

Yves Berthaud  
Patrick de Buhan  
Nicolas Schmitt

L'USINE NOUVELLE

**Aide-mémoire**

**Mécanique des sols**

**Concepts • Applications**



531-15.1

DUNOD

# A

---

## Conception des ouvrages et reconnaissance des terrains

<b>1 • Méthodologie pour le dimensionnement d'un ouvrage</b>	<b>9</b>
1.1 Approche de la sécurité des constructions	9
1.2 Classement d'un ouvrage géotechnique	12
1.3 Données géotechniques	14
1.4 Documents contractuels	16
1.5 Méthodologie d'une étude de sol	16
<b>2 • Techniques de reconnaissance des terrains</b>	<b>19</b>
2.1 Les essais géophysiques	19
2.2 Les essais in situ pour caractériser le comportement mécanique	24
2.3 Essais in situ et comportement hydraulique	46
2.4 Les essais de mesure in-situ et de surveillance	49

## B

### Caractéristiques des sols et des roches

3 • Minéraux de base des sols	55
3.1 Définition	55
3.2 Caractéristiques des minéraux	56
4 • Les argiles	61
4.1 Structure cristalline des feuilletés	61
4.2 Types d'argiles	62
5 • Description et classification des sols	67
5.1 Paramètres globaux du sol	68
5.2 Caractéristiques des grains du sol sec	72
5.3 Comportement des sols fins en présence d'eau	76
5.4 Classification des sols adoptée par le LCPC	80
5.5 Études de cas	83

## C

### Éléments de mécanique des sols, vus comme des milieux continus

6 • Déformations d'un sol en tant que milieu continu	89
6.1 Généralités	89
6.2 Le cas de la transformation infinitésimale	90
6.3 Interprétation des composantes de la déformation	91
6.4 Variations de volume, porosité et indice des vides	92
6.5 Description par les vitesses	94
6.6 Étude de cas	95

7 • Contraintes dans un sol	99
7.1 Tenseur des contraintes de Cauchy	99
7.2 Représentation de Mohr des contraintes	101
7.3 Quelques états de contrainte remarquables	102
7.4 Équilibre ; champs de contrainte statiquement admissibles	105
7.5 Le Principe des Puissances Virtuelles (PPV)	108
8 • Comportement élastique des sols	111
8.1 Comportement élastique isotrope en transformation infinitésimale	111
8.2 Problème d'élasticité HPP	112
8.3 Exemples	114
9 • Comportement élasto-plastique	119
9.1 Critère de plasticité et fonction de charge	119
9.2 Règle d'écoulement plastique et formulation en vitesse de la loi de comportement	122
9.3 Résolution des problèmes de plasticité	124

## D

### Comportement hydro-mécanique des sols

10 • Comportement hydraulique du sol	131
10.1 Équations de conservation de la masse	132
10.2 Écriture lagrangienne de la conservation de la masse fluide	134
10.3 Perméabilité, loi de Darcy	136
10.4 Écoulement dans un massif saturé	142
10.5 Écoulements en régime permanent	144
10.6 Force liée à l'écoulement	146
11 • Comportement mécanique des sols fins saturés	149
11.1 Approche physique du comportement d'un milieu poreux	150

11.2	Poroélasticité	152
11.3	Compressibilité des sols fins saturés	156
11.4	Consolidation bidimensionnelle	168

## E

### Approche expérimentale du comportement hydro-mécanique des sols

<b>12</b>	<b>États de contraintes dans un sol</b>	<b>173</b>
<b>13</b>	<b>Comportement des sols cohérents secs</b>	<b>177</b>
13.1	Caractérisation du comportement en compression simple	177
13.2	Caractérisation du comportement en traction	179
<b>14</b>	<b>Comportement des sols peu ou non cohérents</b>	<b>181</b>
14.1	Comportement sous un chargement de type œdométrique	181
14.2	Comportement en cisaillement direct	184
14.3	Caractérisation du comportement triaxial	186
<b>15</b>	<b>Comportement des sols en présence d'eau</b>	<b>193</b>
15.1	Comportement au cisaillement des sols fins saturés	194
15.2	Comportement œdométrique	201

## F

### Un exemple de modèle de comportement : Cam Clay

<b>16</b>	<b>Modèle de Cam Clay</b>	<b>205</b>
16.1	Définition, hypothèses	205
16.2	Lois d'évolution	211
16.3	Réponse du modèle de Cam Clay	213

## G

### Théorie du calcul à la rupture appliquée à la mécanique des sols

<b>17</b>	<b>Principe du raisonnement du calcul à la rupture : un exemple illustratif</b>	<b>223</b>
<b>18</b>	<b>De l'analyse limite au calcul à la rupture</b>	<b>227</b>
<b>19</b>	<b>Théorie du calcul à la rupture : approche statique par l'intérieur</b>	<b>231</b>
19.1	Analyse de stabilité d'un talus vertical en sol purement cohérent	231
19.2	Position du problème de calcul à la rupture ; notion de facteur de stabilité de l'ouvrage	234
19.3	Approche statique par l'intérieur	235
<b>20</b>	<b>L'approche cinématique par l'extérieur du calcul à la rupture</b>	<b>239</b>
20.1	Approche cinématique : notion de puissance résistante maximale	240
20.2	Première mise en œuvre : mécanisme de « bloc en translation »	241
20.3	Amélioration de l'approche cinématique : les mécanismes de « bloc en rotation »	244
<b>21</b>	<b>Le cas des sols frottants</b>	<b>247</b>
21.1	Facteur de stabilité et approche statique par l'intérieur	248
21.2	Obtention d'un majorant par l'approche cinématique par l'extérieur	249
21.3	Approche cinématique à l'aide de mécanismes par « blocs en rotation »	253

