

SUR L'INTÉRÊT D'UNE DÉFINITION GÉOLOGIQUE COMPLÈTE EN MÉCANIQUE DES ROCHES (*)

par C. SCHROEDER (**)

(4 fig. dans le texte)

RÉSUMÉ

L'étude du comportement mécanique des « matériaux rocheux » (constituant les éléments de « massifs rocheux » qui ne sont pas considérés ici) se base sur des résultats d'essais de laboratoire dont la dispersion fréquemment observée demande explication.

Les principaux paramètres géologiques qui régissent à des titres divers les propriétés mécaniques des roches sont la constitution minéralogique et les caractéristiques des minéraux, la texture, les structures mineures (à l'échelle des matériaux rocheux et non des discontinuités structurales des massifs rocheux) et les caractéristiques hydrogéologiques.

On montre que seule l'étude géologique attentive permet de réduire la dispersion des résultats du laboratoire d'essais, de regrouper les données fiables et de les appliquer correctement aux cas concrets.

ABSTRACT

The study of the mechanical behaviour of « rock materials » (the constituents of « rock masses », which are not considered here) is based on the laboratory tests the results of which often show a wide scatter which requires explanation.

The principal geological parameters which control, in their various ways, the mechanical properties of rocks are :

- mineralogy and characteristics of the minerals;
- minor structures (at the scale of « rock materials », not the structural discontinuities of « rock masses »); and
- hydrogeological characteristics.

It is shown that only careful geological study can reduce the spread of results noted in laboratory tests, allow recognition of the trustworthy data and ensure their correct application in specific cases.

La mécanique des roches a pour objet la définition du comportement des roches sous l'effet de sollicitations mécaniques. Elle trouve son application dans des ouvrages de génie civil d'importance très variable : de la maison unifamiliale à la centrale nucléaire, en passant par les barrages, tunnels, etc. ...

La principale difficulté rencontrée par les ingénieurs dans ce domaine réside dans la *dispersion* des résultats d'essais effectués sur les échantillons de roches testés en laboratoire. Or, la dispersion conduit soit à utiliser dans les calculs des

(*) Communication présentée le 1^{er} juillet 1975, manuscrit déposé le 4 juillet 1975.

(**) Ingénieur civil des constructions, Assistant à l'Université de Liège, Institut de géologie, 7, place du Vingt-Août, B-4000 Liège.

coefficients de sécurité élevés, soit à négliger les enseignements fournis par les essais de laboratoire et à ne se baser que sur des essais in situ (eux-mêmes d'ailleurs sujets à dispersion plus ou moins considérable), soit encore le plus souvent à s'en remettre à des méthodes de dimensionnement empiriques basées sur l'expérience.

Nous montrerons que la cause essentielle de la dispersion des résultats est le manque de précision dans la *définition* du matériau rocheux testé.

Pour illustrer notre propos, considérons d'abord un essai de laboratoire élémentaire, aisé à exécuter et par là très utilisé : l'essai de compression uniaxiale (compression simple) *.

Un tel essai réalisé sur une roche du sous-sol de la Ville de Liège qualifiée « grès » (parfois simplement « roche »!) conduit à des valeurs de la résistance (contrainte au moment de la rupture) variant entre 72 et 2353 bars (L. Calémbert et al. [1]) soit une valeur moyenne de 877 bars et un coefficient de variation (**) de 62 % qui indique une dispersion très importante.

Une définition lithologique plus exacte tenant davantage compte de la composition minéralogique et de la structure permet de distinguer dans les « grès » plusieurs types pour lesquels la dispersion des résultats est déjà réduite et les valeurs de la résistance plus spécifiques.

Les valeurs de la dispersion deviennent : (tableau I)

TABLEAU I

Matériaux rocheux	Résistance moyenne en bars	Coefficient de variation en %
grès homogènes	1359	34
schistes sableux homogènes	443	43
grès straticulés	983	45
schistes sableux straticulés	445	58

Un examen géologique plus complet fait intervenir d'autres paramètres. Pour les roches citées ci-dessus, on a examiné notamment la *teneur en eau* (humidité) et considéré deux cas (on pourrait en distinguer davantage) : échantillons saturés en eau après immersion pendant 4 jours et échantillons séchés à humidité ambiante. On distingue ainsi 8 catégories de matériaux rocheux. Les valeurs obtenues sont : (tableau II)

Dans le sous-sol de la Ville de Liège, des facteurs « anthropiques » jouent un rôle : par exemple, les *actions minières* ont influencé les caractéristiques des roches dans les zones soumises aux affaissements. De plus, suivant le lieu de prélèvement des échantillons, ceux-ci ont subi des influences minières plus ou moins intenses. Si l'on tient compte de ce nouveau facteur en distinguant les zones soumises à influence minière nulle (zone vierge d'exploitation), indirecte (zones limite d'exploitation) ou directe (zones d'exploitation), on obtient le tableau III ci-dessous.

