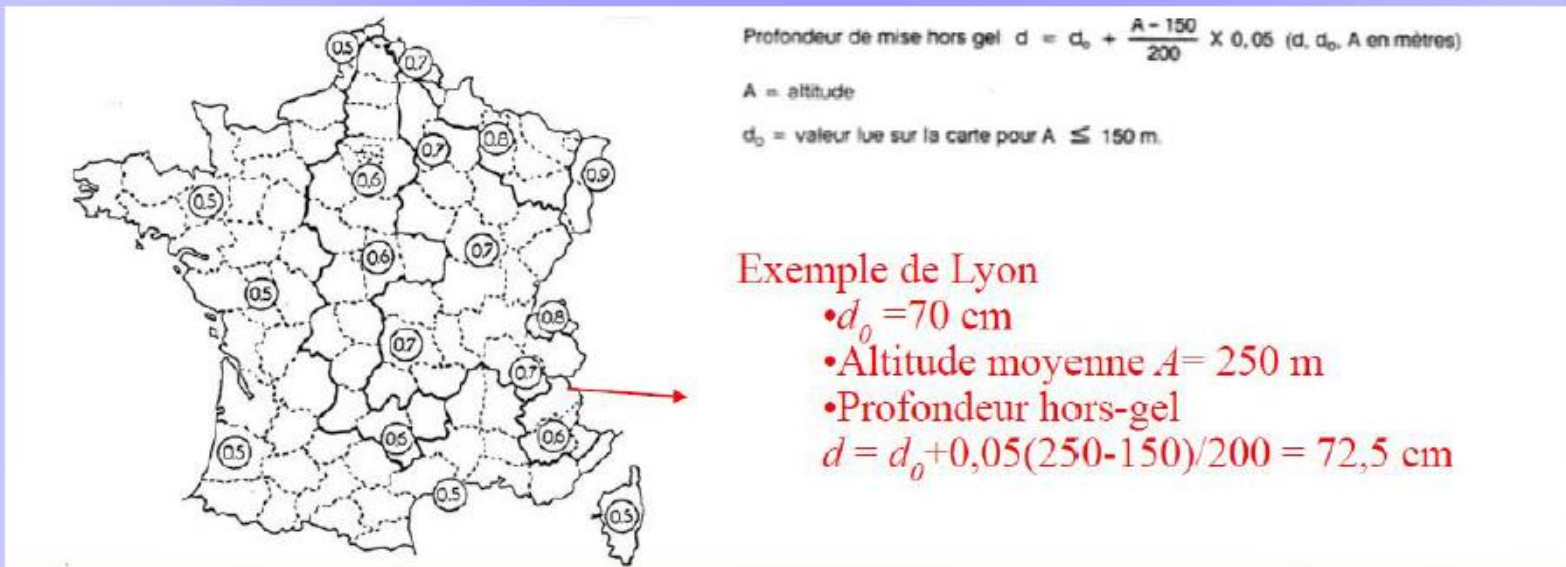
**Les différents états limites à justifier :**

- **Mobilisation du sol (portance)**
  - **Tassements**
  - **Glissement**
  - **Décompression du sol sous la semelle**
-

# JUSTIFICATIONS COURANTES DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

## Profondeur de gel :

Au dégel, perte de portance sous les fondations liée à la diminution de volume. Il faut mettre les fondations hors gel



## Risque d'affouillement :

En site aquatique, prise en compte de l'affouillement. Il faut approfondir la base de la fondation.

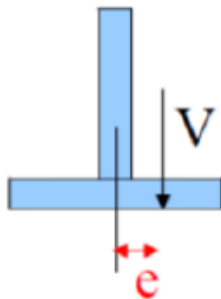
# JUSTIFICATIONS COURANTES DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

## Justification de l'excentrement

Calcul de  $e, e_B, e_L$

$$e = \frac{M_d}{V_d}$$

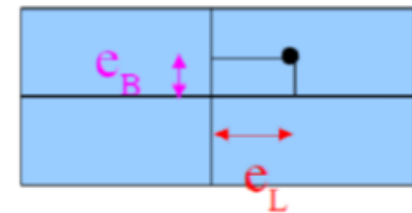
semelle filante



semelle circulaire



semelle rectangulaire



$V_d$

valeur de calcul de la charge verticale au centre de la semelle

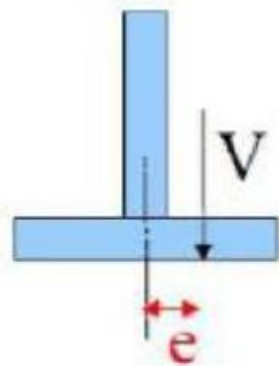
$M_d$

valeur de calcul du moment de la descente de charge au centre de la semelle

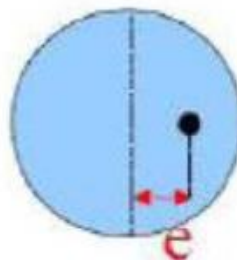
# JUSTIFICATIONS COURANTES DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

## Justification de l'excentrement

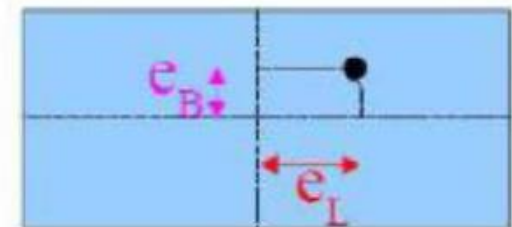
Semelle filante



Semelle circulaire



Semelle isolée



	Semelle filante de largeur $B$	Semelle rectangulaire de largeur $B$ et de longueur $L$	Semelle circulaire de diamètre $B$
<b>ELU</b> Fondamental et accidentel	$\left(1 - \frac{2e}{B}\right) \geq \frac{1}{15}$	$\left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{L}\right) \geq \frac{1}{15}$	$\left(1 - \frac{2e}{B}\right) \geq \frac{3}{40}$
<b>ELS quasi-permanents et ELS fréquents</b>	$\left(1 - \frac{2e}{B}\right) \geq \frac{2}{3}$	$\left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{L}\right) \geq \frac{2}{3}$	$\left(1 - \frac{2e}{B}\right) \geq \frac{3}{4}$
<b>ELS caractéristiques</b>	$\left(1 - \frac{2e}{B}\right) \geq \frac{1}{2}$	$\left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{L}\right) \geq \frac{1}{2}$	$\left(1 - \frac{2e}{B}\right) \geq \frac{9}{16}$

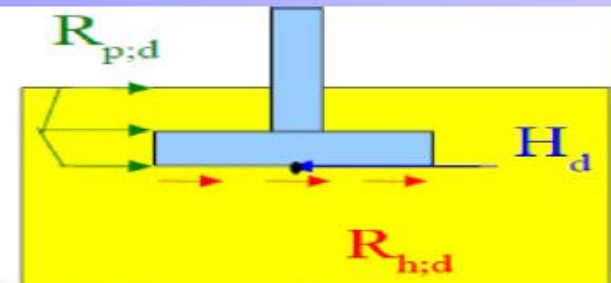


# JUSTIFICATIONS COURANTES DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

## Justification du glissement (ELU seulement)

Vérification :

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



$H_d$  : valeur de calcul de la charge horizontale

$R_{h;d}$  : valeur de calcul de la résistance au glissement de la fondation sur le terrain

$R_{p;d}$  : valeur de calcul de la résistance frontale ou latérale de la fondation à l'effet de  $H_d$

en conditions drainées :

$$R_{h;d} = \frac{V_d \tan \delta_{a;k}}{\gamma_{R;h} \gamma_{R;d;h}}$$

angle de frottement à l'interface entre la base de la fondation et le terrain

en conditions non drainées :

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

Coefficient partiel pour le glissement :  $\gamma_{R;h} = 1,1$  en fond (1,0 en acc)

Coefficient de méthode :  $\gamma_{R;d;h} = 1,1$

Remarque : la résistance frontale ou tangentielle  $R_{p;d}$  est rarement prise en compte du fait de l'incertitude liée à la pérennité de l'épaisseur de terrain dans laquelle elle peut être mobilisée.

# Justification de la capacité portante

Vérification :

ELU fond

$$V_d - R_0 < R_{v;d}$$

ELS qp/carac

$$V_d - R_0 < R_{cr;d}$$

**$V_d$**  : valeur de calcul de la charge verticale (résultante des actions) à la base de la fondation

**$R_0$**  :  $R_0$  poids du sol compris entre le niveau fini **après** travaux et la base de la fondation, occupant la surface de la fondation en l'absence de celle-ci ( $R_0 = Aq_0$ )  
 $q_0$  = contrainte totale verticale après travaux

**$R_{v,d}$**  : valeur de calcul de la résistance nette du terrain sous la fondation

**$R_{cr,d}$**  : valeur de calcul de la résistance de fluage du terrain

# Justification de la capacité portante ELU

Calcul de  $R_{v,d}$  : valeur de calcul de la résistance ultime du terrain :

$$R_{v,d} = R_{v,k} / Y_{R,v} = A' q_{net} / ( Y_{R,v} \cdot Y_{R;d,v} )$$

$R_{v,k}$  : valeur caractéristique de la résistance ultime du terrain

$A'$  : surface effective de la semelle => prend en compte l'excentrement du chargement

$q_{net}$  : contrainte associée à la résistance nette

$Y_{R,v}$  : coefficient partiel pour la portance

ELU fond  $Y_{R,v} = 1,4$

Pour les situations accidentelles :  $Y_{R,v} = 1,2$

$Y_{R;d,v}$  : coefficient de méthode

méthode semi-empirique

$Y_{R;d,v} = 1,2$



# Justification de la capacité portante ELS

Calcul de  $R_{cr,d}$  : valeur de calcul de la résistance de fluage du terrain :

$$R_{cr,d} = R_{cr,k} / Y_{R,v} = A' q_{net} / (Y_{R,v} \cdot Y_{R;d,v})$$

$R_{cr,k}$  : valeur caractéristique de la résistance de fluage du terrain

$A'$  : surface effective de la semelle => prend en compte l'excentrement du chargement

$q_{net}$  : contrainte associée à la résistance nette

$Y_{R,v}$  : coefficient partiel pour la portance

ELS qp/carac  $Y_{R,v} = 2,3$

$Y_{R;d,v}$  : coefficient de méthode

méthode semi-empirique

$Y_{R;d,v} = 1,2$

# Justification de la capacité portante

Calcul de la surface effective :

$A'$  = surface effective de la semelle ( surface réduite)

$$A' = B L i_e$$

$B L$  : Base \* Largeur de la semelle

$i_e$  : Coefficient de réduction lié à l'excentrement du chargement (annexe Q)

semelle filante :

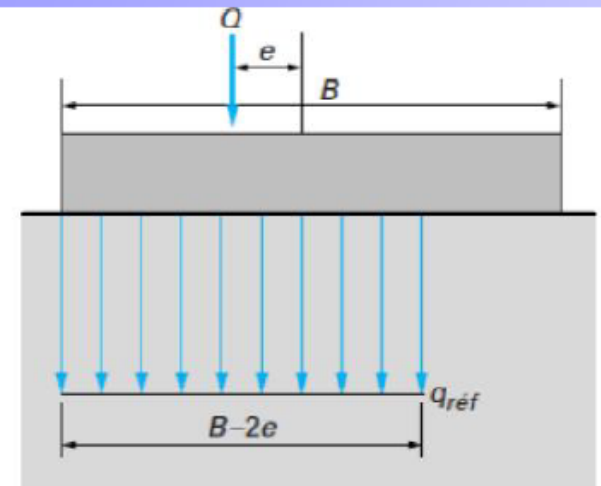
$$i_e = 1 - \frac{2e}{B}$$

semelle rectangulaire :

$$i_e = \left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{B}\right)$$

semelle circulaire :

$$i_e = 2 \frac{\arccos\left(\frac{e}{R}\right)}{\pi} - \frac{2e}{\pi R} \sqrt{1 - \left(\frac{e}{R}\right)^2}$$



Modèle de Meyerhof

# Justification de la capacité portante

Calcul de la contrainte de rupture (méthode pressiométrique) :

$$q_{\text{net}} = P_{\text{le}}^* K_p I_\beta I_\delta$$

$P_{\text{le}}^*$  : Pression limite nette équivalente (Annexe D.2.2)

$K_p$  : Facteur de pointe (Annexe D.2.3)

$I_\beta I_\delta$  : Coefficients minorateurs liés respectivement au talus et au chargement (Annexe D.2.4 / D.2.5)

$$R_{v,d} = A' q_{\text{net}} / ( Y_{R,v} \cdot Y_{R;d,v} )$$

# Justification de la capacité portante

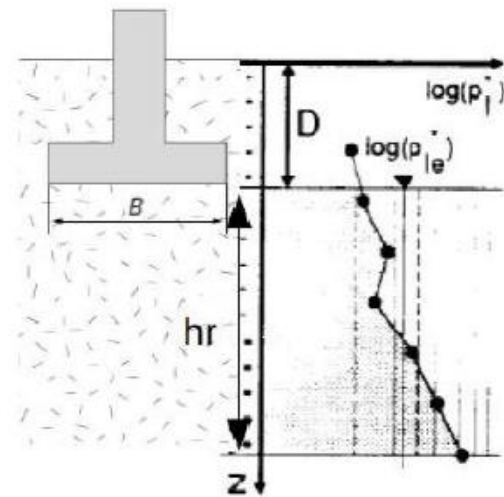
Calcul de  $k_p$  : Définition préalable de la pression limite équivalente  $p_{le}^*$

Calcul de  $p_{le}^*$  (Annexe D.2.2)

$$p_{le}^* = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n p_{i;k}^*}$$

$B$  largeur de la fondation superficielle

$p_{i;k}^*$  valeur caractéristique du  $i$ ème point de mesure du profil des pressions limites nettes mesurées



# Justification de la capacité portante

## Calcul de $h_r$

Calcul de $h_r$		ELU	ELS Quasi-permanent ELS Caractéristique
Semelle filante de largeur $B$	Si $\left(1 - \frac{2e}{B}\right) \geq \frac{1}{2}$	$h_r = 1,5B$	$h_r = 1,5B$
	Si $\left(1 - \frac{2e}{B}\right) < \frac{1}{2}$	$h_r = 3B - 6e$	
Semelle circulaire de diamètre $B$	Si $\left(1 - \frac{2e}{B}\right) \geq \frac{9}{16}$	$h_r = 1,5B$	
	Si $\left(1 - \frac{2e}{B}\right) < \frac{9}{16}$	$h_r = \frac{8B}{3} - \frac{16e}{3}$	
Semelle rectangulaire de largeur $B$ et de longueur $L$	Si $\left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{L}\right) \geq \frac{1}{2}$	$h_r = 1,5B$	
	Si $\left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{L}\right) < \frac{1}{2}$	$h_r = \min(3B - 6e_B, 3L - 6e_L, 1,5B)$	



# Justification de la capacité portante

Calcul de  $k_p$  : Définition préalable de la hauteur d'encastrement  $D_e$

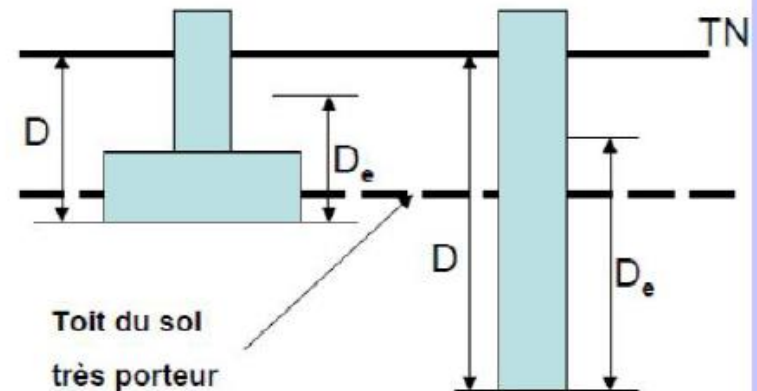
- au *pressiomètre*, on a :

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

avec  $p_l^* = p_l - p_o$

$p_l$  pression limite mesurée

$p_o$  contrainte totale horizontale au même niveau.



