

5E SESSION D'ETUDE
SUR
LES TECHNIQUES DE SAUTAGE

LA MECANIQUE DES ROCS

(Le texte de cette conférence
fera partie d'un second cahier)

par

Branko Ladanyi
Ecole Polytechnique

5e SESSION D'ETUDE SUR LES TECHNIQUES DE SAUTAGE

LES 28 ET 29 OCTOBRE 1982

LA MECANIQUE DES ROCHES

par D.E. Gill
Section de génie minier
Département de génie minéral
Ecole Polytechnique de Montréal

Table des matières

	<u>Page</u>
1. DEFINITION.	1
2. HISTORIQUE.	2
3. SECTEURS D'ACTIVITE	3
4. LA NOTION D'ECHELLE	4
5. LA METHODOLOGIE DE DESIGN	8
6. LA MECANIQUE DES ROCHES ET LE SAUTAGE	11
6.1- Mécanisme de l'abattage.	11
6.2- Modèles de calcul des schémas de tir.	11
6.3- Les essais en laboratoire.	12

LA MECANIQUE DES ROCHES

1.- DEFINITION

La mécanique des roches est une discipline de l'ingénieur qui étudie les forces et les mouvements dans les roches et les massifs rocheux afin de prévoir leur comportement sous l'action de sollicitations diverses dans le but de résoudre des problèmes pratiques. De fait, la mécanique des roches appartient à cette famille de sciences appliquées qu'on appelle, depuis peu, la géomécanique, famille qui fait le lien entre la géologie générale et les sciences de l'ingénieur en s'intéressant à tous les processus mécaniques qui se produisent dans l'écorce terrestre, qu'ils soient dus à des phénomènes naturels ou à des activités de l'homme.

La géomécanique inclut donc les sciences suivantes:

- i) la tectonique et la géologie structurale; la géologie structurale décrit "l'architecture" de la croûte terrestre et suggère des moyens d'observation; la tectonique en explique les origines;
- ii) la mécanique des roches; elle a été définie au paragraphe précédent;
- iii) la mécanique des sols (incluant le muskeg et le pergélisol); elle conduit à la prévision du comportement de masses de matériaux meubles de la croûte terrestre sous l'action de sollicitations;
- iv) la dynamique de la lithification; la lithification est le processus par lequel les terrains meubles se consolident.

Si, d'une part, il est reconnu par tous que la mécanique des sols comprend l'investigation des sites, il n'en est pas de même, d'autre part, dans le cas de la mécanique des roches et plusieurs considèrent que l'exploration des massifs rocheux impliqués dans d'éventuels travaux est le propre de la géologie de l'ingénieur. Pour certains la géomécanique regroupe uniquement la mécanique des sols et la mécanique des roches y inclus l'étude des emplacements. Cet ensemble est connu depuis longtemps en tant que la géotechnique.

2.- HISTORIQUE

Les roches occupent une place importante dans l'histoire de l'homme. Son premier outillage a été tiré de ces dernières. L'homme primitif a percé des souterrains dans les massifs rocheux pour s'y loger. Puis ce fut la production de métaux à partir des minerais extraits de la croûte terrestre laissant des vides toujours plus grands et plus profonds. Les massifs rocheux ont constitué par la suite des appuis sûrs aux édifices et autres structures civils toujours plus vastes et plus hauts. L'urbanisme tire maintenant profit d'un développement en souterrains des villes et la crise de l'énergie a récemment remis en lumière le fait que les roches occupent encore de nos jours cette place.

Contrairement à plusieurs disciplines modernes de l'ingénierie qui se sont développées simultanément à leur science correspondante, l'homme a utilisé les roches et a pratiqué des excavations en rocher durant des siècles sans bénéficier de guidance scientifique. Bien qu'il y a eu, à la fin de la Renaissance, la parution du livre "De Re Metallica" (G. Agricola, 1556) dans lequel on retrouve quelques descriptions de méthodes d'abattage et de soutènement du rocher, ce n'est qu'à la fin du 19e siècle que l'on peut lire des rapports techniques portant sur des mesures d'affaissement de surface de terrains miniers et de convergence de parois d'excavations. Puis, au début du présent siècle, il fut fait état, dans ces mêmes rapports, de propriétés des roches. Bien qu'on rencontre, dans la littérature technique, l'énoncé des premières hypothèses portant sur l'origine des coups de charges dans les mines au début des années trente, ce n'est que vers 1950 que la mécanique des roches fut reconnue universellement comme discipline distincte. Depuis, elle a pris un essor comparable à toutes les autres disciplines de l'ingénierie.

