



République Algérienne démocratique et populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ahmed Draya d'Adrar

Faculté de sciences et technologie

Département de Génie civil

Polycopié de Cours

Procédés généraux de construction des ouvrages géotechniques

Elaboré par
Balegh Benamar
Maître de conférences classe A

Pour les étudiants de master 1
Spécialité géotechnique

Année universitaire 2023/2024

Avant-propos

Le présent ouvrage est un cours de procédés généraux de construction des ouvrages géotechniques adressé essentiellement aux étudiants de master un, spécialité géotechniques et à d'autres spécialités éventuellement. Ce polycopié est élaboré dans le but de faciliter à l'étudiant l'assimilation et la compréhension des cours dispensés.

Ce cours s'articule autour de trois chapitres. Le premier chapitre concerne la conception des ouvrages géotechnique notamment les problématiques géotechniques, les enjeux de la géotechnique, le domaine d'application Les activités de géotechnicien et moyens, les données géotechniques, les diverses reconnaissances primaire pour les dimensionnements ainsi de contrôle, les missions de géotechnicien, les investigations géotechniques in situ, en laboratoire et en contrôle enfin les principes généraux de normes de calcul des ouvrages géotechnique.

La deuxième partie est les principes réglementaires de dimensionnement à savoir les règles de dimensionnement des ouvrages géotechniques, les actions et valeurs caractéristiques, l'approche de l'Eurocode 7 , calcul aux états limites, l'organisation des études géotechniques et les catégories géotechniques, les rapports géotechniques et les études et les hypothèses de calcul des ouvrages géotechniques comme fondations profondes, superficielles, ouvrages de soutènement et en terre.

Le troisième chapitre est consacré aux techniques de construction. Dans ce chapitre, sont présentés, les exemples sur les techniques de construction des divers ouvrages géotechniques.

Sommaire

Avant-propos	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Chapitre 01 : Conception des ouvrages géotechnique	
1.1. Définition	1
1.2. Les problématiques géotechniques	2
1.3. Les enjeux de la géotechnique	4
1.4. Domaine d'application	5
1.5. Les activités de géotechnicien et moyens	6
1.6. Données géotechniques	7
1.6.1. Une reconnaissance primaire	7
1.6.2. Une reconnaissance pour le dimensionnement	8
1.6.3. Une reconnaissance de contrôle	8
1.6.4. Documents contractuels	8
1.6.5 Conception des ouvrages et reconnaissance des terrains	9
1.6.6. Méthodologie d'une étude de sols	10
1.7. Les missions géotechniques	11
1.8. Objet et composition d'une reconnaissance du sol	14
1.9. Importance du paramètre « sol » vis à vis de la pérennité des ouvrages	14
1.10. Investigations géotechniques "in situ"	15
1.11. Les essais de contrôle	25
1.12. Essais en laboratoire	26
1.12.1. Essais d'identification	26
1.12.2 . Essais de caractérisation des propriétés mécaniques	26
1.12.3 . Essais de caractérisation des propriétés hydrauliques	26
1.13. Exemple de recommandations pour le mode de fondations	28
1.14. Principes généraux de normes de calcul des ouvrages géotechnique	29
1.14.1. Classification des actions	29
1.14.2. Situations de calcul	30
1.14.3. Valeurs caractéristiques et valeurs de calcul	30
1.14.4. Définition des coefficients partiels	30

Chapitre 02 : Principes réglementaires de dimensionnement

2.1. Règles de dimensionnement des ouvrages géotechniques	31
2.2. Définition des Actions et valeurs caractéristiques	32
2.3. Règles générales	32
2.4. Approche EC7 – calcul aux états limites	33
2.5. Organisation des études géotechniques	35
2.5.1. Catégories géotechniques	35
2.5.2. Procédures de justification	36
2.5.3. Rapports géotechniques	37
2.6. Fondations profondes	38
2.7. Fondations superficielles	39
2.8. Ouvrages de soutènement	42
2.9. Ouvrages en terre	43
2.10. Modes de rupture des ouvrages de soutènement	46
2.11. Les hypothèses de calcul de stabilité des talus	47

Chapitre 03 : Techniques de construction

3.1. Techniques de construction d'une fondation superficielle (semelles isolées, filantes et radier)	51
3.1.1. Terrassement	51
3.1.2. Béton de propreté	51
3.1.3. Mise en place du ferrailage	52
3.1.4. Coffrage et bétonnage	52
3.2. Techniques de construction d'une fondation profonde	53
3.2.1. Classification des pieux selon le mode d'exécution	53
3.2.2. Classification suivant le mode de fonctionnement	55
3.3. Techniques de construction de stabilisation de sol	55

Références bibliographiques

Liste de figures

Figure 1.1 : Ouvrages géotechniques	4
Figure 1.2 : Domain d'application des ouvrages géotechniques	6
Figure 1.3: Méthodologie générale pour l'étude	11
Figure 1.4 : Exemple de coupe géologique [7]	15
Figure 1.5 : Essai Pressiométrique - NFP 94-110 (Juil 91) et NFP 94-110-1[7]	16
Figure 1.6 : Appareil de l'essai préssiométrique [7]	17
Figure 1.7 : Reperage de la sonde lors de l'essai pressiometrique [7]	18
Figure 1.8 : Schéma d'un sondage pressiometrique [7]	18
Figure 1.9: Courbe préssiométrique	19
Figure 1.10: Pénétrromètre statique [7]	21
Figure 1.11 : Procès verbale de l'essai de pénétrromètre statique [7]	22
Figure 1.12 : Pénétrromètre dynamique [7]	23
Figure 1.13: Procès verbale de l'essai de pénétrromètre dynamique [7]	24
Figure 2.1. Mur cantilever en beton armé	46
Figure 2.2. Murs partiellement ou totalement ancrés [8]	46
Figure 2.3. Modes de rupture des ouvrages de soutènement [8]	47
Figure 2.4. Surface de rupture de talus	49
Figure 3.1: Fouille en puits talutée	51
Figure 3.2: Disposition de ferrailage de fondations	52
Figure 3.3 : Exemple de coffrage et ferrailage de fondations	52
Figure 3.4 : Exemple de coffrage et ferrailage de radier	53
Figure 3.5 : Différentes géométries de pieux métalliques	53
Figure 3.6 : Mise en place de pieu tubé par vibrofonçage	54
Figure 3.7 : Pieux formés par forage à la tarière	54
Figure 3.8 : Classification suivant le mode de fonctionnement	55
Figure 3.9 : divers formes de désinstabilité du sol (glissement, eboulement)	56
Figure 3.10 : Problématique géotechnique pour traitement un problème de glissement (Objectifs et solution)	57
Figure 3.11 : Enquête sur problématique géotechnique pour concrétiser une bonne étude	58
Figure 3.12 : Exemple sur une étude de stabilité	59
Figure 3.13 : Solution géotechnique pour la stabilité d'un sol par les techniques de terrassement	60

Figure 3.14 : Solution géotechnique pour la stabilité d'un sol par les techniques de terrassement par purge

61

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Aide au choix d'un type d'essai (MP : Méthode Proscrite ; MR : MethodeRecommandée ; MUC : Méthode usuelle et convenable)	10
Tableau 1.2 : Valeur de pression limite des sols [7]	20
Tableau 1.3 : Relation entre le module pressiométrique, la pression limite et l'état du sol [7]	20
Tableau 1.4 : valeur de résistance qc en fonction de nature de sol [7]	25
Tableau 1.5 : Exemples d'essais géotechniques in situ+caisse avec carottes	27
Tableau 1.6 : Exemples d'essais géotechniques en laboratoire	28
Tableau 2.1 : Critère de dimensionnement d'un ouvrage géotechnique [3]	33
Tableau 2.2 : Vérification minimales à établir aux ELU pour les situations d'un ouvrage géotechnique en cours de réalisation et exploitation [3]	34
Tableau 2.3 : Vérification minimales à établir aux ELS pour les situation d'un ouvrage géotechnique en cours de réalisation et exploitation [3]	34
Tableau 2.4 : Divers types d'ouvrages de soutènement [8]	44
Tableau 2.5 : coefficient de sécurité de stabilité d'un talus	49

CHAPITRE 01 :
Conception des ouvrages géotechnique

1.1. Définition :

Les terrains naturels sont composés de grains solides, de vide et d'eau. Leurs caractéristiques sont souvent variables. Leurs comportements évoluent dans le temps et dépendent de l'ouvrage qui les sollicite (bâtiments, ponts, pylônes, barrages, tunnels...). Leur modélisation fait appel à la théorie complexe de la mécanique des milieux continus et plus spécifiquement la mécanique des sols.

L'étude de leur comportement mécanique et hydraulique nécessite l'expertise d'ingénieurs et de techniciens hautement qualifiés en géotechnique.

Il est donc indispensable que les équipes constructrices soient assistées d'un géotechnicien à toutes les étapes de l'avancement du projet : étude préliminaire ou d'esquisse, étude d'avant projet, étude de projet, étude d'exécution, suivi d'exécution.

La science de géotechnique possède toutes les compétences pour répondre à ce besoin avec, en particulier, ses ingénieurs et sa direction scientifique et technique, ses experts, ses équipes de sondages et ses laboratoires.

La géotechnique, discipline complexe à la frontière entre la théorie, la science appliquée et les techniques de la construction, évolue constamment. Plusieurs facteurs contemporains contribuent à l'essor de la géotechnique. Tout d'abord, les zones à bâtir deviennent de plus en plus rares, ensuite les terrains non encore valorisés sont souvent ceux présentant les plus médiocres propriétés mécaniques [1].

L'objectif principal de la géotechnique a toujours été de diminuer les dangers associés aux sols [2], que l'on retrouve largement dans le Eurocode 7, 2005 [3]. Les contributions des reconnaissances et des observations ont été largement reconnues et approfondies depuis 50 ans. Personnellement, après 40 ans de pratique, on a été profondément persuadé que la réussite des projets d'ouvrages géotechniques dépend de trois étapes successives : la reconnaissance des terrains pour élaborer un modèle géotechnique; la conception, comprenant la définition d'un type d'ouvrage adapté au contexte, les méthodes utilisées

es, les phasages à utiliser, ainsi que leur dimensionnement: géométrie des ouvrages, qualité et nature des matériaux..., le suivi et la vérification des travaux géotechniques.

De plus, la volonté de préserver les paysages et les écosystèmes encourage les maîtres d'ouvrages à projeter des ouvrages enterrés. Infrastructures de transport, évidemment, mais également de production d'énergie, de stockage, voire même de loisirs sont réalisées en souterrain.

Finalement, la croissance démographique et le développement urbain (la moitié de la population mondiale vit en ville) impose un habitat plus dense et des constructions plus en profondeur. Ainsi de nombreux défis en termes de capacité d'analyse, de dimensionnement, d'exécution et de suivi des travaux sont à maîtriser.

1.2. Les problématiques géotechniques

Du point de vue géotechnique, chaque projet se décompose en ouvrages géotechniques élémentaires, chacun d'eux ayant sa propre problématique. Grâce à une approche méthodologique et une parfaite maîtrise de toutes ces problématiques vous assure optimisation et sécurisation de tous vos projets [2]. Parmi les ouvrages géotechniques il y a :

- ✚ Terrassements, fouilles
- ✚ Stabilité des terrains, glissement
- ✚ Soutènements
- ✚ Fondations et reprises en sous-oeuvre
- ✚ Voies et parkings
- ✚ Dallages
- ✚ sols, remblais
- ✚ Ouvrages en sites aquatiques
- ✚ Forages dirigés
- ✚ Microtunneliers
- ✚ Gestion des dangers/risques naturels
- ✚ Protections contre les chutes de blocs
- ✚ Instrumentations



Terrassement



Stabilité des terrains



Murs de soutènement



Fondations



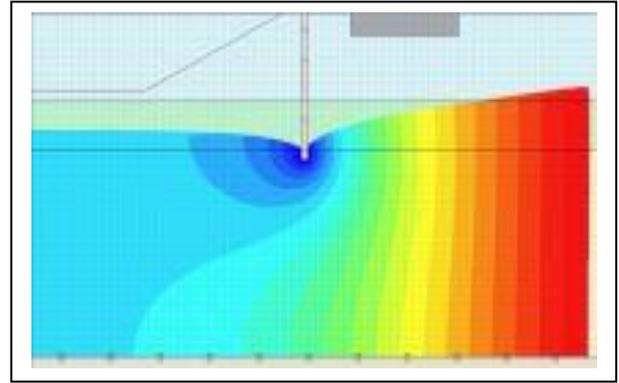
Dallages et plates formes



Amélioration des sols



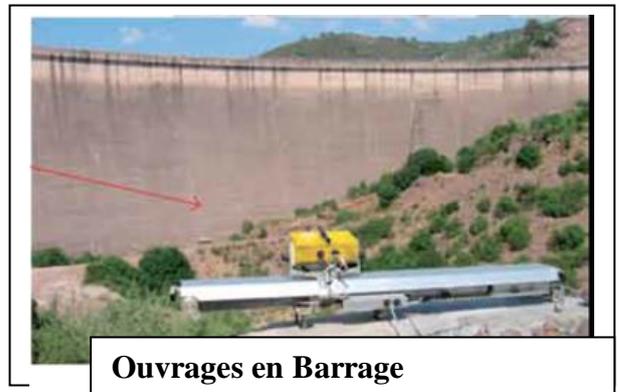
Ouvrages en sites aquatiques



Ouvrage de gestion des eaux



Ouvrages en voies et les parkings



Ouvrages en Barrage

Figure 1.1 : Ouvrages géotechniques

1.3. Les enjeux de la géotechnique

L'acte de construire s'est considérablement complexifié ces dernières années : raréfaction des terrains, exigences environnementales croissantes, judiciarisation de la société, évolution des technologies de construction, sensibilité aux économies croissante.

Cette complexification concerne au premier rang la partie géotechnique des ouvrages, terrassements, soutènements et fondations en particulier.

Sans une bonne maîtrise de la géotechnique, le projet ne peut réussir.

- **La géotechnique est une science complexe.** Elle est un savant mélange entre théorie et empirisme, entre mécanique des milieux continus et expérience personnelle des ingénieurs. La modélisation de l'interaction sol-structure est conditionnée par la nature

des sols, par la nature et l'intensité des efforts, par la géométrie du contact entre sol et structure, par les techniques de réalisation et par le phasage des travaux [4].

- **Le coût d'une étude géotechnique est sans rapport avec les enjeux financiers d'un projet.** Ainsi, une étude géotechnique complète, comprenant toutes les missions de la norme NF P 94-500 [5], représente un très faible pourcentage du coût des ouvrages.
- Une étude géotechnique sérieuse, présente des avantages considérables, économies pour le maître d'ouvrage, sécurité pour le maître d'œuvre, productivité pour l'entreprise.

1.4. Domaine d'application

Soutènements – excavations profondes



Fondations superficielles - profondes





Figure 1.2 : Domain d'application des ouvrages géotechniques

1.5. Les activités de géotechnicien et moyens

L'intervention du géotechnicien est nécessaire à tous les stades d'élaboration d'un projet et de la réalisation des travaux :

- étude d'impact, d'environnement et de pollution
- recherche et choix d'un site
- avant-projet et mise au point du projet
- assistance technique à la maîtrise

Les activités du géotechnicien se développent dans les domaines :

- de l'ingénierie (études, maîtrise d'œuvre spécialisée, contrôles...)
- des sondages et forages de reconnaissance
- des essais et mesures in situ et en laboratoire

- Le géotechnicien dispose des moyens en personnel et en matériel nécessaires à la réalisation de ces activités :
- Ingénieurs et techniciens : études, direction des prestations de
- sondages et d'essais, contrôles de réalisation des ouvrages
- laboratoires d'essais, équipes de mesures et d'instrumentation
- ateliers de sondages, forages, essais in situ

Les prestations sont réalisées en se conformant aux normes, aux D.T.U. , aux recommandations et a la bibliographie se rapportant aux calculs et essais en géotechnique.