$d$  est en général pris égal à 0 sauf s'il existe des terrains de caractéristiques très médiocres en surface dont on désire faire abstraction.

$p_{le}^*$  désigne la pression limite équivalente

# Justification de la capacité portante

Calcul de  $k_p$  :

Cas d'une semelle carrée, filante, ou circulaire:

$$k_{p, \frac{B}{L}} = k_{p0} + \left( a + b \frac{D_e}{B} \right) \left( 1 - e^{-c \frac{D_e}{B}} \right)$$

Cas d'une semelle rectangulaire:

$$k_{p, \frac{B}{L}} = k_{p, \frac{B}{L}=0} \left( 1 - \frac{B}{L} \right) + k_{p, \frac{B}{L}=1} \frac{B}{L}$$

# Justification de la capacité portante

Calcul de  $k_p$  :

Catégorie de sol – Courbe de variation du facteur de portance		Expression de $k_p$			
		a	b	c	$k_{p0}$
Argiles et limons	Semelle filante – Q1	0,2	0,02	1,3	0,8
	Semelle carrée – Q2	0,3	0,02	1,5	0,8
Sables et graves	Semelle filante – Q3	0,3	0,05	2	1
	Semelle carrée – Q4	0,22	0,18	5	1
Craies	Semelle filante – Q5	0,28	0,22	2,8	0,8
	Semelle carrée – Q6	0,35	0,31	3	0,8
Marnes et marno-calcaires	Semelle filante – Q7	0,2	0,2	3	0,8
Roches altérées	Semelle carrée – Q8	0,2	0,3	3	0,8

## D.2.3 :

Les « Sols intermédiaires » définies dans la clause A.2 (4) seront rattachés soit à des sols pulvérulents soit à des sols cohérents de la manière suivante : — sols cohérents de type « Argiles et limons » regroupant également les argiles limoneuses, les limons argileux et les argiles sableuses (d'après la [Figure A.2.1](#)) ; — sols de type « Sables et graves » regroupant également les sables argileux les sables limoneux et les limons sableux (d'après la [Figure A.2.1](#)).

# Justification de la capacité portante

Rappel de la vérification :

Vérification :

ELU fond

$$V_d - R_0 < R_{v;d}$$

ELS qp/carac

$$V_d - R_0 < R_{cr;d}$$

# SOMMAIRE

**Généralités**

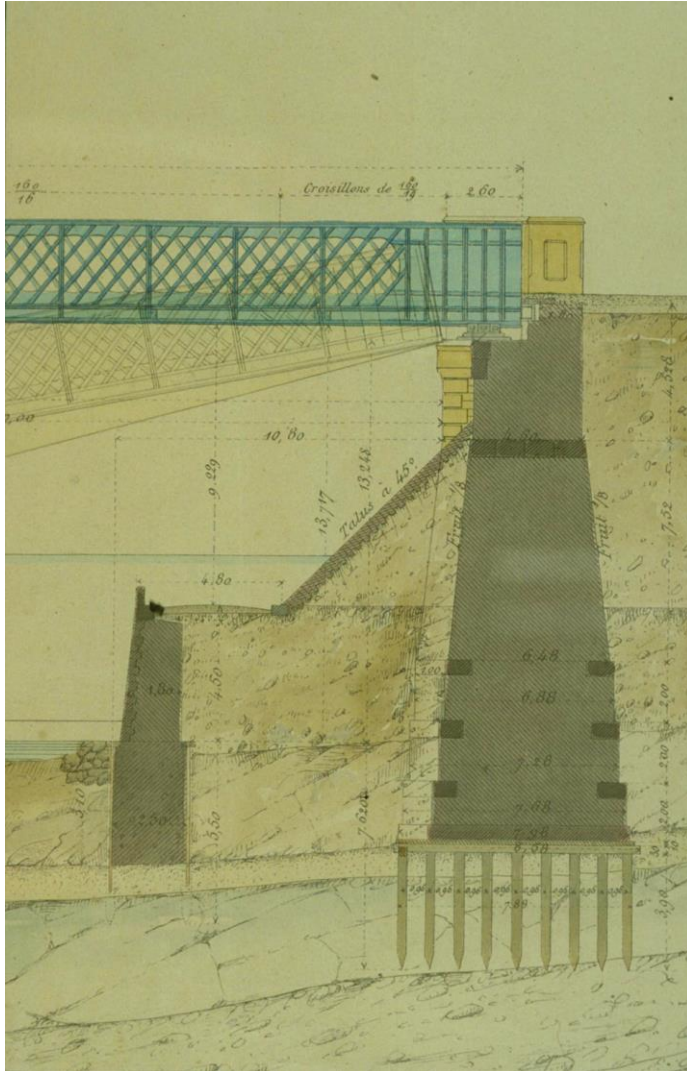
**Les fondations superficielles**

**Les fondations profondes**

**Les cas particuliers**



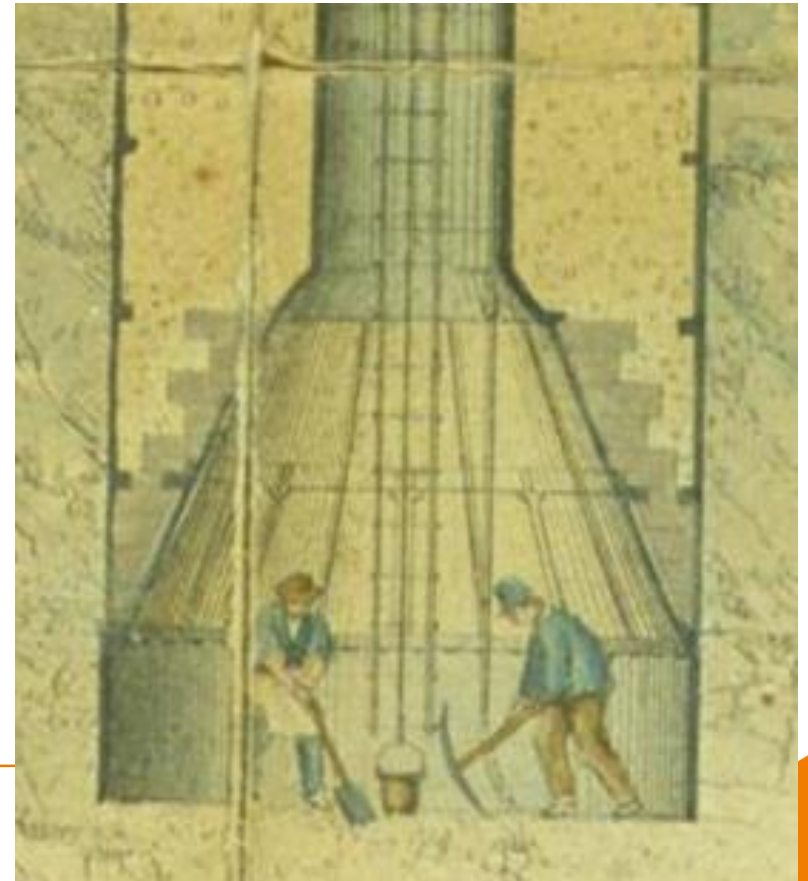
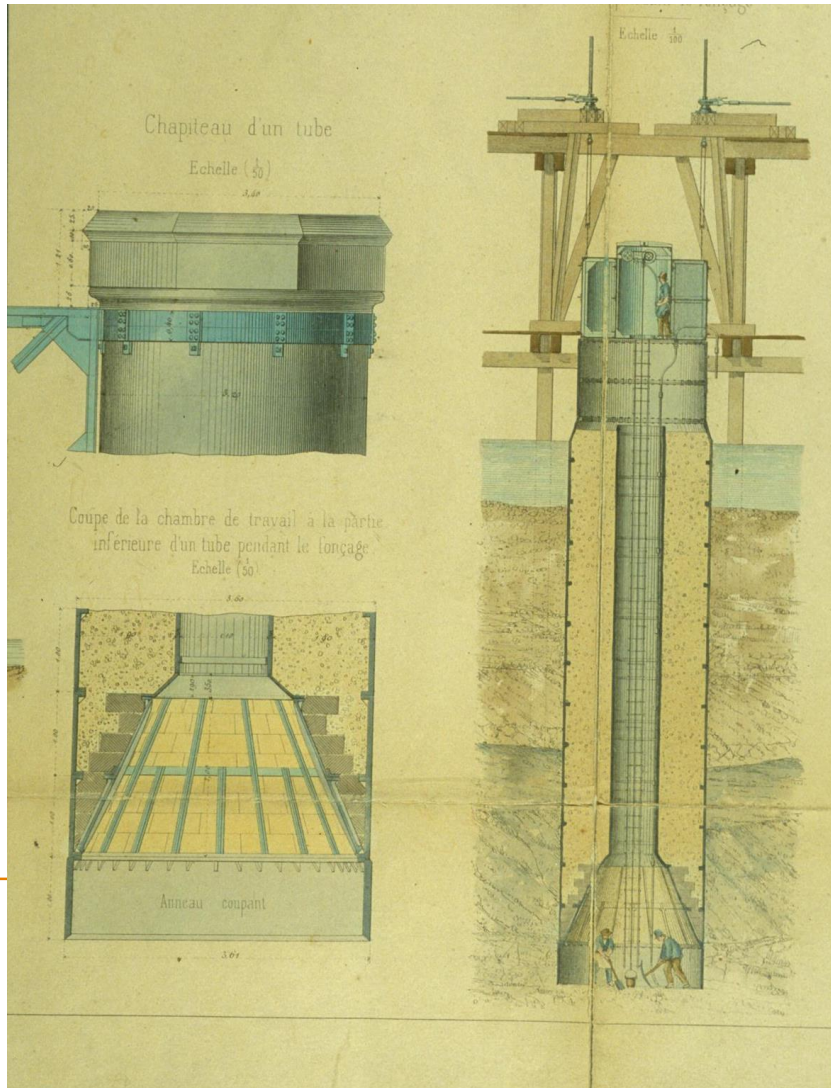
# Quelques repères historiques XIXème siècle



Pont  
d'Argenteuil  
1864



# Quelques repères historiques XIX<sup>ème</sup> siècle



Pont d'Argenteuil - 1864



# Techniques courantes de fondation profonde

- une vingtaine de techniques de base
- la palette est riche car les problèmes pratiques sont variés
- pas de technique à privilégier a priori, mais des critères de choix :

## ***faisabilité***

puissance des machines

contrainte de l'environnement du chantier

exigences écologique

expérience et pratique locale

## ***coût***

exécution

---

matériaux (acier, béton ...)





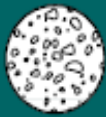
# Quelques sections courantes

## refoulants

Pieux Bois :



Pieux BA préfabriqués :

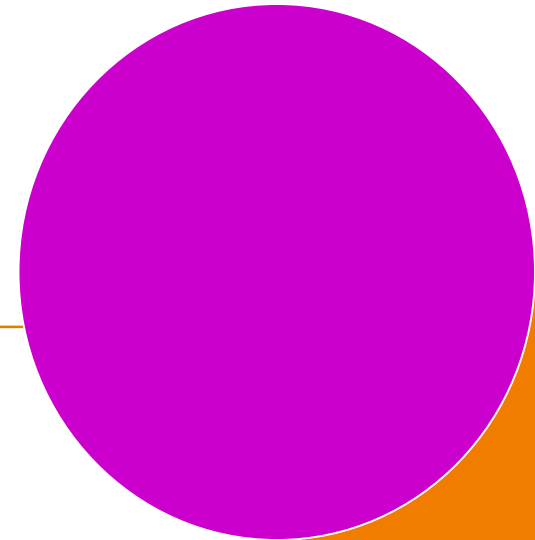
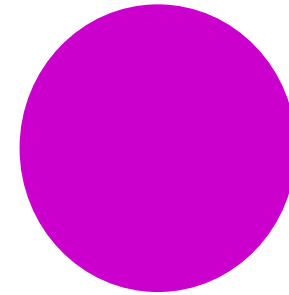


Pieux Acier :