Il semblerait que le premier mémoire de maîtrise en mécanique des roches au Canada ait été présenté à l'Université McGill en 1954. Le programme de génie minier de cette institution fut le premier parmi les programmes de génie canadiens à comporter un cours de mécanique des roches; c'était vers la fin des années cinquantes. L'École Polytechnique de Montréal offrait dès le début des années soixantes des cours de mécaniques des roches dans les programmes de génie minier, de génie géologique et de génie civil. Ce fut la première faculté de génie canadienne à couvrir un si grand nombre de secteurs d'activité en mécanique des roches.

3.- SECTEURS D'ACTIVITE

La mécanique des roches comporte plusieurs secteurs d'activité dont les plus importants sont sommairement décrit ci-après.

L'exploitation des mines. Dans ce secteur, on applique les principes de mécanique des roches au dimensionnement de la structure rocheuse créée par l'abattage du minerai des gisements.

Les travaux publics. Plusieurs grands travaux du génie civil impliquent les massifs rocheux et les structures qui y sont construites requièrent l'application de principes de mécanique des roches lors de leur dimensionnement.

La communiton. Les ingénieurs qui oeuvrent dans ce secteur s'intéressent à la prévision de la loi de dégradation des roches dans les machines de transformation granulométrique, aux quantités d'énergie requises pour les dégrader ainsi qu'à l'usure des revêtements des machines. De telles prévisions conduisent à l'optimalisation des granulométries et du choix des machines et font intervenir les principes de la mécanique des roches.

Le forage et le sautage. La prévision de la réaction des roches et des massifs rocheux à l'attaque des outils et des explosifs peut être réalisée en appliquant les principes de mécanique des roches. L'optimisation du choix des foreuses et des schémas de tir sont habituellement les buts poursuivis.

La mécanique des roches compte d'autres secteurs d'activité de moindre importance au point de vue ampleur comme la sismologie (prévision des tremblements de terre) le génie pétrolifère (recouvrement des nappes de pétrole) ou le génie militaire (construction des abris).

Donc, la mécanique des roches touche à un très grand nombre d'aspects de notre civilisation.

4.- LA NOTION D'ECHELLE EN MECANIQUE DES ROCHES

En mécanique des roches, il est indispensable de faire la différence entre roche (rock substance) et massif rocheux (rock mass). Le mot roche est pris dans le sens restrictif de matériau consolidé de la croûte terrestre. Par massif rocheux, on veut signifier les amas naturels de roches qui forment cette croûte.

Nous avons déjà spécifié que la géologie structurale décrit "l'architecture" de la croûte terrestre. Elle suggère des moyens d'en observer les éléments. Ces derniers, présents dans les roches et/ou les massifs rocheux, sont surtout linéaires et planaires.

Au point de vue mécanique, ils constituent en général des défauts qui influencent de diverses façons la réaction des roches et des massifs rocheux aux sollicitations mécaniques; leur dimension varie du micron au kilomètre. Ces défauts mécaniques interviennent dans les processus de rupture et de déformation et donnent lieu à ce qu'on appelle l'effet d'échelle. L'ensemble de cette notion est montré au tableau I.

Sur ce tableau, l'échelle croît de gauche à droite. Les minéraux sont les plus petits constituants de la croûte terrestre d'intérêt en mécanique des roches. Les cristaux sont les cellules de base des minéraux. On y retrouve les éléments microscopiques intragranulaires (dislocation, clivage, microcraquelures) de la structure géologique. Les roches sont des agrégats de grains de minéraux. Leur cellule de base est le grain. En plus des éléments microscopiques intragranulaires, on retrouve dans les roches les éléments microscopiques extragranulaires (pores, microcraquelures) ainsi que les éléments intermédiaires de la structure macroscopique (foliation, linéation, schistosité,..). Au fur et à mesure que l'on se déplace dans le sens de la croissance de l'échelle, on arrive aux éléments macroscopiques systématiques que sont les diaclases. Ils forment des réseaux qui découpent les amas naturels de roches en blocs plus ou moins réguliers, plus ou moins indépendants les uns des autres. Pour le mécanicien des roches, un massif rocheux est un empilement de blocs. On appelle bloc unitaire, le bloc "typique de l'empilement; c'est la cellule de base d'un massif rocheux.

La conséquence principale de la présence ou de l'absence d'éléments structuraux donnés à certaines échelles plutôt qu'à d'autres est que les propriétés mécaniques des roches ne dépendent pas uniquement des propriétés des minéraux qui les forment et que les propriétés des massifs rocheux ne dépendent pas uniquement des roches qui les forment. C'est pourquoi nous faisons volontairement une distinction entre minéraux, roches et massifs rocheux.