(*) Il consiste à écraser une éprouvette cylindrique de roche, de hauteur comprise entre 2 et 2,5 fois le diamètre, entre deux plateaux d'une presse hydraulique.

(**) Rapport entre l'écart-type et la moyenne.

TABLEAU II

Matériaux rocheux	Humidité	Résistance moyenne en bars	Coefficient de variation en %
grès homogènes	secs	1389	35
	saturés	1270	28
schistes sableux homogènes	secs	508	31
	saturés	206	35
grès straticulés	secs	1049	42
	saturés	760	47
schistes sableux straticulés	secs	528	52
	saturés	279	37

TABLEAU III

Matériaux rocheux	Humidité	Influence minière	Résistance moyenne en bars	Coefficient de variation en %
grès homogènes	secs	nulle	1750	20
		indirecte	1236	27
		directe	1139	41
	saturés	nulle	1287	11
		indirecte	1292	5
		directe	1250	38
schistes sableux homogènes	secs	nulle	556	28
		indirecte	491	14
		directe	501	34
	saturés	nulle	—	—
		indirecte	213	23
		directe	202	41
grès straticulés	secs	nulle	1367	22
		indirecte	849	26
		directe	564	38
	saturés	nulle	976	41
		indirecte	474	3
		directe	742	41
schistes sableux straticulés	secs	nulle	752	39
		indirecte	496	42
		directe	371	36
	saturés	nulle	307	4
		indirecte	315	42
		directe	246	38

On constate que les coefficients de variation sont ramenés à des valeurs de l'ordre de 20 à 30 % qui attestent une dispersion beaucoup moindre des résultats d'essais. Ceux-ci sont valables pour des matériaux rocheux bien définis dont les résistances moyennes sont différentes et représentatives : elles peuvent être utilisées comme telles dans les modèles de la mécanique des roches.

Nous présentons maintenant quelques exemples de définitions plus précises des matériaux rocheux de manière à mieux démontrer dans quelle mesure l'examen géologique complet se justifie. Nous envisageons les principaux paramètres géologiques et nous verrons dans quelles proportions leurs variations impliquent des modifications des propriétés mécaniques des matériaux rocheux.

Minéralogie.

Le comportement mécanique d'un matériau rocheux, dépend en premier lieu de sa composition minéralogique. Elle peut, dans le cas des roches sédimentaires terrigènes, être prise en considération en définissant la *teneur en quartz* de l'échantillon. C'est ainsi que pour l'ensemble des roches houillères du sous-sol de Liège, il a été distingué (Schroeder [2] et Polo-Chiapolini [3]) 9 catégories de roches correspondant à des pourcentages en quartz allant de 10 à 80 % :

<i>Matériaux rocheux</i>	<i>Pourcentage en quartz</i>
Schiste argileux à radicules	10
Schiste argilo-silteux à nodules carbonatés	15
Schiste argilo-silteux	20
Schiste finement sableux	40
Schiste finement sableux straticulé	45
Schiste sableux homogène	55
Schiste sableux straticulé	60
Grès straticulé	70
Grès homogène	80

La relation entre la teneur en quartz et la résistance en compression simple est très nette, ainsi que le montre la fig. 1.

Texture.

La forme, les dimensions et l'agencement mutuel des cristaux et grains constituant une roche influent évidemment sur ses propriétés mécaniques. Pour les roches de la série psammito-pélitique, on distingue (P. Michot [4]) les textures *empâtée*, *réticulée* ou *quartzitique* suivant que les grains de quartz sont entièrement enrobés par le ciment argileux, se touchent par leurs arêtes ou sont en contact franc.

La texture explique notamment l'allure brisée du diagramme de la fig. 1 : en-dessous d'un pourcentage défini de quartz (environ 60 %), la texture est toujours empâtée; l'influence de la teneur en quartz est faible car la résistance de la roche est principalement celle du ciment argileux. Au-delà de 60 % de quartz, la texture est réticulée ou quartzitique et la résistance de la roche est par priorité celle de l'édifice des minéraux de quartz; une augmentation de la teneur en quartz aura une influence brusquement accrue sur la résistance du matériau rocheux.

