

Mécanique des roches

Généralités

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

1. Définition et domaines d'application.....	C 350 - 2
1.1 Mécanique des roches et mécanique des sols	— 2
1.2 Principaux domaines d'application en génie civil	— 2
2. Effet d'échelle en mécanique des roches	— 2
2.1 Vitesse de propagation des ondes et densité de discontinuités	— 2
2.2 Résistance du rocher	— 3
2.3 Résistance au cisaillement des discontinuités.....	— 4
3. Modélisation des massifs rocheux	— 4
3.1 Choix de la modélisation	— 4
3.2 Modélisation par milieu continu	— 4
3.3 Milieu discontinu	— 5
4. Conclusions.....	— 6
Pour en savoir plus.....	Doc. C 350

Il est courant d'affirmer que le matériau rocheux est un matériau de qualité, rigide et résistant, et que les massifs rocheux sont de « bons terrains » pour les travaux de génie civil. Cependant, l'optimisation des travaux au rocher nécessite une connaissance du comportement mécanique des roches, et les grands ouvrages de génie civil, tels que tunnels profonds, barrages, centrales nucléaires, ou viaducs de grande portée, sollicitent le massif rocheux parfois à la limite de ses capacités. La mécanique des roches, science de l'ingénieur qui s'est individualisée depuis une trentaine d'années, possède quelques spécificités que nous présentons sommairement ci-après.

1. Définition et domaines d'application

1.1 Mécanique des roches et mécanique des sols

La distinction entre roche et sol repose essentiellement sur la cohésion du matériau. Un sable sec et propre ne possède pas de cohésion, une argile ou un sable argileux possède une cohésion faible qui peut être détruite par agitation dans l'eau. Une roche possède une cohésion de cimentation qui lie fortement ses éléments entre eux.

En fait, un continuum existe entre roche et sol, comme le montre un profil d'altération de granite par exemple : on passe graduellement de la roche saine en profondeur à une arène granitique en surface (sable argileux).

La limite entre roche et sol peut aussi être définie conventionnellement par un seuil de résistance en compression uniaxiale : les roches se situeraient au-dessus de 1 MPa environ, les sols en dessous.

À l'échelle de l'ouvrage, les discontinuités du massif rocheux jouent un rôle fondamental, à la fois mécanique et hydraulique : ce sont les joints sédimentaires, les diaclases, les failles, ou la schistosité, dont la description constitue une partie importante de l'étude géotechnique [1]. Ces discontinuités sont peu marquées, voire inexistantes, dans les massifs de sols meubles, en raison de la déformabilité de ceux-ci, qui les oppose aux roches rigides à comportement plutôt fragile.

1.2 Principaux domaines d'application en génie civil

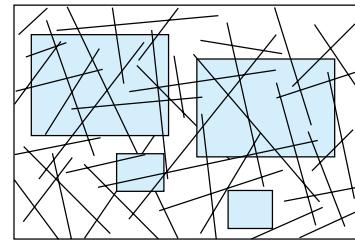
Dans les travaux au rocher, l'ingénieur doit répondre à différentes questions :

- **stabilité** : par exemple, évaluer le risque de chute de blocs à partir d'un talus ou d'une falaise, ou le facteur de sécurité vis-à-vis de la rupture d'une fondation en bordure de plateau ;
- **déformation** : estimer le tassement sous une fondation, ou la convergence d'un tunnel ;
- **extraction** (abattage) : définir les conditions d'une utilisation optimale de l'explosif, vis-à-vis du massif resté en place, qu'il faut endommager le moins possible, ou des vibrations causées sur les constructions voisines ;
- **concassage** : choisir la technique permettant d'obtenir la granularité souhaitée, pour un coût minimal ;
- **utilisation comme matériau** : s'assurer que la roche extraite possède certaines qualités, de résistance et de durabilité par exemple.

Les principaux ouvrages et travaux de génie civil au rocher sont les fondations (de barrages, de grands viaducs, de centrales nucléaires), la stabilisation des talus et des falaises naturelles, les terrassements de surface (tranchées routières, carrières et mines à ciel ouvert), les travaux souterrains (tunnels, stockages d'hydrocarbures, carrières), la production d'enrochements pour la protection des ouvrages à la mer.

