

# Description des roches et des massifs rocheux

par **Jean-Louis DURVILLE**

*Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées  
Chef de la Division Mécanique des Sols  
et Géologie de l'Ingénieur au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

et **Hubert HÉRAUD**

*Ingénieur Géologue  
Chef du Groupe Sols-Roches au Centre d'Études Techniques de l'Équipement,  
Laboratoire Régional de Clermont-Ferrand*

<b>1. Généralités.....</b>	<b>C 352 - 2</b>
1.1 Classification des roches.....	— 2
1.2 Caractères généraux du massif rocheux .....	— 2
<b>2. Description et caractérisation de la matrice rocheuse.....</b>	<b>— 2</b>
2.1 Description pétrographique.....	— 2
2.2 Essais d'identification.....	— 2
2.3 Propriétés mécaniques.....	— 4
2.4 Propriétés diverses .....	— 5
<b>3. Description et propriétés des discontinuités .....</b>	<b>— 6</b>
3.1 Description d'une discontinuité.....	— 6
3.2 Étude structurale.....	— 7
3.3 Propriétés mécaniques.....	— 7
3.4 L'eau dans le massif .....	— 7
<b>4. Méthodes de reconnaissance des massifs rocheux .....</b>	<b>— 8</b>
4.1 Levé géologique de détail.....	— 8
4.2 Photo-interprétation .....	— 9
4.3 Sondages carottés.....	— 10
4.4 Enregistrement des paramètres de foration .....	— 10
4.5 Diagraphie microsismique.....	— 11
4.6 Diagraphie de radioactivité naturelle.....	— 11
4.7 Méthodes géophysiques.....	— 11
4.8 Essais mécaniques <i>in situ</i> .....	— 12
4.9 Essai Lugeon.....	— 12
<b>5. Conclusions .....</b>	<b>— 12</b>
<b>Pour en savoir plus.....</b>	<b>Doc. C 352</b>

**L**a description précise du massif rocheux – celle des roches qui en constituent la matrice et celle des discontinuités qui le traversent – est une phase indispensable de l'étude géomécanique d'un site, que le but soit la fondation d'un barrage, le percement d'un tunnel, le creusement d'un déblai, ou tout autre ouvrage en milieu rocheux. Cette description se fait sur le terrain et au laboratoire, à l'aide d'observations et de mesures diverses.

# 1. Généralités

Un massif rocheux tel que nous l'observons aujourd'hui résulte d'une longue histoire géologique, souvent complexe, qui comprend une phase de formation du matériau (dépôt et consolidation dans le cas d'une roche sédimentaire, cristallisation dans le cas d'une roche magmatique, etc.), une ou plusieurs phases de déformations tectoniques (avec formation de plis et de failles) et de transformations métamorphiques (foliation, recristallisation), et enfin une période d'altération météorique pour les parties proches de la surface.

Deux échelles d'étude sont adoptées : celle de la roche (échantillon de laboratoire ou affleurement ponctuel) et celle du massif rocheux qui est aussi celle de l'ouvrage.

## 1.1 Classification des roches

Une roche est un assemblage de minéraux, c'est-à-dire de cristaux (sauf quelques rares cas où existe une phase vitreuse). Le mécanicien des roches insistera sur la présence de défauts dans l'assemblage, pores ou fissures, qui influent fortement sur les propriétés du matériau.

Les géologues distinguent trois grandes catégories de roches en fonction de leur origine :

- les **roches magmatiques** (ou éruptives) résultent du refroidissement de magmas en fusion ;
- les **roches sédimentaires** se sont déposées dans les mers ou les lacs et sont formées par accumulation de particules détritiques (résultant de la désagrégation des roches par l'érosion) ou biogènes (formées grâce à l'activité d'organismes) ;
- les **roches métamorphiques** sont le produit de la transformation à l'état solide d'une roche préexistante, avec modifications structurales et en général apparition de nouveaux minéraux, sous l'influence de la pression et de la température.

La très grande variété des espèces minéralogiques et des roches a conduit les géologues à diverses classifications, faisant appel à de nombreux termes pétrographiques [1]. Une classification pétrographique simplifiée est présentée dans le tableau 1.

## 1.2 Caractères généraux du massif rocheux

Un massif rocheux est un milieu complexe (figure 1) :

- **discontinu** : le massif est composé de blocs plus ou moins monolithiques, séparés par des discontinuités qui constituent des sites de faiblesse mécanique et des lieux privilégiés de circulation d'eau ;
- **hétérogène** : des hétérogénéités existent à différentes échelles, comme par exemple : alternance de bancs durs et de bancs tendres, contacts tectoniques anormaux mettant en présence des formations très différentes, zones de dissolution karstique ou d'altération locale ;
- **anisotrope** : l'anisotropie peut apparaître dès la formation de la roche (disposition stratifiée des roches sédimentaires) ou en liaison avec le métamorphisme (foliation des gneiss et mica-schistes), ou lors de la fracturation subie lors d'un épisode tectonique, etc. ;
- **biphasique** puisque contenant de l'eau au sein des pores de la matrice rocheuse ou dans les discontinuités ; cette eau peut modifier notablement les propriétés de la roche comme celles des discontinuités, donc aussi le comportement du massif rocheux.



Figure 1 – Front de taille découpé au fil : le massif rocheux, milieu hétérogène, discontinu et anisotrope

# 2. Description et caractérisation de la matrice rocheuse

La description de la matrice rocheuse fait appel à des identifications et à des essais de laboratoire, dont les principaux sont décrits ci-après.

## 2.1 Description pétrographique

La description pétrographique consiste à déterminer la nature des différents minéraux, leur abondance relative, leur degré d'altération, leur taille et leur agencement, ainsi que l'existence éventuelle de pores. La figure 2 présente un exemple de roche observée en lame mince au microscope optique.

Le tableau 2 présente les caractéristiques de quelques minéraux courants.

## 2.2 Essais d'identification

Il s'agit d'essais simples, rapides, couramment pratiqués, et qui donnent, alliés à la description pétrographique, une image assez précise du matériau. Le tableau 3 présente quelques valeurs typiques de propriétés des roches les plus courantes.

### 2.2.1 Masse volumique réelle $\rho_r$

C'est la masse volumique de la roche sèche, quotient de la masse de l'échantillon par son volume (enveloppe extérieure, incluant les pores intérieurs). Elle s'exprime en  $\text{kg/m}^3$  ou en  $\text{t/m}^3$ . Il ne faut pas la confondre avec la masse volumique absolue  $\rho_a$ , qui est la masse volumique de la matière minérale ( $\rho_r \leq \rho_a$ ).

**Tableau 1 – Classification pétrographique simplifiée**

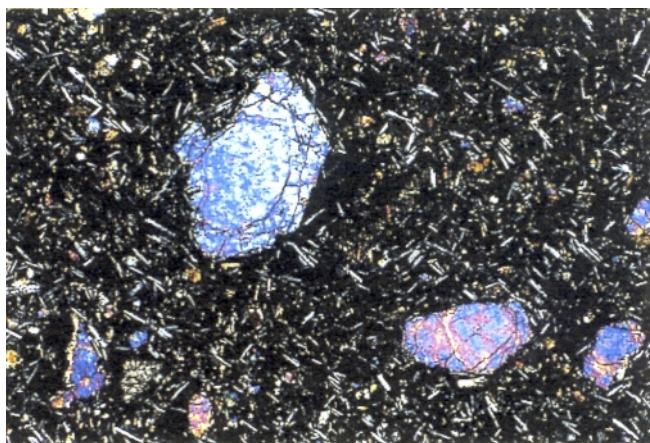
Famille		Teinte	Minéraux constitutifs	Principaux termes	Autres termes
Roches magmatiques	volcaniques	claire ↓ sombre	{ quartz feldspaths amphiboles pyroxène olivine	trachyte, rhyolite andésite basalte	dolérite
	plutoniques	claire ↓ sombre	{ quartz feldspaths amphiboles pyroxène	granite diorite gabbro	microgranite microdiorite monzonite péridotite
Roches métamorphiques	foliées	claire ↓ sombre	{ quartz micas amphibole	gneiss, micaschiste amphibolite	leptynite
	non foliées			marbre, cornéenne	
Roches sédimentaires	détritiques	sombre ↓ claire	{ argiles calcite quartz	pélites marnes grès	argilites
	biogènes et /ou chimiques		{ carbonates, sulfates, etc.	calcaires, craie, dolomies, gypse	meulière, charbon

