

# Théorie et pratique de la géotechnique

Tome

Outils pour la conception  
des ouvrages

Sous la direction  
de Claude Plumelle

EXPERTISE  
TECHNIQUE

EDITIONS

**LE MONITEUR**

2<sup>e</sup> édition

# Présentation des auteurs

Directeur de recherche et professeur à l'École des Ponts ParisTech (ENPC), **Yu Jun Cui** est spécialisé en mécanique des sols non saturés et en ses applications dans les domaines du stockage des déchets nucléaires, de l'interaction sol-végétation-atmosphère, de la géotechnique ferroviaire, de la construction des remblais, de l'utilisation des sols traités [Chapitres 7, 11, 12, 14, 15, 18].

Professeur à la chaire de géotechnique du Cnam, **Denis Fabre** enseigne et a ses activités de recherche en géologie de l'ingénieur et en mécanique des roches. Il participe également à la formation des ingénieurs de Polytech Grenoble et de l'école Hassania à Casablanca, et contribue au master des travaux en souterrain de l'Aftes [Chapitre 1].

Maître de conférences à la chaire de géotechnique du Cnam, **Olivier Fouché** enseigne l'hydrogéologie. Rattaché à l'École des Ponts ParisTech (ENPC), il coordonne un projet de recherche sur les fonctions des sols en ANC et participe à un projet de modélisation hydrogéologique des nappes en milieu urbain [Chapitres 2, 13, 16].

Expert judiciaire, **Alain Hirschauer** a fait toute sa carrière au Cete Île-de-France où il était chef de la section géologie-risques naturels ; parallèlement professeur associé à la chaire de géotechnique du Cnam, il a enseigné la géologie du génie civil, la reconnaissance des sols et les travaux géotechniques [Chapitre 4].

Professeur honoraire du Cnam, **Claude Plumelle** a eu une carrière d'enseignant, d'ingénieur-conseil et de chercheur. Il a dirigé la chaire de géotechnique du Cnam de 1994 à 2005, période au cours de laquelle il a développé le cursus d'ingénieur géotechnicien de cet établissement et créé, avec l'université Paris VI, le master commun géologie-géotechnique. Dans ses activités en recherche-développement, il a été très impliqué dans les projets nationaux : Clouterre, Forever et Asiri [Chapitres 5 à 11, 13 à 15, 17 et 18].

Professeur émérite à l'université Sorbonne Université, **Alain Tabbagh** a enseigné en école d'ingénieur, en diplôme d'études supérieures spécialisées et en master, la prospection géophysique du sous-sol peu profond pour les applications au génie civil, à l'hydrogéologie, à l'étude des sols et des formations superficielles et à l'archéologie [Chapitre 3].

# Introduction

Tout ouvrage (infrastructures, génie civil, bâtiment, etc.) est en interaction avec son environnement géotechnique. L'ingénierie géotechnique est donc une composante de la maîtrise d'œuvre générale indispensable à l'étude, puis à la réalisation de tout projet. Elle doit être associée aux autres ingénieries à toutes les étapes successives d'étude et de réalisation d'un projet et ainsi contribuer à une gestion efficace des risques géologiques afin de fiabiliser le délai d'exécution, le coût réel et la qualité des ouvrages géotechniques.

Le sous-sol est, de par sa nature, le domaine privilégié des incertitudes, des variabilités et des aléas (événements géologiques non prévisibles et d'extension limitée). L'objectif des missions géotechniques est de réduire les risques géologiques avec une approche graduée et progressive des missions.

Il faut rappeler qu'une bonne adaptation du projet au contexte géologique du site est nécessaire pour construire en sécurité de façon économique. Malheureusement, c'est encore trop souvent le sol qui doit s'adapter au projet quand le concepteur entreprend trop tardivement les études géologiques, hydrogéologiques et géotechniques. Enfin, l'expérience montre que tout investissement fait par le maître d'ouvrage en phase de conception pour la maîtrise des risques géologiques est hautement rentable, comme cela a été démontré dans la construction des tunnels par exemple.

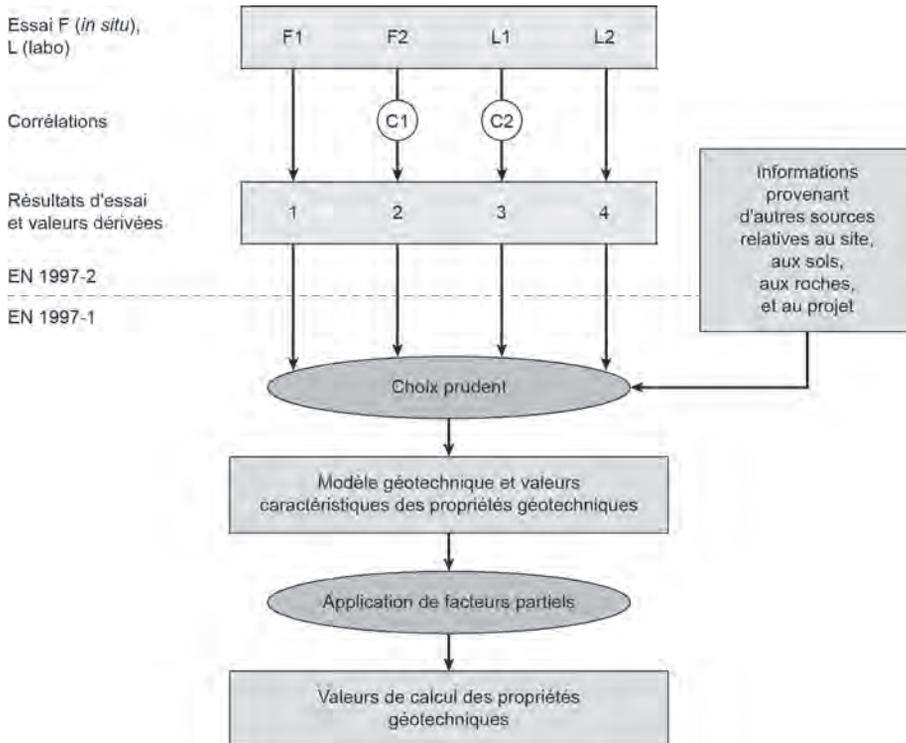
Les normes géotechniques se sont largement développées ces dernières années et forment un vaste corpus. Les normes NF EN, NF ISO, NF EN ISO s'imposent aux normes NF ; par contre, les normes XP n'ont qu'un caractère expérimental. La mention EN indique que la norme a été élaborée par le CEN et la mention ISO par l'ISO. Il n'existe pas de normes ISO ou EN, ces normes sont obligatoirement transcrites par les organismes nationaux de normalisation. Les normes en génie civil, hormis celles liées à la réglementation sismique, au feu et à la sécurité publique ne sont pas obligatoires en France. Elles le deviennent dans le cadre d'un contrat signé entre deux parties, les normes étant d'application volontaire. D'autres référentiels peuvent être utilisés sous réserve que l'assurance donne son accord.

La conception et le dimensionnement d'un ouvrage nécessitent la mise au point d'un modèle géotechnique dont les caractéristiques proviennent des résultats d'essais acquis lors des investigations géotechniques (figure 1).

Concernant la conception et le dimensionnement d'un ouvrage géotechnique, on appliquera la norme nationale française NF EN 1997-1/A1 (P 94 – 251-1/A1) d'avril 2014, qui est l'application nationale de la norme européenne Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 1. Règles générales de juin 2005, complétée par l'amendement A1 d'avril 2014.

La norme nationale française NF EN 1997-2 (P 94 – 252) de septembre 2007 est l'application nationale de la norme européenne Eurocode 7 : Calcul géotechnique – Partie 2. Reconnaissance des terrains et essais de juin 2006. Elle fournit des indications sur la planification et

l'exploitation des essais géotechniques utilisés pour servir de base aux calculs géotechniques des ouvrages. Cette norme est à utiliser conjointement avec la norme de conception NF EN 1997-1/A1 (P 94 – 251-1/A1).



**Figure 1. Cadre général pour le choix des valeurs dérivées des propriétés géotechniques d'après EC7-2**

Pour les normes d'essais de laboratoire et *in situ*, on remarquera, dans la norme NF EN 1997-2 (P 94 – 252), la note indiquant : « La bibliographie fournit une liste de spécifications techniques CEN ISO/TS qui donnent des informations sur des modes opératoires, appareillage, évaluation et présentation de quelques essais de laboratoire et en place. Ces spécifications techniques peuvent devenir à terme des normes EN ISO. L'organisme national de normalisation peut rendre valide nationalement une spécification technique CEN ISO/TS, mais peut conserver en parallèle à une spécification technique des normes nationales en contradiction avec cette TS. Des annexes nationales à la norme EN 1997-2 peuvent fournir des informations vis-à-vis de la pratique nationale concernée. »

On constatera qu'en 2017 on a des normes, NF, NF EN, NF EN ISO, XP F, XP CEN ISO et qu'un grand nombre d'entre elles sont encore en révision ou à l'état de projet. On renvoie au

site <http://www.geotechnique.org> du Comité français de mécanique des sols et de géotechnique (CFMS), qui met à jour chaque année la liste des normes françaises.

Quant à la norme NF P 94-500 « Missions d'ingénierie géotechnique », elle contractualise les rapports entre la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre, les entreprises et l'ingénierie géotechnique.

Révisée en novembre 2013, elle a pour objet de définir les différentes missions types de l'ingénierie géotechnique et leur enchaînement. Elle a été calée au plus près de la loi MOP (Maîtrise d'ouvrage publique) de juillet 1985.

Au départ, le maître d'ouvrage définit le programme de l'opération et fixe l'enveloppe financière. Il détermine le ou les ouvrages à construire, surfaces, descentes de charges, critères de fonctionnement et fixe un planning des études et de réalisation des travaux. Le maître d'œuvre assure la conception générale de l'ouvrage ; il élabore le projet, établit les plans, notes techniques des structures, en intégrant les éléments fournis par l'ingénierie géotechnique au fur et à mesure de l'avancement et de la réalisation du projet.

La conception et la réalisation du projet géotechnique comprennent trois étapes, deux étapes de conception et une étape de réalisation. Toutes les étapes sont obligatoires et s'enchaînent. Pour plus d'efficacité et pour limiter les risques, il est fortement conseillé que l'ingénierie géotechnique soit la même pour les trois étapes, de la conception du projet à la réalisation et au suivi des travaux.

Les investigations géotechniques (études géologiques, hydrogéologiques, reconnaissances géophysiques et géologiques, essais *in situ* et essais de laboratoire) sont indispensables à chaque étape, elles sont décrites aux chapitres 1 à 5 et 13 à 16.

## Conception d'un projet géotechnique

La phase de conception comporte deux étapes, une étape géotechnique préalable et une étape géotechnique de conception (tableau 1).

Il ne faut jamais supprimer l'étape préalable au prétexte de gagner du temps et d'éviter le coût des études correspondantes. Il ne faut pas non plus vouloir entreprendre les études G1 et G2 en même temps, les missions géotechniques doivent s'enchaîner, les conclusions d'une mission  $G_{n-1}$  permettant de définir les objectifs et un programme pertinent pour la mission  $G_n$ .

Au début de la conception du projet, le maître d'ouvrage ou son mandataire doivent missionner une ingénierie géotechnique (mission G1/ES) pour effectuer les études préalables.

Le tableau 1 présente les différentes phases de la conception d'un projet géotechnique, chaque phase est développée ensuite.

**Tableau 1. Conception du projet d'ouvrage géotechnique**

| Étapes                                     | Phases de la maîtrise d'œuvre       | Missions d'ingénierie géotechnique  | Objectifs à atteindre  |
|--|-------------------------------------|---|--|
| 1<br>Étude géotechnique préalable (G1)     |                                     | Étude de site (ES)  | Spécificités géotechniques du site<br>Première identification des risques majeurs  |
|  | Étude préliminaire d'esquisse (APS) | Principes généraux de construction (PGC)  | Premières adaptations des futurs ouvrages aux spécificités du site   |
| 2<br>Étude géotechnique de conception (G2) | APD/AVP                             | Avant-projet (AVP)  | Définition et comparaisons des solutions envisageables pour le projet  |
|  | PRO                                 | Projet (PRO)  | Conception et justifications du projet retenu  |
|  | DCE/ACT                             | Document de consultation des entreprises (DCE)<br>Assistance pour l'établissement des contrats de travaux (ACT) | Consultation sur la technique de base retenue et ouverture à variantes<br>Choix de l'entreprise<br>Mise au point des contrats de travaux |

### Étape 1 : Étude géotechnique préalable (mission G1)

Cette mission est nécessaire pour initier le projet géotechnique, mais elle n'est pas suffisante pour définir et dimensionner le projet retenu. Pour cela, la mission G1 doit être suivie de la mission G2 de conception.

À l'étape 1, l'étude préalable G1, à la charge du maître d'ouvrage, comprend deux phases :

- **La phase « Étude de site » (ES)**, qui est à lancer avant l'étude préliminaire ou l'APS de l'ouvrage ; généralement, elle est commandée par le maître d'ouvrage avant désignation d'un maître d'œuvre. Cette étude géotechnique préliminaire de site permet une première identification des risques géologiques. Elle nécessite une enquête documentaire détaillée. Elle fait l'objet obligatoirement d'une visite du site et peut être accompagnée si nécessaire d'investigations géotechniques. Cette première étude qualitative, d'un faible coût, est indispensable pour identifier les risques majeurs (sismicité, cavités, mouvements de terrain, zones de sols compressibles, inondations, pollutions des sols et de l'eau...). Le compte-rendu de cette étude doit définir, en particulier, le programme des investigations géotechniques à réaliser lors de la phase suivante (PGC).
- **La phase « Principes généraux de construction » (PGC)**, qui comporte des investigations géotechniques importantes. Les résultats de ces investigations permettent de déterminer les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'étude préliminaire ou d'APS

de l'ouvrage. À cette phase, on peut présenter certains principes généraux de construction envisageables (par exemple, pour des ouvrages sur sols compressibles, préchargement, colonnes ballastées, inclusions rigides, *deep mixing method*). Cette phase n'inclut pas d'ébauche dimensionnelle.

À l'issue de cette étape, le maître d'ouvrage ou son mandataire assisté par l'ingénierie géotechnique retient une ou plusieurs solutions envisageables pour le projet.

## Étape 2 : Étude géotechnique de conception (mission G2)

L'objectif de cette mission est la conception des différentes solutions envisageables pour le projet. Elle est à la charge du maître d'ouvrage et doit être réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre. L'étude géotechnique de conception G2 comporte trois phases (tableau 1) :

- **La phase avant-projet (AVP)**, qui contribue à la mise au point de l'ouvrage géotechnique. Elle peut nécessiter des investigations géotechniques complémentaires à celles effectuées en G1/PGC. Elle définit les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'AVP et les principes de construction envisageables. Elle fournit une ébauche dimensionnelle et une première approche des quantités. À l'issue de cette phase, le maître d'ouvrage ou son mandataire assisté par l'ingénierie géotechnique retient un type d'ouvrage géotechnique qui constituera la solution de base étudiée dans la phase projet.
- **La phase projet (PRO)**, qui définit les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques). Elle établit les notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages (travaux préparatoires, plates-formes de travail, phasages, dispositions par rapport aux ouvrages existants...). Elle fournit les notes de calcul de dimensionnement au niveau projet, ainsi qu'une approche des quantités, des délais et des coûts. Elle donne les valeurs seuils (déplacements, convergences, pressions interstitielles, efforts dans des tirants...) et conclut sur la pertinence de la méthode observationnelle ou méthode interactive de dimensionnement. Cette méthode est très utile et souvent utilisée pour garantir une meilleure gestion des risques géotechniques.
- **La phase DCE/ACT**, qui contribue à l'établissement du dossier de consultation des entreprises (DCE) et à l'assistance pour l'établissement des contrats de travaux (ACT) avec le ou les entrepreneurs. Elle établit ou participe à la rédaction des documents techniques nécessaires à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation (dossier de la phase PRO avec plans, notices techniques, critères de performance, notes de calcul, plans d'instrumentation, définition de la méthode observationnelle, cahier des clauses techniques particulières (CCTP), bordereaux de prix, planning prévisionnel). L'ingénierie géotechnique assiste la maîtrise d'ouvrage ou la maîtrise d'œuvre pour la sélection des entreprises, puis elle analyse les offres techniques (projet de base et variantes). Elle participe à la finalisation des pièces techniques définitives des contrats de travaux.

## Réalisation du projet géotechnique

La réalisation du projet géotechnique comporte une phase « étude » et une phase « suivi » très importantes et indispensables pour les ouvrages géotechniques. Ces deux phases sont à la charge de l'entreprise adjudicataire sous la supervision de l'ingénierie géotechnique mandatée par le maître d'ouvrage ou son représentant (tableau 2).