1.6. Données géotechniques

Pour réaliser le dimensionnement de l'ouvrage, le géotechnicien doit disposer de suffisamment d'informations sur le terrain où l'ouvrage est construit, de manière à proposer la solution technologique la plus adéquate.

Il est donc nécessaire de recueillir des informations sur :

- la convenance générale du terrain ;
- la disposition et la classification des différentes zones de sol ou de roche et des éléments de l'ouvrage ;
- les plans de stratification inclinés, les failles, joints et fissures, les cavités de dissolution ;
- les variations des niveaux des eaux souterraines ;
- les exploitations minières, cavernes ou autres ouvrages souterrains ;
- les effets d'affouillement, d'érosion et d'excavation ;
- les effets de la corrosion chimique, d'altération, du gel ;
- les autres effets du temps sur la résistance et les autres propriétés des matériaux ;
- les effets du nouvel ouvrage sur les ouvrages et les réseaux existants.

La reconnaissance géotechnique ne soulève pas de problème particulier pour les petits ouvrages de catégorie 1. Pour les ouvrages de catégorie 2 et 3, elle comprend trois étapes décrites ci-dessous.

1.6.1. Une reconnaissance primaire

Cette reconnaissance a pour but d'évaluer la convenance générale du site, de le comparer avec d'autres sites potentiels et d'estimer les transformations qui peuvent être provoquées par les

travaux. Elle permet également de planifier les reconnaissances destinées aux dimensionnements et aux contrôles et d'identifier les zones d'emprunt.

Il est nécessaire de prendre en compte différents éléments en fonction de l'importance de l'ouvrage, la reconnaissance du terrain, la topographie, l'hydrologie, l'examen des ouvrages proches et des excavations voisines, les cartes et relevés géologiques et géotechniques, les reconnaissances antérieures, les photographies aériennes, la sismicité régionale...

1.6.2. Une reconnaissance pour le dimensionnement

Cette reconnaissance est menée pour collecter les informations nécessaires au dimensionnement de l'ouvrage dans les conditions économiques satisfaisantes et à la définition de la méthode de construction. Les éléments suivants doivent être pris en compte : la stratigraphie géologique, les propriétés de déformabilité et de résistance des terrains, la distribution des pressions interstitielles de l'eau, les conditions de perméabilité, les instabilités, la compactibilité, l'agressivité du terrain et de l'eau, la sensibilité au gel.

Le dimensionnement de l'ouvrage suppose donc qu'on ait une connaissance qui soit la plus précise possible des caractéristiques du sol ou de la roche. Un certain nombre d'entre eux est recensé dans le tableau 1.2.

1.6.3. Une reconnaissance de contrôle

Cette reconnaissance est effectuée au cours de la réalisation de l'ouvrage.

Elle a pour but de vérifier que les données géotechniques recueillies dans l'étape précédente et ayant servi au dimensionnement sont toujours valables.

1.6.4. Documents contractuels

La justification du dimensionnement d'un ouvrage géotechnique fait l'objet de deux Documents contractuels dont la structure est définie par les normes en vigueur : un *rapport de reconnaissance géotechnique* et un *rapport de dimensionnement de l'ouvrage*.

Les résultats de la reconnaissance des terrains sont consignés dans un rapport qui sert de base au rapport de dimensionnement géotechnique.

Le rapport comprend normalement deux parties :

- La présentation des informations géotechniques disponibles, y compris les caractéristiques géotechniques et les données importantes pour le projet ;

- L'évaluation géotechnique de ces informations indiquant les hypothèses adoptées pour établir les valeurs des paramètres géotechniques.

Le rapport de dimensionnement rassemble les hypothèses de calcul, les données, les calculs et les résultats. Il convient d'y inclure les points suivants

1.6.5 Conception des ouvrages et reconnaissance des terrains

Lors de conception d'un ouvrage, la reconnaissance des terrains nécessite l'élaboration d'un programme d'investigations géotechniques. La nature des investigations (type de sondages et d'essais), la quantité des investigations (nombre de points de sondage ou d'essais) et l'extension des investigations (périmètre à reconnaître, profondeur, espacement entre points de sondage) ne peuvent pas être dissociés. Parmi ces reconnaissance de terrain, on distingue :

- + Courbe granulométrique minéralogie forme des particules pétrographie
- + Rugosité de surface teneur en eau
- + Indice de densité poids volumique
- + Poids volumique porosité
- + Teneur naturelle en eau vitesse du son
- + Limites d'Atterberg coefficient d'imbibition rapide
- + Teneur en carbonates gonflement
- + Teneur en matières organiques index de durabilité
- + Résistance au cisaillement résistance à la compression simple
- + Raideur du sol caractérisation des discontinuités
- + Perméabilité perméabilité
- + Consolidation
- + Compactibilité
- + Une description du site et de son voisinage ;
- + Une description des conditions de terrain ;
- + Les valeurs de calculs des propriétés des sols et des roches, y compris leurs justifications ;
- + La liste des codes et normes appliqués ;
- + L'énoncé du niveau des risques admis ;
- + Les calculs géotechniques et les dessins ;

- ✚ Une liste des points à vérifier pendant l'exécution des travaux ou nécessitant de l'entretien ou un suivi ;
- ✚ Un programme de contrôle et de surveillance, lorsque le contexte l'exige.
- ✚ Selon le type de projet, ce rapport peut être plus ou moins détaillé ; la rédaction d'une page peut suffire pour les projets simples.

1.6.6. Méthodologie d'une étude de sols

Le choix de la méthode dépend dans une large mesure de la nature du problème étudié et de la structure géologique du site.

Certains essais sont mieux adaptés que d'autres à l'étude d'un problème, compte-tenu évidemment de la nature du terrain. Souvent, sur un même chantier, plusieurs types d'essais complémentaires sont utilisés comme le pénétromètre statique et le pressiomètre. Le tableau 1 apporte des précisions sur ces points.

Tableau 1.1 : Aide au choix d'un type d'essai (MP : Méthode Proscrite ; MR : Méthode Recommandée ; MUC : Méthode usuelle et convenable)

	Carotte	Lab	Pres	Pénétr	SPT	Scisso
Argile molles	MUC	MUC	MR	MR	MP	MUC
Argile raides	MR	MUC	MR	MP	MP	MP
sables	MP	MP	MR	MR	MUC	MP
graviers	MP	MP	MR	MP	MP	MP

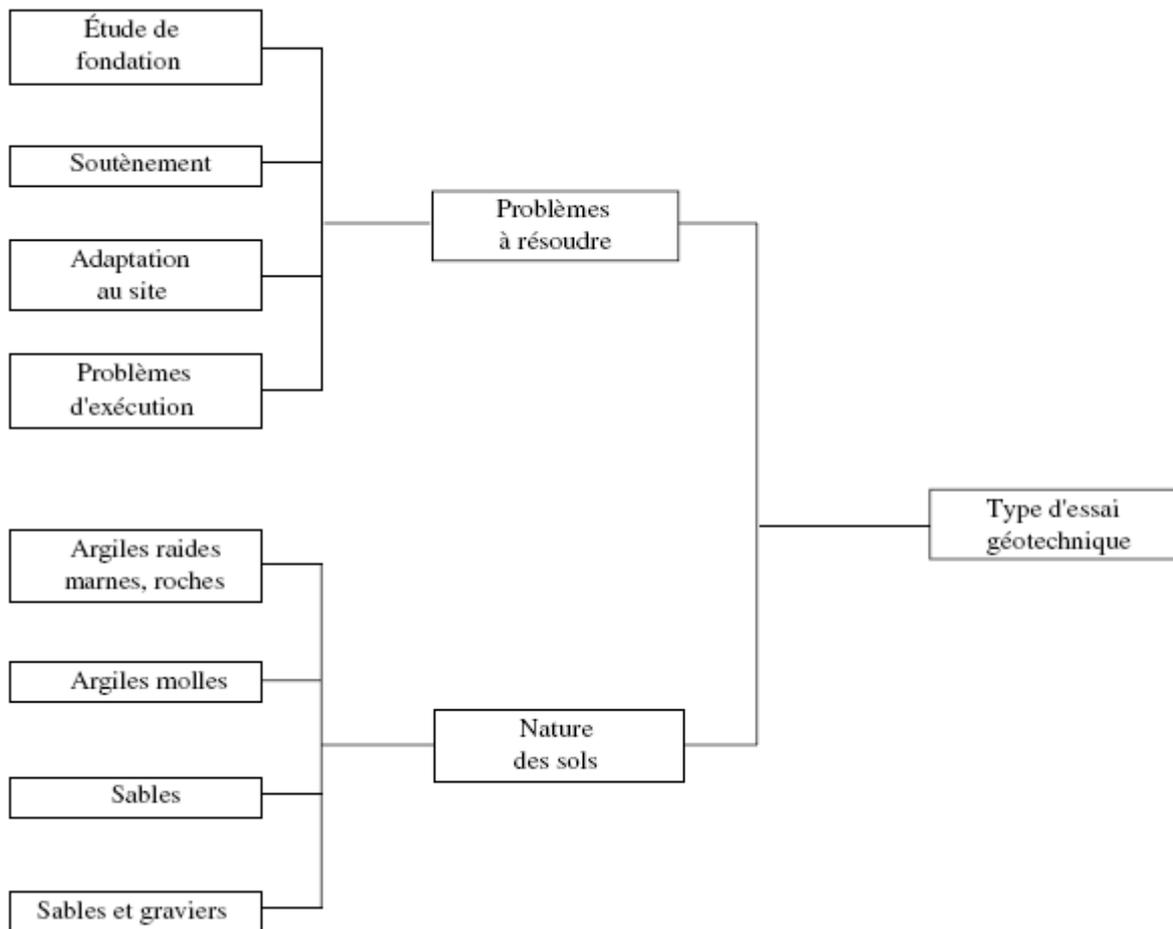


Figure 1.3: Méthodologie générale pour l'étude

1.7. Les missions géotechniques

Les géotechniciens possèdent les compétences pour intervenir à tous les stades de la vie d'un ouvrage. Les différentes missions dans lesquelles géotechniciens intervient, entrent dans le cadre des missions types d'ingénierie géotechniques telles que définies par la norme NFP 94-500 de novembre 2013 [5].

Mission G1 - Etudes géotechniques préalables

Mission G1 ES – Etude de Site

Réalisée en amont d'une étude préliminaire, d'une étude d'esquisse ou d'un avant projet sommaire, elle permet de définir le modèle géologique préalable du site ainsi que les

recommandations en vue d'y implanter un ouvrage non-encore défini et de faire la première identification des risques géologiques d'un site à travers une enquête documentaire.

Mission G1 PGC – Principes Généraux de Construction

Réalisée au stade d'une étude préliminaire, d'une étude d'esquisse ou d'un avant projet sommaire, elle permet de définir les principes généraux de construction envisageables pour le projet. Elle s'appuie sur la définition, la réalisation et/ou le suivi d'un programme d'investigations géotechniques.

Mission G2 - Etude géotechnique de conception

Mission G2 AVP - En Phase Avant Projet

Réalisée au stade de l'avant-projet, elle étudie les principes constructifs et d'adaptation du projet au sol envisageables et fournit l'ébauche dimensionnelle d'un profil type pour chaque ouvrage géotechnique. Elle s'appuie sur la définition, la réalisation et/ou le suivi d'un programme d'investigations géotechniques. Elle permet une première approche des quantités.

Mission G2 PRO - En Phase Projet

Réalisée au stade projet, elle fournit une synthèse actualisée du site, les méthodes d'exécution pour les ouvrages géotechniques et les valeurs seuils associées, ainsi que les notes de calcul de dimensionnement optimisé pour tous les ouvrages géotechniques et pour toutes les phases de construction. Elle permet une approche des quantités / délais / coûts d'exécution de ces ouvrages. Si besoin, des investigations complémentaires sont réalisées.

Mission G2 DCE/ACT – En Phase DCE / ACT

Elle consiste en l'établissement des documents nécessaires à la consultation des entreprises pour l'exécution des ouvrages géotechniques et en l'assistance du client pour la sélection des entreprises et pour l'analyse technique des offres.

Mission G3 - Etude et suivi géotechnique d'exécution

Normalement à la charge de l'entreprise, elle permet de réduire les risques géotechniques résiduels par la mise en œuvre à temps de mesures correctives d'adaptation ou d'optimisation.

En phase Etude

Elle consiste à étudier dans le détail les ouvrages géotechniques : hypothèses, définition et dimensionnement, méthodes et conditions d'exécution. Si nécessaire, des investigations complémentaires peuvent être réalisées.

En phase Suivi

Elle consiste à suivre l'exécution des ouvrages géotechniques, à vérifier les données et à participer à l'établissement du dossier de fin de travaux et des recommandations de maintenance des ouvrages géotechniques.

Mission G4 - Supervision géotechnique d'exécution

Normalement à la charge du maître d'ouvrage ou de son représentant, elle permet de vérifier la conformité aux objectifs du projet, de l'étude et du suivi géotechniques d'exécution.

En phase de Supervision de l'étude d'exécution

Elle consiste en des avis sur l'étude géotechnique d'exécution, sur les adaptations potentielles des ouvrages géotechniques proposées par l'entreprise, sur le programme d'auscultation et les valeurs seuils associées.

En phase de Supervision du suivi d'exécution

Elle consiste en des avis, à l'issue d'interventions ponctuelles sur le chantier, sur le contexte géotechnique, sur le comportement observé de l'ouvrage et des avoisinants et sur l'adaptation ou l'optimisation de l'ouvrage géotechnique.

Mission G5 - Diagnostic géotechnique

Pendant le déroulement d'un projet ou au cours de la vie d'un ouvrage, cette mission consiste dans le cadre d'une mission ponctuelle à étudier un ou plusieurs éléments géotechniques dans le cadre d'un diagnostic, mais sans aucune implication dans d'autres éléments géotechniques.

Cette mission peut inclure après enquête documentaire, la définition d'un programme d'investigations spécifique et sa réalisation.

1.8. Objet et composition d'une reconnaissance du sol

- Identifier les sols sous et au voisinage immédiat de l'ouvrage et d'en quantifier certains paramètres nécessaires à la conception des infrastructures d'un ouvrage (bâtiments, ponts, routes...)

- Adaptée au type d'ouvrage

- Communiquée aux soumissionnaires par le Maître d'Ouvrage

Il existe des paramètres permettant de quantifier la nature et le comportement des sols sous les sollicitations qui lui sont appliquées. Ces paramètres sont déterminés par des essais [6]:

- soit effectués au laboratoire à partir d'échantillons intacts prélevés in situ

- soit effectués in situ au moyen d'appareillages appropriés Paramètres caractérisant la nature des sols, leur comportement et les écoulements d'eau dans le sol

Dans tous les cas, la reconnaissance géotechnique fait l'objet d'un rapport comportant les parties géologie de la région concernée, informations sur les constructions environnantes (s'il y a lieu), rapport sur les essais effectués (in situ et en laboratoires) localisation des essais, description du matériel utilisé, mode opératoire, incidents, résultats obtenus, synthèse des informations et résultats obtenus, recommandations sur les procédés de fondations possibles et évaluations de leurs avantages et inconvénients.