## H

### Stabilité des pentes et talus

<b>22» Les approches classiques</b>	<b>257</b>
22.1 Cas du sol purement cohérent	258
22.2 Cas du sol frottant : la « méthode des tranches »	260
<b>23» Analyse par le calcul à la rupture de la stabilité des pentes : l'approche statique par l'extérieur</b>	<b>263</b>
<b>24» Mise en œuvre pratique</b>	<b>269</b>
24.1 Cas d'un sol multicouche	269
24.2 Prise en compte de surcharges et d'un écoulement hydraulique	269
24.3 Introduction de renforcements	270
<b>25» En conclusion</b>	<b>275</b>

## I

### Capacité portante des fondations superficielles

<b>26» Introduction</b>	<b>279</b>
<b>27» Étude de cas : Analyse de la capacité portante d'un massif en sol purement cohérent</b>	<b>281</b>
27.1 Approches statiques par l'intérieur	282
27.2 Approches cinématiques par l'extérieur	285
27.3 Prise en compte de la pesanteur	289
27.4 Généralisation	290

## J

### Calculs de poussée et de butée

<b>28» Introduction</b>	<b>295</b>
<b>29» Coefficients de poussée et de butée d'un sol sur une paroi : l'exemple d'un massif de sol pulvérulent</b>	<b>297</b>
29.1 Paramètres de chargement du système	298
29.2 Approche statique par l'intérieur	299
29.3 Approche cinématique par l'extérieur	301
29.4 Commentaires	303
<b>Bibliographie</b>	<b>305</b>
<b>Index</b>	<b>309</b>

# INTRODUCTION

---

La géotechnique regroupe l'ensemble des sciences appliquées et des techniques en relation avec les sols et les terrains sur lesquels l'ingénieur de Génie Civil s'appuie pour construire les ouvrages du Bâtiment et des Travaux Publics. Ce vaste domaine comprend diverses disciplines :

- **La géologie.** Elle est nécessaire pour évaluer la nature du terrain sur lequel les ouvrages sont construits, et revêt une importance particulière dans le cas des ouvrages d'art, des tunnels, des bâtiments de grande hauteur car les charges transmises se diffusent dans le sol sur une zone étendue.
- **La mécanique des solides et des fluides.** Celle-ci est indispensable pour déterminer les actions transmises par les ouvrages au terrain, les contraintes mécaniques dans le sol générées par ces actions et s'assurer ainsi que le sol reprenne ces actions dans de bonnes conditions.
- **La topographie.** Elle définit une représentation de la géométrie du terrain sur lequel l'ouvrage sera construit.
- **La chimie.** Science mineure dans le cas de la construction des ouvrages courants (petits bâtiments), elle est très présente dans le cas des ouvrages importants. Elle est nécessaire pour évaluer l'évolution du terrain en présence d'un environnement qui parfois peut être agressif pour le sol (par exemple dissolution de roche due à la modification de l'écoulement de l'eau dans les terrains suite à la construction d'un ouvrage).
- **Les techniques des travaux et de construction.** Elles regroupent l'ensemble des outils d'ingénierie qui permettent de choisir les solutions technologiques mises en oeuvre pour assurer la stabilité et la pérennité des ouvrages, sur la base de critères technologiques et financiers.

La conception de l'ancrage d'un ouvrage dans l'environnement géologique pose souvent davantage de problèmes que la conception de l'ouvrage même, en raison des spécificités de la géotechnique. On ne dispose en général que d'une connaissance partielle (ou imparfaite) du terrain et des actions qu'exerce l'ouvrage sur le sol, ou de l'évolution future de la configuration du terrain (s. ex., construction d'autres ouvrages à proximité).

Tra ailleurs, il n'est souvent pas possible (ou nécessaire) d'utiliser toute la panoplie des outils que les sciences appliquées mettent aujourd'hui à notre disposition pour dimensionner les ouvrages, pour les raisons évoquées précédemment ou simplement parce que l'importance de l'ouvrage ne le justifie pas. Néanmoins, le concepteur doit trouver des réponses à certaines interrogations soit en phase de dimensionnement de l'ouvrage, soit lors de la vérification.

#### – Phase de dimensionnement

- Comment reporter les charges d'une structure sur le terrain (ou réciproquement) par l'intermédiaire d'une interface qui garantit la stabilité mécanique de l'ouvrage dans le temps (fondation, tunnel) ?
- Quelles actions exercent le sol sur l'ouvrage (tranchées, murs de soutènement) ?
- Comment réaliser des terrassements qui offrent toutes les garanties de stabilité dans le temps sur lesquels on pourra construire des ouvrages ?