**Tableau 2. Réalisation du projet d'ouvrage géotechnique**

| Étape  | Phases de la maîtrise d'œuvre | G3 (entreprise) | G4 (maître d'ouvrage)                           | Objectifs à atteindre   |
|--|-------------------------------|-----------------|---|---|
| 3<br>Études géotechniques de réalisation (G3/G4) | EXE/VISA                      | Phase Études    | Supervision de l'étude géotechnique d'exécution | Études d'exécution conformes au projet  |
|  | DET/AOR                       | Phase Suivi     | Supervision du suivi géotechnique d'exécution   | Maîtrise des risques durant l'exécution des travaux et vérification des objectifs de l'ouvrage géotechnique |

### Étape 3 : Études géotechniques de réalisation

L'étape de réalisation des travaux de l'ouvrage géotechnique est entreprise après l'étude géotechnique de conception (G2 DCE/ACT) figurant dans le contrat de travaux. Elle comporte deux missions distinctes et simultanées :

- étude et suivi géotechnique d'exécution (mission G3), à la charge de l'entrepreneur qui réalise le chantier, l'entrepreneur peut sous-traiter cette mission à une ingénierie différente de celle de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre ;
- supervision géotechnique d'exécution (mission G4), à la charge de la maîtrise d'ouvrage ou de son mandataire en collaboration avec la maîtrise d'œuvre.

### Étude et suivi géotechniques d'exécution (mission G3)

Par le suivi continu sur site des travaux, elle permet de confirmer le modèle géotechnique retenu pour la conception du projet. En cas de rencontre de conditions géotechniques ou de comportement des ouvrages géotechniques en cours de réalisation significativement différents de ceux prévus mais identifiés comme risques possibles, ce suivi permet d'adapter ou de modifier la partie correspondante de l'ouvrage et de recalculer les modèles de calcul et/ou les méthodes d'exécution. Dans le cas de conditions géotechniques non identifiées au stade de l'étude, ce suivi permet de sécuriser l'ouvrage et les avoisinants, puis de procéder à la réalisation d'investigations géotechniques complémentaires nécessaires au diagnostic (mission G5)

et à la reprise correspondantes des études d'exécution G3 initiale ou de l'étude G2 si la conception est modifiée.

Elle se déroule en deux phases interactives.

#### Phase étude

L'entreprise étudie dans le détail la réalisation du chantier de l'ouvrage géotechnique.

Elle définit un programme d'investigations géotechniques spécifiques, si nécessaire, en fonction des données existantes et en assure le suivi technique et l'exploitation des résultats. Elle établit la note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par l'étude géotechnique de conception (G2 DCE/ACT) et le contrat de travaux ainsi que les résultats des éventuelles investigations prescrites ci-dessus.

Elle définit les ouvrages, leur dimensionnement, les notes de calcul justificatives, les plans d'exécution et établit les méthodes et les conditions d'exécution, le phasage, les spécifications et les plans correspondants.

Elle fournit le plan de suivi et contrôle des travaux avec description des auscultations à réaliser et des valeurs seuils, ainsi que des dispositions constructives complémentaires nécessaires en cas d'atteinte de celles-ci dans le cas de l'application de la méthode observationnelle.

Cette étude d'exécution doit être réalisée en amont des travaux correspondants et fait l'objet d'un visa de la maîtrise d'œuvre après avis de l'ingénierie géotechnique en charge de la mission G4.

#### Phase suivi d'exécution

Dans cette phase, l'entreprise procède ou fait procéder par une entreprise extérieure aux opérations de contrôle interne et externe.

Elle vérifie la conformité du contexte géotechnique rencontré avec celui pris en compte dans la phase étude.

Elle assure la mise en place de l'auscultation des ouvrages et toutes les mesures durant l'exécution des travaux et éventuellement après la livraison de l'ouvrage. Dans le cas d'application de la méthode observationnelle, elle applique les dispositions constructives prédéfinies en phase étude.

Dans le cas où les conditions géotechniques seraient plus favorables que celles envisagées dans la phase étude, elle propose la mise en œuvre des mesures d'optimisation prédéfinies en phase étude.

Elle établit un programme d'investigations géotechniques supplémentaires si nécessaire, le réalise et en assure le suivi et en exploite les résultats.

Elle établit au fur et à mesure les documents synthétiques précisant les conditions géotechniques rencontrées, le comportement des ouvrages en phase de construction et l'impact sur les avoisinants.

Elle établit la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et le dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO).

### **Supervision géotechnique d'exécution (mission G4)**

La mission G4, à la charge du maître d'ouvrage, concerne la supervision géotechnique d'exécution dans le cadre de la maîtrise d'œuvre. Elle permet de vérifier la conformité de l'étude et le suivi géotechnique de l'entreprise aux objectifs du projet. La mission G4 comporte deux phases.

#### Phase supervision de l'étude

Cette phase permet de vérifier les documents établis par l'entrepreneur (mission G3 de l'entreprise). Elle consiste à vérifier et donner un avis sur les hypothèses géotechniques, les dispositions constructives de l'entreprise, les notes de calcul, les plans, les fiches produits, les programmes de suivi et d'auscultation y compris la méthode observationnelle.

#### Phase supervision du suivi d'exécution

Cette phase a pour objectif, par une intervention périodique et discontinue sur le chantier, de vérifier que le suivi géotechnique d'exécution, à la charge de l'entrepreneur, permet de confirmer à l'avancement des travaux le modèle géologique et le contexte géotechnique retenus ainsi que la similitude entre comportement prévu et comportement observé de l'ouvrage et des ouvrages avoisinants.

L'ingénierie géotechnique donne son avis sur les résultats des mesures des auscultations et vérifie la bonne application de la méthode observationnelle. Elle valide toute adaptation de l'ouvrage, tout changement de planning.

### **Diagnostic (mission G5)**

Pendant le déroulement du projet, il peut être nécessaire de procéder de façon limitative à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques.

Cette mission ne concerne strictement que l'ouvrage ou la partie d'ouvrage géotechnique spécifiée sans aucune implication dans la globalité du projet. Si ce diagnostic conduit à modifier tout ou partie du projet, des études géotechniques de conception et/ou d'exécution ainsi qu'un suivi et une supervision géotechnique seront réalisées ultérieurement.

L'étude géologique développée au chapitre 1 initie l'enchaînement des missions géotechniques dans les études géotechniques préliminaires. Elle est indispensable pour les grands ouvrages de génie civil, les ouvrages linéaires, les tunnels, mais elle ne doit pas être oubliée pour des ouvrages plus modestes, tels que bâtiments, voiries et réseaux divers. L'étude géologique permet d'identifier dès le départ, avant l'élaboration du projet, les grands risques géologiques : failles, zones de glissement, zones karstiques, terrains argileux, vallées compressibles, etc. ; elle guide souvent le choix et l'implantation des reconnaissances.

## Références

XP P 94-010 (décembre 1996 – Indice de classement : P 94-010) Sols : reconnaissance et essais – Glossaire géotechnique – Définitions – Notations – Symboles.

NF P 94-500 (novembre 2013 – Indice de classement : P 94-500) Missions d'ingénierie géotechnique – Classification et spécifications.

|                   |               |  |
|-------------------|---------------|--|
| Géologie des sols | Chapitre<br>1 |  |
|-------------------|---------------|--|

Les ouvrages géotechniques concernent la plupart du temps la tranche superficielle de l'écorce terrestre sur une profondeur n'excédant qu'exceptionnellement une cinquantaine de mètres. Par ailleurs, ces ouvrages sont concentrés dans les zones urbanisées et particulièrement dans les grands centres urbains, c'est-à-dire, en général, dans des zones à faible relief en site alluvial (vallées) ou proches des rivages (plaines côtières).

Sur le plan géologique, cela implique que les terrains concernés par les aménagements sont très souvent constitués de la tranche superficielle altérée du substrat (terrains autochtones) et/ou de matériaux sédimentaires transportés, puis déposés par les cours d'eau et les courants côtiers (terrains allochtones). Pour le géologue, il s'agit de roches meubles, mais le vocabulaire a consacré plutôt le terme de sol, repris dans le vocable classique de mécanique des sols.

La reconstitution de l'histoire des sols permet souvent de comprendre leur organisation spatiale en couches ou lentilles (structure) ; et leur origine (nature) explique beaucoup de leurs propriétés géotechniques. Il nous a donc paru intéressant de donner brièvement, dans ce premier chapitre, quelques notions sur l'origine et l'histoire géologique des sols, utiles en vue de la réalisation des terrassements et des ouvrages de génie civil.

## 1.1 Minéraux et roches

### 1.1.1 Définitions de base

Même si une fraction organique peut exister dans certains sols (tourbe, etc.), ceux-ci sont principalement constitués de grains minéraux issus d'une roche préexistante. Les roches superficielles fournissent la matière nécessaire à l'élaboration de la quasi-totalité des matériaux de construction (pierres de taille, granulats routiers et à béton, métaux, ciment, chaux, plâtre, briques et tuiles, etc.), à l'exception de quelques produits d'origine organique (bois principalement et certaines matières plastiques dérivées du pétrole).

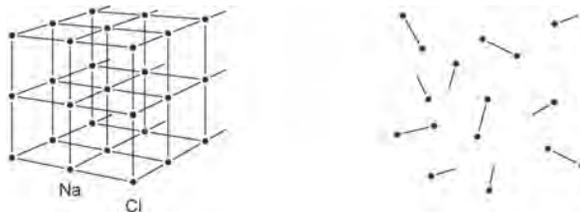
### 1.1.1.1 Minéral

Bien que minéral et cristal soient en général des notions associées, nous préférons les distinguer (il existe quelques rares cas de minéraux non cristallisés, voir § 1.1.1.2).

Un minéral est une substance solide (à la pression et à la température de la surface de la Terre), ayant une formule chimique bien définie, dans laquelle n'intervient pas d'association carbone-hydrogène. Les minéraux sont principalement composés des atomes les plus fréquents à la surface de la Terre : l'oxygène (47 %), le silicium (27 %), l'aluminium (8 %), le fer (5 %), le calcium (3,7 %), le sodium (2,8 %), le potassium (2,6 %), le magnésium (2,1 %), etc. En particulier, la famille la plus représentée est celle des silicates où figure, associé à d'autres atomes, le groupement  $\text{SiO}_4$ . On connaît aujourd'hui plus de 3 000 espèces minérales.

### 1.1.1.2 Cristal

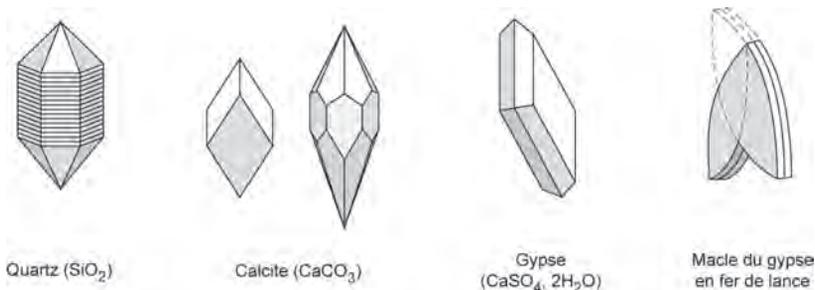
Un cristal est un minéral structuré géométriquement à l'échelle de l'arrangement des molécules (figure 1.1). Il possède en conséquence une forme géométrique caractéristique, dont les dimensions peuvent atteindre quelques centimètres. Un minéral non cristallisé est un verre.



**Figure 1.1. État cristallin (exemple du sel) et état amorphe**

À la surface de la Terre, la matière minérale naturelle est le plus souvent cristallisée, mais les cristaux sont en général invisibles à l'œil nu (voir § 1.1.2.1). En fait, les verres naturels ne se forment que lors de certaines éruptions volcaniques, lorsque le refroidissement du magma initial liquide est trop rapide pour que la matière puisse s'organiser en se solidifiant.

La figure 1.2 montre quelques exemples de cristaux courants : le quartz ( $\text{SiO}_2$ ), la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).



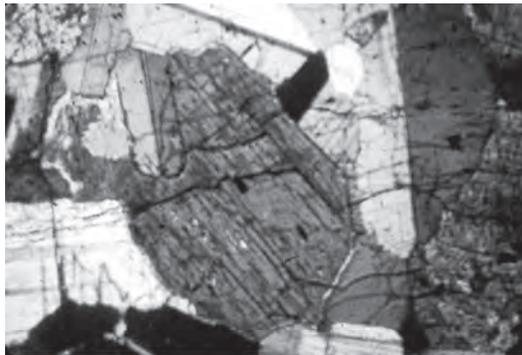
**Figure 1.2. Cristaux courants : quartz, calcite, gypse (deux formes)**

Il existe sept principaux systèmes cristallins, le plus simple à décrire étant le système cubique où les molécules occupent les sommets d'un cube de côté constant (la maille). Mais de nombreuses variétés faisant intervenir des arrangements entre parties de cristaux, à partir de défauts du réseau cristallin (les macles), font que la forme géométrique des cristaux est beaucoup plus variée que le nombre restreint des systèmes cristallins ne le laisse supposer. En fait, il est très rare que deux minéraux distincts aient la même forme cristalline.

Les propriétés optiques permettent l'identification des minéraux cristallisés : le dispositif classique utilise des lames minces (épaisseur de 30  $\mu\text{m}$ ) observées au microscope en lumière polarisée.

### 1.1.1.3 Roche

Les roches sont des agrégats polycristallins, associant des minéraux divers (voir la lame mince de la photo 1.1). Une roche est dite monominérale lorsqu'elle est composée à plus de 95 % du même minéral. En général, les roches sont constituées de quelques minéraux principaux et de plusieurs minéraux dits accessoires, en petites quantités parfois localisées (« impurétés »).



**Photo 1.1. Lame mince dans une roche magmatique**

Les gros cristaux sont centimétriques.

La très grande variété des minéraux et de leurs proportions au sein des roches et la nécessité d'avoir le plus souvent recours au microscope pour les distinguer font qu'il est peu commode d'utiliser la composition minéralogique comme critère de classification simple des roches.

### 1.1.2 Identification des minéraux importants

Nous indiquerons ici des moyens simples pour reconnaître les minéraux les plus courants. Une analyse visuelle fine et des tests simples renseignent rapidement sur des données fondamentales de nature (quartz, calcite, etc.) et de texture (taille et forme des grains) qui conditionnent les propriétés géotechniques.

### 1.1.2.1 Pouvoir séparateur de l'œil

C'est une notion physiologique très utile pour l'observation fine en général, qui présente un intérêt particulier pour le génie civil. L'œil humain est en effet susceptible de distinguer les particules de matière (les « grains »), pour peu que leur taille soit supérieure à environ  $1/10^e$  de mm (100  $\mu\text{m}$ ).

Cela est particulièrement intéressant pour l'analyse des sols et des matériaux de construction. Les « fines » (généralement indésirables pour la fabrication du béton), par exemple, sont les particules traversant le tamis à 80  $\mu\text{m}$  ou 63  $\mu\text{m}$  (dernier tamis de la colonne usuelle de tamis). Avec un peu d'exercice, on peut les distinguer visuellement des grains plus grossiers, évaluer leur importance et établir une granulométrie approchée applicable aux matériaux meubles (graves, sables, limons, etc.).

### 1.1.2.2 Observations simples : couleur, éclat, structure cristalline et clivages éventuels

La couleur n'est pas une caractéristique absolue d'un minéral et même d'un cristal, puisque d'infimes défauts de la structure, modifiant les propriétés optiques, ou la présence d'une impureté minérale colorée peuvent changer complètement sa couleur. Le cristal si caractéristique du quartz (prisme hexagonal pyramidé), normalement translucide (cristal de roche) peut apparaître sous des couleurs aussi variées que le blanc grisâtre (quartz commun), le noir (quartz enfumé), le violet (améthyste), le rose, etc.

L'éclat, c'est-à-dire l'aptitude à renvoyer la lumière, doit être apprécié sur une cassure fraîche de la roche (d'où l'un des intérêts du marteau de géologue). Il peut varier un peu pour les minéraux en fonction de la taille et de la forme des grains et, également, en fonction de leur état d'altération. Il est cependant intéressant d'utiliser une échelle qualitative à cinq niveaux :

1 – métallique ; 2 – vitreux ; 3 – gras ; 4 – mat ; 5 – terreux.

La structure cristalline, comme signalé plus haut, est caractéristique du minéral. Encore faut-il pouvoir distinguer les cristaux à l'œil nu. L'observation des cristaux et de leurs propriétés optiques est à la base de la détermination minéralogique sur lames minces de roches à l'aide du microscope optique (photo 1.1). Un trait important de certains cristaux est la présence en leur sein de plans de séparation (clivages) parallèles aux faces externes du cristal. On distingue ainsi des « débits » en parallélépipèdes (trois clivages) ou en plaques (un clivage).

### 1.1.2.3 Tests simples : dureté, comportement avec l'eau, réaction HCl dilué

Le test de dureté, qui consiste à frotter deux minéraux l'un contre l'autre et à examiner lequel des deux a laissé une empreinte (rayure) sur l'autre, est sans doute le premier test mécanique réalisé dans l'histoire des hommes pour rechercher la matière de base de leurs outils.