1.9. Importance du paramètre « sol » vis à vis de la pérennité des ouvrages

Les conditions géologiques et géotechniques initiales Géomorphologie du site, géologie (nature des sols et géométrie des couches, pendages, accidents éventuels, hydrogéologie)

- Caractérisations physique et mécanique des sols

- Sondage de reconnaissance avec essais pressiométriques $\square E_M, p_1^*, p_f^*$
- Sondage pénétrométrique $\square q_d$
- Sondage au carottier battu \square coupe des terrains et N_{CB10}
- Sondage au tracto-pelle \square coupe des terrains,



Figure 1.5 : Essai Pressiométrique - NFP 94-110 (Juil 91) et NFP 94-110-1[7]

Description de l'essai :

Il s'agit d'un essai de chargement statique du terrain en place effectué grâce à une sonde cylindrique dilatable radialement, introduite dans un forage.

L'essai permet d'obtenir la courbe de variation des déformations volumétriques du sol en fonction de la pression appliquée (la contrainte).

On peut déterminer trois paramètres : le module de déformation du sol, la pression de fluage, et la pression limite de chargement.

Description du matériel :

3 éléments principaux : l'ensemble manométrique et volumétrique

Les tubulures coaxiales ou jumelées reliant l'ensemble précédent à la sonde.

La sonde (dilatable radialement par injection d'eau).

Mise en oeuvre :

Après forage, la paroi doit demeurer intacte pour permettre l'insertion de la sonde.

On déplace la sonde à diverses profondeurs pour effectuer des mesures sur l'épaisseur de

terrain désirée.

Résultats : procès verbal

Le but de cet essai est de trouver la pression limite de chargement du sol :

Au cours de l'essai, on note successivement les valeurs de la pression et de la déformation du sol à chaque palier sur une feuille

Puis on tracera la courbe déformation volumiques-pression, qui permet de calculer :

le module pressiométrique, la pression de fluage et la pression limite.

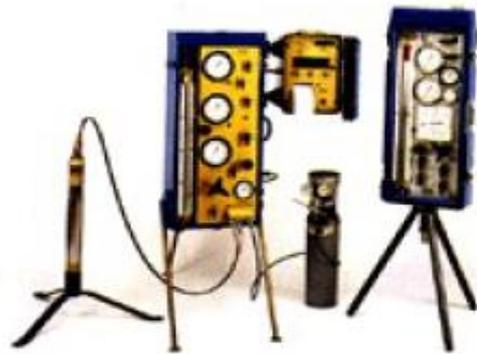
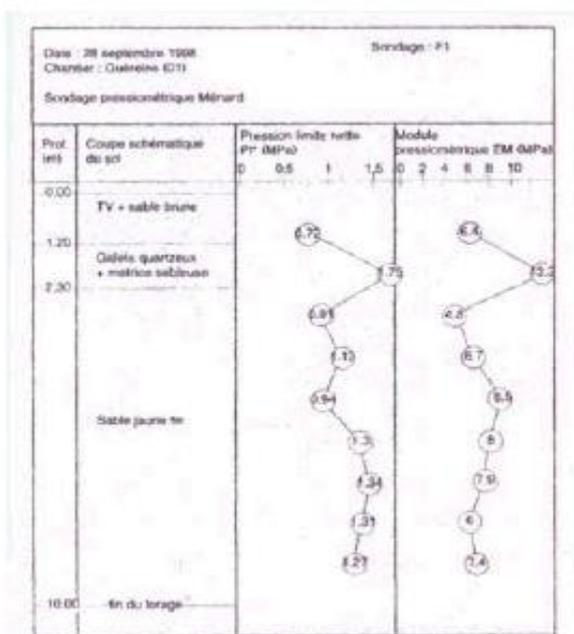
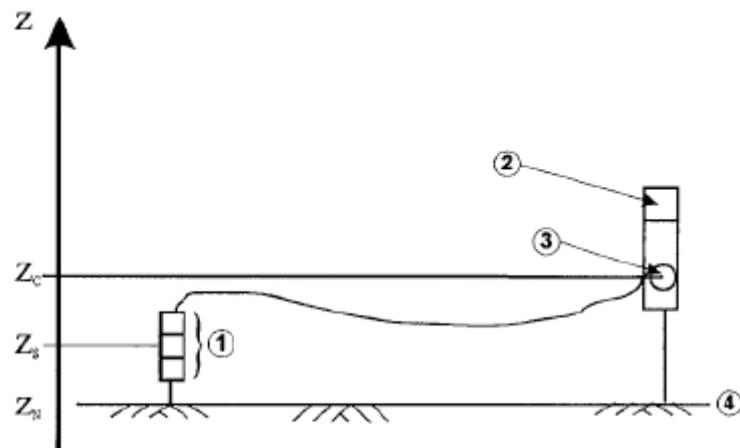


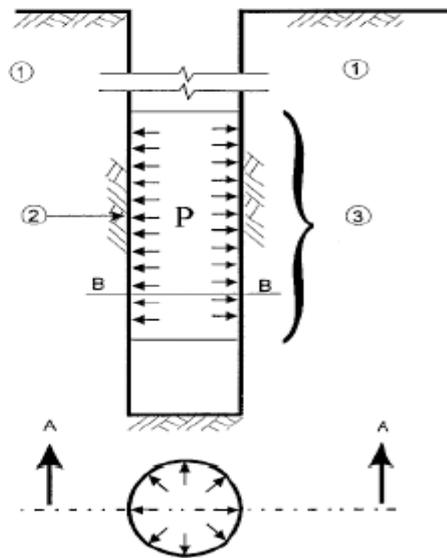
Figure 1.6 : Appareil de l'essai pressiométrique [7]



Légende

- 1 Sonde pressiométrique
- 2 Indicateur de pression
- 3 Conditionneur de pression
- 4 Terrain naturel
- Z Cote altimétrique

Figure 1.7 : Reperage de la sonde lors de l'essai pressiométrique [7]



Légende

- 1 Terrain
- 2 Forage pressiométrique
- 3 Sonde pressiométrique

Figure 1.8 : Schéma d'un sondage pressiométrique [7]

Courbe pressiométrique corrigée

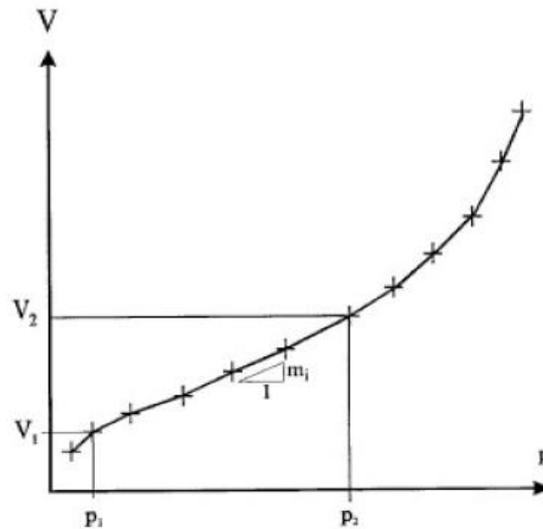


Figure 1.9: Courbe préssiométrique

Calcul du module préssiométrique, de la pression limite et de la pression de fluage

- $EM = 2(1+(V_s + ((V_1+V_2)/2)))(P_2-P_1)/(V_2-V_1)$

- p_l est la pression corrigée qui correspond à un volume de liquide injecté de

$V_l = V_s + 2 V_1$

(méthode directe, méthodes d'extrapolation de la courbe inverse et hyperbolique, ..)

- p_f est obtenue par extrapolation graphique du diagramme $(p, V_{60}/30)$

Tableau 1.2: Valeur de pression limite des sols [7]

Nature des sols	Pression limite pl en Mpa
Argile molle	< 0.7
Limon et craie molle	< 0.8
Sable argileux et limoneux ou vaseux lâche	< 0.7
Sable et grave moyen compacts	1- 1.8
Argile et limon compacts	1.2- 3
Marne et marnocalcaire	1.5 - 4
Craie altérée	1 - 2.5
Roche altérée	2.5 - 4
Craie fragmentée	> 3
Marne très compacte	> 4.5
Sable et graviers compacts à très compacts	> 2.5
Roche fragmentée	> 4.5

Tableau 1.3: Relation entre le module pressiométrique, la pression limite et l'état du sol [7]

type	tourbe	argile		limon		sable		Sable et gravier	
	α	E/pl	α	E/pl	α	E/pl	α	E/pl	α
Surconsolidé très serré	-	>16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3
Normalement consolidé ou serré	1	9-16	2/3	8-14	1/2	-12	1/3	6/10	1/4
Surconsolidé altéré, remanié ou lâche	-	7-9	1/2	5-8	1/2	5-7	1/3		

- Essai de pénétration statique (NFP 94-113, oct 96)
- Essais de pénétration type A (NFP 94-114, dec 90)
- Sondage au pénétromètre type B (NFP 94-115, dec 90)
- Essai de pénétration au SPT (NFP 94-116, oct 91)

Description de l'essai et du matériel :

Résultats : procès verbal

- calcul de q_c (résistance apparente à la pénétration du cône) et de f_s (effort de frottement latéral)
- calcul de q_d (résistance dynamique de pointe) avec PDA (dimensionnement)
- calcul du nombre de coups pour enfoncement de 20 cm avec PDB
- calcul du nombre de coups N pour une hauteur de 30 cm

4 Appareillage et instruments de mesure

4.1 Appareillage

4.1.1 Présentation du pénétromètre statique

La figure 1 montre les différents éléments par fonction dans leur environnement.

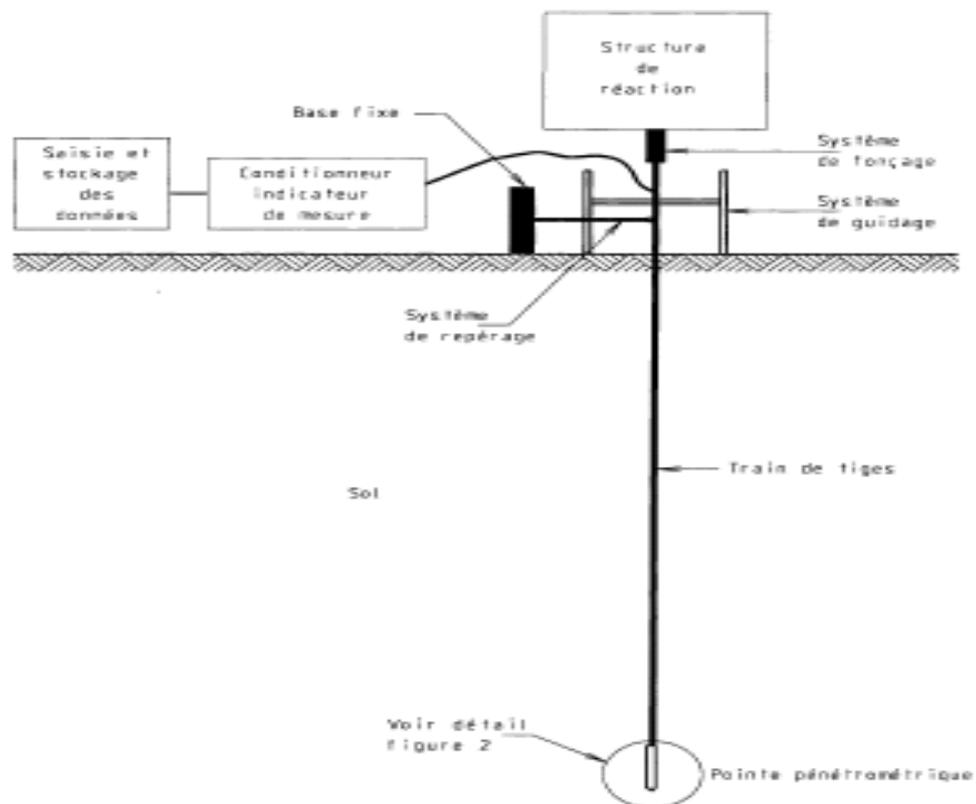


Figure 1.10: Pénétromètre statique [7]

Annexe C

(informative)

Exemple de présentation des résultats

C.1 Procès-verbal d'essai

Il comporte une représentation graphique des résultats dont un exemple est donné sur la figure C.1.

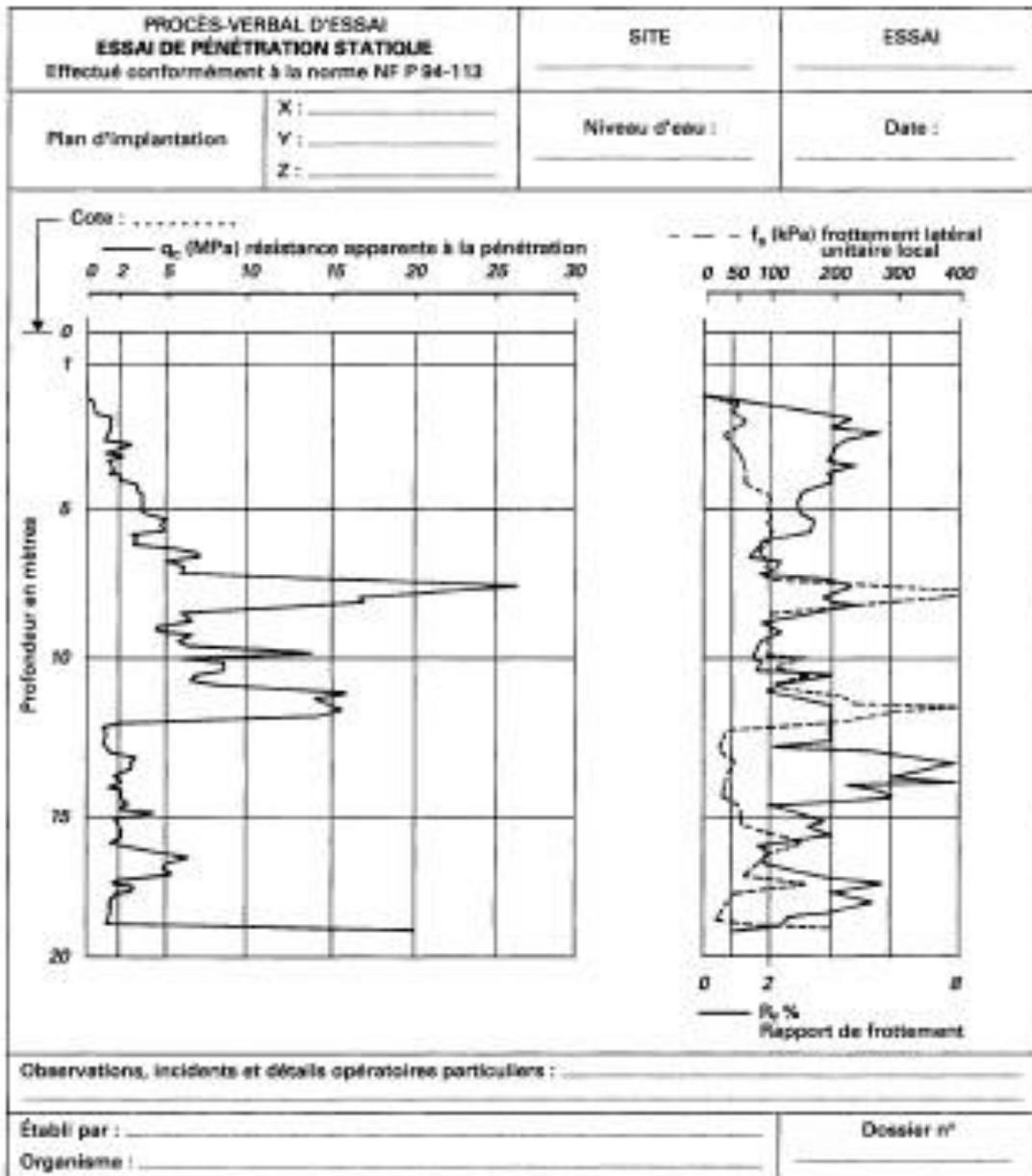


Figure 1.11 : Procès verbale de l'essai de pénétromètre statique [7]