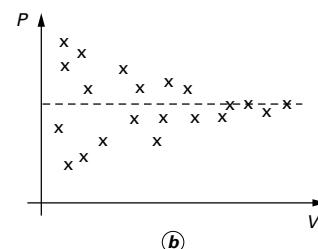
2. Effet d'échelle en mécanique des roches

Une des difficultés majeures en mécanique des roches est d'estimer les propriétés du massif rocheux à l'échelle de l'ouvrage, du fait



On notera la variabilité du matériau échantillonné par les petits rectangles

(a)



Diminution de la dispersion de P lorsque le volume V de l'échantillon augmente.

Les valeurs d'une propriété P sont très dispersées si l'on ausculte un petit volume, mais sont statistiquement à peu près constantes dans le cas de volumes importants.

Figure 1 – Effet d'échelle dans un massif fracturé

de l'existence fréquente d'un effet d'échelle. On dit qu'une propriété est soumise à effet d'échelle lorsque sa valeur mesurée varie suivant les dimensions de l'échantillon testé. Les propriétés concernées sont la résistance, la déformabilité, la perméabilité, etc., mais non les propriétés de type additif comme la masse ou le volume. Deux types d'effets se font sentir, l'un sur la dispersion et l'autre sur la moyenne des valeurs.

Le premier est illustré sur la figure 1 pour une propriété P donnée : la mesure de P réalisée sur de petits échantillons est très dispersée, et ce n'est qu'en auscultant un volume de terrain supérieur au « volume élémentaire représentatif », une dizaine de mètres cubes par exemple, que la valeur de P se stabilise à sa valeur moyenne.

L'effet d'échelle proprement dit est présenté dans les exemples ci-après, qui montrent que les hétérogénéités et les défauts de structure, au niveau de l'éprouvette de laboratoire comme à celui du massif, sont à l'origine de la variation d'une caractéristique avec la dimension de l'échantillon testé.

2.1 Vitesse de propagation des ondes et densité de discontinuités

On observe dans la mesure de la vitesse des ondes des différences marquées entre les échelles du grain de la roche, de l'éprouvette de laboratoire et de l'ouvrage.

À l'échelle du **grain**, les minéraux les plus courants, comme la calcite et le quartz, sont des cristaux anisotropes. La propagation des ondes dans un milieu anisotrope est très complexe : par exemple, dans un cristal de calcite, qui possède un axe de symétrie

ternaire, trois types d'ondes peuvent se propager dans la direction de cet axe, une onde longitudinale et deux ondes transversales, avec trois célérités différentes.

L'éprouvette de laboratoire est un agrégat formé d'un grand nombre de cristaux, en général assimilable à un milieu homogène et isotrope, au moins en première approximation. Deux célérités caractérisent un tel milieu, correspondant aux ondes longitudinales et transversales.

Considérons d'abord une roche sans défaut, c'est-à-dire un assemblage parfait de minéraux. Un raisonnement simplifié permet de dire que la vitesse théorique v^* des ondes longitudinales dans l'agrégat est la moyenne harmonique des vitesses des différents constituants :

$$\frac{1}{v^*} = \sum \frac{c_i}{v_i}$$

où c_i et v_i sont respectivement la concentration du minéral i et la vitesse dans ce minéral (plus exactement, la vitesse moyenne prise dans toutes les directions).

Toutefois, les roches sont des agrégats imparfaits : on y observe des pores (vides à peu près sphériques) et des microfissures (vides très aplatis). Ces défauts expliquent que la vitesse longitudinale mesurée sur l'échantillon v soit toujours plus faible que la valeur théorique. On définit l'indice de continuité, exprimé en pour-cent par :

$$I_C = 100 \frac{v}{v^*}$$

Il faut noter que les pores induisent une diminution modérée de la vitesse, donc de l'indice de continuité :

$$I_C \approx 100 - 1,5 n$$

avec n porosité exprimée en pour-cent.

alors que les fissures sont beaucoup plus efficaces pour ralentir les ondes (figure 2).