**Tableau 2 – Quelques propriétés des minéraux courants**

Minéraux		Masse volumique (t/m <sup>3</sup> )	Dureté Vickers (HV)	Vitesse des ondes longitudinales (m/s)	Observations
Silicates	Quartz .....	2,65	1 250 à 1 400	6 050	inaltérable
	Feldspaths.....	2,55 à 2,75	650 à 800	5 800 à 6 200	
	Mica blanc.....	2,8 à 2,9	70 à 85	5 800	très anisotrope
	Mica noir .....	2,8 à 3,3	90	5 100	très anisotrope
	Amphiboles.....	3 à 3,4	730	7 200	anisotrope
	Olivine .....	3,2 à 3,6	820	8 400	
Autres	Calcite.....	2,71	110 à 120	6 650	un peu soluble dans l'eau
	Dolomite.....	2,85 à 2,9	250 à 400	7 500	
	Gypse .....	2,3 à 2,4	50 à 70	5 200	soluble dans l'eau

**Tableau 3 – Quelques valeurs typiques des caractéristiques des roches les plus courantes (roches saines)**

Roche	$\rho_r$ (t/m <sup>3</sup> )	$n$ (%)	$v_l$ (m/s)	$R_c$ (MPa)	$L_A$	$M_{DE}$	$A_{BR}$
Granites.....	2,6 à 2,7	≤ 1	4 500 à 6 000	170 à 260	15 à 25	6 à 13	900 à 1 500
Microgranites..	2,6	< 1	4 500 à 6 000	200 à 350	10 à 18	5 à 10	1 500 à 2 000
Basaltes .....	2,8 à 3,0	0 à 2	5 500 à 7 000	200 à 400	11 à 17	5 à 10	500 à 2 000
Calcaires.....	2,6 à 2,7	0 à 5	5 600 à 6 500	80 à 260	18 à 40	14 à 40	10 à 50
	2,3 à 2,6	5 à 15	4 000 à 5 800	35 à 150	25 à 65	25 à 60	0 à 20
	1,8 à 2,3	15 à 35	2 000 à 4 300	8 à 80	30 à 100	40 à 100	0
Grès .....	2,5 à 2,6	0 à 5	3 000 à 5 500	40 à 250	12 à 25	3 à 30	600 à 2 200
	2,2 à 2,5	5 à 20	2 500 à 5 000	20 à 200	25 à 80	20 à 100	100 à 600
Cornéennes.....	2,6 à 2,7	≤ 1	5 000 à 6 500	160 à 200	10 à 16	5 à 15	800 à 900
Gneiss.....	2,6 à 2,7	≤ 2	4 000 à 5 500	140 à 250	12 à 28	5 à 14	1 000 à 1 800
Amphibolites ..	2,8 à 3,0	≤ 1	5 500 à 6 000	160 à 250	8 à 20	5 à 22	900 à 1 500



**Figure 2 – Photographie de lame mince de basalte au microscope polarisant.** On observe les grands cristaux d’olivine (le plus grand fait environ 1 mm de longueur), les nombreuses paillettes de feldspath et une pâte sombre amorphe

2.2.2 Porosité  $n$

C’est le rapport du volume de l’espace poreux, c’est-à-dire des vides inclus dans la roche, au volume de l’éprouvette (enveloppe extérieure) :

$$n = \frac{V_v}{V} = 1 - \frac{\rho_r}{\rho_a}$$

avec  $V_v$  volume des vides,  
 $V$  volume de l’échantillon.

La porosité s’exprime le plus souvent en pour-cent.

2.2.3 Degré de saturation  $S_r$

C’est le pourcentage de l’espace poreux qui est occupé par l’eau, dans l’état considéré. En profondeur, à l’état naturel, le degré de saturation est de 100 %.

2.2.4 Vitesse du son  $v_\ell$  et indice de continuité  $I_C$

La vitesse de propagation des ondes longitudinales  $v_\ell$  est calculée à partir de la mesure du temps de propagation des ondes à travers une éprouvette. Cette quantité est sensible à la porosité et surtout à la microfissuration de la roche : la vitesse du son d’un granite sain (6 000 m/s environ) chute à moins de 3 000 m/s dans un granite très altéré. Le calcul de l’indice de continuité  $I_C$ , rapport de la vitesse mesurée à la vitesse théorique (moyenne pondérée des vitesses des minéraux constitutifs), permet ainsi d’appréhender la « qualité » de la roche [2]. À l’aide de la porosité  $n$ , on peut aussi quantifier le degré de fissuration en calculant l’indice  $D_f$  (figure 3) :

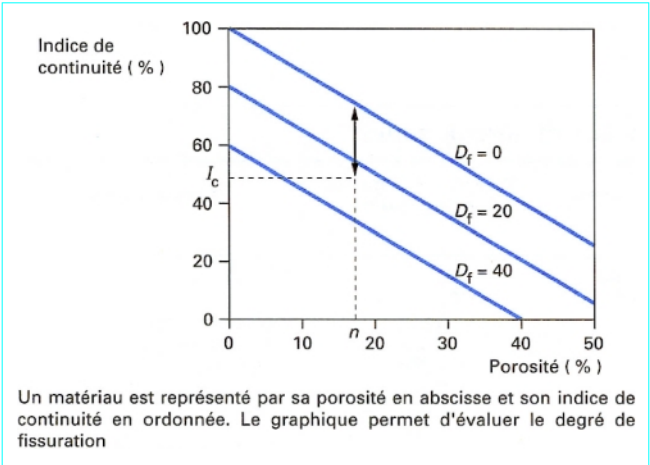
$$D_f = 100 - 1,5 \, n - I_C$$

$n$  et  $I_C$  étant exprimés en pour-cent.

En mesurant la vitesse  $v_\ell$  dans différentes directions, on peut aussi apprécier l’anisotropie d’une roche. On définit l’indice d’anisotropie par :

$$I_A = \frac{v_{\ell \max}}{v_{\ell \min}}$$

qui vaut 1 pour une roche isotrope et atteint environ 2 dans certaines ardoises.



**Figure 3 – Indice de continuité et degré de fissuration**

2.3 Propriétés mécaniques

On se reportera au tableau 3 pour des exemples de résultats d’essais mécaniques.

2.3.1 Résistance en compression

L’essai mécanique le plus courant est l’essai de résistance en compression uniaxiale ( $R_c$ ). Celle-ci est mesurée sur éprouvette cylindrique, de diamètre 40 à 50 mm en général. On fait croître l’effort axial fourni par la presse, avec une vitesse correspondant à environ 0,5 MPa/s, jusqu’à la rupture de l’éprouvette. Si  $F$  est l’effort maximal et  $R$  le rayon de l’éprouvette, on a :

$$R_c = \frac{F}{\pi R^2}$$

La résistance en compression simple est une propriété assez dispersée ; on réalise en général cinq écrasements pour obtenir une valeur représentative. Le tableau 4 fournit une échelle de résistance couramment employée.