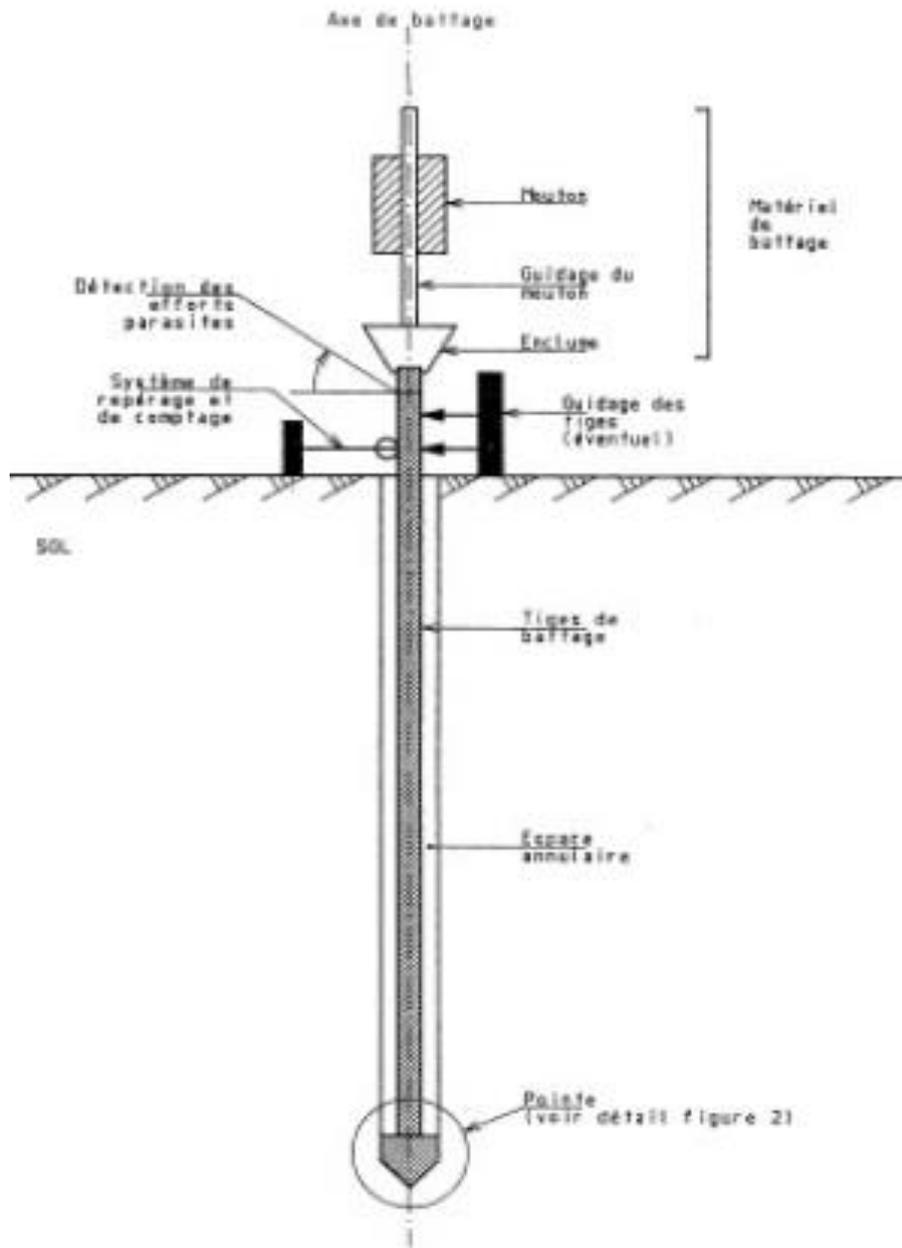


Figure 1.12 : Pénétrömètre dynamique [7]

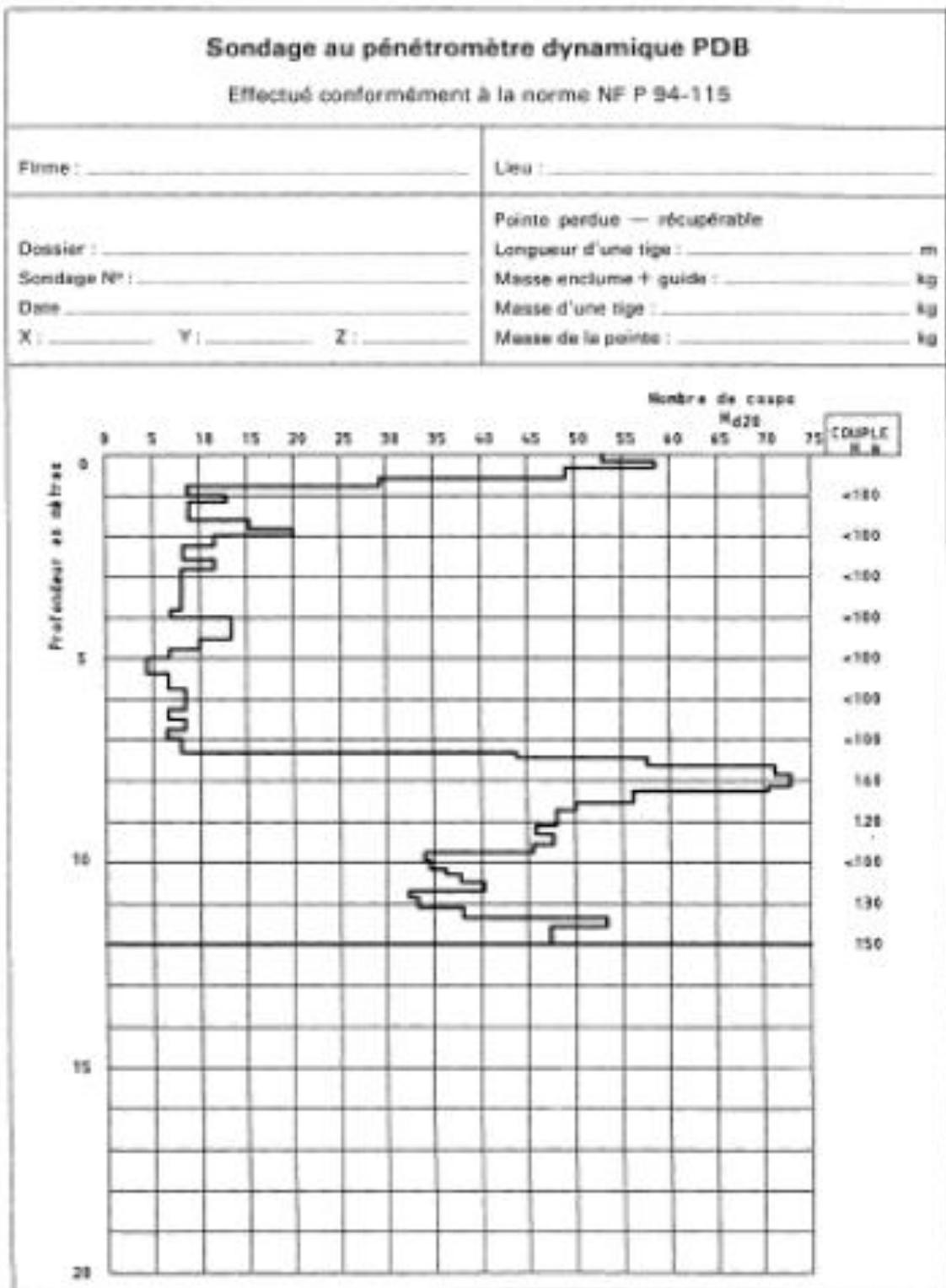


Figure 1.13: Procès verbale de l'essai de pénétromètre dynamique [7]

Tableau 1.4: valeur de résistance q_c en fonction de nature de sol [7]

Nature du sol	q_c (kPa)
Argile molle et vase	0 à 2000
Argile moyen consistante	2000 à 5000
Argile raide à très raide	>5000
Limon ou sable lâche	0 à 2500
Sable moyen compact	2500 à 10000
Sable compact à très compact	>10000
Craie molle	< 5000
Craie altérée, fragmentée	>5000

Essai de cisaillement au phicomètre - XP P 94-120 (déc 97)

Description de l'essai et du matériel :

Résultats : procès verbal

1. Angle de frottement in situ
2. Cohésion mesurée in situ

Essai scissométrique en place - NF P 94-112 (nov 91)

Description de l'essai et du matériel :

Résultats : procès verbal

Résistance au cisaillement

1.11. Les essais de contrôle

Un exemple, le contrôle du compactage avec le pénétromètre dynamique à énergie variable

Fonction A : les variations de résistances de pénétration dynamique à la transition des couches sont utilisées pour apprécier les épaisseurs compactées [8].

Fonction B : l'identification des matériaux effectivement mis en œuvre selon la norme NF P 11-300 est nécessaire ainsi que la connaissance de leur état hydrique au moment de l'essai.

Le pénétrogramme est comparé, pour les valeurs requises de densité sèche, au niveau Q_L et Q_R extraites du catalogue d'étalonnage spécifique à l'appareil :

- Soit catalogue de cas- types soumis à essai, si on utilise la méthode d'étalonnage par établissement des droits limites .

Fonction C : Le pénétrogramme de la partie contrôlée sont comparés à la population des pénétrogrammes obtenues avec le même appareil sur une planche de référence spécifique au chantier.

1.12. Essais en laboratoire

1.12.1. Essais d'identification :

- + Appellation suivant la classification normalisée
- + Granulométrie
- + Teneur en eau
- + Compacité
- + Poids spécifiques apparent et absolu
- + Limites d'Atterberg
- + Etat de fissuration, pendages

1.12.2 . Essais de caractérisation des propriétés mécaniques :

- + Caractéristiques à la rupture
- + Résistance à la compression,
- + Caractéristiques intrinsèques :
 - Cohésion,
 - Angle de frottement.
 - Caractéristiques de déformabilité sous charges.

1.12.3 . Essais de caractérisation des propriétés hydrauliques

Tableau 1.5 : Exemples d'essais géotechniques in situ+caisse avec carottes

	Types d'essais	But
	Sondage carotté	Sert à prélever des échantillons de sols pour analyse au laboratoire.
	Essai pénétrométrique	Donne une idée sur la portance des sols sans prélèvement de carottes.
	Carottes prélevées et mises dans des caissons.	Pour le transport au laboratoire et leurs protections.

Tableau 1.6 : Exemples d'essais géotechniques en laboratoire

	Types d'essais	But
	Essai triaxial	Déterminer les paramètres de cisaillement
	Analyse granulométrique par tamisage	Identification des sols
	Essai de cisaillement rectiligne.	Détermination de la cohésion et de l'angle de frottement.

1.13. Exemple de recommandations pour le mode de fondations

Une étude de sol, adaptée au type d'ouvrage, est communiquée aux soumissionnaires par le maître d'ouvrage. Les ouvrages et leurs systèmes de fondation sont conçus en tenant compte des résultats des études de sol .

Cette étude sera conforme au DTU 13.12 "Règles de calcul pour les fondations superficielles" ou selon le cas au DTU 13.2 "Fondations profondes" :

commentaires au cahier des charges "Calcul des fondations profondes soumises à charge axiale, au Fascicule 62 titre V, à l'Eurocode 7.

Il appartient au maître d'ouvrage de préciser dans les documents d'appel d'offres :

- s'il a opté pour un type de fondations (superficielles ou profondes) ;
- s'il laisse la liberté de choix à l'entreprise.

Cette étude précise explicitement :

a) Dans le cas de fondations superficielles :

- La contrainte de calcul "q",
- Les paramètres permettant de calculer, selon la taille de la fondation, sa valeur ultime "qu",
- Les paramètres qui permettent d'évaluer les tassements absolus et les tassements différentiels.

b) Dans le cas de fondations profondes :

- La résistance de pointe,
- Le frottement latéral, ou les éléments permettant de calculer ces valeurs.

c) Le niveau maximum de la nappe phréatique, à prendre en compte dans les calculs.

1.14. Principes généraux de normes de calcul des ouvrages géotechnique

1.14.1. Classification des actions

L'Eurocode 1 définit trois catégories d'actions (ou « charges » au sens large, puisqu'il peut s'agir de forces, de moments ou de déplacements imposés) correspondant à des durées et fréquences d'application différentes [9]:

- Les actions permanentes (poids des structures et des sols, pressions d'eau, pressions des terres, précontrainte, etc.) ;
- Les actions variables (charges de circulation, charges de vent et neige, etc.) ;
- Les actions accidentelles (explosions, charges dynamiques, chocs, séismes, etc.).

Ces actions sont combinées pour définir les cas de charge qui serviront pour le calcul, en suivant les règles complexes traditionnelles qui attribuent des poids différents aux différents types d'actions (permanentes, variables dominantes ou autres, accidentelles et sismiques).

1.14.2. Situations de calcul

Les situations de calcul sont les données géométriques, physiques et mécaniques sur les structures et les sols pour lesquelles on doit vérifier que l'on n'atteint pas d'état limite ultime ou de service. Des situations de calcul différentes peuvent être associées aux phases d'exécution d'un même ouvrage, tant pour les géométries successives du sol et de l'ouvrage que pour le type de comportement (court terme, long terme) et les combinaisons de charges permanentes, transitoires et accidentelles qui sont susceptibles de se produire pendant la durée de la phase correspondante des travaux.

1.14.3. Valeurs caractéristiques et valeurs de calcul

La notion de valeur caractéristique d'un paramètre de dimensionnement (charge ou propriété mécanique d'un matériau) est liée à une conception probabiliste de la sécurité : c'est une valeur « représentative » ayant une certaine probabilité d'être dépassée du côté défavorable au comportement de l'ouvrage (c'est ainsi, par exemple, que l'on choisit en général des valeurs caractéristiques inférieures à la moyenne pour la résistance et des valeurs supérieures pour les charges). Cette probabilité est fixée à 5 % dans l'eurocode 7. Dans la pratique de la géotechnique, la détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques des sols (et des roches) est souvent malaisée, car on dispose rarement d'un ensemble suffisant de résultats de mesures pour effectuer une analyse statistique

1.14.4. Définition des coefficients partiels

Les coefficients partiels sont les facteurs minorateurs ou majorateurs que l'on applique aux valeurs caractéristiques des actions et propriétés des matériaux pour en déduire les valeurs de calcul. Cette correction, opérée au niveau des données du calcul, remplace l'application classique d'un coefficient de sécurité global unique sur les résultats des calculs de stabilité (pour les calculs de déplacements et déformations, on garde en général les valeurs des modules déduites de la synthèse des essais, en appliquant des coefficients partiels égaux à un). Il est prévu d'affecter aussi un coefficient partiel à la méthode de calcul elle-même, mais cette possibilité n'a encore pas été mise en oeuvre dans l'eurocode 7.

CHAPITRE 02 :
Principes réglementaires de dimensionnement

2.1. Règles de dimensionnement des ouvrages géotechniques

L'eurocode 7 s'applique aux **aspects géotechniques du calcul des bâtiments et des ouvrages géotechniques de génie civil** [3].

Il traite des exigences vis-à-vis de la résistance, de la stabilité, de l'aptitude au service et de la durabilité des ouvrages.

Des principes réglementaires est applicable aux aspects géotechniques des catégories d'ouvrages suivantes :

- tous les bâtiments ;
- les ouvrages d'art tels que les ponts, les soutènements, les tranchées couvertes, les pylônes
- les pentes naturelles et artificiels (déblais), les ouvrages en sol renforcé, les remblais.

