

ENPC / MASTER GCE

COURS DE PROJET DE PONTS

LES FONDATIONS DE PONTS

Conception / Technologie / Dimensionnement

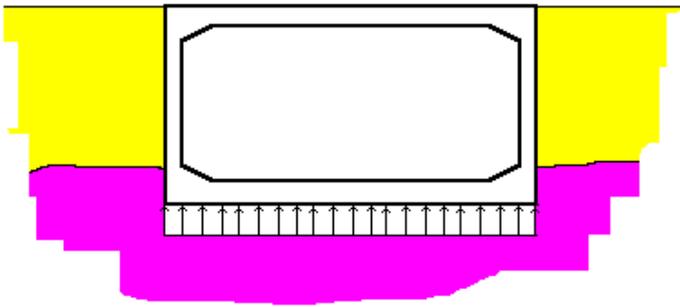
SOMMAIRE

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

GÉNÉRALITÉS

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

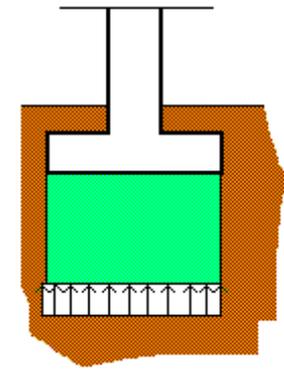
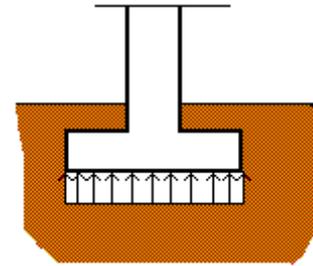
LES PRINCIPAUX TYPES DE FONDATIONS DES PONTS



LES RADIERS

(Ponts-cadres, réservoirs, etc.)

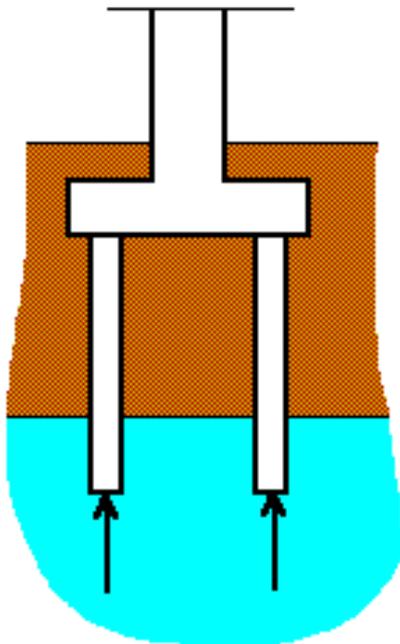
Pression au sol (ELS) : 0,1 MPa



FONDATIONS SUPERFICIELLES

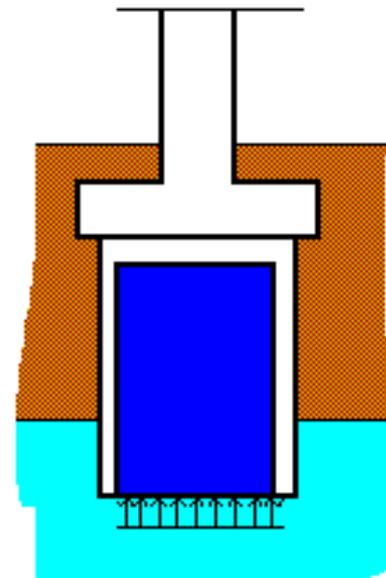
(Ouvrages d'art, murs de soutènement, etc.)

Pression au sol (ELS) : 0,3 MPa



PIEUX ET PUIITS

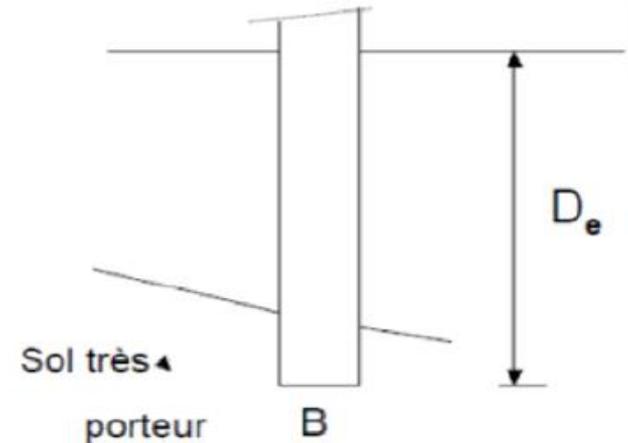
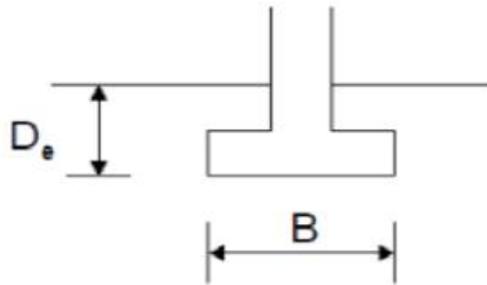
Pression en pointe (ELS) supérieure à 2 MPa environ, sauf pieux flottants.



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,

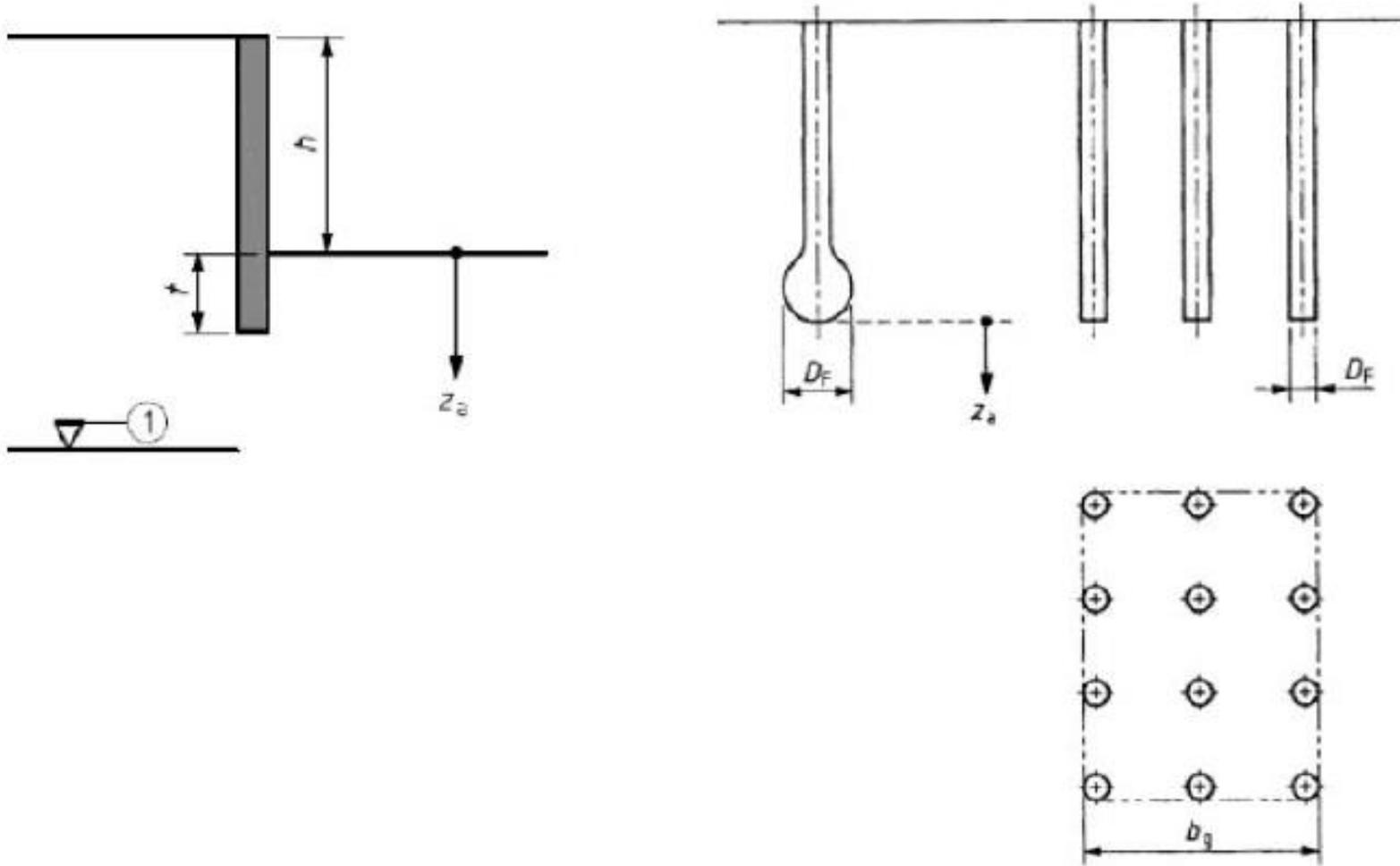
Profondeur du sondage : $z_a = \text{Max} (b_g; 5\text{m}; 3d_f)$

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

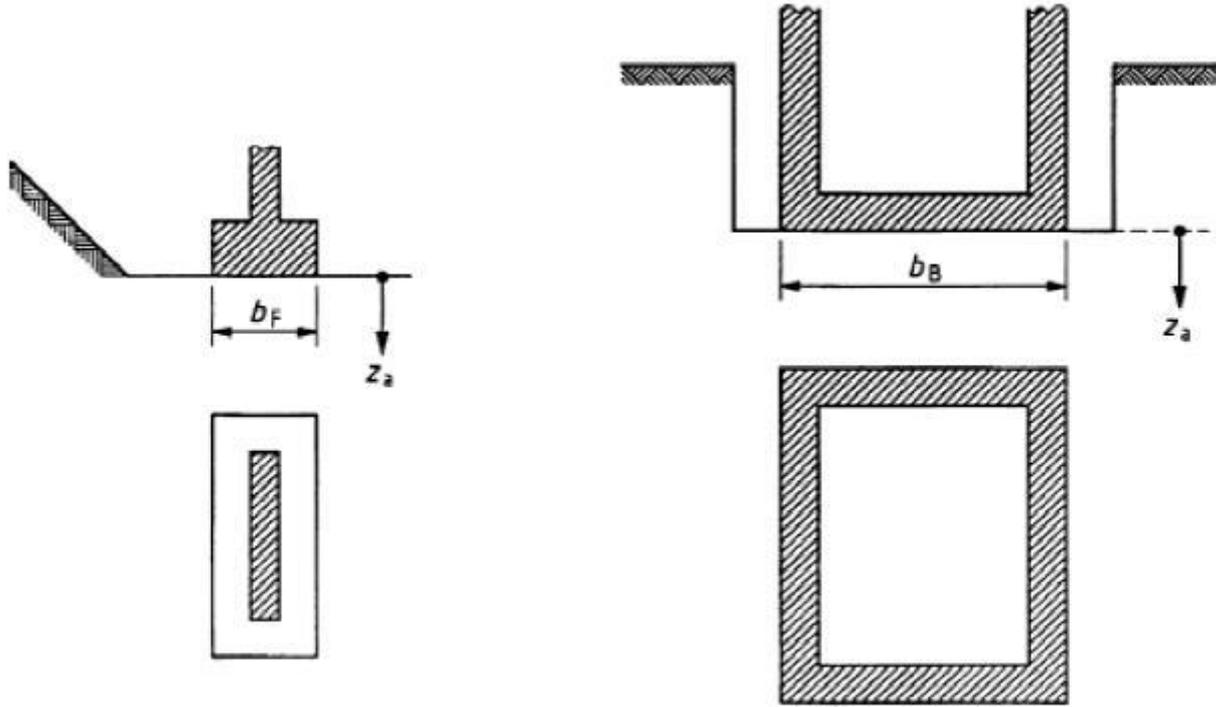
Ouvrage de type radier,

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>Sol fin</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>Sol grenu pulvérulent</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>Roche</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>Abréviations</p> <p>Essais en place</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>Prélèvement</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>Mesurages piézométriques</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

