

Recension de l'ouvrage «Mécanique des sols et des roches» par Laurent Vulliet, Lyesse Laloui et Jian Zhao

Jean-Louis Durville¹ · Jean-Alain Fleurisson¹  · Véronique Merrien-Soukatchoff¹

Received: 28 January 2017 / Accepted: 31 January 2017
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2017

L'ouvrage «Mécanique des sols et des roches» publié par les Presses Polytechniques et Universitaires Romandes en 2016, comportant 603 pages, traite des définitions et principes de base, y compris écoulements souterrains et transferts de chaleur, des méthodes d'étude et des applications aux fondations, soutènements, pentes instables et cavités souterraines. Il constitue le volume 18 du *Traité de Génie Civil de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*, ce qui explique que les questions de fondations, de soutènements et de travaux souterrains ne sont que sommairement abordées puisque deux autres volumes de ce *Traité* leur sont consacrés.

Les auteurs sont trois professeurs renommés de l'EPFL qui ont associé leurs compétences dans différents domaines de la mécanique des sols et des roches et de leurs applications au génie civil pour rédiger cet ouvrage de synthèse.

Les principaux volets de la mécanique des sols et des roches sont remarquablement présentés, ce qui constitue un tour de force s'agissant d'un champ aussi vaste. Notons que ce n'est pas un traité de géotechnique, par exemple le suivi instrumental des sites n'est pas abordé: c'est essentiellement de mécanique qu'il s'agit, comme l'indique le titre.

Après un agréable premier chapitre retraçant l'histoire de la discipline, depuis l'Antiquité jusqu'aux principaux développements actuels, le chapitre 2 (64 p.) présente les caractéristiques minéralogiques, pétrographiques, structurales et géotechniques des matériaux, c'est-à-dire les sols et les roches. Il est rédigé de façon très claire, passant des minéraux aux roches et aux discontinuités des massifs qui

sont largement traitées, puis à la description et à la caractérisation minéralogique, pétro-physique et géotechnique des sols. Le géologue sera un peu frustré par certains raccourcis: le paragraphe sur les roches sédimentaires se limite quasiment aux roches détritiques et le terme de *marne* n'est pas cité; dans le court paragraphe sur les plis, il est considéré que ceux-ci sont souvent associés à des roches faibles et tendres. Les sols et leurs propriétés sont largement détaillés, avec un paragraphe original sur la gélivité des sols. Notons que les auteurs n'ont pas repris la distinction classique entre paramètres de nature et paramètres d'état. Il est curieux que la masse volumique et la porosité ne soient définies que dans la partie sur les sols, et la mesure directe de la porosité n'est donc pas abordée. Des photos d'affleurements, d'échantillons et de lames minces complètent judicieusement le texte. Un regret: la distinction entre roche et sol avec un développement sur les SIRT (sols indurés et roches tendres) aurait pu trouver place dans ce chapitre.

Le chapitre 3 développe en 39 pages la reconnaissance des sites. Le lecteur approuvera sans réserve l'introduction insistant sur l'importance et la progressivité des reconnaissances, avant que soient abordées les différentes techniques, à commencer par la récolte des données existantes souvent négligée, et l'examen visuel du site associé à des entretiens avec les parties concernées par le projet. Sont ensuite décrites les méthodes géophysiques, les forages de reconnaissance avec prises d'échantillons, mesures des paramètres de forage et caméra de forage. C'est évidemment une gageure de vouloir présenter en un si petit nombre de pages l'ensemble des techniques et l'on regrettera, entre autres, que des exemples de panneaux électriques ou de tomographies sismiques ne soient pas présentés. De même, le géologue pourra trouver que l'utilisation de photographies aériennes multi-dates aurait

✉ Jean-Alain Fleurisson
jean-alain.fleurisson@mines-paristech.fr

¹ Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'Environnement, Paris, France

pu être mentionnée et illustrée, ainsi que celle du lidar pour l'établissement d'un MNT très précis. Il est appréciable que la partie concernant les forages fasse référence à l'eurocode 7 pour la qualité des prélèvements d'échantillons et qu'un modèle de log de forage avec enregistrement de paramètres soit donné. Le paragraphe sur la campagne piézométrique est fort bienvenu. Enfin, les auteurs ne se contentent pas d'évoquer successivement chaque méthode; ils rappellent l'importance de la synthèse des reconnaissances, sous forme d'un profil ou modèle 3D et d'un rapport de reconnaissance des terrains, en référence, là aussi, à l'eurocode 7.

