

Classification des sols et des roches à partir d'essais d'expansion cylindrique en haute pression

Soil and Rock Classification Based on High Pressure Borehole Expansion Tests

J. P. Baud ¹

Eurogé, Avrainville, France

M. Gambin

Apagéo, Magny-les-Hameaux, France

ABSTRACT

Physical and mechanical properties used to characterize soil and rock are different according to the approaches and targets of the various activities involved, namely soil mechanics, rock mechanics or engineering geology. The Authors suggest that the data obtained during a borehole expansion test, which can be summarized by a Ménard E-modulus and a limit pressure, be used in an overall classification ranging from loose soils to hard rock without any discontinuity, based on the soil Pressiorama® developed some years ago.

RÉSUMÉ

Les propriétés physiques et mécaniques utilisées pour caractériser les sols et les roches sont différentes selon les approches et les objectifs, ceux de la géotechnique, de la géologie de l'ingénieur ou de la mécanique des roches. Les auteurs suggèrent que les mesures faites lors de l'expansion de la cavité cylindrique d'un forage, et qui peuvent se ramener aux deux paramètres fondamentaux, un module pressiométrique et une pression limite, soient utilisés pour une classification passant sans discontinuité des sols aux roches, fondée sur le diagramme Pressiorama® mis au point pour les sols il y a quelques années.

Keywords: Pressuremeter, flexible dilatometer, rock moduli, rock limit pressure, hard soils, weak rocks, weathered rocks.

Mots-clés : Pressiomètre, dilatomètre, modules des roches, pression limite des roches, sols raides, roches tendres, roches altérées.

1 INTRODUCTION. LA FRONTIERE ENTRE SOLS ET ROCHES EST-ELLE UTILE ?

Définir une limite entre les sols et les roches est une démarche qui semble naturelle à tout homme, de l'agriculteur néolithique au bâtisseur du XXIème siècle, et qui pourtant reste une démarche sinon subjective du moins contingente, fonction de la perception d'usage du matériau naturel sur lequel il évolue et avec lequel il se

mesure. Pour le géologue depuis l'émergence de cette discipline, tous les constituants de l'écorce terrestre sont des roches, de l'eau à la matière des socles continentaux, indépendamment donc de leur état, solide ou liquide voire gazeux. Toutes ces roches ont des histoires et des devenir particuliers, plus ou moins essentiels au développement mondial plus ou moins durable, à l'exemple du pétrole, « l'huile-de-pierre ». Pour tout constructeur, cette classification globale est incongrue, et la roche se distingue par son caractère

¹ Corresponding Author.

solide des sols qui sont tous les terrains qui ne sont pas roches, et caractérisés par leur manque plus ou moins marqué de solidité : altérables, terrassables, friables, compressibles, mous jusqu'à la limite de la liquidité.

Historiquement, la définition de Terzaghi [1], à la double culture de géologue et d'ingénieur, institue la limite mécanique entre sols et roches : « Le sol est un agrégat naturel de grains minéraux qui peuvent être séparés par de légères actions mécaniques telles que l'agitation dans de l'eau. La roche au contraire est un agrégat naturel de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes. Comme ces termes « fort » et « permanent » sont sujets à diverses interprétations, la distinction entre le sol et la roche est nécessairement arbitraire. En fait, il y a beaucoup d'agrégats naturels de grains minéraux qui sont difficiles à classer, soit comme sols, soit comme roches » [1].

Un des objectifs du colloque d'Athènes 2011 est de s'intéresser aux terrains dont le champ d'action est revendiqué à la fois par la mécanique des sols et la mécanique des roches. Et bien que les spécialistes des deux disciplines soient le plus souvent dans des rapports cordiaux et fructueux, et développent leur expertise dans le cadre de lois physiques universelles, la revendication va parfois jusqu'à contester à l'autre la pertinence de son approche : « Une forte cohésion et une fissuration développée, deux critères souvent cités pour les roches, restent insuffisants. La séparation entre sols et roches dépend beaucoup de l'école de pensée et du domaine d'expérience de l'ingénieur ; les congrès qui ont tenté de regrouper les sols raides et les roches tendres n'ont fait qu'ajouter à la confusion. C'est à la géologie qu'il appartiendrait de faciliter une clarification. » [2]. Le schéma ci-après (Figure 1) se base

