

La mécanique des roches pour les ouvrages du génie civil

Ingénierie des roches

Muriel Gasc-Barbier

Didier Hantz

DUNOD

Couverture : © Maresol – Fotolia.fr

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2019

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

ISBN 978-2-10-079094-4

www.dunod.com

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos

VII

Partie 1

Bases de la mécanique des roches

1

Chapitre 1 Rappels de mécanique des milieux continus

3

1. Notion de contrainte

3

2. Plan et cercles de Mohr

5

3. Déformations

5

4. Lois de comportement et critères de rupture

6

Entraînez-vous

7

Solutions

8

Chapitre 2 Propriétés physiques et mécaniques des roches

11

1. Composition des roches

11

2. Propriétés physiques des roches

13

3. Le comportement mécanique des roches

17

Testez-vous

19

Entraînez-vous

20

Solutions

21

Chapitre 3 Comportement mécanique de la matrice rocheuse

23

1. Essai de compression simple

24

2. Essai de traction indirecte (essai brésilien)

26

3. Essai de compression triaxiale

27

4. Comportement différé

30

5. Autres essais utiles en génie civil

31

6. Critères de rupture

32

Testez-vous	34
Entraînez-vous	35
Solutions	36
Chapitre 4 Structure des massifs rocheux	37
1. Contexte géologique et hydrogéologique	37
2. Observation et échantillonnage	38
3. Description des discontinuités	39
4. Structure du massif rocheux	47
Testez-vous	51
Entraînez-vous	52
Solutions	53
Chapitre 5 Comportement mécanique des discontinuités rocheuses	55
1. Étude expérimentale du comportement des joints rocheux	55
2. Critères de rupture	59
3. Comportement réel des discontinuités	62
Testez-vous	65
Entraînez-vous	66
Solutions	67
Chapitre 6 Comportement du massif rocheux	69
1. Comportement global du massif	69
2. Les méthodes de classification du massif rocheux	72
3. Résistance et déformabilité du massif rocheux	74
Testez-vous	79
Entraînez-vous	80
Solutions	81

Partie 2	
Ingénierie des roches	83
Chapitre 7 Stabilité des massifs fracturés	85
1. Introduction à la théorie des blocs	86
2. Identification des blocs amovibles	88
3. Détermination du mode d'instabilité potentielle d'un bloc amovible	91
4. Stabilité d'un bloc au glissement	96
5. Stabilité d'un bloc au basculement	102
6. Stabilité d'un ensemble de blocs	102
7. Méthodes d'éléments discrets	105
8. Modèles de milieu continu	110
9. Application des méthodes	111
Testez-vous	114
Entraînez-vous	115
Solutions	117
Chapitre 8 Parades actives et passives contre le risque rocheux	119
1. L'évitement	119
2. La surveillance	120
3. Les purges	120
4. Les parades actives	121
5. Les parades passives	126
6. Conclusion : éléments pour le choix d'une ou des parades	129
Testez-vous	131
Entraînez-vous	132
Solutions	133

Chapitre 9	Cavités et ouvrages souterrains	135
1.	Cavités dans un milieu continu	135
2.	Cavités dans un milieu discontinu	155
3.	Cavités à faible profondeur	161
4.	Dimensionnement des tunnels à l'aide des méthodes « empiriques »	162
	Testez-vous	166
	Entraînez-vous	167
	Solutions	168
Chapitre 10	Fondations au rocher	171
1.	Reconnaissance générale du massif	171
2.	Principes de conception	173
3.	Dimensionnement	175
4.	Suivi géologique et instrumentation	178
	Testez-vous	179
	Entraînez-vous	180
	Solutions	181
Chapitre 11	Auscultation et surveillance des massifs rocheux	183
1.	Outils pour la caractérisation géométrique	184
2.	Outils pour la caractérisation mécanique <i>in situ</i>	186
3.	Méthodes propres au suivi	189
4.	Méthodes géophysiques	190
	Testez-vous	192
	Entraînez-vous	193
	Solutions	194
	Index	195