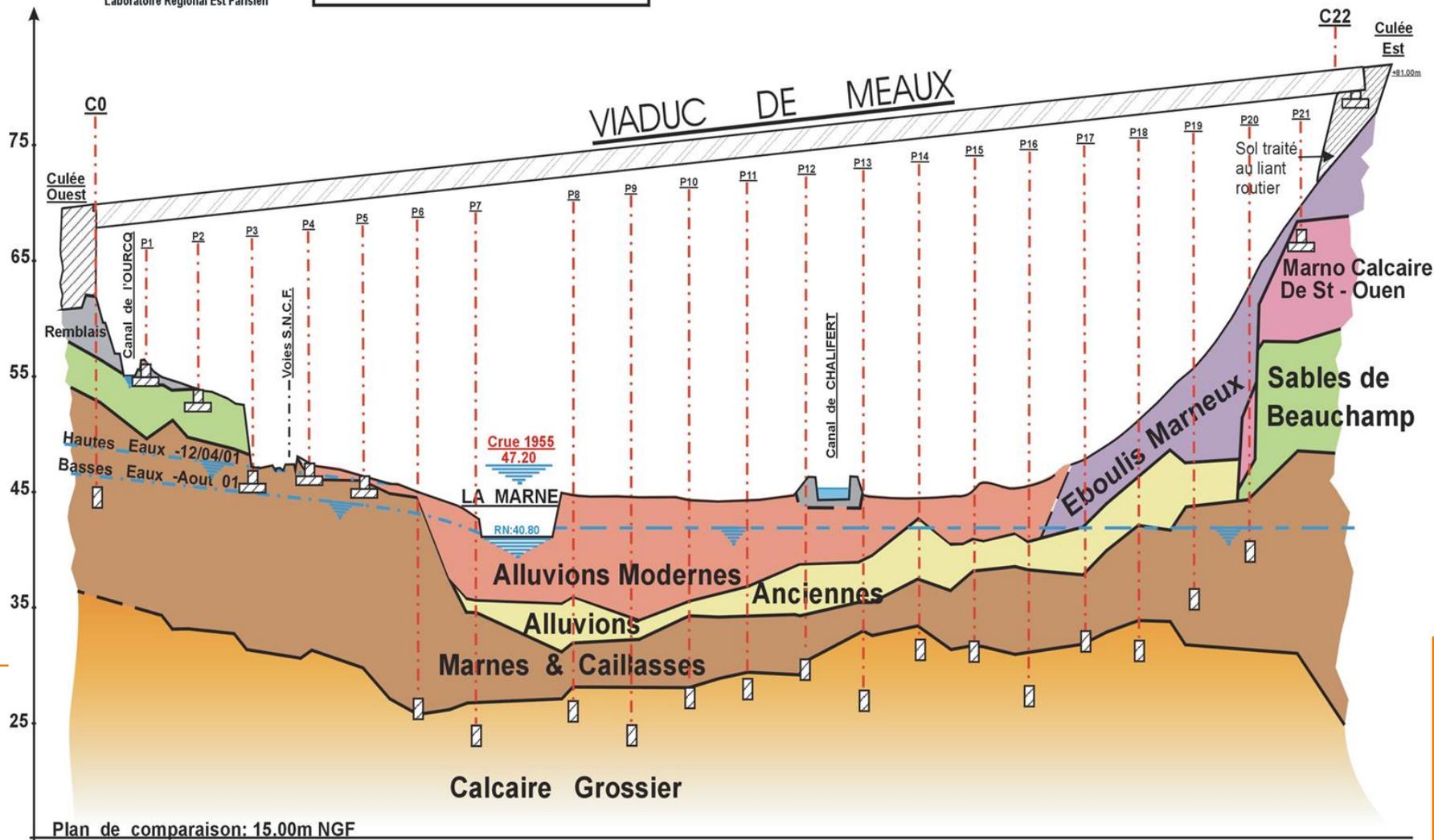
LIAISON A.140 - R.D.5
DEVIATION DE MEAUX

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

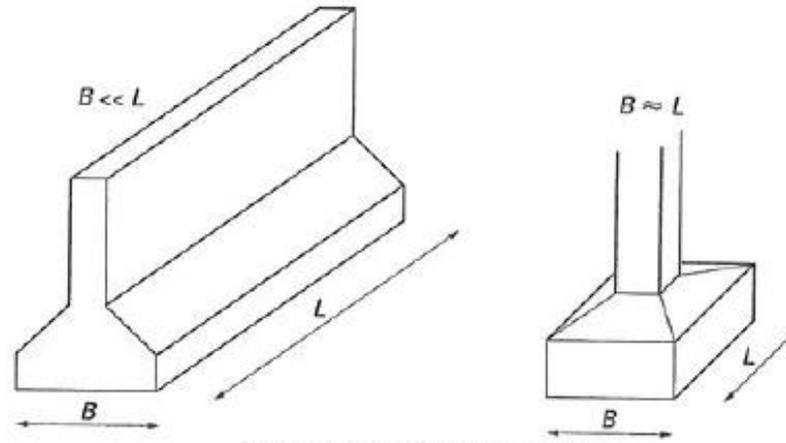
Généralités

Les fondations superficielles

Les fondations profondes

Les cas particuliers

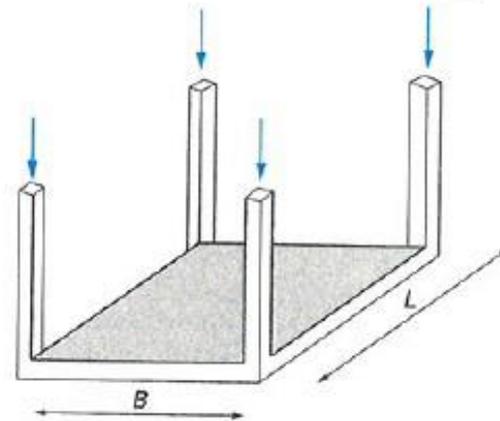
TYPES DE FONDATIONS SUPERFICIELLES



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

(a) semelle filante

(b) semelle isolée



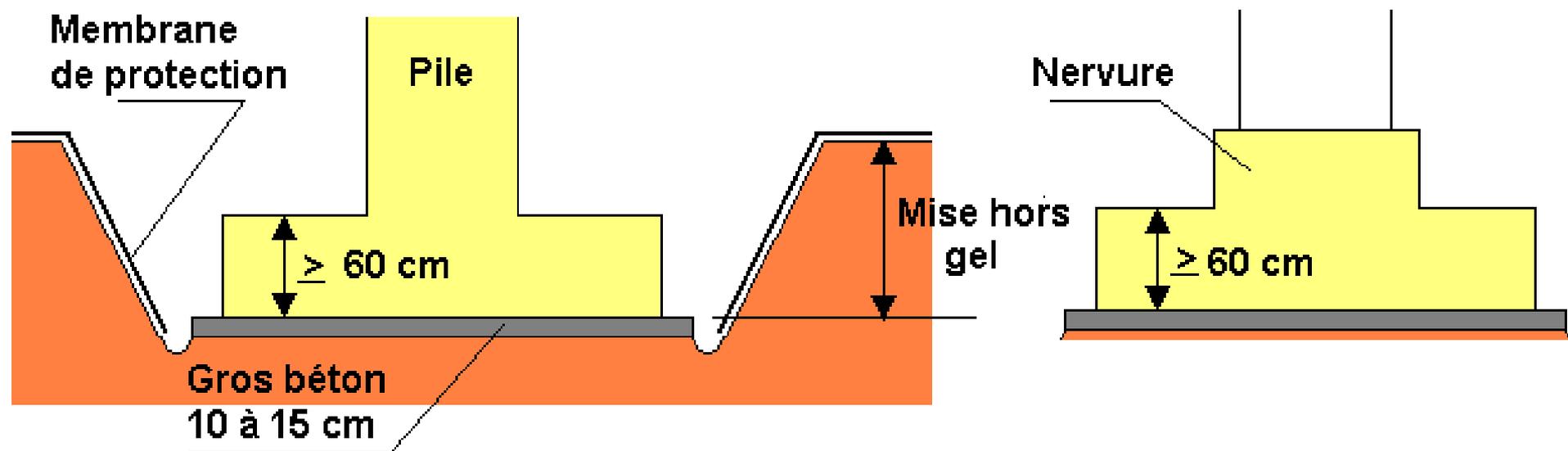
$B \times L$: aire de l'ouvrage porté

(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

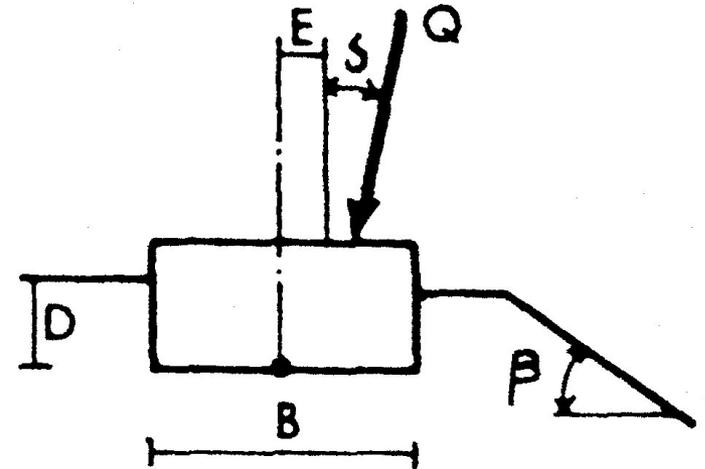
forme

encastrement

inclinaison

proximité d'un talus

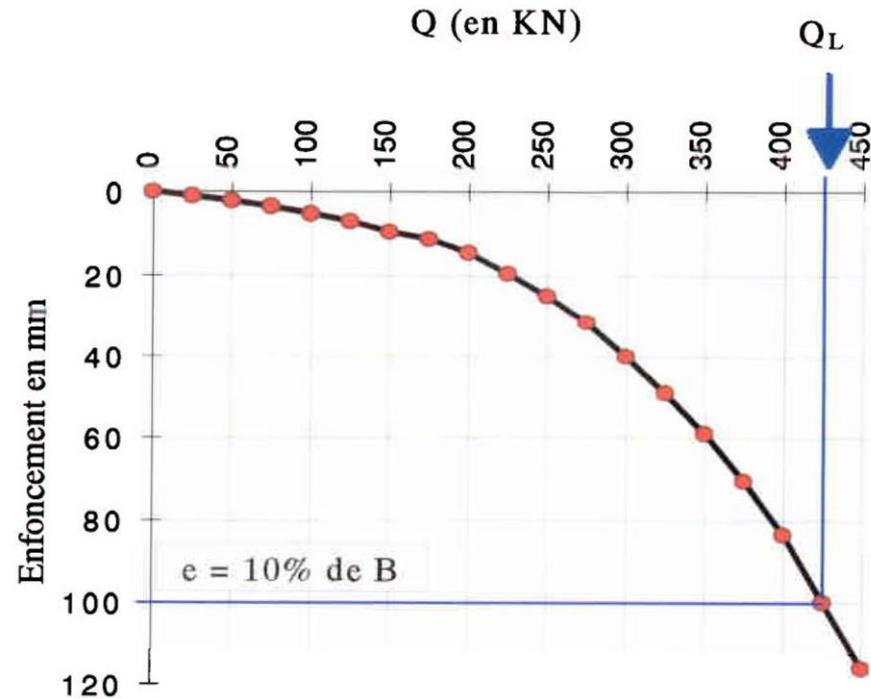
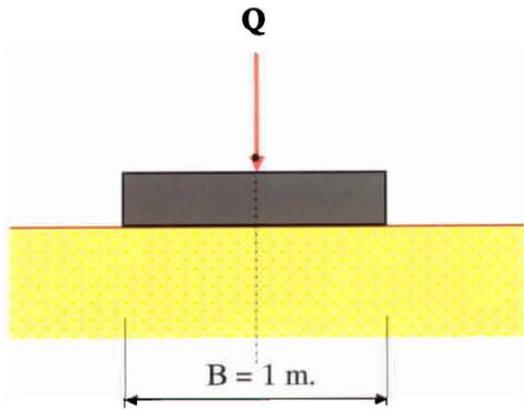
pente du talus



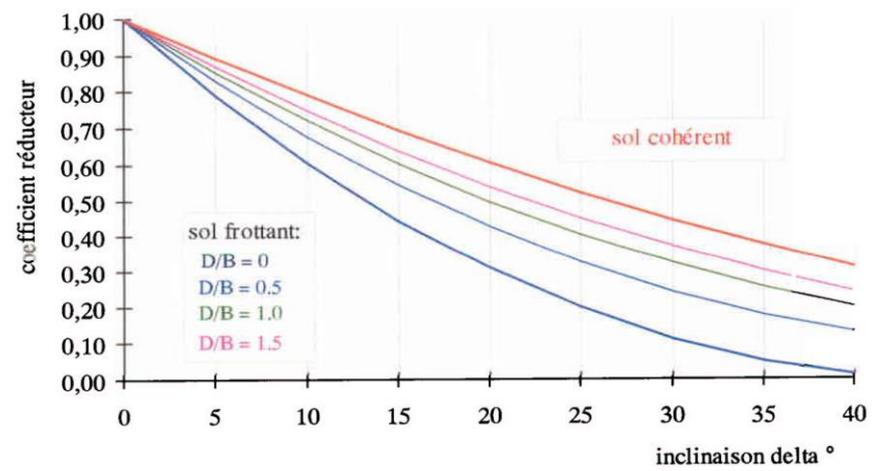
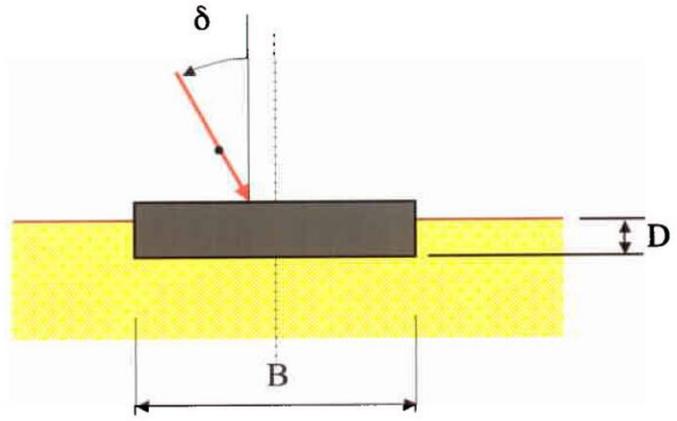
Paramètres étudiés

COMPORTEMENT DES FONDATIONS

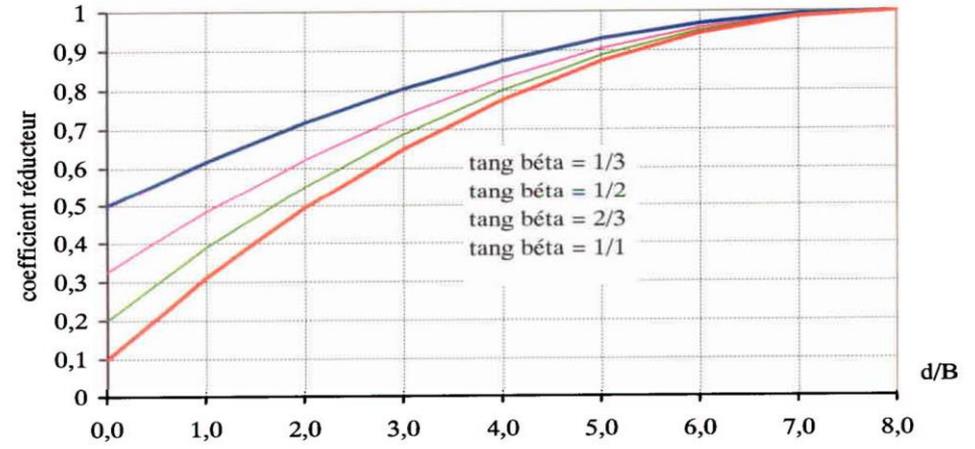
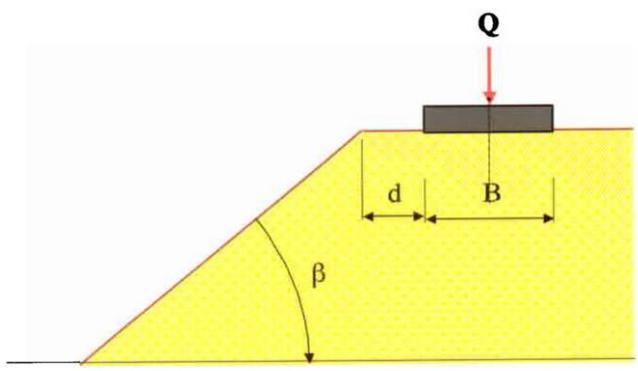
• Charge limite d'une fondation superficielle



EFFET DE L'INCLINAISON : COEFFICIENT RÉDUCTEUR I_δ, I_β



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.