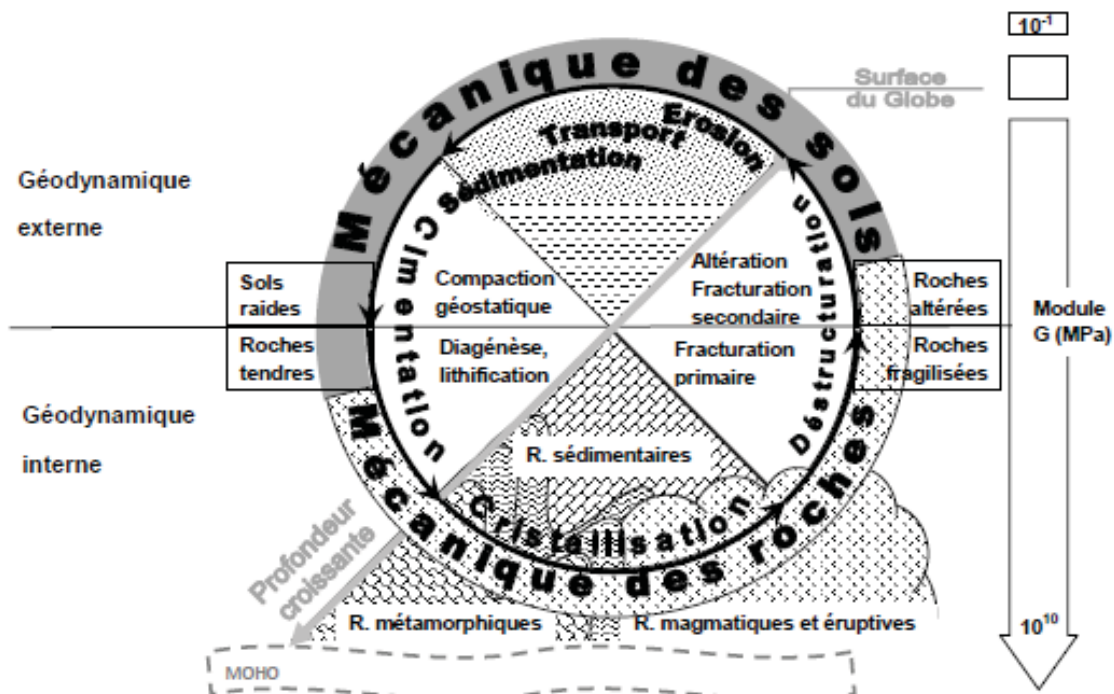


Figure 1. Cycle de la matière minérale (et organique) des roches aux sols.

Modifié et augmenté des concepts géologiques classiques, d'après une présentation « à faire hurler un géologue » (sic) de J. Hurtado [3]

donc sur la distinction que fait la géologie classique, avant la tectonique des plaques, entre les facteurs de formation des roches de l'écorce terrestre, ou géodynamique interne, et les facteurs de dégradation des roches et recombinaison des roches sédimentaires, ou géodynamique externe. C'est, en première approximation, ce qui forme frontière entre les domaines de la mécanique des roches et de la mécanique des sols. Le cycle géologiquement très long d'une particule minérale, par exemple un grain de silice magmatique au sein d'un granite, devenant grain d'un sable de plage avant de retourner à la base de l'écorce terrestre, le conduit à être composant de roches et de sols de résistances mécaniques extrêmes, symbolisées en marge du schéma par le module de cisaillement de ces formations. La caractéristique génétique essentielle des roches, c'est la liaison de plus en plus forte entre les grains qui la composent, par cimentation au cours de la diagenèse des roches sédimentaires, cristallisation ou recristallisation des roches métamorphiques et magmatiques. Leur devenir à la surface du Globe, c'est la destruction de ces structures fortes, progressive jusqu'à la juxtaposition de grains sans liaisons. Vouloir comparer les caractéristiques mécaniques d'un sol très raide et d'une roche assez altérée, même si elles semblent presque identiques, doit se faire en gardant en perspective le fait qu'elles sont aux antipodes de ce cycle.