Il y a plus d'un siècle, une échelle de dureté minéralogique a été définie par Mohs. Elle comporte 10 niveaux :

1 – Talc ; 2 – Gypse ; 3 – Calcite ; 4 – Fluorine ; 5 – Apatite ;  
6 – Orthose ; 7 – Quartz ; 8 – Topaze ; 9 – Corindon ; 10 – Diamant.

Le quartz (silice, silex, etc.) y apparaît comme la matière courante la plus dure que l'on puisse trouver facilement dans la nature. Cette échelle à 10 niveaux est cependant peu commode à utiliser. On emploie plutôt l'échelle réduite suivante :

2,5 – Ongle ; 5,5 – Acier ; 6,5 – Verre ; 7,8 – Carbure de tungstène.

Les valeurs données sont approximatives pour les aciers (entre 5 et 6 selon leur nature) et les verres (entre 6 et 7 selon leur nature). Cette échelle permet de classer les minéraux en cinq classes de dureté :

tendre ; mi-dur ; dur ; très dur ; extrêmement dur.

La matière tendre est rayée par l'ongle ; la mi-dure raye l'ongle, mais est rayée par l'acier ; etc.

Le comportement en présence d'eau est également un test très utile. Il permet de distinguer rapidement :

- un minéral très soluble (300 g/l), le sel (NaCl) ;
- une famille de minéraux hydrophiles, formant avec l'eau un amalgame un peu collant, les argiles (voir § 1.1.3).

**Tableau 1.1. Caractéristiques et usages de quelques minéraux courants**

| Minéral   | Formule  | Dureté (Mohs)    | Système cristallin | Densité | Particularités et usages                                 |
|-----------|--|------------------|--------------------|---------|--|
| Quartz    | SiO <sub>2</sub>   | 7                | Hexagonal          | 2,65    | Très dur et abrasif<br>Granulats, laine de verre         |
| Orthose   | K(Si <sub>3</sub> AlO <sub>8</sub> )   | 6                | Hexagonal          | 2,56    | Dur et résistant<br>Granulats, grès cérames              |
| Calcite   | CaCO <sub>3</sub>  | 3                | Hexagonal          | 2,71    | Résistant, mais non abrasif<br>Chaux, ciments, granulats |
| Gypse     | CaSO <sub>4</sub> , 2H <sub>2</sub> O  | 2                | Mono-clinique      | 2,32    | Peu résistant, soluble (2 g/l)<br>Plâtre                 |
| Biotite   | K (Mg, Fe) <sub>3</sub><br>Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> | 2,5              | Mono-clinique      | 2,80    | Très brillant<br>Réfractaire                             |
| Kaolinite | Al <sub>4</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ](OH) <sub>8</sub>              | Non déterminable | Mono-clinique      | 2,62    | Très sensible à l'eau<br>Céramiques, ciments             |

Un dernier test simple, sélectif comme les précédents, est couramment pratiqué : il s'agit de la réaction avec l'acide chlorhydrique dilué ( $N/10$ ) à froid, qui n'est positive (effervescence) que sur un seul minéral courant, la calcite  $\text{CaCO}_3$ , selon la réaction :



Les réponses aux tests simples de minéraux usuels figurent avec leurs propriétés visuelles et leurs formules chimiques dans le tableau 1.1 à côté de leurs particularités et usages en construction.

### 1.1.3 Propriétés des minéraux argileux

Le terme argile est couramment défini, en mécanique des sols, par rapport à la taille des particules inférieures à  $2 \mu\text{m}$ . Cette définition ne correspond pas exactement à celle du géologue (voir § 1.1.3.1). Elle est par ailleurs insuffisante pour la compréhension du comportement hydromécanique des sols argileux en général, et des phénomènes de retrait et de gonflement en particulier. Il existe en outre des sols composés de particules très fines, inférieures à  $2 \mu\text{m}$ , mais peu argileuses au sens minéralogique (« farines de roche »). Par exemple, des « argiles sensibles » qui résultent du dépôt de ces particules peuvent être rencontrées, en particulier au Québec et dans les pays du nord de l'Europe.

#### 1.1.3.1 Microstructure des argiles

Les argiles sont des phyllosilicates d'aluminium hydratés. Elles présentent une microstructure complexe, dont la description varie selon les auteurs. Nous avons adopté celle de D. Tessier de l'Institut national de la recherche agronomique (Inra) qui distingue plans d'anions, couches, feuilletts élémentaires, cristallites, particules et arrangement textural (Tessier, 1975, 1984).

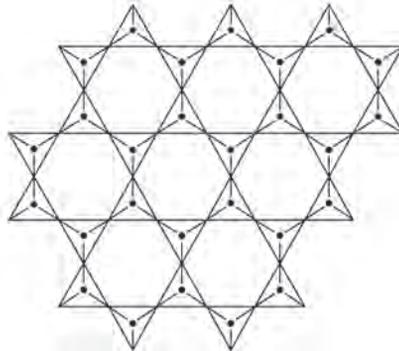
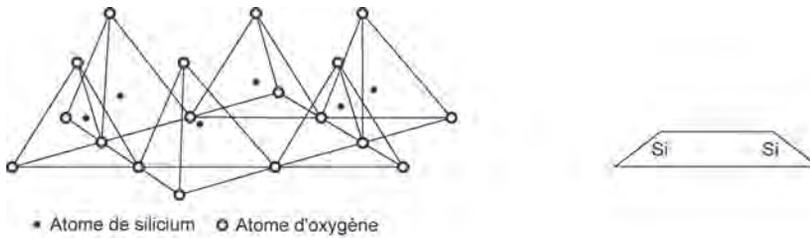
##### Les plans d'anions

Les ions oxygènes et hydroxyles sont de grande taille ( $13,5 \text{ nm}$  par exemple pour l'oxygène) par rapport à la plupart des cations ( $4,2 \text{ nm}$  pour la silice,  $5,1$  pour l'alumine). De ce fait, ce sont ces éléments qui vont conférer à la structure son aspect caractéristique.

Il existe deux arrangements possibles. L'un, valable exclusivement pour les ions oxygènes  $\text{O}^{2-}$ , est un assemblage hexagonal ; l'autre, pour les ions  $\text{O}^{2-}$  oxygènes et hydroxyles  $\text{OH}^-$ , est un assemblage compact.

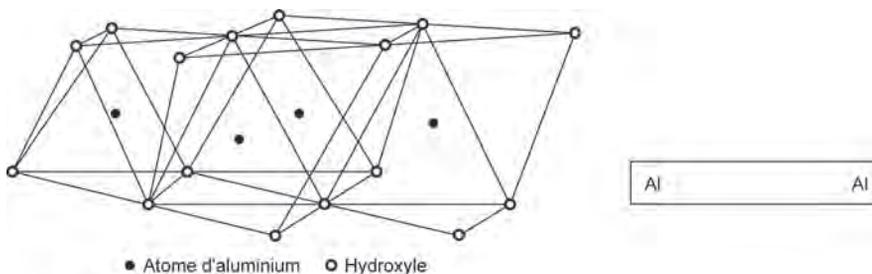
##### Les couches

Les couches sont des empilements de deux plans. On obtient des couches de tétraèdres (couche T) en superposant une couche hexagonale et une couche compacte. Les tétraèdres sont constitués d'un cation central de silicium  $\text{Si}^{4+}$  entouré de quatre anions  $\text{O}^{2-}$  aux sommets (figure 1.3).



**Figure 1.3. Couche tétraédrique de silice**

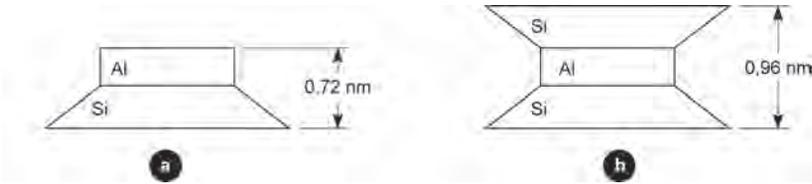
On obtient des couches d'octaèdres (couche O) en disposant deux couches compactes l'une sur l'autre, décalées d'un rayon dans les deux directions. Les octaèdres sont constitués d'un cation aluminium  $\text{Al}^{3+}$  (ou  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ), entouré de six hydroxyles  $\text{OH}^-$  (figure 1.4).



**Figure 1.4. Couche octaédrique d'alumine**

Les feuillets élémentaires

Les feuillets sont des superpositions de plans d'anions délimitant des couches tétraédriques et octaédriques. Les minéraux argileux sont classés en deux familles suivant le type de feuillet (figure 1.5).



**Figure 1.5. Types de feuillets des minéraux argileux**

a. Schéma du feuillet 1/1. b. Schéma du feuillet 2/1.

Les feuillets 1/1 sont formés d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique (T-O), par exemple pour la kaolinite. Les feuillets 2/1 sont formés d'une couche octaédrique entourée de deux couches tétraédriques (T-O-T), par exemple pour les illites, smectites, chlorites. Les forces qui associent les éléments de chaque feuillet sont de nature ionique et sont stables.

#### Cristallites

Les feuillets sont très rarement isolés dans les argiles. La superposition de plusieurs feuillets forme un cristallite. On verra que les forces qui associent les feuillets successifs sont de nature variée et sont toujours moins fortes que les précédentes, ce qui permet parfois de séparer les feuillets.

Le cristallite comporte trois types de surface :

- les surfaces basales ;
- les surfaces latérales ;
- les surfaces interfeuillets.

L'ensemble formé par les surfaces basales et latérales constitue la surface externe ; les surfaces interfeuillets, quand elles sont accessibles à l'eau et aux cations hydratés, forment la surface interne.

#### Particule

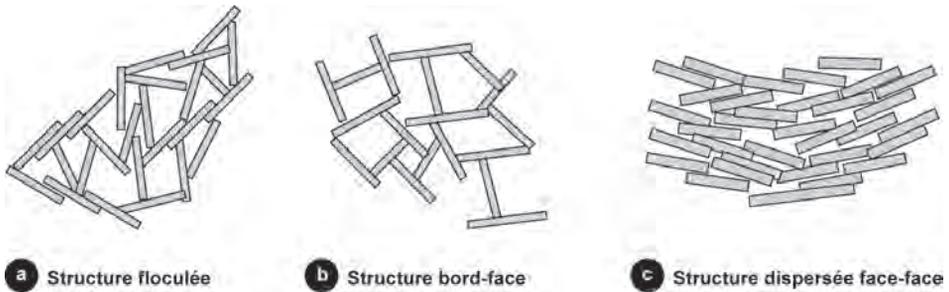
La particule d'argile est un agrégat complexe de cristallites.

#### Arrangement textural

L'arrangement élémentaire des particules et des pores constitue l'arrangement textural.

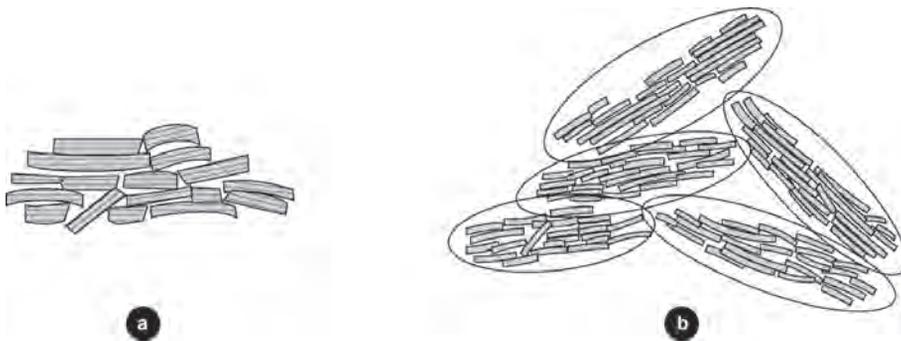
Les particules s'organisent en unités morphologiques. On peut distinguer par exemple des structures floculées bord-face et des structures dispersées face-face (figure 1.6). L'arrangement textural est très divers. Il varie suivant les types d'argile et avec les conditions hydriques et physico-chimiques des sols.

L'étude de la microstructure des argiles par microscopie électronique à balayage et microscopie électronique par transmission (MEB et MET) permet de mettre en évidence les différents niveaux d'arrangement des textures.



**Figure 1.6. Texture des argiles**

Par exemple, les images en microscopie par transmission d'une kaolinite (Vasseur *et al.*, 1995) montrent que les particules de kaolinite d'Austell sont formées par un agrégat de cristallites, eux-mêmes composés de 25 feuilletts élémentaires. La figure 1.7 montre une particule formée d'agrégats de cristallites et un arrangement textural qui indique une porosité interparticulaire.

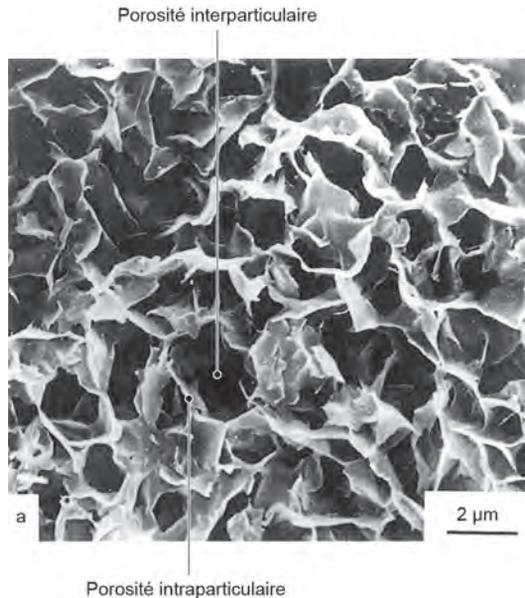


**Figure 1.7. Microstructure des argiles**

a. Agrégat de cristallites. b. Arrangement textural

D'après Vasseur *et al.* (1995).

La photo 1.2 permet de visualiser la microstructure d'une montmorillonite à très forte teneur en eau. L'arrangement textural est un assemblage bord à bord de particules qui constituent des rubans délimitant une porosité interparticulaire dépendant de la teneur en eau. On distinguera la porosité entre les feuilletts de montmorillonite, de type interfoliaire ou intraparticulaire, et la porosité interparticulaire beaucoup plus importante.



**Photo 1.2. Montmorillonite à teneur en eau de 369 %**

Photo MEB, D. Tessier.

### 1.1.3.2 Propriétés physico-chimiques des argiles

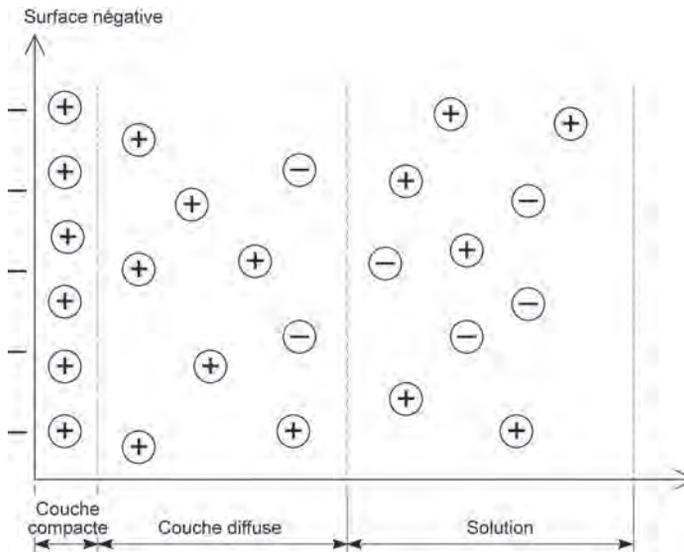
Les argiles sont soumises à des forces électrostatiques et osmotiques. Les forces électrostatiques sont présentes à la surface des feuillets, qui peuvent être chargés positivement ou négativement et attirer les molécules d'eau qui ont un comportement dipolaire.

Les forces électrostatiques proviennent de charges structurales permanentes et de charges de surface variables qui prennent naissance aux bords des feuillets.

Les charges électrostatiques structurales sont dues aux substitutions isomorphiques. Deux ions de dimension voisine peuvent se substituer l'un à l'autre sans qu'il y ait de modification fondamentale de la structure. Ces substitutions isomorphiques d'ions dans la structure des feuillets de certaines argiles créent des déficits de charges électriques qui doivent être compensés par des cations compensateurs ou cations échangeables situés dans les espaces interfoliaires. Par exemple, si on remplace dans les tétraèdres un  $\text{Si}^{4+}$  par un  $\text{Al}^{3+}$  (substitution isomorphique), des charges négatives vont apparaître sur les faces des particules (figure 1.8). Ces charges structurales sont constantes, quelles que soient les conditions physico-chimiques du milieu et toujours négatives.

Les charges électrostatiques de surface sont liées à l'hydrolyse de liens Si-O, Al-OH, le long des surfaces des feuillets. Les charges peuvent être négatives ou positives, en fonction du pH du sol.