Tableau 4 – Classes de résistance en compression uniaxiale (d’après [3])		
Classe	Résistance $R_c$ (MPa)	Description
R1	> 200	Résistance très élevée
R2	200 à 60	Résistance élevée
R3	60 à 20	Résistance moyenne
R4	20 à 6	Résistance faible
R5	< 6	Résistance très faible

Certaines roches, comme les calcaires tendres, sont sensiblement moins résistantes à l’état saturé qu’à l’état sec : la perte de résistance peut atteindre 50 %.



### 2.3.2 Résistance à la traction

La **résistance à la traction directe** est obtenue par traction jusqu'à la rupture d'une éprouvette cylindrique dont les extrémités ont été collées sur des têtes métalliques. En moyenne, elle est voisine de  $R_c/10$ .

L'essai de **résistance à la traction indirecte**, dit aussi **essai brésilien**, est réalisé en comprimant entre les plateaux de la presse une éprouvette cylindrique le long de deux génératrices opposées (figure 4) : la rupture est obtenue par traction au centre de l'éprouvette. On évite ainsi les difficultés de collage des têtes et la dispersion des valeurs est moins grande que dans l'essai direct. Si  $P$  est l'effort fourni par la presse au moment de la rupture,  $R$  le rayon de l'éprouvette et  $H$  sa hauteur, la résistance à la traction indirecte est donnée par :

$$R_{tb} = \frac{P}{\pi R H}$$

L'essai Franklin est un essai de rupture par traction sous charge ponctuelle, simple à réaliser mais assez dispersé [3].

### 2.3.3 Paramètres de déformabilité

La mesure des déformations lors d'une compression uniaxiale permet de déterminer les paramètres élastiques de déformabilité de la roche (figure 5) : module d'Young (pente de la courbe de déformation longitudinale) et coefficient de Poisson (rapport de la déformation transversale à la déformation longitudinale). Le module d'Young est typiquement compris entre 8 et 80 GPa. Le coefficient de Poisson se situe entre 0,1 et 0,4.

## 2.4 Propriétés diverses

Des essais, en général de nature empirique, permettent de quantifier certaines propriétés des matériaux rocheux utilisés en génie civil. Le tableau 3 présente des valeurs de résultats d'essais.

### 2.4.1 Essai Los Angeles

Cet essai a pour but d'évaluer la résistance à la fragmentation par chocs. Les gravillons testés sont en général de granularité 6-10, 10-14 ou 25-50 mm. Un broyeur cylindrique à boulets (figure 6) fragmente les gravillons, pendant 500 ou 1 000 révolutions suivant la granularité, puis on tamise à 1,6 mm. Le coefficient Los Angeles est défini par :

$$L_A = 100 \frac{m}{M}$$

avec  $m$  (g) masse du passant au tamis de 1,6 mm,  
 $M$  (g) masse initiale de granulats.

### 2.4.2 Essais Deval et micro-Deval

La production de fines par frottement des granulats entre eux ou au contact d'outils métalliques est liée aux propriétés d'usure ou d'attrition de la roche. On distingue en général l'essai à sec et l'essai en présence d'eau, ce qui permet de mettre en évidence les roches sensibles à l'eau.

L'essai Deval porte sur 7 kg de granulats 25-50 mm. Il est aujourd'hui souvent remplacé par l'essai micro-Deval décrit sommairement ci-après.

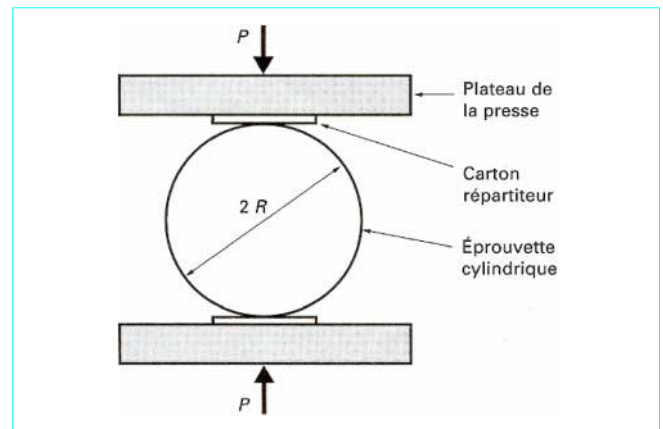


Figure 4 – Essai de traction indirecte (brésilien)

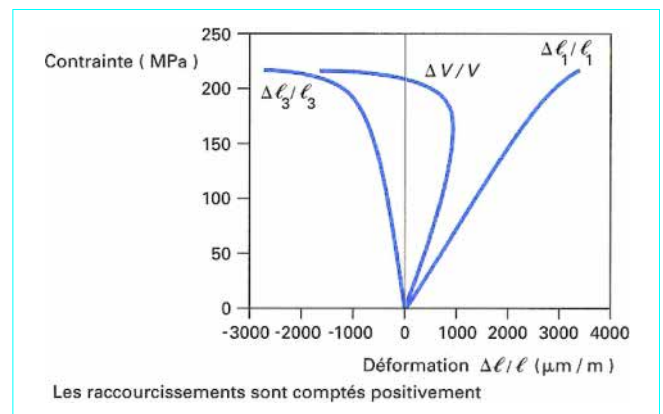


Figure 5 – Essai de compression uniaxiale sur un gneiss : déformation longitudinale ( $\Delta \ell_1 / \ell_1$ ), transversale ( $\Delta \ell_3 / \ell_3$ ) et volumique ( $\Delta V / V$ )



Figure 6 – Machine Los Angeles  
 (le diamètre du tambour est d'environ 71 cm)

Le principe est analogue à celui de l'essai Los Angeles, avec une charge plus légère (billes) et une durée de rotation plus longue : il n'y a pas de fragmentation, mais seulement une usure. Le coefficient  $M_{DE}$  (essai micro-Deval effectué en présence d'eau) est défini par :

$$M_{DE} = 100 \frac{m}{M}$$

avec  $m$  (g) masse du passant au tamis de 1,6 mm,  
 $M$  (g) masse initiale de granulats.

2.4.3 Abrasivité

L'abrasivité caractérise la capacité d'une roche à provoquer l'usure d'un outil tel que pièce de concasseur, taillant de forage (tableau 5), molette ou pic de machine foreuse ; cette propriété est importante pour les travaux d'exploitation des matériaux rocheux, en souterrain comme à ciel ouvert. Elle dépend à la fois de la teneur en minéraux durs (quartz notamment) et de la résistance de l'assemblage des grains (cohésion de la roche).

Tableau 5 – Durée de vie (mesurée en mètre foré) d'un taillant de forage, pour des roches peu abrasives et abrasives		
Taillant de forage	Longueur forée (m)	
	Roche abrasive	Roche peu abrasive
Taillant fileté à picots ≥ 64 mm ou taillant fond de trou à picots.....	400 à 1 000	1 200 à 2 500
Taillant fileté à plaquettes .....	200 à 400	800 à 1 000
Fleuret monobloc .....	150 à 200	600 à 800

Pour estimer l'abrasivité d'un matériau, on peut utiliser l'abrasimètre LCPC, constitué d'un pot métallique que l'on remplit de granulats 4/6,3 mm, et dans lequel tourne à grande vitesse une palette métallique (figure 7). La perte de poids subie par la palette après 5 min de rotation, exprimée en mg d'acier, est divisée par la masse en kg de granulats traités : on obtient ainsi l'indice  $A_{BR}$  de la roche. On estime en général que des valeurs supérieures à 1 500 peuvent conduire à de fortes usures d'outils.

2.4.4 Forabilité

La forabilité d'une roche exprime la facilité avec laquelle un outil de forage pénètre dans la roche. Elle dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier de la résistance, dureté et texture de la matrice rocheuse, et de son abrasivité.

Certains essais, généralement utilisés dans les pays anglo-saxons, ont pour but de quantifier la forabilité. Il ne faut pas perdre de vue toutefois que la forabilité *in situ* dépend aussi de la densité de discontinuités.

