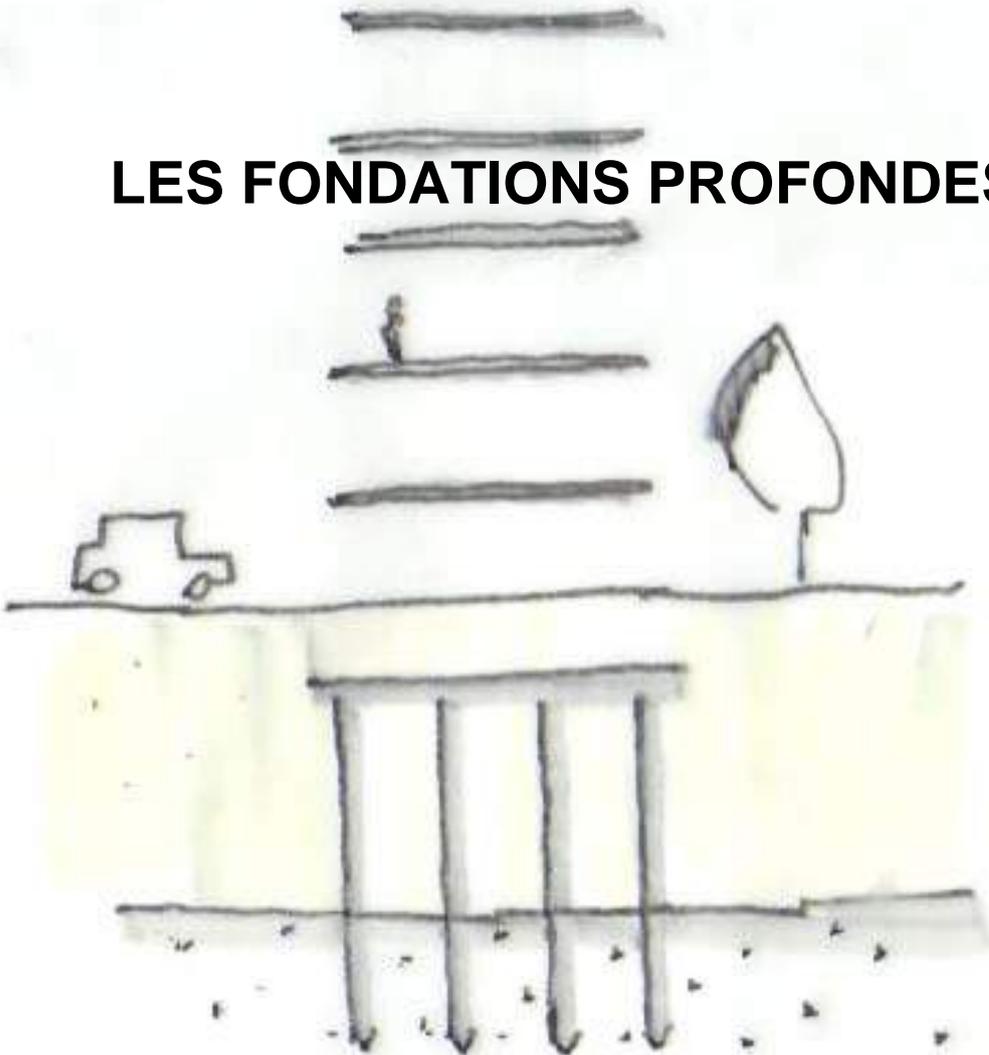




Techniques et procédés de construction
Youssef Diab

LES FONDATIONS PROFONDES



Mars 2008
Master 1 GENIE URBAIN

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION.....	3
II.	GENERALITE SUR LES FONDATIONS.....	4
A.	DEFINITION GENERALE	4
B.	LES FONDATIONS SUPERFICIELLES.....	4
C.	LES FONDATIONS PROFONDES	4
III.	LE SOL, GEOMATERIAU PORTEUR.....	5
A.	DEFINITION.....	5
B.	CLASSIFICATION, IDENTIFICATION.....	5
C.	CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES	6
1.	<i>Les masses volumiques.....</i>	6
2.	<i>Mesure de l'eau d'un sol.....</i>	7
3.	<i>Mesure et grandeur de l'état de compacité d'un sol.....</i>	7
D.	LA RECONNAISSANCE DES SOLS.....	7
1.	<i>Introduction</i>	7
2.	<i>La récupération du sol.....</i>	8
3.	<i>Les essais « in situ ».....</i>	8
4.	<i>Les essais en laboratoire</i>	9
IV.	LES FONDATIONS PROFONDES.....	11
A.	DEFINITIONS.....	11
B.	TYPES DE FONDATIONS PROFONDES	11
1.	<i>Puits</i>	11
2.	<i>Pieux</i>	12
3.	<i>Semelles et longrines.....</i>	17
4.	<i>Barrettes.....</i>	17
5.	<i>Micropieux.....</i>	17
6.	<i>Ancrage.....</i>	17
C.	CONDITIONS D'EMPLOI DES FONDATIONS PROFONDES.....	18
D.	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA CONSTRUCTION SUR PIEUX.....	18
V.	LES PATHOLOGIES DES FONDATIONS.....	19
A.	ORIGINES DES DESORDRES	19
B.	LES DESORDRES POSSIBLES.....	19
1.	<i>Dus aux essais géotechniques</i>	19
2.	<i>Dus à la structure de la fondation</i>	20
VI.	LES FONDATIONS, UNE DONNEE A INTEGRER DANS LE TRAITEMENT ARCHITECTURAL.....	21
VII.	CONCLUSION	23

I. Introduction

Un ouvrage, de quel type qu'il soit, s'appuie sur un sol d'assise et lui transmet donc un ensemble de charges. Entre le terrain et l'ouvrage, les fondations jouent le rôle d'interface. Elles sont adaptées au terrain et à l'ouvrage. Ainsi les fondations prennent des formes différentes pour répondre à la problématique des charges et contraintes (la recherche de l'équilibre).

Les fondations sont les parties enterrées d'un ouvrage, c'est un élément clé de toute construction. C'est pourquoi une attention toute particulière doit être faite lors de leur étude et de leur réalisation. Ce n'est pas parce que c'est la partie la plus basse d'une structure que c'est le premier élément dimensionné par un bureau d'étude. En effet, les fondations reprennent toutes les charges qui « leur tombent dessus » et donc doivent prendre en compte tout le reste d'un ouvrage de génie civil. C'est pourquoi le choix et le dimensionnement des fondations sont corrélés avec la conception du bâtiment.

Cela donne à la fondation une place importante qui en fait un point névralgique pour une construction. Ainsi les risques doivent être minimisés le plus possible. Ceux-ci ne viennent pas que de la structure supportée mais aussi du milieu environnant, notamment le sol. Celui-ci est en effet un matériau comme un autre à la différence qu'il est souvent très hétérogène et que par son côté naturel est en partie inconnu. Or la nature, la résistance mécanique d'un sol peut faire toute la différence sur la construction. On perçoit alors l'importance de la connaissance de la nature des sols d'assise.

Cette connaissance du sol se fait par des essais en laboratoire ou sur le terrain. Ceux-ci définiront donc ses caractéristiques, ce qui prendra une part importante dans le choix final du type de fondation. Car c'est en effet dans un sol stable, avec des risques minimisés à court, moyen et long terme de changement physique que l'ancrage des fondations sera préféré.

Nous nous sommes alors posés la question de savoir comment se fait le choix d'une fondation, tout en nous intéressant plus aux fondations profondes, sachant qu'il en existe plusieurs types, quels sont les enjeux et enfin quels sont les impacts ?

Pour y répondre nous allons tout d'abord présenter les différentes familles de fondations (superficielles et profondes). Ensuite nous verrons comment on détermine les caractéristiques physiques et mécaniques du sol. Après cela nous décrirons les types de fondations profondes existantes, avec leurs caractéristiques, leur mise en œuvre, leurs points forts et faibles. Nous continuerons avec une explication des différentes pathologies pouvant être subies par les fondations. Pour finir nous illustrerons nos explications avec un exemple d'ouvrage constitué de fondations profondes par pieux : l'ESSIE d'Amiens.

II. Généralité sur les fondations

A. Définition générale

Les fondations sont les parties enterrées d'un ouvrage qui lui servent de base par l'intermédiaire d'appuis. Elles transmettent au sol les charges que supportent ces appuis. Les particularités naturelles et artificielles du site, topographie, structure, sol, eau souterraine, ouvrages voisins doivent orienter le choix de la fondation à mettre en place. Ceci déterminera sa forme, le type de sa structure. La stabilité au glissement d'ensemble doit être contrôlée.

Il est rare qu'un seul type de fondation convienne à un ouvrage donné dans un site donné. Le projet doit en étudier plusieurs car on ignore souvent les particularités de la structure de l'ouvrage projeté et son aptitude à supporter des tassements par exemple. Les coûts et les possibilités de mise en œuvre sont souvent inconnus.

B. Les fondations superficielles

On appelle fondation superficielle une fondation dont le rapport de la largeur sur la profondeur est inférieur à 5. Ce type de fondations est employé lorsque le bon sol se trouve à une profondeur maximale inférieure à 2,50 m.

On distingue trois catégories de fondations superficielles :

- Les fondations par rigoles ;
- Les fondations par semelles ;
- Les fondations sur radier général.

Un bâtiment à fondations superficielles est directement en relation avec les sols. Les pieux sont à exclure de ce type de fondations car ils forment un intermédiaire entre le sol et le bâtiment.