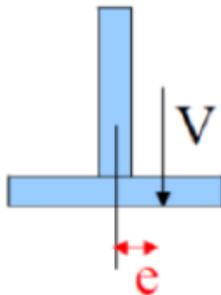
JUSTIFICATIONS COURANTES DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

Justification de l'excentrement

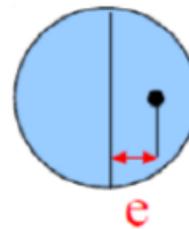
Calcul de e, e_B, e_L

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

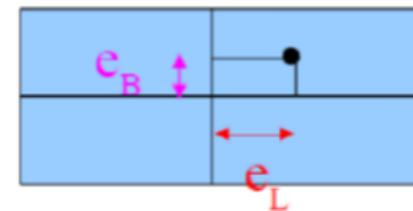
semelle filante



semelle circulaire



semelle rectangulaire



V_d

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

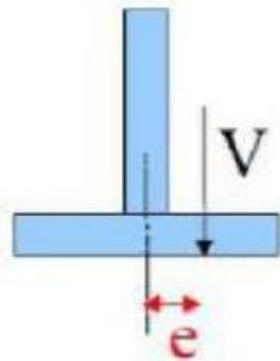
M_d

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

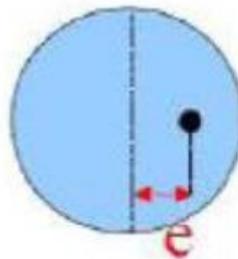
JUSTIFICATIONS COURANTES DES FONDATIONS SUPERFICIELLES

Justification de l'excentrement

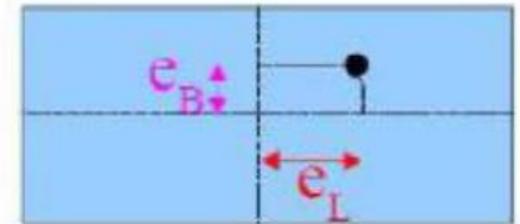
Semelle filante



Semelle circulaire



Semelle isolée



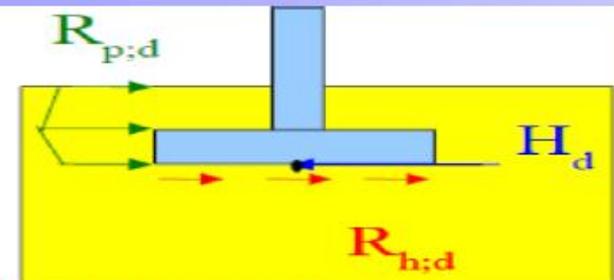
	Semelle filante de largeur B	Semelle rectangulaire de largeur B et de longueur L	Semelle circulaire de diamètre B
ELU Fondamental et accidentel	$\left(1 - \frac{2e}{B}\right) \geq \frac{1}{15}$	$\left(1 - \frac{2e_B}{B}\right) \left(1 - \frac{2e_L}{L}\right) \geq \frac{1}{15}$	$\left(1 - \frac{2e}{B}\right)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

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 :

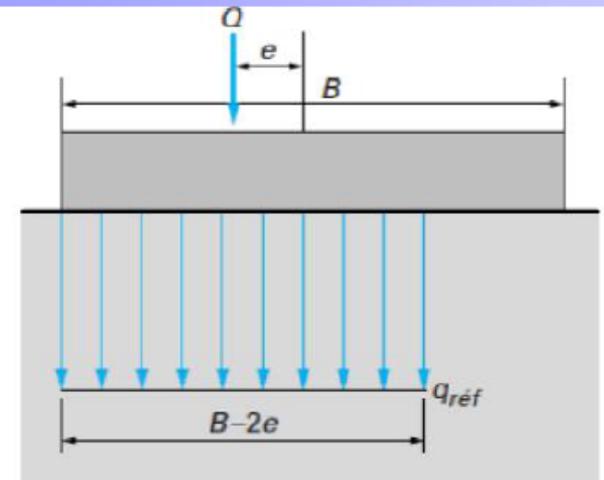
$$i_e = 1 - \frac{2e}{B}$$

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_{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

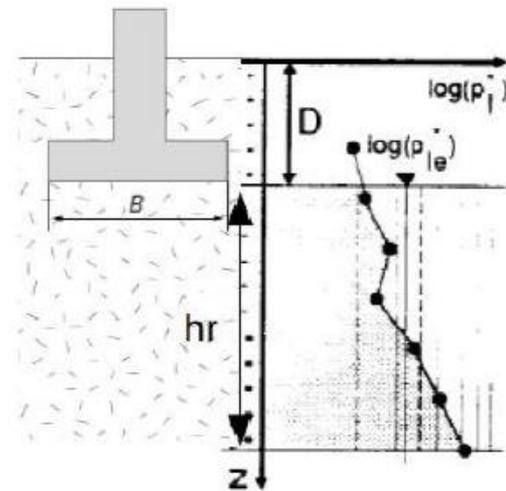
Calcul de k_p : Définition préalable de la pression limite équivalente pl_e^*

Calcul de pl_e^* (Annexe D.2.2)

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

B largeur de la fondation superficielle

$pl_{i;k}^*$ 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

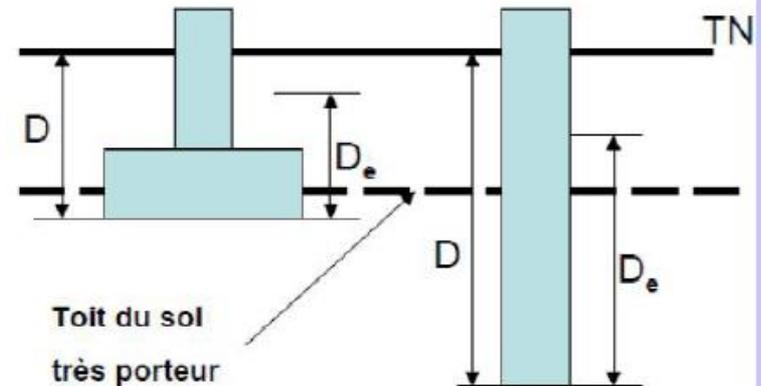
- au *pressiomètre*, on a :

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

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

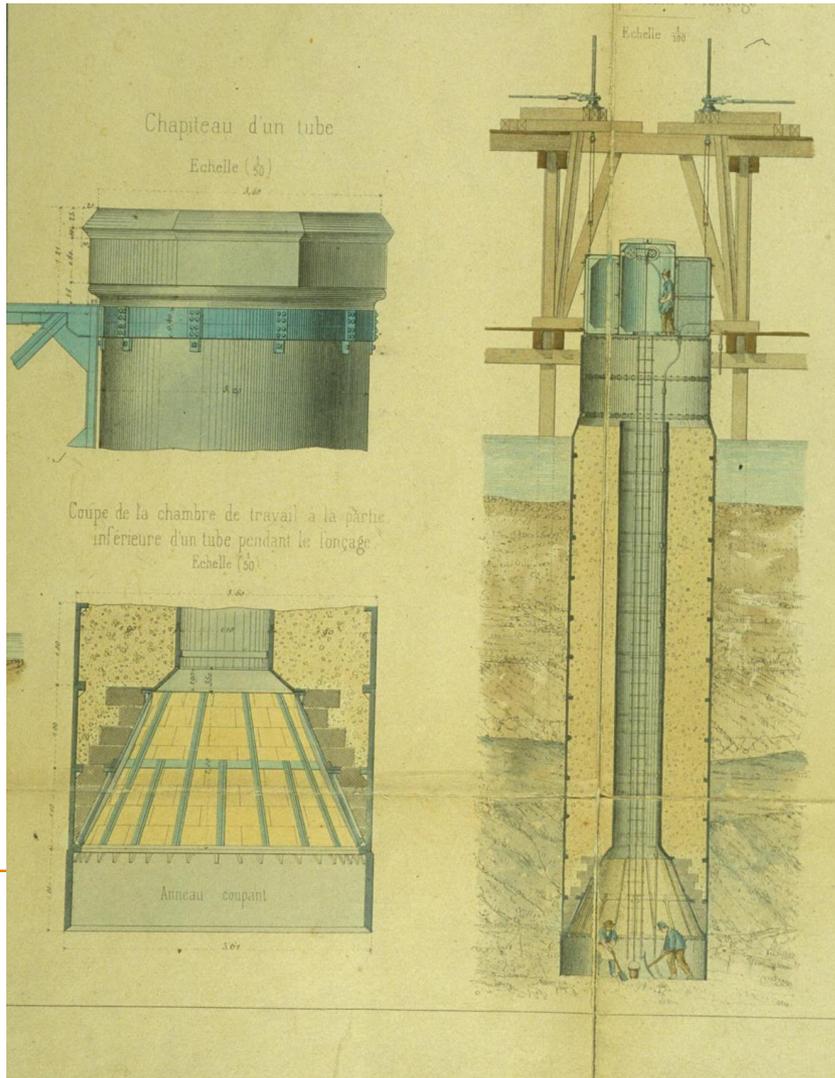
Généralités

Les fondations superficielles

Les fondations profondes

Les cas particuliers

Quelques repères historiques XIX^{ème} 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 :

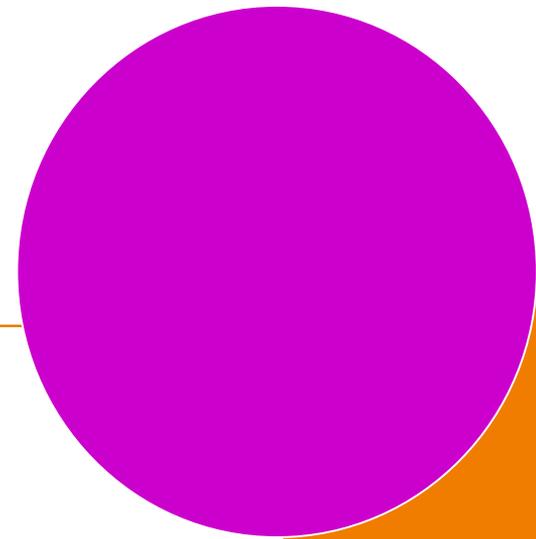
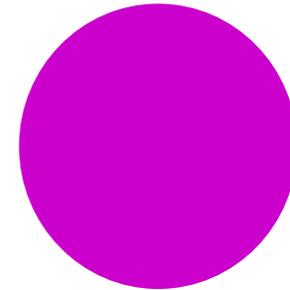


Pieux Acier :



non refoulants

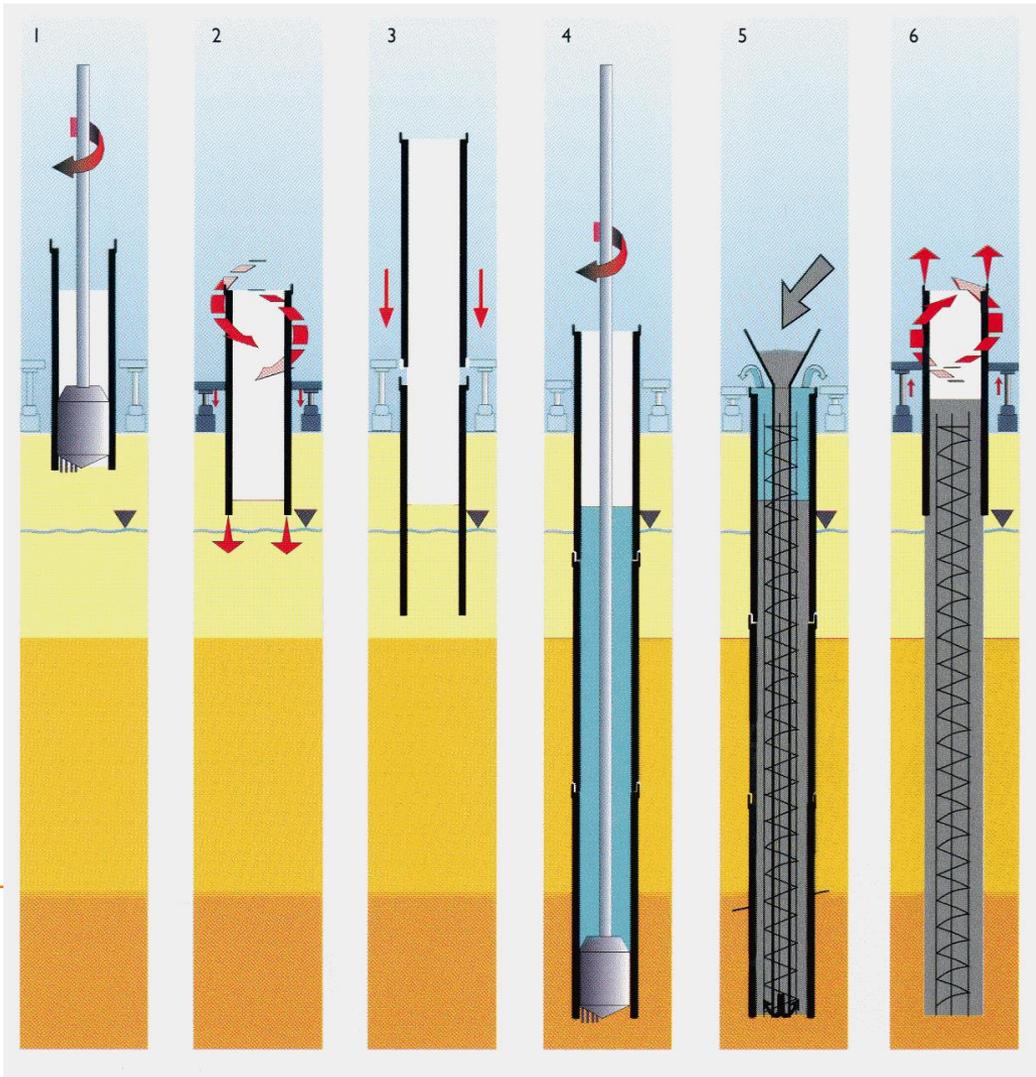
● Pieux forés



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)

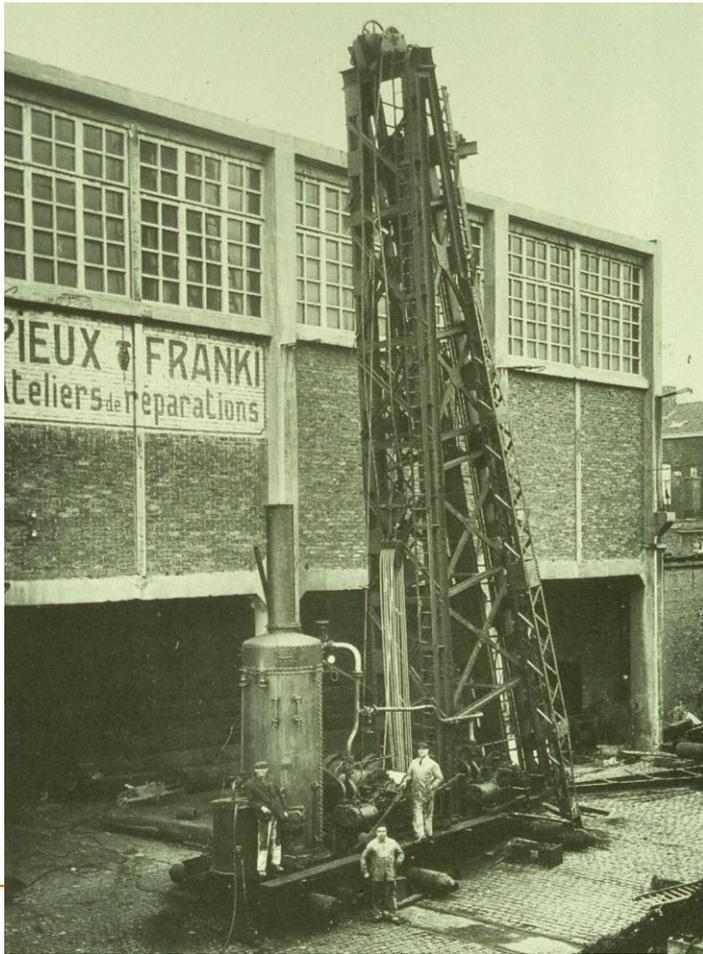
Difficultés

- 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 ...)