Avant-propos

En 2000, le Comité Français de Mécanique des Roches a édité, aux presses des mines, le 1^{er} tome d'une série de cinq « manuels de mécanique des roches ». Le tome 1 « fondements » reprend les grands principes de la mécanique des roches. Les tomes suivants, tome 2 (2003) « applications » ; tome 3 (2013) « retour d'expérience/génie minier et pétrolier » ; tome 4 (2013) « retour d'expérience/génie civil » ; tome 5 (2017) « thermo-mécanique des roches », ont été consacrés, comme leurs titres l'indiquent, à différentes applications et retours d'expérience précis. Nous ne saurions que recommander la lecture de ces ouvrages collectifs qui, par la richesse de leur contenu et la notoriété de leurs auteurs, en font des marqueurs de cette discipline, tournée vers les différents domaines d'étude qu'elle recouvre.

Auparavant, en 1976, Marc Panet, aidé de Dominique Fourmaintraux et d'autres co-auteurs, a organisé un séminaire de formation continue de l'École nationale des ponts et chaussées et de l'Association amicale des ingénieurs anciens élèves, dédié à la mécanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil. De cette session de formation a été tiré un ouvrage aujourd'hui largement épuisé, mais qui est resté, pendant très longtemps, un ouvrage de référence.

C'est dans cette veine qu'a été rédigé le présent ouvrage. Il est forcément moins complet que les 5 tomes des « manuels » mais se veut plus appliqué et résolument tourné vers l'enseignement en génie civil. Les spécificités de la mécanique des roches sont encore trop mal connues des non-spécialistes et peuvent, si elles sont mal prises en compte dès le démarrage du projet, conduire soit à d'importants surcoûts au moment de la mise en œuvre (situation assez classique dans le cas de fondations au rocher), soit, au contraire, amener à substituer du (très) bon rocher par du béton souvent de moindre résistance. De plus, il n'existe pas en France et à ce jour de texte réglementaire ou normatif traitant de la mécanique des roches. L'Eurocode 7 (calcul géotechnique) et l'Eurocode 8 (calcul des structures pour leur résistance au séisme), sont bien évidemment censés s'appliquer aux ouvrages au rocher, mais, à ce jour, ils sont essentiellement tournés vers la mécanique des sols. La refonte en cours de l'Eurocode 7, qui devrait sortir en 2020, prévoit explicitement d'intégrer les aspects rocheux : ainsi, un groupe de travail, sur les treize travaillant sur la refonte de l'Eurocode 7, est spécifiquement dédié à la mécanique des roches.

Ainsi, à l'aune de ces modifications réglementaires, il nous est apparu opportun de proposer un nouvel ouvrage que l'on a souhaité didactique, et tourné vers l'apprentissage des spécificités de l'utilisation de la mécanique des roches pour les ouvrages du génie civil. Cet ouvrage a donc été conçu en deux parties : dans un premier temps, une

première partie axée sur les bases théoriques qui permettent d'appliquer les grands principes de la mécanique à des massifs rocheux, naturels, dont la description et le comportement actuel dépendent de leur histoire, et qui ne sont pas des massifs continus, homogènes et isotropes... La deuxième partie de l'ouvrage est consacrée à proprement parler à l'ingénierie des roches : stabilité et renforcement des pentes instables, tunnels, fondations au rocher, auscultation et surveillance des massifs.

Bases de la mécanique des roches

Introduction

Dans cette partie consacrée aux bases théoriques de la mécanique des roches à destination des ouvrages du génie civil, on décrira les grands principes permettant de comprendre les spécificités du massif rocheux, par rapport au matériau « sol » classiquement étudié en géotechnique.

On reprendra successivement quelques notions de mécanique des milieux continus nécessaires à la compréhension de l'ouvrage, on décrira les propriétés physiques des roches qui influent sur leur comportement mécanique. On détaillera ensuite les essais de laboratoire propres à décrire le comportement de la matrice rocheuse. Deux chapitres seront ensuite consacrés aux discontinuités qui découpent le massif rocheux, et qui sont les éléments clés de leur comportement : un chapitre sur la description physique des discontinuités et un sur leur comportement mécanique propre. Enfin, cette partie sera conclue par un chapitre portant sur le comportement du massif rocheux, qui intègre donc à la fois la matrice et les discontinuités.