## non refoulants

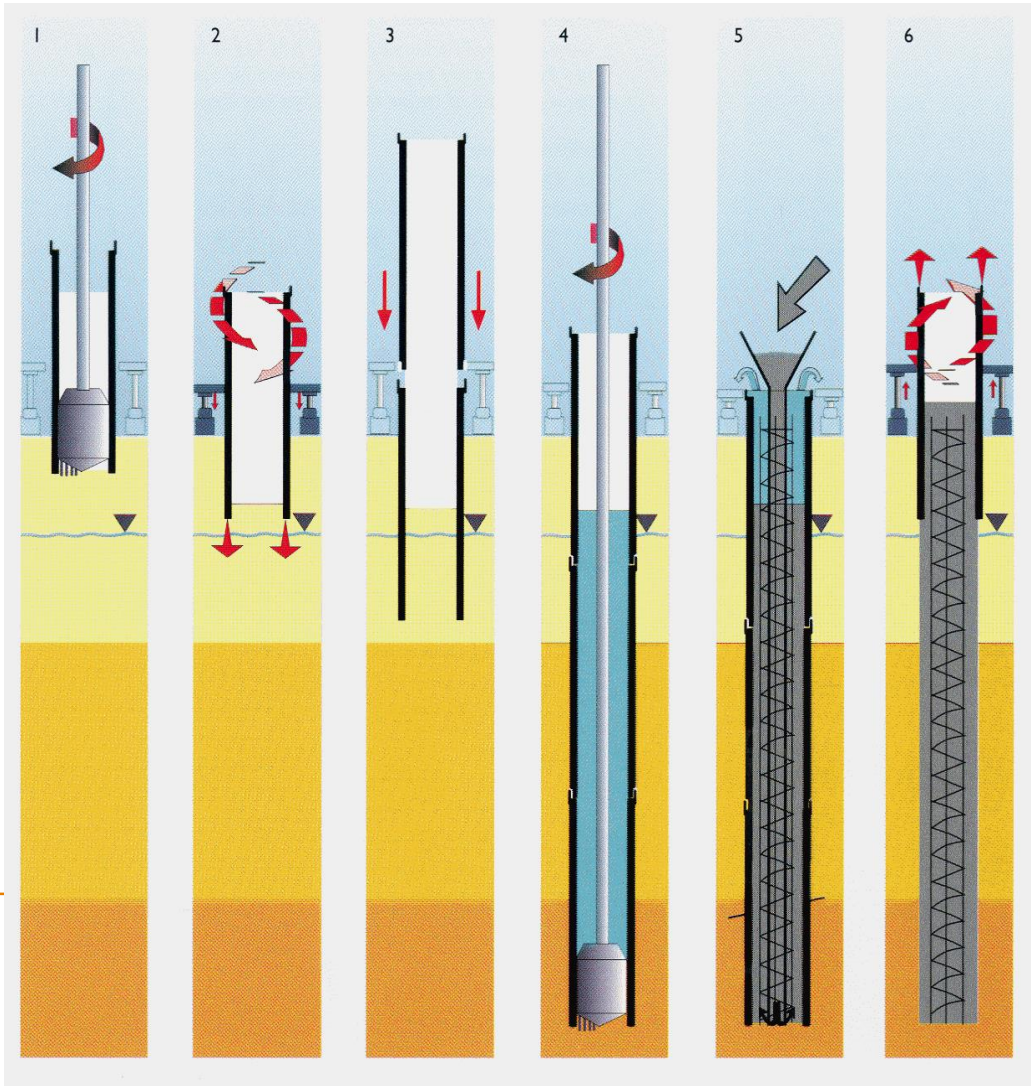
● Pieux forés



# Pieux forés (non refoulants)

# Pieux forés de gros diamètre

## Le principe



### Maintenir le forage

- avec ou sans tubage
- à sec
- sous eau
- sous bentonite
- sous polymère

D'autant plus **difficile**  
que le diamètre est  
important !



# Pieux forés de gros diamètre

## Le tubage                      Le louvoyeur



# Pieux forés de gros diamètre

## La boue



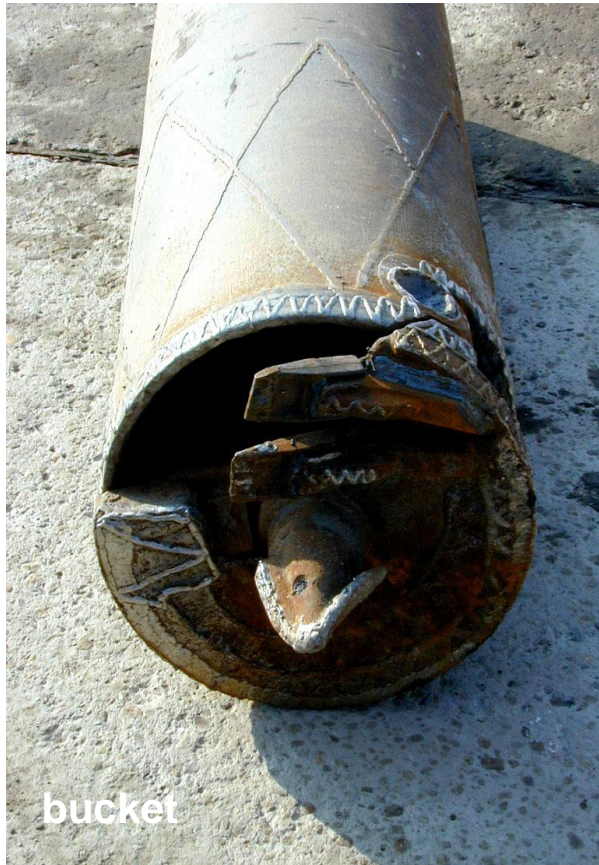
- Préparation
- Stockage
- Traitement de la boue usée
- Contrôle ...





# Pieux forés de gros diamètre

## Les outils



bucket



tarière



trépan

adapter les outils au passage des différents horizons ...



# Pieux forés de gros diamètre

## Les outils



**Trépan et benne**



**Les barrettes**

# Pieux forés de gros diamètre

## Conclusions

### **Avantages :**

- adaptabilité aux conditions de terrain (sols durs / sols mous)
- diamètre de 20 cm à plus de 2 m : optimisation du béton
- possibilité d'atteindre de grandes profondeurs (>100 m)

### **Difficultés**

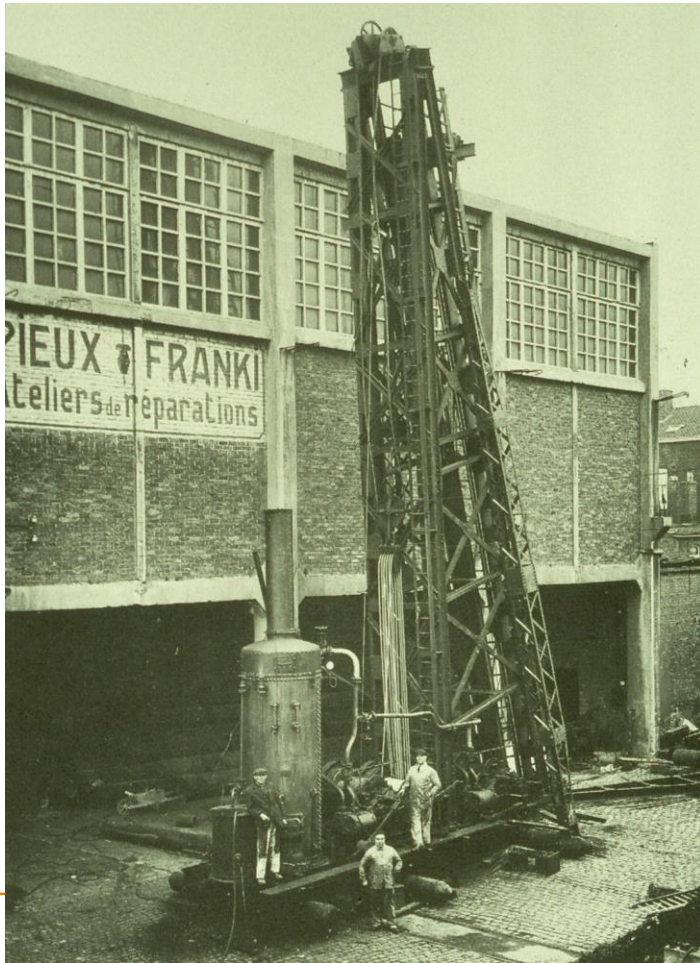
- matériel et personnel très spécialisés
- qualité et contrôle de la boue
- sur-volumes
- remaniement / desserrage du sol (pulvérulent, sensible à l'eau ...)
- évacuation et mise en décharge des déblais
- très sensible aux erreurs d'exécution  
(contrôle de la qualité impératif : essais d'intégrité, essais de portance ...)



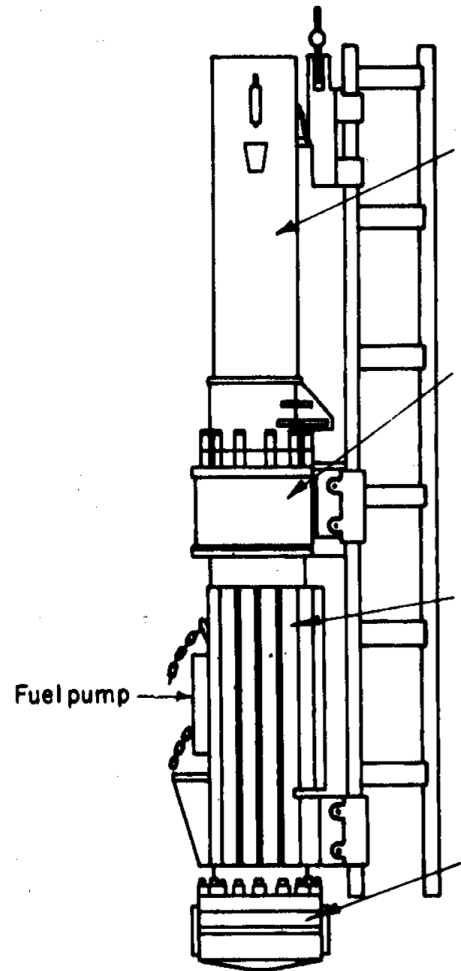
# Pieux refoulants (battus, vibrofoncés, vissés ...)