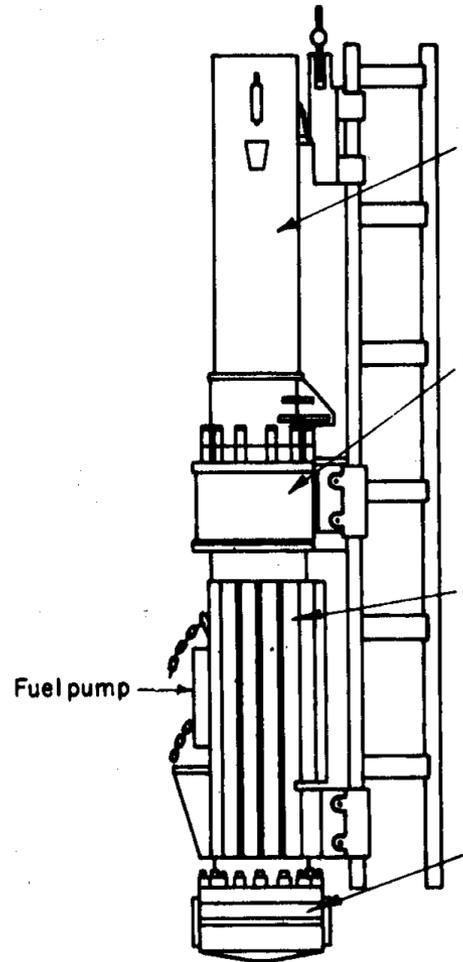
Pieux refoulants (battus, vibrofoncés, vissés ...)

Pieux battus

Machine à vapeur & Marteau Diesel



1930 - machine Franki



pieu H

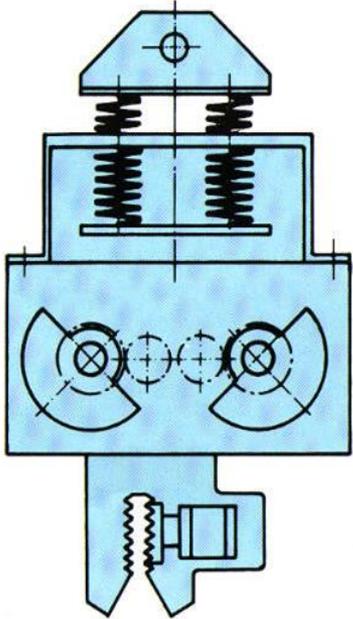
Pieux battus Marteau Hydraulique



Possibilité de
contrôler
précisément
l'énergie

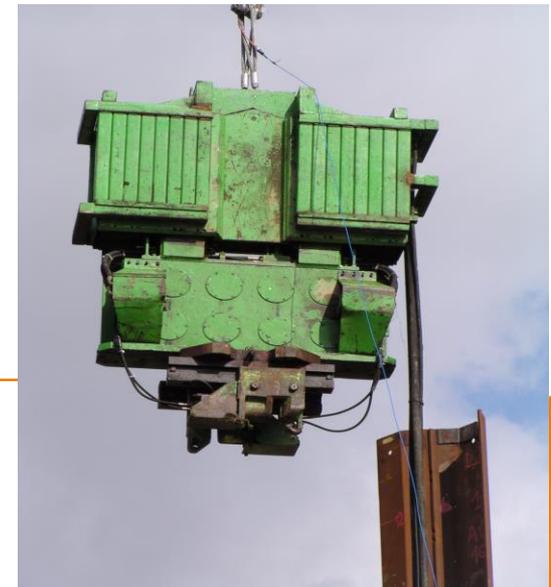


Pieux vibrofoncés

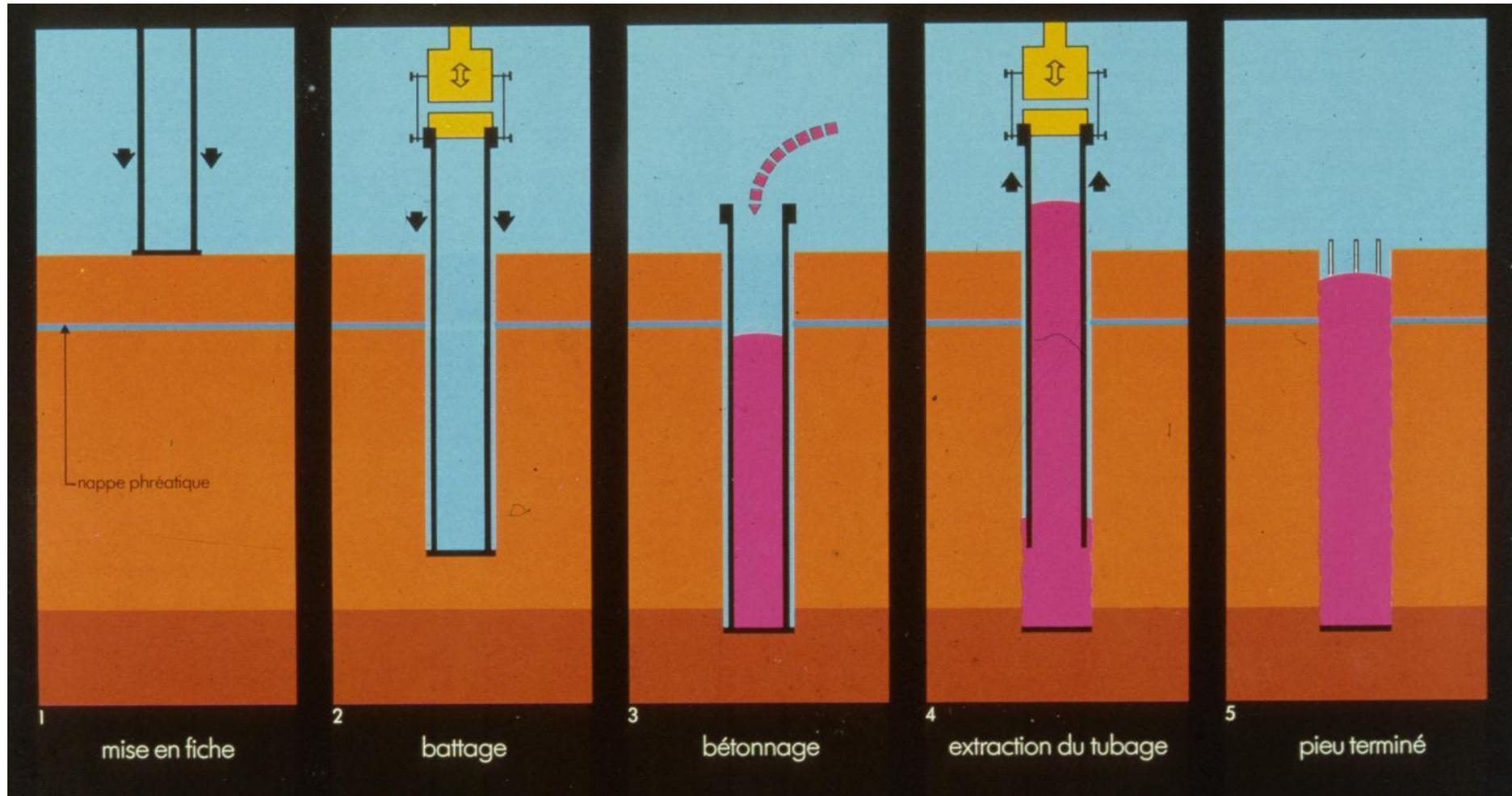


Évolutions technologiques récentes :

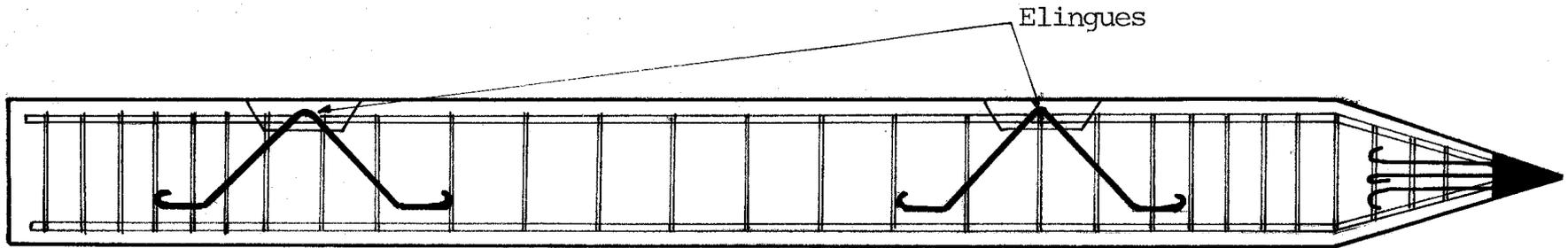
- Basse fréquence (20 – 30 Hz)
- Haute fréquence (35 – 40 Hz)
- Fréquence variable
- Moment d'excentricité variable



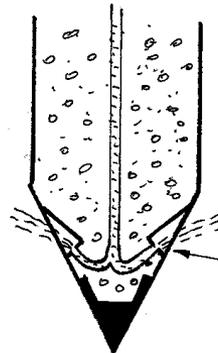
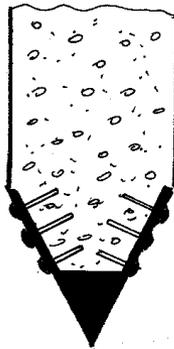
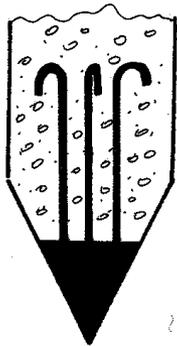
Pieu battu ou vibrofoncé moulé



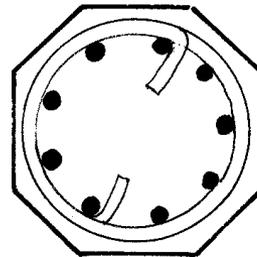
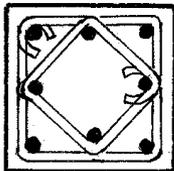
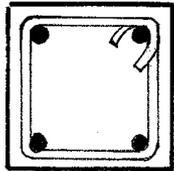
PIEUX EN BETON ARME



Coupe schématique d'un pieu en béton armé



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



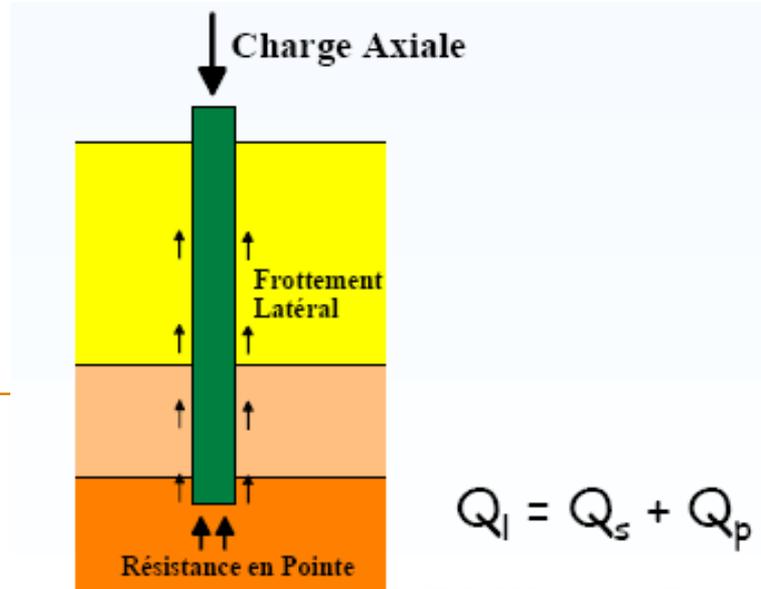
Réalisation de la semelle de répartition