À l'échelle du **massif** ou de l'**ouvrage**, on peut mesurer la vitesse de propagation *in situ* par diagraphe microseismique [1] (base auscultée : environ 0,5 m) ou par sismique-réfraction (base auscultée : quelques dizaines de mètres). Les vitesses que l'on obtient sont toujours plus faibles qu'à l'échelle de l'échantillon : on passe couramment de 5 000-6 000 m/s à 3 000-4 000 m/s en changeant d'échelle, par suite de la présence de discontinuités d'espacement métrique ou plurimétrique. Du fait de l'existence des joints sédimentaires ou d'une famille prépondérante de fractures dans le massif, on peut souvent observer une anisotropie de vitesse, même si l'échantillon de laboratoire est quasi isotrope.

2.2 Résistance du rocher

Dans l'essai de compression uniaxiale (figure 3 a), une éprouvette cylindrique (\varnothing 40 ou 50 mm en général) est placée entre les plateaux d'une presse, et la force axiale est augmentée jusqu'à rupture de l'éprouvette. La valeur maximale F de la force permet de calculer la résistance à la compression uniaxiale σ_c de la roche :

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

avec A aire d'une section de l'éprouvette.

Des essais réalisés sur des éprouvettes de différents diamètres et de même élancement ont montré que, très généralement, la résistance diminue lorsque la taille de l'éprouvette augmente. Cette propriété est interprétée de la façon suivante : la roche contient des défauts, microfissures notamment, de dimensions variables et

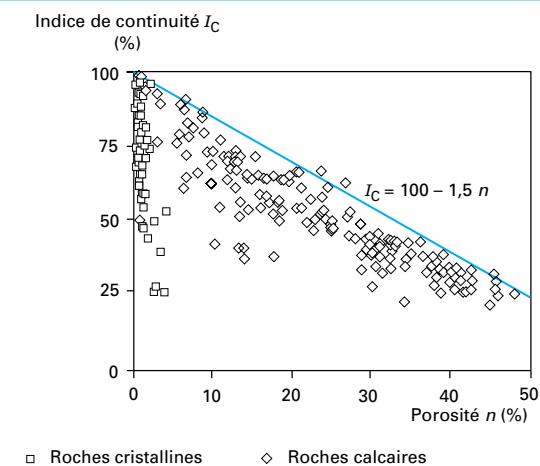


Figure 2 – Diagramme reliant la porosité et l'indice de continuité

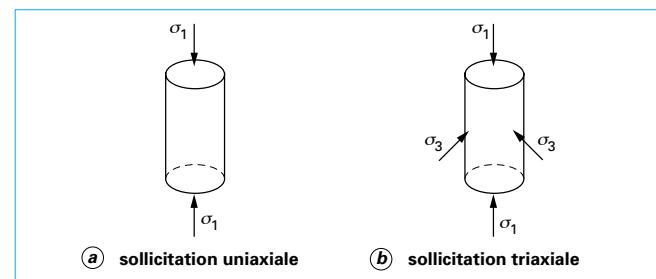


Figure 3 – Essais de laboratoire

réparties de façon aléatoire. L'existence d'un défaut dans l'éprouvette fait chuter sa résistance. Plus la taille de l'éprouvette est grande, plus la probabilité qu'elle contienne des défauts importants est grande, et plus la résistance mesurée diminue en moyenne.

Hoek et Brown ont suggéré que la résistance du rocher sous sollicitations triaxiales (figure 3 b) s'exprime par :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3\sigma_c + s\sigma_c^2}$$

où σ_c est la résistance en compression uniaxiale mesurée en laboratoire, σ_1 la contrainte axiale et σ_3 l'entreinte latérale. Le paramètre m est lié à la nature pétrographique de la roche. Le paramètre s représente le degré de fracturation et donc indirectement l'échelle de l'échantillon : il décroît de 1 (échantillon de laboratoire, sans fractures) à 0 (matériau réduit à l'état granulaire, ayant perdu toute cohésion). Par exemple, la résistance en compression uniaxiale « à l'échelle du massif » a pour expression $\sigma_c\sqrt{s}$, avec des valeurs de s de l'ordre de 0,1 à 0,001 suivant le degré de fracturation.

Compte tenu de cet effet d'échelle, il apparaît qu'un ouvrage de grande dimension, galerie ou talus par exemple, est *a priori* moins stable qu'un ouvrage de petite dimension situé dans le même massif.