# Pieux battus

## Machine à vapeur & Marteau Diesel



1930 - machine Franki



pieu H

# Pieux battus Marteau Hydraulique

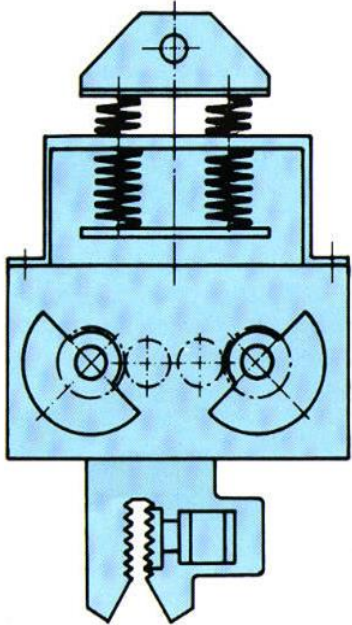


Possibilité de  
contrôler  
précisément  
l'énergie



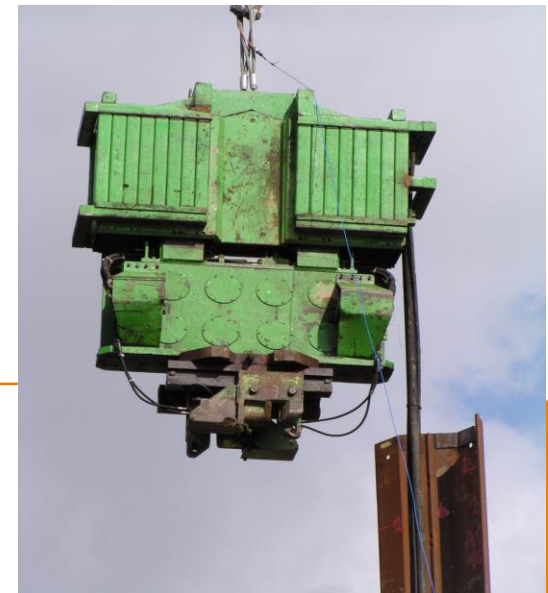


# Pieux vibrofoncés

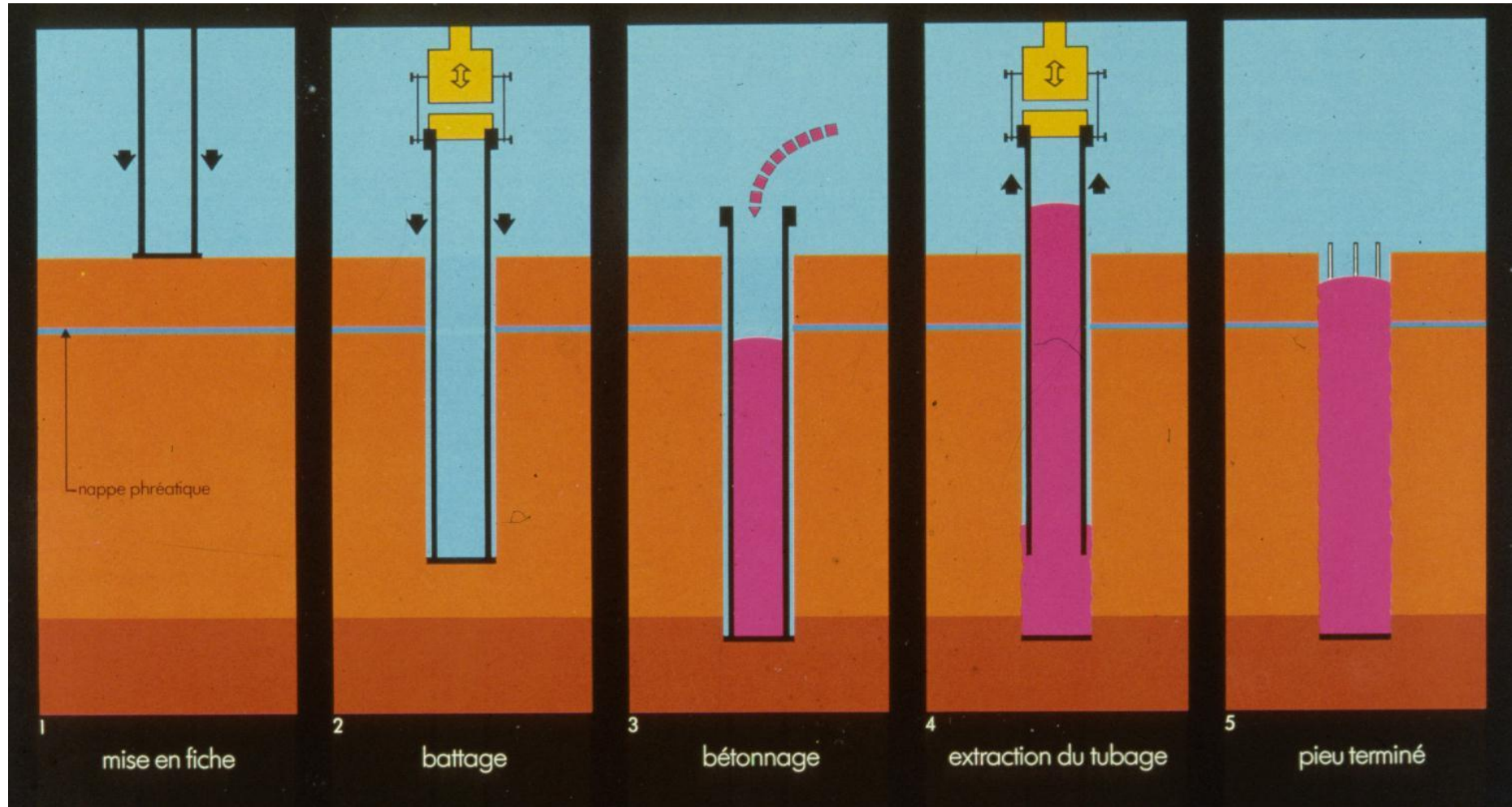


## Évolutions technologiques récentes :

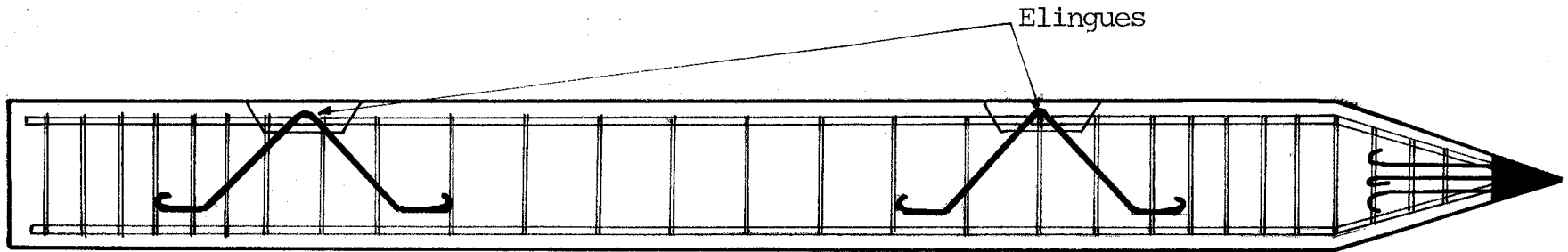
- Basse fréquence (20 – 30 Hz)
- Haute fréquence (35 – 40 Hz)
- Fréquence variable
- Moment d'excentricité variable



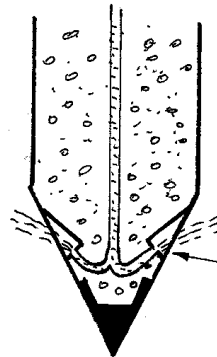
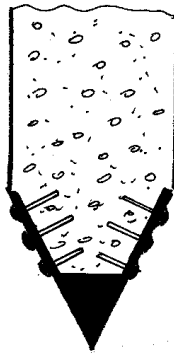
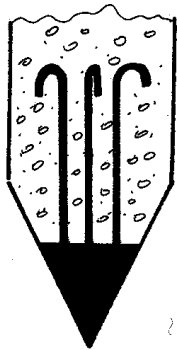
# Pieu battu ou vibrofoncé moulé



# PIEUX EN BETON ARME

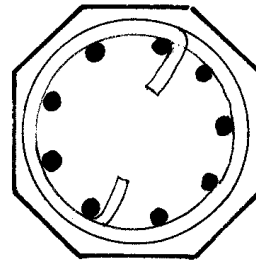
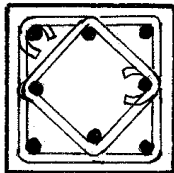
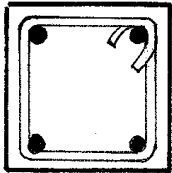


Coupe schématique d'un pieu en béton armé



Dispositif pour lançage

Exemples de sabots métalliques



Exemples de ferrailage en section courante



# Pieux battus / vibrofoncés

## Conclusions

### Avantages

- relativement « simple » et rapide à réaliser
- bonne pénétrabilité des H
- efficacité du battage fond de trou

### Spécificités techniques

- nécessité d'une énergie importante et contrôlée (site urbain)
  - majoritaire en Europe ... 20 % en France !
  - domaine privilégié : maritime et portuaire, soutènement
  - techniques d'appoint : lançage, injection, pieux coniques ...
-

# Pieux battus / vibrofoncés

## Conclusions

### Difficultés

- certains sols sensibles : cimentés, craie sous nappe
  - relativité de la notion de refus
  - vulnérabilité aux obstacles enterrés
  - bruits et vibrations
  - contraintes excessives dans le pieu lors du battage
  - adaptation de la longueur de fiche : recépage, soudure ...
  - cicatrisation
-

# Phases d'exécution des pieux forés



## **Confection et mise en place du ferrailage**

---







# Bétonnage au tube plongeur





# Recépage des pieux





# Réalisation de la semelle de répartition

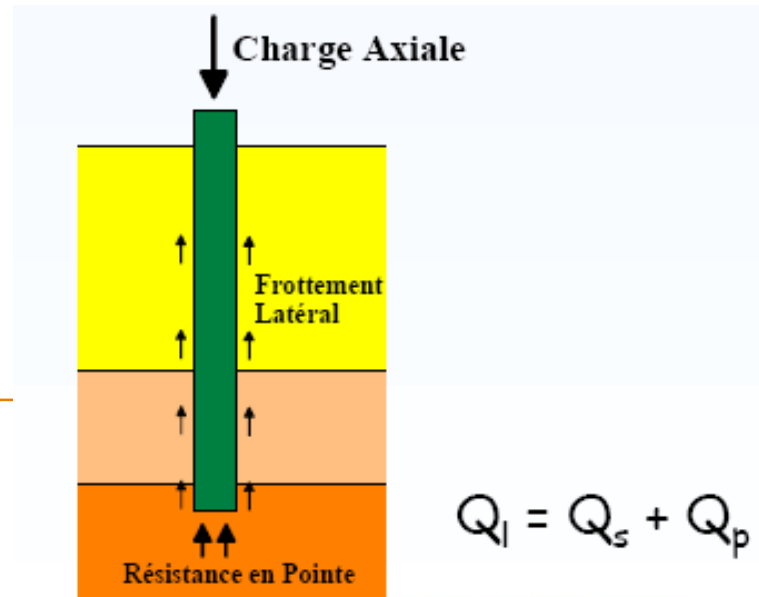




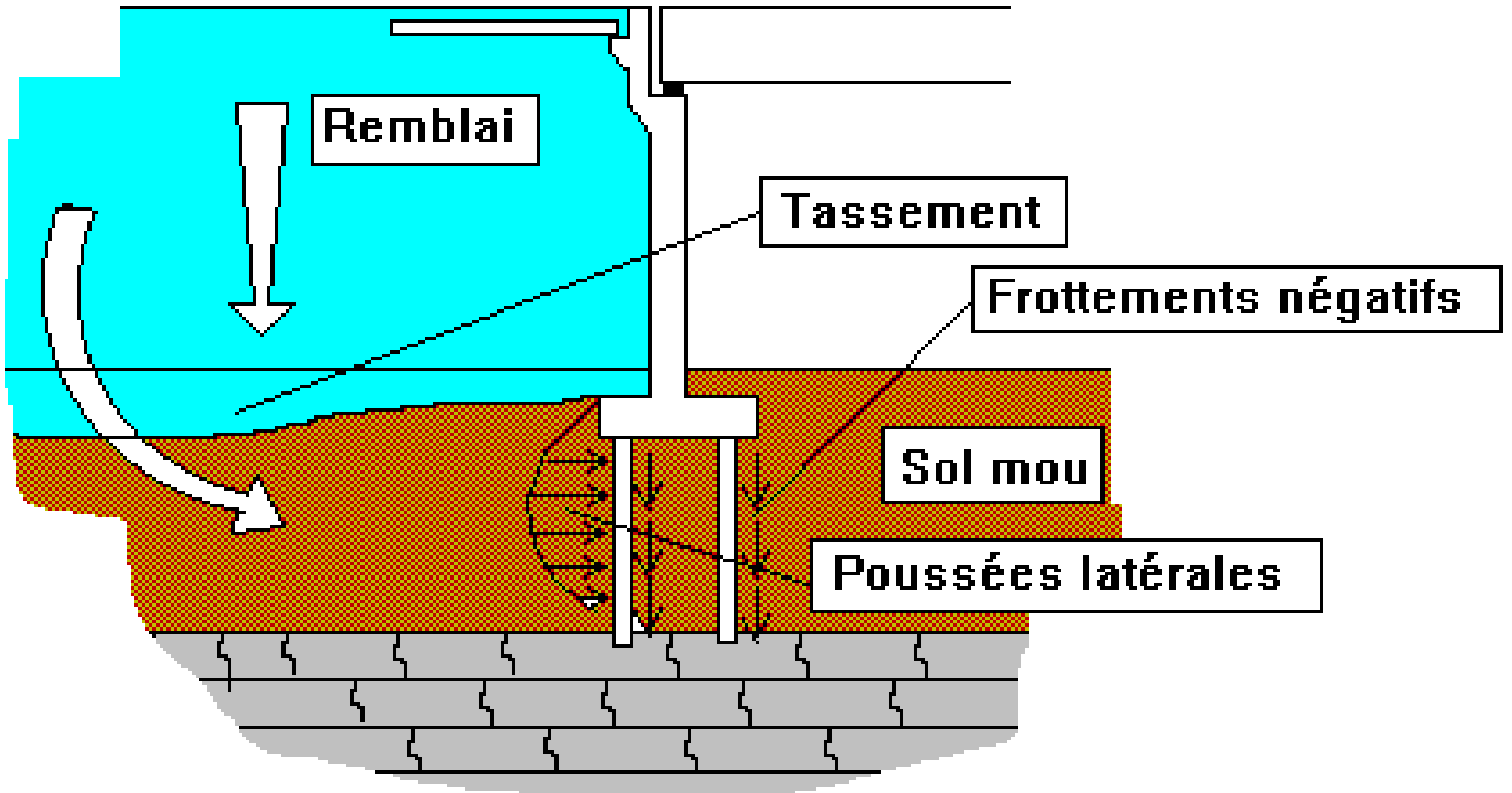


# ÉTUDES EXPÉRIMENTALES / COMPORTEMENT

- Nombreux essais de pieux menés par le LCPC (et les LPC)
- Essais sous charge axiale permettant de mesurer individuellement le frottement latéral et la charge en pointe
- Ces essais sont à l'origine des règlements

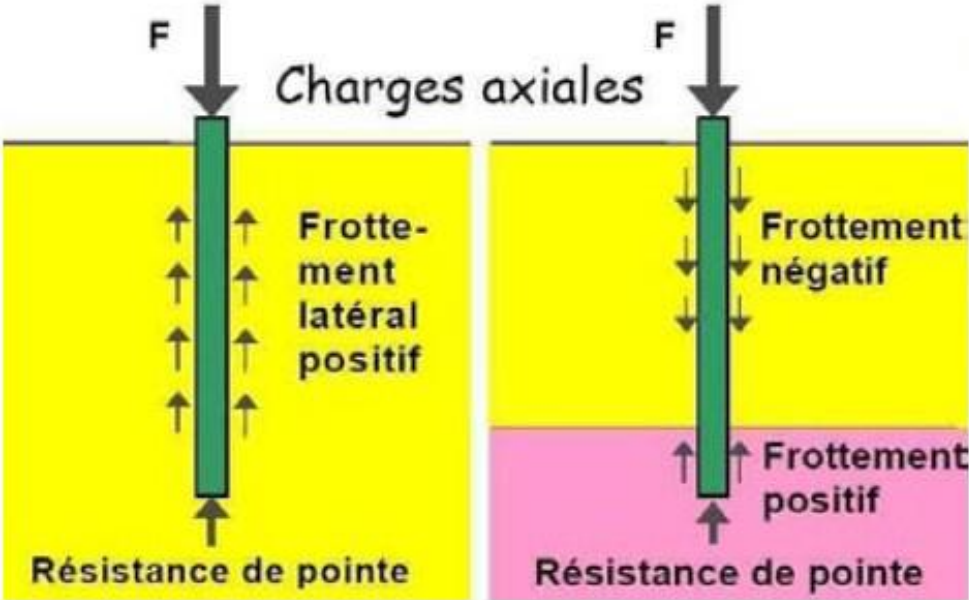


# EFFORTS PARASITES SUR LES PIEUX

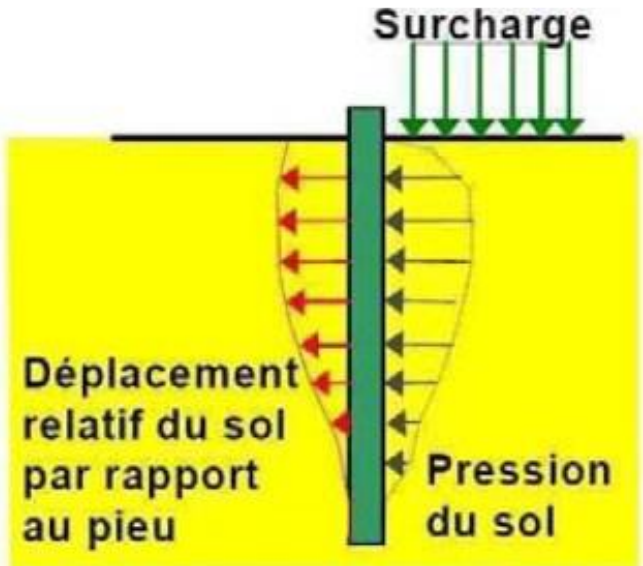
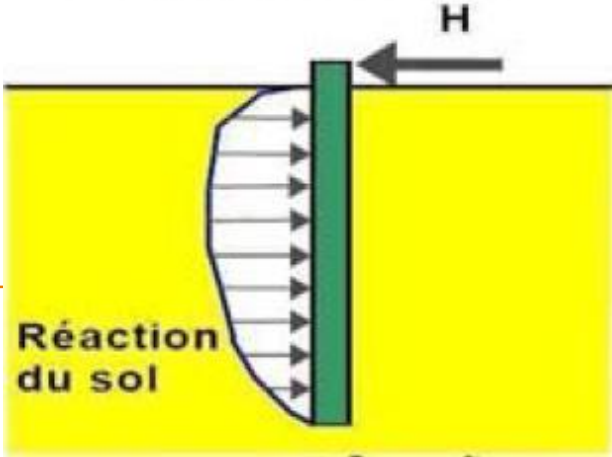