Les sols devant supporter des fondations superficielles ne doivent subir aucun tassement ; un tassement provoquerait des désordres de structures dans le bâtiment ou les ouvrages voisins. Cependant, un sol présentant ce risque n'est pas toujours inapte à recevoir ce type de fondations, si ses caractéristiques mécaniques sont améliorées par déchargement, compactage, injection ou vibroflottation.

C. Les fondations profondes

Lorsque le rapport de la largeur à la hauteur d'une fondation est inférieur à un sixième et que la hauteur est supérieure à 3 mètres, il s'agit de fondations profondes ou "spéciales". Elles peuvent être préférées aux fondations superficielles pour des raisons qui ne sont pas forcément géotechniques. Dans la plupart des cas c'est toutefois l'impossibilité de fonder superficiellement qui détermine le choix, en raison de matériaux d'assise (le sol) trop hétérogènes ou de répartition de charges d'appuis trop différentes.

Avant de réaliser une fondation, la première chose à faire est de connaître le sol. Ce sont en effet ses conditions physiques, mécaniques qui vont définir le type de fondations mettre en place : des fondations superficielles ou des fondations profondes. Dans la majorité des cas on essaiera en effet de faire en sorte que la fondation repose sur un sol stable qui ne subit pas de changements mécaniques et physiques dans le temps. En général on cherche un sol où la teneur en eau est peu importante car celle-ci a des effets néfastes. C'est un élément qui peut perturber le sol, soit en se déplaçant, soit en s'évaporant, ce qui peut créer des tassements différentiels par exemple qui sont dommageable pour la structure portée.

Dans la partie suivante nous allons présenter les différents sols que l'on peut trouver sur un chantier d'infrastructures. Nous verrons les différentes classifications que l'on en fait, leurs différentes grandeurs mécaniques et enfin les essais que l'on peut réaliser pour les caractériser. Avec toutes ces données un rapport géotechnique est fait. Celui-ci va alors aider à justifier le choix du type de fondations à mettre en place.

III. Le sol, géomatériau porteur

A. Définition

Le sol peut avoir deux fonctions. Tout d'abord il peut servir comme matériau de construction pour la réalisation de remblais en talutage, des rives d'un bassin, de tranchées de VRD par exemple. Il peut aussi servir de support pour les fondations d'une route (assise de chaussée, couche de forme), d'un ouvrage d'art (quai, culée de pont), d'un bâtiment. Ce sont ces deux derniers exemples qui vont particulièrement nous intéresser par la suite.

Le sol se définit par rapport à la roche mère par une différence de rigidité. La roche est rigide, non homogène (constitué de plusieurs espèces chimiques) alors que le sol est un agrégat (ensemble compact mais dissociable) de constituants rigides. Le sol est meuble, poreux (présence de vides) et non homogène.

On distingue trois phases d'un même sol :

- la phase solide, elle comprend les grains, c'est-à-dire ce que l'on peut toucher,
- la phase liquide, principalement l'eau, cette dernière peut être présente sous différentes formes comme nous allons le voir par la suite.
- la phase gazeuse composée principalement d'air ou de méthane.

B. Classification, identification

Il y a plusieurs classifications de sols qui toutes mettent en évidence des sols de différents types. Les deux plus utilisées en France sont la classification LCPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées) et la classification GTR (Guide de Terrassements Routiers). Leur utilisation est définie par les grandes classes de constituants en fonction de leur taille :

- les fines : c'est l'ensemble des particules inférieures à 80 micromètres,
- les argiles : elles sont inférieures à 3 micromètres,
- les limons : ce sont des grains très fins constitués de silice ou de quartz,
- les sols fins : ils sont constitués pour grande partie de fines. Pour ces sols l'eau joue un rôle prépondérant. La présence d'eau agit sur leur plasticité et leur cohésion,
- les sols grenus ou pulvérulents : ce sont des sables ou des graves,
- les sols organiques : ce sont les terres végétales, la vase, les tourbes. Ce type de sol est systématiquement décapé et écarté de toute construction de génie civil.
- Les sols "sous produits industriels" : ils résultent de transformations industrielles (cendres, laitiers).

On peut caractériser et identifier les sols selon leur nature. Il s'agit de définir la nature des sols selon la proportion des différents éléments : fines, sables, gravier et leur importance.

L'analyse granulométrique des sols consiste à déterminer la proportion des éléments du sol selon leur dimension. Elle est différente de celle des granulats car elle doit prendre en compte la présence des fines que ne contiennent pas les granulats.

Les fines peuvent être caractérisées par différents essais.

- la sédimentométrie utilisée pour déterminer les dimensions et les proportions des éléments les plus fins des sols mal connus,
- l'essai d'Atterberg qui définit l'état physique du sol fin,
- l'essai au bleu de méthylène pour définir les argiles.

La classification des terrains est fondée sur les difficultés d'extraction ou sur les difficultés de compactage.

Pour la classification suivant les difficultés d'extraction, les terrains sont classés en sept catégories :

- Terrains ordinaires (terres végétales, sables...);
- Terrains argileux ou caillouteux non compacts (argiles, pierres, tufs...);
- Terrains compacts (argiles compactes, glaises...);
- Roches;
- Roches dures (emploi d'un marteau-piqueur, par exemple);

- Roches très dures (emploi de la mine) ;
- Roches de sujétion.

Pour la classification suivant les difficultés de compactage, les matériaux sont classés en six familles auxquelles sont associées des lettres alphabétiques, de A à F :

- A, fins (limons, argiles) ;
- B, sableux ou graveleux avec fines (sables et graves argileux) ;
- C, fines et gros éléments (argiles à silex, alluvions) ;
- D, sols et roches insensibles à l'eau (sables et graves propres) ;
- E, roches évolutives (craies, schistes) ;
- F, matières putrescibles ou combustibles (tourbes, gypses, résidus industriels polluants).

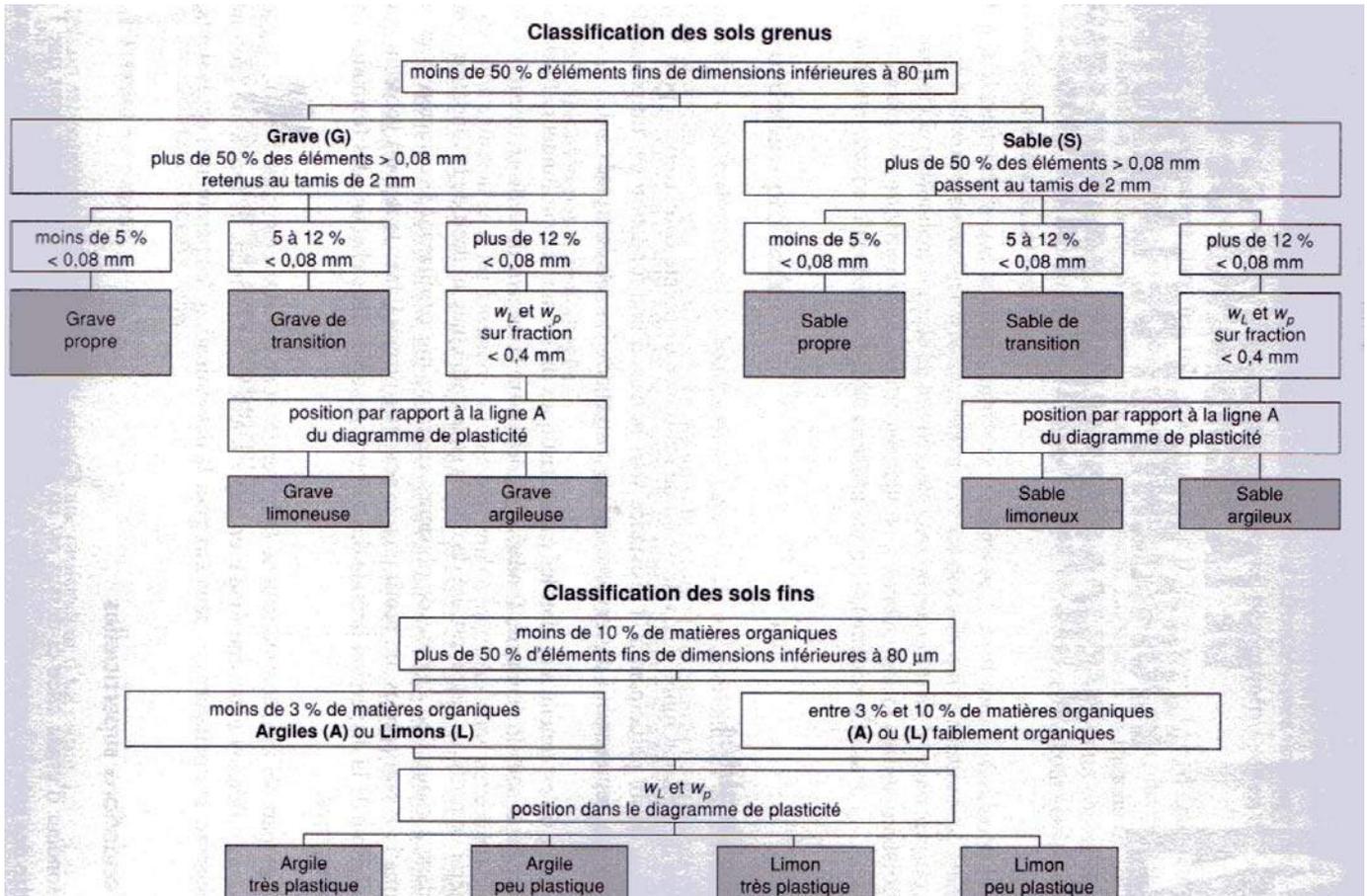


Figure 1 classification des sols "règles techniques de conception et de calcul des fondations", page 129

C. Caractéristiques physiques et mécaniques

Les sols possèdent plusieurs grandeurs caractéristiques qui permettent de les définir physiquement et mécaniquement.