2.4.5 Altérabilité

On appelle altérabilité la sensibilité d'une roche aux modifications du milieu environnant. La sensibilité au gel peut être évaluée par mesure de l'évolution de la résistance à la fragmentation (Los Angeles) d'un matériau soumis à des cycles de gel-dégel. L'altération physico-chimique traduit la capacité de gonflement, de délitage ou de dissolution d'une roche.



Figure 7 – Abrasimètre LCPC : palette métallique (après essai) et pot de granulats

Divers essais existent pour quantifier l'altérabilité d'une roche ; aucun cependant ne s'est véritablement imposé.

En France, pour la réutilisation en terrassement des matériaux rocheux, a été défini un coefficient de dégradabilité, fondé sur l'évolution granulométrique de granulats après des cycles d'immersion-séchage conventionnels : l'essai met bien en évidence le caractère évolutif des roches marneuses ou schisteuses.

3. Description et propriétés des discontinuités

Les discontinuités ont différentes origines géologiques : joints sédimentaires, foliations, diaclases, failles, schistosité. Les premiers sont liés à des interruptions de sédimentation (minces lits argileux entre deux bancs, par exemple) ; la foliation est due à la disposition en lits de minéraux micacés dans les roches métamorphiques ; les autres discontinuités correspondent à des ruptures mécaniques.

3.1 Description d'une discontinuité

Une discontinuité est, au moins localement, assimilable à une portion de plan. Il faut d'abord noter ses caractéristiques géométriques : orientation, extension spatiale dans son plan, existence ou non de ponts rocheux. Ces deux dernières caractéristiques ne sont en général accessibles qu'indirectement, d'après la trace de la discontinuité visible à l'affleurement ou sur un talus.

Les différentes conventions de mesure de l'orientation d'un plan reviennent toutes à la mesure d'un azimut et d'un pendage (figure 8), effectuée sur le terrain à la boussole. On utilise soit la direction (angle

$\alpha$ ) et le pendage ( $\beta$ ), soit le vecteur-pendage  $\vec{P}$  caractérisé par son azimut (à 90° de l'angle  $\alpha$ ) et son pendage  $\beta$ .

La description de la discontinuité comporte également des indications sur le remplissage (continu, argileux, humide, par exemple) et sur les épontes (c'est-à-dire les parois) avec leur degré d'altération, la hauteur et la longueur d'onde des aspérités, leur degré d'imbrication, etc. Toutes ces caractéristiques ont une grande influence sur les propriétés mécaniques et hydrauliques de la discontinuité.

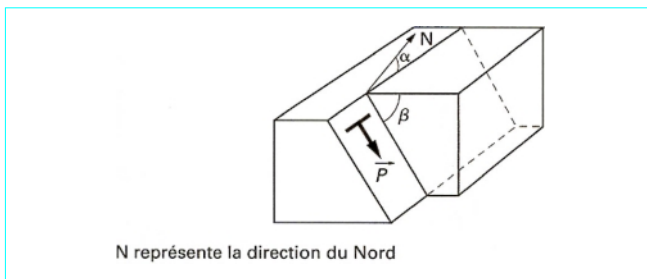


Figure 8 – Définition de la direction  $\alpha$ , du pendage  $\beta$  et du vecteur-pendage  $\vec{P}$  d'un plan

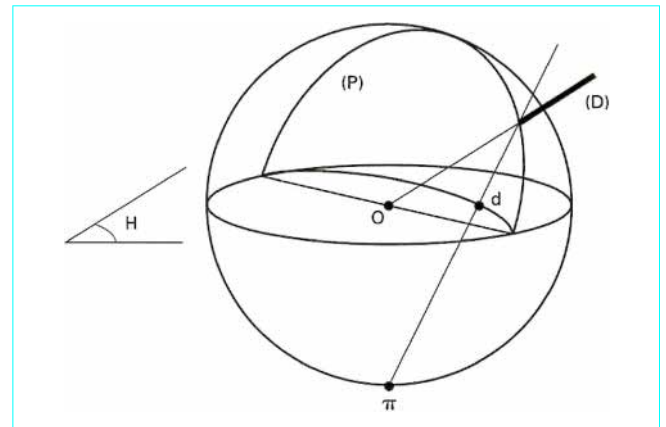


Figure 9 – Principe de la projection stéréographique, à partir du pôle inférieur  $\pi$

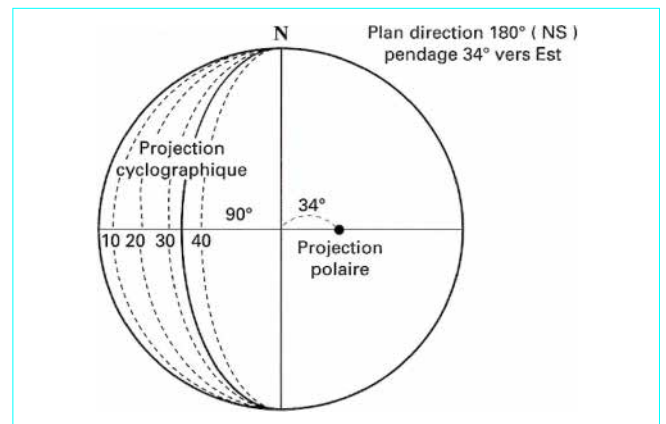


Figure 10 – Projection stéréographique d'un plan : représentation polaire et cyclographique

frottement. Un angle de frottement résiduel, après grand déplacement, peut aussi être défini ; il est le plus souvent compris entre 25 et 35° (discontinuité sans remplissage). Par ailleurs, le cisaillement s'accompagne d'une ouverture de la discontinuité, appelée **dilatance** (figure 13), du fait des aspérités des épontes.

### 3.4 L'eau dans le massif

La perméabilité des roches étant en général très faible, les circulations d'eau dans le massif se font en majeure partie par les discontinuités : c'est ce qu'on appelle la perméabilité « en grand » des massifs rocheux, opposée à la perméabilité « en petit » des sols. Si le régime de l'écoulement dans la discontinuité est laminaire, on peut admettre que la vitesse d'écoulement  $v$  est donnée par :

$$v = k i$$

où  $i$  est le gradient hydraulique. Le coefficient  $k$  est appelé conductivité hydraulique de la discontinuité et s'exprime en m/s.

## 3.2 Étude structurale

La représentation sur un plan de l'orientation des discontinuités du site constitue une phase essentielle de la description des massifs rocheux. Elle s'effectue à l'aide de la projection stéréographique qui a l'avantage de conserver les angles (figure 9) : les éléments structuraux tels que la droite D et le plan P, supposés passer par le centre O de la sphère, coupent l'hémisphère supérieur respectivement suivant un point ou un arc de grand cercle, que l'on projette sur le plan horizontal de projection (le point d est donc la projection de la droite D). Un plan est donc représenté par un arc de cercle (représentation cyclographique), mais on peut aussi tracer son pôle qui est la projection de la direction de droite normale au plan (représentation polaire) : figure 10. Le report des relevés de terrain peut être fait manuellement, à l'aide du canevas de Wulff gradué de 2 en 2 degrés, ou automatiquement avec des logiciels appropriés.

Les discontinuités repérées sur le terrain sont souvent regroupées en familles ; on définit pour chacune une direction de plan moyenne. Pour l'étude statistique des directions, on utilise la représentation polaire des plans, dans une projection qui conserve les aires (figure 11a). Sur la figure 11b, on a représenté par projection stéréographique les plans moyens des trois familles majeures identifiées sur la figure 11a, ainsi que le plan d'un talus (direction N-S) : l'analyse des intersections de ces plans entre eux permet de mettre en évidence la possibilité d'instabilité d'un dièdre limité par les plans 1 et 3.

L'estimation de l'espacement moyen et de la dimension moyenne des discontinuités d'une famille contribue à l'appréciation de la densité de discontinuités. Celle-ci est aussi estimée de façon globale, toutes familles confondues, par l'évaluation de l'intervalle de discontinuités mesuré selon une ligne (cf. § 4.3).