Le chapitre 4, intitulé écoulements souterrains, comporte 68 pages. Si l'on peut regretter l'absence d'un paragraphe sur l'hydrogéologie, avec au moins distinction entre nappe libre et nappe captive, la loi de Darcy et les équations de l'écoulement en milieu isotrope ou anisotrope sont clairement exposées. La science de l'hydraulique des sols est complétée par des développements sur la consolidation, sur les milieux poreux non saturés et sur les essais de pompage en régime permanent ou transitoire ainsi que sur la mesure de perméabilité en laboratoire. L'hydraulique des massifs rocheux n'est malheureusement pas abordée.

Le chapitre 5, qui traite en 18 pages des contraintes effectives et des interactions hydro-mécaniques, est de caractère théorique. Il insiste à juste titre en préambule sur la nécessité de raisonner à l'échelle du Volume Élémentaire Représentatif. Il présente une discussion approfondie de la notion de contrainte effective, mettant en lumière que la loi de Terzaghi est une approximation valable lorsque la déformabilité du squelette solide est bien supérieure à celle de la matière solide et du fluide. Il est montré ensuite comment définir la contrainte effective dans les matériaux à pression interstitielle négative. Les équations de la mécanique des milieux poreux sont clairement présentées, avec une application à la consolidation de Biot - et à l'approximation de Terzaghi - et une introduction au cas des milieux à deux phases fluides.

Le chapitre 6 (16 pages) relatif aux transferts de la chaleur dans les sols et les roches débute opportunément par des considérations sur les variations de températures dans les terrains. Il est question de leur effet sur le module «résilient» sans que ce terme soit défini. Les principaux modes de transfert thermique (conduction, rayonnement, diffusion de vapeur et convection) et les paramètres associés sont clairement décrits. Un paragraphe relatif à leurs mesures au laboratoire et in situ conclut de manière judicieuse ce chapitre. Dans le reste de l'ouvrage, rien n'est cependant mentionné sur le comportement thermomécanique des terrains.

Le chapitre 7 (36 pages) est consacré à la dynamique des sols et des roches. Il présente dans un premier temps les différentes natures de charges dynamiques (séismes,

vibrations dues aux activités humaines, et explosions mais principalement dans l'air). La distinction entre magnitude et intensité des séismes est clairement établie dans le texte, mais le tableau de correspondance entre ces deux grandeurs peut engendrer une certaine confusion. Les équations de propagation des différents types d'ondes (planes, cylindriques et sphériques) sont ensuite rappelées et les notions d'amortissement, d'atténuation et d'amplification sont définies. Le chapitre se poursuit par des applications à la propagation des ondes dans les sols (secs, partiellement ou totalement saturés) et dans les massifs rocheux avec les problématiques des transmissions d'ondes au travers des interfaces et des discontinuités. Il se termine par des notions sur les propriétés et critères de rupture dynamiques des roches, des discontinuités et des massifs rocheux, ainsi que des rappels sur le comportement dynamique des sols en distinguant l'évolution des paramètres mécaniques du solide, de celle des pressions interstitielles, pour conclure sur les phénomènes de liquéfaction. Si ce chapitre présente un panorama complet des phénomènes dynamiques des sols et des roches, il se limite nécessairement à des considérations théoriques générales en raison de la complexité des phénomènes physiques étudiés, et il sera donc plus utile au modélisateur qu'au praticien.

Le chapitre 8, 60 pages, traite des lois de comportement mécanique et de la modélisation. Les auteurs font montre ici de toute leur compétence. Sont abordés successivement les lois de l'élasticité (linéaire et non linéaire) ainsi que la plasticité et les différents critères de plasticité sans écrouissage habituellement utilisés en mécanique des sols (Von Mises, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb), des roches (Hoek-Brown) et des massifs rocheux (Hoek-Brown généralisé). Des ordres de grandeur de paramètres mécaniques de sols et de roches constituent un apport pratique pour le lecteur. Des modèles plus complexes avec écrouissage (Cam-Clay) ainsi que le comportement en fonction du temps (viscosité, fluage) sont également traités. Le chapitre se termine par le comportement mécanique des discontinuités rocheuses en présentant clairement le rôle de la rugosité des épontes et du degré du niveau de contrainte. La terminologie adoptée pour les angles de frottement (angles de frottement effectif, de base, résiduel, de friction net apparent...) est déroutante.