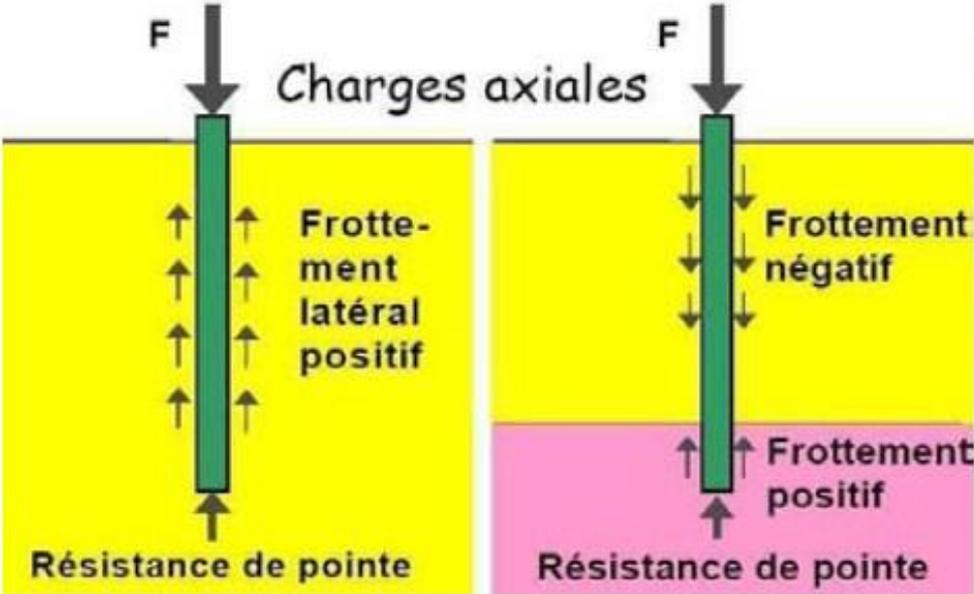


ÉTUDES EXPÉRIMENTALES / COMPORTEMENT

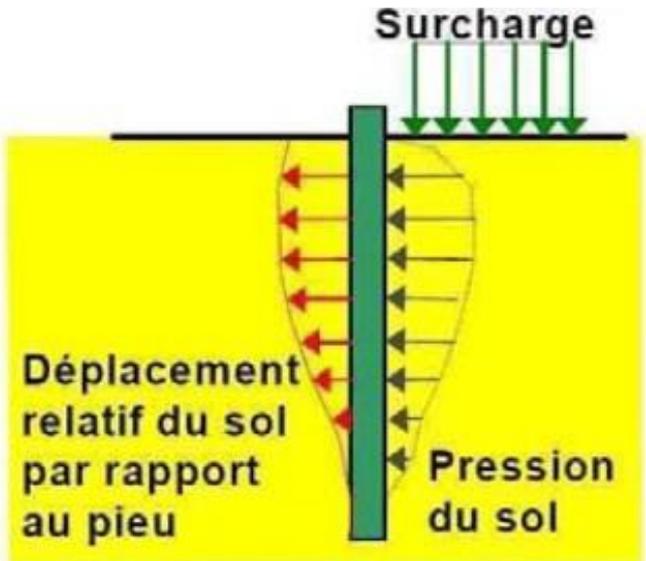
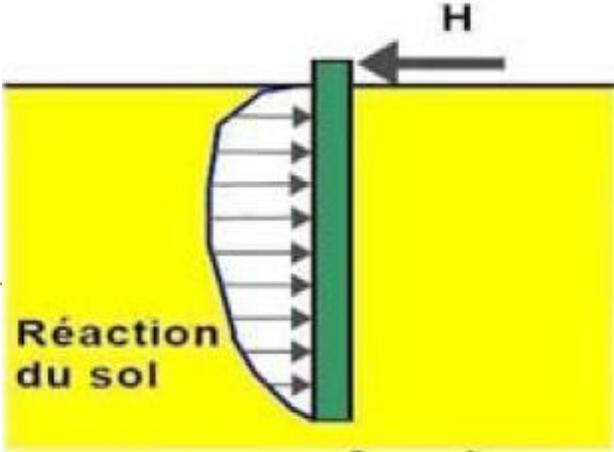
- Nombreux essais de pieux menés par le LCPC (et les LPC)
- Essais sous charge axiale permettant de mesurer individuellement le frottement latéral et la charge en pointe
- Ces essais sont à l'origine des règlements



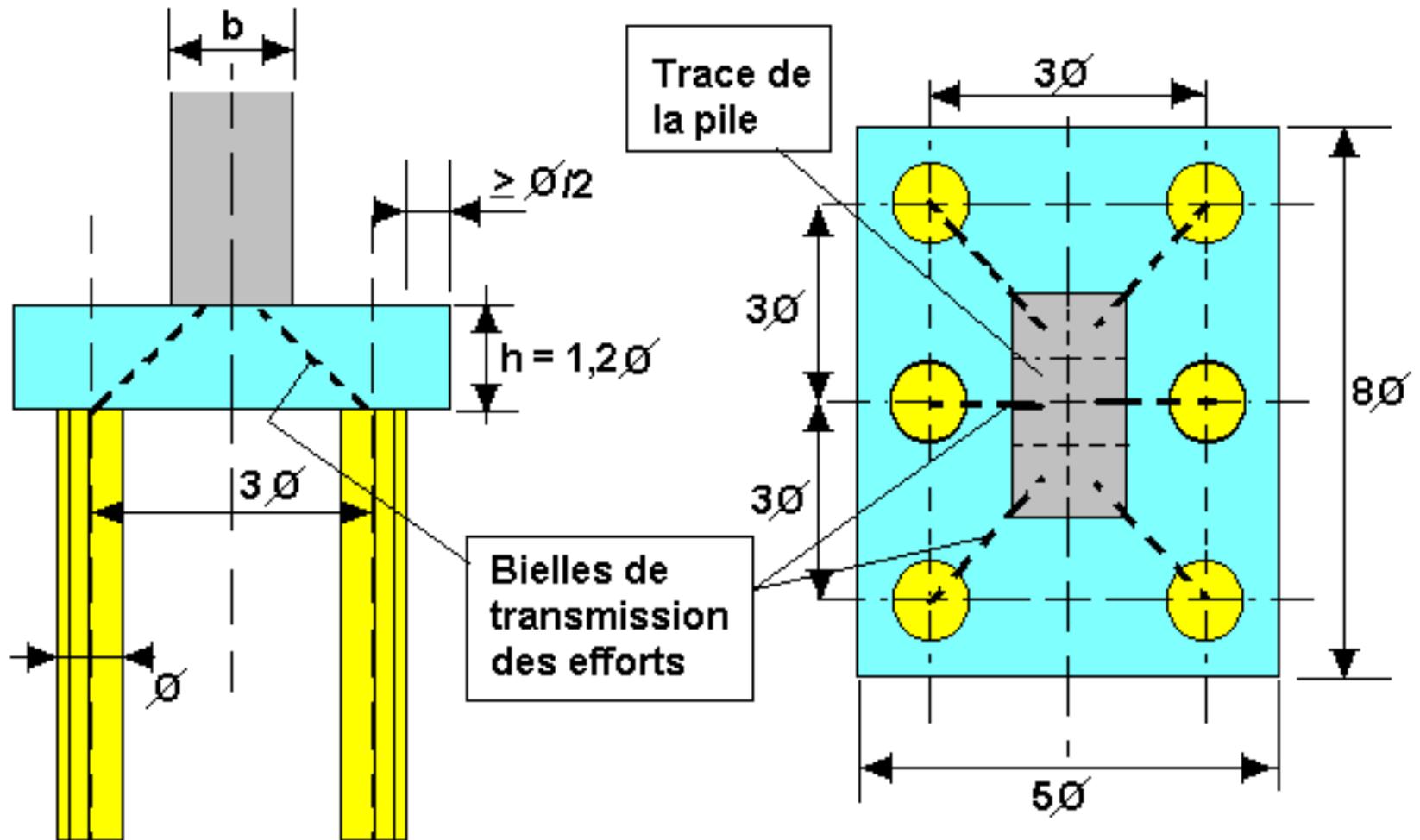
EFFORTS PARASITES SUR LES PIEUX



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,
sur le pieu,

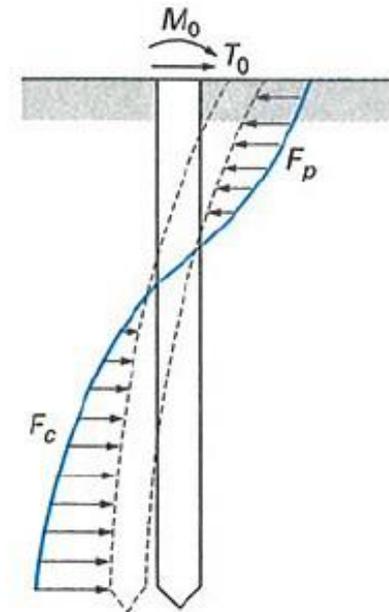
cette réaction est fonction du déplacement

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

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 :

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

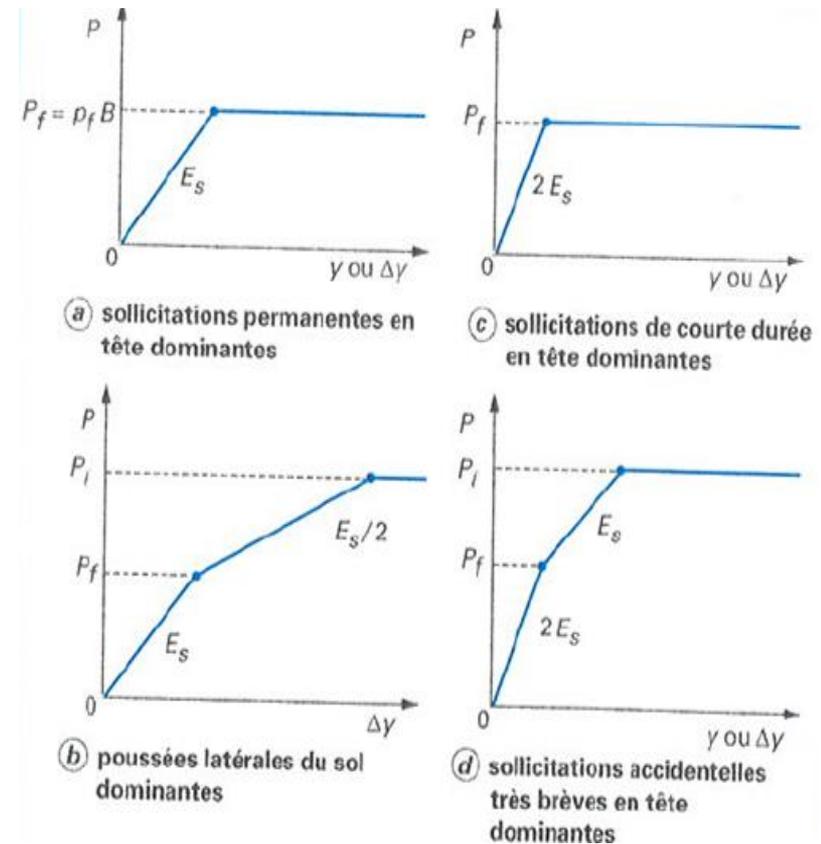
* **Vis-à-vis des efforts instantanés :**

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

B : diamètre / α : 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

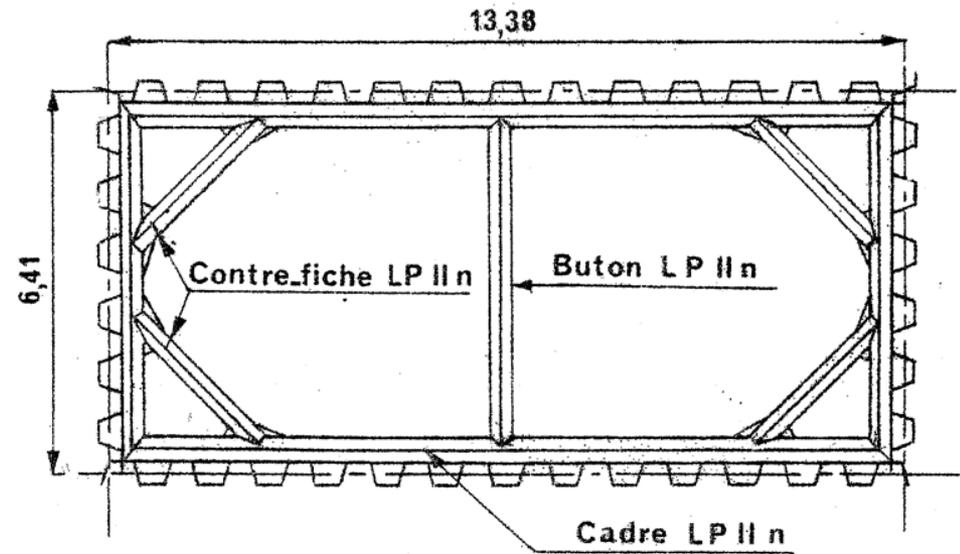
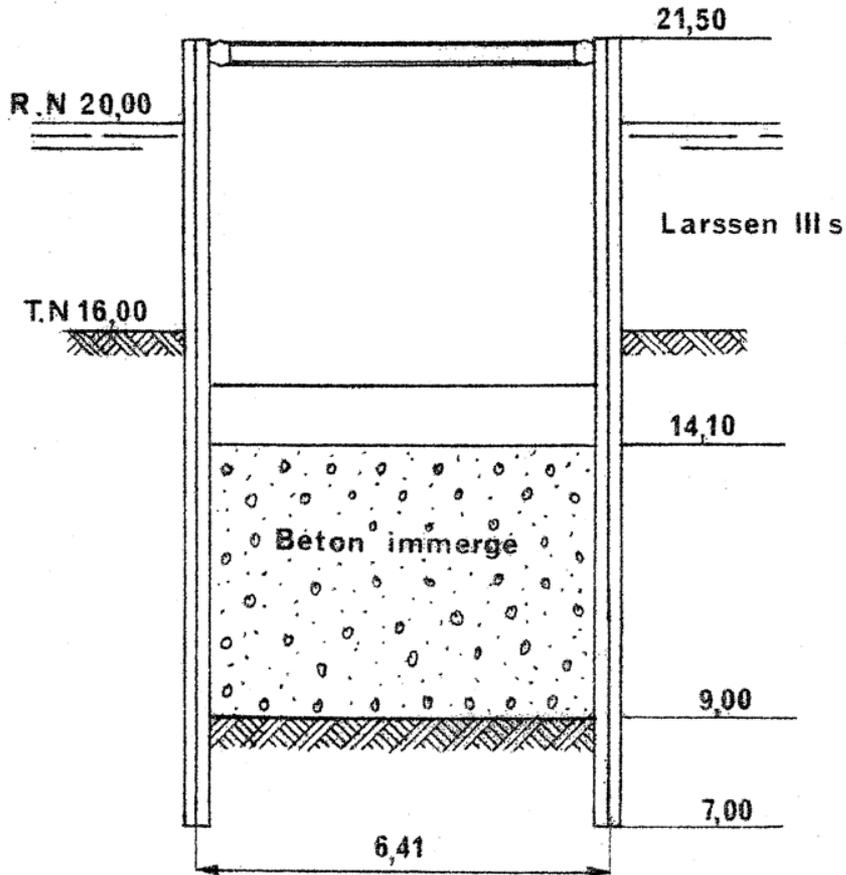


