

Chapitre II: Roches et Minéraux

1. Introduction

Notre planète est constituée essentiellement de roches et de minéraux (les montagnes, le fond des mers, la terre, l'eau, le sable...). Ces roches et minéraux ont été transformés et ils ont changé de forme et d'aspect.

Depuis le commencement de l'histoire de l'humanité, on utilise les roches et les minéraux de façon incontournable pour le développement des sociétés (âge de la pierre, âge du bronze, âge du fer).

Les minéraux : Un minéral est une substance inorganique solide, composé d'un élément chimique ou d'un ensemble de plusieurs éléments. Ce sont des substances qui apparaissent naturellement dans la croûte terrestre et qui peuvent avoir différentes formes. Il existe cependant des minéraux liquides : l'eau, le pétrole et le mercure.

Les minerais : sont des minéraux utiles exploitables économiquement et industriellement comme le fer, le cuivre, l'aluminium, le plomb... etc.

Selon les scientifiques, il existe près de 3.000 minéraux différents que l'on peut répertorier selon différents critères. Pour classer 3.000 espèces, on se base sur leur composition chimique, la symétrie de leur réseau cristallin et la finesse de leur structure. Ainsi, on obtient les 9 classes suivantes:

I	Éléments natifs (<i>composés d'un seul élément chimique</i>)	3 à 4 % des espèces
II	Sulfures (soufre + un autre élément chimique)	15 à 20 % des espèces
III	Halogénures	5 à 6 % des espèces
IV	Oxydes et hydroxydes	14 % des espèces
V	Carbonates (avec nitrates, borates)	9 % des espèces
VI	Sulfates (avec molybdates, chromates et tungstates)	10 % des espèces
VII	Phosphates (avec arséniates et vanadates) (<i>arsenic, vanadium</i>)	16 % des espèces
VIII	Silicates	25 % des espèces
XI	Substances organiques	

(Selon les classifications de Dana et de Strunz)

2. Identification des roches

L'identification des roches est assez difficile. Pour bien identifier une roche, il faut connaître : le lieu précis où la roche a été prise, l'origine des roches qui entourent celle-ci, le relief de cet endroit (plaine, montagne, vallée,...), la composition en minéraux ou en sédiments, son effervescence, sa dureté, sa coloration, sa texture, sa masse volumique.

Cette identification repose essentiellement sur les caractéristiques observables à l'œil nu. Elle permet de différencier les principales catégories (ignées, sédimentaires, métamorphiques) de roches.

Il existe ce que l'on appelle une clé d'identification : c'est un ensemble de questions qui permettent selon les réponses de classer son échantillon dans une des catégories connues.

Exemple:

- Est-ce que la roche présente des fossiles?
- Est-ce que l'échantillon présente des trous, des cavités, des vides ou des vacuoles de plus de 1 mm de long?
- Est-ce que l'échantillon présente des éléments (cristaux, cailloux,...) dont la longueur est supérieure à 5 mm?
- Est-ce que la roche présente principalement des cristaux ou des grains de couleurs différentes?

Identification des minéraux

Les minéraux possèdent des propriétés physiques qui permettent de les distinguer entre eux et qui deviennent des critères d'identification. Ce qui attire d'abord l'œil, c'est bien sûr la couleur et la forme cristalline des minéraux, mais il y a bien d'autres propriétés. Plusieurs de ces propriétés peuvent être observées sans l'aide d'instruments et sont d'une grande utilité pratique.

Couleur: Il faut noter que la couleur doit être observée sur une cassure fraîche, car l'altération superficielle peut modifier la couleur, particulièrement chez les minéraux à éclat métallique.

Éclat: L'éclat des minéraux, c'est l'aspect qu'offre leur surface lorsqu'elle réfléchit la lumière.

Trait: Cette propriété se détermine sur la trace laissée par le minéral lorsqu'on frotte ce dernier sur une plaque de porcelaine non émaillée.

Dureté: La dureté d'un minéral correspond à sa résistance à se laisser rayer. Elle est variable d'un minéral à l'autre.

Densité: La densité des minéraux est une propriété mesurable. Elle est une constante physique qui caractérise un minéral donné.

Forme cristalline: Chaque minéral cristallise dans un système donné ce qu'on appelle un système cristallin. Un minéral donné reproduira toujours les mêmes formes régies par ce système.

Clivage: Le clivage est une propriété très importante des minéraux. Il correspond à des plans de faiblesse dans la structure cristalline. Puisqu'il s'agit de plans de faiblesse, un minéral va donc se briser facilement le long des plans de clivage, alors qu'il ne se brisera jamais selon ses faces cristallines.