2 CARACTERISATION DES SOLS ET DES ROCHES PAR LES PARAMETRES PRESSIOMETRIQUES CLASSIQUES

La loi de comportement de tout matériau soumis à l'expansion d'une cavité cylindrique peut se ramener essentiellement à une règle hyperbolique assez simple [4].

Dans les sols les deux paramètres fondamentaux E_M et p^*_{LM} (module pressiométrique et pression limite) qui s'en déduisent permettent une classification des sols, en raison de la relation étroite entre le rapport E_M/p^*_{LM} , et le type de comportement des sols, entre les pôles extrêmes sableux et argileux, fonction de la proportion et de la granulométrie des composants des sols.

Cette classification est illustrée par exemple dans le diagramme Pressiorama® [5], et elle est totalement liée au coefficient de structure α défini par Ménard comme le rapport E_M/E où E serait un « module d'Young » acceptable [6] [7].

Le devenir de cette classification, et la pertinence du coefficient de structure α des sols, est une question qui se pose lorsque l'essai pressiométrique est appliqué à des « sols » de plus en plus raides, qui peuvent être, soit des terrains sédimentaires dans un état de consolidation géostatique élevé, soit des roches dans un état d'altération et de décompression plus ou moins avancé, ou des roches moins altérées, fracturées ou peu fracturées et enfin aux roches massives.

3 LE COMPORTEMENT PRESSIOMETRIQUE DES SOLS INDURES, DES ROCHES TENDRES ET DES ROCHES MASSIVES

La loi de comportement hyperbolique des sols soumis à un essai de chargement radial, correspond à la mesure globale de la déformation de la paroi sous la contrainte de cisaillement que subit le sol. Le réarrangement des grains au cours de la déformation et de la généralisation de la rupture à une zone de sol, est un phénomène dont le principe est bien établi et compréhensible [6] [7], même si le détail de son apparition et de ses modalités suivant les sols fera encore longtemps l'objet de recherches géomécaniques.

Lors du passage progressif à des sols de plus en plus indurés, à des roches altérées, et à des roches fracturées, le comportement en expansion radiale des terrains ne change pas brutalement de nature, mais l'échelle des contraintes associées change progressivement d'une ou deux puissances de 10 par rapport aux sols « meubles », et la limitation des essais à 5 MPa due au matériel disponible ne permet plus que d'accéder à la phase initiale des déformations. L'essai ne comporte alors que la mesure d'un module sur cette plage limitée de contraintes, sans connaissance de la pression limite de l'évolution du module sous contraintes plus élevées. La mise au point de matériel pressiométrique rendant possible d'atteindre des pressions d'essai de 25 MPa [8],

on peut commencer à entrevoir si le mode de rupture des matériaux situés dans la plage de pressions commune entre sols et roches reste comparable à celui des sols.

3.1 Mode de cisaillement et de rupture des sols indurés et des roches

L'accroissement du rapport E_M/p^*_{LM} avec p^*_{LM} est une observation courante. Sur la courbe pressiométrique cela correspond à une augmentation du rayon de courbure des tracés, et à une tendance pour le coefficient de structure α des sols très indurés à se rapprocher de 1 ; autrement dit dans les roches massives non fracturées, il est d'usage de penser que l'essai d'expansion mesure directement un module d'Young :