Fondation en site aquatique Batardeau

Pont sur le Scorff

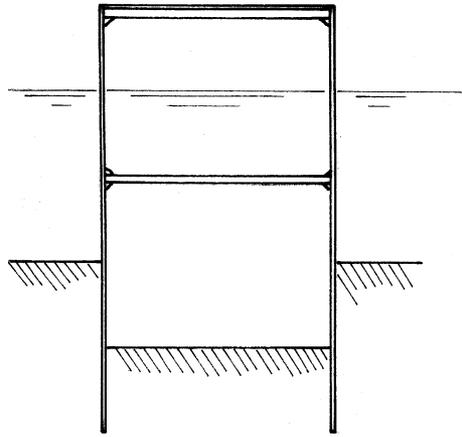


FONDATEMENTS SUPERFICIELLES EN SITE AQUATIQUE - BATARDEAUX

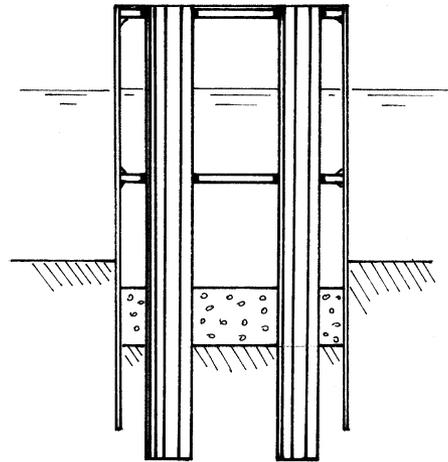


Exemple de batardeau rectangulaire

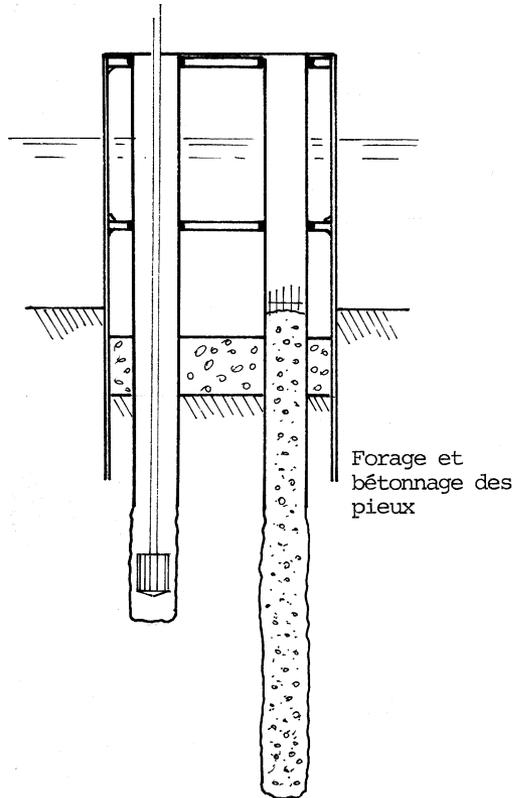
Principes d'exécution d'une fondation sur pieux en site aquatique



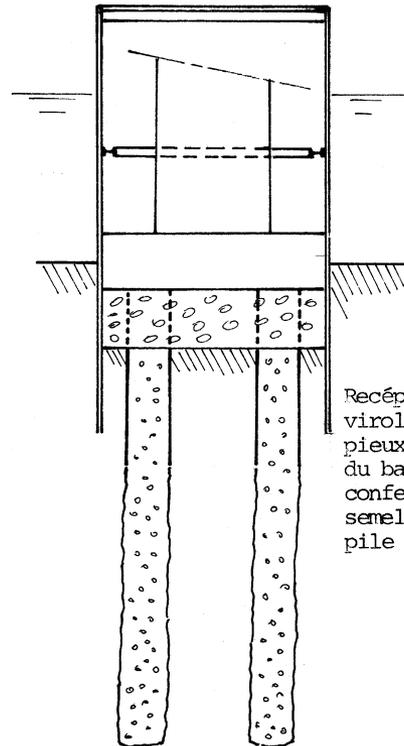
Exécution du batardeau
et terrassements



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

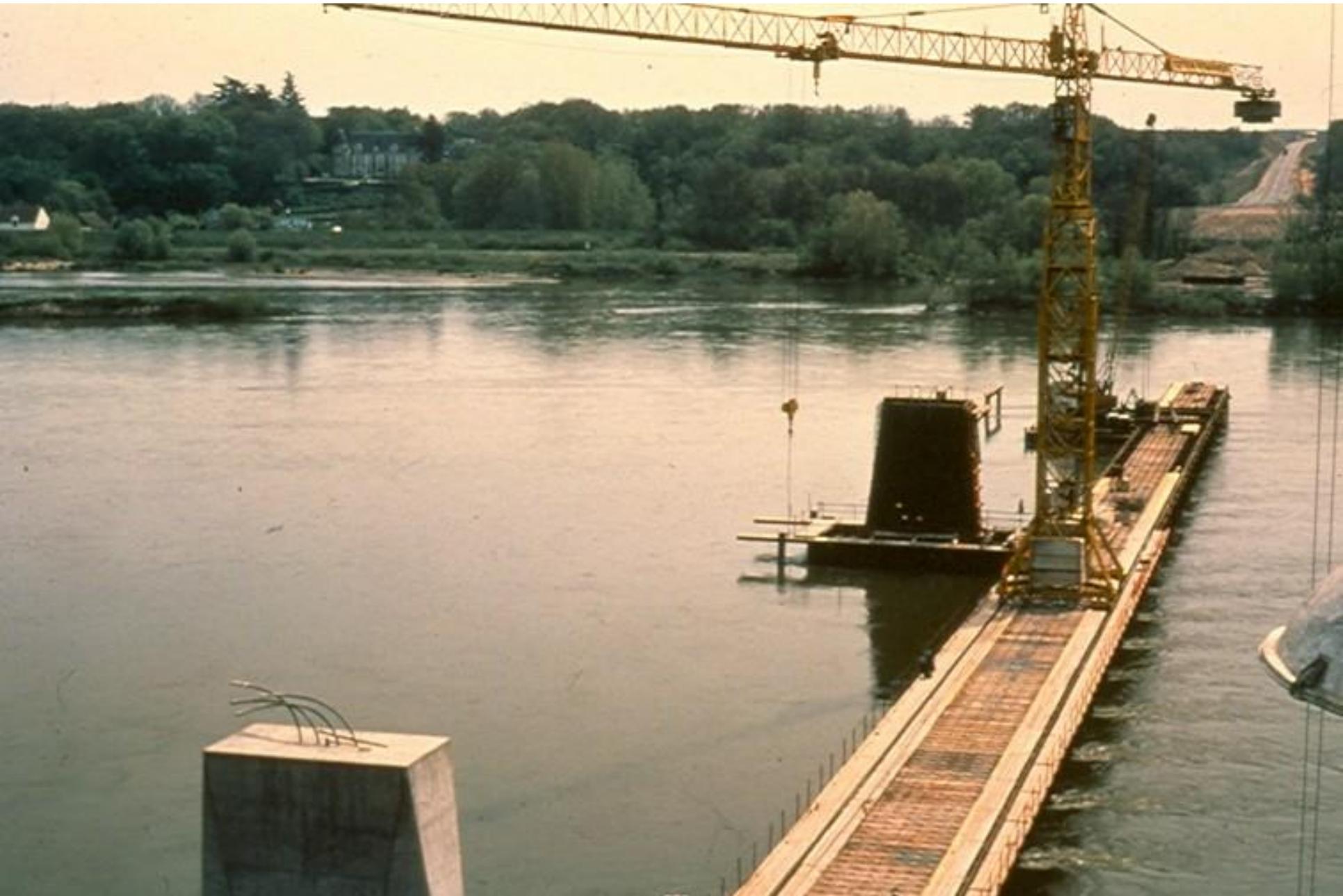


Forage et
bétonnage des
pieux



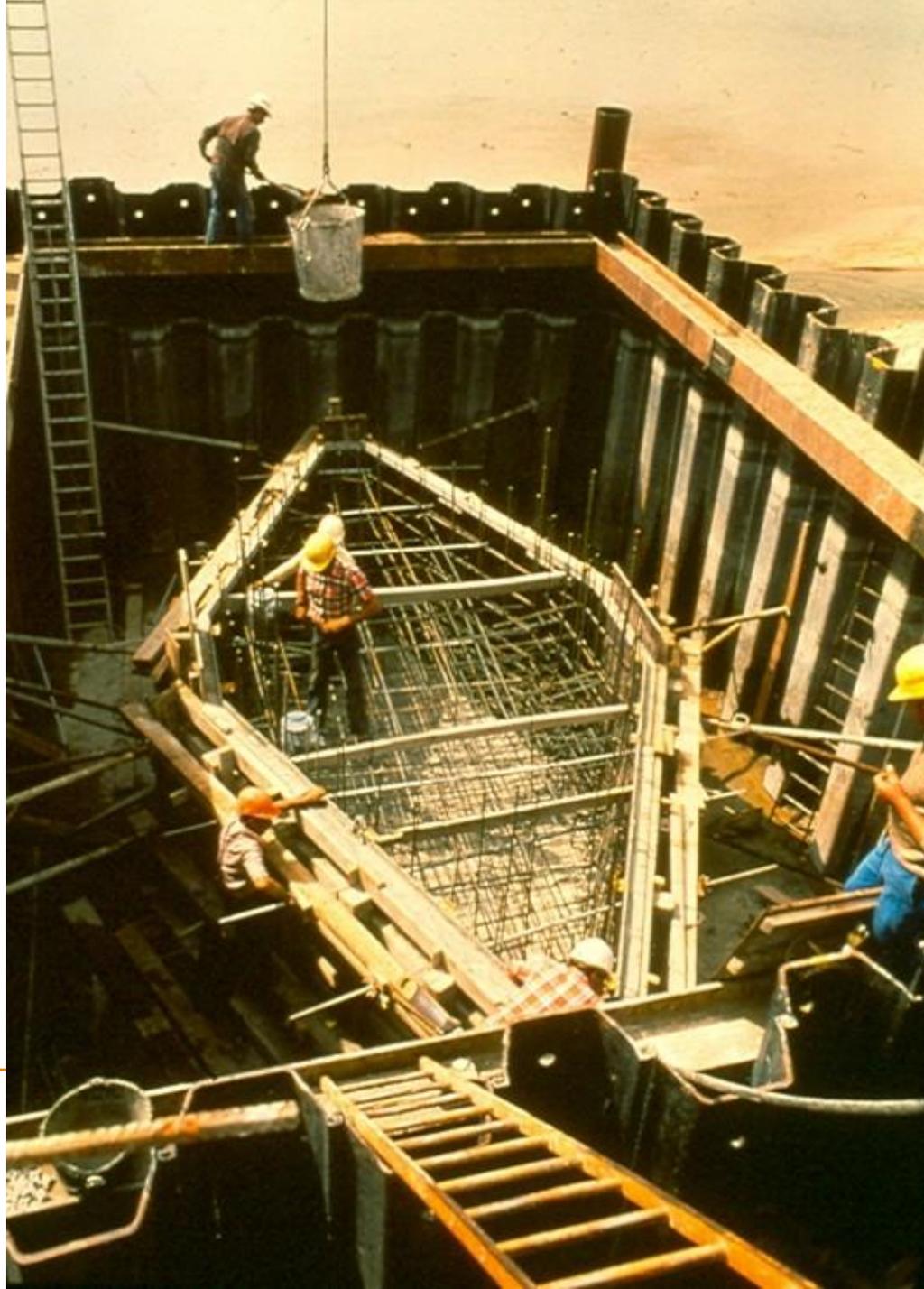
Recépage des
viroles et des
pieux-Epuisement
du batardeau et
confection de la
semelle et de la
pile

Pont d'Amboise sur la Loire

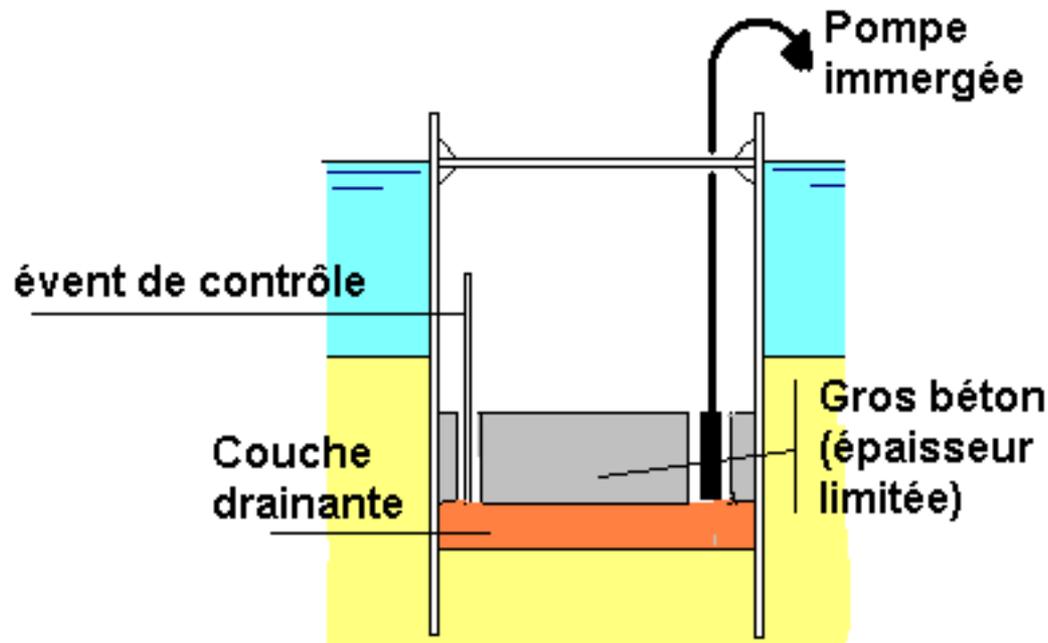
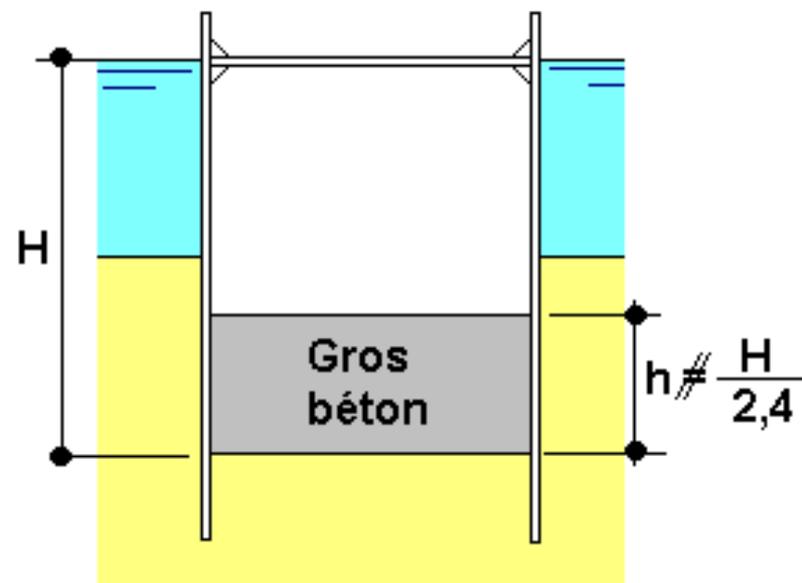
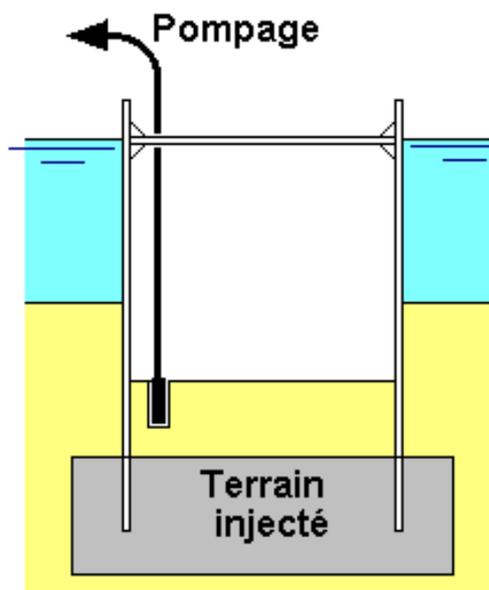
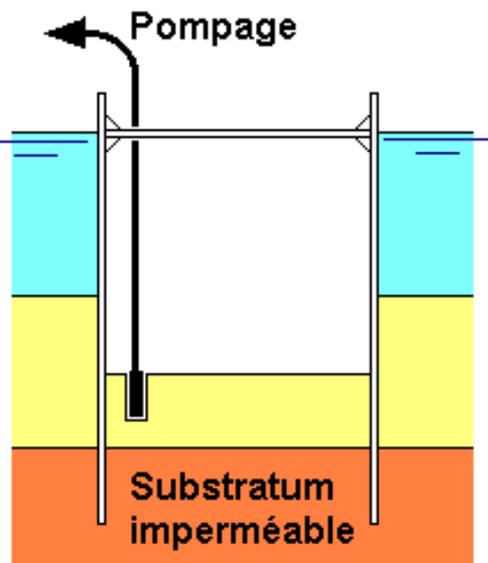