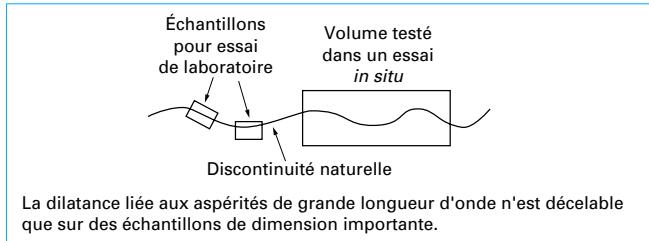


Figure 4 – Cisaillement d'une discontinuité naturelle

2.3 Résistance au cisaillement des discontinuités

La résistance au cisaillement des discontinuités peut en général être caractérisée par un angle de frottement φ . En laboratoire, une surface de 50 cm^2 , par exemple, est soumise à l'essai : l'angle de frottement obtenu est lié aux propriétés du matériau et à son état de surface (rugosité) ; il est en général compris entre 25 et 45° .

La résistance mobilisée dans un essai de cisaillement *in situ* ou dans un glissement de talus rocheux, donc relative à des dimensions métriques ou décamétriques, fait intervenir un paramètre supplémentaire appelé dilatance : le déplacement tangentiel s'accompagne d'une ouverture de la discontinuité, liée aux aspérités de celle-ci (figure 4). De façon sommaire, on peut dire que l'angle de frottement apparent est égal à $\varphi + \delta$, où δ est l'angle de dilatance (de 0 à 15° le plus souvent).

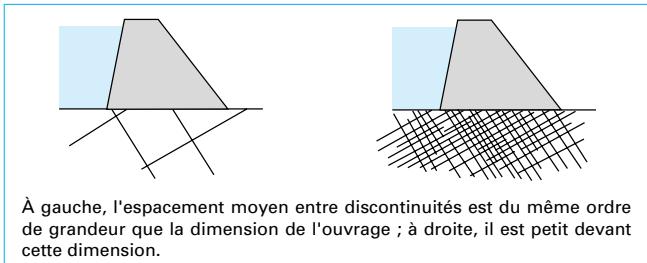


Figure 5 – Fondation d'un barrage au rocher

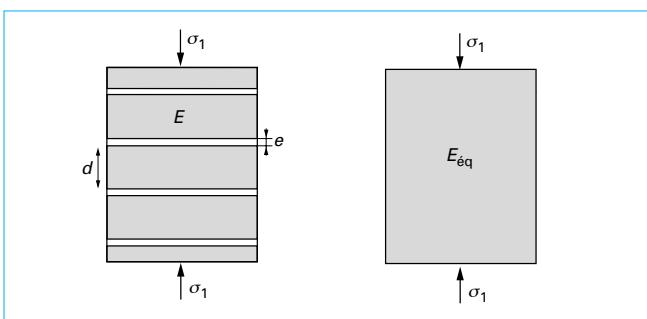


Figure 6 – Massif stratifié soumis à une compression uniaxiale et modèle continu équivalent

3. Modélisation des massifs rocheux

Une phase indispensable de toute étude géotechnique est de construire un modèle simplifié du terrain naturel, à partir duquel l'ingénieur pourra raisonner et dimensionner l'ouvrage projeté.

3.1 Choix de la modélisation

Deux grandes catégories de modèles sont susceptibles de fournir à l'ingénieur une représentation des massifs rocheux : modèles par milieu continu ou modèles par milieu discontinu. Le choix du modèle le mieux adapté dépend de plusieurs facteurs, en particulier :

- la dimension de l'ouvrage (L) comparée à l'espacement moyen des discontinuités (S) : dans l'exemple de la figure 5, on voit que l'utilisation d'un modèle par milieu continu n'est envisageable que dans le cas où $L >> S$;

- le degré de fermeture des discontinuités : celles-ci sont plus ouvertes en surface qu'en profondeur, et l'emploi d'un modèle discontinu s'imposera souvent dans le premier cas ; au contraire, la mécanique des roches appliquée au domaine pétrolier, ou aux stockages profonds, repose sur la mécanique des milieux continus [2] ;

- la possibilité de grands déplacements au niveau des discontinuités, par glissement ou décollement, qui aiguille vers un modèle discontinu : cette possibilité n'existe qu'au voisinage d'une paroi libre, talus de tranchée ou mur de chambre souterraine par exemple.

3.2 Modélisation par milieu continu

On cherche à remplacer le massif réel, traversé de discontinuités, par un milieu continu équivalent pour la propriété considérée. Deux questions se posent : est-ce licite ? comment estimer les propriétés du milieu équivalent ?