1. Les masses volumiques

La masse volumique apparente se calcule à partir d'échantillons de sol prélevés in situ et donc dans un état naturel. Le poids ou la masse volumique des sols varie beaucoup en fonction de la présence d'eau dans ces sols.

La masse volumique apparente sèche est le rapport entre la masse des grains sur le volume total du sol. Dans ce rapport on ne tient pas compte de la masse d'eau présente dans le sol.

La masse volumique absolue est le rapport de la masse des grains sur leur volume. On ne prend plus en compte le volume occupé par les vides (air + eau). La masse volumique absolue reste sensiblement constante pour les différents sols

2. Mesure de l'eau d'un sol

Il est nécessaire de quantifier la présence ou la proportion d'eau dans un sol par rapport à la masse des grains du sol. C'est la teneur en eau.

Le degré de saturation est le rapport du volume d'eau avec le volume des vides.

3. Mesure et grandeur de l'état de compacité d'un sol

L'indice des vides est le rapport du volume des vides et du volume des grains.

La compacité est le rapport du volume des grains et du volume total du sol.

La porosité est le rapport du volume des vides et du volume total du sol. Elle caractérise l'état des vides d'un sol.

D. La reconnaissance des sols

1. Introduction

L'examen et l'étude des sols sur lesquels on souhaite établir les fondations d'un bâtiment sont des opérations de grandes importances. Cette importance est assez souvent sous-estimée, or une étude insuffisante peut avoir des conséquences financières et techniques graves et entraîner des retards importants dans l'exécution des travaux.

Les objectifs de la campagne de reconnaissance des sols sont multiples ; celles-ci pouvant intervenir au stade des pré études ou au cours de l'avancement du projet. En pré études, la campagne est lancée pour :

- La recherche de terrains adaptés à l'implantation d'ouvrages importants,
- L'ébauche d'un plan de masse en tenant compte des aléas du sol. On peut alors modifier le plan de masse pour optimiser l'adaptation des constructions.

Ainsi, trois niveaux d'études peuvent être définis :

- Le niveau 0 est une situation de difficultés : reconnaissance générale. Celui-ci est défini après les études de dimensionnement de niveau I et II à entreprendre.
- Le niveau I qui est le pré dimensionnement,
- Le niveau II qui est l'étude géotechnique détaillées.

Elaboration du projet	Etudes géotechniques	
Phase administrative	Reconnaissance générale	Etudes de dimensionnement
Etudes préliminaires	Etablissement du modèle géotechnique pré liminaire	
Avant-projet	Etablissement du modèle géotechnique	Pré dimensionnement des ouvrages
Projet		Dimensionnement final des ouvrages

Les reconnaissances peuvent donc être réalisées à n'importe quel stade du projet. Il y a plusieurs façons de les réaliser. Nous allons voir par la suite différents essais couramment utilisés. Ceux-ci sont classés par le lieu où ils sont réalisés. En effet ils peuvent se faire sur le chantier en prenant tout simplement un échantillon de sol et en le testant dans un laboratoire mobile. Parfois il n'y a pas assez de place sur le chantier ou les essais demandent un matériel trop sophistiqué, les essais sont alors faits hors site dans un laboratoire.

Les résultats des essais permettent de choisir le ou les types de fondations définitives nécessaires à la réalisation du projet et de calculer au plus juste le coût de ces fondations.

Les essais, mêmes les plus simples, sont très importants en raison :

- De leurs incidences en matière de responsabilité des constructeurs ;
- Des conséquences financières résultant d'une mauvaise estimation du coût réel des ouvrages par rapport à des prévisions faites sur un « bon terrain ».

2. La récupération du sol

Avant de procéder aux essais ou pour donner la simple nature du sol, il faut en extraire une partie afin de réaliser des échantillons analysables. Cela peut se faire par différents procédés, ceux-ci se font par excavations ou forages. On relève :

- les niveaux des différentes couches rencontrées,
- leur épaisseur,
- la profondeur du sondage,

Il faut être attentif à ce que ces sondages soient réalisés en dehors des futurs appuis de la construction.

Par ailleurs, une fois les sondages réalisés, les trous de sondages doivent être remblayés et reconstitués au plus proche possible du sol préexistant.

Ces renseignements sont reportés sur une coupe donnant le niveau du terrain naturel rattaché à un système de nivellement.

a) Forages en puits ou tranchées :

Ils sont réalisés par des engins de terrassement : pelle mécanique pour des profondeurs inférieures à 6 mètres, benne preneuse pour puits tubulaires de diamètre 500 à 1200 pour des profondeurs plus importantes.

Ces sondages sont implantés en dehors de l'emprise de la fondation.

b) Sondages de reconnaissance :

Ils atteignent de grandes profondeurs, d'un diamètre de 100 à 200 mm et permettent de prélever des échantillons. Les différents procédés sont :

- la tarière dans les sols meubles : échantillons remaniés
- la rotation : tube creux équipé d'une trousse coupante à l'extrémité. La carotte est de diamètre 70 à 140 mm.

3. Les essais « in situ »

Ce sont les essais réalisés sur le site, c'est-à-dire directement sur le chantier. Ils sont souvent simple, rapide et ne demande aucun matériel spécialement compliqué. Il y a quand même des « règles de l'art » à respecter pour qu'il soit possible de caractériser fidèlement le sol en place.

a) Essais géophysique :

Utilisés initialement pour la prospection pétrolière, ils ont été adaptés à la reconnaissance des sols. Il existe là aussi plusieurs méthodes :

- Une méthode fait appel à la résistivité électrique des sols, localisant la présence d'eau et les sols perméables.
- La méthode sismique mesure la vitesse de propagation d'une onde, créée par explosion, dans les différentes couches. Des capteurs mesurent les temps de parcours directs et réfractés (sismique réfraction). Les résultats permettent de déterminer la nature des roches ou la présence de failles ou fissures.

b) Essai pressiométrique :

Il est utilisé pour tous les types de terrains sauf les terrains rocheux. Il permet de mesurer la déformation latérale de la paroi d'un forage par l'introduction d'une cellule de mesure protégée par une enveloppe de caoutchouc. L'appareillage comprend une sonde, un contrôleur pression volume et des tubulures. Un sondage pressiométrique est précédé de l'exécution d'un forage.

L'essai pressio-Ménard consiste à appliquer progressivement par palier, une pression uniforme sur la paroi du forage et à mesurer l'expansion de la sonde. Il permet d'obtenir une caractéristique de déformabilité du sol (module pressiométrique) et une caractéristique de rupture (pression limite).

V_{60} : variation de volume à une minute.
 p_0 : pression initiale du terrain au repos
 p_f : pression de fluage
 p_l : pression limite
 E_p : module pressiométrique.

c) Essai au pénétromètre statique :

C'est le principe d'une structure de réaction qui peut transmettre un effort supérieur à 100kN. Le fonçage se fait à vitesse constante. On mesure alors la vitesse de pénétration, la résistance de la cône, le frottement latéral local et la pression interstitielle. La lecture des mesures se fait en continue.

Le pénétromètre statique de référence (à l'origine Standard Penetration Test) a une pointe fixe avec un cône d'angle au sommet de 90° équipé d'un manchon de frottement latéral, Φ 35.7mm, action 10 cm².

d) Essai de pénétration dynamique (PDA) NFP 94-114 :

C'est un essai qui teste le terrain en place et fournit une caractéristique du sol : la résistance dynamique. L'essai permet d'apprécier la succession des couches, l'homogénéité d'une couche ou une anomalie et la position d'une couche résistante. L'essai sert à orienter le choix des fondations. La formule la plus utilisée pour déterminer la résistance dynamique est la formule des Hollandais :

$$Rd = \frac{M^2 h}{e(p + M)} \frac{1}{A}$$

M : poids du mouton (63.5 kg)

P : poids du train de tige (kg)

h : hauteur de chute du mouton (0.75 m)

$$e : \text{refus (cm)} = \frac{10cm}{N}$$

N = nombre de coup

A : section de la pointe (cm²).

Cet essai est exécuté avec un marteau qui produit des chocs sur la tête de la tige enfoncée dans le sol. On mesure le nombre de coups nécessaires pour obtenir un enfoncement de 1 cm.

e) Essai au sismomètre (vanne test):

Le test au sismomètre est utilisé pour mesurer la résistance en cisaillement et de la cohésion dans les sols cohérents de faible consistance (argiles molles).

Terrains de faible résistance :

$$r = 10 \text{ mm}$$

$$h = 76 \text{ mm}$$

Terrains de grande résistance :

$$r = 32.5 \text{ mm}$$

$$h = 130 \text{ mm}$$

Connaissant T, la cohésion C est :

$$C = \frac{3T}{28\pi r^3}$$

4. Les essais en laboratoire

Il y a plusieurs essais différents qui ont des objectifs différents. Ils peuvent servir à juste identifier le sol ou alors à connaître les paramètres de résistance, déformabilité ou de perméabilité de celui-ci. Ceux-ci peuvent être fait en complément des essais in situ ou indépendamment. Après la première campagne de sondages, il y a lieu d'en réaliser une seconde, destinée à quadriller le projet définitif par des essais de laboratoire. Les essais de laboratoire apportent les informations nécessaires à une formulation mathématique des fondations.

a) Les paramètres de résistance du sol

C'est l'essai de cisaillement. L'étude expérimentale est réalisée avec un échantillon de section rectangulaire parfaitement encastré, sur lequel on applique un effort variable uniformément réparti dans le plan de (S).