## 3.3 Propriétés mécaniques

### 3.3.1 Action normale

Sous un effort de compression, une discontinuité a tendance à se refermer ; on observe que sa raideur (donnée par la pente de la courbe) augmente avec la contrainte (figure 12). Un déchargement laisse apparaître en général un déplacement résiduel.

La résistance en traction d'une discontinuité doit en général être considérée comme quasi nulle.

### 3.3.2 Action tangentielle

Le cisaillement d'une discontinuité sous contrainte normale constante, tel que pratiqué dans une boîte de cisaillement, permet de définir les caractéristiques de résistance de pic : cohésion et

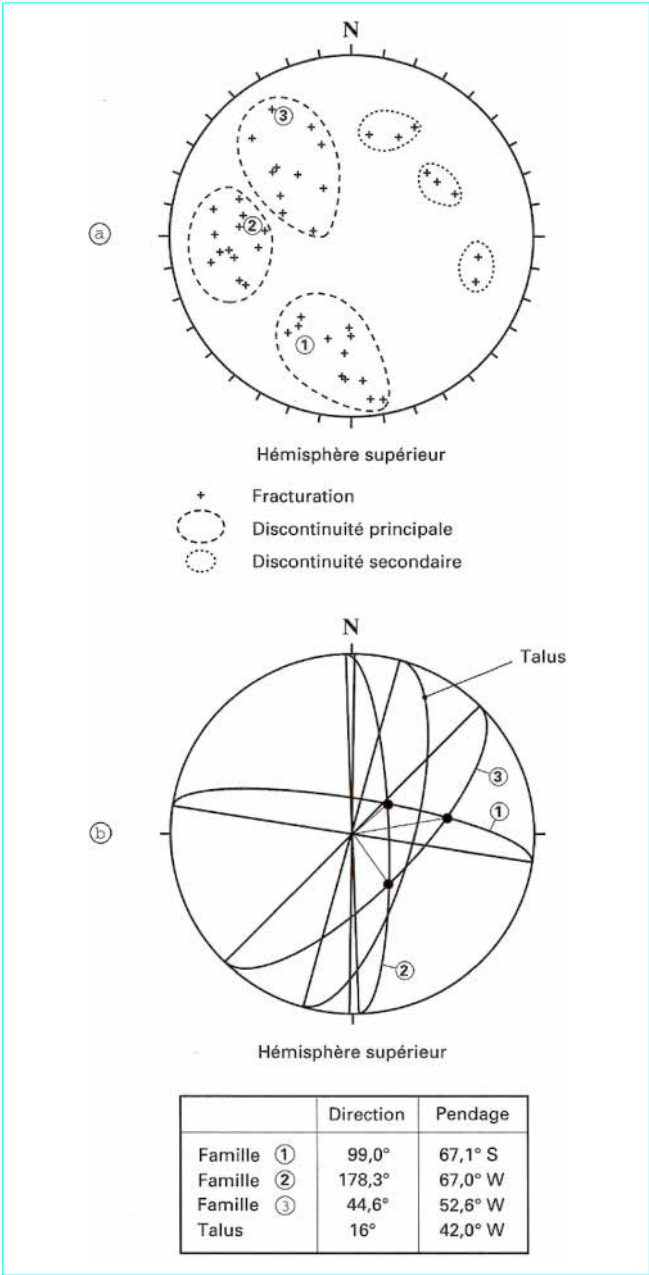


Figure 11 – Exemple de relevé structural : représentation polaire des plans repérés avec identification de trois familles principales (a) et représentation cyclographique des plans moyens des trois familles ainsi que du plan d’un talus (b)

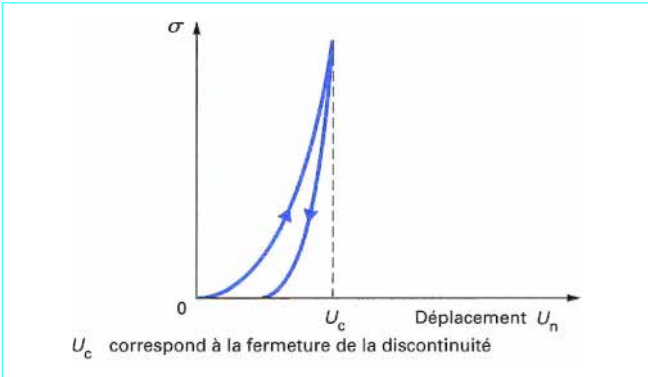


Figure 12 – Comportement d’une discontinuité sous contrainte normale

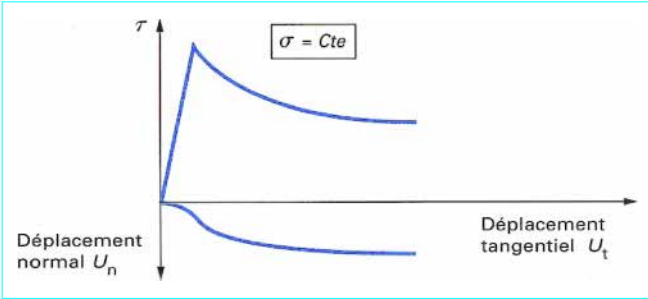


Figure 13 – Essai de cisaillement d’une discontinuité

## 4. Méthodes de reconnaissance des massifs rocheux

La reconnaissance des massifs rocheux a pour but d’identifier les matériaux présents, d’en prélever des échantillons pour étude en laboratoire, et de repérer les variations et anomalies locales telles que zones broyées, karsts, etc. Il est particulièrement important de connaître, soit par observation directe lorsque cela est possible, soit par des procédés d’auscultation indirecte, la répartition des discontinuités dans l’espace, leurs caractéristiques et leur densité. Enfin, l’étude de terrain peut être complétée par des essais *in situ* permettant d’évaluer certaines propriétés mécaniques ou hydrauliques du massif.

### 4.1 Levé géologique de détail

Un levé géologique est effectué à une échelle comprise entre 1/1 000 et 1/100, afin de localiser les principaux affleurements et les observations qui s’y rapportent.

L’observation directe d’un affleurement rocheux montre généralement une matrice rocheuse affectée de discontinuités organisées en familles. Le relevé de ces discontinuités peut être intégral (par exemple en galerie, sur un plan de la voûte et des piedroits rabattus) ou échantillonné selon une ou plusieurs lignes droites. On estime qu’il faut effectuer 200 à 300 mesures de pendage pour une étude structurale de difficulté moyenne.