Les chapitres 9 et 10, totalisant 90 pages à eux deux, sont consacrés aux essais mécaniques, respectivement au laboratoire et in situ. Il est bienvenu de distinguer dès l'abord les valeurs mesurées lors de l'essai et les valeurs dérivées, notamment celles qu'il faudra prendre en compte dans un dimensionnement. Les principaux essais sont fort bien décrits et commentés, qu'il s'agisse de sol ou de roche - même si, sous la rubrique «dilatomètre», on ne trouve que le dilatomètre Marchetti.

L'important sujet des classifications est traité dans les 18 pages du chapitre 11. La partie sur les sols est tout à fait classique, avec une présentation de la norme suisse, conforme aux standards internationaux. Le tableau de l'aide à la dénomination des roches est repris de la norme ISO 14689-1: certes c'est un outil commode pour les ingénieurs; peut-être aurait-il fallu rappeler qu'il comporte des approximations renforcées par une version française parfois malheureuse (par ex. s'agissant du terme «saccharoïde» attribué aux conglomérats et aux brèches) et que le recours à un géologue est recommandé, voire nécessaire. Les classifications des massifs rocheux (les auteurs auraient pu être ici plus nets sur la distinction entre roche et massif rocheux), RMR, Q, GSI, sont clairement présentées avec, ce qui n'est pas courant, des exemples d'application. On peut regretter qu'il n'y ait pas de commentaires insistant sur les précautions d'usage de ces classifications de massifs rocheux et sur l'utilisation des relations directes entre les paramètres de ces classifications et les caractéristiques mécaniques du massif rocheux, ainsi que sur la nécessité de confronter ces approches à des résultats de mesures in situ.

Le chapitre 12 sur les fondations comporte 30 pages consacrées aux fondations dans les sols uniquement. La théorie des fondations superficielles ou profondes est parfaitement présentée: répartition des contraintes sous la fondation, tassement, capacité portante évaluée à partir des caractéristiques c et φ , du pressiomètre, du pénétromètre statique ou d'essais de chargement de pieux.

Le chapitre 13 relatif aux pressions sur les soutènements comporte 21 pages et présente les méthodes classiquement utilisées: calculs de poussée, butée, méthode du coefficient de réaction ainsi qu'un paragraphe relatif aux calculs éléments finis et un autre sur l'interaction hydraulique.

Le chapitre 14 sur la stabilité des pentes est particulièrement développé avec 47 pages. Les typologies d'instabilités de pente sont inspirées des classifications existantes sans pour autant les citer. Le chapitre reprend ensuite les méthodes classiques de calcul de facteur de sécurité pour évaluer le degré de stabilité des pentes avec ou sans eau: pente infinie homogène, méthode des tranches dans les sols cohésifs (Bishop, Janbu, Morgenstern-Price), méthode des perturbations et du calcul à la rupture. On aurait souhaité que soient évoqués les cas où la géologie complexe ne permet pas de se rattacher à ces cas simples. Les calculs en déformation sont présentés rapidement. Le cas des instabilités de falaises rocheuses est succinctement abordé à travers les mécanismes de rupture élémentaires. Les chutes de blocs et la trajectographie font l'objet d'un court dernier paragraphe. Notons qu'un ouvrage francophone uniquement consacré aux mouvements de pentes est prévu dans le Traité de Génie Civil du même éditeur.

Le chapitre 15 évoquant les cavités souterraines est extrêmement succinct (10 pages). Il expose le calcul d'une galerie circulaire en élasticité et explique très clairement la méthode convergence-confinement. Il faudra attendre le volume 20 du Traité de Génie Civil relatif aux ouvrages et travaux souterrains pour compléter ce sujet.

Les schémas et graphiques sont d'excellente qualité, les photos en noir et blanc ou en couleurs sont très nombreuses. La mise en page permet une lecture facile et agréable de l'ensemble de l'ouvrage. Cet ouvrage sera très utile aux étudiants, aux enseignants et aux praticiens. Le géologue de l'ingénieur trouvera dans cet ouvrage de référence une présentation exhaustive de la mécanique des sols et des roches complétant parfaitement l'approche géologique.