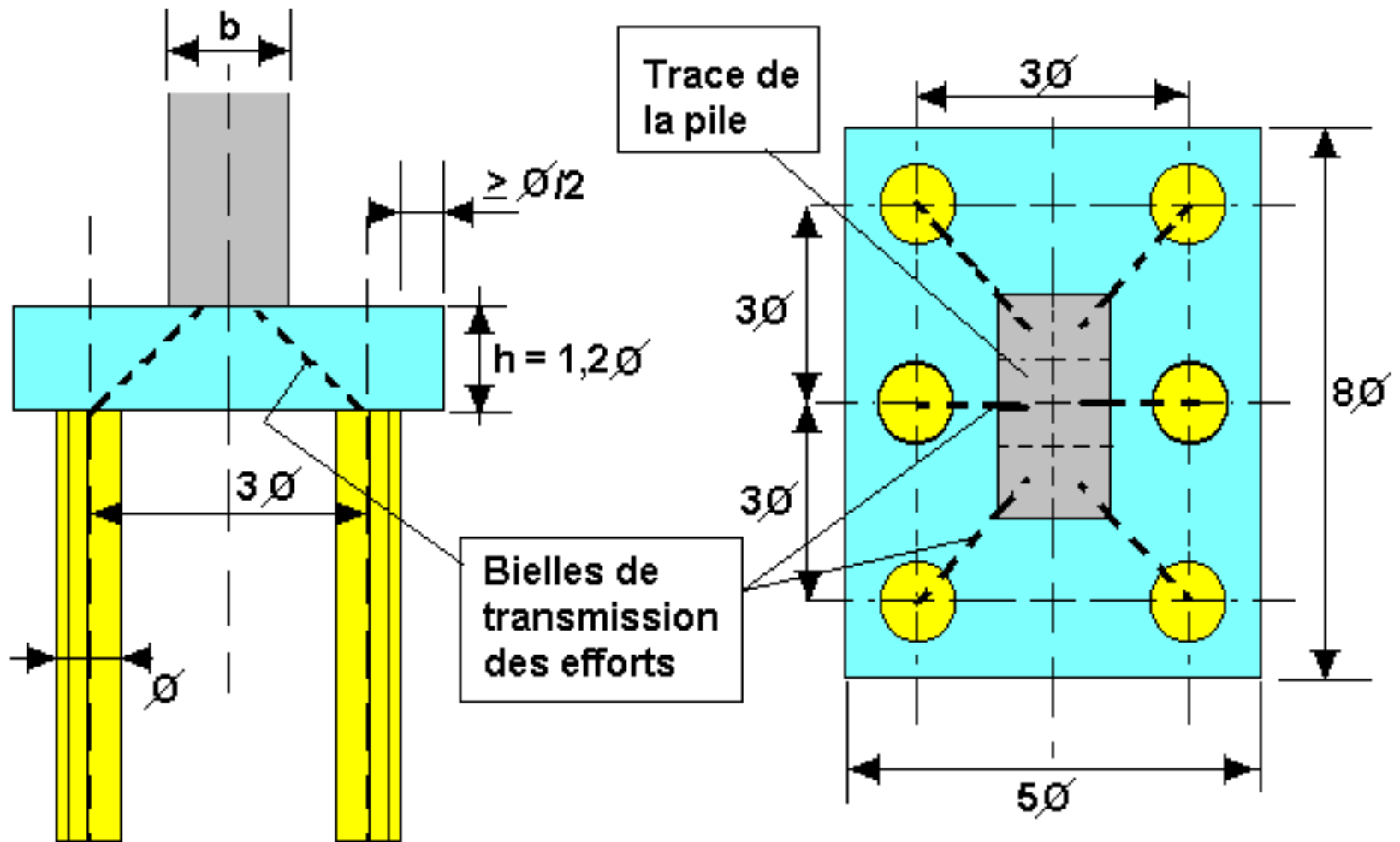
# EFFORTS PARASITES SUR LES PIEUX



## Charges latérales



# PRINCIPES DE CONCEPTION D'UNE FONDATION SUR PIEUX



# JUSTIFICATIONS COURANTES DES FONDATIONS SUR PIEUX

## Hypothèses :

- les pieux ne mobilisent aucune réaction tangentielle,
- la fondation n'est soumise à aucun effort parasite (frottement négatif, poussées latérales),
- absence d'un effet de groupe des pieux.

## Modélisation des fondations

### *Efforts axiaux*

Pour calculer la répartition des efforts axiaux entre les pieux d'une fondation, la présence du sol est ignorée. Ils sont considérés comme des poutres obéissant à la loi de Hooke :

$$\Delta L = \frac{NL}{ES}$$

## Justification de la portance : cf exemple

---

## Comportement transversal :

Pieu soumis à un effort horizontal  $T_0$ , un moment  $M_0$  :

stabilité assurée par mobilisation des efforts de réaction latérale du sol sur le pieu,

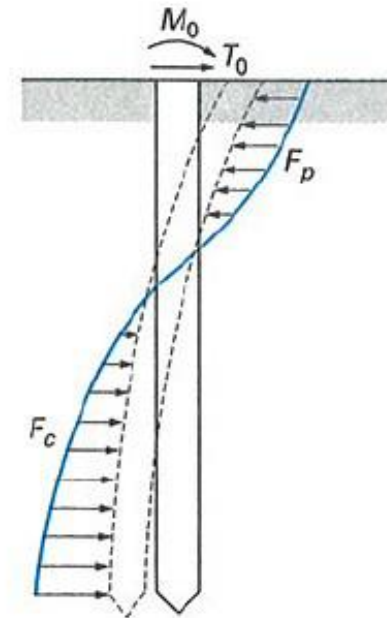
cette réaction est fonction du déplacement

$$P = E_s y \text{ et } P = -\frac{dT}{dz} = -\frac{d^2M}{dz^2} = -\frac{E_p I_p d^4 y}{dz^4}$$

$P$  = force répartie sur le pieu (kN/m)

$E_s$  = Module de réaction (kPa)

$y$  = déplacement (m)



$F_c$  contre-butée

$F_p$  butée

## Efforts transversaux

Tant qu'ils sollicitent le sol dans le domaine élastique, les pieux sont assimilés à des poutres sur appuis élastiques infiniment rapprochés obéissant à l'équation différentielle suivante :

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = 0$$

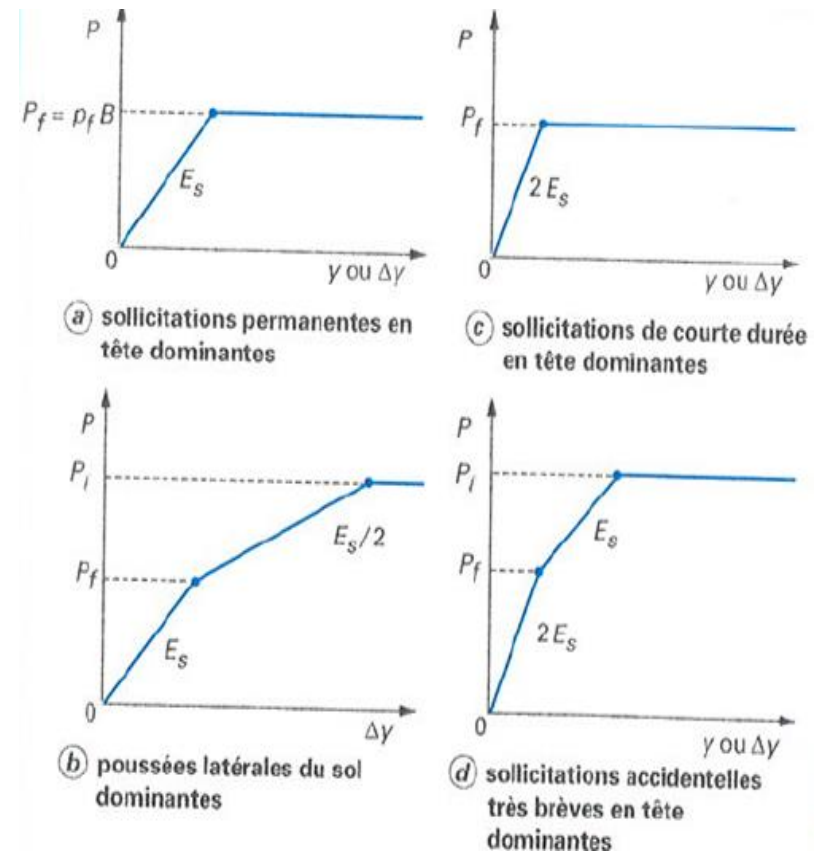
\* **Vis-à-vis des efforts instantanés :**

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{9E_M} \frac{B_0}{B} \left[ 2,65 \frac{B}{B_0} \right]^\alpha + \frac{\alpha}{12E_M} s l B \geq B_0 = 60cm$$

B : diamètre /  $\alpha$  : coefficient caractérisant le sol /  $k = E_s/B$

\* **Vis-à-vis des efforts soutenus :**

La valeur du coefficient  $k$  est obtenue en divisant par 2 la précédente.





## **Les liaisons**

**La semelle est généralement supposée infiniment rigide.**

**Les pieux sont supposés :**

- encastrés dans la semelle lorsqu'ils sont en béton armé exécutés en place ou métalliques avec remplissage en béton armé sur deux mètres au moins à leur partie supérieure,**
- Articulés sur la semelle lorsqu'il s'agit de pieux préfabriqués en béton armé ou de pieux métalliques à section en H.**

**En pied, le choix du mode de liaison (libre, articulé, encastré, élastique) dépend du type de pieu et de la formation géotechnique dans laquelle ils prennent appui.**

---

# SOMMAIRE

**Généralités**

**Les fondations superficielles**

**Les fondations profondes**

**Les cas particuliers**



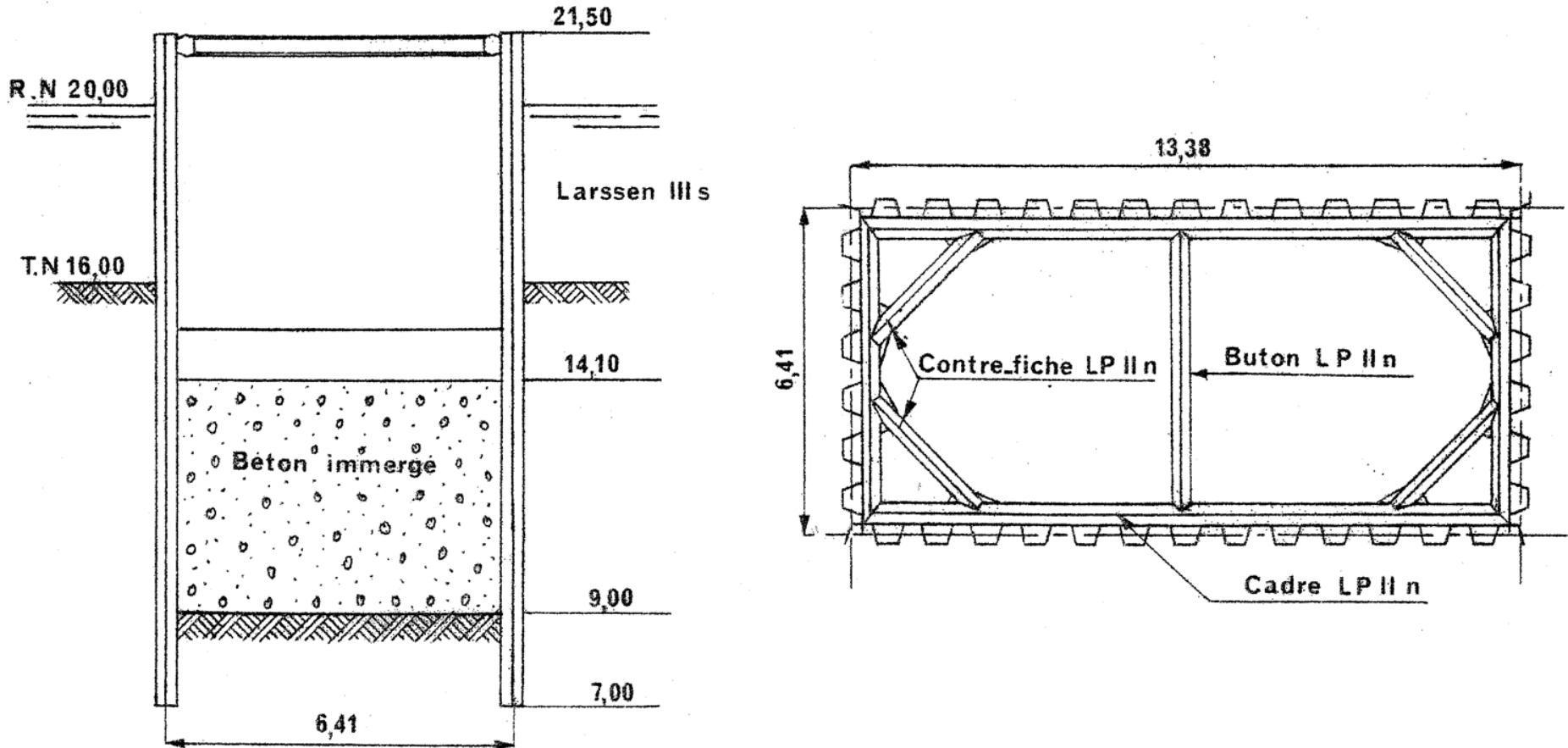
# Fondation en site aquatique Batardeau

Pont sur le Scorff





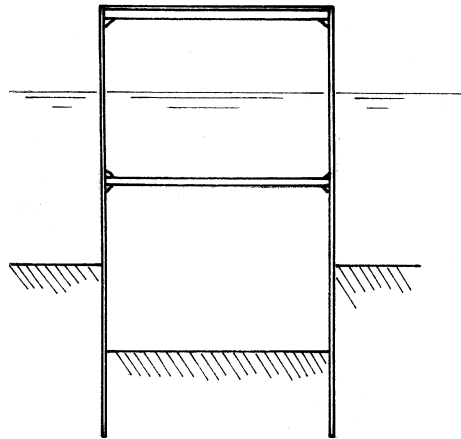
# FONDATIONS SUPERFICIELLES EN SITE AQUATIQUE - BATARDEAUX



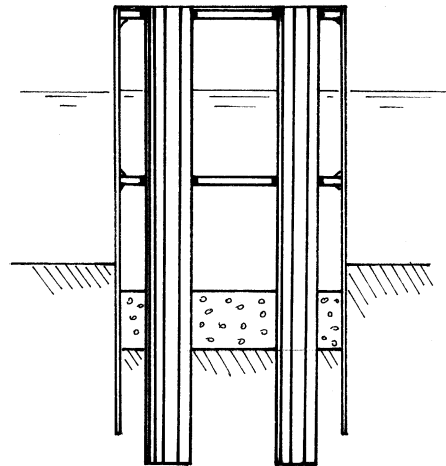
**Exemple de batardeau rectangulaire**



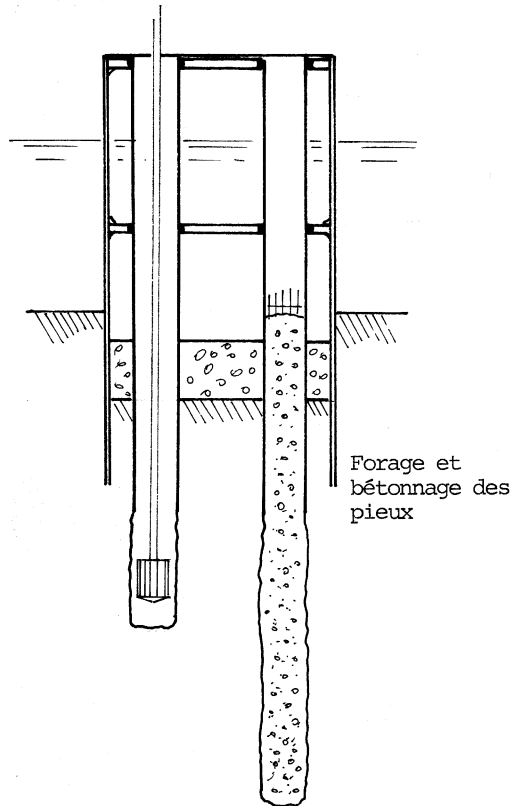
# Principes d'exécution d'une fondation sur pieux en site aquatique



