le bilan énergétique en mécanique des roches

par

Ch. Fairhurst

Professeur & Président de Section
Department of Civil & Mineral Engineering
University of Minnesota
Minneapolis, Minnesota
U.S.A.

LE BILAN ENERGETIQUE EN MECANIQUE DES ROCHES

L'article étend à la mécanique des roches une conception générale basée sur le bilan énergétique des phénomènes. Cette approche est appliquée aux problèmes suivants qu'elle éclaire d'un jour nouveau :

- fracturation hydraulique et abattage à l'explosif;
- stabilité de la roche en compression ;
- stabilité des tunnels ;
- stabilité d'un massif formé d'un assemblage de blocs ;
- dimensionnement des piliers de mine.

Les nouvelles possibilités du traitement conversationnel sur écran cathodique sont largement exploitées.

THE APPLICATION OF MECHANICS TO ROCK ENGINEERING

The article extends the general energy balance concept to rock mechanics. This approach is used to throw new light on:

- hydraulic fracturing and rock blasting;
- stability of rock in compression;
- tunnel stability;
- stability of block-jointed rock;
- mine pillar design.

The new possibilities of computer interactive graphics are discussed.

Comité Français de Mécanique des Roches : exposé du 21 octobre 1976.

le bilan énergétique en mécanique des roches

par Ch. FAIRHURST

« ...Une troisième impression est l'absence comparable d'une base théorique dans la plupart des réalisations de l'ingénieur et ceci jusqu'il y a une centaine d'années. Cela ne veut pas dire pour autant que le climat intellectuel créé par Newton, Hooke, Boyle et d'autres durant la révolution scientifique ne préparait pas les fondations du bouleversement industriel qui s'en suivit ; mais il ne semble pas que les ingénieurs eux-mêmes en aient été conscients. Pendant plus d'un siècle, ils se passèrent de toute théorie et lorsque la science commença à toucher la technique ces ingénieurs — ou plutôt leurs successeurs — prirent lentement conscience que les temps avaient changé et que les progrès futurs allaient devoir se faire avec la physique et la chimie. Peut-on en tirer une leçon valable pour nous aujourd'hui ? »

Extrait de « Can We Learn from History ».
Introduction de « Engineering Heritage ».
Institut des Ingénieurs mécaniciens
(Londres) 1963, p. 180.

INTRODUCTION

Le seul fait de constater dans la nature la complexité des structures géologiques nous fait comprendre pourquoi le développement de bases théoriques rationnelles, applicables au dimensionnement des ouvrages au rocher, a été lent à côté des progrès réalisés dans le dimensionnement des structures utilisant uniquement des matériaux fabriqués par l'homme. Les premières tentatives d'utilisation pour les roches des concepts et des procédés mis au point pour les matériaux fabriqués par l'homme n'eurent en général qu'un succès limité, à cause de la simplification exagérée des données géologiques et à cause d'hypothèses acceptées sans étude critique. Le dimensionnement des ouvrages au rocher reste un « art plutôt qu'une science » et les seules règles existantes sont empiriques.

Il va sans dire que cette situation doit changer. Les travaux au rocher deviennent de jour en jour plus ambitieux et l'extrapolation à partir d'expériences antérieures ne cesse de s'amplifier. Les ouvrages souterrains sont édifiés dans des sites moins favorables. De nouvelles applications telles que l'exploitation de l'énergie géothermique, le rejet de déchets nucléaires, le stockage de l'énergie hydro-électrique, l'utilisation de l'espace souterrain pour une multitude d'usages, nécessitent toutes une compréhension plus fine du comportement des massifs rocheux. Comme ce fut le cas pour nos prédécesseurs, les ingénieurs-mécaniciens de la fin du XIX^{e} siècle, nous commençons à ressentir la nécessité de meilleurs fondements théoriques de la mécanique des roches appliquée.

En établissant ces fondements, nous devons être conscients que nous travaillons avec un tout autre matériau que celui des ingénieurs-mécaniciens. Le matériau géologique — la roche — possède des caractéristiques variables, jusqu'à un certain degré imprévisibles, que nous négligeons à nos risques et périls. Des principes généraux fondamentaux doivent être énoncés afin de servir de guide lors du dimensionnement des ouvrages, pourvu qu'ils soient utilisés avec intelligence en fonction des données naturelles et par des hommes d'expérience. Labasse [20] disait déjà cela au sujet du dimensionnement du soutènement des tunnels dans la roche (voir page 32).

La mise en œuvre de ces démarches, basées sur une théorie saine, a été le but principal de la recherche en mécanique des roches effectuée à l'Université du Minnesota durant les vingt dernières années. La présente communication décrit quelques-uns de ces développements et donne des exemples de recherche provenant de l'Université ou d'ailleurs, qui concernent des problèmes de grande importance pratique. Dans chaque cas particulier, les détails des calculs pourront être trouvés dans les ouvrages cités en référence.