3.2.1 Exemple du comportement mécanique d'un massif stratifié

On considère un massif traversé par une famille de joints horizontaux et équidistants, soumis à une compression uniforme verticale (figure 6), et l'on cherche à estimer les propriétés de ce massif en petites déformations.

Soit E le module d'Young du rocher et K la raideur normale des joints ; si l'on applique la contrainte verticale σ_1 , on a :

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\sigma_1}{E} \quad \Delta e = \frac{\sigma_1}{K}$$

avec d épaisseur des bancs rocheux,

e épaisseur des joints.

Considérons la déformation d'un couple banc + joint :

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta d + \Delta e}{d + e} = \frac{d \frac{\sigma_1}{E} + \frac{\sigma_1}{K}}{d + e}$$

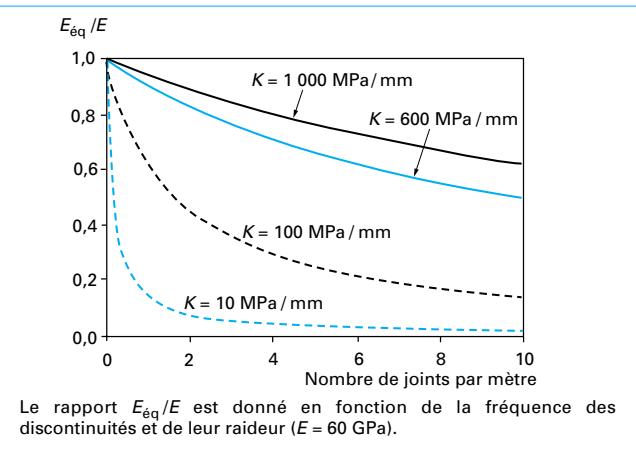


Figure 7 – Module équivalent d'un massif stratifié

On constate que ε_1 est proportionnelle à σ_1 . On peut donc remplacer le massif stratifié par un milieu élastique homogène continu, ayant pour module E_{eq} défini par :

$$\frac{1}{E_{\text{eq}}} = \frac{\varepsilon_1}{\sigma_1} = \frac{\frac{d}{E} + \frac{1}{K}}{d + e}$$

et, dans l'hypothèse où $d \gg e$:

$$\frac{1}{E_{\text{eq}}} \approx \frac{1}{E} + \frac{1}{Kd}$$

La figure 7 donne une idée de l'affaiblissement du massif en fonction de la densité de discontinuités et de leur raideur.

On peut aussi noter que le milieu continu équivalent au massif de la figure 6 est anisotrope, puisque le module dans la direction de compression horizontale est quant à lui très voisin de E .

3.2.2 Perméabilité en grand d'un massif fracturé

La perméabilité k d'une roche ou d'un sol peut être évaluée sur éprouvette en laboratoire, à l'aide de la formule de définition :

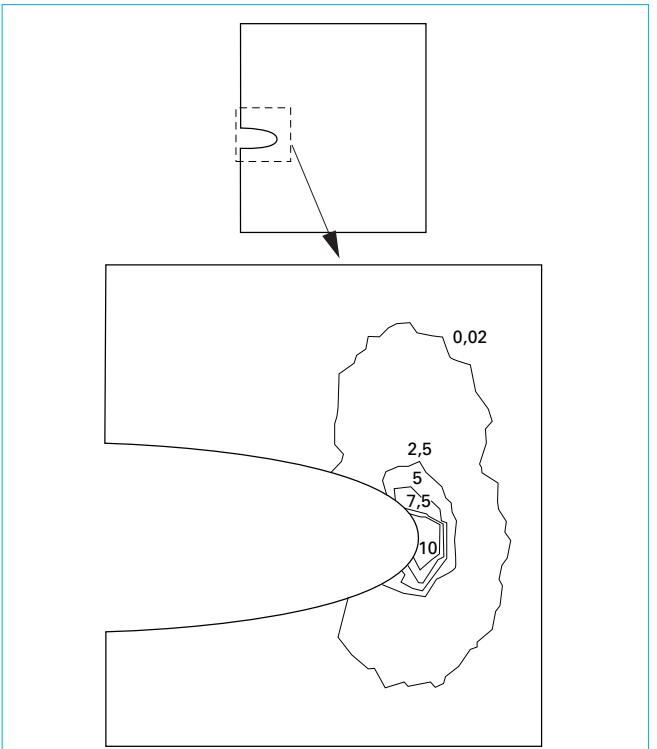
$$v = k i$$

avec v vitesse de filtration de l'eau,

i gradient de charge hydraulique imposé.