Rappels de mécanique des milieux continus

Introduction

La mécanique des roches, comme son nom l'indique, revient à étudier les lois et paramètres mécaniques qui permettent de comprendre et de prédire le comportement des massifs rocheux. Plus particulièrement dans cet ouvrage, on se concentrera sur le comportement appliqué aux ouvrages du génie civil, c'est-à-dire qu'on se placera dans des conditions proches de la surface ou de la sub-surface. Dans ce premier chapitre, nous redonnons très brièvement les notions élémentaires de mécanique nécessaires.

Objectifs

Connaître les principales notions de mécanique des milieux continus utiles à la compréhension de cet ouvrage

Identifier les liens entre contraintes et déformations

Définir les principales lois de comportement

Expliquer les plan et cercles de Mohr

Plan

- 1 Notion de contrainte
- 2 Plan et cercles de Mohr
- 3 Déformations
- 4 Loi de comportement et critères de rupture

1 Notion de contrainte

1.1 Définition

Une contrainte est une force divisée par une surface. Si on considère une surface élémentaire dS d'un solide de normale \mathbf{n} tournée vers l'extérieur de ce solide, subissant une force $d\mathbf{f}$, la contrainte \mathbf{T} est le rapport entre force et surface quand la surface tend vers zéro.

$$\mathbf{T} = \lim_{S \rightarrow 0} \left(\frac{d\mathbf{f}}{dS} \right)$$

Elle est homogène à une pression et est exprimée, dans le système international (SI), en pascal. En mécanique des roches, on utilise classiquement le mégapascal (MPa), alors qu'en mécanique des sols on reste en général en kilopascal (kPa). Le vecteur contrainte s'exerçant sur une surface élémentaire (ou facette) se décompose en une composante normale, notée σ_n et une composante tangentielle, notée τ .

Cauchy a décrit la notion de contrainte par « quand on soumet un corps à l'action de forces extérieures, des contraintes s'établissent par réaction, à l'intérieur de ce corps. ». Les efforts se développant à l'intérieur du corps en équilibre sont donc différents, selon le plan de coupe considéré.

ATTENTION !

En mécanique des roches, comme en géotechnique, les compressions sont comptées positivement et les tractions sont négatives. C'est l'opposé des conventions classiques de mécanique. Cette convention s'explique par le fait qu'à l'état naturel, les roches sont le plus souvent en compression.

1.2 Contraintes sur les faces d'un cube

L'état de contrainte en un point P se caractérise dans le repère (x, y, z) par le tenseur des contraintes :

$$[\sigma_{(x,y,z)}] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

L'équilibre du cube impose $\tau_{xy} = \tau_{yx}$; $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ et $\tau_{zy} = \tau_{yz}$

En 3D, l'état de contrainte en P est donc déterminée par un tenseur à six composantes indépendantes. Les termes diagonaux sont des contraintes normales, les autres des contraintes de cisaillement. On peut par ailleurs montrer qu'il existe un repère orthonormé (1, 2, 3) dans lequel les cisaillements perpendiculaires aux axes sont nuls. Ce repère est dit **repère principal**. Les contraintes $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, sont dites **contraintes principales**.

1.3 Contraintes totales et contraintes effectives

Les contraintes introduites jusqu'ici sont les contraintes totales (σ). Ce sont elles qui vérifient l'équation d'équilibre. En présence de fluide, on introduit la notion de contraintes effectives (σ').

DÉFINITION

Les **contraintes effectives** sont la part des contraintes totales s'exerçant sur la roche et qui contrôlent donc le comportement mécanique ; le reste est repris par la pression interstitielle du fluide.

On écrit alors : $\sigma' = \sigma - bp$

Avec p la pression et b le coefficient de Biot. La valeur du coefficient de Biot dépend entre autres de la porosité et de la fissuration de la roche, et l'on a toujours $0 < b < 1$.

2 Plan et cercles de Mohr

Le plan de Mohr est défini dans le plan (σ_n, τ) .