Il est caractérisé par sa cohésion et son angle de frottement. Ces paramètres sont déterminés à partir d'essais effectués en laboratoire sur des échantillons intacts (cisaillement à la boîte, essai à l'appareil triaxial).

Selon les conditions de drainage et la vitesse d'application des sollicitations, on distingue plusieurs types d'essais.

L'essai non consolidé non drainé permet de déterminer les caractéristiques non drainées correspondant au comportement à court terme d'un sol fin.

L'essai consolidé non drainé permet d'étudier la variation de la résistance au cisaillement non drainé du sol en fonction de la pression de consolidation. En mesurant la pression interstitielle il est possible de déterminer les caractéristiques intergranulaires ou effectives des sols saturés.

L'essai consolidé drainé. Il permet de déterminer les caractéristiques intergranulaires ou effectives correspondant au comportement des sols grenus perméables et au comportement à long terme des sols fins.

b) Les paramètres de déformabilité du sol

La compressibilité d'un sol est caractérisée par son indice des vides initial, sa pression de préconsolidation et son indice de compression.

c) La perméabilité du sol

L'essai ne doit servir qu'à la détermination du coefficient de consolidation. Elle n'est en générale pas représentative de la perméabilité globale d'un terrain.

IV. Les fondations profondes

A. Définitions

Les fondations profondes regroupent tous les types de fondations pour lesquelles le rapport H / B (hauteur de la fondation sur la base) est supérieur à 6, ou prenant appui sur un sol d'assise situé à plus de trois mètres du niveau le plus bas de l'ouvrage :

$$\frac{\text{Hauteur de la fondation enterrée dans le sol}}{\text{Largeur de la base}} > 6 \quad \text{ou} \quad H > 3 \text{ m}$$

(schéma)

Les fondations profondes permettent d'aller chercher la couche résistante dans le sol à une profondeur adéquate, en traversant les couches de qualité moindre.

Au vu de la taille du fût, l'effet de résistance à la pointe et la résistance au frottement peuvent être conjugués. La fondation profonde présente une surface d'appui sur l'horizon d'assise égale à sa section. Cette surface d'appui engendre une réaction du sol que l'on appelle terme de pointe.

Lorsque la fondation présente une dimension verticale importante, la surface de contact entre les flancs de la fondation et le terrain peut être le siège de frottements (dans les deux sens). Suivant le mode de réalisation ce frottement peut être significatif. Les efforts mobilisés au niveau de ce contact constituent le frottement latéral.

Ce sont des fondations dont le calcul de portance intègre le terme de profondeur.

Les fondations profondes sollicitent le sol par deux types d'action :

- le frottement de la fondation sur le sol qui l'entoure, et qui offre ainsi une résistance à l'enfoncement.
- le terme de pointe qui correspond à l'appui vertical de la fondation sur un sol de qualité acceptable.

B. Types de fondations profondes

1. Puits

Pour un sol d'assise compris entre 3 et 8 m, les puits sont la technique de fondation recommandée.

Les puits sont creusés à l'aide d'une pelle mécanique ou d'une benne preneuse, pour le réglage du fond il est nécessaire de procéder à une intervention manuelle. Selon la qualité des sols le blindage peut être prévu, provisoire (bois ou cercle métallique) ou définitifs (virolles en béton).

Définition :

Ce système est utilisé lorsque l'ouvrage est lourd et qu'il faut aller chercher en profondeur une couche assez résistante pour le supporter. On fonde la construction sur des piliers dont la section totale est suffisante pour ne pas faire supporter au terrain une pression supérieure à celle préconisée par l'étude faite.

Caractéristiques des puits :

Les parois de forage sont toujours blindées.

Les puits se distinguent de pieux par le fait :

- qu'ils sont parfois creusés à la main
- qu'ils ont toujours une section importante (1,10 à 2,50 m²)
- qu'ils peuvent être exécutés en maçonnerie
- qu'ils ne peuvent être réalisés que dans des terrains dénoyés en terrain peu cohérent sauf si la nappe phréatique est rabattue à l'extérieure du puit)
- qu'ils fonctionnent presque toujours en pointe

La section des puits est très variable : circulaire, carrée, rectangulaire, semi-circulaire, en angle, ...

Le dosage du béton sera de 250 à 300 kg/m³.

Leur profondeur est limitée par les conditions d'exécution en ce qui concerne les puits manuels (problèmes de ventilation, venues d'eau) ou par la capacité des engins de terrassement (pelle

mécanique, tarière gros diamètre, ...). Des profondeurs de 40 à 50 m peuvent être couramment atteintes si le terrain s'y prête.

La transmission des charges de la superstructure sur les puits s'effectue par l'intermédiaire de semelles B.A. (15 à 20 cm) qui en assure une répartition satisfaisante.

Remarque :

L'église du sacré cœur de Montmartre est fondée sur des puits carrés de 2.5 à 5 m de côté et 30 m de profondeur, creusés à la main.

La force portante des puits est fonction de leur section. Afin de ne pas l'augmenter exagérément, lorsqu'on veut faire croître la portance d'un puit, il est possible en terrain favorable (cohérent) de procéder à un élargissement de la base du fût en créant une « patte d'éléphant » qui sera limité à 2 fois le diamètre du puit (réalisation manuelle).

Compte tenu de leur section importante, les puits sont implantés :

Soit directement à l'aplomb des charges ponctuelles

Soit sous les murs ou voiles en cas de charges linéaires avec un espacement régulier variable.

Il est également possible d'appliquer des charges excentrées sur les puits avec éventuellement recours à des longrines de redressement.

Blindage :

Le blindage des puits est obligatoire.

Pour les puits circulaires, on pourra utiliser des voliges en bois d'une épaisseur de 27mm (minimum qui seront disposées côte à côte et maintenues par des cercles métalliques disposés tous les mètres.

Dans le cas de puits carrés ou rectangulaires, le blindage est généralement réalisé en planches jointives maintenues contre les parois par des cadres en bois bloqués par des coins ou des cadres métalliques réglables.

Bétonnage :

Le remplissage se fait au moyen de maçonnerie, de gros béton de cailloux dosé de 250 à 300 kg/m³.

Il pourra être exécuté aux tubes, à la gouttière ou encore à la benne automatique. Le béton sera déversé doucement pour ne pas détériorer les parois.

2. Pieux

Les pieux sont des éléments ponctuels pouvant s'appuyer sur un sol compris entre 2 et 20 m (il est même possible de les faire descendre encore plus). Il est nécessaire de faire la distinction entre les pieux préfabriqués et ceux exécutés in situ.

Définition :

Les pieux sont des fondations profondes réalisées mécaniquement. Ils peuvent être en bois, en béton armé ou bien métalliques.

Il existe 2 grands types de pieux : les préfabriqués et les coulés en place.

En fonction de leur type et de leur nature, on distingue sept techniques principales de mise en place :

- battage : on appelle fiche la longueur dont un pieu est enfoncé dans le terrain d'assise. La mise en fiche consista à positionner la pointe du pieu avant son battage. Le battage consiste à enfoncer un pieu après sa mise en fiche en frappant sur sa tête au moyen d'une sonnette munie d'une masse appelée « mouton ».
- fonçage
- vibro-fonçage
- lançage
- vissage
- tube moulé ou pilonné
- foré

On appelle refus d'un pieu son enfoncement sous un nombre déterminé de coups de moutons appelé volées.

Le pieu a une force portante (surcharge qu'il transmet au sol) qui dépend du frottement latéral du pieu contre le terrain à traverser, de la compression produite dans le terrain par son enfoncement et par l'enfoncement des pieux voisins et de l'effet de point qui désigne la résistance rencontrée par la partie inférieure du pieu qui pénètre dans le terrain d'assise.

Si le pieu rencontre un terrain d'assise solide, il faut déterminer la résistance maximale du pieu pour éviter que son taux de travail admissible ne dépasse les limites imposées par la nature du matériel. Lorsque les pieux ont été battus, il faut les couper au niveau fixé par les plans de fondation. Cette opération s'appelle le recépage.

a) Préfabriqués

Les pieux préfabriqués sont constitués en un unique composant sans raccord. Leur longueur dépend de la charge à supporter prévue. Leur mise en place peut être effectuée par battage ou vibrofonçage de manière inclinée ou verticale. Il existe 3 types de pieux préfabriqués.

En acier

Le pieu préfabriqué en acier peut être un profilé en forme de H pouvant atteindre 50 cm, il peut prendre la forme d'un tube à section circulaire ou polygonale avec un diamètre de 30 à 60 cm. Selon le degré d'agressivité du terrain et sa nature, le fût métallique sera protégé ou non par des injections de béton.

(Schéma)

En béton armé

Le pieu préfabriqué en béton armé se compose de 3 éléments :

- le sabot : point en acier ou en fonte qui permet la pénétration du pieu dans le sol.
- le corps : il possède une section carrée, polygonale ou circulaire avec un diamètre allant de 30 à 60 cm. Pour reprendre les contraintes de flexion dues au transport, à la mise en œuvre ou au levage, le pieu est guindé d'armatures transversales et longitudinales.
- la tête constituée en béton fretté permet de résister aux contraintes de battage. Le battage n'est jamais effectué immédiatement sur le pieu mais sur un casque de battage métallique ou en bois. Ainsi la tête reste protégée.