La perméabilité à l'eau des roches est en général très faible : celle d'un granite sain, par exemple, est de l'ordre de 10^{-10} m/s . Aussi, dans un massif rocheux, l'eau circule-t-elle principalement dans les fissures ou fractures plus ou moins interconnectées.

À l'échelle du massif, on peut bien souvent admettre l'existence d'une perméabilité équivalente : on parle de perméabilité « en grand » du massif, que l'on peut estimer par des essais *in situ*, à l'opposé de la perméabilité « en petit » mesurée sur échantillon. La perméabilité en grand est souvent anisotrope, dans la mesure où le réseau de discontinuités l'est : rôle du litage sédimentaire notamment, qui a tendance à guider les écoulements. Elle peut atteindre des valeurs de l'ordre de 10^{-5} m/s pour des roches très fracturées.



Compte tenu de la symétrie du problème, on n'a représenté qu'une demi-galerie. Cinq niveaux de déformation plastique ont été représentés. Ces déformations sont indiquées en pour-mille.

Figure 8 – Galerie elliptique en milieu élasto-plastique
(logiciel de calcul par éléments finis CESAR-LCPC)

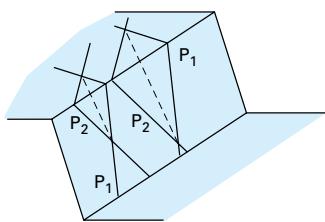
3.2.3 Exemple d'utilisation de la méthode des éléments finis

Le creusement d'une galerie modifie les contraintes à son voisinage et fait parfois sortir le rocher du domaine de comportement élastique. La stabilité d'une galerie profonde et le dimensionnement d'un soutènement peuvent être étudiés en considérant le massif comme un milieu continu ; toutefois, cela ne dispense pas d'analyser à part la stabilité de blocs rocheux en voûte, sous l'effet de la pesanteur.

La méthode des éléments finis permet de soumettre le massif vierge à des contraintes initiales données, de simuler le creusement d'une galerie et de mettre en place un soutènement, anneau de béton par exemple. La figure 8 est relative à une galerie de section elliptique, non revêtue, creusée dans un massif élasto-plastique où régnait un état de contraintes défini par les contraintes principales verticale $\sigma_v = 3 \text{ MPa}$ et horizontale $\sigma_h = 2 \text{ MPa}$. On observe que les zones plastiques forment des « oreilles » au voisinage des naissances de voûte ; la convergence calculée est de l'ordre de 3 cm pour le petit axe vertical de l'ellipse.

3.3 Milieu discontinu

Dans les problèmes de stabilité des talus rocheux, il n'est possible :



Les deux familles de discontinuités P_1 et P_2 donnent naissance à des dièbres potentiellement instables.

Figure 9 – Vue en perspective d'un talus

— ni de négliger les discontinuités : les caractéristiques mécaniques d'un rocher non fracturé (cohésion de 1 MPa, angle de frottement de 40° , par exemple) garantiraient la stabilité d'un talus vertical jusqu'à des hauteurs irréalistes, dépassant 300 m dans l'exemple choisi ;

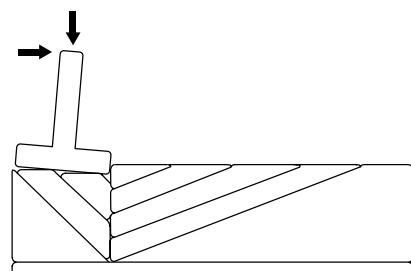
— ni de remplacer le milieu fracturé par un milieu continu : deux plans de discontinuités peuvent former un dièdre dont il faut étudier individuellement l'équilibre, fonction de l'orientation des discontinuités (figure 9) et de leur résistance au cisaillement.

Cet exemple, quoique très simple, nécessite donc de prendre en compte explicitement les discontinuités ; remarquons que le modèle est tridimensionnel : c'est bien souvent le cas en mécanique des roches, même si la faveur des ingénieurs se porte plutôt vers l'analyse sur profils à deux dimensions...