Microfissuration.

Nous entendons par là les fissures à l'échelle du matériau rocheux affectant soit les minéraux, soit des éprouvettes prélevées en dehors des fissures du massif

rocheux. Elles sont dues à des facteurs naturels (tectonique, altération ...) ou humains (excavations, vibrations ...). En particulier, les influences minières évoquées plus haut se traduisent pour le matériau rocheux par des états de fissuration distincts : en zone vierge d'influence, la microfissuration est due uniquement aux actions tectoniques régionales et est modérée; elle croît en zone influencée indirectement et est très intense en zone influencée directement.



Fig. 1. — Influence de la composition minéralogique sur la résistance en compression simple. Roches du sous-sol de Liège, ensemble des essais sur échantillons secs. D'après Schroeder [2] et Polo-Chiapolini [3].

Les matériaux rocheux microfissurés possèdent toujours une résistance inférieure à celle de leurs homologues intacts ou simplement moins fissurés. La tableau III permet de constater l'importance de la diminution : pour le grès straticulé sec par exemple, la résistance passe de 1367 bars pour des échantillons moyennement fissurés (prélevés en zone vierge d'influence minière) à 565 bars pour des échantillons intensément fissurés (prélevés en zone influencée directement), soit une diminution de résistance de l'ordre de 50 %.

La microfissuration permet aussi d'expliquer certaines particularités du tableau III. Nous constatons généralement que la dispersion est d'autant plus élevée que les matériaux rocheux sont plus fissurés. Il en ressort que pour un matériau rocheux bien défini géologiquement par ailleurs, les résultats d'essais de compression simple possèdent une *dispersion fonction de la microfissuration*. La tableau IV illustre le phénomène, d'après les résultats obtenus par Bernaix [5] sur des gneiss et du calcaire et un exemple de ceux obtenus lors de l'étude des grès houillers du sous-sol de Liège [1], [2], [3].

TABLEAU IV

Micro-fissuration	d'après Bernaix [4]		recherches à Liège [1], [2], [3]	
	matériaux rocheux	coefficient de variation en %	matériaux rocheux	coefficient de variation en %
Très intense	gneiss de Malpasset (rive gauche)	37	grès homogène (influence minière directe)	41
Intense	gneiss de Malpasset (rive droite)	30	grès homogène (influence minière indirecte)	27
Moyennement intense	gneiss à biotite et muscovite	22	grès homogène (influence minière nulle)	20
Nulle	calcaire de St-Vaast	5	—	—

Structures mineures.

De nombreux matériaux rocheux possèdent une anisotropie. Elle se traduit par exemple par une orientation privilégiée des cristaux ou grains : litage, schistosité ...

Suivant l'orientation de l'échantillon testé par rapport aux forces appliquées, on peut obtenir des valeurs de la résistance en compression simple allant du simple au double. Monjoie [6] a obtenu pour des schistes siluriens les résultats présentés à la fig. 2.

La variation de résistance en fonction de la direction de l'effort principal appliqué par rapport à celle du plan préférentiel suit toujours la même loi, définie par Donath [7], illustrée à la fig. 3.

Influence de l'eau.

L'importance des conditions hydrogéologiques est double : l'eau présente dans les matériaux rocheux altère les propriétés intrinsèques de certains minéraux et modifie le champ des contraintes.

La diminution de résistance des matériaux rocheux saturés en eau est naturellement d'importance variable suivant la composition minéralogique. Un accroissement de la teneur en *minéraux argileux* augmente la sensibilité à l'eau du matériau rocheux. La comparaison des deux courbes du diagramme de la fig. 4 montre la diminution de résistance des matériaux rocheux du sous-sol de Liège à pourcentages de minéraux argileux décroissants quand ils sont saturés en eau; le tableau ci-dessous donne les valeurs chiffrées.