(Schéma)

En bois

Le pieu préfabriqué en bois était très utilisé dans le passé pour soutenir des ouvrages importants. Désormais il est remplacé par l'utilisation de pieux en acier ou béton. Dans certaines régions du monde possédant une grande quantité de bois, la constitution de pieux en bois comme fondation est toujours réalisée. Cependant le pieu en bois possède un sérieux inconvénient, celui du pourrissement. Ceci se produit en présence temporaire d'eau due par exemple à des variations de nappes phréatiques. Mais si le bois est entièrement immergé il se tient bien (exemple : Venise !).

b) Pieux exécutés in situ

Définition

Les pieux exécutés in situ sont définis par 5 critères :

- Le tubage : utilisé ou non dans la réalisation des pieux. C'est un guide. A l'aide d'un sabot ou d'un bouchon en béton il pénètre dans le sol. En général, il est retiré lors du bétonnage. Il est également possible de maintenir les sols grâce à l'injection d'une boue bentonitique.
- Le mode de mise en place du tubage : réalisé par sur la tête du tube, vibrofonçage, vérinage ou rotation du tube.
- Le forage : réalisé par pilonnage et compression du sol ou excavation de terres à l'aide d'une tarière ou d'une benne preneuse. Pour les sols rocheux, une cavité peut être créée à la base du pieu par explosion.
- Les armatures : selon les contraintes agissant sur le pieu, les armatures sont ou non nécessaires. Dans le cas d'efforts de cisaillement ou traction, les armatures sont indispensables. Elles sont mises en place avant le bétonnage.
- Le mode de bétonnage : c'est la mise en œuvre du béton. Il se fait mécaniquement par pilonnage du béton sous pression ou par vibration.

Le bétonnage se réalise à la base du pieu grâce à un tube plongeur. Double avantage de cette méthode : permet de garder l'homogénéité du béton et de maintenir en surface la couche de béton en contact avec la boue bentonitique. Elle sera retirée avant la pose des longrines ou semelles.

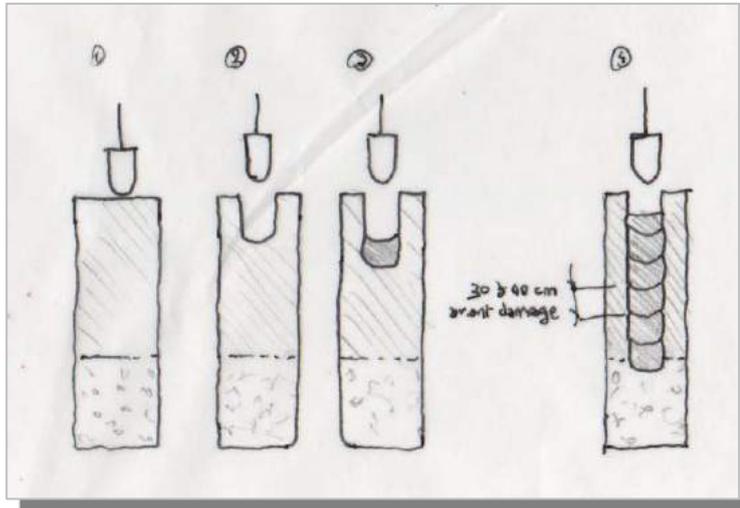
Le choix du type de pieu dépend :

- De la nature des couches de terrain
- Des surcharges et des efforts à reprendre
- De la technicité de l'entreprise
- De l'environnement du chantier

- Du coût d'exécution.

Le pieu pilonné sans tubage

La mise en place d'un pieu pilonné sans tubage s'effectue grâce à la chute d'un mouton cylindro-conique qui perce un trou circulaire. Le béton (consistance ferme) est compressé à l'aide d'un mouton de 1000kg. Grâce à ce procédé on peut réaliser des pieux flottants nécessaires lorsque la couche solide est trop profonde pour être atteinte. Ainsi c'est la résistance aux frottements qui est uniquement sollicitée.



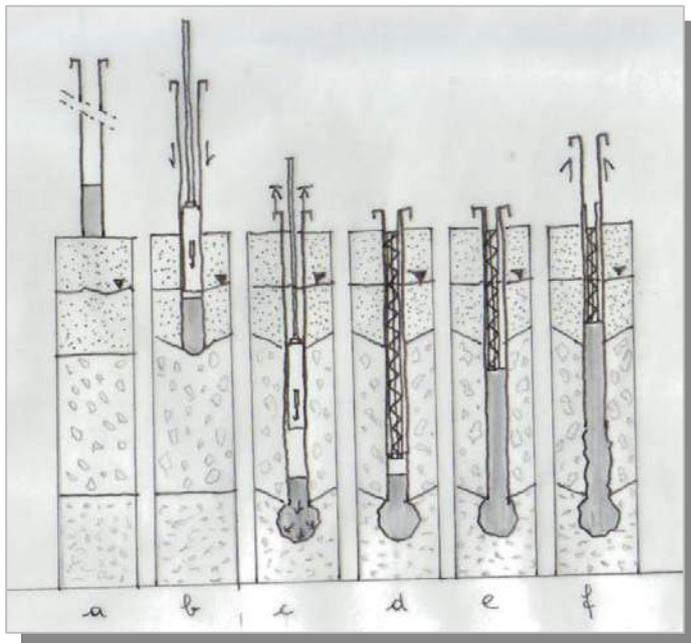
- a- Mise en fiche
- b- Fonçage
- c- Bétonnage
- d- Pieu terminé

Pieu pilonné sans tubage

Source : La fabrication du bâtiment, le gros œuvre

Le pieu pilonné à tube battu

Un bouchon de béton est positionné à la base du tubage sur lequel le battage est effectué jusqu'à la couche d'assise ce qui comprime le sol avoisinant. Le béton est introduit dans le tube par petite quantité puis pilonné et refoulé dans le terrain. La résistance aux frottements est améliorée par l'augmentation de la rugosité du pieu. Dans le temps que le bétonnage on effectue l'extraction du tube en prenant garde à ce que le béton ne soit jamais en contact avec le terrain.



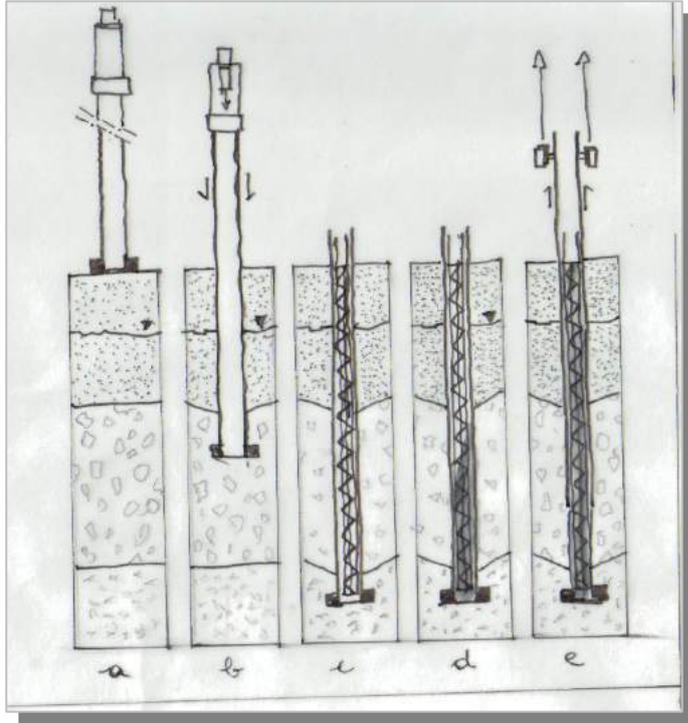
- a- Mise en fiche, réglage d'un bouchon de béton sec
- b- Pilonnage en fon de tube du bouchon, refoulement du sol
- c- Réalisation de la base élargie dans la couche d'ancrage
- d- Mise en place d'armatures partielles ou totales
- e- Bétonnage à sec
- f- Extraction du tube

Exécution de pieux battus pilonnés

Source : La fabrication du bâtiment, le gros œuvre

Le pieu moulé à tube battu

Le tube comprenant une base métallique ou armé est battu jusqu'à la couche d'assise. Le béton est introduit dans la totalité du tube puis celui-ci est retiré. Pour ce type de pieu il s'agit de la résistance à la pointe majoritairement.



- a-** Mise en fiche, réglage, pose d'une plaque perdue
- b-** Fonçage du tube par battage au mouton hydraulique ou diesel
- c-** Mise en place d'armatures partielles ou totales
- d-** Bétonnage à sec
- e-** Extraction du tube (vibré si nécessaire)

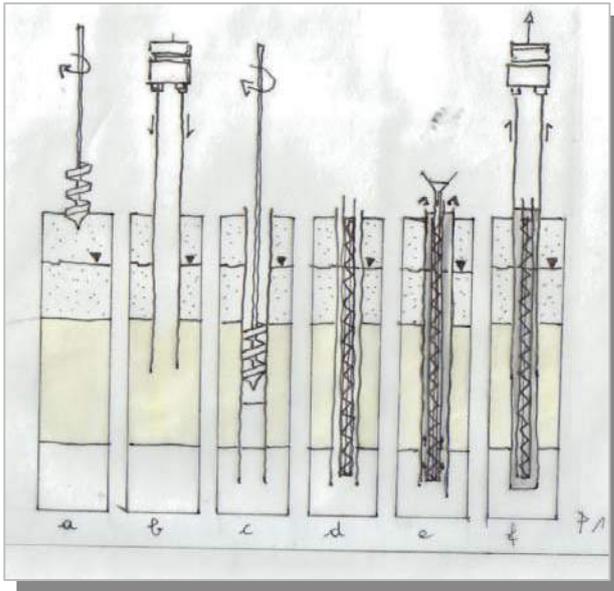
*Exécution de pieux moulés dans le sol à tube battu
Source : La fabrication du bâtiment, le gros œuvre*

Le pieu foré sans tubage

L'utilisation de ce type de pieu doit se faire dans des terrains homogènes suffisamment cohérents et en l'absence de nappes phréatiques. La mise en place s'effectue à l'aide d'un forage à la benne preneuse ou tarière. Le bétonnage est réalisé avec un tube plongeur dès que la profondeur désirée est atteinte.