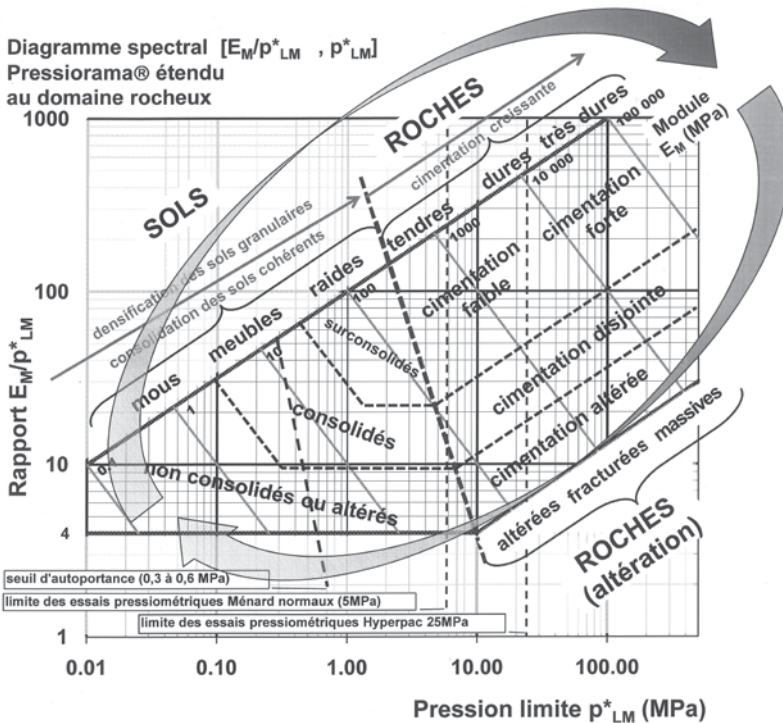
- la cimentation entre leurs composants minéraux limite un réarrangement de ces minéraux sous les contraintes de cisaillement fortes ;
- la densité, la continuité, l'ouverture et l'état de surface des épontes, et le remplissage de cette fracturation influencent la déformation de la paroi d'un forage en expansion radiale.

3.2 Comportement pressiométrique des roches altérées ou fracturées

La fracturation des roches se manifeste sur la courbe pressiométrique de façon très claire, par la présence d'une très longue phase de diminution de la pente de la courbe lors de l'augmentation de la pression, qui correspond à la fermeture progressive des fissures proches du forage, puis la prise en compte par l'essai de fissures de plus en plus éloignées du forage.

Quelle que soit la pression finale atteinte, entre 5 et 25 MPa, on trouve comme pour les essais pressiométriques standards, trois types de courbes d'essai au moment de leur interruption : celles qui sont encore en phase de fermetures des fissures et de diminution de la pente DV/DP, celles pour lesquelles un point d'inflexion a été passé avec croissance de DV/DP sans fluage, et enfin celles pour lesquelles apparaît en fin d'essai une amorce de fluage et de plus grandes déformations.

Figure 2. Classification des roches et des sols à l'aide de leurs caractéristiques pressiométriques. Le cycle génétique des unes aux autres est celui de la figure 1.



Ces 3 types de courbes permettent une classification basique :

- roches massives plus ou moins fracturées ;
- roches fracturées et altérées, mais dont la matrice rocheuse reste peu compressible ;
- roches altérées et décomposées évoluant en un comportement de type sol.

4 PASSAGE SOL INDURE / ROCHE TENDRE ET ROCHES ALTEREE / SOL : PROGRESSIF OU BRUTAL ?

4.1 Utilisation du diagramme spectral $[E_M/p^*_{LM}, p^*_{LM}]$ pour visualiser la transition sols-roches (fig. 2 et 3)

Nous proposons, à titre de cadre de réflexion, l'extension au domaine des pressions d'essai supérieures à 10 MPa, le diagramme spectral $[E_M/p^*_{LM}, p^*_{LM}]$ ou Pressiorama® que nous utilisons habituellement dans les campagnes de reconnaissance au pressiomètre [5], d'une part pour détecter les anomalies dans la réalisation des essais ou dans le sol proprement dit, et surtout pour classer les terrains rencontrés.