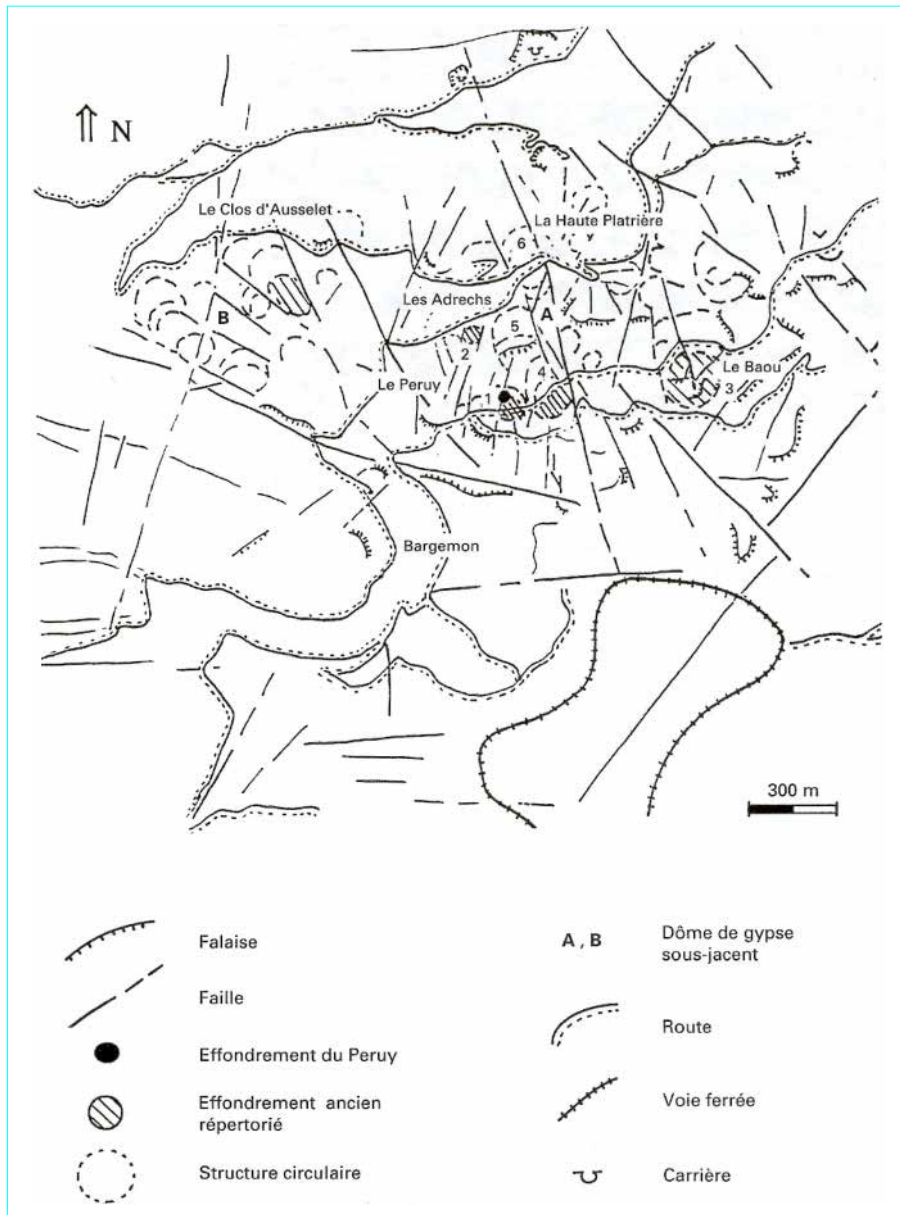
Le géologue structural doit éviter certains pièges tels que ceux-ci :

- dans l'observation d'une paroi de falaise, la représentation des discontinuités de direction parallèle à cette paroi est très réduite et l'échantillonnage est donc biaisé ;
- dans un versant, le fauchage des terrains peut modifier leur pendage sur des épaisseurs dépassant parfois la dizaine de mètres.

Le recours à la tranchée d'essai, outre le fait de créer un nouveau point d'observation, peut apporter des précisions sur certains éléments : possibilité d'extraction, possibilité de fragmentation au tir, vibrations transmises lors des tirs, coefficient de foisonnement, stabilité des talus, etc.

## 4.2 Photo-interprétation

L'étude d'un site rocheux devrait toujours inclure l'observation des photographies aériennes qui permettent de s'éloigner et de prendre du recul par rapport à l'affleurement. L'examen stéréoscopique des photographies aériennes, avec différents types d'émulsion, à différentes dates et à différentes échelles, peut ainsi fournir des éléments précis sur les directions générales de fracturation, sur la présence de zones faillées ou altérées, de venues d'eau, d'anciens karsts, etc. (figure 14).



**Figure 14 – Exemple de photo-interprétation**  
(document communiqué par P. Pothérat) :  
**recherche de dissolutions du gypse**  
**pouvant entraîner des effondrements**  
**dans la région de Bargemon (Var)**

4.3 Sondages carottés

La réalisation de sondages carottés reste la méthode la plus classique, en l'absence d'affleurements significatifs, pour obtenir des informations sur le matériau rocheux, son état d'altération, ses hétérogénéités, etc. Il s'agit toujours d'une opération longue, délicate et coûteuse. On a donc intérêt à valoriser au maximum les renseignements fournis par cette investigation. L'implantation et l'orientation d'un sondage carotté doivent tenir compte des investigations antérieures et des observations de surface. Dans le cas de structure très redressée ou verticale, le sondage sera incliné de manière à recouper le maximum de discontinuités.

Après réalisation du sondage, les caisses de carottes sont répertoriées, numérotées et photographiées (figure 15). Des échantillons sont ensuite soumis aux essais décrits au paragraphe 2.

La **densité de fracturation** du massif peut être évaluée à partir de nombreux paramètres, parmi lesquels on peut citer :

— le *RQD (Rock Quality Designation)*, paramètre de qualité de la roche, qui est défini comme suit :

RQD = (Σ (longueurs de carottes > 10 cm) / longueur de sondage considéré) × 100

Les éléments de longueur inférieure à 10 cm ne sont pas pris en compte car considérés comme liés aux discontinuités elles-mêmes ;

— l'intervalle entre discontinuités *I<sub>D</sub>* qui est la distance moyenne séparant deux discontinuités successives le long d'une ligne de mesure (tableau 6) ; dans un sondage carotté, c'est la longueur moyenne des carottes : plusieurs valeurs peuvent être fournies, relatives à différentes profondeurs du sondage.

Tableau 6 – Classes de densité de discontinuités mesurée selon une ligne, d'après l'intervalle entre discontinuités *I<sub>D</sub>* [3]

Classe	Intervalle (cm)	Description
<i>I<sub>D</sub>1</i>	> 200	Densité très faible
<i>I<sub>D</sub>2</i>	200 à 60	Densité faible
<i>I<sub>D</sub>3</i>	60 à 20	Densité moyenne
<i>I<sub>D</sub>4</i>	20 à 6	Densité forte
<i>I<sub>D</sub>5</i>	< 6	Densité très forte

L'information la plus complète est donnée par l'histogramme des longueurs de carottes (figure 16).

Si nécessaire, on peut faire orienter les carottes lors du prélèvement, ce qui permet d'estimer non seulement le pendage mais aussi la direction des discontinuités ; on peut citer les techniques suivantes : prise d'empreinte de la paroi du forage par application d'un film déformable [4], auscultation des parois du forage par caméra vidéo ou par méthodes électromagnétiques ou acoustiques [5], coulage de plâtre au fond du forage et orientation avant chaque passe, etc.

4.4 Enregistrement des paramètres de foration

Les forages destructifs, moins coûteux et plus rapides que les sondages carottés, peuvent être valorisés par l'enregistrement des paramètres de foration. La plupart des foreuses peuvent être



Figure 15 – Sondage carotté : photographie de caisse de carottes

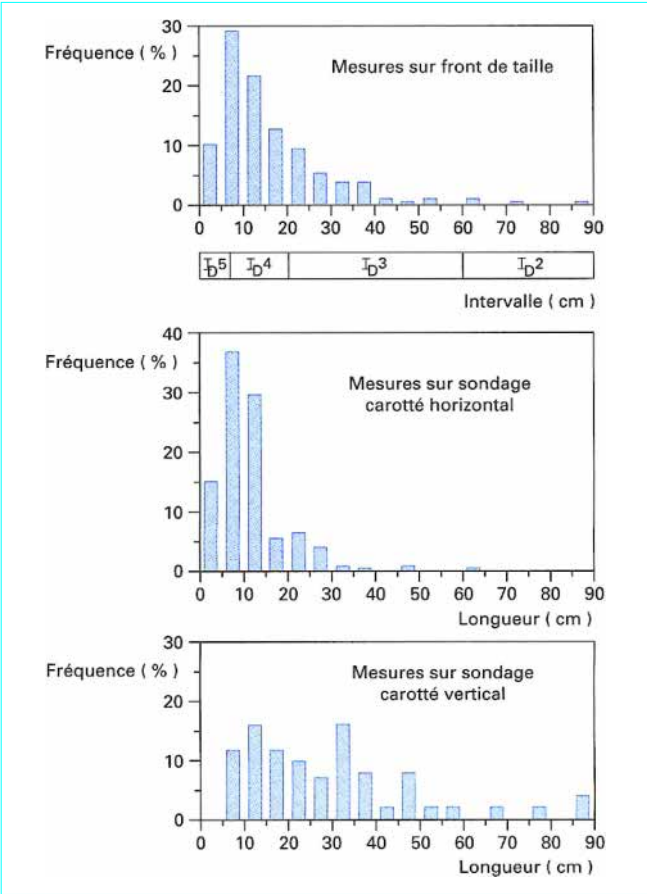


Figure 16 – Histogrammes de longueurs de carottes dans deux sondages d'orientations différentes, comparés à un histogramme des intervalles entre discontinuités mesurés sur affleurement

équipées d'enregistreurs permettant d'analyser la vitesse d'avancement instantanée, le couple de rotation, la poussée sur l'outil, la pression du fluide de perforation, la vitesse de rotation, etc.