Les forces osmotiques résultent de gradients de concentration des cations dans la phase liquide du sol.



**Figure 1.8. Schéma de la double couche dans le modèle de Stern**

D'après Fourati (1999).

Le modèle de la double couche de Gouy-Chapman modifié par Stern rend compte de la fixation des cations et molécules d'eau dipolaires.

On considère une double couche électrique diffuse composée (voir figure 1.8) :

- d'une couche d'eau compacte, adsorbée au solide, de Stern, qui est entièrement liée à la particule par des forces électrostatiques ;
- d'une couche diffuse de Gouy et Chapman. Elle correspond à un nuage d'ions résultant de l'interaction entre l'attraction électrostatique des cations par les surfaces des particules d'argile et à la diffusion des ions qui, par des phénomènes d'osmose, auraient tendance à se distribuer de manière homogène dans l'eau. C'est cet équilibre entre les forces électrostatiques et les forces osmotiques qui conduit à la présence d'une double couche.

### 1.1.3.3 Étude expérimentale des caractéristiques de surface des particules d'argile

On peut obtenir les caractéristiques de surface des particules d'argile par différents essais de laboratoire. Le plus utilisé sur les chantiers est l'essai au bleu de méthylène.

#### Mesure de la capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) permet de quantifier les forces électrostatiques présentes sur les surfaces et les bords des feuillets argileux ; elle représente le déficit de charge de

particules exprimé par le nombre de cations attirés à la surface de l'argile et nécessaire pour atteindre l'électroneutralité. On la définit par le nombre de milliéquivalents de cations susceptibles d'être adsorbés d'une façon réversible par 100 g de sol. On notera que la CEC totale intègre l'ensemble des charges développées à la surface des différents constituants qui composent sa phase solide. Ainsi, elle prend non seulement en compte celles développées par les argiles, mais aussi celles dues à la présence de matière organique et d'oxydes/hydroxydes. La matière organique a une très forte CEC (200-400).

Le tableau 1.2 indique les surfaces interne, externe, totale et les CEC de différents types d'argile, ainsi que celui de la matière organique.

**Tableau 1.2. Valeurs de la CEC de différents types d'argile et de la matière organique**

D'après Morel (1996).

| Constituant       | Surface interne (m <sup>2</sup> /g) | Surface externe (m <sup>2</sup> /g) | Surface totale (m <sup>2</sup> /g) | CEC (meq/100 g) |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| Kaolinite         | 0                                   | 10-30                               | 10-30                              | 3-15            |
| Illite            | 20-55                               | 80-120                              | 100-175                            | 20-50           |
| Chlorite          | –                                   | 100-175                             | 100-175                            | 10-40           |
| Montmorillonite   | 600-700                             | 80                                  | 700-800                            | 80-150          |
| Vermiculite       | 700                                 | 40-70                               | 760                                | 100-150         |
| Matière organique | –                                   | –                                   | –                                  | 200-400         |

#### La mesure des surfaces par physisorption

La BET (Brunauer, Emmet, Teller) mesure essentiellement la surface externe des particules argileuses. Il s'agit d'une méthode d'adsorption gazeuse (azote). Les molécules d'azote qui ne pénètrent pas entre les feuillets des argiles gonflantes se fixent uniquement sur les surfaces externes.

#### La mesure des surfaces par chimisorption

L'adsorption chimique permet de mesurer la surface spécifique totale. Parmi les méthodes utilisées, on citera comme adsorbant l'éthylène glycol et surtout le bleu de méthylène.

L'adsorption chimique irréversible de bleu de méthylène s'effectue avec libération équivalente de cations échangeables.

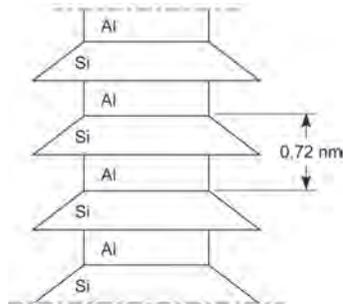
On dose par des méthodes chimiques la quantité de bleu de méthylène fixé, mais on le verra aussi beaucoup plus simplement par l'essai au bleu de méthylène à la tache (voir chapitre 5).

#### 1.1.3.4 Principaux types d'argile

Parmi les deux cents types d'argile, on pourra rencontrer dans les sols surtout des mélanges d'argiles monominérales dont les principales sont : la kaolinite, l'illite et les smectites, dont fait partie la montmorillonite.

##### Kaolinite

Le feuillet élémentaire est 1/1 (T-O), le cristallite élémentaire comporte quelques dizaines de feuillets (figure 1.9). La kaolinite ne présente aucune substitution isomorphique, les charges disponibles pour la fixation de cations hydratés ne se trouvent qu'en bordure des feuillets élémentaires. N'ayant pas de substitution isomorphique, les liaisons entre feuillets sont très stables et ne laissent aucune possibilité de passage aux molécules d'eau.



**Figure 1.9. Schéma du cristallite de kaolinite**

La largeur de la particule est de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$  et son épaisseur de l'ordre de 0,1  $\mu\text{m}$ . La kaolinite se présente sous forme de plaquettes rigides (photo 1.3).



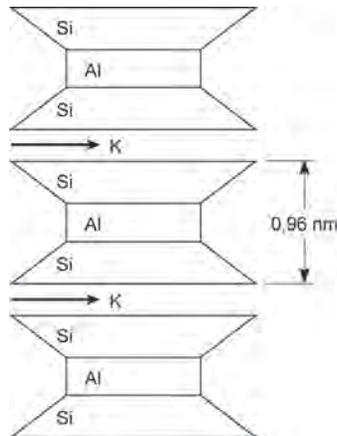
**Photo 1.3. Cliché de la microstructure du kaolin d'Arvor**

D'après Fourati (1999).

### Illite

Le feuillet élémentaire est 2/1 (T-O-T). Dans les couches tétraédriques, un cation  $\text{Si}^{4+}$  sur quatre est remplacé par un cation  $\text{Al}^{3+}$ . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions potassiums  $\text{K}^+$  anhydres situés entre les feuillets. Ce potassium bloque toute hydratation et expansion foliaire (figure 1.10).

Le cristallite d'illite comporte une dizaine de feuillets qui lui donne une largeur de l'ordre de  $0,3 \mu\text{m}$  et une épaisseur de l'ordre de  $10 \text{ nm}$ .



**Figure 1.10. Schéma du cristallite d'illite**

### Smectites

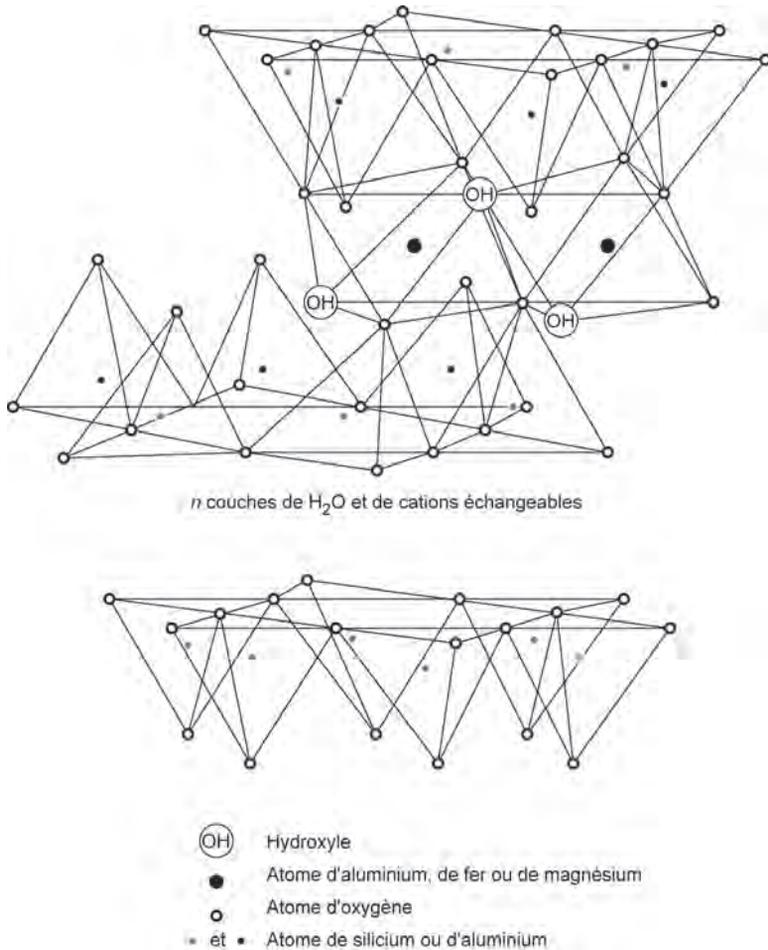
La famille des smectites comprend, entre autres, la montmorillonite et la beidellite. Le terme bentonite est utilisé pour tout matériau argileux contenant au moins 60 % de montmorillonite. Le feuillet élémentaire est 2/1 (T-O-T) (figure 1.11).

Pour la montmorillonite, le déficit de charge interne aux feuillets est provoqué par des substitutions de cations  $\text{Al}^{3+}$  en couche octaédrique par des cations  $\text{Mg}^{2+}$ . Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des cations hydratés échangeables, tels que  $\text{Na}^+$  ou  $\text{Ca}^{2+}$ , localisés entre les feuillets (voir figure 1.11). L'épaisseur des feuillets dépendra donc de l'état d'hydratation.

Le nombre de feuillets du cristallite dépend des paramètres minéralogiques, de la nature des cations échangeables et de la concentration en sels de la solution. L'arrangement textural est un assemblage bord à bord de particules primaires qui constituent des rubans plus ou moins « chiffonnés ».

Le mécanisme de l'hydratation est dominé dans les montmorillonites par la porosité interfoliaire ou intraparticulaire et la porosité interparticulaire. La photo 1.4 montre la microstructure d'une montmorillonite  $\text{Na}^+$  à trois teneurs en eau, 369 %, 114 % et 82 %, sous des succions

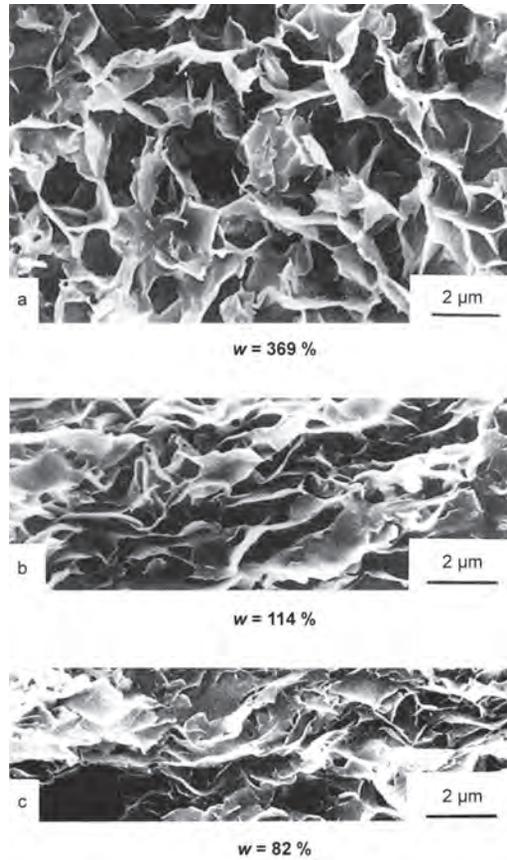
respectivement égales à 3,2 kPa, 0,1 MPa, 1 MPa. À la teneur en eau de 369 %, le diamètre des pores interparticulaires est de l'ordre de 1 à 2  $\mu\text{m}$  ; pour des teneurs en eau plus faibles, on observe clairement un tassement très important des pores interparticulaires.



**Figure 1.11. Structure du cristallite de montmorillonite**

### Interstratifié

Les interstratifiés sont formés par l'alternance de feuillets appartenant à deux familles d'argile différentes : illite-montmorillonite, par exemple. On en trouve une illustration dans les minéraux argileux contenus dans les argiles vertes de Romainville, qui sont représentés par de l'illite, de la kaolinite, de la montmorillonite et des interstratifiés illite-montmorillonite.



**Photo 1.4. Évolution de la microstructure d'une montmorillonite à trois teneurs en eau**

D'après Tessier (1995).

#### 1.1.3.5 Matériaux argileux

Dans les travaux géotechniques, il est très rare de trouver des argiles monominérales ; le sol argileux comporte presque toujours plusieurs types d'argile.

Plus généralement encore, le sol peut être composé d'argile et de fractions plus grossières : limon, sable, gravier. On considère qu'il suffit de 30 % d'argile dans un sol pour que celle-ci impose ses propriétés à l'ensemble du sol.

À taux d'argile comparable, la nature des minéraux argileux est d'une importance capitale ; on peut également considérer que 30 à 40 % de montmorillonite dans un mélange argileux sont suffisants pour que la montmorillonite confère ses caractéristiques à l'ensemble du mé-

# Table des matières

|   |    |
|---|----|
| Avant-propos .....  | 5  |
| Présentation des auteurs .....  | 7  |
| Sigles et abréviations .....  | 9  |
| Introduction .....  | 13 |
| Chapitre 1 Géologie des sols .....  | 23 |
| 1.1 Minéraux et roches .....  | 23 |
| 1.1.1 Définitions de base .....   | 23 |
| 1.1.1.1 Minéral .....   | 24 |
| 1.1.1.2 Cristal .....   | 24 |
| 1.1.1.3 Roche .....   | 25 |
| 1.1.2 Identification des minéraux importants .....  | 25 |
| 1.1.2.1 Pouvoir séparateur de l'œil .....   | 26 |
| 1.1.2.2 Observations simples : couleur, éclat, structure<br>cristalline et clivages éventuels ..... | 26 |
| 1.1.2.3 Tests simples : dureté, comportement avec l'eau,<br>réaction HCl dilué .....                | 26 |
| 1.1.3 Propriétés des minéraux argileux .....  | 28 |
| 1.1.3.1 Microstructure des argiles .....  | 28 |
| 1.1.3.2 Propriétés physico-chimique des argiles .....   | 32 |
| 1.1.3.3 Étude expérimentale des caractéristiques de surface<br>des particules d'argile .....        | 33 |
| 1.1.3.4 Principaux types d'argile .....   | 35 |
| 1.1.3.5 Matériaux argileux .....  | 38 |
| 1.1.4 Principales familles de roches .....  | 39 |
| 1.1.4.1 Roches magmatiques .....  | 39 |
| 1.1.4.2 Roches métamorphiques .....   | 41 |
| 1.1.4.3 Roches sédimentaires .....  | 41 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.2     | Les massifs rocheux .....  | 43 |
| 1.2.1   | Les surfaces de discontinuité .....  | 44 |
| 1.2.1.1 | Stratification .....   | 44 |
| 1.2.1.2 | Diaclases .....  | 45 |
| 1.2.1.3 | Faillles .....   | 45 |
| 1.2.1.4 | Schistosité .....  | 47 |
| 1.2.2   | Caractérisation des surfaces de discontinuité .....                                      | 47 |
| 1.2.2.1 | Orientation .....  | 47 |
| 1.2.2.2 | Intensité de la fracturation .....   | 48 |
| 1.2.2.3 | État de surface, remplissage .....   | 49 |
| 1.2.3   | Influence de la structure du massif sur la morphologie<br>et le paysage .....            | 49 |
| 1.2.3.1 | Structure monoclinale .....  | 50 |
| 1.2.3.2 | Structure plissée .....  | 50 |
| 1.2.3.3 | Structure faillée .....  | 51 |
| 1.2.4   | Les hétérogénéités des massifs (sols et roches) .....                                    | 51 |
| 1.2.4.1 | Hétérogénéités métriques en terrain rocheux .....  | 51 |
| 1.2.4.2 | Hétérogénéités métriques en massif de sol .....  | 53 |
| 1.3     | Altération des roches. Formation des sols autochtones<br>(altérites et colluvions) ..... | 54 |
| 1.3.1   | Éléments de climatologie .....   | 54 |
| 1.3.1.1 | Les températures .....   | 55 |
| 1.3.1.2 | La pluviométrie .....  | 55 |
| 1.3.1.3 | Les glaciations quaternaires .....   | 56 |
| 1.3.1.4 | Le changement climatique .....   | 57 |
| 1.3.2   | Processus d'altération .....   | 57 |
| 1.3.2.1 | Actions mécaniques .....   | 58 |
| 1.3.2.2 | Actions chimiques .....  | 59 |
| 1.3.3   | Pédogenèse .....   | 59 |
| 1.3.3.1 | Différents types de sols .....   | 60 |
| 1.3.3.2 | Profils pédologiques .....   | 61 |
| 1.3.4   | Les sols organiques .....  | 61 |
| 1.3.4.1 | Les vases .....  | 62 |
| 1.3.4.2 | Les tourbes .....  | 63 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 1.4  | Les processus sédimentaires. Formation des sols allochtones (alluvions, moraines, etc.) ..... | 64 |
| 1.4.1  | Les processus sédimentaires .....   | 64 |
| 1.4.2  | Les milieux montagnards .....   | 65 |
| 1.4.2.1  | Moraines .....  | 65 |
| 1.4.2.2  | Éboulis et cônes torrentiels .....  | 66 |
| 1.4.2.3  | Matériaux fluvio-glaciaires .....   | 67 |
| 1.4.3  | Milieux fluviatiles .....   | 68 |
| 1.4.3.1  | Alluvions récentes .....  | 69 |
| 1.4.3.2  | Terrasses alluviales .....  | 70 |
| 1.4.4  | Milieux littoraux .....   | 71 |
| 1.4.4.1  | Dunes côtières .....  | 71 |
| 1.4.4.2  | Deltas .....  | 71 |
| 1.5  | Les cartes géologiques .....  | 72 |
| 1.5.1  | Principes de base .....   | 72 |
| 1.5.2  | Légende des cartes géologiques .....  | 76 |
| 1.5.3  | Édition des cartes. Échelles disponibles .....  | 77 |
| 1.5.4  | La carte géologique au 1/50 000 .....   | 77 |
| 1.6  | Conclusion .....  | 79 |
| 1.7  | Références .....  | 80 |
| Chapitre 2 Hydrologie et niveaux d'eau dans le sol ..... |   | 83 |
| 2.1  | Composantes du cycle hydrologique .....   | 84 |
| 2.2  | La distribution des eaux .....  | 86 |
| 2.2.1  | L'échelle globale : sphères, réservoirs, cycles .....   | 87 |
| 2.2.2  | L'échelle continentale, régionale ou locale .....   | 89 |
| 2.3  | Les systèmes hydrologiques .....  | 92 |
| 2.3.1  | Limites et alimentation des systèmes hydrologiques .....                                      | 92 |
| 2.3.2  | Débits d'écoulement des systèmes hydrologiques .....  | 94 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 2.4     | Le bilan hydrologique .....   | 95  |
| 2.4.1   | Formes possibles de l'équation du bilan .....                                   | 95  |
| 2.4.2   | Applications nécessitant un bilan hydrologique .....                            | 98  |
| 2.5     | Le système [aquifère + rivière] .....   | 98  |
| 2.5.1   | Relations géologiques, structurales et morphologiques .....                     | 98  |
| 2.5.2   | Relations hydrologiques cours d'eau-nappe alluviale .....                       | 100 |
| 2.5.3   | Courbe de tarissement, vidange des nappes et réserves .....                     | 103 |
| 2.5.3.1 | Coefficient de tarissement et capacité<br>d'emmagasinement .....                | 104 |
| 2.5.3.2 | Bilan de nappe et relation entre variation de charge<br>et emmagasinement ..... | 106 |
| 2.5.3.3 | Étude de l'indice d'emmagasinement à partir<br>de l'hydrogramme .....           | 107 |
| 2.6     | Application sur le bilan et le tarissement .....                                | 107 |
| 2.7     | Impact potentiel de la crue de nappe sur un bâtiment .....                      | 110 |
| 2.7.1   | Étude prévisionnelle du niveau des plus hautes eaux (NPHE) ...                  | 110 |
| 2.7.2   | Application : projet de fondations de bâtiment sous nappe .....                 | 112 |
| 2.8     | L'infiltration .....  | 116 |
| 2.8.1   | Facteurs, courbes et paramètres descriptifs de l'infiltration .....             | 116 |
| 2.8.2   | Évolution du profil de teneur en eau au cours d'une averse .....                | 119 |
| 2.9     | Impact de l'infiltration sur les réseaux et le bâti .....                       | 123 |
| 2.9.1   | Les eaux claires parasites permanentes (ECP) .....                              | 123 |
| 2.9.2   | Infiltrabilité des eaux pluviales et cartographie .....                         | 124 |
| 2.9.3   | Exemple de réinjection des eaux d'exhaure .....                                 | 127 |
| 2.10    | La remontée de nappe par cessation partielle<br>ou totale de pompage .....      | 128 |
| 2.11    | Références .....  | 133 |