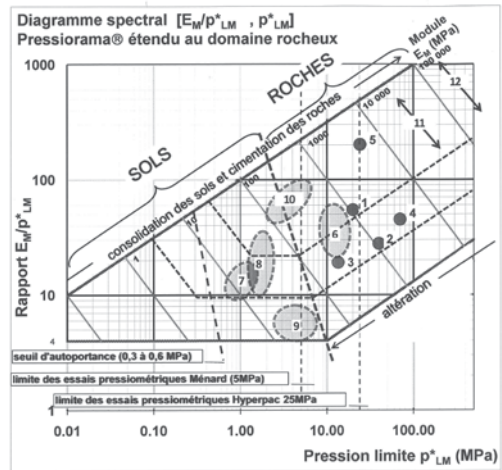
Les cas réels de sols très indurés et roches altérées que nous pouvons positionner dans cette extension du diagramme au domaine rocheux sont assez nombreux jusqu'à des pressions limites extrapolées vers 15 à 18 MPa. Au-delà, les premiers essais Hyperpac [8] nous donnent des points à 25 MPa et permettent d'envisager des extrapolations possibles de pressions limites jusque vers 30 à 40 MPa, si du moins la corrélation p_F-p_{LM} des sols reste validée. Au-delà encore, les essais au dilatomètre réinterprétés selon la méthode pressiométrique peuvent donner des modules E_M supérieurs à 10^5 MPa, mais dans ce type d'essai on est très loin de l'estimation de la pression limite [9].

4.2 Rupture fragile ou ductile en essais d'expansion in situ

Les exemples précédents montrent que, lorsque l'on peut pousser suffisamment loin en pression l'essai de type pressiométrique, les terrains raides ou rocheux suffisamment tendres présentent un comportement assez peu différent des

sols, avec une phase de fluage et de grandes déformations.

La différence notable est la tendance à l'augmentation du rapport E_M/p^*_{LM} avec la pression limite, qui dépasse rapidement les valeurs usuelles des sols meubles, pour atteindre 50 ou 100, et même 200. Les courbes pressiométriques correspondant à de telles valeurs élevées de E_M/p^*_{LM} présentent une « pliure » de plus en plus nette entre les deux phases, avant et après apparition du fluage.



- 1 Granite altéré, Bologne [8]
- 2 Marnes du Lias, Alise-Ste-Reine [8]
- 3 Gneiss altéré, Limoges [8]
- 4 Grès de Fontainebleau, Saulx-les-Chartreux [8]
- 5 Calcaire de Beauce, carrière de Roncevaux [8]
- 6 Gneiss à différents stades d'altération, Limoges [4]
- 7 Argile yprésienne, site de Merville LCPC [Baud ISP5 vol.2 pp 549-560]
- 8 Argile yprésienne, Triel-sur-Seine [non publié]
- 9 Sables et graviers, Le Caire [non publié]
- 10 Marno-calcaire de Champigny, Bassin Parisien [non publié]
- 11 Béton de pieu [E = 30 GPa]
- 12 Acier de pieu [E = 200 GPa]

Figure 3. Quelques exemples de roches tendres ou altérées, et de sols consolidés à raides. Par comparaison, module d'Young de deux matériaux du génie civil, le béton et l'acier.

Au fur et à mesure de la progression des investigations vers les roches massives, il semble apparaître que le comportement du matériau se rapproche du type « fragile » dans lequel la rupture se produirait pratiquement sans prémices au terme d'une plage quasi-élastique. Cette intuition est généralement partagée, par exemple par la crainte exprimée à l'encontre d'essais à 25 MPa dans le béton (cas de pieux ou de colonnes), et Ménard lui-même envisageait « d'éclater » la roche [10]. Pour l'instant, même dans les me-

sures poussées à 25 MPa, ce type de comportement n'a pas été observé, et tous les matériaux testés présentent un fluage progressif annonçant le début d'une phase de rupture.

A des pressions supérieures, la rupture de la roche par expansion en forage peut être obtenue, de façon industrielle, par les procédés d'injection de mousse expansive sous pression (tel le procédé DMX de Colas-Rail). Dans ce type d'arrachement de zones rocheuses proches de la surface d'un front de taille, avec mise en pression rapide sous environ 50 à 60 MPa, on peut observer deux modes distincts de rupture du rocher : la plus fréquente est la décomposition immédiate en blocs polyédriques découpés par l'ouverture de fractures fermées préexistantes ; plus rarement, dans les roches moins fissurées, l'expansion provoque un déplacement de la paroi pendant quelques secondes, avant un émiettement de la masse rocheuses en éléments dont toutes les faces ne sont pas planes et semblent correspondre à l'ouverture de joints intergranulaires (Delaporte, communication orale, [11]).