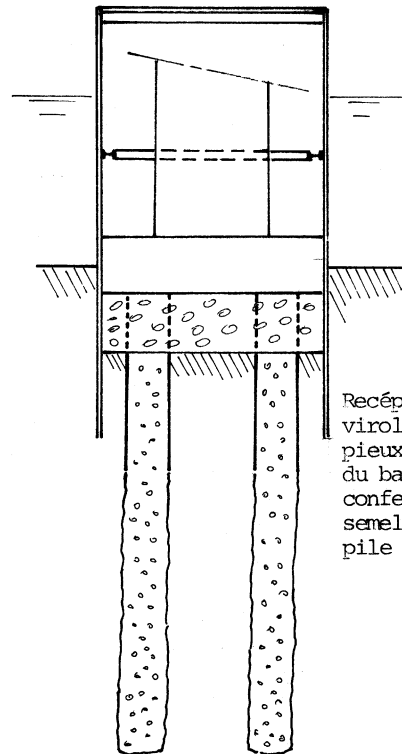
Exécution du batardeau  
et terrassements



Mise en fiche des viroles et exécution  
du gros béton (pour les maintenir en pied)



Forage et  
bétonnage des  
pieux



Recépage des  
viroles et des  
pieux-Epuisement  
du batardeau et  
confection de la  
semelle et de la  
pile

# Pont d'Amboise sur la Loire





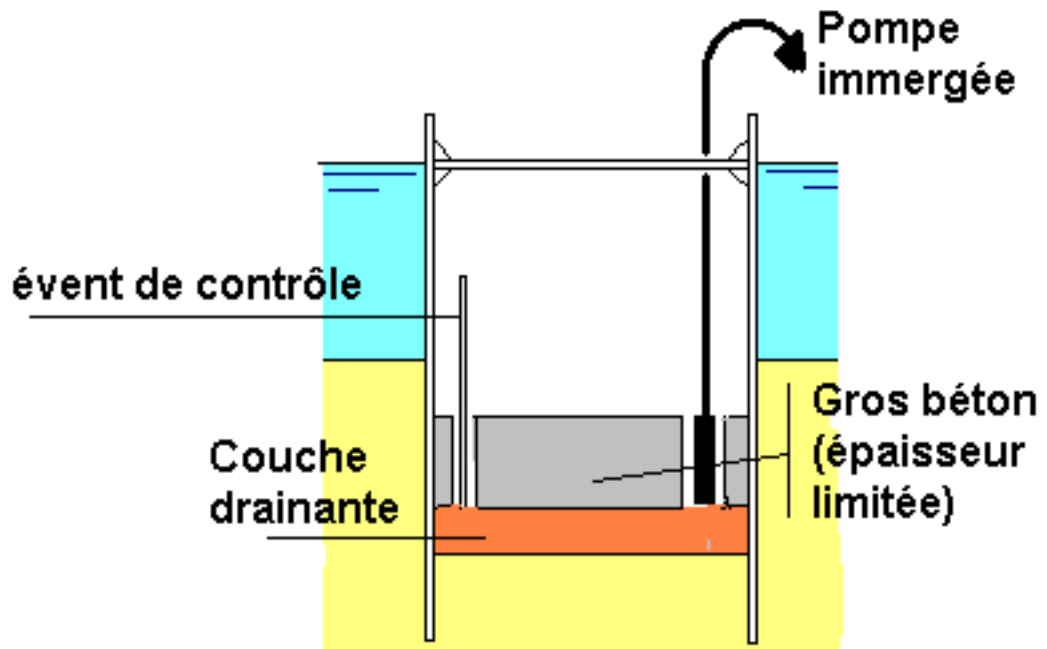
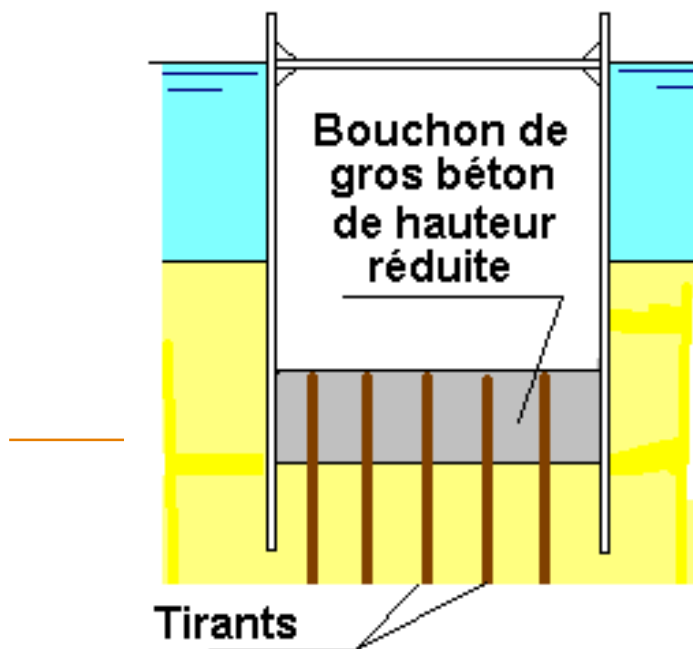
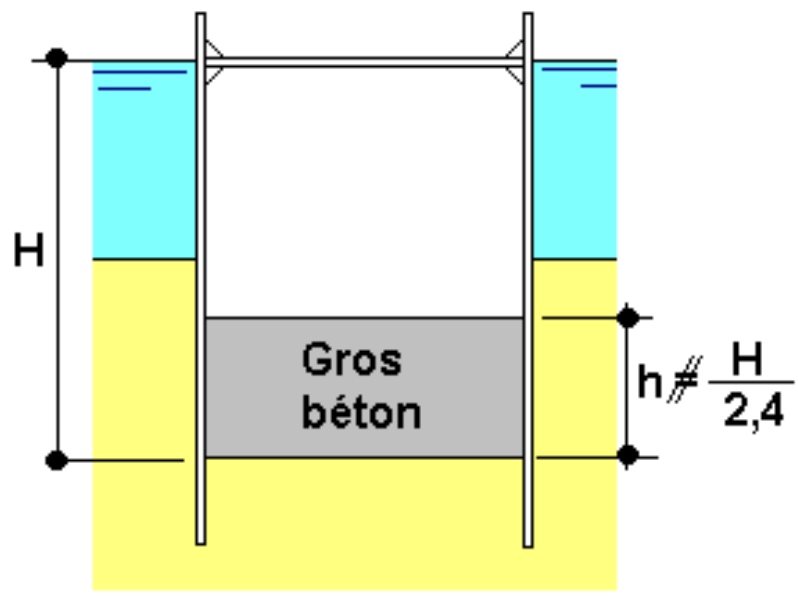
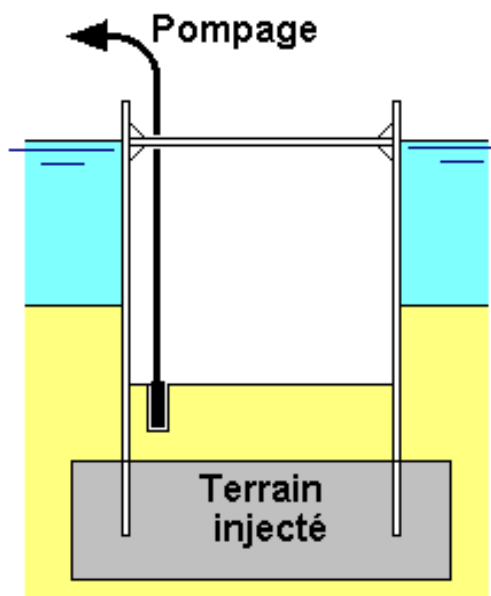
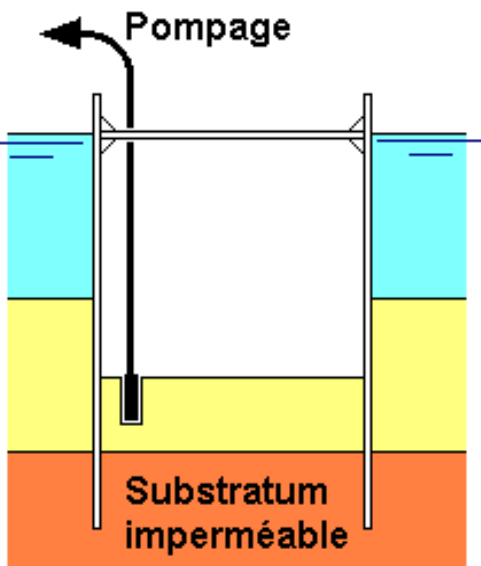