En 2D et pour un point P quelconque, on peut montrer que les points représentatifs des contraintes s'exerçant en P sur différentes facettes sont situés sur un cercle, appelé cercle de Mohr (figure 1.1). Lorsqu'une facette tourne d'un angle $+\alpha$ dans le plan physique, le point représentatif du vecteur contrainte tourne de -2α sur le cercle de Mohr. Le cercle de Mohr coupe l'axe des abscisses en deux points pour lesquels la contrainte tangentielle est nulle. Ces deux points, diamétralement opposés sur le cercle de Mohr, correspondent à deux facettes principales, perpendiculaires l'une à l'autre dans le plan physique.

En 3D, les points représentatifs de l'état de contrainte en M se situent dans le triangle curviligne défini par $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (voir figure 1.1).

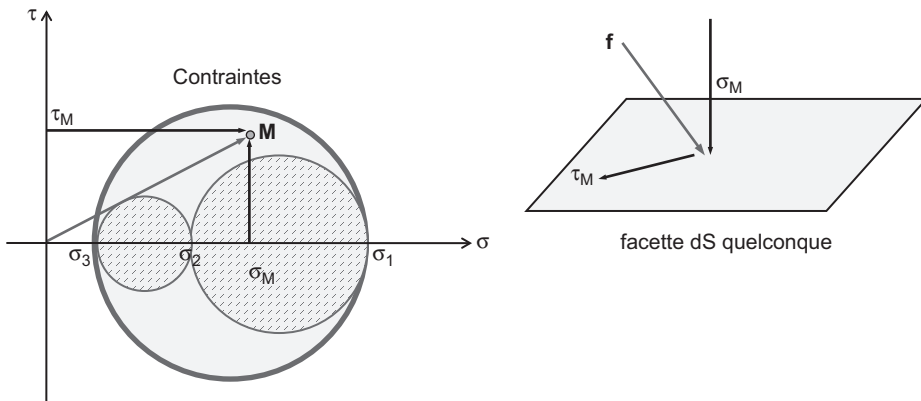


Figure 1.1 – Représentation de l'état de contrainte par le cercle de Mohr. En 2D, l'extrémité du vecteur contrainte (M) se trouve sur le cercle passant par σ_1 et σ_3 . En 3D, elle se trouve dans les triangles curvilignes représentés en gris clair.

3 Déformations

En mécanique des milieux continus, on fait généralement l'hypothèse de petites déformations, c'est-à-dire que les déformations d'un milieu peuvent être décrites par des combinaisons linéaires d'allongements et de distorsions.

Les allongements (ou raccourcissements) sont notés ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz} et les distorsions γ_{xy} , γ_{xz} , γ_{yz} ou ϵ_{xy} , ϵ_{xz} , ϵ_{yz} . En 3D, le tenseur des déformations est symétrique. Dans le repère principal des déformations, il n'y a pas de distorsion. On a alors :

$$[\varepsilon_{(1, 2, 3)}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix}$$

Pour un matériau donné, l'équation mathématique qui lie les contraintes et les déplacements est la « loi de comportement ».

ATTENTION !

En mécanique des roches, comme en géotechnique, les raccourcissements sont comptés positivement et les allongements sont négatifs.

4 Lois de comportement et critères de rupture

DÉFINITION

Une **loi de comportement** est une équation mathématique permettant de décrire le comportement mécanique d'une roche, ou de façon plus générale d'un matériau. Plus précisément, elle permet de relier les contraintes aux déformations.

La loi de comportement la plus simple est la loi de Hooke généralisée qui définit le comportement d'un solide élastique soumis à des contraintes et caractérisé par deux paramètres qui sont généralement le module d'Young (E) et le coefficient de Poisson (ν).

Concrètement, comme on le verra dans le chapitre 3, les roches ne sont pas des matériaux élastiques. On sera donc régulièrement amené à utiliser d'autres types de lois de comportement.

DÉFINITION

Un **critère de rupture** est une équation mathématique permettant de décrire quelle(s) contrainte(s) maximum peut subir la roche dans une certaine gamme de sollicitations.

Pour aller plus loin

- Coirier J., Nadot-Martin C., *Mécanique des milieux continus – Cours et exercices corrigés*, 4^e édition, 2013, Dunod.