L'état des connaissances sur la rupture sous contrainte triaxiale d'échantillons de roches non fracturés, et sur la résistance au glissement des joints rocheux est résumé par Parriaux [12] et détaillé dans une abondante bibliographie par Al Bied [13]. La rupture de la matrice se fait par apparition de bandes de cisaillement dans les zones de concentration de contraintes.

Au cours d'un essai d'expansion sous très haute pression, le confinement assuré par la masse rocheuse environnante devrait donc conduire à une rupture combinant à la fois la mise en jeu des glissements selon les joints préexistants, et la formation près de la paroi de bandes de cisaillement, permettant de garder dans les roches la notion de pression de fluage pressiométrique.

5 CONCLUSION PROVISoire ET DEVELOPPEMENTS FUTURS

La mise au point récente de matériel d'essais d'expansion en forage à 25 MPa doit encore donner lieu à des mesures dans des conditions de terrain variées pour que le retour d'expérience vienne étayer les hypothèses faites ici sur la rupture des roches par cisaillement. Nous envisa-

geons assez rapidement de porter les pressions d'essai jusque vers 50 MPa.

Le diagramme de classification continue des sols et des roches par les valeurs pressiométriques nous sert de cadre pour ces travaux, ainsi que la mise au point parallèlement, de lignes d'isovaleurs du coefficient rhéologique α compatibles avec la pratique des méthodes pressiométriques Ménard [7].

REFERENCES

- [1] K. Terzaghi et R.B. Peck, *Mécanique des sols appliquée*, traduction française J. Baudrillard et C. Meunier, Dunod, Paris (1957).
- [2] Comité Français de Mécanique des Roches, *Manuel de mécanique des roches*, tome 1, Presses de l'Ecole des Mines, Paris (2000).
- [3] J. Hurtado, *Introduction à la géomécanique*, Sols et structures ed., Paris (1988).
- [4] J.-P. Baud et M. Gambin, Déduction d'une loi de réponse hyperbolique unique par compilation de courbes pressiométriques dans un sol de lithologie homogène, *ISP5 – PRESSIO 2005, Vol. 1. Gambin, Magnan et Mestat (ed.)*, Presses ENPC, Paris (2005), 175-186.
- [5] J.-P. Baud, Analyse des résultats pressiométriques Ménard dans un diagramme spectral [Log(p_{LM}), Log (E_M/p_{LM})] et utilisation des regroupements statistiques dans la modélisation d'un site, *ISP5 – PRESSIO 2005, Vol. 1. Gambin, Magnan et Mestat (ed.)*, Presses ENPC, Paris (2005), 167-174.
- [6] L. Ménard et J. Rousseau, L'évaluation des tassements, tendances nouvelles. *Sols-soils, n°1*, (1962), 167-174.
- [7] M. Gambin, Le pressiomètre, in *I. Sharour et R. Gourvès, Reconnaissance des terrains in situ*, Hermès Sciences - Lavoisier Ed. (2005), Chapitre 4, 104-146.
- [8] G. Arsonnet, J.-P. Baud, M. Gambin, R. Heintz, L'HyperPac 25 MPa comble le vide entre le pressiomètre Ménard et le dilatomètre flexible, *Geotechnics of hard soils and weak rocks, XV ECSMGE, Athens (2011)*.
- [9] M. Galera, M. Alvarez, Z.T. Bienawski, Evaluation of the deformation modulus of rock masses. Comparison by pressuremeter and dilatometer test, *ISP5 – PRESSIO 2005, Vol. 2. Gambin, Magnan et Mestat (ed.)*, Presses ENPC, Paris (2005), 239-256.
- [10] L. Ménard, Le pressiomètre éclateur de roches, *Notice technique Etudes Pressiométriques Louis Ménard D23 (1974)*.
- [11] T. Delaporte, Process DMX (Démolition par Mousse eXpansive), Abattage de roche sans emploi d'explosifs, *DVD de démonstration et notice technique (2009)*.
- [12] A. Parriaux, *Géologie, bases pour l'ingénieur*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2^e éd., Lausanne, (2009).
- [13] A. Al Bied, Etude expérimentale et modélisation du comportement des roches granulaires : écoulement, radoucissement et rupture en mode localisé. *Thèse Doct. LCPC, Paris (2002)*.