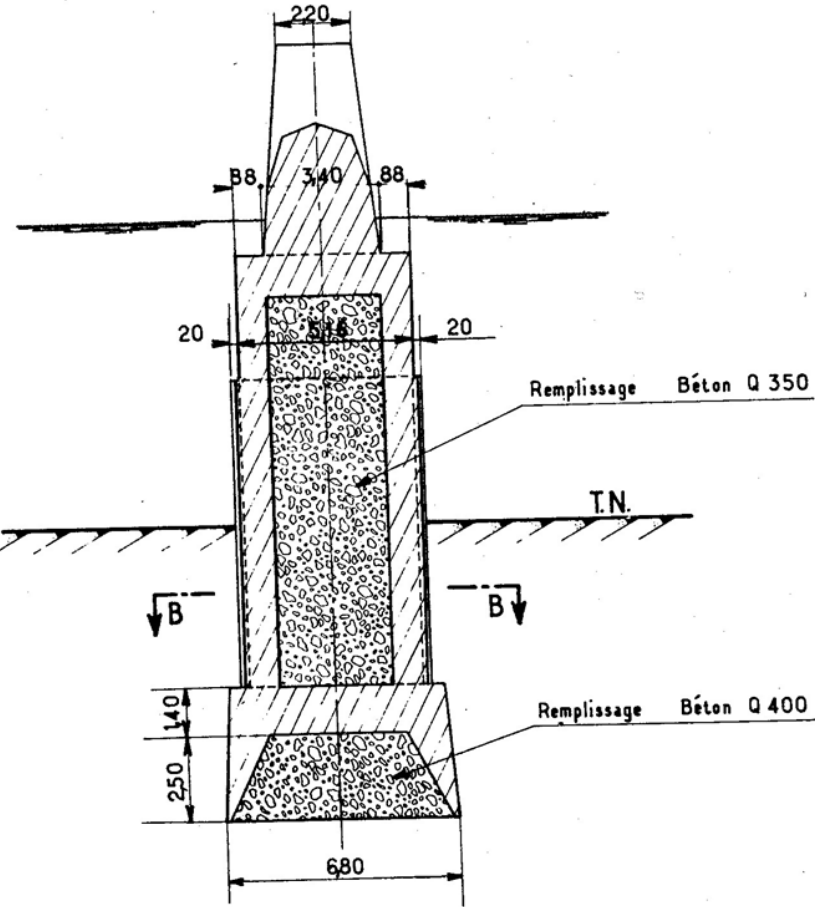


# METHODES D'ASSECHEMENT DES BATARDEAUX

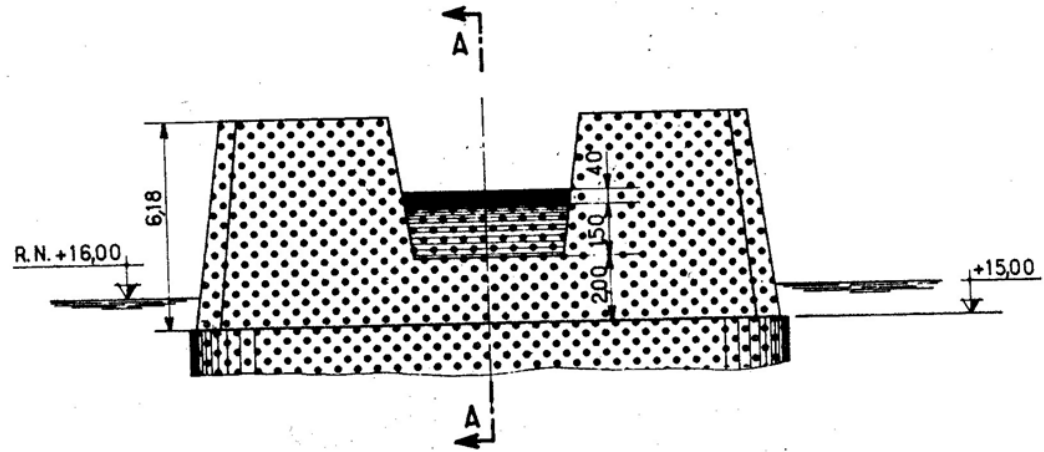


# CAISSONS HAVES

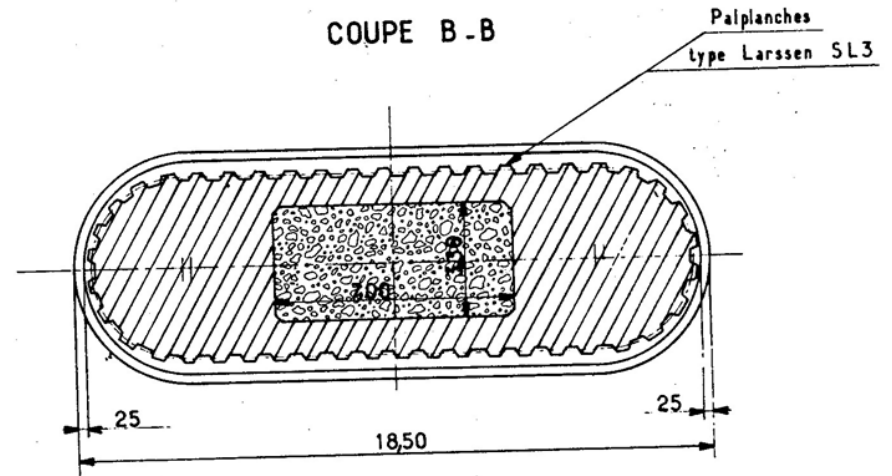
COUPE A-A



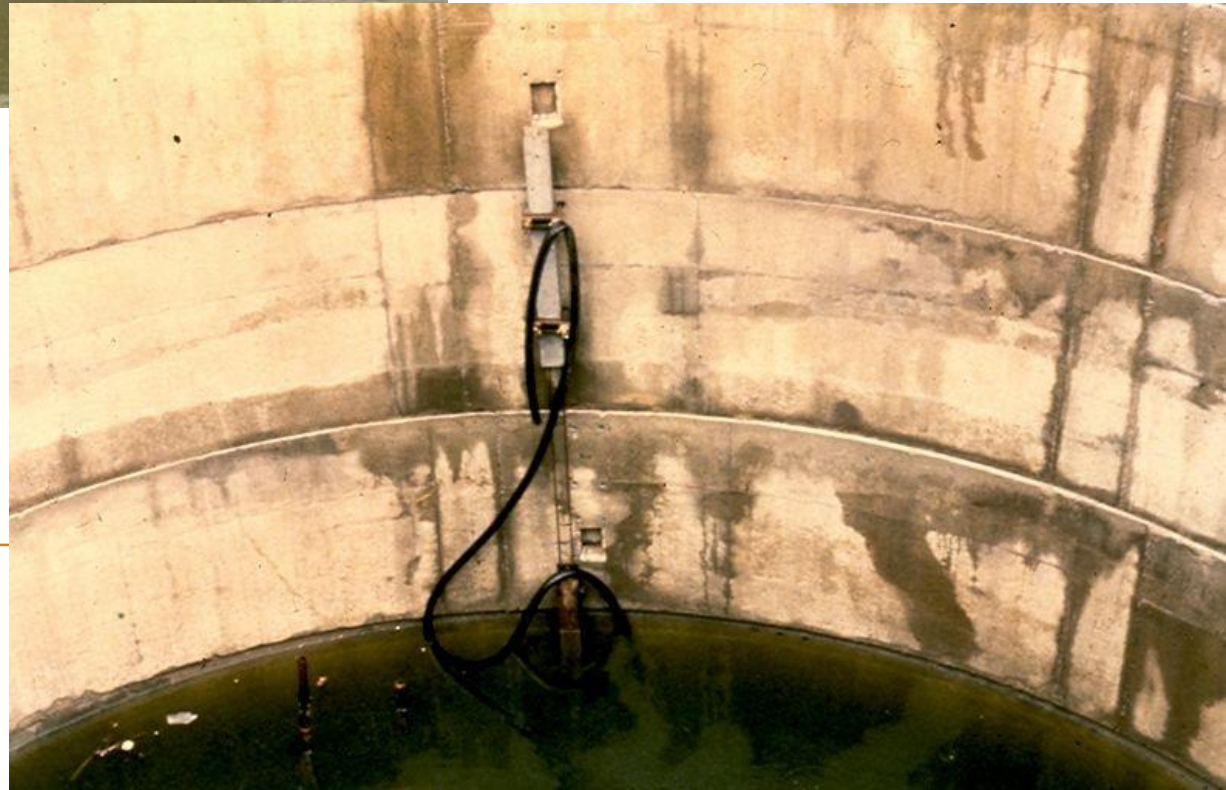
ELEVATION



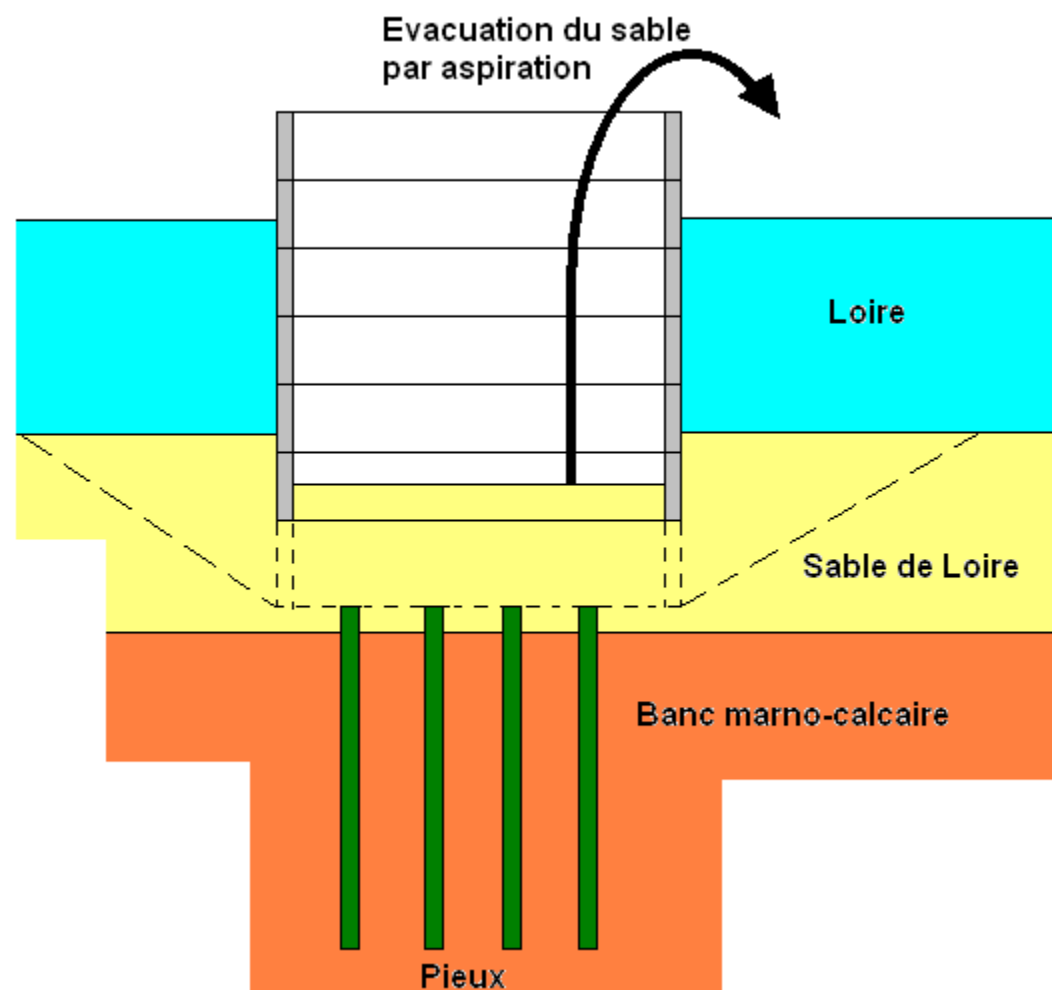
COUPE B-B











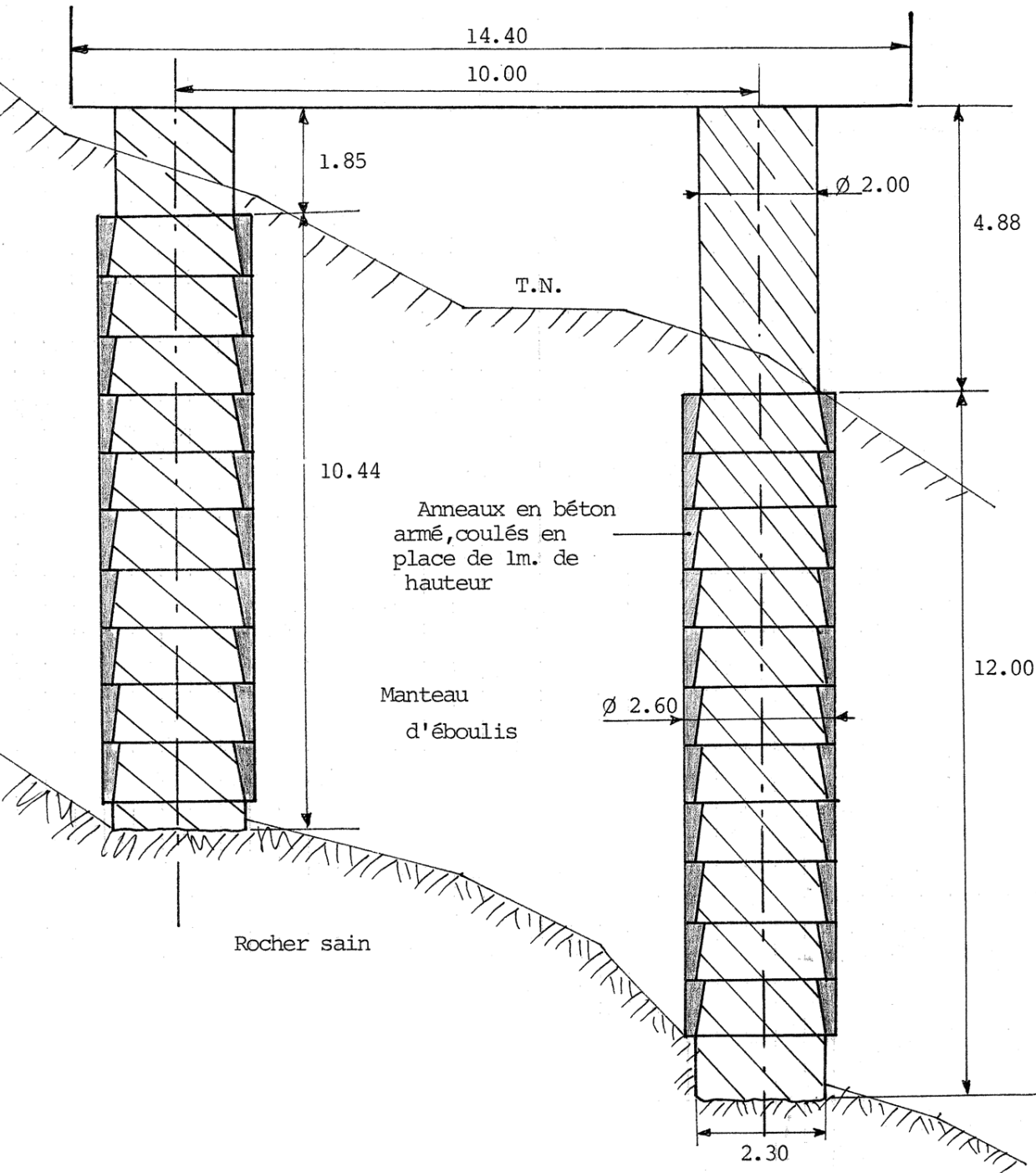
# Fondation en site montagneux

## Puits

Viaduc de la Colagne



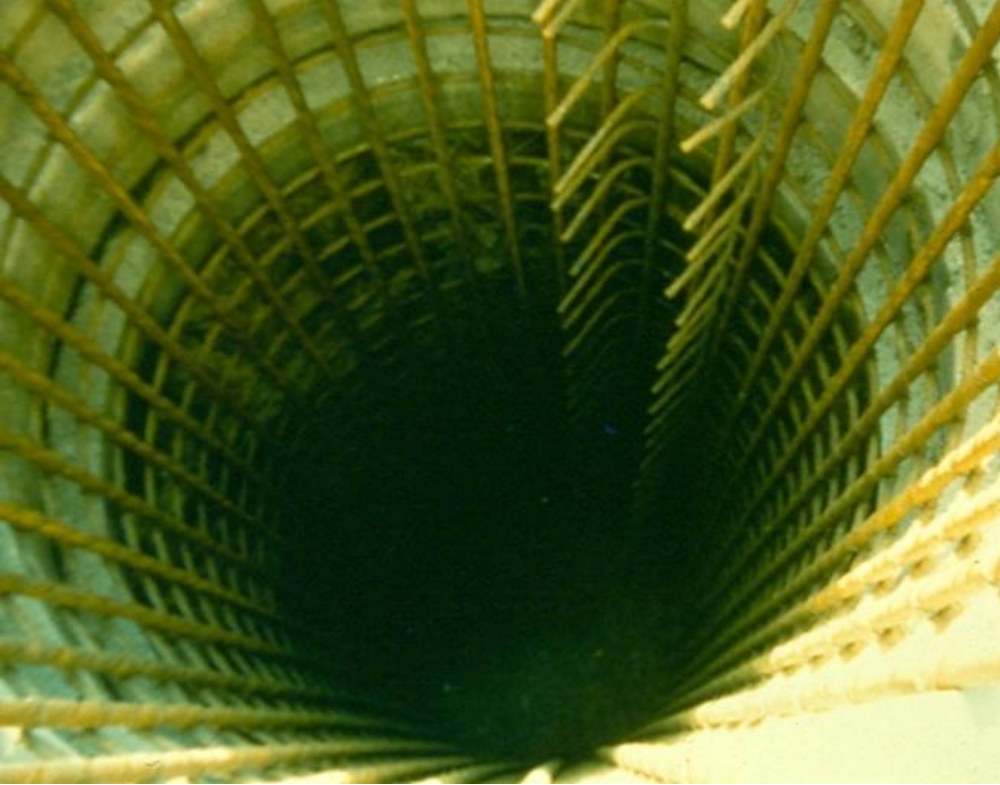




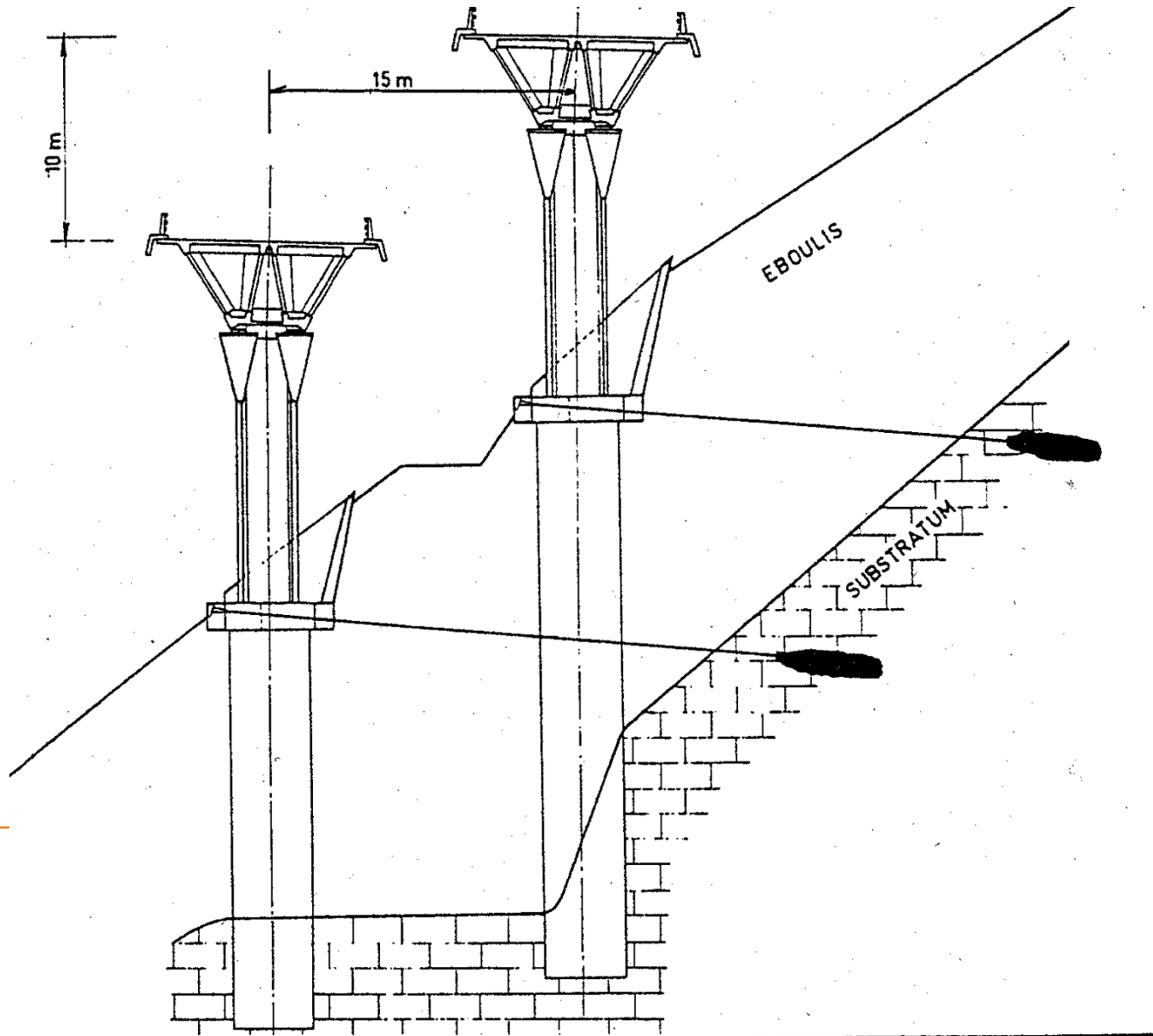
## Fondation sur « puits de gros diamètres »







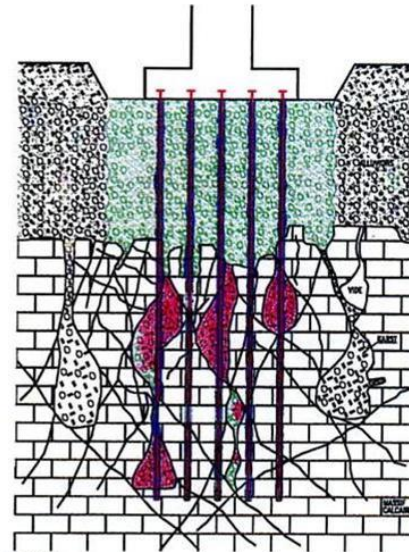
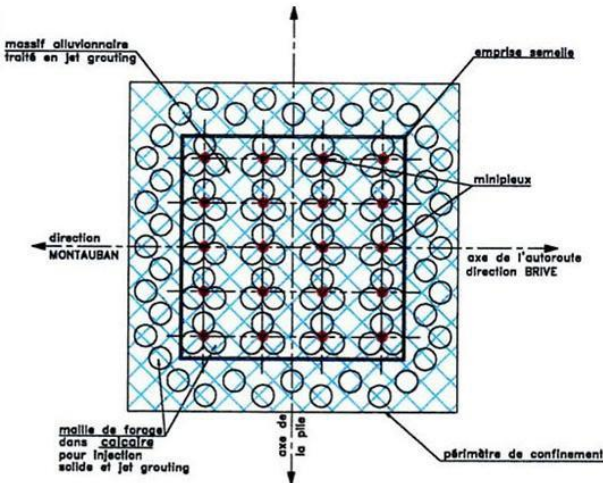
# Fondation sur versant instable





# Fondation en site karstique

## Traitements de terrain



- Jet Grouting
- Injection Solide