Effervescence: Les minéraux de la classe des carbonates sont décomposés chimiquement par les acides. Cette réaction chimique dégage des bulles de gaz carbonique, un phénomène qu'on qualifie d'effervescence (un bouillonnement).

Propriétés optiques: Les propriétés optiques constituent un élément diagnostique fondamental dans l'identification d'un minéral. En géologie, les moyens techniques permettent d'amincir des tranches de minéraux collées sur des lamelles de verre si minces (30 micromètres) qu'elles deviennent tout à fait transparentes, pour être étudié au microscope. Chaque groupe de minéraux possède ses propriétés optiques, c'est-à-dire qu'ils transmettent différemment la lumière et qu'ils produisent des couleurs caractéristiques lorsqu'ils sont observés en lumière polarisée, ce qui, en bout de ligne, permet de les identifier.

3. Propriétés physiques des roches

3.1. Le milieu poreux

Dans les roches la matière minérale forme un squelette solide qui ne remplit pas tout l'espace, et dont le complément est appelé vide. La proportion de vide est appelée porosité. La forme des vides, leur taille, leur répartition, leurs liaisons ou au contraire l'isolement de certains, influent sur le comportement mécanique de la roche.

La **porosité n** est le rapport du volume des vides V_v au volume total V_t :

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

ou par rapport au volume du squelette V_s :

$$n = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t}$$

La porosité est de l'ordre du centième pour certains marbres et quartzites, du dixième pour beaucoup de roches sédimentaires, elle peut atteindre 0,5 pour certaines craies et tufs.

L'espace poreux peut être étudié de manière directe par observation au microscope optique ou électronique, éventuellement après remplissage par un produit colorant. Les techniques d'analyse d'images permettent ensuite une estimation quantitative de la porosité.

3.2. Masse volumiques et teneur en eau

On appelle **masse volumique** d'un matériau: la masse de l'unité de volume.

On définit, suivant l'état du matériau:

- la **masse volumique absolue** ou masse volumique du solide,

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s}$$

- la **masse volumique naturelle** à réception du matériau,

$$\gamma_h = \frac{M_h}{V_t}$$

- la **masse volumique sèche**,

$$\gamma_d = \frac{M_s}{V_t}$$

- la **masse volumique saturée** (après saturation de la roche) :

$$\gamma_{sat} = \frac{M_{sat}}{V_t}$$

avec M_s la masse du matériau sec, V_s le volume des grains après broyage, V_t le volume de l'échantillon, M_h la masse naturelle, M_{sat} la masse de l'échantillon saturé.

La **teneur en eau** w est le rapport de la masse d'eau, à la masse du solide sec:

$$w = \frac{M_w}{M_s}$$

Et on appelle **degré de saturation** S_r le rapport du volume de l'eau, au volume des vides:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{w}{\frac{\gamma_w}{\gamma_d} + \frac{\gamma_w}{\gamma_s}} = \frac{w\gamma_d}{n\gamma_s}$$

3.3. Circulation des fluides: (La perméabilité)

La perméabilité caractérise l'aptitude d'une roche (ou de tout autre milieu poreux) à laisser circuler des fluides au sein dans son espace poreux. La perméabilité d'une roche est entièrement déterminée par la géométrie de son réseau de porosité.

3.4. Propriétés acoustiques

La caractérisation des matériaux rocheux par des méthodes ultrasoniques est couramment utilisée. L'étude de la propagation des ondes dans un matériau à l'état sec et saturé permet d'évaluer les propriétés physiques du matériau telles que sa porosité, son état de fissuration et ses propriétés élastiques (module de Young, coefficient de Poisson). Ce paramètre est particulièrement intéressant pour l'analyse de l'anisotropie d'un matériau, soit structurale, soit liée à une microfissuration.

a- Propagation des ondes dans un milieu élastique

Pour une onde P, le mouvement vibratoire a lieu suivant la direction de propagation et affecte le volume de la roche. V_p est donc la vitesse d'une onde de **compression** (ou onde longitudinale). V_s est la vitesse d'une onde de **cisaillement** (ou onde transversale), dont le mouvement vibratoire a lieu dans un plan normal à la direction de propagation. Elles sont plus lentes que les ondes P et ne se propagent pas dans l'eau.