Consultez sur le Web

→ mmaya.fr/PDF/MMCWeb.pdf



Exercice 1.1 Un cylindre de calcaire de diamètre de 50 mm et d'élancement 2 est soumis à une force de 50 kN parallèlement à son axe.

- a. Trouver la contrainte normale $\sigma_{n\theta}$ et la contrainte de cisaillement τ_θ dans un plan incliné à 30° par rapport à l'horizontale ;
- b. Donner la valeur maximum de la contrainte de cisaillement ;
- c. Donner l'angle θ pour lequel on aura une contrainte de cisaillement égale à la moitié de la contrainte de cisaillement maximale.

Exercice 1.2 Un échantillon parallélépipédique d'argilite (côtés l , épaisseur négligeable) va être testé au MEB environnemental. On suppose une compression selon σ_1 et une traction selon σ_2 . On augmente simultanément σ_1 et σ_2 , mais en gardant toujours $\sigma_1 = -4\sigma_2$.

- a. La rupture intervient pour un cisaillement de 10 MPa. Quelles sont les valeurs de σ_1 et σ_2 ?
- b. Est-ce que les valeurs de σ_1 et σ_2 à la rupture auraient changé si la limite à la traction de l'argilite était de 5 MPa ?
- c. On considère un plan plus fragile à 60° par rapport à l'horizontale. Quelle est la valeur de la contrainte de cisaillement sur ce plan ?
- d. Si on considère que cette zone de faiblesse présente une rupture en cisaillement à 8 MPa, que peut-on dire ?

Exercice 1.3 Tracer le cercle de Mohr correspondant à l'exercice 1.2.a. Déterminer la direction pour laquelle on a $\sigma_n = 0$; Déterminer la contrainte de cisaillement dans le plan de faiblesse défini en 1.2c.

Solutions



- 1.1** La figure 1.2 présente une vue en coupe de l'éprouvette considérée. La force F appliquée est décomposée en force normale N , et force tangentielle T , par rapport au plan considéré, qui fait un angle θ avec l'horizontale. On a alors $N = F \cos \theta$ et $T = F \sin \theta$.
- a. D'un point de vue général, $\sigma = F/A$. Si l'on se place sur un plan incliné de θ , la surface d'application à considérer est $A' = A/\cos \theta$. On a alors $\sigma_{n\theta} = N/A' = (F/A) \cos^2 \theta$ et $\tau_{\theta} = T/A' = (F/A) \cos \theta \sin \theta = (F/2A) \sin 2\theta$.
Application numérique : $A = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$; $\sigma_{n\theta} = 19,13 \text{ MPa}$; $\tau_{\theta} = 11 \text{ MPa}$.
 - b. La valeur maximum s'obtient lorsque la dérivée s'annule, c'est-à-dire pour $d\tau_{\theta}/d\theta = 0$. Or $d\tau_{\theta}/d\theta = (F/A) \cos 2\theta$; donc le maximum s'obtient pour $\cos 2\theta = 0$; ce qui donne $\tau_{\theta\max} = F/2A = 12,5 \text{ MPa}$.
 - c. On obtient $\tau_{\theta} = \tau_{\theta\max}/2$ pour $\sin 2\theta = 1/2$ soit donc pour $\theta = 15^\circ$.

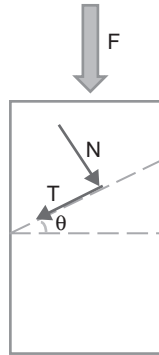


Figure 1.2 – Représentation des forces dans un plan en coupe de l'éprouvette.