RESISTANCE ET STABILITE

L'objectif final du projeteur est d'obtenir la certitude que la structure ne se rompra pas en service. Dans la plupart des cas, « rupture » est synonyme de limite élastique ou de « contrainte limite ». Mais dans certaines situations, le dépassement local de cette contrainte limite ou résistance fait que les forces appliquées sont redistribuées dans la structure et il est fort possible qu'au total cette dernière puisse toujours jouer le rôle pour lequel elle a été conçue, c'est-à-dire qu'il n'y a pas réellement « rupture ».

Très souvent, les ouvrages au rocher font partie de cette seconde catégorie. La résistance de la roche est généralement inconnue et peut varier de façon spectaculaire d'un point à un autre. Au surplus, les charges appliquées sont pareillement inconnues. Considérant ces caractéristiques, il est en général plus réaliste d'analyser les problèmes concernant la roche en termes de « stabilité » structurelle plutôt que de considérer sa résistance ; en d'autres mots, il est préférable de se poser la question suivante : « Qu'arriverait-il si la résistance (inconnue) était dépassée ? ».

THEORIE DE LA RUPTURE D'APRES GRIFFITH [1] [2]

L'exemple le plus courant d'analyse de la stabilité en mécanique des roches est probablement la théorie de la rupture selon Griffith, dont certains détails sont revus dans l'annexe à cette communication.

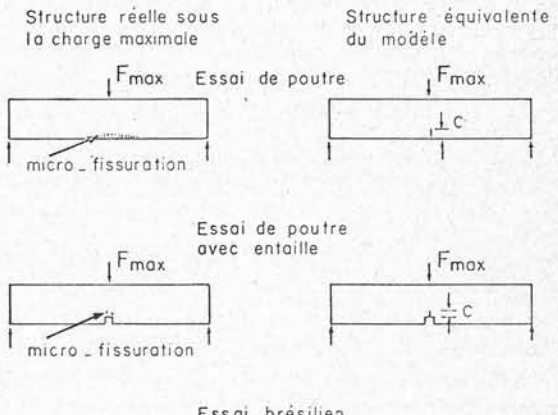
Dans son principe, cette théorie est une application du principe de l'énergie potentielle minimale. Elle établit qu'après initiation, une fissure de traction se propagera dans un matériau fragile lorsque l'énergie libérée par la fracturation (E_s) dépasse l'énergie nécessaire pour créer de nouvelles surfaces de fractures (E_d).

$$\frac{\partial E_s}{\partial c} \geq \frac{\partial E_d}{\partial c}$$

Dans cette relation c représente la longueur de la fissure.

Développée par Griffith afin d'expliquer la résistance des matériaux fragiles, la théorie de la rupture est à la base de la Mécanique de la Fracturation [3] et fut utilisée avec succès pour interpréter le comportement des matériaux à la rupture. L'application de cette théorie à l'analyse des fissures de traction dans les roches aboutit à des résultats très intéressants dont certains sont décrits maintenant.

ESSAIS DE TRACTION INDIRECTE SUR LES ROCHES

La difficulté inhérente à l'essai de traction directe a conduit au développement d'un certain nombre d'essais indirects, dans lesquels la traction est induite dans une partie seulement de l'échantillon, par application d'un chargement local en compression. La théorie de l'élasticité est ensuite utilisée afin d'interpréter les résultats, en reliant la charge de rupture à la contrainte maximale de traction obtenue dans l'échantillon. L'hypothèse usuelle est que la rupture se produit à partir de la contrainte maximale de traction. Il est bien connu que la « résistance à la traction » déterminée de cette façon varie largement d'un type d'essai à l'autre pour la même roche.

Hardy [4] a utilisé les notions de bilan énergétique de Griffith pour interpréter les résultats de trois types d'essais de traction indirecte, sur deux types de granite : a) l'essai de poutre (avec ou sans entaille), *b*) l'essai dit « Brésilien », *c*) l'essai d'anneau. La variation théorique de l'énergie du système de chargement (poutre ou disque) a été calculée en fonction de la longueur de la fissure en utilisant la méthode des éléments finis. La figure 1 décrit les différents essais ainsi que les « structures équivalentes » utilisées dans l'analyse numérique. Les tableaux 1 et 2 donnent les résultats obtenus pour le granite gris et le granite rocheuse par rapport au modèle analysé qui ne contient qu'une seule fissure. Ces résultats démontrent clairement les insuffisances du critère de la contrainte de traction maximale dans le cas des essais de traction indirecte sur échantillons de roche.