#### – Phase de vérification

- La transmission des charges entre structure et terrain est-elle assurée en garantissant la stabilité mécanique de l'ouvrage et sa tenue dans le temps ?
- Quels outils utiliser pour faire ces vérifications ?

Répondre à ces interrogations suppose que l'on dispose de compétences à différents stades de l'étude géotechnique :

- de nature naturaliste : il faut savoir reconnaître le sol et les terrains ;
- d'expérimenteur : il faut connaître et mettre en oeuvre les essais pour caractériser le sols ;

- de mécanique : il faut maîtriser les outils de la mécanique des milieux continus afin des déterminer les sollicitations sur le sol et l'ouvrage et vérifier que le sol et l'ouvrage restent stables ;
- en technique de construction et organisation de chantier : indispensable pour proposer des solutions économiquement viables et choisir celle qui est la plus appropriée.

On mesure donc ici l'étendue très vaste de compétences qu'un géotechnicien doit acquérir pour devenir opérationnel, et qui lui permet ensuite d'exercer un métier passionnant aux multiples facettes.

Ce livre n'a pas pour ambition de couvrir tous ces champs disciplinaires. Une littérature déjà riche de nombreux ouvrages éprouvés permet au futur géotechnicien de se former de manière efficace.

Ce livre s'inscrit dans une démarche différente. Il se focalise sur l'aspect mécanique des sols et des structures. En effet, à travers leur expérience d'enseignant les auteurs ont pris conscience de la difficulté de proposer un formalisme unifié du dimensionnement des ouvrages. De grands noms sont associés à certaines méthodes de calcul. Parfois plusieurs méthodes coexistent pour dimensionner un ouvrage (p. ex., mur de soutènement), sans qu'il soit toujours possible de justifier que telle méthode ou telle autre est meilleure. Elles sont alors davantage perçues comme des recettes de cuisine que comme des méthodes rigoureuses. Le législateur lui-même n'a visiblement pas souhaité prendre partie dans certains cas. Une des raisons de cet état provient sans doute du fait que ces méthodes ne sont pas inscrites dans les dernières avancées scientifiques de la mécanique, mais restent confidentielles, réservées à la communauté scientifique qui travaille sur ces sujets.

Les auteurs considèrent que les conditions sont aujourd'hui réunies pour proposer un ouvrage de mécanique des sols, accessible à un niveau licence, master ou ingénieur qui organise certains de ces concepts pour en faire une présentation unifiée. Les outils numériques dont l'usage se développent devraient faciliter ce travail d'appropriation et achever de convaincre les lecteurs d'utiliser des concepts et des méthodes plus modernes pour dimensionner les ouvrages.

L'ouvrage est décomposé en grandes parties :

- *Introduction* pour expliquer sommairement le contexte d'une étude géotechnique et les essais de reconnaissance in situ qui fournissent des données sur le sol.
- *Caractérisation des sols et des roches* qui permet de décrire un sol et de donner les paramètres classiques utiles par la suite.
- *Éléments de mécanique des sols, vis comme des milieux continus* avec les rappels essentiels pour la compréhension de la suite et quelques informations sur la résolution d'un problème d'élasticité et d'élasto-plasticité.
- *Comportement hydro mécanique des sols*, dans lequel nous présentons l'hydraulique des matériaux et des sols, mais aussi la poroélasticité support de la notion de contrainte effective avec les applications classiques de consolidation.
- *Approche expérimentale du comportement hydro mécanique des sols* qui présente les essais classiques de laboratoire et les traits essentiels du comportement des matériaux.
- *Lois de comportement*, partie consacrée essentiellement à la présentation du modèle de Cam Clay devenu une référence pour les sols et qui s'inscrit dans un cadre conceptuel bien connu.
- *Théorie du calcul à la rupture* avec un exemple permettant de comprendre les concepts et des applications qui illustrent les différentes approches présentées, statique par l'intérieur et cinématique par l'extérieur.
- *Stabilité des pentes et talus* qui constitue un problème classique traité usuellement par des méthodes approchées mises en défaut dans de nombreux cas concrets. Le calcul à la rupture permet alors un traitement unifié et rigoureux des problèmes concrets de l'ingénieur.
- *Capacité portante des fondations superficielles* qui constitue une autre application naturelle du calcul à la rupture avec les deux approches statique et/ou cinématique qui permettent d'encadrer la solution.
- *Calculs de poussée butée* notions de base abordées ici comme conséquence immédiate d'une vision calcul à la rupture.

Le lecteur connaissant déjà la mécanique des sols et des ouvrages sera peut-être étonné de ne pas trouver le calcul des fondations profondes ou d'autres aspects importants pour le dimensionnement. Le choix fait a été de conserver ce qui autorise un traitement unifié et cohérent et donc d'éliminer ce qui résulte d'une pratique codifiée. Nous renvoyons le lecteur à tous les ouvrages ou documents techniques qui existent.

Conception  
des ouvrages  
et reconnaissance  
des terrains