- 1.2** La figure 1.3 présente le schéma correspondant : un carré de côté l . Les contraintes normale et tangentielle s'exerçant sur une facette de l'échantillon dépendent d'une combinaison de σ_1 et de σ_2 . En restant en 2D, on peut remonter aux forces et les décomposer selon le plan d'angle θ (cf. exercice 1). On peut alors écrire : $F_1 = \sigma_1 l$; $N_1 = \sigma_1 l \cos \theta$; $T_1 = \sigma_1 l \sin \theta$ et $F_2 = \sigma_2 l \tan \theta$; $N_2 = \sigma_2 l \tan \theta \sin \theta$; $T_2 = \sigma_2 l \tan \theta \cos \theta$.
- a. On peut alors écrire, en additionnant les contributions des forces :

$$\sigma_{n\theta} = (N_1 + N_2)/(l/\cos\theta) = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta$$

$$\text{et } \tau_{\theta} = (T_1 + T_2)/(l/\cos\theta) = (1/2)(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\theta$$
 On a alors $\tau_{\theta\max} = (1/2)(\sigma_1 - \sigma_2)$ (cf. exercice 1.1) donc comme $\sigma_1 = -4\sigma_2$ et qu'on donne $\tau_{\theta\max} = 10 \text{ MPa}$ on obtient $\sigma_1 = 16 \text{ MPa}$ et $\sigma_2 = -4 \text{ MPa}$.
 - b. Les valeurs à la rupture n'auraient pas changé puisque σ_2 est inférieure à la limite à la traction (5 MPa).
 - c. La contrainte de cisaillement s'obtient par application numérique pour $\theta = 60^\circ$, ce qui donne $\tau_{60} = 8,66 \text{ MPa}$;
 - d. Si la zone de faiblesse présente une rupture en cisaillement à 8 MPa, elle sera atteinte avant le cas précédent donc pour $\tau_{\theta\max} = 8 \text{ MPa}$; ce qui correspondrait alors à $\sigma_1 = 14,8 \text{ MPa}$ et $\sigma_2 = -3,7 \text{ MPa}$;

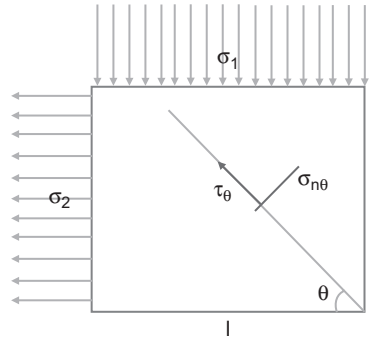


Figure 1.3 – Figure correspondant à l'exercice 1.2.

- 1.3** Le cercle est tracé pour $\sigma_1 = 16 \text{ MPa}$ et $\sigma_2 = -4 \text{ MPa}$, soit donc un rayon de 10 et un centre de coordonnées $(6,0)$. On lit alors sur le cercle $2\theta = 127^\circ$ soit $\theta = 63^\circ$. Pour le plan à 60° , on trace la droite passant par le centre et d'angle $2\theta = 120^\circ$ et on lit les coordonnées directement sur la figure.

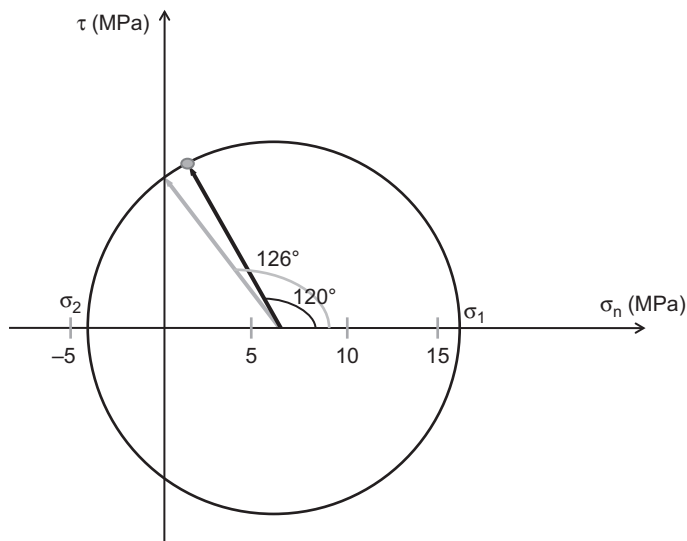


Figure 1.4 – Figure correspondant à l'exercice 1.3.