Le choix des paramètres enregistrés dépend du problème à étudier. La méthode est bien adaptée à la reconnaissance de l'altération et des hétérogénéités des massifs rocheux telles que failles, discontinuités ouvertes, cavités karstiques [6].

#### 4.5 Diagraphie microsismique

Le lecteur pourra se reporter à la référence [7]

Elle consiste à mesurer, à l'aide d'une sonde plaquée sur la paroi d'un forage, le temps de trajet d'une onde mécanique sur un parcours de longueur fixe. La sonde (figure 17) comporte un émetteur, constitué d'un petit marteau pneumatique, et un ou deux récepteur(s) ; elle est déplacée à l'intérieur du forage selon un pas régulier (33 ou 50 cm en général).

La méthode peut être mise en œuvre dans les forages destructifs ou carottés, verticaux ou inclinés, avec ou sans eau. Elle permet notamment de repérer le rocher compact, les hétérogénéités, les zones fissurées ou décomprimées, etc. (figure 18).

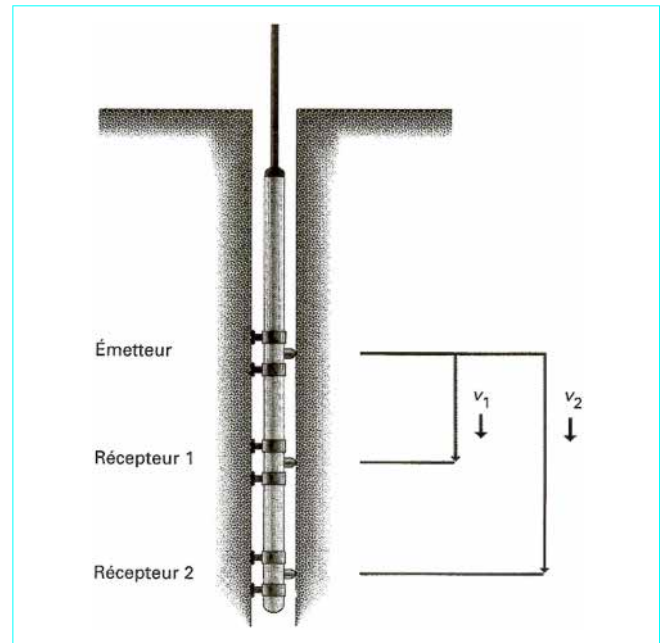


Figure 17 – Principe de la diagraphie microsismique

#### 4.6 Diagraphie de radioactivité naturelle

Le lecteur pourra se reporter à la référence [7]

Une sonde descendue dans un forage est sensible à la présence, en quantités infimes, d'éléments radioactifs. La méthode est bien adaptée à la reconnaissance des terrains sédimentaires où les niveaux argileux constituent d'excellents repères.

#### 4.7 Méthodes géophysiques

Différentes méthodes géophysiques, de type sismique, gravimétrique ou électromagnétique, peuvent être utilisées pour l'étude des massifs rocheux [7]. Elles doivent faire l'objet d'un étalonnage sur le site, par exemple avec un sondage carotté.

##### 4.7.1 Sismique-réfraction

Les ondes sismiques émises en surface se propagent dans le sol à des vitesses qui vont de moins de 1 000 m/s pour les terrains complètement altérés à près de 6 000 m/s pour certains massifs rocheux compacts. L'appareillage comprend un émetteur (marteau ou charge explosive), un récepteur constitué par un ou plusieurs géophones distants de quelques mètres ou décimètres de l'émetteur et un amplificateur permettant soit l'enregistrement du signal, soit l'arrêt d'un chronomètre électronique. La méthode permet de définir différentes couches caractérisées par leur vitesse de propagation qui dépend de l'état de compacité, de fracturation et d'altération du matériau ; elle est classiquement utilisée pour prévoir les modes de terrassement des déblais rocheux.

##### 4.7.2 Tomographie sismique

Le lecteur pourra se reporter à la référence [8]

La méthode permet de réaliser une coupe du massif entre deux forages, fournissant la répartition des vitesses sismiques dans le plan de coupe. Plusieurs capteurs sont disposés dans un forage, et l'émetteur est déplacé dans l'autre forage : la surface auscultée est ainsi parcourue par un grand nombre de rais sismiques dont on mesure le temps de propagation, et la résolution du problème inverse permet d'obtenir une image du panneau en vitesse (figure 19).

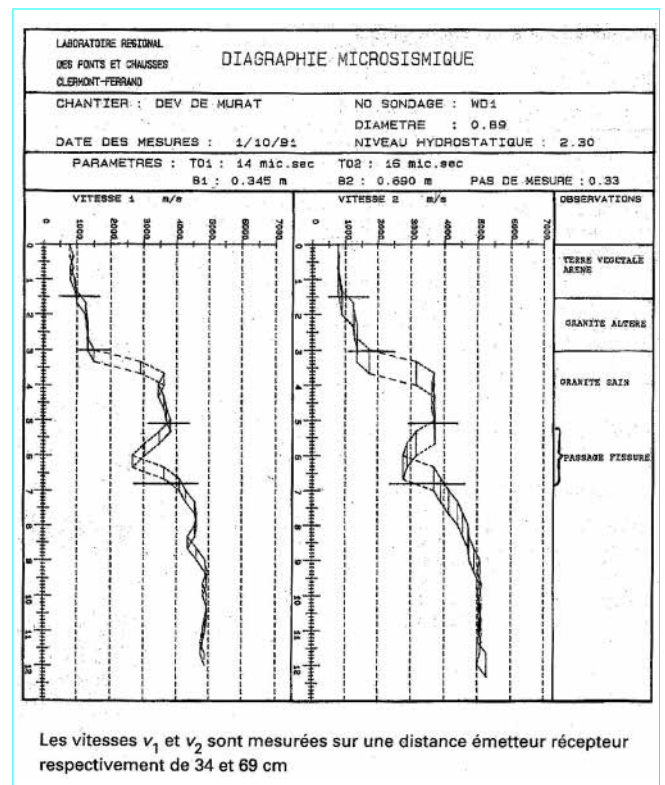


Figure 18 – Exemple de diagraphie microsismique dans un massif granitique

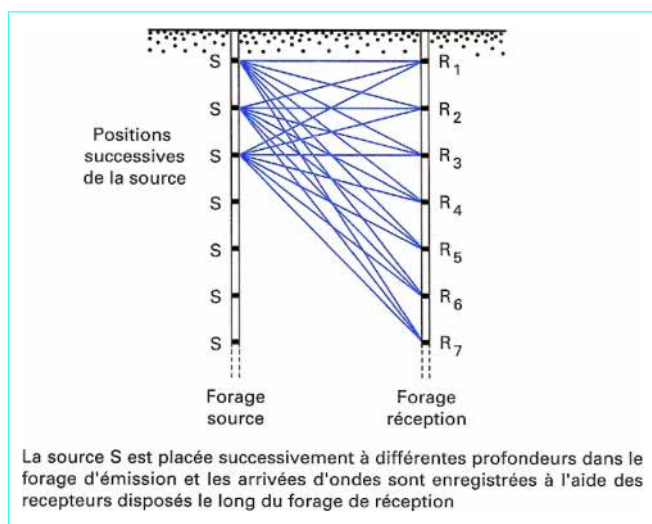


Figure 19 – Principe de la tomographie sismique entre forages

La méthode est bien adaptée au repérage des vides, karsts ou carrières souterraines, à l'étude de la fissuration et de son évolution (analyse des phénomènes de décompression liés aux terrassements, par exemple) ou au contrôle d'injections.