Il est important également de noter que **l'eurocode 7 n'est pas un manuel de dimensionnement mais un règlement de justification des projets.**

L'eurocode 7 est divisé en neuf chapitres [3]:

chapitre 1 : Introduction

chapitre 2 : Bases du calcul géotechnique

chapitre 3 : Données géotechniques

chapitre 4 : Contrôle de la construction, surveillance et entretien

chapitre 5 : Remblais, rabattements de nappe, amélioration et renforcement du sol

chapitre 6 : Fondations superficielles

chapitre 7 : Fondations sur pieux

chapitre 8 : Ouvrages de soutènement

chapitre 9 : Remblais et talus

Les premiers chapitres présentent les concepts de base du dimensionnement des ouvrages, tandis que les chapitres suivants décrivent leur application au dimensionnement des grandes catégories d'ouvrages géotechniques

Il ne faut pas y chercher des indications sur la meilleure façon de concevoir les ouvrages, ni quelles dimensions il vaut mieux leur donner ou quelles sont les meilleures techniques de construction : l'eurocode 7, comme tous les autres eurocodes, définit les règles qu'il faut appliquer pour prouver au client et aux organismes chargés d'assurer la sécurité dans le

secteur du bâtiment et des travaux publics que l'ouvrage décrit dans le projet est stable et remplira les fonctions qui lui sont assignées.

Il fallait en effet, dans l'énoncé des principes obligatoires de justification des ouvrages, tenir compte de l'extrême diversité des matériaux rencontrés en géotechnique et de l'existence de traditions nationales incontournables.

Eurocode 7 se limite souvent à l'énoncé de principes généraux et de listes de facteurs qu'il ne faut pas oublier, quand ils sont pertinents, pour effectuer la justification du dimensionnement de l'ouvrage. Il est un peu plus détaillé pour les fondations profondes et superficielles, qui sont des types d'ouvrages pour lesquels existaient des normes spécifiques.

2.2. Définition des Actions et valeurs caractéristiques

Actions permanentes G G_{max} et G_{min}

Poids propre de la fondation, poids propre de l'appui, fraction du poids propre du bâtiment ou de l'ouvrage considéré et de ses équipements reprise par la fondation, efforts dus au retrait, fluage, efforts dus au poids et poussée des sols

Poussées latérales G_{sp}

Certains cas dans les fondations profondes

Frottement négatif G_{sf}

Dans le cas de sols compressibles pour les fondations profondes

Actions dues à l'eau F_w

Poussée d'Archimède (pour les contraintes effectives), l'effet hydrodynamique des courants sur les appuis en rivière et en mer

Actions variables Q

Charges d'exploitation (surcharges routières, freinage, stockage temporaire...)

Charges dues aux effets climatiques

Actions accidentelles F_a

Choc de bateau, de véhicule, vent extrême, explosion, feu, séisme

2.3. Règles générales

Il faut éviter la rupture et limiter les tassements dont :

ELU /ELS à vérifier

- Instabilité d'ensemble
- Portance
- Glissement
- Rupture combinée dans le terrain et dans la fondation
- Rotations, tassements ou déplacements excessifs
- soulèvement de la fondation sous l'effet du gonflement ou du gel
- Vibrations inadmissibles

2.4. Approche EC7 – calcul aux états limites

La conception et le dimensionnement fait référence à plusieurs critères qu'il convient de Vérifier simultanément, mais un seul est généralement dimensionnant,

Tableau 2.1 : Critère de dimensionnement d'un ouvrage géotechnique [3]

Critères de dimensionnement		<u>Cas dimensionnants</u>
<p><u>États Limites Ultimes (ELU)</u> Pondérations réglementaires</p>	<p><u>États Limites de Service (ELS) -</u> Pondérations $\gamma = 1.0$</p>	
<p><u>Cas de charges</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Normales et extrêmes • Accidentelles 	<p><u>Cas de charges</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Normales et extrêmes • Pannes ou défaillance 	
<p><u>Vérifications</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Stabilité générale (y compris déjaugageage – surface comprimée) • Capacité portante du sol • Glissement 	<p><u>Vérifications</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Tassements • Capacité portante du sol • Décollement de la fondation • Résonance ($K_{phi;dyn}$) 	

- Rafale
 - Souvent classe 1
 - Rarement classe 2 et/ou 3
- Tremblement de terre
 - Pratiquement jamais
 - typiquement si $a_n > 0.2 g$
- Charge opérationnelle
 - Souvent arrêt d'urgence
 - Rafale et coupure du réseau électrique

Tableau 2.2 : Vérification minimales à établir aux ELU pour les situations d'un ouvrage géotechnique en cours de réalisation et exploitation [3]

ELU

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

Pour les fondations superficielles

- l'ELU de mobilisation du sol (capacité portante)
- l'ELU de renversement
- L'ELU de glissement sur la base
- L'ELU de stabilité d'ensemble
- L'ELU de résistance des matériaux constitutifs de la fondation

Tableau 2.3 : Vérification minimales à établir aux ELS pour les situations d'un ouvrage géotechnique en cours de réalisation et exploitation [3]

ELS

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

ELS

- l'ELS de mobilisation du sol (limitation des déplacements)
- L'ELS de décompression du sol (uniquement pour les fondations superficielles)
- l'ELS du matériau constitutif de la fondation (durabilité de la fondation)

2.5. Organisation des études géotechniques

La justification d'un ouvrage du point de vue de la géotechnique s'appuie bien évidemment sur les conclusions de la reconnaissance du site, comportant les cas des études géologiques, des sondages et essais en place, des prélèvements et essais de laboratoire, voire des expérimentations en vraie grandeur. L'importance de cette reconnaissance géotechnique et les méthodes de justification utilisées dépendent non seulement de la nature de l'ouvrage et des terrains (sols ou roches) rencontrés sur le site, mais aussi de l'importance de l'ouvrage.

2.5.1 Catégories géotechniques

Les rédacteurs de l'eurocode 7 ont introduit la notion de « catégorie géotechnique » pour différencier les « ouvrages simples » des autres ouvrages géotechniques et autoriser l'emploi de méthodes de justification simplifiées pour ces ouvrages simples, afin de permettre le maintien des pratiques en vigueur sans dommages particuliers. L'eurocode 7 définit trois catégories géotechniques [3]:

a- Catégorie géotechnique 1

comprend les ouvrages de faible importance et relativement simples, pour lesquels il est possible d'admettre que les exigences fondamentales (sécurité, aptitude au service et durabilité) seront satisfaites en utilisant l'expérience acquise et des reconnaissances géotechniques qualitatives, avec des risques négligeables pour les biens et les vies. Cette catégorie correspond typiquement à des maisons à un ou deux niveaux, à des bâtiments agricoles de faible importance sur fondations superficielles classiques ou sur pieux, à des murs de soutènement et fouilles blindées où la différence de niveau des terrains n'excède pas 2 m, à de petites excavations pour la pose de canalisations ou de drains.

b- Catégorie géotechnique 2

comprend les types classiques d'ouvrages et de fondations qui ne présentent pas de risques anormaux ou des conditions de terrain et de chargement inhabituelles ou exceptionnellement difficiles. Pour ces ouvrages, des reconnaissances géotechniques quantitatives et des calculs de justification sont nécessaires, mais avec des procédures de routine tant pour les essais que pour les calculs. Cette catégorie comprend les types classiques de fondations superficielles, de fondations sur radiers, de fondations sur pieux, les murs et les autres ouvrages retenant ou soutenant du sol ou de l'eau, les excavations, les appuis et culées de ponts, les remblais et terrassements pour le bâtiment et les ouvrages d'art, les ancrages et autres systèmes de tirants, les tunnels simples.

c- Catégorie géotechnique 3

comprend les ouvrages et parties d'ouvrages qui n'entrent pas dans les catégories 1 et 2, parce qu'ils sont très grands ou très inhabituels, créent des risques anormaux ou doivent être édifiés dans des conditions de terrain très complexes ou dans des zones très sismiques.

La consistance de l'étude géotechnique et du rapport de justification de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage est définie *a priori* lors de la commande de l'étude géotechnique par le maître d'oeuvre, mais elle doit être régulièrement revue pour l'adapter aux constatations faites au fur et à mesure de la reconnaissance géotechnique et de l'élaboration du projet.

2.5.2 Procédures de justification

La justification des ouvrages géotechniques consiste à prouver que, dans chaque situation de calcul, aucun des états limites identifiés n'est atteint. La façon classique d'opérer cette vérification consiste à effectuer des calculs :

- Calcul des efforts déstabilisants et des efforts résistants ;
- Calcul des déplacements ou déformations, et de vérifier que l'on atteint pas les états limites ultimes (en stabilité et en déformations), ni les états limites de service (en stabilité et en déformations). Toutefois, cette procédure de justification n'est pas la seule qui soit admise pour les ouvrages de géotechnique.

L'eurocode 7 note que de nombreuses incertitudes affectent les méthodes de calcul disponibles, parce qu'elles simplifient le comportement du sol ou de l'ouvrage et nécessitent souvent des ajustements empiriques pour dimensionner l'ouvrage à partir des résultats du

calcul. Certaines méthodes de calcul sont d'ailleurs uniquement des relations empiriques entre les résultats d'essais et le comportement de l'ouvrage. Enfin, certains états limites ne peuvent être vérifiés par le calcul et il est donc impossible de mettre en oeuvre directement les règles générales de justification. Dans un tel cas, on a recours à l'expérience pour justifier qu'un coefficient de sécurité par rapport à un autre état limite calculable permet d'éviter l'état limite considéré.

L'eurocode 7 admet donc logiquement, conformément à l'expérience acquise dans la pratique de la géotechnique, qu'il existe quatre façons de justifier un ouvrage :

- Justification par le calcul

déjà évoquée, où l'on utilise des modèles de calcul, des actions qui peuvent être des charges imposées ou des déplacements imposés, des propriétés de sols, roches ou autres matériaux, des données géométriques et des valeurs limites de déformations, de profondeurs de fissures, de vibrations, etc.

- Justification par des mesures prescriptives

qui sont des choix classiques et sécuritaires sur les matériaux, les détails du projet, son exécution, etc. Ce type de dimensionnement peut être utilisé notamment pour les ouvrages simples, lorsque l'on dispose de l'expérience d'une construction semblable dans les mêmes conditions de terrain. Il est également adapté pour traiter les questions de durabilité vis-à-vis du gel et des attaques chimiques et biologiques, pour lesquelles des calculs ne sont en général pas appropriés.

- Justification par des essais de chargement ou des essais sur modèles physiques

qui suppose toutefois de maîtriser les effets de temps, d'échelle et de différences éventuelles des conditions de terrain entre l'essai et l'ouvrage à construire ;

- Justification du projet et conduite des travaux

par utilisation des observations faites sur l'ouvrage lui-même, approche appelée couramment méthode observationnelle. Cette démarche admet que l'on fasse un dimensionnement optimiste de l'ouvrage, à la condition d'avoir pris la mesure des risques encourus, de réaliser des mesures efficaces pendant les travaux et de disposer d'un programme de mesures

d'urgence à mettre en oeuvre si les observations montrent que le comportement réel de l'ouvrage sort des limites admises.

2.5.3. Rapports géotechniques

Les calculs nécessaires à la justification du projet doivent être présentés dans un rapport de dimensionnement géotechnique, qui complète le rapport de reconnaissance géotechnique. Elle traite les constructions géotechniques disponibles, y compris les caractéristiques géologiques et les autres données importantes pour le projet, et un rapport d'évaluation géotechnique des informations précédentes, indiquant les hypothèses adoptées pour établir les valeurs des paramètres géotechniques prises en compte dans le dimensionnement de l'ouvrage.

2.6. Fondations profondes

Conformément aux principes généraux présentés ci-avant, la justification d'une fondation sur pieux nécessite d'établir d'abord la liste des situations de calcul et des états limites. Les situations de calcul dépendent de la conduite du chantier [10]. L'eurocode 7 donne une liste d'états limites (sans distinction entre états limites ultimes et états limites de service), que l'on peut grouper comme suit :

Etats limites ultimes :

- instabilité d'ensemble,
- rupture du sol (capacité portante, arrachement, résistance transversale),
- rupture du pieu (en compression, traction, flexion, flambement ou cisaillement),
- rupture simultanée du pieu et du sol,
- tassement ou soulèvement excessif ;

Etats limites de service :

- tassement ou soulèvement excessif,
- vibrations.

Les actions doivent être choisies dans une liste générale, commune à tout l'eurocode 7 et comportant les points suivants :

- le poids des sols, des roches et de l'eau ;
- les contraintes existant dans le terrain ;

- les pressions de l'eau libre et de l'eau souterraine ;
- les forces d'écoulement de l'eau ;
- les charges permanentes, d'exploitation et d'environnement provenant des ouvrages ;
- les surcharges ;
- les forces d'amarrage ;
- les déchargements et excavations ;
- les charges de circulation ;
- les mouvements dus aux exploitations minières ;
- les gonflements et retraits créés par la végétation, le climat ou les variations de l'humidité ;
- les mouvements dus au fluage ou au glissement des masses de sol ;
- les mouvements dus à la dégradation, à la décomposition, à l'autodensification ou à la dissolution des terrains ;
- les mouvements et les accélérations dus aux tremblements de terre, explosions, vibrations et charges dynamiques ;
- les effets de température, y compris le soulèvement dû au gel ;
- les charges de glace ;
- les précontraintes imposées dans les ancrages et les butons.

Nous ne reprendrons pas ici la description des procédures de justification des fondations profondes

Pour les fondations profondes, de nombreux aspects du dimensionnement sortent de ce formalisme de calcul, soit parce que l'on ne dispose pas de méthodes de calcul autres qu'empiriques, soit parce que l'on s'appuie sur des essais de pieux sur le chantier pour préciser le projet. On utilise pour cette raison des estimations de la résistance globale du sol au mouvement du pieu, que l'on traite comme des valeurs caractéristiques ou de calcul et qui sont issues directement d'essais de chargement ou de formules de calcul pour essais statiques ou dynamiques en place. Suivant le nombre d'essais réalisés, la résistance du sol au pieu est plus ou moins pénalisée pour déterminer les valeurs de calcul qui seront comparées aux effets des actions.

L'eurocode 7 envisage toutes les situations courantes de fondations profondes : pieux isolés et groupes de pieux, en compression ou en traction, avec ou sans charges latérales, avec ou sans frottement négatif ou soulèvement du sol. Le dimensionnement peut être fondé sur les

propriétés mécaniques du sol en laboratoire, sur les résultats d'essais en place, sur les résultats d'essais de pieux sur le site.

2.7. Fondations superficielles

L'eurocode 7 donne la liste suivante pour les états limites à éviter pour les fondations superficielles :

- instabilité d'ensemble (fondations sur pente, en tête de talus, près d'une excavation ou d'un mur de soutènement, dans une zone minière ou à proximité d'ouvrages souterrains). Cette instabilité est analysée par les méthodes définies pour les ouvrages en terre (remblais et talus) ;
- défaut de capacité portante ;
- rupture par glissement ;
- rupture combinée dans le sol et dans l'ouvrage ;
- rupture de la structure due à un mouvement du sol de fondation ;
- tassements excessifs ;
- soulèvement excessif ;
- vibrations inacceptables.

Les actions à prendre en compte sont de façon générale les mêmes que pour les fondations profondes, en tenant compte de la rigidité globale de la structure, du niveau de l'eau dans le sol, de toutes les sollicitations extérieures diverses susceptibles d'influer sur leur comportement [11,12].

Après un rappel de conseils dans le choix des dimensions des fondations superficielles, y compris la dimension économique et les contraintes d'exécution des travaux, l'eurocode 7 indique que deux méthodes peuvent être utilisées pour justifier le dimensionnement d'une fondation superficielle :

- une méthode directe où l'on calcule séparément la stabilité et les déformations dans chaque situation de calcul, afin de vérifier directement que l'on n'a atteint aucun état limite ;
- et une méthode dans laquelle on détermine une capacité portante conventionnelle, estimée sur la base d'essais, de l'expérience antérieure et de la connaissance accumulée sur la prévention des états limites de service, et garantissant que l'on n'atteint aucun état limite ultime ou de service.