V_p et V_s étant exprimées en fonction des coefficients de Lamé, la mesure du temps de propagation d'une onde ultrasonique dans une roche permet de remonter aux modules élastiques. Dans le cas d'un matériau isotrope, le calcul du coefficient de Poisson ν et du module de Young E est le suivant :

$$\nu = \frac{1/2 - (V_s / V_p)^2}{1 - (V_s / V_p)^2}$$

$$E = \rho \frac{V_p^2 (1+\nu) (1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

Il est donc indispensable de mesurer V_p et V_s pour calculer E et ν ; trop souvent V_p est seul mesuré, E est déduit en supposant $\nu = 0,25$.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DES PRINCIPAUX MINÉRAUX

Minéraux	ρ_s (g/cm ³)	E (GPa)	ν	V_p (m/s)
Quartz	2,65	96,4	0,08	6 050
Olivine	3,2-3,6	216	0,24	8 770
Augite	3,2-3,6	14 3	0,24	7 330
Amphibole	2,9-3,2	110	0,29	6 800
Muscovite	2,7-3	80	0,25	5 880
Biotite	2,8-3,1	67	0,30	5 360
Orthose	2,5-2,6	63	0,29	5 680
Plagioclase	2,6-2,8	77	0,29	6 220
Magnétite	4,4-5,2	218	0,19	7 410
Calcite	2,7	84	0,28	6 320
Dolomie	2,8-3,1			7 900
Halite	2,1-2,6	36		4 320
Gypse	2,3-2,4			5 200

D'après Belikov (1967)

4. Propriétés thermiques des roches

4.1. La résistance au gel

C'est la capacité d'un matériau (roche) saturé d'eau de supporter la congélation et le dégel d'eau, sans montrer de signes de destruction ou de perte de résistance mécanique.

La destruction du matériau est provoquée par l'augmentation de 9% du volume de l'eau se trouvant dans les pores du matériau.

La plus grande **délimitation** de l'eau a lieu au moment de sa transformation en glace sous la température de (-40°C).

La résistance au gel d'un matériau dépend de sa densité (porosité) et du degré de saturation en eau.

Un matériau est considéré résistant au gel si après un nombre déterminé de cycles de congélation et de dégel en **état saturé** sa résistance diminue de moins de 15 % et si les pertes de poids et > 5 %.

Le coefficient de résistance au gel:

$$K_{Rg} = \frac{R_{Rg}}{R_{sat}}$$

où:

R_{Rg} : résistance à la compression du matériau après l'essai de résistance au gel.

R_{sat} : résistance à la compression du matériau saturé d'eau.

4.2. La conductibilité thermique

C'est la capacité d'un matériau (roche) de se laisser traversé par la chaleur. Elle est mesurée par le coefficient de conductibilité thermique (λ):

$$\lambda = \frac{Q.e}{(t_1 - t_2)S.T}$$

où:

Q: quantité de la chaleur.

e: épaisseur de l'échantillon.

S: surface de l'échantillon

$t_1 - t_2$: la différence de température entre les deux surfaces de l'échantillon.

T: temps nécessaire à (Q) pour traverser l'échantillon.

λ : la quantité de chaleur (1 W/m.K) qui traverse un échantillon d'épaisseur 1 m, de surface 1m², $\Delta t = t_1 - t_2 = 1^\circ \text{C}$, pendant T= 1 heure.

Les matériaux humides transfèrent mieux la chaleur que les matériaux sec, parce que la conductibilité thermique de l'eau est supérieur à celle de l'air.

VALEURS DE CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DES ROCHES

<i>Roches</i>	<i>Origine</i>	<i>Masse Volumique</i> kg/m ³	<i>Chaleur spécifique</i> J/kg.K	<i>Conductivité thermique</i> W/m.K
Grès	Vosges	2 650		2,7
Granite	Limousin	2 600	700	2,8
Ardoise	Angers	2 800	740	1,2 & 4,5
Argilite	Tournemire	2 340	815	0,7 & 2
Marne	Alsace	2 300	826	1,04 & 1,4
Argilite	Aisne	2 220	845	0,75 & 1,4
Calcaire	Euville	2 310	846	3,5
Sel		2160	870	6

Les deux valeurs de conductivité sont suivant les directions principales d'anisotropie

4.3. La capacité calorifique

C'est la capacité d'un matériau d'absorber une certaine quantité de chaleur en s'échauffant.

La capacité calorifique s'exprime par le coefficient de chaleur spécifique (C) qui est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de (1° C) la température de 1 kg de matériau:

$$C = \frac{Q}{M(t_1 - t_2)} \quad [\text{J/kg.}^\circ\text{C}]$$

où:

Q: quantité de la chaleur dépensée pour chauffer un matériau de température initiale t_1 à t_2 .

M: masse de matériau.

t_1 : avant chauffage.

t_2 : après le chauffage.

4.4. La réfractairité

C'est le pouvoir d'un matériau de résister à l'action continue de haute température sans se déformer ou fondre.