---

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Chapitre 3 | Reconnaissance géophysique .....   | 135 |
| 3.1        | Propriétés physiques utilisées .....                                       | 135 |
| 3.1.1      | Densité .....  | 135 |
| 3.1.2      | Vitesse de propagation des ondes élastiques .....                          | 136 |
| 3.1.3      | Propriétés électriques .....   | 140 |
| 3.1.4      | Conductivité (ou résistivité) électrique .....                             | 141 |
| 3.1.4.1    | Milieux sans argile, loi d'Archie .....                                    | 142 |
| 3.1.4.2    | Milieux avec argile .....  | 142 |
| 3.1.5      | Permittivité diélectrique .....  | 143 |
| 3.2        | Prospection gravimétrique, microgravimétrie .....                          | 146 |
| 3.2.1      | Principe .....   | 146 |
| 3.2.2      | Champ de gravité, potentiel et accélération de la pesanteur .....          | 147 |
| 3.2.2.1    | Loi de l'attraction universelle .....                                      | 147 |
| 3.2.2.2    | Accélération de la pesanteur .....   | 148 |
| 3.2.3      | Mesure de la gravité .....   | 148 |
| 3.2.4      | Procédures et faisabilité de la microgravimétrie .....                     | 149 |
| 3.2.5      | Type de gravimètre .....   | 149 |
| 3.2.6      | Implantation des points et programme des mesures .....                     | 149 |
| 3.2.7      | Corrections .....  | 152 |
| 3.2.7.1    | Correction de dérives .....  | 152 |
| 3.2.7.2    | Corrections de latitude .....  | 152 |
| 3.2.7.3    | Corrections de Bouguer .....   | 153 |
| 3.2.8      | Interprétation des prospections gravimétriques .....                       | 154 |
| 3.2.8.1    | Interprétation qualitative .....   | 155 |
| 3.2.8.2    | Détermination des paramètres invariants ou limitant<br>les solutions ..... | 157 |
| 3.2.9      | Utilisation de la méthode en génie civil .....                             | 158 |
| 3.2.10     | Application à la recherche de vides sous voie ferrée .....                 | 158 |
| 3.3        | Prospection sismique .....   | 160 |
| 3.3.1      | Sismique réflexion (très haute résolution en génie civil) .....            | 161 |
| 3.3.2      | Sismique réfraction .....  | 165 |
| 3.3.2.1    | Terrain tabulaire .....  | 165 |
| 3.3.2.2    | Terrains non tabulaires .....  | 167 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 3.3.2.3 | Application de la méthode au génie civil .....  | 169 |
| 3.3.2.4 | Exemple .....   | 170 |
| 3.3.3   | Tomographie sismique .....  | 171 |
| 3.3.4   | Sismique en ondes de surface .....  | 171 |
| 3.4     | Méthodes électriques .....  | 174 |
| 3.4.1   | Principe des différentes méthodes .....   | 174 |
| 3.4.1.1 | Méthode électrique .....  | 175 |
| 3.4.1.2 | Méthodes électromagnétiques basse fréquence .....   | 175 |
| 3.4.1.3 | Méthode électromagnétique haute fréquence .....   | 175 |
| 3.4.2   | Méthode électrique .....  | 176 |
| 3.4.2.1 | Principe de la mesure, le quadripôle .....  | 176 |
| 3.4.2.2 | Mise en œuvre de la méthode : principes .....   | 178 |
| 3.4.2.3 | Exemples .....  | 180 |
| 3.4.2.4 | Interprétation des mesures .....  | 182 |
| 3.4.2.6 | Multipôles mobiles .....  | 185 |
| 3.4.2.7 | Réalisation des mesures .....   | 185 |
| 3.4.2.8 | Application de la méthode au génie civil .....  | 186 |
| 3.4.3   | Méthode électrostatique .....   | 186 |
| 3.4.3.1 | Principe de la mesure .....   | 186 |
| 3.4.3.2 | Application de la méthode au génie civil .....  | 187 |
| 3.4.4   | Méthodes électromagnétiques basse fréquence .....   | 187 |
| 3.4.4.1 | Effet de peau, profondeur de pénétration, nombre<br>d'induction .....   | 187 |
| 3.4.4.2 | Modes électromagnétiques basses fréquences .....  | 188 |
| 3.4.4.3 | Sources utilisées .....   | 189 |
| 3.4.4.4 | Méthodes électromagnétiques basses fréquences<br>en champ lointain .....  | 189 |
| 3.4.4.5 | Méthodes basse fréquence en champ proche .....  | 191 |
| 3.4.5   | Mesures haute fréquence, radar-sol ( <i>Ground Penetrating Radar</i><br>ou Géo-Radar) ou radar géologique ..... | 193 |
| 3.4.5.1 | Principe de la méthode .....  | 193 |
| 3.4.5.2 | Applications .....  | 194 |
| 3.4.5.3 | Application de la méthode en génie civil .....  | 195 |
| 3.5     | Synthèse de l'utilisation des méthodes .....  | 195 |
| 3.6     | Références .....  | 199 |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Chapitre 4 | Reconnaissance géologique .....  | 201 |
| 4.1        | Les forages géologiques .....  | 202 |
| 4.1.1      | Moyens de reconnaissance .....   | 202 |
| 4.1.1.1    | Le sondage carotté .....   | 202 |
| 4.1.1.2    | Le forage destructif avec diagraphies instantanées .....                             | 202 |
| 4.1.1.3    | Le passage de caméra en forage .....   | 203 |
| 4.1.1.4    | Les pénétromètres .....  | 203 |
| 4.1.1.5    | Les tarières .....   | 203 |
| 4.1.1.6    | Les sondages à la pelle .....  | 203 |
| 4.1.1.7    | Les puits blindés .....  | 203 |
| 4.1.2      | Les foreuses .....   | 204 |
| 4.1.2.1    | Les sondeuses de reconnaissance .....  | 204 |
| 4.1.2.2    | Les foreuses de production .....   | 206 |
| 4.1.3      | Les tubages .....  | 207 |
| 4.1.4      | Les fluides de perforation .....   | 207 |
| 4.1.5      | Les outils du forage rotatif .....   | 208 |
| 4.1.5.1    | Les carottiers .....   | 208 |
| 4.1.5.2    | Les outils désagrégateurs (ou « destructifs »)<br>en rotation simple .....           | 213 |
| 4.1.6      | Matériel de forage en rotopercussion .....   | 216 |
| 4.1.7      | Incidents de carottage .....   | 216 |
| 4.1.7.1    | Perte d'eau ou du fluide de forage .....   | 216 |
| 4.1.7.2    | Grippage de l'ensemble mobile .....  | 216 |
| 4.1.7.3    | Récupération nulle .....   | 216 |
| 4.1.7.4    | Chute d'outil et avance rapide .....   | 217 |
| 4.1.7.5    | Problèmes particuliers en cas de présence de cavités ...                             | 217 |
| 4.1.8      | Exploitation et présentation du carottage .....                                      | 217 |
| 4.1.8.1    | Contrôle de qualité des carottes .....   | 217 |
| 4.1.8.2    | Les caisses de carottes .....  | 217 |
| 4.1.9      | Les sondages pénétrométriques .....  | 221 |
| 4.2        | Les diagraphies instantanées en forage .....   | 221 |
| 4.2.1      | Introduction .....   | 221 |
| 4.2.2      | Les principaux types d'appareils – Principe de fonctionnement<br>des matériels ..... | 222 |

|  |   |     |
|--|---|-----|
| 4.2.3  | Les variables intervenant sur le paramètre de vitesse d'avancement de l'outil de forage rotatif ..... | 224 |
| 4.2.3.1  | La pression sur l'outil et la vitesse de rotation .....   | 225 |
| 4.2.3.2  | La pression du fluide d'injection .....   | 226 |
| 4.2.3.3  | La nature de l'outil : type, diamètre, degré d'usure .....  | 226 |
| 4.2.4  | Forage en rotoperçussion .....  | 228 |
| 4.2.5  | Applications .....  | 228 |
| 4.2.5.1  | Détection de vides francs et de cavités .....   | 228 |
| 4.2.5.2  | Altération des sols et des roches, contrôle de la validité des essais mécaniques en place .....       | 229 |
| 4.2.5.3  | Lithostratigraphie .....  | 231 |
| 4.2.5.4  | Contrôle d'amélioration de terrains .....   | 231 |
| 4.2.5.5  | Contrôle de la qualité des couches situées au-dessus de cavités .....                                 | 231 |
| 4.2.6  | Conclusion .....  | 232 |
| 4.3  | Les diagraphies nucléaires .....  | 234 |
| 4.3.1  | Les diagraphies de radioactivité naturelle (RAN) .....  | 234 |
| 4.3.1.1  | Le principe .....   | 234 |
| 4.3.1.2  | Les compteurs .....   | 234 |
| 4.3.1.3  | Les mesures de radioactivité naturelle .....  | 234 |
| 4.3.1.4  | Utilisation de la RAN globale .....   | 235 |
| 4.3.2  | Diagraphies gamma-gamma et neutron-neutron .....  | 241 |
| 4.3.2.1  | Principes des méthodes .....  | 241 |
| 4.3.2.2  | Mise en œuvre, limites de la méthode .....  | 241 |
| 4.3.2.3  | Intérêt des diagraphies gamma-gamma et neutron-neutron .....  | 242 |
| 4.4  | Références .....  | 244 |
| Chapitre 5 Identification et classification des sols ..... |   | 245 |
| 5.1  | Définitions du modèle élémentaire de sol .....  | 247 |
| 5.2  | Identification des sols .....   | 251 |
| 5.2.1  | Paramètres de nature .....  | 251 |
| 5.2.1.1  | La granularité .....  | 252 |

---

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 5.2.1.2 | L'argilosité .....   | 255 |
| 5.2.1.3 | Détermination de la masse volumique des particules ....  | 264 |
| 5.2.1.4 | Détermination des masses volumiques minimale<br>et maximale des sols non cohérents .....                       | 264 |
| 5.2.1.5 | Constituants minéraux et organiques .....  | 265 |
| 5.2.2   | Paramètres d'état .....  | 267 |
| 5.2.2.1 | Détermination de la teneur en eau pondérale .....  | 267 |
| 5.2.2.2 | Détermination de la masse volumique totale des sols<br>en laboratoire .....                                    | 267 |
| 5.2.2.3 | Détermination de la masse volumique du sol en place ..   | 268 |
| 5.3     | Dénomination des sols .....  | 268 |
| 5.3.1   | Critères principaux .....  | 268 |
| 5.3.1.1 | La granularité .....   | 268 |
| 5.3.1.2 | La teneur en carbonates .....  | 271 |
| 5.3.1.3 | La teneur en matières organiques .....   | 271 |
| 5.3.2   | Les qualificatifs .....  | 271 |
| 5.3.2.1 | L'activité de bleu de la fraction argileuse .....  | 272 |
| 5.3.2.2 | La plasticité et l'indice de consistance .....   | 272 |
| 5.3.2.3 | La compacité .....   | 273 |
| 5.3.2.4 | La densité .....   | 273 |
| 5.4     | Valeurs repères .....  | 274 |
| 5.5     | Classification des sols .....  | 277 |
| 5.5.1   | La classification géotechnique des sols des LPC (Ifsttar) .....  | 278 |
| 5.5.2   | La classification des matériaux utilisables dans la construction<br>des remblais et des couches de forme ..... | 280 |
| 5.5.2.1 | Utilisation des sols et des roches dans les remblais<br>et les couches de forme .....                          | 280 |
| 5.5.2.2 | Classification des sols .....  | 282 |
| 5.5.2.3 | Classification des matériaux rocheux .....   | 292 |
| 5.5.2.4 | Classification des sols organiques et des sous-produits<br>industriels .....                                   | 295 |
| 5.6     | Références .....   | 295 |