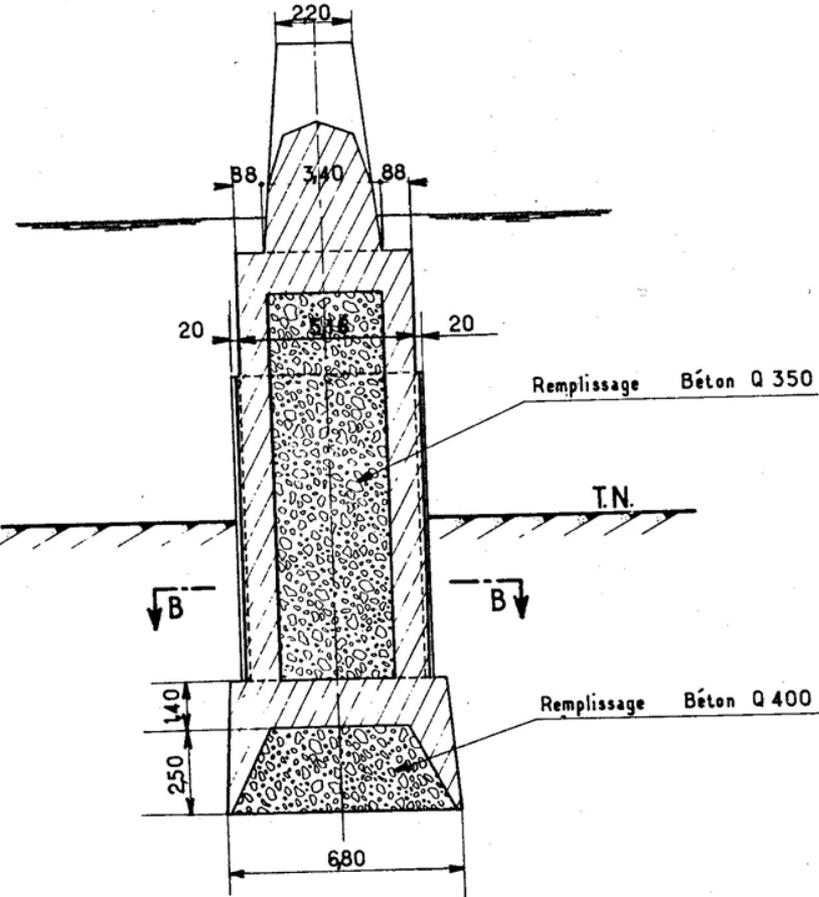


METHODES D'ASSECHEMENT DES BATARDEAUX

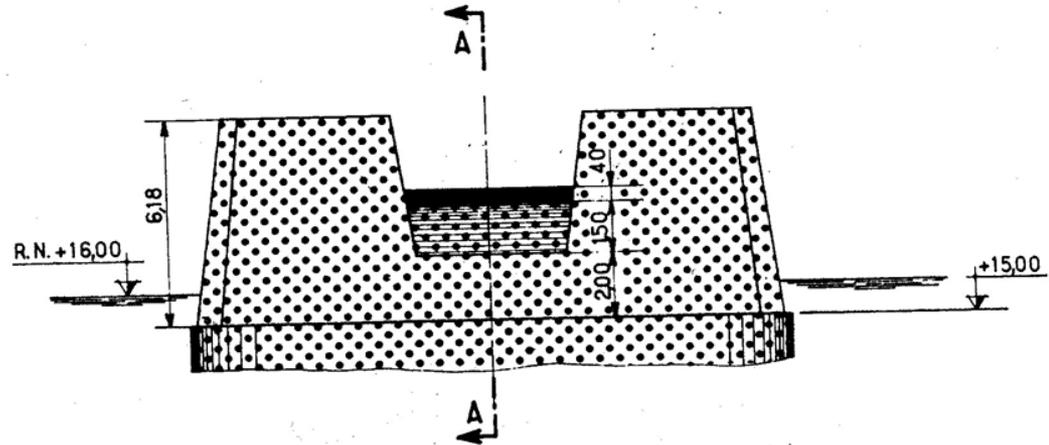


CAISSONS HAVES

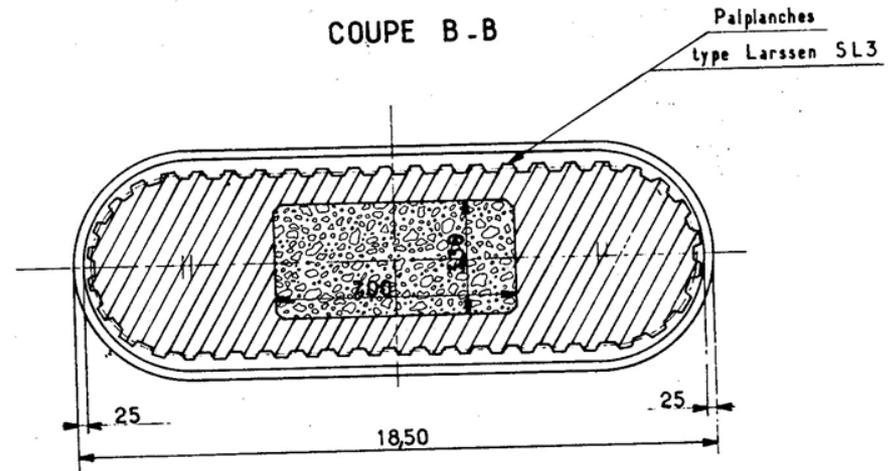
COUPE A-A



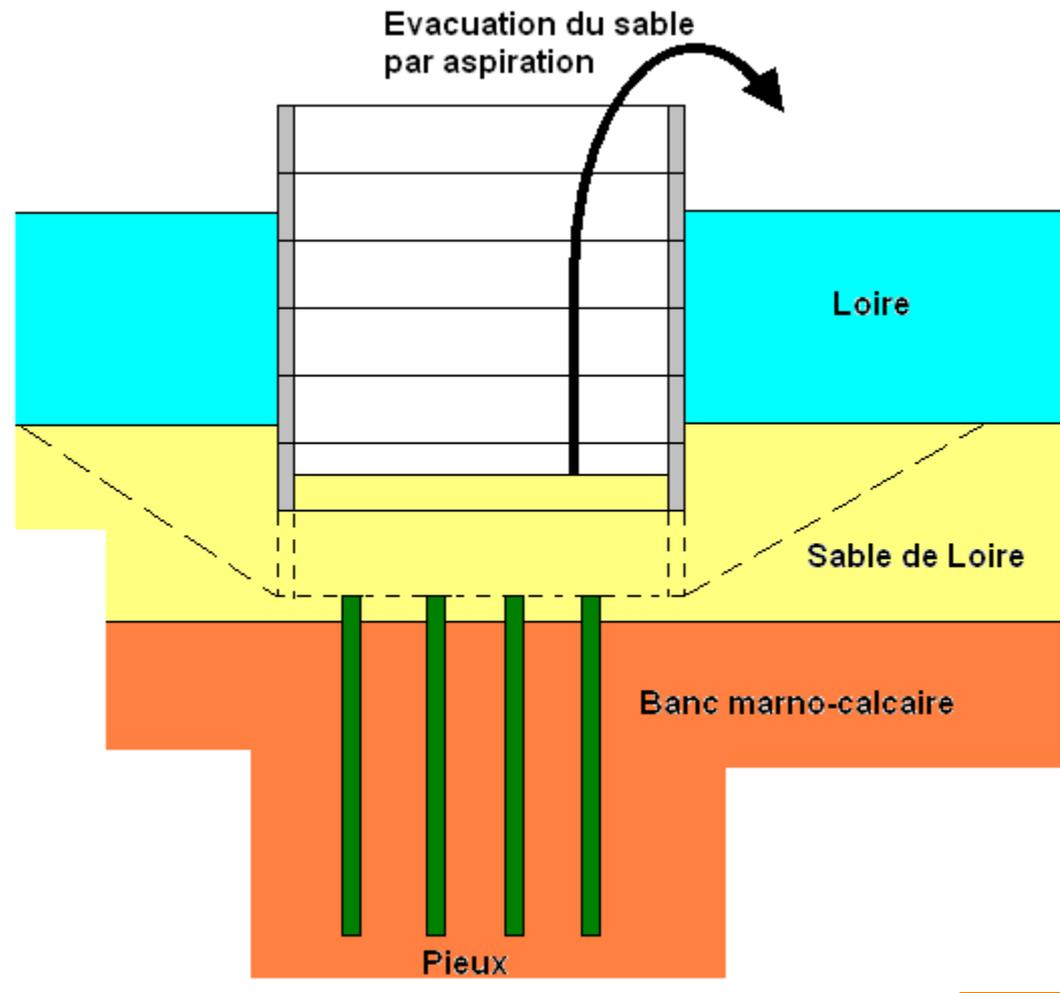
ELEVATION



COUPE B-B





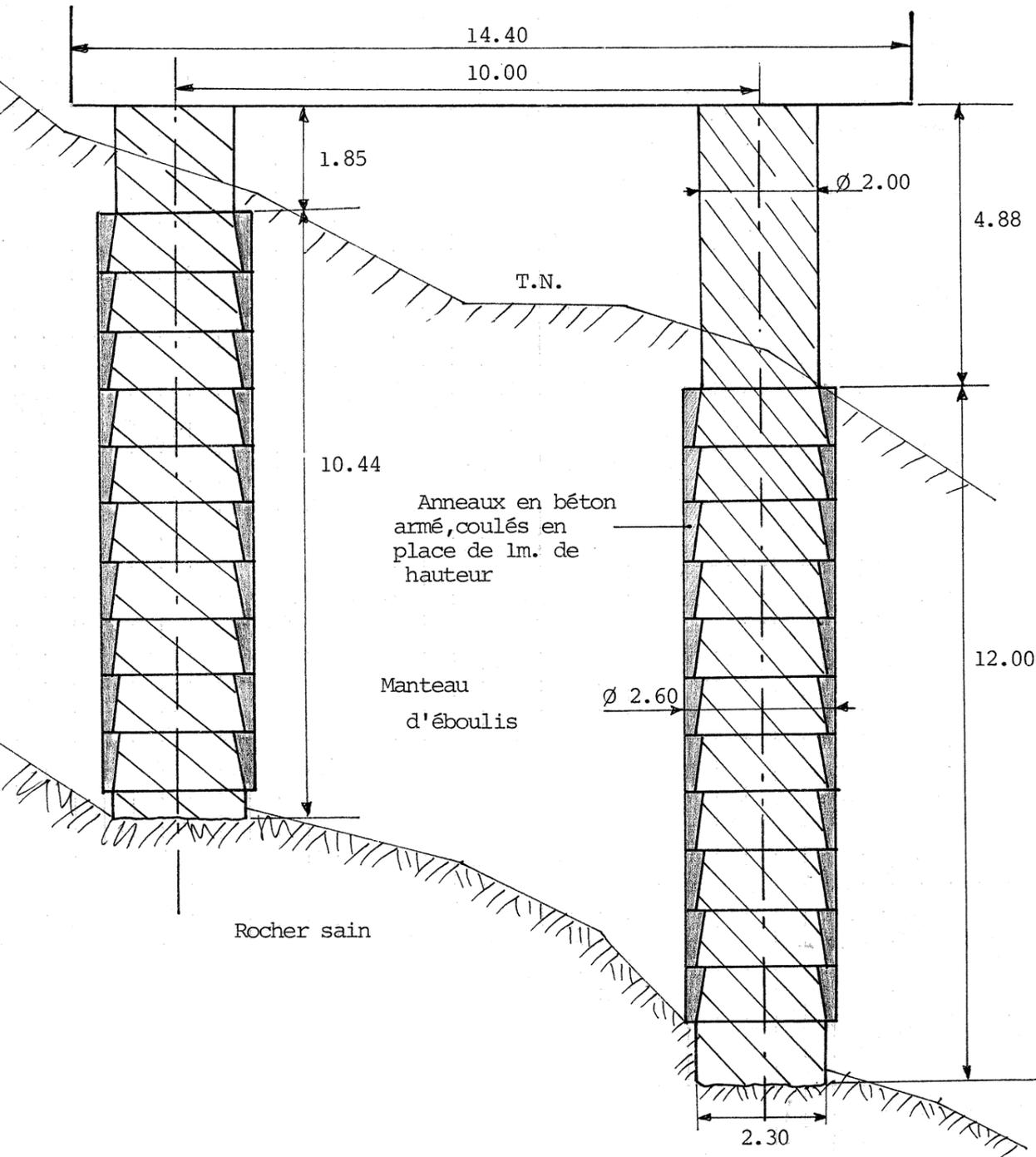


Fondation en site montagneux

Puits

Viaduc de la Colagne



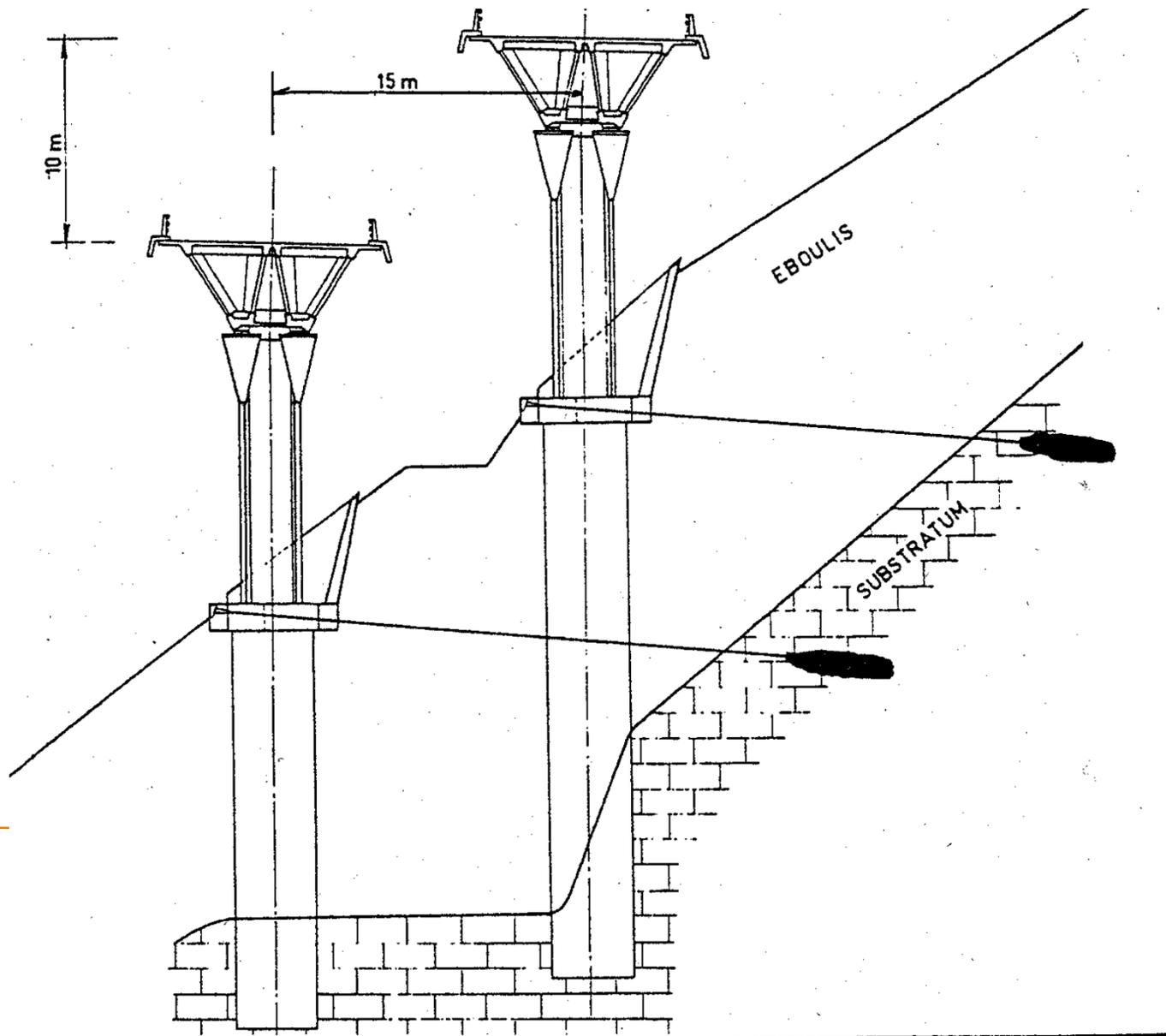


Fondation sur « puits de gros diamètres »





Fondation sur versant instable



Fondation en site karstique

Traitements de terrain

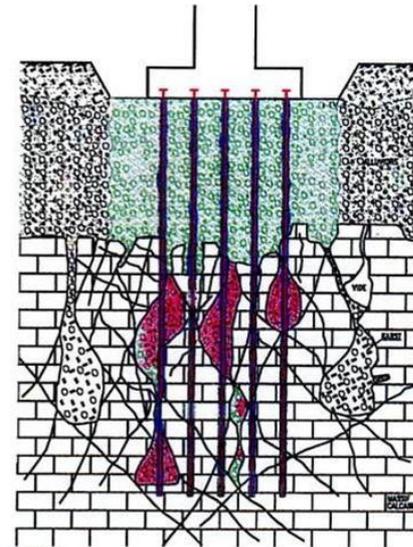