Vérification à l'état limite ultime

La condition de stabilité de la fondation superficielle vis-à-vis du poinçonnement s'écrit :

Avec V charge de calcul à l'état limite ultime, appliquée normalement à la semelle de la fondation, incluant le poids de la fondation elle-même et des éventuels matériaux de remblai. Pour les calculs en conditions drainées, les pressions d'eau sont en général comptées parmi les actions mais, si l'eau est en état hydrostatique autour de la fondation, on peut utiliser les poids volumiques déjaugés des parties immergées, R capacité portante de calcul du sol de fondation sous charge normale à la surface, en incluant les effets des inclinaisons et excentricité éventuelles. Cette valeur est calculée en utilisant les valeurs de calcul des paramètres géotechniques. La valeur de R est donc le produit de la méthode de calcul analytique ou numérique ou empirique utilisée par l'ingénieur géotechnicien dans les conditions du projet. La détermination de R dépend naturellement du type de situation (à court terme ou à long terme) que l'on considère. L'eurocode 7 fournit en annexe (informative) une méthode de calcul analytique (expressions de N_{γ}, N_c et N_q), avec des coefficients de correction pour la forme, l'inclinaison et l'excentricité) et la formule de calcul au pressiomètre. Une autre annexe donne une méthode d'évaluation de la capacité portante des fondations sur rocher.

Des formules de même structure générale sont données pour la stabilité au glissement sur la base de la fondation.

Il faut exécuter ces calculs pour tous les cas pertinents pour le problème considéré, avec des pondérations différentes des actions et des résistances du sol, et prendre la géométrie maximale de la fondation superficielle. La pondération des coefficients partiels pour les propriétés du sol est donnée dans un tableau de l'eurocode 7 pour les caractéristiques classiques des sols en laboratoire (cohésion effective, angle de frottement interne, cohésion non drainée ou résistance à la compression simple). Mais ce travail n'a pas été fait pour les essais en place, la seule condition, assez vague en pratique, étant que le niveau de sécurité soit le même.

Autres vérifications

Pour les calculs de justification correspondant aux autres états limites ultimes ou de service de la liste précédente, l'eurocode 7 donne un certain nombre de recommandations sur les points à ne pas oublier, mais laisse le projeteur libre de la méthode de calcul.

Une annexe informative décrit le principe du calcul des tassements sous les fondations superficielles.

Les dimensions de fondations superficielles justifiées selon l'eurocode 7 et selon les pratiques actuelles dans différents pays ont été comparées lors des travaux préliminaires à la rédaction de l'eurocode 7. Les dimensions des fondations superficielles calculées ne sont pas très différentes dans les cas étudiés, si l'on tient compte de l'ensemble des conditions sur la stabilité et sur les déformations des ouvrages aux états limites ultimes et de service. Mais, comme noté ci-avant, le cas des essais en place n'a pas été étudié et il reste donc encore des travaux importants à faire, pendant la période d'application expérimentale de l'eurocode 7, avant de préciser les règles qui s'appliquent dans l'ensemble des situations rencontrées en pratique.

2.8. Ouvrages de soutènement

Pour les ouvrages de soutènement, l'eurocode 7 suggère de distinguer les murs-poids, les rideaux encastrés et les soutènements mixtes. La liste des états limites à éviter est la suivante [8] :

pour tous les types de soutènements :

- instabilité d'ensemble ;
- rupture d'un élément de structure (paroi, ancrage, buton, etc.) ou des liaisons entre ces éléments ;
- rupture combinée dans le sol et la structure ;
- mouvements excessifs ;
- défaut d'étanchéité ;
- érosion excessive du remblai ;
- modification inacceptable des écoulements souterrains.

Pour les murs-poids et les ouvrages mixtes , il faut aussi considérer les états limites suivants :

- rupture par poinçonnement du sol sous la base du mur ;
- rupture par glissement du mur sur sa base ;
- rupture par renversement du mur.

Pour les rideaux encastrés, il faut par ailleurs prendre en compte les états limites suivants :

- rupture par rotation ou translation du mur ;
- rupture par perte d'équilibre vertical du mur.

La plupart des actions énumérées pour les fondations profondes peuvent s'appliquer aux ouvrages de soutènement. La définition des situations de calcul est particulièrement importante dans ce cas, à cause du nombre parfois élevé des étapes de réalisation des travaux, avec des phases provisoires dont certaines peuvent être plus instables que la situation finale de l'ouvrage de soutènement terminé.

Les procédures de justification des ouvrages de soutènement entrent assez bien dans le moule général des eurocodes, avec des méthodes de calcul pour passer des propriétés mécaniques des sols aux efforts globaux dont le bilan permet de vérifier la stabilité. L'eurocode 7 donne en annexe (règle d'application) des abaques de calcul des efforts de poussée et de butée dans les sols. Ces efforts doivent être calculés avec les valeurs de calcul des paramètres de résistance au cisaillement, déterminées comme indiqué ci-avant. On vérifie ensuite la condition d'équilibre global des actions et des réactions du sol, sans coefficient supplémentaire.

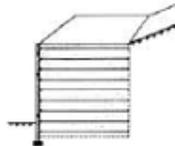
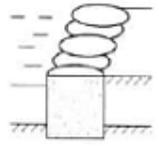
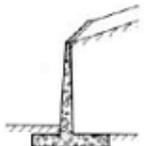
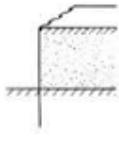
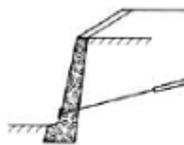
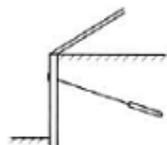
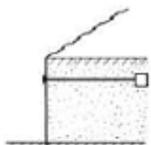
Pour les ancrages, des procédures d'essai d'évaluation de la résistance d'ancrage et d'essai de réception sont prévues. Les conditions d'utilisation des résultats des essais préliminaires pour dimensionner les ancrages, comme cela se fait pour les pieux, sont précisées.

2.9. Ouvrages en terre

Le chapitre relatif aux ouvrages en terre (remblais et talus) est le plus petit des chapitres de l'eurocode 7 consacrés aux ouvrages [13]. De fait, il contient des règles générales qui nécessiteront un approfondissement sensible si l'on veut un jour utiliser l'eurocode 7 pour justifier le dimensionnement détaillé de ce type d'ouvrages géotechniques.

$$V \leq R$$

Tableau 2.4 : Divers types d'ouvrages de soutènement [8]

Mode de reprise de la poussée	Ouvrages de soutènement		
Poids de l'ouvrage	 <p>Mur poids en béton ou maçonnerie</p>	 <p>Mur en Terre Armée</p>	 <p>Ouvrage cellulaire</p>
Encastrement	 <p>Mur cantilever en béton armé</p>	 <p>Paroi moulée</p>	 <p>Rideau de palplanches</p>
Ancrage	 <p>Mur en béton, ancré</p>	 <p>Paroi moulée ancrée</p>	 <p>Rideau ancré</p>

a- Cas où la poussée est reprise par le poids de l'ouvrage de soutènement

- Le type d'ouvrage le plus classique et le plus ancien est le mur poids **en béton** ou **en maçonnerie**. Ce sont des ouvrages rigides qui ne peuvent supporter sans dommages des tassements différentiels supérieurs à quelques pour-mille.
- Les **murs en Terre Armée**, dans lesquels le sol est renforcé par des inclusions souples résistant à la traction, sont des ouvrages souples qui supportent les tassements différentiels du sol de fondation.
- Les **ouvrages cellulaires** sont très variés et le type le plus ancien est le mur caisson en éléments préfabriqués. Dans les travaux maritimes, par exemple, on utilise pour la construction des quais de grands batardeaux cellulaires en palplanches métalliques ou de grands caissons en béton armé. Dans un ouvrage cellulaire, la cellule est remplie de sol et l'ensemble forme un ouvrage qui peut être, dans certains cas, très souple.

b- Cas où la poussée est reprise par encastrement de l'ouvrage de soutènement dans le sol de fondation

Parmi les ouvrages de ce type, on citera :

- le **mur cantilever en béton armé** qui, doté d'une base élargie et encadrée à la partie supérieure du sol de fondation, fonctionne en faisant participer à l'action de soutènement une partie du poids du remblai. Un mur cantilever peut d'ailleurs être considéré comme un ouvrage poids si l'on y inclut le poids du remblai compris entre le mur et la verticale I passant par l'extrémité arrière de la semelle (figure 1). Les murs cantilever en béton armé sont également des ouvrages rigides ;
- les murs en **parois moulées**, technique qui consiste à construire un mur au sein du sol en place, avant toute excavation, par bétonnage d'une tranchée remplie de boue pour en assurer la stabilité.

Cette technique est particulièrement utilisée pour les travaux sous la nappe, en zones urbaine et portuaire. Une paroi moulée fonctionne par encastrement total ou partiel dans le sol de fondation.

- les **rideaux de palplanches**, encastres dans le sol de fondation [14]:

ce sont des ouvrages de soutènement flexibles, où l'interaction structure-remblai a une influence prépondérante sur le comportement de l'ouvrage.

c- Cas où la poussée est reprise en totalité ou en partie par des ancrages

Dans les ouvrages de soutènement en déblai, l'effort de poussée est fréquemment repris en partie ou en totalité par des ancrages.

C'est le cas notamment des rideaux des parois moulées et des parois berlinoises. À la différence d'une paroi moulée, une **paroi berlinoise** est réalisée à partir de poteaux placés préalablement dans le sol en place. Au fur et à mesure de l'excavation, on vient placer entre les poteaux des éléments de soutènement soit préfabriqués (poutres, plaques), soit coulés en place, et l'on reprend la poussée des terres par des ancrages précontraints fixés sur les poteaux (figure 2a). Il existe également des techniques d'ouvrages en déblai où la poussée des terres est totalement reprise par des ancrages précontraints. C'est le cas des **murs épignés** construits par excavations successives de 2 m de hauteur environ, avec coulage d'éléments verticaux en béton armé et mise en place d'ancrages précontraints (figure 2b).

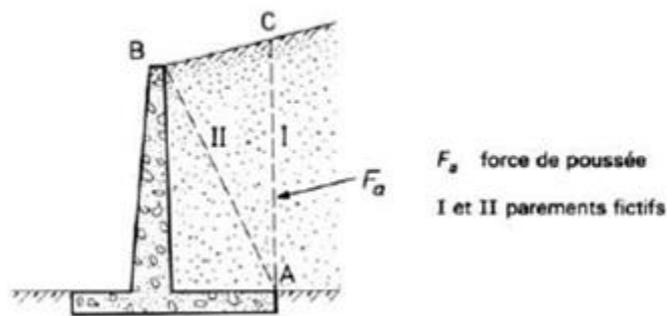


Figure 2.1. Mur cantilever en béton armé

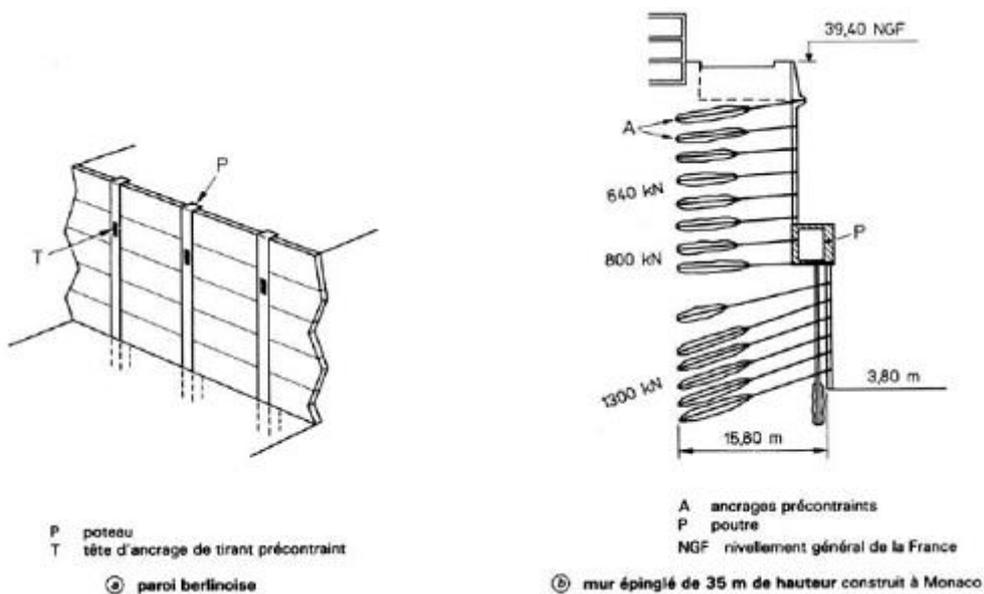


Figure 2.2. Murs partiellement ou totalement ancrés [8]

2.10. Modes de rupture des ouvrages de soutènement

Cinq modes de rupture, illustrés à la figure 3 peuvent être rencontrés dans les ouvrages de soutènement :

- le glissement de l'ouvrage sur sa base (figure 3a) ;
- le renversement de l'ouvrage (figure 3b) ;
- le poinçonnement du sol de fondation (figure 3c) ;
- le grand glissement englobant l'ouvrage (figure 3d) ;
- la rupture des éléments structuraux de l'ouvrage (figure 3e).

Les quatre premiers types de rupture sont relatifs à l'instabilité externe de l'ouvrage, la rupture des éléments structuraux constituant l'instabilité interne.

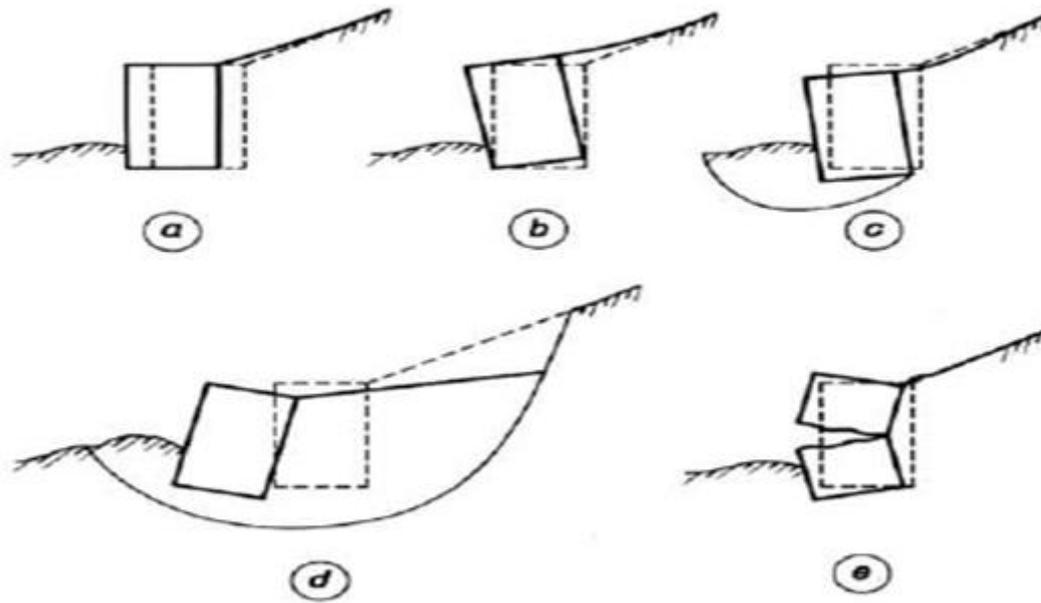


Figure 2.3. Modes de rupture des ouvrages de soutènement [8]

2.11. Les hypothèses de calcul de stabilité des talus

les hypothèses de calcul admises sont:

- ▶ La rupture se fait dans un plan (analyse bidimensionnelle)
- ▶ Les forces extérieures étant: le poids et les surcharges.
- ▶ L'application des lois de la mécanique des milieux continus.
- ▶ Le déplacement du sol est rigide
- ▶ La relation de TERZAGHI est applicable : $\sigma = \sigma' + u$
- ▶ Un coefficient de sécurité est défini comme le rapport de la

Contrainte de cisaillement maximale mobilisable à celle sollicitant les sols en place.

$$F_s = \tau_{max} / \tau$$

F_s : est constant le long de la ligne de rupture du massif de sol.