- Minipieux et coulis de scellement



Photo 5  
Massif de jet grouting  
en cours de recépage  
avec ses minipieux

*Jet grouting block  
during strike-off  
with its mini-piles*

© Botte Sade

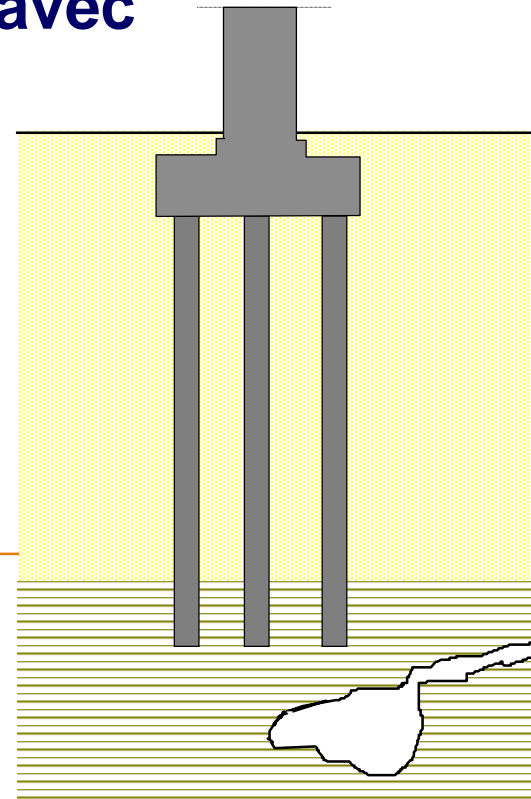
# Fondations en site karstique

*La reconnaissance est essentielle*

Fondation en dessous des niveaux karstifiés

Fondation au-dessus des niveaux karstifiés avec prise en compte de ceux-ci

Traitement des karsts



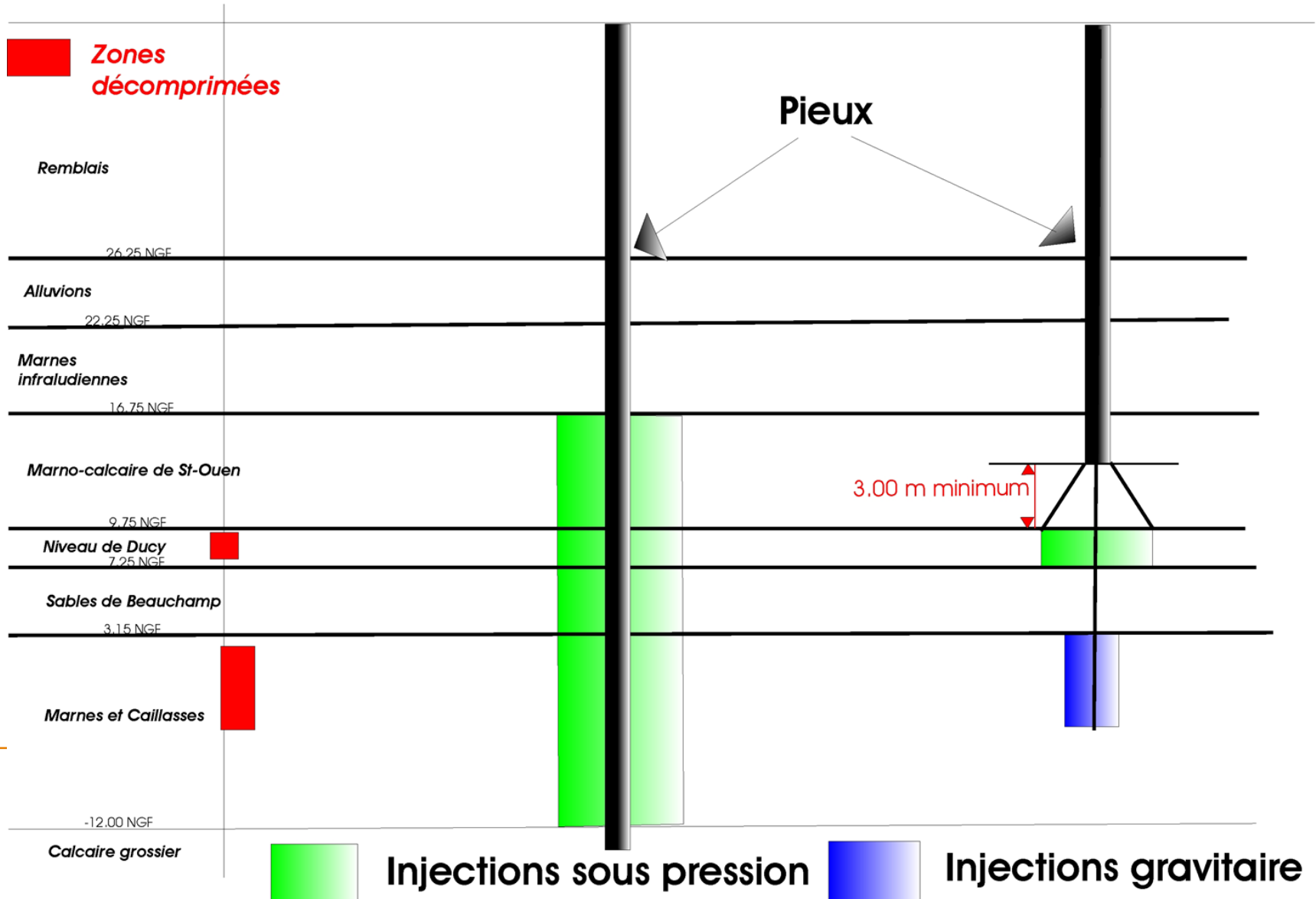


# Évolution de la conception des fondations en site karstique

TCSP  
Ouvrage OA2 D202

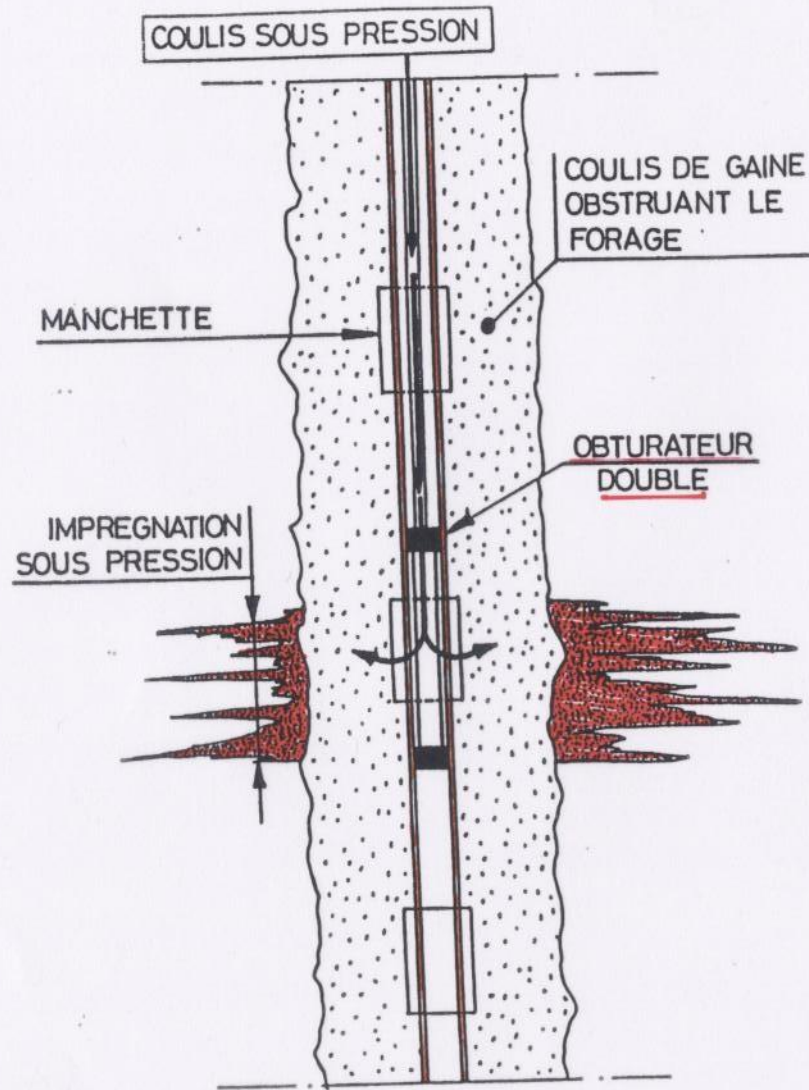
Etude initiale

Préconisations du LREP



# Injections sous pression





INJECTION  
COULIS BENTONITE-  
CIMENT







**MERCI DE VOTRE ATTENTION.**