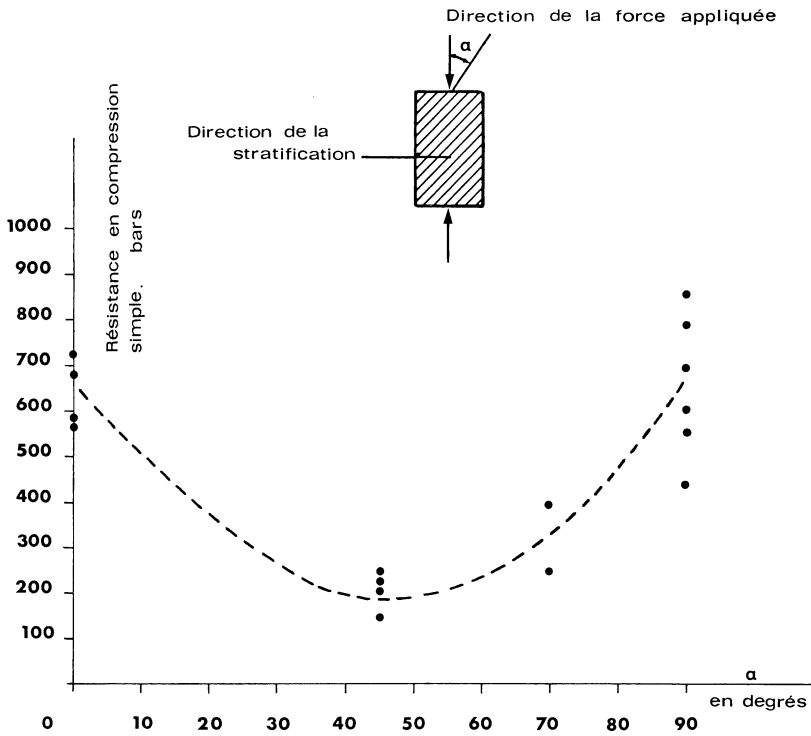


Fig. 2. — Influence de l'orientation de la stratification par rapport aux efforts appliqués, sur la résistance de schistes siluriens. D'après Monjoie [5].

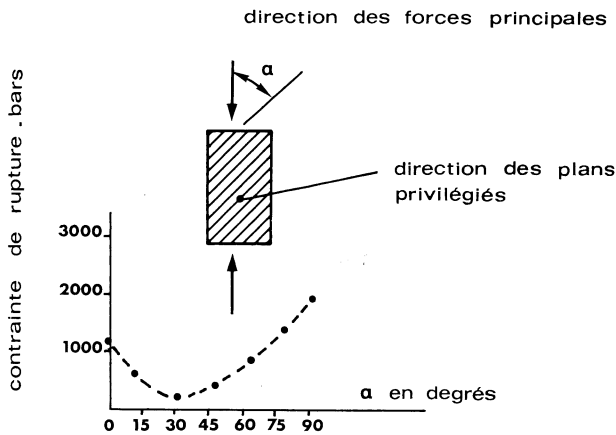


Fig. 3. — Variation de la résistance à la compression triaxiale sous pression latérale de 35 bars en fonction de l'angle entre la direction des forces principales et la direction des plans privilégiés. D'après Donath [7].

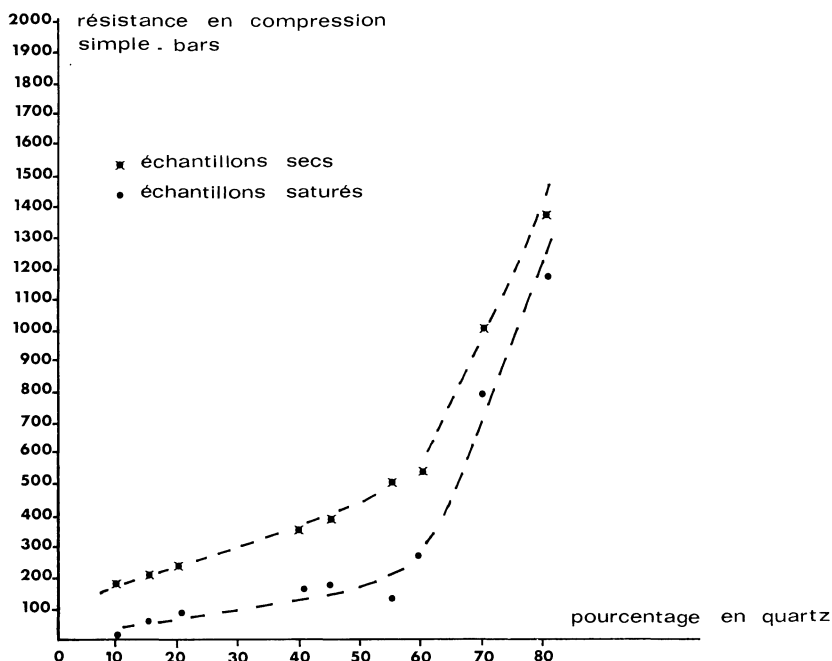


Fig. 4. — Influence de la saturation en eau d'échantillons de roches du sous-sol de Liège classés suivant la teneur en quartz.
D'après Polo-Chiapolini [3].