|  |     |
|--|-----|
| Chapitre 6 Déplacements et déformations des massifs de sol .....   | 297 |
| 6.1 Domaines d'étude .....   | 298 |
| 6.2 Illustrations des déplacements et des déformations d'un massif de sol .....  | 299 |
| 6.3 Déplacements et déformations d'un domaine élémentaire en coordonnées cartésiennes .....  | 303 |
| 6.3.1 Description du mouvement du massif de sol .....  | 303 |
| 6.3.2 Études des petits déplacements rigides : translation et rotation d'ensemble .....  | 305 |
| 6.3.2.1 Translation d'ensemble (rigide) .....  | 305 |
| 6.3.2.2 Rotation d'ensemble (rigide) .....   | 306 |
| 6.3.3 Étude de la déformation infinitésimale .....   | 308 |
| 6.3.3.1 Définition du vecteur déformation .....  | 309 |
| 6.3.3.2 Les dilatations en coordonnées cartésiennes .....  | 310 |
| 6.3.3.3 Les glissements en coordonnées cartésiennes .....  | 312 |
| 6.3.4 Conclusions sur les déplacements et les déformations du massif de sol ou d'un élément de structure .....   | 313 |
| 6.3.5 Dilatations et directions principales du tenseur de déformations infinitésimales .....   | 316 |
| 6.3.6 Dilatation cubique en déformations infinitésimales .....   | 320 |
| 6.3.7 Décomposition du tenseur de déformations infinitésimales en partie sphérique et déviatorique .....   | 320 |
| 6.3.8 Généralités sur la représentation géométrique du tenseur de déformations infinitésimales .....   | 320 |
| 6.3.9 Représentation géométrique du tenseur de déformation infinitésimale dans les axes fixes principaux $X_1, X_2, X_3$ .<br>Représentation de Lamé ..... | 321 |
| 6.3.10 Représentation géométrique du tenseur de déformations infinitésimales dans les axes liés $\lambda, g$ .<br>Représentation de Mohr .....             | 322 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 6.4.  | Déplacements et déformations d'un domaine élémentaire en coordonnées cylindriques .....            | 330 |
| 6.4.1   | Définitions des composantes du déplacement .....   | 330 |
| 6.4.2   | Définitions des composantes du tenseur de déformation dans le cas tridimensionnel .....            | 331 |
| 6.4.3   | Définitions des composantes du tenseur de déformation en déformation plane .....                   | 332 |
| 6.4.4   | Définitions des composantes du tenseur de déformation en déformation plane et en axisymétrie ..... | 333 |
| 6.4.5   | Dilatation cubique en déformations infinitésimales .....   | 335 |
| 6.5   | Application .....  | 335 |
| 6.5.1   | Déformation plane .....  | 336 |
| 6.5.2   | Déformations principales et directions principales analytiquement .....                            | 336 |
| 6.5.2.1   | Déformations principales .....   | 336 |
| 6.5.2.2   | Directions principales .....   | 336 |
| 6.5.3   | Déformations principales et directions principales par le cercle de Mohr .....                     | 337 |
| 6.6   | Références .....   | 338 |
| Chapitre 7 Contraintes dans les massifs de sols ..... |  | 339 |
| 7.1   | Notion de contrainte. Définition du vecteur contrainte .....                                       | 340 |
| 7.1.1   | Vecteur contrainte .....   | 340 |
| 7.1.2   | Contraintes orthogonales en un point .....   | 342 |
| 7.1.3   | Tenseurs des contraintes en contraintes cartésiennes .....   | 343 |
| 7.2   | Équations d'équilibre .....  | 347 |
| 7.2.1   | Équations d'équilibre en coordonnées cartésiennes .....  | 347 |
| 7.2.1.1   | Déformation plane .....  | 347 |
| 7.2.1.2   | Cas tridimensionnel .....  | 348 |
| 7.2.2   | Équations d'équilibre en coordonnées cylindriques .....  | 348 |
| 7.2.2.1   | Déformation plane .....  | 348 |
| 7.2.2.2   | Cas tridimensionnel .....  | 350 |
| 7.2.2.3   | Déformation plane et chargement de révolution .....  | 351 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 7.2.3   | Expression tensorielle de l'équation d'équilibre .....  | 352 |
| 7.3     | Étude locale du tenseur de contraintes .....  | 353 |
| 7.3.1   | Contrainte normale et contrainte tangentielle .....   | 353 |
| 7.3.2   | Réciprocité des contraintes .....   | 354 |
| 7.3.3   | Contraintes et directions principales du tenseur de contraintes ..  | 355 |
| 7.3.4   | Décomposition du tenseur de contraintes en partie sphérique<br>et déviatorique .....  | 357 |
| 7.3.5   | Contraintes octaédriques .....  | 358 |
| 7.3.6   | Applications aux calculs des contraintes dans le sol .....  | 358 |
| 7.3.6.1 | Massif semi-infini à surface horizontale soumis<br>aux forces de pesanteur .....  | 358 |
| 7.3.6.2 | Massif semi-infini à surface inclinée soumis<br>aux forces de pesanteur .....   | 360 |
| 7.3.7   | Généralités sur la représentation géométrique<br>du vecteur contrainte .....  | 362 |
| 7.3.7.1 | Représentation géométrique du vecteur contrainte $\underline{t}(n)$<br>dans les axes fixes principaux $X_1, X_2, X_3$ .<br>Représentation de Lamé ..... | 362 |
| 7.3.7.2 | Représentation géométrique du vecteur contrainte $\underline{t}(n)$<br>dans les axes liés $\sigma, \tau$ à la facette.<br>Représentation de Mohr .....  | 363 |
| 7.4     | Sols saturés. Contraintes effectives et postulat<br>de Terzaghi .....   | 381 |
| 7.4.1   | Chargement d'un massif de gravier saturé .....  | 381 |
| 7.4.2   | Postulat de Terzaghi .....  | 382 |
| 7.4.3   | Application au sol grenu saturé .....   | 383 |
| 7.5     | Sols non saturés. Succion dans les sols .....   | 383 |
| 7.5.1   | Différents types de succion .....   | 384 |
| 7.5.1.1 | Succion capillaire dans les sols granulaires .....  | 384 |
| 7.5.1.2 | Succion physico-chimique dans les sols fins .....   | 384 |
| 7.5.1.3 | Succion matricielle .....   | 386 |
| 7.5.2   | Relation entre la succion, le degré de saturation, la teneur<br>en eau, l'indice des vides .....  | 386 |

---

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 7.5.3   | Domaines de non-saturation .....  | 389 |
| 7.5.4   | Choix de variables de contrainte .....  | 393 |
| 7.5.5   | Techniques de mesure de succion .....   | 394 |
| 7.5.5.1   | Mesure par translation d'axes .....   | 394 |
| 7.5.5.2   | Mesure par technique osmotique .....  | 395 |
| 7.5.5.3   | Mesure par phase vapeur .....   | 395 |
| 7.5.5.4   | Mesure par tensiométrie .....   | 396 |
| 7.5.5.5   | Mesure par psychrométrie .....  | 396 |
| 7.5.5.6   | Mesure par papier-filtre .....  | 397 |
| 7.6   | Références .....  | 398 |
| Chapitre 8 Consolidation et fluage des sols ..... |   | 401 |
| 8.1   | Présentation du couplage hydromécanique des sols saturés .....                                      | 401 |
| 8.1.1   | État initial .....  | 403 |
| 8.1.2   | Loi de comportement .....   | 403 |
| 8.2   | Consolidation et fluage des sols saturés .....  | 403 |
| 8.2.1   | Présentations de la consolidation et du fluage .....  | 403 |
| 8.2.2   | Consolidation unidimensionnelle .....   | 404 |
| 8.2.2.1   | Définition de la consolidation .....  | 404 |
| 8.2.2.2   | Application de la consolidation unidimensionnelle<br>au tassement d'une couche d'argile molle ..... | 406 |
| 8.3   | Courbes œdométriques .....  | 407 |
| 8.3.1   | Définitions des courbes œdométriques .....  | 407 |
| 8.3.2   | Différents états initiaux du sol .....  | 410 |
| 8.3.3   | Détermination de la contrainte de préconsolidation .....  | 412 |
| 8.3.4   | Différents paramètres de l'essai œdométrique .....  | 412 |
| 8.4   | Calculs du tassement unidimensionnel<br>de consolidation .....                                      | 414 |
| 8.4.1   | Cas du sol normalement consolidé .....  | 414 |
| 8.4.2   | Cas du sol surconsolidé .....   | 416 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 8.4.3   | Applications .....   | 417 |
| 8.5     | Estimation du temps de consolidation unidimensionnel .....                                   | 419 |
| 8.5.1   | Équation de la consolidation .....   | 419 |
| 8.5.2   | Coefficients de consolidation .....  | 420 |
| 8.5.3   | Détermination des isochrones .....   | 422 |
| 8.5.4   | Calcul du temps de tassement .....   | 424 |
| 8.5.5   | Application .....  | 426 |
| 8.6     | Consolidation bidimensionnelle .....   | 427 |
| 8.7     | Fluage .....   | 432 |
| 8.7.1   | Phénomène de fluage du sol .....   | 432 |
| 8.7.2   | Modèles élémentaires unidimensionnels de fluage du sol .....                                 | 433 |
| 8.7.2.1 | Description de la viscosité .....  | 433 |
| 8.7.2.2 | Modèle viscoélastique de Maxwell .....   | 434 |
| 8.7.2.3 | Modèle viscoélastique de Kelvin-Voigt .....  | 435 |
| 8.7.2.4 | Modèle viscoplastique de Bingham .....   | 437 |
| 8.7.2.5 | Autres modèles .....   | 438 |
| 8.7.3   | Effet du fluage sur la valeur de la pression<br>de préconsolidation .....                    | 440 |
| 8.7.3.1 | Réseau des « lignes de temps » de Bjerrum .....  | 440 |
| 8.7.3.2 | Calcul de la pression de préconsolidation en fonction<br>de la durée de chargement .....     | 442 |
| 8.7.4   | Effet du fluage sur la surface de charge .....   | 444 |
| 8.7.5   | Paramètres des lois de fluage .....  | 445 |
| 8.7.6   | Calcul pratique du tassement de fluage d'un massif de sol .....                              | 445 |
| 8.7.7   | Application .....  | 446 |
| 8.8     | Valeurs indicatives des caractéristiques<br>de consolidation et de fluage de sols fins ..... | 449 |
| 8.9     | Corrélations pour un site géographique donné .....   | 450 |
| 8.10    | Références .....   | 451 |

---

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Chapitre 9 | Généralités sur les lois de comportement des sols .....                               | 453 |
| 9.1        | Historique des lois de comportements des sols .....                                   | 453 |
| 9.1.1      | Première période : le sol, matériau monophasique .....                                | 453 |
| 9.1.2      | Deuxième période : le sol, matériau biphasique .....                                  | 454 |
| 9.1.3      | Troisième période : le sol, matériau triphasique .....                                | 454 |
| 9.1.4      | Exemple d'études de comportement de sols .....  | 454 |
| 9.1.5      | Comportement des sols suivant leur état de saturation .....                           | 455 |
| 9.2        | Généralités sur le comportement des matériaux .....                                   | 456 |
| 9.2.1      | Étude du comportement de l'acier doux .....   | 456 |
| 9.2.2      | Étude du comportement de l'acier écroui .....   | 458 |
| 9.2.3      | Étude du comportement du sol saturé par l'essai œdométrique et l'essai triaxial ..... | 460 |
| 9.2.3.1    | Essais triaxiaux sur des éprouvettes de sol saturé. Essais drainés .....              | 462 |
| 9.2.3.2    | Essais triaxiaux sur des éprouvettes de sol saturé. Essais non drainés .....          | 463 |
| 9.2.4      | Chemins de contraintes des essais triaxiaux de révolution .....                       | 464 |
| 9.2.4.1    | Chemin de contraintes dans les axes de Mohr .....                                     | 464 |
| 9.2.4.2    | Chemin de contraintes dans les axes de Cambridge .....                                | 465 |
| 9.2.4.3    | Chemin de contraintes dans les axes de Lambe .....                                    | 466 |
| 9.3        | Établissement des lois de comportement du squelette du sol .....                      | 468 |
| 9.3.1      | Généralités sur les lois de comportement .....  | 468 |
| 9.3.2      | Établissement des lois élastoplastiques .....   | 469 |
| 9.3.2.1    | Surfaces de charge et domaines d'élasticité actuels .....                             | 470 |
| 9.3.2.2    | Règles d'écoulement plastique. Lois de déformation plastique .....                    | 472 |
| 9.4        | Références .....  | 474 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Chapitre 10 | Lois de comportement élastique parfaitement<br>plastique et modèle hyperbolique .....                        | 477 |
| 10.1        | Loi de comportement élastique linéaire .....   | 479 |
| 10.1.1      | Modules et coefficient d'élasticité .....  | 480 |
| 10.1.1.1    | Compression simple ou traction simple .....  | 480 |
| 10.1.1.2    | Cisaillement simple .....  | 481 |
| 10.1.1.3    | Compression isotrope .....   | 482 |
| 10.1.2      | Loi de Hooke .....   | 483 |
| 10.1.3      | Élasticité plane .....   | 484 |
| 10.1.3.1    | Déformation plane .....  | 484 |
| 10.1.3.2    | Contrainte plane (ou quasi plane) .....  | 485 |
| 10.1.4      | Applications aux calculs des tubes épais .....   | 486 |
| 10.1.4.1    | Calculs des déplacements et des contraintes<br>dans le cas général .....                                     | 487 |
| 10.1.4.2    | Cas de la pression intérieure seule $P_i$ .....  | 488 |
| 10.1.4.3    | Cas de la pression extérieure seule $P_e$ .....  | 489 |
| 10.1.4.4    | Cas du tube de rayon intérieur infiniment petit<br>soumis à une pression extérieure $P_e$ .....              | 490 |
| 10.1.4.5    | Cas du tube mince .....  | 491 |
| 10.1.5      | Formules et abaques de distribution des contraintes dans le sol<br>dues à certains types de surcharges ..... | 491 |
| 10.1.5.1    | Diffusion d'une force ponctuelle unique $P$ appliquée<br>à la surface du sol .....                           | 491 |
| 10.1.5.2    | Charge répartie sur une aire finie à la surface du sol .....   | 493 |
| 10.1.5.3    | Charge appliquée par un remblai infiniment long .....  | 498 |
| 10.1.5.4    | Distribution des contraintes dans un angle solide .....  | 500 |
| 10.1.6      | Détermination et choix du module d'élasticité $E$ .....  | 504 |
| 10.1.7      | Détermination du coefficient de Poisson .....  | 505 |
| 10.1.8      | Détermination du module d'élasticité $E_u$<br>et du coefficient de Poisson $\nu$ .....                       | 506 |
| 10.2        | Loi de comportement élastique parfaitement plastique .....   | 507 |
| 10.2.1      | Critère de plasticité de Mohr-Coulomb .....  | 507 |
| 10.2.1.1    | Détermination de $\phi$ et $c$ dans les axes de Mohr .....   | 510 |
| 10.2.1.2    | Détermination de $\phi$ et $c$ dans les axes<br>de Cambridge .....   | 511 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| 10.2.1.3    | Détermination de $\sigma_c$ et $c$ dans les axes de Lambe ...   | 512 |
| 10.2.1.4    | Détermination de l'angle de dilatance .....                     | 513 |
| 10.2.2      | Critère de plasticité de Tresca .....                           | 514 |
| 10.2.2.1    | Détermination de $c_u$ dans les axes de Lambe .....             | 515 |
| 10.2.2.2    | Détermination de $c_u$ dans les axes de Mohr .....              | 516 |
| 10.2.2.3    | Détermination de $c_u$ .....                                    | 517 |
| 10.3        | Modèle hyperbolique de type élastoplastique avec écrouissage .  | 518 |
| 10.4        | Modélisation d'essais triaxiaux drainés .....                   | 521 |
| 10.5        | Références .....  | 522 |
|             |   |     |
| Chapitre 11 | Lois élastoplastiques avec écrouissage                          |     |
|             | de Cam-Clay .....   | 523 |
|             |   |     |
| 11.1        | Comportement des argiles idéales reconstituées                  |     |
|             | et saturées dans le domaine normalement consolidé.              |     |
|             | Notion d'état critique .....                                    | 523 |
| 11.1.1      | Compression isotrope .....                                      | 523 |
| 11.1.2      | Essais triaxiaux dans le domaine normalement consolidé ....     | 526 |
| 11.2        | Comportement des argiles idéales reconstituées et saturées,     |     |
|             | dans le domaine surconsolidé. Notion de surface de charge ..... | 531 |
| 11.3        | Modèle de Cam-Clay modifié .....                                | 532 |
| 11.3.1      | Description du modèle de Cam-Clay modifié .....                 | 532 |
| 11.3.2      | Applications du modèle de Cam-Clay modifié à l'interprétation   |     |
|             | des essais triaxiaux sur des argiles .....                      | 537 |
| 11.3.2.1    | Essai triaxial de compression, avec consolidation               |     |
|             | isotrope, drainé, CID, d'une argile reconstituée                |     |
|             | saturée normalement consolidée .....                            | 538 |
| 11.3.2.2    | Essai triaxial de compression, avec consolidation               |     |
|             | isotrope, non drainé, CIU, d'une argile reconstituée            |     |
|             | saturée normalement consolidée .....                            | 539 |
| 11.3.2.3    | Essai triaxial de compression, avec consolidation               |     |
|             | isotrope, drainé, CID, d'une argile reconstituée                |     |
|             | saturée légèrement surconsolidée .....                          | 539 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 11.3.2.4  | Essai triaxial de compression, avec consolidation isotrope, non drainé, CIU, d'une argile reconstituée saturée légèrement surconsolidée ..... | 540 |
| 11.3.2.5  | Essai triaxial de compression, avec consolidation isotrope, drainé, CID, d'une argile reconstituée saturée fortement surconsolidée .....      | 541 |
| 11.3.2.6  | Essai triaxial de compression, avec consolidation isotrope, non drainé, CIU, d'une argile reconstituée saturée fortement surconsolidée .....  | 542 |
| 11.3.2.7  | Exploitation des essais triaxiaux sur des argiles saturées naturelles .....   | 543 |
| 11.3.2.8  | Déterminations expérimentales de la surface de charge et de l'état critique des argiles naturelles .  | 544 |
| 11.4  | Références .....  | 549 |
| Chapitre 12 Comportement des sols non saturés ..... |   | 551 |
| 12.1  | Effet de la succion sur la compressibilité .....  | 551 |
| 12.2  | Effet de la succion sur la résistance au cisaillement .....   | 553 |
| 12.2.1  | Influence de la succion .....   | 553 |
| 12.2.2  | Influence de la contrainte de confinement .....   | 554 |
| 12.3  | Angle de frottement et cohésion apparents .....   | 556 |
| 12.4  | Influence de la succion sur la surface de charge .....  | 556 |
| 12.5  | Phénomène de gonflement et d'effondrement .....   | 557 |
| 12.6  | Déformation plastique due à la succion .....  | 558 |
| 12.7  | Couplage succion-contrainte (ou pression de préconsolidation) .....   | 559 |
| 12.8  | Lois de comportement .....  | 561 |
| 12.8.1  | Généralités .....   | 561 |
| 12.8.2  | Modèles élastiques .....  | 564 |
| 12.8.3  | Modèles élastoplastiques .....  | 564 |
| 12.9  | Références .....  | 571 |