- Les Matériaux réfractaires: ils résistent à une température $> 1580^\circ\text{C}$
- Les Matériaux peu réfractaires: ils résistent à une température entre 1350 et 1580°C
- Les Matériaux fusibles: ils résistent à une température $< 1350^\circ\text{C}$

4.5. La résistance au feu

C'est la capacité d'un matériau de résister à l'action prolongée du feu sans perdre sa résistance. Cette propriété est importante en cas d'incendie.

4.6. Les paramètres intervenant sur les propriétés thermiques

Les principaux facteurs qui influencent les propriétés thermiques des roches sont :

- la variation de composition minérale et chimique;
- la structure;
- la température et les contraintes ;
- la porosité et la teneur en fluide.

5. Propriétés mécaniques des roches

5.1. La résistance mécanique

C'est la capacité d'un matériau de ne pas se détruire sous l'action de forces extérieures ou d'autres agents comme le changement de température.

Selon le mode d'application des forces extérieures on désigne:

- la résistance à la compression uniaxiale ou triaxiale
- la résistance à la traction

La résistance mécanique d'un matériau est caractérisée par la limite de sa résistance qui correspond à la charge de rupture.

La résistance mécanique d'une roche dépend de:

- la structure morphologique;
- la porosité et la teneur en fluides;
- la direction de chargement (anisotropie des roches).

5.1. Résistance à la compression

Elle se mesure expérimentalement en écrasant des éprouvettes. Dans ce cas on utilise des éprouvettes de forme cylindrique ou prismatique (L'AFNOR recommande une dimension minimale de 40 mm de diamètre).

La résistance à la compression est déterminée par:

$$R_c = \frac{P}{S}$$

P: La force de pression appliquée ayant causé la rupture

S: la surface transversale de l'éprouvette.

L'étendue des valeurs des résistances est grossièrement comprise entre 1 et 200 MPa. Les valeurs inférieures à 5 MPa correspondent à des roches qualifiées de « très tendres » ; des valeurs supérieures à 100 MPa caractérisent des roches dites « très résistantes ».

5.2. Resistance à la traction

Cette résistance est déterminée par un essai de traction indirect (l'essai Brésilien) sur une éprouvette cylindrique.

La résistance traction est déterminée par la formule:

$$R_t = \frac{2.P}{\pi.d.l}$$

P: charge d'écrasement à la rupture.

d: diamètre de l'éprouvette.

l: longueur de l'éprouvette.

5.3. La fragilité

Le rapport entre la résistance à la compression uniaxiale et la résistance à la traction donne un indice de fragilité, qui est une caractéristique importante de comportement. Ce rapport varie usuellement entre 5 (roche peu fragile) et 30 (roche très fragile).

5.4. La résistance à la fragmentation

L'essai Los Angeles est utilisé pour déterminer la résistance à la fragmentation d'un échantillon de granulat. Le coefficient Los Angeles obtenu est le pourcentage de l'échantillon initial passant au tamis de 1.6 mm après fragmentation dans un cylindre en présence de boulets d'acier. Plus le pourcentage Los Angeles (noté LA) est bas, plus l'échantillon est résistant à la fragmentation.

$$LA = 100 \times (m_0 - m) / m_0$$

Avec:

m_0 masse initiale des granulats = 5000 ± 5 g.

m masse du refus à 1.6 mm.

La machine Los Angeles, composée de:

- cylindre et d'un moteur. Le cylindre mesure à l'intérieur (508 ± 5) mm et a un diamètre de (711 ± 5) mm et fabriqué avec une tôle de 12 mm d'épaisseur. Le moteur doit permettre d'entraîner ce cylindre à une vitesse comprise entre 31 et 33 tours par minute et être équipé d'un compte tours permettant un arrêt automatique après 500 tours.

- boulets d'acier de diamètre compris entre 45 et 49 mm et de masse comprise entre 400 et 445 g.

5.4. La résistance à l'usure

L'essai Micro-Deval en présence de l'eau (MDE) est utilisé pour déterminer la résistance à l'usure par attrition d'un granulat.

L'essai est effectué comme suit:

- prise d'essai de 500 g lavée et séchée;
- mise en place dans un tambour avec 5kg de billes métalliques calibrées et 2.5 litres d'eau;
- appliquer une rotation de 12000 tours au tambour à la vitesse de 100 tours/ minutes;
- retirer alors la prise d'essai, pour lavage au-dessus d'un tamis de 1.6mm;
- peser le refus à ce tamis après séchage (m exprimée en g).

$$MDE = (500 - m)/5$$