Le pieu foré tubé

Selon la présence de nappe ou la nature du terrain, le forage est protégé par un tube qui sera mis en place par vibrofonçage, rotation ou louvoisement. La base du tube doit toujours se trouver à une plus grande profondeur que celle du forage et jusqu'au sol d'assise. Le bétonnage se fait avec un tube plongeur puis le tube de travail est retiré.



- a-** Mise en fiche, réglage, perforage
- b-** Fibro-fonçage du tube de travail
- c-** Forage et extraction des terres
- d-** Mise en place d'armatures partielles ou totales
- e-** Bétonnage au tube plongeur
- f-** Extraction du tubage de travail

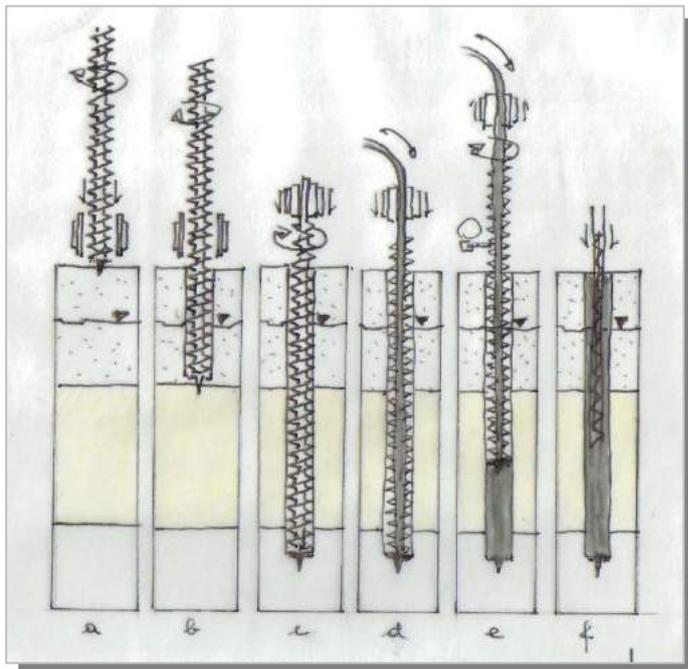
Exécution de pieu foré tubé
 Source : La fabrication du bâtiment, le gros œuvre

Le pieu foré sous boue

Pour les terrains instables, le tubage pour le maintien des terres se fait à l'aide de boue thixotropique. Le bétonnage se fait par la base du pieu à l'aide d'un tube plongeur ainsi la boue remonte au fur et à mesure que le béton coule. La boue est récupérée puis traitée avant réemploi. (Schéma)

Le pieu foré à la tarière creuse

Le forage du pieu est obtenu par vissage de la tarière dans le sol par compression des terres. Sa longueur doit être égale à la hauteur du pieu. Le bétonnage s'effectue quand la profondeur est atteinte et sous pression de manière ininterrompue à travers l'axe creux de la tarière au fur et à mesure que celle-ci est remontée. Il est indispensable que le terrain ne comporte pas d'obstacles.

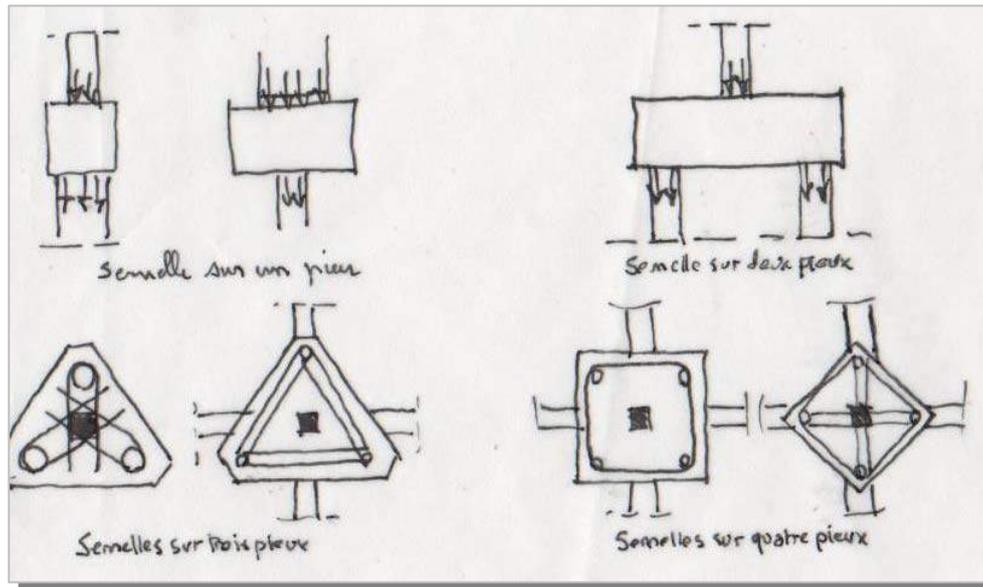


- a-** Mise en fiche, réglage des guides de forage
- b-** Forage
- c-** Ancrage par rotation et avec poussée des outils
- d-** Injection de béton dans l'axe creux de la tarière
- e-** Descente du tube plongeur, remontée de la tarière en rotation lente, nettoyage de la tarière et bétonnage contrôlé en continu
- f-** Mise en place des armatures

Exécution de pieux forés à la tarière creuse
 Source : La fabrication du bâtiment, le gros œuvre

3. Semelles et longrines

Les semelles (éléments ponctuels) et longrines (éléments linéaires) constituent l'intermédiaire entre les pieux et la structure. Les charges sont transmises par les longrines et semelles. Avant la mise en place des semelles ou longrines il faut effectuer le recépage des pieux. Cette étape consiste à mettre à nu les armatures du pieu au niveau de sa tête pour permettre la liaison entre les différents éléments. Les semelles et longrines sont extrêmement rigides. Ainsi la répartition des charges sur les pieux est considérée uniforme. La semelle peut prendre appui sur un ou plusieurs pieux selon les charges à transmettre. La longrine prend place sur plusieurs pieux de manière linéaire en une ou deux files. Elle peut aussi faire le lien entre les différentes semelles pour raidir encore plus la structure. L'implantation des pieux sous une construction considère la configuration générale, la position des éléments porteurs du niveau le plus bas et du report des charges.



Différents types de semelles

Source : *La fabrication du bâtiment, le gros œuvre*

4. Barrettes

Les barrettes sont des pieux forés moulés. Elles ont une section élancée ou en croix ce qui permet la reprise d'efforts verticaux et horizontaux très importants.

5. Micropieux

Les micropieux sont des pieux forés, tubés ou non avec un diamètre inférieur à 250 mm. Ils travaillent en compression ou en traction par les frottements latéraux. Le forage est effectué par roto-percussion ou rotation. L'armature est constituée d'une tige d'acier ou d'un tube métallique. Le bétonnage se fait avec du mortier mis en place sous pression. Les micropieux sont très souvent employés comme tirants d'ancrage ou dans les travaux de reprise en sous-œuvre de fondations superficielles en raison du peu de place que prend le matériel.

(Schéma)

6. Ancrage

Les ancrages, contrairement aux autres types de fondations, sont soumis à des efforts de traction. Ainsi il est nécessaire de les consolider en unissant une portion du terrain en place avec une injection de liant.

(Schéma)

C. Conditions d'emploi des fondations profondes



Source : La fabrication du bâtiment, le gros œuvre

D. Avantages et inconvénients de la construction sur pieux

Avantages	Inconvénients
permet la recherche d'un sol d'assise à grande profondeur, suivant son pendage (appui ou frottements)	difficulté du maintien de la verticalité ou de l'angle d'attaque du tubage sans risque de dévoiement
permet un travail aisé en terrain aquifère sous conditions de précautions	difficulté dans la continuité du bétonnage et l'enrobage des armatures
rapidité du travail d'exécution	en présence d'eau risque de délavage du béton
permet l'amélioration des effets de frottements dans les pieux pilonnés	possibilité de devoir utiliser un matériel spécifique entraînant un surcoût
permet l'absence de vibrations pour les pieux forés, idéal en milieu urbain	surface de pose et d'entreposage très importante pour les pieux préfabriqués et inconvénients si différentes hauteurs de pieux
exécution possible même à température basse	nécessité d'analyser l'agressivité du sol pour les pieux en acier
bétonnage de très bonne qualité pour les pieux préfabriqués	vibrations importantes dans le cas du battage
technique des pieux forés économique avec du matériel peu encombrant et adaptable aux formes du terrain	nécessité d'utiliser un ciment particulier en présence d'eaux agressives

V. Les pathologies des fondations

Les pathologies des fondations ont des origines aussi diverses que variées. Elles peuvent dépendre du terrain en place, de désordres techniques lors de la réalisation, d'actions extérieures accidentelles. On peut distinguer trois types de situations : les situations en cours de construction, les situations en cours d'exploitation et les situations accidentelles. Pour les éviter des règles techniques avec des valeurs limites à respecter ont été créées. Malgré celle-ci des problèmes peuvent toujours survenir.

A. Origines des désordres

Les actions à transmission directe sont les actions appliquées à la structure, autres que celles dues à l'eau, qui ne sont pas liées à la présence du sol environnant et qui ne sont pas transmises par l'intermédiaire de celui-ci.

Les actions dues au sol peuvent se traduire par :

- des effets pondéraux,
- des effets de poussée,
- des effets liés à des déplacements d'ensemble de celui-ci liés à un tassement ou encore un fluage du sol.