---

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Chapitre 13 | Hydraulique des sols .....                                     | 573 |
| 13.1        | Équations générales de la mécanique des fluides .....          | 573 |
| 13.2        | Équation de continuité en milieu poreux .....                  | 575 |
| 13.2.1      | Notion de volume élémentaire représentatif .....               | 575 |
| 13.2.2      | Vitesse de filtration, continuité macroscopique .....          | 576 |
| 13.2.3      | Terme source .....   | 578 |
| 13.3        | Équation de Navier-Stokes – milieux poreux modèles .....       | 578 |
| 13.3.1      | Simplifications .....  | 579 |
| 13.3.2      | Cas d'un tube cylindrique .....                                | 579 |
| 13.4        | Le théorème de Bernoulli .....                                 | 580 |
| 13.4.1      | Énoncé .....   | 580 |
| 13.4.2      | Démonstration .....  | 581 |
| 13.4.3      | Principe du manomètre .....                                    | 582 |
| 13.4.4      | Application : loi de Torricelli .....                          | 583 |
| 13.5        | Charge hydraulique .....                                       | 584 |
| 13.5.1      | Écoulement laminaire d'un fluide visqueux .....                | 584 |
| 13.5.2      | Écoulement laminaire dans un tube et perte de charge .....     | 584 |
| 13.5.3      | Charge et gradient hydraulique, isopièzes .....                | 585 |
| 13.5.4      | Description de l'écoulement par les courbes isopièzes .....    | 589 |
| 13.5.5      | Application à un ouvrage géotechnique : le batardeau .....     | 592 |
| 13.6        | La loi de Darcy (1856) .....                                   | 594 |
| 13.6.1      | L'expérience de Darcy et le coefficient de perméabilité .....  | 594 |
| 13.6.2      | Perméabilité intrinsèque .....                                 | 595 |
| 13.6.3      | Relations entre perméabilité intrinsèque et porosité .....     | 597 |
| 13.6.3.1    | Hazen (1911) / Taylor (1948) .....                             | 597 |
| 13.6.3.2    | Terzaghi (1925) .....  | 598 |
| 13.6.3.3    | Kozeny (1927) / Carman (1937) .....                            | 598 |
| 13.6.4      | Application : écoulement d'une nappe libre vers un canal ..... | 599 |

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| 13.7      | Généralisation de la loi de Darcy .....  | 600 |
| 13.7.1    | Tenseur de perméabilité .....  | 600 |
| 13.7.2    | Transmissivité .....   | 602 |
| 13.8      | Limites de validité de la loi de Darcy .....   | 604 |
| 13.8.1    | Gradients faibles .....  | 604 |
| 13.8.2    | Gradients forts .....  | 605 |
| 13.8.3    | Régime transitoire .....   | 605 |
| 13.9      | Équation générale de l'écoulement en milieu saturé .....   | 605 |
| 13.10     | Étude des réseaux d'écoulement : cas unidimensionnel .....   | 608 |
| 13.10.1   | Sol homogène .....   | 608 |
| 13.10.2   | Multicouche .....  | 609 |
| 13.10.2.1 | Écoulement vertical .....  | 609 |
| 13.10.2.2 | Écoulement horizontal .....  | 610 |
| 13.11     | Étude des réseaux d'écoulement : cas bidimensionnel .....  | 611 |
| 13.11.1   | Conditions aux limites .....   | 612 |
| 13.11.1.1 | Condition de Neumann, flux imposé .....  | 612 |
| 13.11.1.2 | Condition de Dirichlet, potentiel imposé .....   | 613 |
| 13.11.1.3 | Condition de surface libre et de suintement .....  | 613 |
| 13.11.2   | Méthode graphique de tracé du réseau d'écoulement :<br>cas du batardeau .....  | 614 |
| 13.11.3   | Méthode numérique du tracé du réseau d'écoulement :<br>cas du batardeau .....  | 616 |
| 13.11.4   | Méthode numérique de tracé du réseau d'écoulement<br>pour une fouille blindée dans un monocouche .....                                       | 617 |
| 13.11.5   | Écoulement de l'eau dans un batardeau le long d'un écran<br>dans une couche de sol infinie. Solution de Mandel .....                         | 620 |
| 13.11.6   | Écoulement dans un batardeau le long d'un écran dans<br>une couche de sol limitée par un substratum imperméable.<br>Solution de Mandel ..... | 621 |
| 13.11.7   | Abaques de Davidenkoff pour un batardeau .....   | 622 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| 13.12       | Rupture du fond de fouille d'origine hydraulique .....  | 624 |
| 13.12.1     | Soulèvement hydraulique global du terrain .....   | 625 |
| 13.12.2     | Forces hydrodynamiques exercées par l'écoulement<br>de l'eau sur les grains, bouance .....              | 625 |
| 13.12.3     | Érosion interne et régressive .....   | 627 |
| 13.13       | Hydraulique des sols non saturés .....  | 628 |
| 13.14       | Références .....  | 632 |
| Chapitre 14 | Essais de laboratoire .....   | 635 |
| 14.1        | L'essai œdométrique .....   | 635 |
| 14.1.1      | Sol non gonflant .....  | 637 |
| 14.1.2      | Sol gonflant .....  | 639 |
| 14.1.3      | Application .....   | 640 |
| 14.1.4      | Détermination du coefficient de consolidation verticale .....   | 641 |
| 14.1.4.1    | Méthode de Taylor .....   | 641 |
| 14.1.4.2    | Méthode de Casagrande .....   | 643 |
| 14.1.4.3    | Méthode à partir de la mesure du coefficient<br>de perméabilité verticale .....                         | 643 |
| 14.1.4.4    | Détermination des paramètres de fluage .....  | 649 |
| 14.2        | Essais de cisaillement à l'appareil triaxial .....  | 650 |
| 14.2.1      | Essais de cisaillement à l'appareil triaxial .....  | 650 |
| 14.2.2      | Appareil triaxial .....   | 650 |
| 14.2.3      | Description de l'essai .....  | 652 |
| 14.2.4      | Exploitation des résultats de l'essai .....   | 654 |
| 14.2.5      | Différents types d'essais .....   | 654 |
| 14.2.5.1    | Essai UU ( <i>unconsolidated undrained</i> ) .....  | 654 |
| 14.2.5.2    | Essai CD ( <i>consolidated drained</i> ) sur sols saturés ...   | 655 |
| 14.2.5.3    | Essai CU + <i>u</i> ( <i>consolidated undrained</i> ) avec mesure<br>de <i>u</i> sur sols saturés ..... | 656 |
| 14.3        | Essais de cisaillement rectiligne à la boîte .....  | 667 |
| 14.3.1      | Description de l'essai .....  | 668 |
| 14.3.2      | Exploitation des résultats de l'essai .....   | 668 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 14.4                                    | Essais de laboratoire sur sols non saturés .....   | 671 |
| 14.5                                    | Références .....   | 673 |
| Chapitre 15 Essais <i>in situ</i> ..... |  | 675 |
| 15.1                                    | Essai pressiométrique Ménard .....   | 676 |
| 15.1.1                                  | Domaine d'application .....  | 676 |
| 15.1.2                                  | Principe de l'essai .....  | 676 |
| 15.1.3                                  | Appareillage .....   | 676 |
| 15.1.3.1                                | Contrôleur pression-volume .....   | 677 |
| 15.1.3.2                                | Sondes .....   | 677 |
| 15.1.3.3                                | L'enregistreur .....   | 678 |
| 15.1.4                                  | Réalisation du sondage pressiométrique .....   | 678 |
| 15.1.4.1                                | Forage pressiométrique .....   | 678 |
| 15.1.4.2                                | Essai pressiométrique .....  | 678 |
| 15.1.5                                  | Expression des résultats .....   | 681 |
| 15.1.5.1                                | Analyse théorique de l'essai pressiométrique .....                                       | 681 |
| 15.1.5.2                                | Courbe pressiométrique corrigée .....  | 683 |
| 15.1.5.3                                | Détermination du module pressiométrique Ménard ..  | 683 |
| 15.1.5.4                                | Détermination de la pression de fluage .....   | 684 |
| 15.1.5.5                                | Détermination de la pression limite .....  | 684 |
| 15.1.5.6                                | Pression limite pressiométrique nette, pression<br>de fluage pressiométrique nette ..... | 685 |
| 15.1.5.7                                | Qualités nécessaires à l'exécution d'un essai<br>pressiométrique .....                   | 685 |
| 15.1.5.8                                | Exemple de dépouillement d'un essai<br>pressiométrique .....                             | 687 |
| 15.1.5.9                                | Exemple de sondage pressiométrique .....   | 687 |
| 15.1.5.10                               | Ordre de grandeur des pressions limites .....  | 687 |
| 15.2                                    | Essai de pénétration statique .....  | 690 |
| 15.2.1                                  | Domaine d'application .....  | 690 |
| 15.2.2                                  | Principe de l'essai .....  | 694 |
| 15.2.3                                  | Appareillage .....   | 692 |
| 15.2.4                                  | Réalisation de l'essai de pénétration statique .....                                     | 696 |

---

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 15.2.5   | Expression des résultats .....  | 696 |
| 15.2.6   | Classification des sols d'après le pénétromètre<br>statique CPT ..... | 696 |
| 15.2.7   | Ordre de grandeur des résistances de pointe .....                     | 699 |
| 15.3     | Essais de pénétration statique au piézocône .....                     | 701 |
| 15.3.1   | Domaine d'application .....   | 701 |
| 15.3.2   | Principe de l'essai .....   | 701 |
| 15.3.3   | Appareillage .....  | 702 |
| 15.3.4   | Réalisation de l'essai au piézocône .....                             | 702 |
| 15.3.5   | Expression des résultats .....  | 703 |
| 15.3.6   | Classification des sols d'après le piézocône CPTU .....               | 704 |
| 15.3.7   | Estimation du coefficient local de perméabilité horizontale .....     | 706 |
| 15.4     | Essai de cisaillement (sur site) au phicomètre .....                  | 709 |
| 15.4.1   | Domaine d'application .....   | 709 |
| 15.4.2   | Principe de l'essai .....   | 709 |
| 15.4.3   | Appareillage .....  | 710 |
| 15.4.4   | Réalisation de l'essai .....  | 710 |
| 15.4.5   | Expression des résultats .....  | 711 |
| 15.5     | Pénétromètres dynamiques de reconnaissance .....                      | 712 |
| 15.5.1   | Pénétromètre dynamique A .....  | 712 |
| 15.5.1.1 | Principe de l'essai .....   | 712 |
| 15.5.1.2 | Domaine d'application .....   | 713 |
| 15.5.1.3 | Appareillage .....  | 713 |
| 15.5.1.4 | Réalisation de l'essai .....  | 713 |
| 15.5.1.5 | Expression des résultats .....  | 713 |
| 15.5.2   | Pénétromètre dynamique B .....  | 714 |
| 15.5.2.1 | Principe de l'essai .....   | 714 |
| 15.5.2.2 | Domaine d'application .....   | 714 |
| 15.5.2.3 | Appareillage .....  | 714 |
| 15.5.2.4 | Réalisation de l'essai .....  | 714 |
| 15.5.2.5 | Expression des résultats .....  | 714 |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 15.6  | Pénétrromètres dynamiques de contrôle de compactage .....  | 717 |
| 15.6.1  | Pénétrromètre à énergie constante .....  | 717 |
| 15.6.2  | Pénétrromètre à énergie variable .....   | 720 |
| 15.7  | Essai de pénétration au carottier .....  | 722 |
| 15.7.1  | Principe de l'essai .....  | 722 |
| 15.7.2  | Domaine d'application .....  | 722 |
| 15.7.3  | Appareillage .....   | 722 |
| 15.7.4  | Réalisation de l'essai .....   | 723 |
| 15.7.5  | Expression des résultats .....   | 723 |
| 15.8  | Essai scissométrique .....   | 723 |
| 15.8.1  | Principe de l'essai .....  | 723 |
| 15.8.2  | Domaine d'application .....  | 723 |
| 15.8.3  | Appareillage .....   | 724 |
| 15.8.4  | Réalisation de l'essai .....   | 724 |
| 15.8.5  | Expression des résultats .....   | 725 |
| 15.9  | Effet de la non-saturation sur les résultats d'essai <i>in situ</i> .....                                      | 726 |
| 15.10   | Recommandation pour le choix des essais mécaniques<br>pour le dimensionnement des ouvrages géotechniques ..... | 729 |
| 15.11   | Références .....   | 729 |
| Chapitre 16 Aquifères, nappes et essais d'eau ..... |  | 731 |
| 16.1  | Définitions .....  | 731 |
| 16.2  | Typologie des systèmes aquifères et des nappes .....   | 733 |
| 16.2.1  | Nappes libres .....  | 733 |
| 16.2.1.1  | Nappe de littoral .....  | 733 |
| 16.2.1.2  | Nappe alluviale .....  | 734 |
| 16.2.1.3  | Nappe de vallée ou nappe soutenue .....  | 735 |
| 16.2.1.4  | Nappe non soutenue et nappe perchée .....  | 736 |
| 16.2.1.5  | Types de sources des nappes libres .....   | 738 |
| 16.2.2  | Nappes captives .....  | 738 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 16.2.3   | Coupe type d'une nappe mixte dans la direction de l'écoulement ..... | 740 |
| 16.2.4   | Les nappes des aquifères hétérogènes .....                           | 741 |
| 16.2.4.1 | Régions de socle .....   | 741 |
| 16.2.4.2 | Régions de plateaux calcaires karstiques .....                       | 742 |
| 16.2.4.3 | Régions de bassins sédimentaires :<br>aquifère multicouche .....     | 744 |
| 16.2.5   | Ordres de grandeur des vitesses d'écoulement des nappes..            | 746 |
| 16.3     | L'équation de diffusivité .....                                      | 746 |
| 16.3.1   | Introduction .....   | 746 |
| 16.3.2   | Nappe libre, nappe captive : emmagasinement .....                    | 747 |
| 16.3.2.1 | Porosité efficace ou de drainage .....                               | 748 |
| 16.3.2.2 | Nappe libre .....  | 750 |
| 16.3.2.3 | Nappe captive .....  | 751 |
| 16.3.3   | L'équation de la diffusivité dans une nappe libre .....              | 754 |
| 16.3.4   | L'équation de la diffusivité dans une nappe captive.....             | 757 |
| 16.3.5   | Nappe complexe : libre ou captive selon le lieu .....                | 758 |
| 16.4     | Conditions aux limites .....   | 759 |
| 16.4.1   | Limite à potentiel imposé .....                                      | 759 |
| 16.4.2   | Limite à flux imposé .....   | 760 |
| 16.4.3   | Condition de Fourier .....   | 763 |
| 16.4.4   | Condition de surface libre .....                                     | 764 |
| 16.4.5   | Condition de surface de suintement .....                             | 765 |
| 16.4.6   | Absence de condition aux limites .....                               | 766 |
| 16.5     | Les mesures piézométriques .....                                     | 766 |
| 16.5.1   | Principe et recommandations .....                                    | 766 |
| 16.5.1.1 | Principe .....   | 766 |
| 16.5.1.2 | Recommandations .....  | 767 |
| 16.5.2   | Les piézomètres à tube ouvert .....                                  | 768 |
| 16.5.2.1 | Technologie .....  | 768 |
| 16.5.2.2 | Temps de réponse et mesure piézométrique .....                       | 769 |
| 16.5.3   | Les capteurs de pression interstitielle .....                        | 770 |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 16.6     | Les mesures ponctuelles de perméabilité <i>in situ</i> .....                | 773 |
| 16.6.1   | L'essai de poche, ou essai Lefranc .....                                    | 774 |
| 16.6.1.1 | Principe de l'essai de poche .....  | 774 |
| 16.6.1.2 | Signification du régime permanent .....                                     | 775 |
| 16.6.1.3 | Facteur <i>m</i> de forme et de position .....                              | 776 |
| 16.6.1.4 | Application sur l'interprétation des mesures<br>en régime transitoire ..... | 777 |
| 16.6.2   | Essai Lefranc à débit nul en terrain de faible perméabilité ....            | 783 |
| 16.6.2.1 | Essai d'absorption après injection initiale .....                           | 783 |
| 16.6.2.2 | Essai de remontée après pompage initial .....                               | 784 |
| 16.6.3   | Le micromoulinet .....  | 784 |
| 16.6.3.1 | Circulations d'eau verticales dans un forage .....                          | 784 |
| 16.6.3.2 | Les mesures au micromoulinet<br>et leur interprétation .....                | 786 |
| 16.7     | Les essais de pompage et la diffusivité : introduction .....                | 788 |
| 16.7.1   | Cône de dépression et types d'essais .....                                  | 788 |
| 16.7.2   | Propriétés de l'équation de la diffusivité .....                            | 792 |
| 16.7.2.1 | Unicité de la solution et principe de superposition ..                      | 793 |
| 16.7.2.2 | Anisotropie et perméabilité isotrope équivalente ....                       | 793 |
| 16.7.2.3 | Écoulement parallèle en régime permanent .....                              | 794 |
| 16.8     | Solutions 2D en écoulement permanent radial .....                           | 794 |
| 16.8.1   | Puits dans une nappe captive : solution de Dupuit .....                     | 794 |
| 16.8.2   | Puits dans une nappe libre .....  | 796 |
| 16.8.3   | Couple de puits : principe des images .....                                 | 800 |
| 16.8.3.1 | Cas d'une limite rectiligne à potentiel imposé .....                        | 800 |
| 16.8.3.2 | Cas d'une limite rectiligne étanche ( <i>i.e.</i> à flux nul) .             | 802 |
| 16.9     | Courbe caractéristique d'un puits .....                                     | 803 |
| 16.9.1   | Mise en œuvre d'un essai de puits .....                                     | 803 |
| 16.9.2   | Exécution des paliers de débit .....  | 803 |
| 16.9.3   | Signification du rabattement et pertes de charge .....                      | 804 |
| 16.9.4   | Interprétation graphique de l'essai de puits .....                          | 806 |