Propriétés physiques et mécaniques des roches

Introduction

Les roches sont des matériaux solides constitués pour l'essentiel d'un assemblage de minéraux. Peuvent y être également présents des fossiles ou des agrégats d'autres roches. Leur état actuel (composition minéralogique, degré de cristallisation des minéraux, présence ou non d'impureté, de fractures, etc.) dépend très fortement de leur mise en place, mais également de leur histoire (diagénèse). Ainsi, les roches sont des solides particulièrement complexes. Dans ce chapitre, nous reviendrons sur les conséquences de cette complexité sur leurs propriétés tant physiques que mécaniques.

Objectifs

- Connaître** les principales propriétés des roches
- Identifier** les familles de roche
- Définir** les paramètres physiques caractéristiques
- Expliquer** les différents types de comportement

Plan

- 1 Composition des roches
- 2 Propriétés physiques des roches
- 3 Le comportement mécanique des roches

1 Composition des roches

Dans cette partie, on décrira très succinctement quelques notions de pétrographie nécessaires à la bonne compréhension du manuel. Pour une approche beaucoup plus approfondie de ces notions, les auteurs recommandent la lecture d'*Éléments de géologie* chez le même éditeur.

1.1 Notions de pétrographie

Les roches sont constituées principalement d'un assemblage de minéraux. Un minéral est une substance solide ayant une formule chimique définie dans laquelle n'intervient pas d'association C-H (Carbone-Hydrogène). En général, les minéraux sont cristallisés, c'est-à-dire que leurs atomes sont disposés selon un arrangement particulier, mais la

taille des cristaux est souvent invisible à l'œil nu. Dans certaines roches volcaniques, en cas de refroidissement très rapide, les minéraux ne sont pas cristallisés ; on parle alors de « verres ».

Les propriétés géométriques, physiques et mécaniques des roches dépendent donc des propriétés de leurs matériaux constitutifs, et de leur assemblage, mais sont différentes de celles de ces matériaux. En effet, ces propriétés résultent de la proportion de chaque minéral, de la taille des cristaux, de la structure et de la texture de l'assemblage minéral et des défauts et hétérogénéités présents.

Ainsi les roches sont des matériaux :

- **hétérogènes**, c'est-à-dire qu'elles sont constituées de grains qui, dans la majorité des cas, appartiennent à des espèces minérales différentes et sont de tailles et de formes variées. De plus, les éléments d'une même espèce minérale peuvent présenter dans la roche des formes de cristallisation différentes (systèmes cristallins différents) ou des degrés d'altération divers ;
- **discontinus** : l'assemblage des grains constituant la roche n'est jamais parfait : d'une part, et comme dans tout assemblage de grains, on identifie très souvent des vides, appelés pores et, d'autre part, il existe en général de nombreux défauts intercristallins, que l'on désigne sous le terme général de « fissures ». Ces vides peuvent être remplis d'air ou d'eau. Dans les conditions naturelles, les roches sont en général saturées ou proches de la saturation. Il est donc important de prendre en compte correctement la pression et les propriétés de l'eau interstitielle ;
- **anisotropes** : les cristaux ont, par essence, une anisotropie liée au système cristallin auquel ils appartiennent. Une roche aura donc a priori des caractéristiques physiques anisotropes. Une isotropie apparente sera liée à une distribution aléatoire des orientations des différents cristaux. Du point de vue mécanique, l'anisotropie est essentiellement liée aux réseaux de fissures.

1.2 Principales roches et familles pétrographiques

Les roches tirent leur nom de leur composition chimique et minéralogique, de leur texture et de leur mode de formation. On distingue classiquement trois grandes familles de roches : les roches sédimentaires, les roches magmatiques et les roches métamorphiques.

Les **roches sédimentaires** se forment à la surface de la terre, sur le sol ou au fond de l'eau, par dépôt en couches initialement sub-horizontales. On en distingue deux grands types :

- les roches détritiques, qui résultent de la désagrégation et/ou de l'accumulation de roches préexistantes après érosion et transport des éléments ; on y retrouve en particulier les argiles et les grès ;
- les roches physico-chimiques ou biogènes, qui résultent de la précipitation d'ions en solution et/ou de l'activité d'être vivants ; les roches carbonatées et les roches salines (ou évaporites) sont les plus fréquentes.