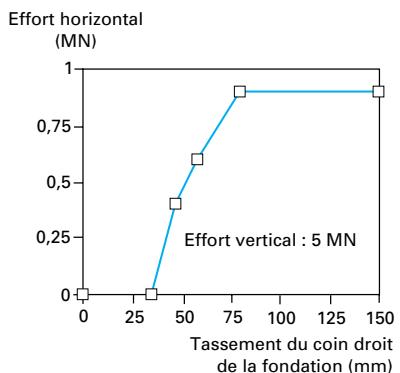
L'étude de la fondation d'une pile de viaduc sur versant se doit de mettre en évidence les mécanismes de rupture possibles, compte tenu du réseau de discontinuités. La méthode des éléments distincts est une méthode de calcul numérique permettant de traiter des cas de massif à plusieurs familles de discontinuités : le massif est alors constitué d'un assemblage de blocs, que l'on peut parfois supposer rigides pour simplifier, délimités par les plans de discontinuités. La figure 10 présente un exemple d'étude de fondation sur un massif fracturé ; on étudie la stabilité sous l'effet d'un effort normal et d'un effort tangentiel appliqué en haut de la pile. Le graphique de la figure 10 b, permet d'évaluer la raideur de la fondation sous faible déformation ainsi que la charge horizontale limite (ici 0,9 MN, pour une charge verticale fixe de 5 MN).

4. Conclusions

Dans cet article a été soulignée l'importance des discontinuités des massifs rocheux. Ceux-ci peuvent aussi être affectés par une



(a) modèle déformé sous chargement vertical et horizontal



(b) courbe reliant l'effort horizontal exercé sur la pile au tassement de la fondation ; le tassement initial est dû à l'application de l'effort vertical.

Figure 10 – Calcul bidimensionnel d'une fondation superficielle par la méthode des éléments distincts (logiciel UDEC) (d'après [3])

altération superficielle, susceptible de modifier notamment leurs propriétés, et bien souvent par des anomalies ponctuelles, telles que zones broyées au voisinage de failles, ou cavités de dissolution dans les roches calcaires ou gypseuses.

Toute étude d'ouvrage au rocher doit donc s'attacher non seulement à bien connaître le comportement du rocher proprement dit, mais aussi à identifier les hétérogénéités, les « défauts » du massif qui peuvent influencer considérablement ses caractéristiques à l'échelle de l'ouvrage. C'est pourquoi le mécanicien des roches s'appuie fortement sur les observations et les interprétations du géologue.

Mécanique des roches

Généralités

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*

Bibliographie

Dans les Techniques de l'Ingénieur

- [1] DURVILLE (J.-L.), HÉRAUD (H.). – *Description des roches et des massifs rocheux*. C 352 (1995). Traité Construction, vol. C2l.

Références

- [2] CHARLEZ (Ph. A.). – *Rock mechanics*. Volume 1 : *theoretical fundamentals*. 333 p. 1991. Technip, Paris.
- [3] RACHEZ (X.). – *Les fondations au rocher de grands viaducs : l'apport de la méthode des éléments distincts*. 241 p. 1997. Thèse de

I'ENPC (École nationale des Ponts et Chausées).

Livres et revues

- FILLIAT (G.). – *La pratique des sols et des fondations*. 1 392 p. 1981. Éditions du Moniteur, Paris (voir en particulier les chapitres 1, 2, 18, 25 et 31).
- GOODMAN (R.E.). – *Introduction to rock mechanics*. 560 p. 1989. John Wiley & Sons, New York.
- HUDSON (J.). – *Rock mechanics principles in engineering practice*. 72 p. 1989. Butterworths, Londres.

PANET (M.). – *La mécanique des roches appliquée aux ouvrages de génie civil*. 235 p. 1976. Association amicale des anciens élèves de l'ENPC.

PRAT (M.) et coll. – *La modélisation des ouvrages*. 770 p. 1995. Hermès, Paris.

TALOBRE (J.). – *La mécanique des roches*. 440 p. 1967. Dunod, Paris.

Revue française de géotechnique, revue trimestrielle publiée par les Presses de l'ENPC.

Tunnels et ouvrages souterrains, revue bimestrielle publiée par l'AFTES (Association française des travaux en souterrains).