---

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| 16.10     | L'essai de nappe .....  | 807 |
| 16.10.1   | Solution élémentaire en écoulement radial transitoire .....                                   | 807 |
| 16.10.1.1 | Introduction .....  | 807 |
| 16.10.1.2 | La solution de Theis .....  | 808 |
| 16.10.1.3 | L'approximation logarithmique de Jacob<br>pour les essais de longue durée .....               | 811 |
| 16.10.1.4 | Relation avec le régime permanent .....   | 812 |
| 16.10.1.5 | Application du principe de superposition .....  | 813 |
| 16.10.2   | Interprétation d'un essai de nappe ou essai de pompage .....                                  | 814 |
| 16.10.2.1 | Méthode de Jacob .....  | 815 |
| 16.10.2.2 | Formule de Theis complète : la méthode<br>d'identification .....                              | 817 |
| 16.10.2.3 | Interprétation de la courbe de remontée .....   | 819 |
| 16.10.2.4 | Bilan des résultats obtenus<br>par différentes méthodes .....                                 | 821 |
| 16.10.3   | Application : essai de nappe dans la plaine alluviale<br>de la Seine (méthode de Jacob) ..... | 826 |
| 16.11     | Mesure de la perméabilité à l'eau et à l'air en laboratoire .....                             | 834 |
| 16.11.1   | Perméabilité à l'eau des sols saturés .....   | 834 |
| 16.11.1.1 | Perméamètre à charge constante .....  | 834 |
| 16.11.1.2 | Perméamètre à charge variable .....   | 835 |
| 16.11.2   | Perméabilité à l'eau et à l'air des sols non saturés .....                                    | 836 |
| 16.12     | Mesure <i>in situ</i> de l'infiltration .....   | 839 |
| 16.12.1   | Méthodes de mesure de l'infiltration .....  | 840 |
| 16.12.2   | La méthode de Porchet .....   | 842 |
| 16.12.2.1 | Appareillage – Méthode à niveau constant .....  | 842 |
| 16.12.2.2 | Application : test de faisabilité d'un dispositif<br>d'assainissement non collectif .....     | 844 |
| 16.12.3   | Le perméamètre de Guelph .....  | 844 |
| 16.13     | Conclusions .....   | 850 |
| 16.14     | Références .....  | 850 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Chapitre 17 | Actions du sol sur un écran .....   | 855 |
| 17.1        | Équilibres limites de poussée et butée .....  | 856 |
| 17.1.1      | État initial .....  | 856 |
| 17.1.2      | Mobilisations des équilibres de poussée et de butée .....   | 857 |
| 17.1.2.1    | Équilibre de poussée .....  | 857 |
| 17.1.2.2    | Équilibre de butée .....  | 859 |
| 17.2        | Calculs des coefficients de poussée et de butée<br>d'un sol pesant .....  | 859 |
| 17.2.1      | Théorie de Coulomb .....  | 860 |
| 17.2.2      | Méthode de Rankine .....  | 862 |
| 17.2.2.1    | Cas général .....   | 863 |
| 17.2.2.2    | Cas particulier .....   | 865 |
| 17.2.3      | Méthode de Boussinesq .....   | 869 |
| 17.3        | Calculs des coefficients de poussée et butée<br>d'un sol non pesant .....                                       | 871 |
| 17.3.1      | Méthode de Rankine .....  | 871 |
| 17.3.2      | Équilibre généralisé de Prandtl .....   | 872 |
| 17.4        | Calculs des coefficients de poussée et de butée .....   | 874 |
| 17.5        | Calculs de la poussée et de la butée pour un sol frottant<br>et cohérent .....                                  | 878 |
| 17.6        | Choix de l'angle de frottement sol-écran .....  | 879 |
| 17.7        | Application au calcul de la poussée d'un terrain surmonté<br>d'un talus semi-infini sur un écran vertical ..... | 880 |
| 17.7.1      | Méthode de Coulomb .....  | 881 |
| 17.7.2      | Méthode de Rankine .....  | 883 |
| 17.7.3      | Méthode de Boussinesq – tables de Caquot, Kérisel, Absi .....   | 884 |
| 17.8        | Calculs de la poussée et de la butée pour un talus<br>de géométrie quelconque .....                             | 885 |
| 17.8.1      | Cas simples .....   | 885 |

---

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| 17.8.2    | Cas complexes .....  | 886 |
| 17.8.3    | Application .....  | 887 |
| 17.9      | Dispositions particulières de surcharges .....   | 889 |
| 17.9.1    | Solution en élasticité linéaire .....  | 889 |
| 17.9.2    | Solution en plasticité .....   | 892 |
| 17.9.2.1  | Surcharge semi-infinie limitée sur un plan<br>horizontal .....   | 892 |
| 17.9.2.2  | Surcharge linéaire .....   | 892 |
| 17.9.2.3  | Surcharges locales .....   | 893 |
| 17.10     | Cas d'un multicouche .....   | 895 |
| 17.11     | Applications de la poussée sur un mur<br>de soutènement .....  | 895 |
| 17.11.1   | Remblai monocouche non cohérent .....  | 896 |
| 17.11.1.1 | Poussée due au remblai .....   | 896 |
| 17.11.1.2 | Poussée due à la surcharge .....   | 897 |
| 17.11.2   | Remblai monocouche frottant et cohérent .....  | 897 |
| 17.11.3   | Remblai bicouche frottant et cohérent .....  | 898 |
| 17.12     | Influence de la pression interstitielle $u$ .....  | 900 |
| 17.12.1   | Application au mur de soutènement, nappe statique .....  | 900 |
| 17.12.1.1 | Poussée due aux grains .....   | 901 |
| 17.12.1.2 | Poussée due à l'eau .....  | 902 |
| 17.12.1.3 | Poussée due à la surcharge .....   | 902 |
| 17.12.1.4 | Bilan de la poussée du remblai sans<br>et avec nappe .....   | 902 |
| 17.12.2   | Application de calculs de poussée et butée d'un massif<br>de sol soumis à un écoulement sur un écran ..... | 903 |
| 17.13     | Références .....   | 908 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Chapitre 18 | Mouvements de terrain et stabilité des pentes .....                                   | 911 |
| 18.1        | Description des mouvements de terrain .....   | 911 |
| 18.1.1      | Facteurs d'instabilité .....  | 912 |
| 18.1.2      | Classements des mouvements de terrain .....   | 912 |
| 18.1.3      | Affaissements et effondrements .....  | 912 |
| 18.1.3.1    | Anciennes carrières de la région parisienne .....                                     | 914 |
| 18.1.3.2    | Recherche et localisation des marnières en Haute-Normandie .....                      | 914 |
| 18.1.4      | Les écroulements rocheux .....  | 917 |
| 18.1.5      | Le fluage des terrains .....  | 919 |
| 18.1.6      | Les coulées boueuses et les laves torrentielles .....                                 | 919 |
| 18.1.7      | Les glissements .....   | 920 |
| 18.2        | Méthodes de calcul de stabilité des massifs de sol .....                              | 922 |
| 18.2.1      | Différentes méthodes .....  | 922 |
| 18.2.2      | Définition du critère de rupture .....  | 923 |
| 18.2.3      | Définition du coefficient de sécurité .....   | 923 |
| 18.2.3.1    | Coefficient de sécurité global .....  | 923 |
| 18.2.3.2    | Coefficients de sécurité partiels .....   | 924 |
| 18.2.4      | Détermination de la géométrie de la rupture .....                                     | 925 |
| 18.3        | Calculs à l'équilibre limite .....  | 926 |
| 18.3.1      | Glissements plans avec ou sans écoulement .....                                       | 926 |
| 18.3.1.1    | Sol frottant, non cohérent, sans nappe .....  | 930 |
| 18.3.1.2    | Sol frottant et cohérent, sans nappe .....  | 930 |
| 18.3.1.3    | Sol frottant, non cohérent, nappe affleurante en écoulement .....                     | 931 |
| 18.3.1.4    | Applications .....  | 931 |
| 18.3.2      | Calculs des glissements de surfaces quelconques .....                                 | 932 |
| 18.3.2.1    | Équation générale du problème de stabilité au glissement (méthode des tranches) ..... | 932 |
| 18.3.2.2    | Méthode de Fellenius (1927) .....   | 934 |

---

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| 18.3.2.3 | Méthode de Bishop simplifiée (1954) .....   | 935 |
| 18.3.2.4 | Méthode des perturbations (1974) .....  | 937 |
| 18.3.2.5 | Choix des valeurs de $\sigma_0$ et $v$ .....  | 938 |
| 18.3.2.6 | Conclusions .....   | 938 |
| 18.4     | Calcul à la rupture .....   | 939 |
| 18.4.1   | Présentation du calcul à la rupture .....   | 939 |
| 18.4.1.1 | Comportement élastique linéaire,<br>parfaitement plastique .....                          | 940 |
| 18.4.1.2 | Comportement élastique linéaire, fragile .....  | 941 |
| 18.4.2   | Approche du calcul à la rupture .....   | 942 |
| 18.4.2.1 | Approche statique par l'intérieur .....   | 942 |
| 18.4.2.2 | Approche cinématique par l'extérieur .....  | 943 |
| 18.4.2.3 | Application de calculs sur ordinateur .....   | 945 |
| 18.5     | Méthode de calcul aux éléments finis .....  | 947 |
| 18.6     | Résolution de cas simples par abaques .....   | 948 |
| 18.6.1   | Abaque de Biarez .....  | 948 |
| 18.6.2   | Abaques de Chen .....   | 950 |
| 18.7     | Remblais sur sols compressibles .....   | 954 |
| 18.7.1   | Types de rupture .....  | 954 |
| 18.7.1.1 | Rupture par poinçonnement .....   | 955 |
| 18.7.1.2 | Rupture rotationnelle .....   | 955 |
| 18.7.2   | Caractéristiques nécessaires aux calculs de stabilité .....                               | 956 |
| 18.7.3   | Vérifications vis-à-vis du poinçonnement .....  | 958 |
| 18.7.4   | Vérifications vis-à-vis de la rupture rotationnelle .....                                 | 960 |
| 18.7.4.1 | Vérification par abaques dans les cas simples .....                                       | 960 |
| 18.7.4.2 | Vérifications par logiciels dans les cas courants<br>et complexes .....                   | 963 |
| 18.8     | Analyse de la stabilité des pentes des sols non saturés .....                             | 968 |
| 18.8.1   | Critère avec prise en compte de l'effet de la succion<br>dans la cohésion .....           | 968 |
| 18.8.2   | Critère avec prise en compte de l'effet de la succion<br>dans la contrainte normale ..... | 969 |

|          |                                     |     |
|----------|-------------------------------------|-----|
| 18.8.3   | Analyse en régime permanent .....   | 969 |
| 18.8.4   | Analyse en régime transitoire ..... | 970 |
| 18.8.4.1 | Méthode couplée .....               | 970 |
| 18.8.4.2 | Méthode non couplée .....           | 970 |
| 18.9     | Références .....                    | 972 |
|          | Index .....                         | 975 |
|          | Table des matières .....            | 983 |

Achévé d'imprimer sur les presses de Jouve à Mayenne  
N° d'imprimeur : 2620625H  
Dépôt légal : septembre 2017

*Imprimé en France*

# Théorie et pratique de la géotechnique

Tome 1

Avant de concevoir et dimensionner les ouvrages liés au sol ou souterrains, un ensemble de connaissances en géosciences est indispensable pour établir un modèle géotechnique.

L'objectif de ce livre est de fournir les outils pour élaborer ce modèle. Avec celui-ci, les professionnels peuvent ensuite aborder la conception, le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

L'analyse débute par les études géologiques et hydrogéologiques nécessaires à la description et à la compréhension d'un site naturel sur lequel insérer un ouvrage. Ensuite, les reconnaissances géophysiques et géologiques permettent d'identifier les sols, de les classer et d'aboutir à l'élaboration d'un modèle géologique et hydrogéologique. Puis la mécanique des sols traite des sols saturés mais également des sols non saturés et analyse les principales lois de comportement utilisées par les professionnels. Les essais en laboratoire et *in situ*, décrits dans l'ouvrage, déterminent les paramètres de ces lois.

Les bases complètes pour dimensionner tout type de soutènement sont exposées, puis sont fournis les outils nécessaires pour vérifier la stabilité générale de tous les ouvrages et les éléments permettant le dimensionnement de la stabilité des sols renforcés. De nombreuses applications, souvent complétées par des calculs utilisant la méthode aux éléments finis, sont proposées pour mettre en pratique les théories qui sont développées.

Cette nouvelle édition prend en compte l'évolution de la pratique géotechnique, des normes, en particulier de la norme NF P 94-500 sur les missions d'ingénierie géotechnique.

Ce traité s'adresse aussi bien aux géotechniciens des bureaux d'études et des entreprises souhaitant maîtriser et optimiser la géotechnique qu'aux étudiants et élèves-ingénieurs désirant s'initier à la théorie et à la pratique de la géotechnique.

Claude Plumelle a assuré la direction de l'ouvrage. Ont participé à la rédaction :

**Yu Jun Cui**, professeur à l'école des Ponts ParisTech (ENPC).

**Denis Fabre**, professeur à la chaire de géotechnique du Cnam.

**Olivier Fouché**, maître de conférences à la chaire de géotechnique du Cnam.

**Alain Hirschauer**, expert judiciaire.

**Claude Plumelle**, professeur honoraire du Cnam.

**Alain Tabbagh**, professeur émérite à l'université Sorbonne Université.

## Sommaire

- ▶ Géologie des sols
- ▶ Hydrologie et niveaux d'eau dans le sol
- ▶ Reconnaissance géophysique
- ▶ Reconnaissance géologique
- ▶ Identification et classification des sols
- ▶ Déplacements et déformations des massifs de sol
- ▶ Contraintes dans les massifs de sols
- ▶ Consolidation et fluage des sols
- ▶ Généralités sur les lois de comportement des sols
- ▶ Lois de comportement élastique  
– parfaitement plastique et modèle hyperbolique
- ▶ Lois élastoplastiques avec écrouissage de Cam-Clay
- ▶ Comportement des sols non saturés
- ▶ Hydraulique des sols
- ▶ Essais de laboratoire
- ▶ Essais *in situ*
- ▶ Aquifères, nappes et essais d'eau
- ▶ Actions du sol sur un écran
- ▶ Mouvements de terrain et stabilité des pentes

EXPERTISE  
TECHNIQUE

EDITIONS

LE MONITEUR

Photographie de couverture  
© Stocksolutions – Fotolia.com

ISSN 2262-5089

ISBN 978-2-281-14026-2



9 782281 140262