Matériaux rocheux

Diminutions de la résistance après saturation en eau

Schiste argileux à radicelles	90 %
Schiste argilo-silteux à nodules carbonatés	68 %
Schiste argilo-silteux	58 %
Schiste finement sableux homogène	48 %
Schiste finement sableux straticulé	53 %
Schiste sableux homogène	69 %
Schiste sableux straticulé	48 %
Grès straticulé	20 %
Grès homogène	13 %

La résistance varie de 90 % pour des schistes à radicelles (teneur en quartz : 10 %) à 10 % environ pour des grès homogènes (teneur en quartz : 80 %).

En ce qui concerne les grès homogènes, l'influence de la variation du champ de contraintes, sous l'action des pressions interstitielles, semble être prépondérante. Le mécanisme des pressions interstitielles n'est pas encore parfaitement connu et fait l'objet de nombreuses études (Colback et Wiid [8]).

La dégradation des propriétés mécaniques des matériaux rocheux peut être due également à l'altération consécutive à la circulation de l'eau. Bernaix [5] a montré que la résistance en compression simple d'un gneiss de Malpasset, de 440 bars pour la roche intacte, tombait à 235 bars pour la roche soumise à percolation d'eau pendant quelques semaines.

CONCLUSIONS

Nous avons vu que l'influence des paramètres géologiques peut être considérable, la variation d'un seul d'entre eux pouvant entraîner des différences de 50 à 100 % dans les résultats d'essais de compression simple. C'est ainsi que la fissuration des grès homogènes leur fait perdre 50 % de leur résistance et que la saturation en eau des schistes à radicules entraîne une diminution de leur résistance de l'ordre de 90 %. Il va de soi que les caractéristiques géologiques interviennent également lors d'autres essais tels que les essais triaxiaux (voir à ce sujet les études de Donath [7] sur l'anisotropie des matériaux rocheux), les mesures de vitesse de propagation des ondes sismiques, etc. ...

L'étude géologique poussée apparaît donc indispensable dans la mécanique des roches. Ce n'est qu'en connaissant tous les paramètres géologiques et leur influence spécifique que l'ingénieur peut tirer le maximum d'enseignements des essais de laboratoire sur matériaux rocheux en les définissant avec plus de rigueur. Il lui est ainsi possible de disposer de données groupées et fiables permettant de calculer les structures avec davantage de précision et donc en améliorant l'économie et la sécurité des ouvrages.

Laboratoires de Géologie
de la Faculté des Sciences Appliquées
de l'Université de Liège,
7, place du XX Août, Liège.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. CALEMBERT, L. LAMBRECHT, A. MONJOIE, C. POLO-CHIAPOLINI, C. SCHROEDER, J. C. WATHELET, 1971-1972-1973. — Études préalables pour le projet de métro de Liège. Rapports inédits S.T.I.L./711, 721, 731, 732, Laboratoires de Géologie de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège.
- [2] C. SCHROEDER, 1972. — Influence de la lithologie sur le comportement mécanique des roches soumises à essais de compression simple et brésiliens. *Engineering Geology*, vol. 6, n° 1, Amsterdam.
- [3] C. POLO-CHIAPOLINI, 1974. — Caractérisatiques géomécaniques des roches du bassin houiller de Liège (Belgique). *Mémoire C.E.R.E.S.*, n° 47, Liège.
- [4] P. MICHOT, 1958. — Classification et terminologie des roches lapidifiées de la série psammo-pélitique. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, t. 81.
- [5] J. BERNAIX, 1968. — Étude géotechnique de la roche de Malpasset, Dunod, Paris.
- [6] A. MONJOIE, 1970. — Propriétés mécaniques des schistes siluriens à Tihange. 2^e Congrès de la Société Internationale de Mécaniques des Roches, Belgrade.
- [7] F. A. DONATH, 1963. — Strength variation and deformational behaviour in anisotropic rocks. State of stress in earth's crust. Proc. Int. Conf. Santa Monica, California.
- [8] COLBACK et WIID, 1965. — The influence of moisture content on the compressive strength of rock. Publ. South African Council for Scientific and Industrial Research.