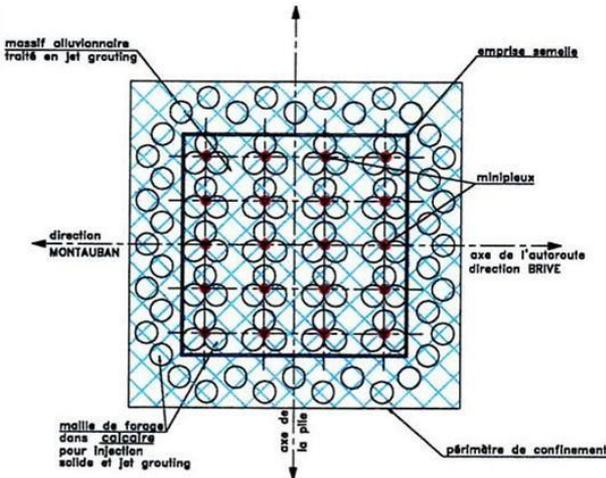


Photo 5
Massif de jet grouting en cours de recépage avec ses minipieux
Jet grouting block during strike-off with its mini-piles

© Botte Sade

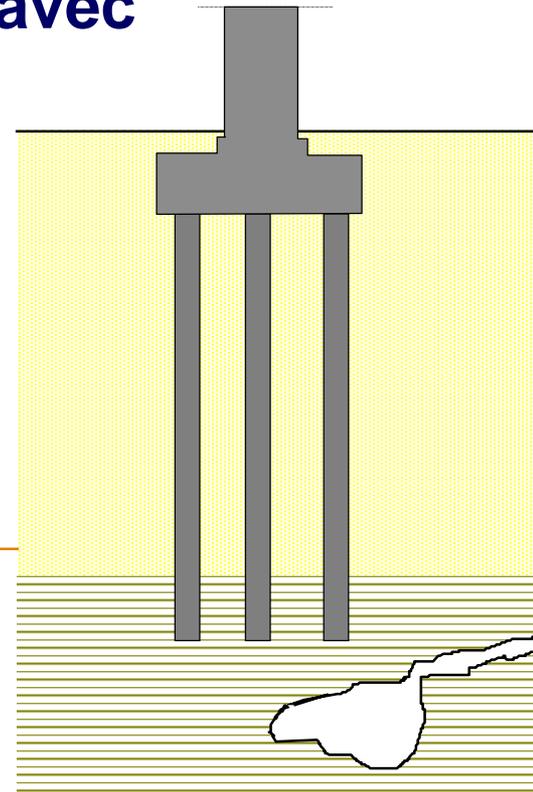
Fondations en site karstique

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

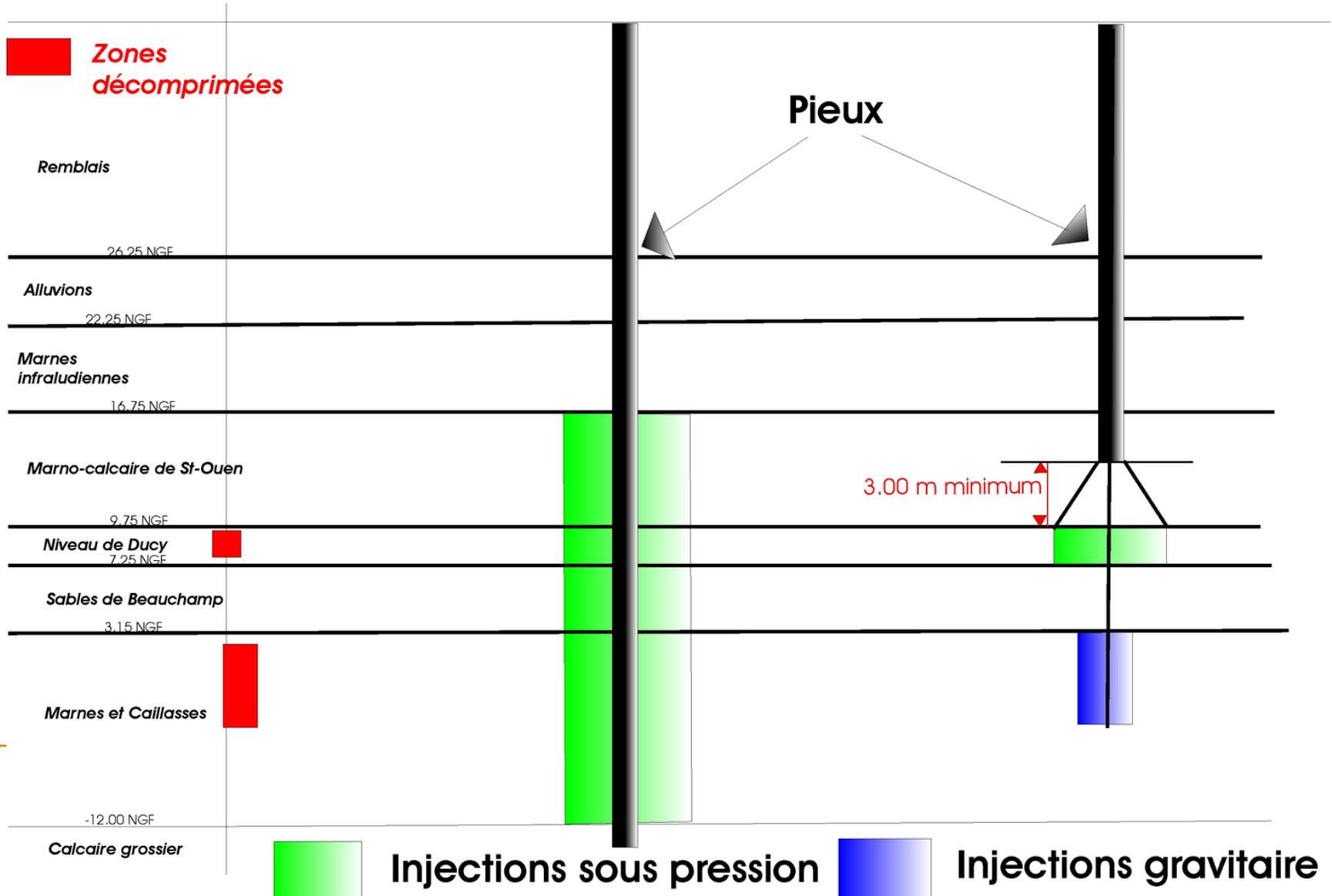


Évolution de la conception des fondations en site karstique

TCSP
Ouvrage OA2 D202

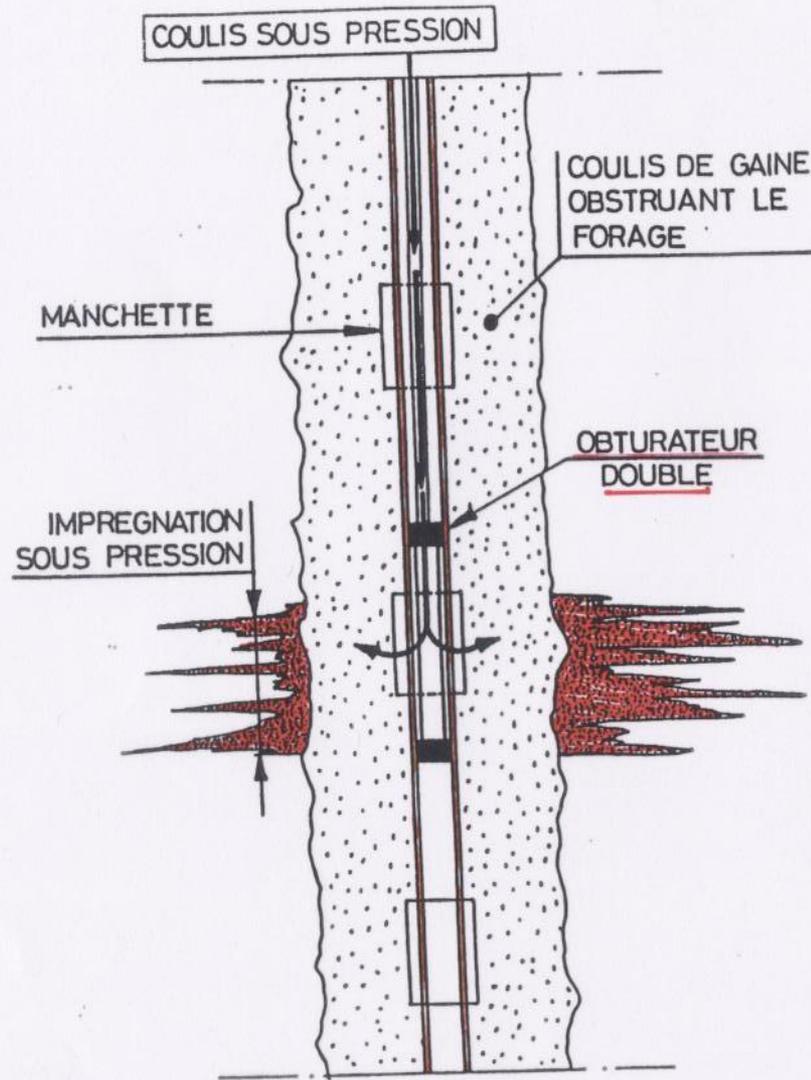
Etude initiale

Préconisations du LREP



Injections sous pression





INJECTION
COULIS BENTONITE-
CIMENT



MERCI DE VOTRE ATTENTION.