La résistance du sol au cisaillement

Les paramètres classiques de résistance du sol (intact) au cisaillement sont :

- La cohésion C
- L'angle de frottement interne ϕ

En conditions d'essai drainé (essai lent) on a :

$$C = C'$$

$$\varphi = \varphi'$$

La résistance du sol au cisaillement exprimée par l'équation de **COULOMB**

$$\tau' = C' + \sigma' \operatorname{tg}\varphi'$$

σ' = contrainte effective normale au plan de cisaillement.

u = pression interstitielle ($\sigma' = \sigma - u$).

On définit alors pour les Sols Glisses : les **caractéristiques dites : Résiduelles**.

C'_{res} = Cohésion résiduelle (non draine) et $C'_{\text{res}} < C'$

Φ'_{res} = Angle de frottement résiduel $\varphi'_{\text{res}} < \varphi'$

En conséquence on a : $\tau'_{\text{res}} = C'_{\text{res}} + \sigma'_{\text{res}} \operatorname{tg}\varphi'_{\text{res}}$.

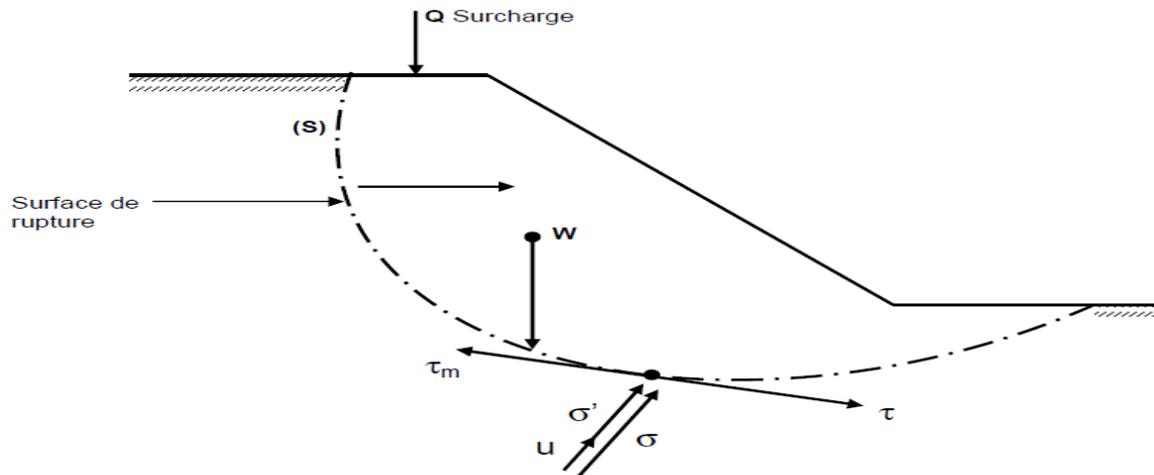
Les différentes approches de vérification de stabilité /

Consiste à apprécier la valeur de F_s :

La définition d'un facteur de sécurité **FS** qui traduit l'état d'équilibre du massif (stable ou instable) s'exprime soit :

- En rapport de forces*
- En rapport de moments.*
- Ou en grandeur limite.*
- Ou Calcul de déplacement d'une valeur limite.*

Le choix dépendra de l'ingénieur du modèle de calcul choisi (pour ce cas) ainsi que des outils de calcul a sa disposition (logiciels).



Au cisaillement le sol offre une résistance τ_m

Figure 2.4. Surface de rupture de talus

Méthode classique

$$F = \frac{\tau_m}{\tau}$$

Coefficient de sécurité du massif pour la surface (S) considérée

- si $F = 1$: Il y a rupture
- $F > 1$: Le talus est stable
- $F < 1$: Le talus est instable

Tableau 2.5 : coefficient de sécurité de stabilité d'un talus

FS	Etat de l'ouvrage
< 1	danger
1.0 - 1.25	sécurité contestable
1.25 - 1.4	sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants sécurité contestable pour les barrages, Fs > 1.4 satisfaisante pour les BARRAGES

CHAPITRE 03 :
Techniques de construction

3.1. Techniques de construction d'une fondation superficielle (semelles isolées, filantes et radier)

3.1.1. Terrassement

Si le terrain ne présente pas de risques d'éboulements la fondation peut être coulée directement dans la fouille.

Si le sol est éboulé ou si la fondation doit être coffrée, la fouille présentera un talus dont l'angle est égal à l'angle de talus naturel du sol ϕ . Cet angle dépend de la nature du sol, de sa cohésion, de sa granulométrie et de la présence ou non d'eau.

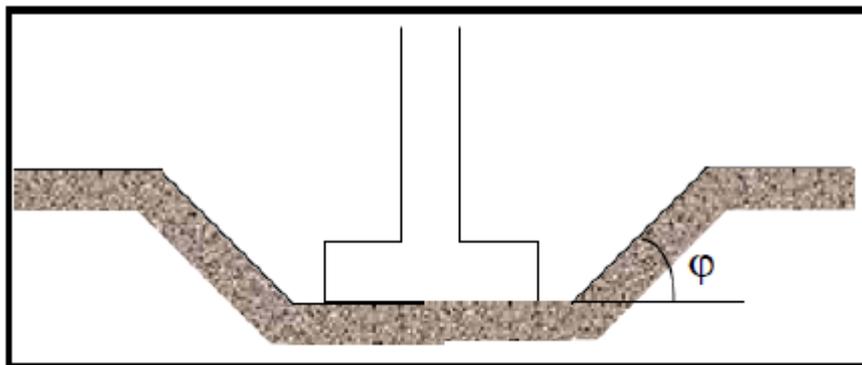


Figure 3.1. Fouille en puits talutée

3.1.2. Béton de propreté

C'est un béton maigre (dosage minimum de 150 kg/m³ de ciment. Son épaisseur est > 4 cm et sa largeur supérieure, en général, à celle de la semelle. Il n'est jamais coffré.

Il peut être remplacé par un film plastique (polyane) en fond de fouille.

3.1.3. Mise en place du ferrailage

Afin de respecter l'enrobage, les armatures sont positionnées sur le béton de propreté par l'intermédiaire de cales pour armatures ou de distanciers ou écarteurs [15,16].

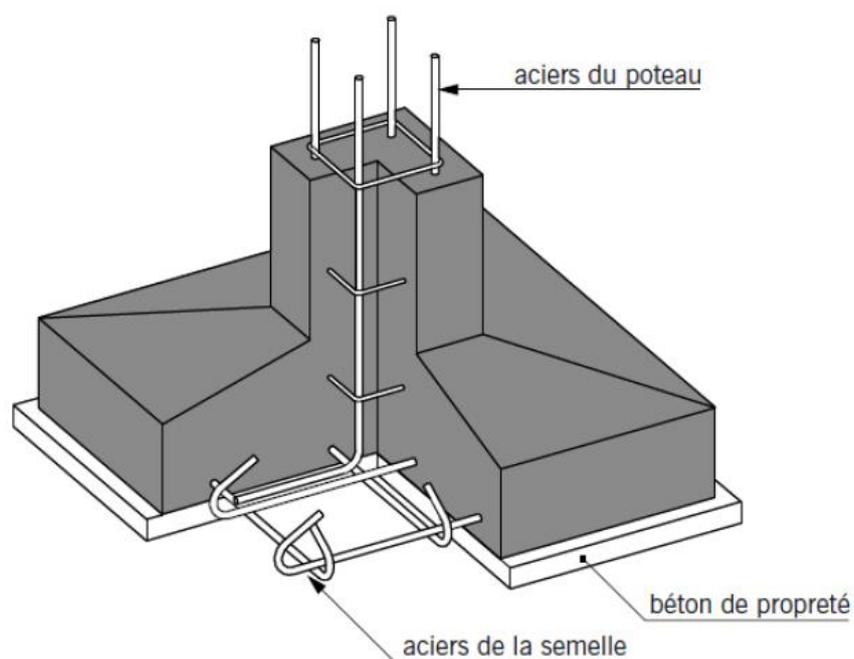


Figure 3.2. Disposition de ferrailage de fondations

3.1.4. Coffrage et bétonnage

Les fondations peuvent être coffrées latéralement ou bien coulées directement dans les fouilles, selon ses dimensions et la tenue des terres. Le bétonnage est effectué en une seule fois sans reprise de bétonnage [15,16].



Figure 3.3 : Exemple de coffrage et ferrailage de fondations



Figure 3.4. Exemple de coffrage et ferrailage de radier

3.2. Techniques de construction d'une fondation profonde

On opte pour les fondations profondes (pieux) ou semi profondes (puits) afin d'atteindre des couches résistantes en profondeur lorsque les charges apportées par un ouvrage sont élevées et que les couches superficielles sont très compressibles (vases, tourbes, argiles molles..).

Un pieu ou puits sont des fondations élancées qui reportent les charges de la structure sur des couches de terrain de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol et limiter les déplacements à des valeurs très faibles.

On désigne par pieu, une fondation profonde réalisée mécaniquement et par puits une fondation profonde creusée à la main sous la protection d'un blindage.

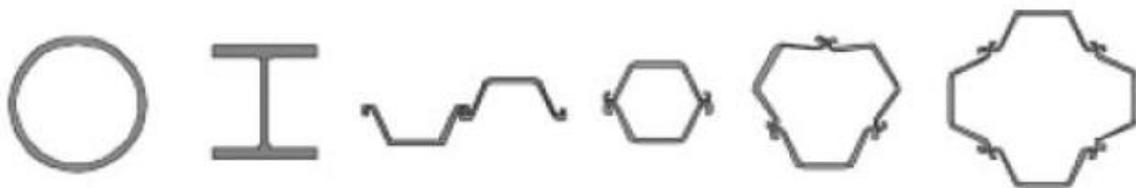


Figure 3.5. Différentes géométries de pieux métalliques

3.2.1. Classification des pieux selon le mode d'exécution

Pieux refoulant le sol à la mise en place :

Pieux en bois

Pieux battus préfabriqués

Pieux métalliques battus

Pieux en béton foncés

Pieux métalliques foncés

Pieux battus pilonnés

Pieux battus moulés

Pieux battus enrobés

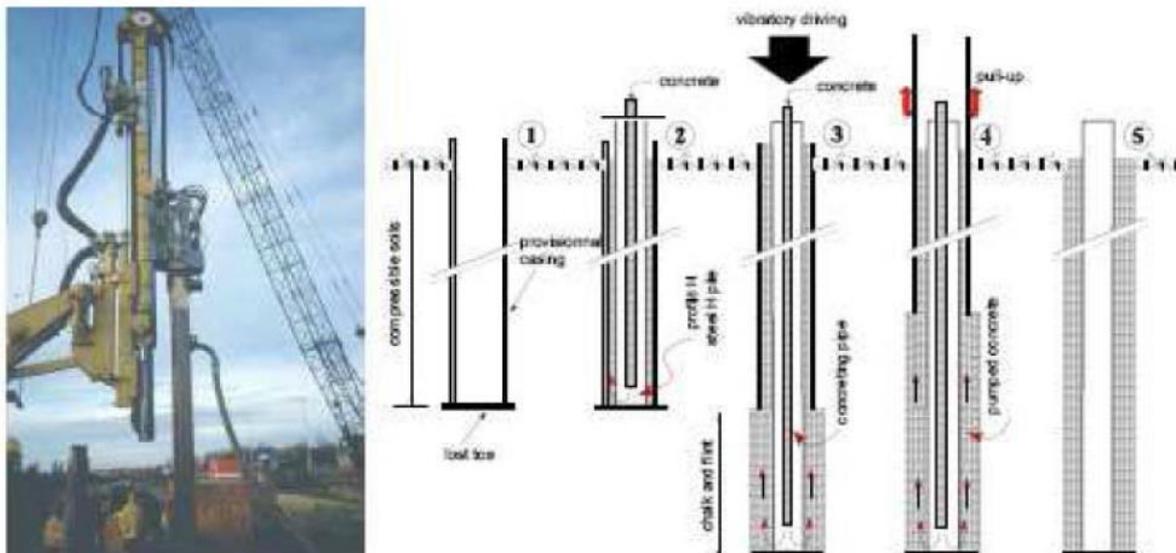


Figure 3.6 . Mise en place de pieu tubé par vibrofonçage

Pieux ne refoulant pas le sol à la mise en place :

Pieux forés simples (barrette exécutée dans les mêmes conditions)

Pieux forés avec boue

Pieux forés tubés

Pieux tarières creuses

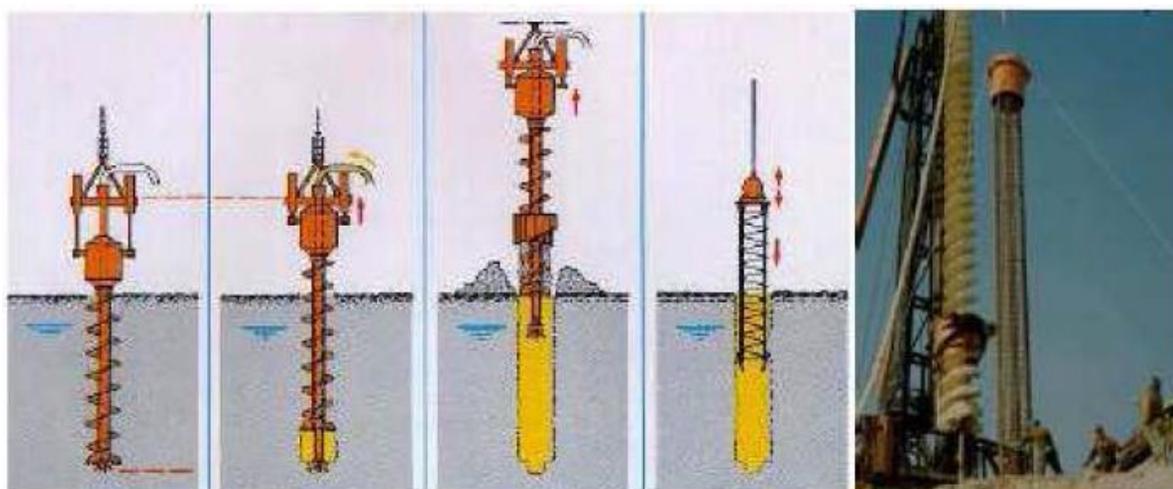


Figure 3.7. Pieux formés par forage à la tarière

3.2.2. Classification suivant le mode de fonctionnement

Les pieux agissent sur le sol soit par [16]:

Effet de pointe : reposant sur une couche très dure.

Effet de frottement latéral (Pieux flottants) : transmettent essentiellement leurs charges par frottement latéral et ne reposent pas sur une couche résistante.

Effet de pointe et frottement latéral (Pieux frottant à la base) : frottement latérale à la partie inférieur du fut qui doit s'ajouter à la résistance de pointe.