Les actions transmises par le sol sont les actions appliquées à la structure, autres que celles dues à l'eau. L'intensité et la répartition des sollicitations engendrées sont évaluées à l'aide de modèles de diffusion différents en fonction de la nature de l'action, de la nature du sol et de la loi d'interaction sol-structure.

Les actions dues à l'eau ne sont présente que lorsque le l'eau contenue dans le sol est en équilibre ou en quasi équilibre hydrostatique. Les actions dues à l'eau sont présentes sous la forme de pressions statiques et d'effets hydrodynamique (poussée du courant, efforts engendrés par un séisme).

B. Les désordres possibles

Ceux-ci peuvent venir de la structure même de la fondation, de la nature des matériaux qui la compose. En effet, si les états limitent des matériaux constitutifs ne sont pas respectés, les charges à récupérer ne pourront pas être reprises dans des conditions de service correctes et une rupture de la structure peut se produire.

1. Dus aux essais géotechniques

Plusieurs causes sont possibles :

- Une étude de sol incomplète, inadaptée ou absence d'études géotechniques (profondeur insuffisante, présence de cavités, nappe d'eau insoupçonnée, ...)
- Une mauvaise interprétation des résultats de la reconnaissance des sols.
- Des tassement des fondations profondes peuvent résulter de la non prise en compte d'un frottement négatif dû à des couches de surfaces compressibles et qui s'ajoute à charge transmise à la fondation par l'ouvrage. Sur un même terrain, l'interaction des charges entre fondations isolées et groupées ne sera pas la même, d'où des tassements importants.
- En présence de couches superficielles de surfaces, chargées par des remblais dissymétriques, le fluage des couches molles peut engendrer des efforts latéraux sur les fûts allant jusqu'à leur rupture en l'absence d'armatures.
- Les pieux battus peuvent rencontrer de faux refus ou pas de refus dans certains sols.
- L'agression des fondations par le sol environnant : circulation d'eaux acides, eaux contenant des sulfates, ...

2. Dus à la structure de la fondation

Une rupture du béton peut se produire si une force de compression trop importante est appliquée à la fondation. Différents facteurs influent sur la durabilité du béton.

Si la porosité est trop importante, la résistance du béton en ait proportionnellement réduite, aussi bien mécaniquement qu'aux agressions physico chimiques. Pour réduire la porosité on utilise un dosage en ciment adéquat, une faible teneur en eau et une granulométrie bien étalée.

Une fissuration peut se produire à cause du retrait de la pâte de ciment, des conditions thermiques et hygrométriques et par des actions mécaniques. Pour éviter cette fissuration il faut une bonne formulation du béton, une bonne mise en œuvre et un bon dimensionnement.

Le béton peut se rompre indirectement via la rupture de son armature constituée de barres d'aciers. Celles-ci sont présentes afin de reprendre les efforts de tractions que le béton est en incapacité d'absorber. Par conséquent des forces de traction trop importantes peuvent engendrer une rupture des aciers. Pour remédier à ce problème, les aciers doivent être correctement répartis dans le béton selon un plan défini à l'avance et les diamètres des barres doivent être bien dimensionnés.

Les armatures peuvent aussi se corroder. Les armatures enrobées de béton sont protégées de la corrosion par une pellicule protectrice de ferrite (combinaison de chaux libérée lors de l'hydratation et d'oxyde de fer). De plus la présence de chaux crée un milieu fortement basique. L'oxydation des aciers est impossible.

En présence de gaz carbonique de l'air, la chaux libérée se carbonate (carbonatation). Le milieu se trouve modifié pour atteindre un pH de l'ordre de 9. L'oxydation des aciers est alors possible.

La carbonatation se produit surtout en surface. Sa progression dépend de la nature et du dosage du ciment, du dosage en eau et de la porosité du béton.

L'eau de pluie entraîne des composés chimiques qui diffusent dans le béton et attaquent les armatures. L'acidification de pluie devient particulièrement agressive pour le béton et pour les armatures.

Les eaux chargées en chlorures (milieu marin) ou en sulfates (certaines eaux souterraines) provoquent une corrosion importante des armatures.

Pour éviter la corrosion des armatures il faut :

- un ciment adapté,
- une faible porosité,
- le respect des enrobages.

Lors de l'exécution des problèmes peuvent survenir :

- si les vibrations sont trop importantes lors du battage, une rupture du pieu peut survenir,
- si les conditions hors gel ne sont pas conforme,
- si le terrain d'assise est non homogène ou non expurgé ou si il n'y a pas de drainage,

Pour les pieux coulés en place le problème vient d'un mauvais bétonnage par :

- un béton trop « sec »
- un ferrailage trop important gênant le coulage du béton
- une remontée trop rapide du tube.

VI. Les fondations, une donnée à intégrer dans le traitement architectural

Les fondations constituent un élément de la structure à part entière. Le choix du type de fondations se répercute sur l'architecture du bâtiment déjà loin dans la conception. L'infrastructure du bâtiment permet selon les cas une conception du projet bien particulière. En effet l'adaptation à une typologie urbaine est un parti pris dans le projet il en est de même sur l'adaptation au site et au sol _ sous-sol. Ainsi un choix audacieux concernant les fondations _ profondes dans notre cas _ peut soulever des problématiques architecturales très intéressantes.

Le choix de l'infrastructure est un élément de sécurité, économique et architectural.

Dans un premier temps il s'agit d'une donnée concernant la sécurité – stabilité de la future construction. Cet élément dépend de caractéristiques physique et mécanique du sol et pas uniquement d'un choix personnel. Les conditions d'emplois des différents types de fondations sont connues et décrites. Elles permettent en fonction des différents essais de conforter les choix d'un ou plusieurs types de fondations.

Dans un second temps l'aspect économique intervient. Il s'agit d'aspect très important et qui peut prédominer la sécurité quand plusieurs types de soubassement sont possibles et qui n'entraîneraient pas de risque. Il est significatif dans l'implantation et le nombre total d'éléments de soutien du bâtiment. En effet le moindre pieu en moins peut représenter des économies considérables. Leur implantation est aussi régit par l'aspect économique du lot infrastructures. Le calcul méticuleux pour la place de chaque élément dans le sol peut représenter un avantage financier non négligeable.

Enfin l'architecture du bâtiment qui viendra s'implanter sur le site sera influencée par les deux aspects précédemment décrits. Le maillage et la qualité des fondations justifieront ou non d'une proportion, d'un volume ou de certains matériaux. Dans certains cas la construction se verra contrainte dans l'espace, sa base sera réduite pour limiter les nombres de pieux _ ou autre _ à mettre en place même s'ils doivent être plus profonds ou plus larges. Dans d'autres cas les raisons techniques et financières préféreront un étalement de l'immeuble pour répartir davantage les charges.

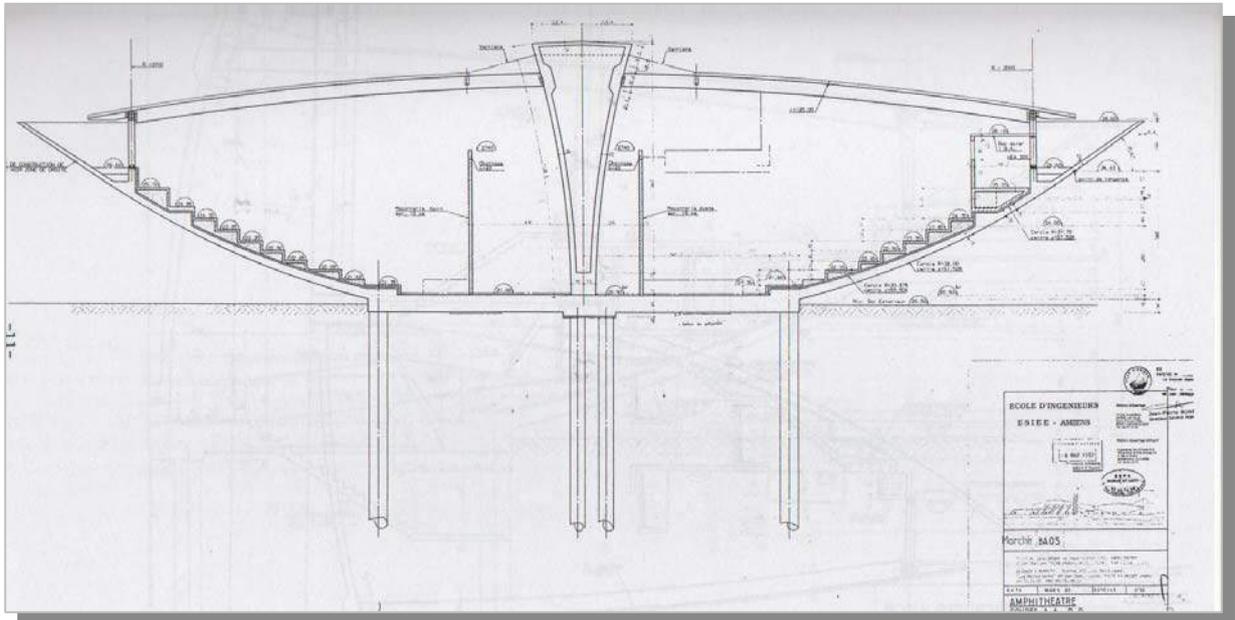
Pour illustrer l'impact des infrastructures sur la superstructure, le cas du site de l'ESIEE_ Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Electronique et Electronique _ d'Amiens (Somme) semble idéal.