#### 4.7.3 Radar géologique

La profondeur de pénétration variant en sens inverse de la conductivité électrique de terrain, le radar est bien adapté à l'auscultation de terrains de forte résistivité, donc hors nappe et peu argileux, massifs calcaires par exemple : recherche d'hétérogénéités, de failles, etc.

### 4.8 Essais mécaniques *in situ*

#### 4.8.1 Mesures de déformabilité

Les essais de déformabilité *in situ* permettent d'ausculter un volume de terrain plus important que les essais de laboratoire, mais ce volume (quelques mètres cubes au maximum) reste limité par rapport à celui concerné par l'ouvrage : ces essais ne mettent pas complètement à l'abri d'un effet d'échelle lié aux discontinuités [2].

On peut citer les essais de chargement à la plaque, réalisés en surface ou en galerie, et les essais au dilatomètre en forage [9].

#### 4.8.2 Mesures de contraintes

L'état de contrainte naturel du massif conditionne le dimensionnement des ouvrages souterrains ; pour les ouvrages de surface, cet état n'est pas sans influence, puisque les fractures perpendiculaires à la direction de compression majeure sont en général fermées, alors que celles qui lui sont parallèles sont plutôt ouvertes, ce qui engendre une anisotropie mécanique et hydraulique du massif. Les principales techniques de mesure utilisées en génie civil sont celle du vérin plat et du surcarottage [10].

### 4.9 Essai Lugeon

L'essai Lugeon donne une indication sur l'état de fracturation d'un massif rocheux et permet d'évaluer un ordre de grandeur de sa perméabilité. Il est souvent pratiqué pour prévoir des quantités d'injection. L'essai consiste à injecter de l'eau dans un forage sous charge constante et à mesurer le débit, l'opération étant répétée à divers paliers de charge. L'unité Lugeon correspond à un débit de 1 L/min injecté sous une charge de 1 MPa ; l'unité Lugeon peut être corrélée avec la perméabilité du massif. Si la courbe charge-débit est linéaire, on peut également estimer l'état de fracturation (ouverture moyenne des fractures).

## 5. Conclusions

On peut signaler, pour clore cet article consacré à la description des massifs rocheux, que plusieurs classifications de ces massifs ont été mises au point : la plus répandue, en particulier dans le monde anglo-saxon, est la classification RMR (*Rock Mass Rating*), qui attribue à un massif rocheux une « note » comprise entre 0 et 100, à partir de cinq composantes : résistance en compression simple de la roche, valeur du *RQD*, espacement moyen des discontinuités dans la famille principale, état des discontinuités (rugosité, ouverture, remplissage) et conditions hydrauliques [11]. Si ces méthodes peuvent permettre d'élaborer une première ébauche de solution technique (fondation, méthode d'abattage, soutènement de tunnel, etc.), elles ne dispensent pas toutefois l'ingénieur d'une analyse approfondie du problème ; en particulier, les discontinuités majeures, qui peuvent constituer des sources d'instabilité, sont mal prises en compte dans ces classifications à caractère global.



# Description des roches et des massifs rocheux

par **Jean-Louis DURVILLE**

*Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées  
Chef de la Division Mécanique des Sols  
et Géologie de l'Ingénieur au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*

et **Hubert HÉRAUD**

*Ingénieur Géologue  
Chef du Groupe Sols-Roches au Centre d'Études Techniques de l'Équipement,  
Laboratoire Régional de Clermont-Ferrand.*

## Bibliographie

### Références

- [1] FOUCAULT (A.) et RAOULT (J.-F.). – *Dictionnaire de géologie*. 3<sup>e</sup> édition, Masson, 351 p. (1988).
- [2] DURVILLE (J.-L.). – *Mécanique des roches : généralités*. C 350, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction.
- [3] AFTES. – *Description des massifs rocheux utile à l'étude de stabilité*. Tunnels et Ouvrages Souterrains, supplément au n° 117, 223 p. (1993).
- [4] HÉRAUD (H.) et LIVET (M.). – *Reconnaissance des massifs rocheux. Prise d'empreinte dans un forage*. Bulletin Liaison Laboratoires Ponts et Chaussées n° 128, p. 128-131, nov.-déc. 1983.
- [5] BRETON (J.-P.). – *L'orientation des carottes de sondages miniers. Méthodes et appareillages*. Chronique Recherche Minière n° 470, p. 65-68 (1983).
- [6] CAILLEUX (J.-B.). – *Étude des diagraphies instantanées en forage*. Rapport des Laboratoires des Ponts et Chaussées, GT 12, 96 p. (1986).
- [7] RAT (M.) et al. – *Note d'information technique : Reconnaissance géotechnique des tracés de routes et autoroutes. Annexes III (Géophysique de surface) et V (Diagraphies)*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 111 p. (1982).
- [8] COFFEC (O.), COTE (Ph.), LAFONT (R.) et PIQUARD (R.). – *Mesures sismiques destinées aux tomographies*. Bulletin Liaison Laboratoires Ponts et Chaussées n° 152, p. 55-60, nov.-déc. 1987.
- [9] ANDRÉ (D.) et PARADIS (P.). – *Essais de déformabilité à la plaque et au dilatomètre*. Tunnels et Ouvrages Souterrains, n° 123, p. 146-148, mai-juin 1994.
- [10] BRIGLIA (P.), BURLET (D.) et PIRAUD (J.). – *La mesure des contraintes naturelles appliquée au génie civil*. Tunnels et Ouvrages Souterrains, n° 123, p. 149-152, mai-juin 1994.
- [11] HUDSON (J.A.). – *Rock mechanics principles in engineering practice*. Butterworths, Londres, 72 p. (1989).

### On consultera également

- ARQUIÉ (G.) et TOURENQ (C.). – *Granulats*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 718 p. (1990).
- PANET (M.). – *La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de génie civil*. Association Amicale des Ingénieurs Anciens Élèves de l'ENPC, 235 p. (1976).
- Guide technique SETRA-LCPC. *Le déroctage à l'explosif dans les travaux routiers*. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, 69 p. (1988).
- Projet de méthode d'essai n° 33 : *Roches et granulats. Essai de résistance en compression uniaxiale*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1988).
- Projet de méthode d'essai n° 6 : *Roches et granulats. Essai de traction par fendage*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1985).
- Suggested methods for...* – Méthodes d'essais rédigées par la Société Internationale de Mécanique des Roches, et publiées par la revue : *The International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Pergamon Press.

## Normalisation

### Association Française de Normalisation (AFNOR)

P 18-556	9.90	Granulats. Détermination de l'indice de continuité.
P 18-572	12.90	Granulats. Essai d'usure micro-Deval.
P 18-573	12.90	Granulats. Essai Los Angeles
P 18-579	12.90	Granulats. Essai d'abrasivité et de broyabilité.
P 18-593	12.90	Granulats. Sensibilité au gel.
NF P 94-067	12.92	Sols : reconnaissance et essais. Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.