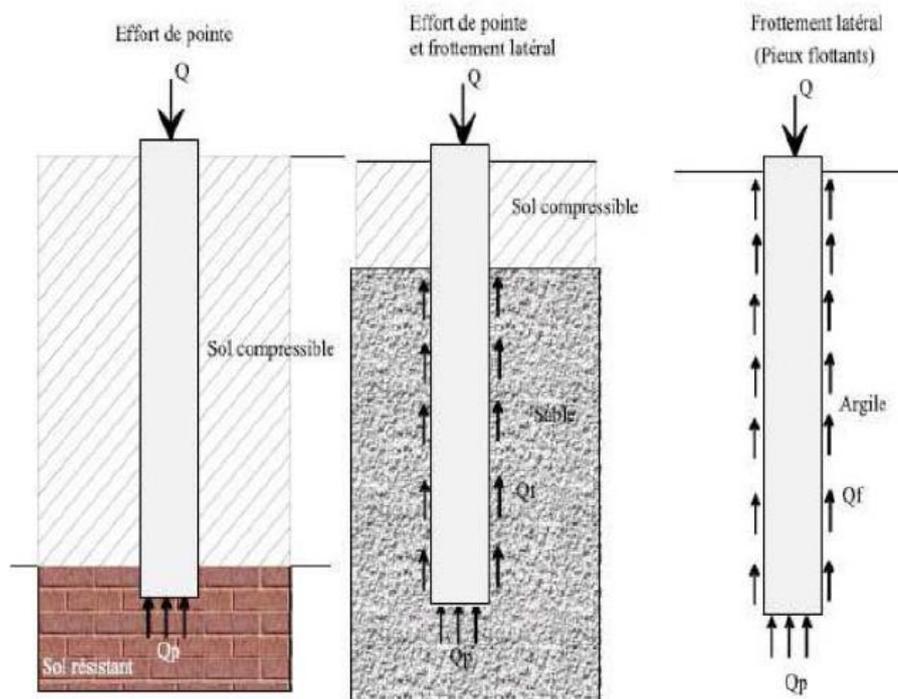


Figure 3.8 . Classification suivant le mode de fonctionnement

3.3. Techniques de construction de stabilisation de sol

Définition

Les Mouvements de terrain traduisent des phénomènes d'instabilités très variées (glissements de terrains, affaissements effondrements, écroulements de massifs ,coulées de boues ,etc.). Les volumes des masses mises en jeu vont de quelques mètres cubes a des centaines [17], parfois même des millions de M3 déplacés.

En comparaison avec les autres risques naturels les instabilités de sites sont souvent localisées (du point de vue spatial) dans les régions montagneuses ou autour des agglomérations dont le relief est assez accidenté et aussi là où des formations géologiques aux conditions défavorables existent, parfois en régions exposées à l'érosion ou cavités karstiques. Du point

de vue climatologie , les periodes de forte pluies ,de fonte des neiges sont souvent propices au déclenchement de mouvements de terres.

Comme solution de stabilisation de sol, on distingue : les travaux de terrassement, drainage, soutènement, ancrage par tirants precontraints, clouage, protection superficielle, remblaiement [18,19]

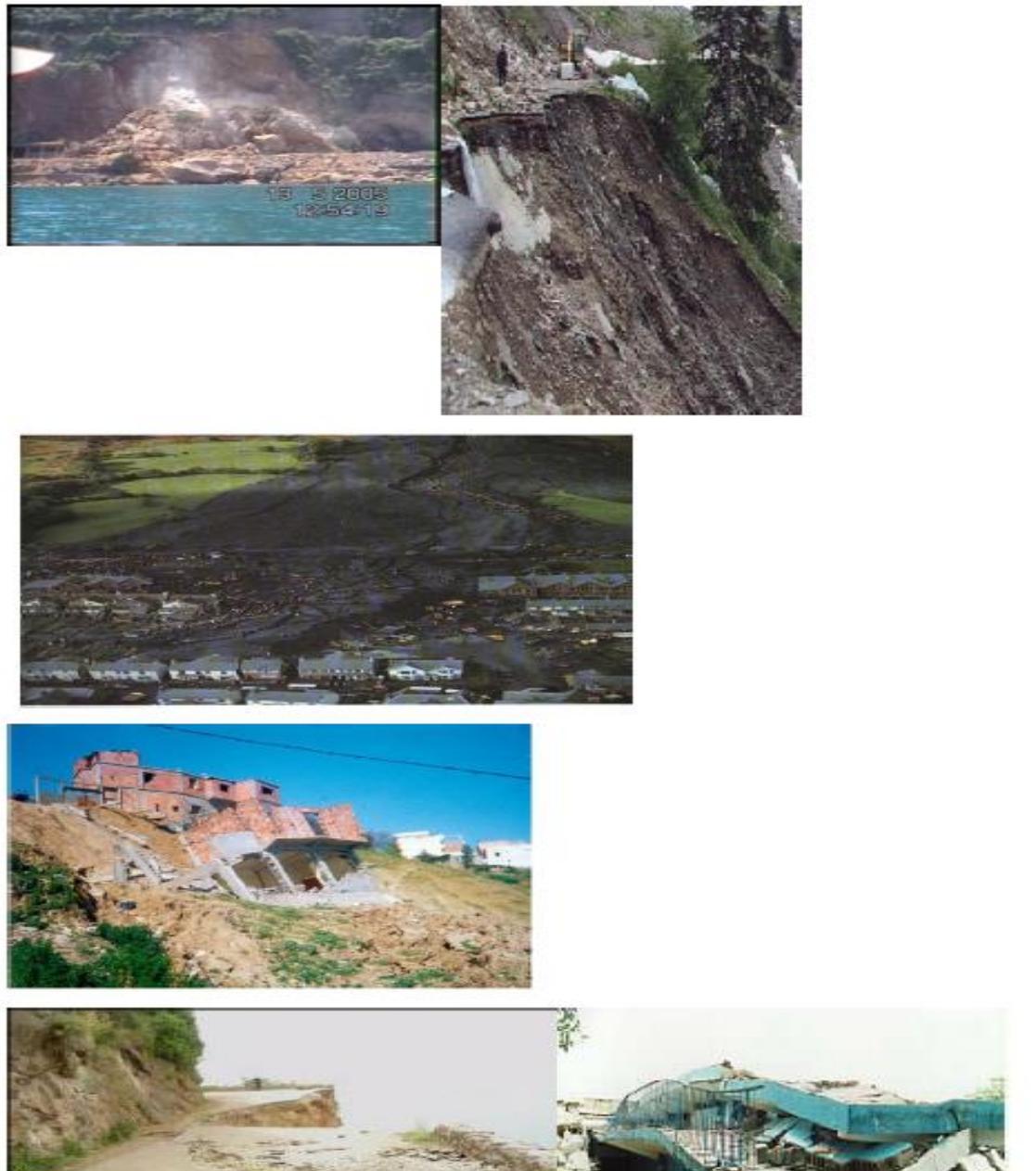


Figure 3.9.: divers formes de désinstabilité du sol (glissement, eboulement)

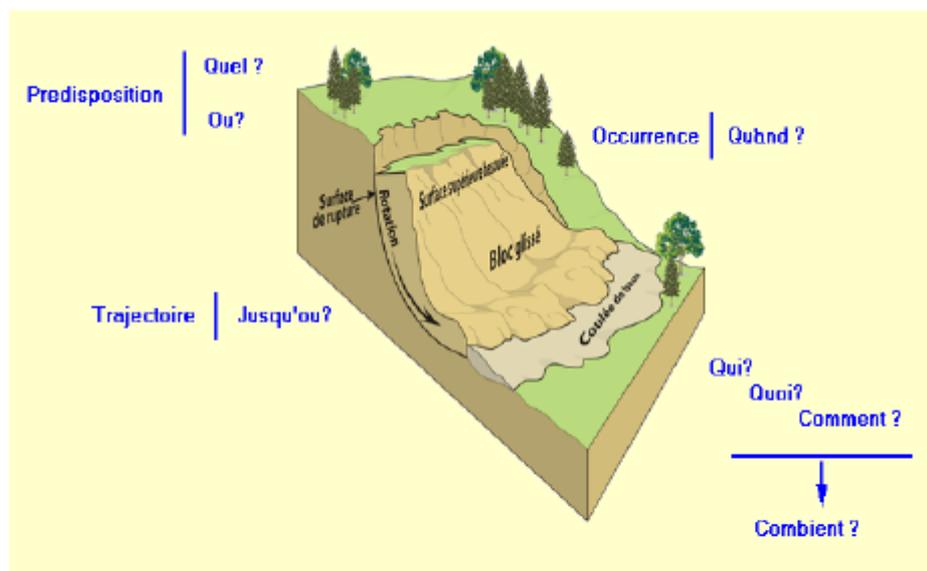


Objectifs du confortement

- Prévenir un glissement potentiel
- Arrêter un glissement en cours
- Ralentir un glissement en cours
- Arrêter une partie du glissement
- Empêcher le glissement d'endommager l'ouvrage

Confortement :
provisoire,
pérenne

Figure 3.10 . Problématique géotechnique pour traitement un problème de glissement
(Objectifs et solution)



Pour concrétiser une bonne étude de stabilité : il est nécessaire d'avoir

- ❖ Un relevé topographique du site (les pentes, les réseaux hydrographiques etc...)
- ❖ Les données locales de géologie, les formations en place (Lithologie : succession des couches, anomalies ?....)
- ❖ La climatologie (les précipitations annuelles et répartition mensuelles)
- ❖ Les informations hydrogéologiques dont l'importance est majeure comme/ les nappes et niveaux hydrostatiques Les écoulements de surface.

Les écoulements profonds (quand ils existent alimentés par les réseaux de fissures qui parcourent les sols).

Une bonne caractérisation des sols en place (comportements du point de vue mécanique des sols).

Figure 3.11. Enquête sur problématique géotechnique pour concrétiser une bonne étude



L'étude de stabilisation

- Analyse du phénomène
établissement du modèle géotechnique
- Évaluation de l'incidence sur F des différentes solutions
- Sélection des techniques apportant un $\Delta F/F$ convenable
- Choix de la technique (coût, délai, pérennité, difficulté de réalisation, impact environnemental, etc.)
- Dimensionnement, optimisation
- Suivi des travaux

18

Figure 3.12 . Exemple sur une étude de stabilité [20]

Les terrassements

Les conditions de stabilité étant directement liées à la pente du terrain, le terrassement reste le moyen d'action le plus naturel. On peut distinguer trois groupes de méthodes de stabilisation par terrassement:

- les actions sur l'équilibre des masses : allègement en tête, remblai en pied ;
- les actions sur la géométrie de la pente : purge et reprofilage
- les substitutions partielles ou totales de la masse instable.



Reprofilage

Les conditions de stabilité d'un talus étant directement liées à sa pente, on peut assez simplement augmenter la sécurité par retalutage du terrain naturel. Dans ce sens, le procédé s'apparente à l'allègement en tête : il consiste en un adoucissement de la pente moyenne. Ce type de traitement est particulièrement bien adapté aux talus de déblais, et il est de pratique courante. Notons que l'exécution de risbermes a l'avantage d'améliorer la stabilité par rapport à une pente unique et de créer des voies d'accès pour l'entretien ou des travaux complémentaires.

L'adoucissement de la pente est généralement mal adapté aux versants naturels instables car il met en jeu des volumes de sol très importants.

Substitution totale ou partielle des matériaux

- ▶ La substitution totale consiste à venir purger l'ensemble des matériaux glissés ou susceptibles de glisser, et à les remplacer par un matériau de meilleure qualité. Cela permet de reconstituer le profil du talus initial.
- ▶ Il importe de vérifier la stabilité au cours des phases de travaux et celle du talus définitif dans lequel on prend en compte les caractéristiques du matériau de substitution et du matériau en place.
- ▶ Des substitutions partielles sont souvent employées, sous forme de bèches ou de contreforts discontinus. Le coefficient de sécurité de la pente ainsi traitée peut être

Figure 3.13 . Solution géotechnique pour la stabilité d'un sol par les techniques de terrassement [20]

Purge

Les techniques de terrassement s'accompagnent fréquemment de purges du matériau déplacé par le glissement. Cette solution est généralement limitée aux glissements de taille modeste. On peut, dans certains cas, purger l'ensemble du matériau glissé, à condition que la surface mise à nu soit stable.

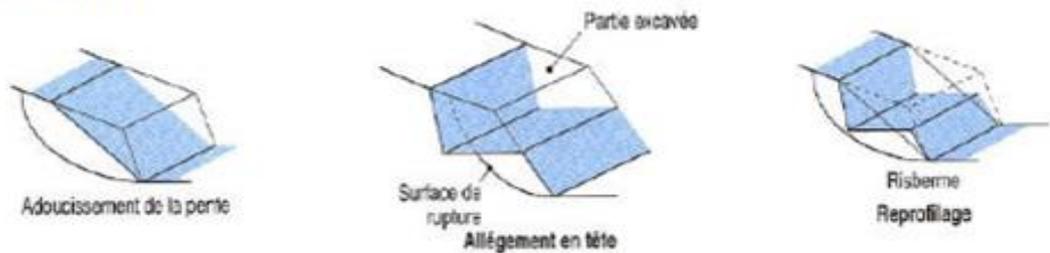


Figure 3.14 : Solution géotechnique pour la stabilité d'un sol par les techniques de terrassement par purge [20]

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] PECK RB, 1969. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Geotechnique* 19: 2.
- [2] TERZAGHI K, PECK RB, 1967. *Soils mechanics in engineering practice*, Ed. Elsevier
- [3] EUROCODE 7. NF EN 1997–2005, Eurocode 7 : calcul géotechnique.
- [4] COSTET J, SANGLERAT G, 1981. *Cours pratique de mécanique des sols*, Dunod
- [5] NF P94-500 November 2013. *Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications*.
- [6] FILLIAT G, 1981. *La pratique des sols et des fondations*, Editions du Moniteur
- [7] AMAR S., MAGNAN J.P, 1980. *Essais de mécanique des sols en laboratoire et en place, aide mémoire, rapport LCPC*.
- [8] SCHLOSSER F, 1988, *Éléments de mécanique des sols*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [9] EUROCODE 1: EN1991-1-4: 2005. *Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions*.
- [10] FRANK R, 1995. *Fondations profondes*, C248-3, *Revue des Techniques de l'ingénieur, traité de construction, volume C24*.
- [11] FRANK R., 1999. *Calcul des fondations superficielles et profondes*, Presses de l'Ecole des Ponts et Chaussées, éditions Techniques de l'Ingénieur.
- [12] FRANK R, 1998. *Fondations superficielles*, C246-1, *Revue des Techniques de l'ingénieur, traité de construction, volume C24*.
- [13] *Les ouvrages en Terre Armée : Recommandations et Règles de l'Art*. Ministère des Transports, Direction des Routes (1979).
- [14] HOUY A, 1986. *Dimensionnement des ouvrages en palplanches en acier*. 492 p., M. Houy éd.
- [15] MATHIVAT J et. BOITEAU C. *Procédés généraux de construction Tome 1 : Coffrage et bétonnage*, ENPC, Eyrolles.
- [16] MATHIVAT J et FENOUX. *Procédés généraux de construction Tome 2 : Fondation et ouvrages d'art*, ENPC, Eyrolles.
- [17] MATHIVAT J , F. BOUGARD. *Procédés généraux de construction Tome 3 : Travaux Souterrains"*, ENPC, Eyrolles.
- [18] *Guide Technique SETRA/LCPC, 1992, Réalisation des remblais et des couches de forme (ISBN 2.11.085.707.2)*.
- [19] *Guide des terrassements routiers : Réalisation des remblais et des couches de forme*. Guide technique, (ex. LCPC), France. Ed. IFSTTAR, France.
- [20] REIFFSTECK, P, 2015. *Stabilité des pentes : glissements en terrain meuble , techniques-ingenieur*.