Fondée en 1961, l'ESIEE est installée depuis 1987 sur le site de la cité Descartes à Marne-la-Vallée. Elle se développe et étend ses locaux. Ainsi l'ESIEE-Amiens a ouvert ses portes en septembre 1992. Le projet a été conçu par les architectes Jean Dubus et Jean-Pierre Lott. Ils ont donné une architecture expressive, riche en lignes et courbes donnant une épure exacte aux formes et espaces dessinés. Le terrain se trouve au bord des quais de la Somme sur « l'îlot des Teinturiers » à proximité du centre historique, milieu urbain. Le sol est de mauvaise qualité. L'ensemble de l'édifice est fondé sur des pieux qui descendent en moyenne à 16 m de profondeur pour y trouver le bon sol. La spécificité de l'école réside dans la coupole inversée abritant les 3 amphithéâtres.

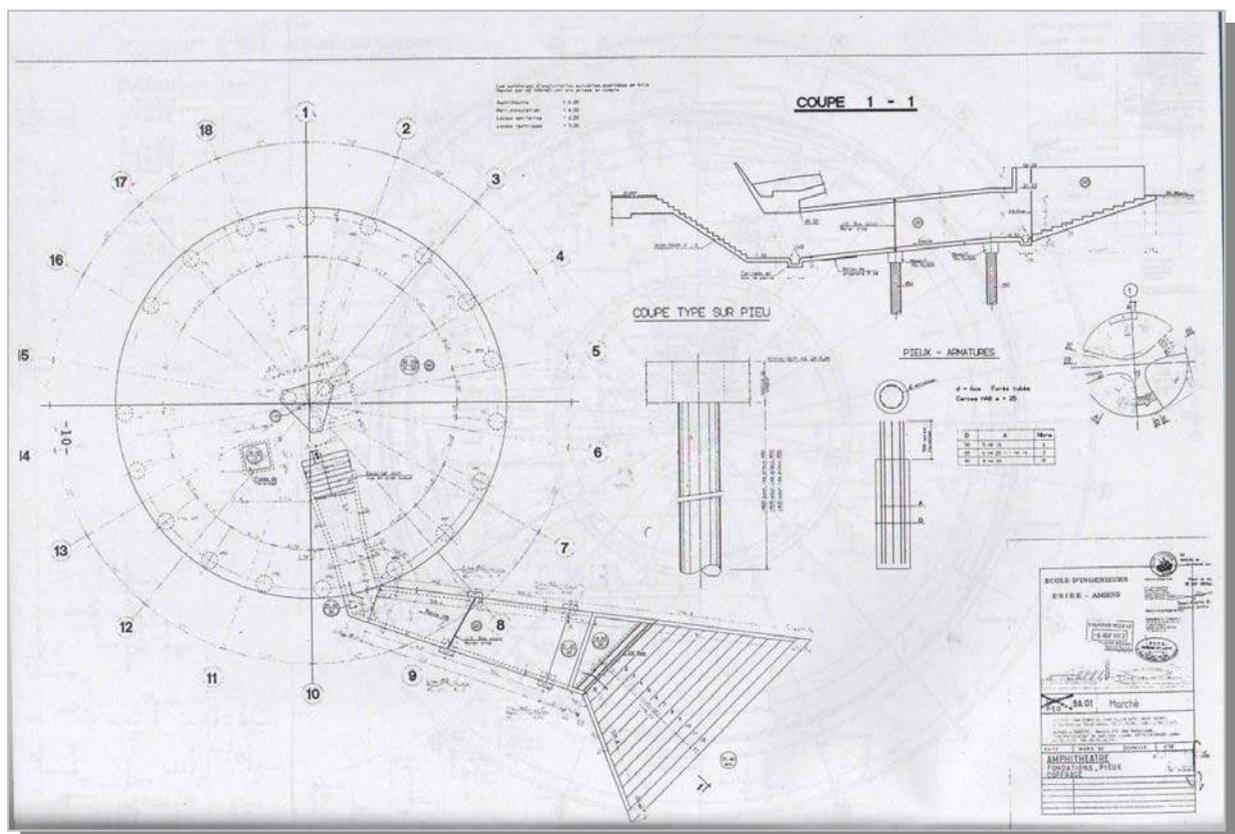
Dans sa plus grande dimension, cette coque présente un diamètre de 50 m. Elle est fondée sur un radier (environ 15 m de diamètre et 2 m d'épaisseur) porté par des pieux descendant à 16 m. Elle présente d'importants porte-à-faux. Elle a été réalisée en béton précontraint coulé en continu pendant 24h. La base de la coque a une épaisseur de 45 à 50 cm. Un système de câbles de précontrainte circulaire assure la rigidité de ce plancher en porte-à-faux. Pour des raisons de poids, cette structure en « baleines de parapluie » est métallique. Cette coupole a été réalisée selon deux techniques : la partie principale, en bas, a été coulée en place tandis que pour des raisons économiques, la frange supérieure de la coque a été exécutée avec des panneaux préfabriqués. Pour la partie basse, le coffrage perdu a entièrement été exécuté en bois. Toute la partie de l'ouvrage coulée en place est calculé « à la fissuration préjudiciable » c'est-à-dire qu'aucune fissure n'est admissible. Pour la partie supérieure de la coque des panneaux préfabriqués ont été mis en œuvre, parce qu'étant situés en haut de l'ouvrage les contraintes sur les bétons sont moins fortes et qu'une certaine tolérance à la fissuration est admissible. Ce choix permet de limiter en cette partie la quantité d'armatures en acier. Il en résulte aussi une économie au niveau du coffrage perdu. L'utilisation de panneaux préfabriqués dans cette forme courbe a nécessité un calage et un clavetage parfait des modules entre eux et avec la partie coulée en place.

Autre particularité, le bâtiment en S qui se déploie sur une longueur de 200 m et sur 5,50 m de larges est conçu également en béton. En certains endroits du rez-de-chaussée, il révèle des formes en porte-à-faux de 5 m afin de reprendre les descentes de charges des étages supérieurs.

Les contraintes du site et portefeuille de la construction ont conduit à la réalisation d'un bâtiment original, simple et élégant. Les fondations ont complètement orientés l'architecture de l'immeuble. La coupole inversée en est l'illustration parfaite. Elle répond aux contraintes par un système de porte-à-faux ingénieux et esthétique. La mise en œuvre a été délicate mais juste. Le traitement architectural dépend en parti _ parfois plus que moins _ des infrastructures.



Coupe de la coupole inversée et ses pieux
Source : *Analyse de l'ESIEE à Amiens, ENSAPLV 2006 – 2007*



Plan de fondation et détails de pieux
Source : *Analyse de l'ESIEE à Amiens, ENSAPLV 2006 – 2007*

VII. CONCLUSION

Nous avons vu tout au long du dossier que dans une construction, les fondations assurent le transfert des efforts repris par l'ossature de l'ouvrage au terrain qui lui sert d'assise. Elles doivent répondre aux forces de réaction du terrain. Les efforts peuvent correspondre à :

- une compression verticale (charges verticales axées)
- une compression oblique à composantes verticales et horizontales (appuis de pieds d'acres)
- une traction verticale ou oblique (ancrages)
- des moments (encastremets en pieds de poteaux)

Pour déterminer les dimensions des fondations il faut connaître l'ensemble des charges :

- son poids propre après achèvement
- toutes les surcharges qui peuvent lui être appliquées.

De manière générale les fondations doivent répondre à la relation :

$$\frac{\text{Poids total de l'ouvrage en fonctionnement}}{\text{Surface d'appui sur le sol}} < \text{Force portante du sol}$$

Trois données essentielles servent à définir les fondations :

- la surcharge apportée par la construction
- la force portante du sol
- la typologie de la structure

Les fondations étant le point faible des constructions, il faut donc les élaborer avec soins. Différentes méthodes permettent déjà de bien percevoir les caractéristiques du terrain sur lequel on souhaite fonder. On se rend compte que à chaque terrain peut correspondre une fondation mais que globalement c'est toujours sur le terrain le plus stable et souvent celui possédant une teneur en eau stable dans le temps qui sont les plus aptes à servir de base.

On peut alors maintenant se demander s'il n'est pas possible de concevoir des fondations qui, sur n'importe quel type de sol, assurent toujours leur pouvoir de transmission de charge et d'équilibre de la structure. A partir de là serait-il possible de construire un bâtiment sur un sol mou sans rencontrer de désordres dommageable pour la structure ?

BIBLIOGRAPHIE :

- Fiches pathologie bâtiment, Agence Qualité Construction & Excellence, SMA, 1996
- Fondations et ouvrages en terre, G. Philipponnat, B. Hubert, *Editions Eyrolles*, 2002
- La fabrication du bâtiment, tome 1 le gros œuvre, G. Karsenty, *Editions Eyrolles*, 2005
- Les fondations, Jacques DUBUS, 1990 (mémoire)
- Maçonnerie 1, collection concevoir et construire, Michel MATANA, *Editions alternatives*, 2004
- Précis bâtiment, collection conception, mise en œuvre, normalisation, D. Didier, M. Le Brazidec, P. Nataf, J. Thiesset, *Editions Nathan, Afnor*, 2005
- Conception et calcul des structures de bâtiments, tome 2, H. Thonier, *cours de l'ENPC*, 2000
- Géomécanique appliquée au BTP, Pierre Martin, *Edition Eyrolles*, 2005
- Calcul des fondations superficielles et profondes, Roger Frank, Presse de l'ENPC, 1999
- Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil, Fascicule n°62, Groupe Permanent d'Etudes des Marchés de Travaux, *Edition Eyrolles*, 1999

WEBOGRAPHIE

- <http://www.marseille.archi.fr/~M35/Construction4.pdf>