TABEAU I: LA NOTION D'ECHELLE EN MECANIQUE DES ROCHES

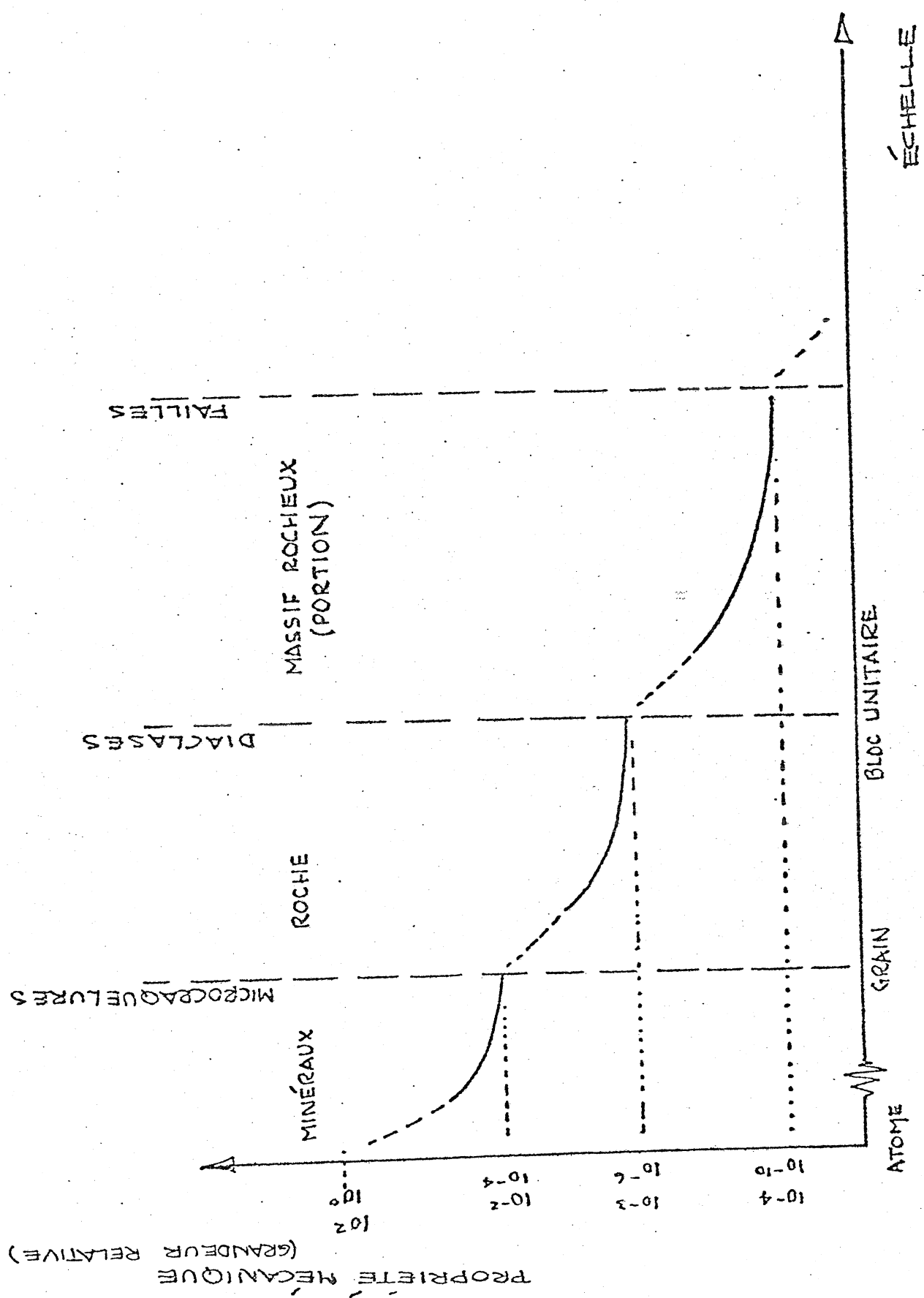
EXEMPLES D'ÉLÉMENT DE STRUCTURE GÉOLOGIQUE	DISLOCATIONS CLIVAGES MINÉRAUX MICROCRAQUELURES SCHISTOSITES CLIVAGES ARDOISIERS LINEATION FOLIATION STRATIFICES DIACLASES FAILLES				
NOM DU MATÉRIAU	MINÉRAUX	ROCHES	MASSIFS ROCHEUX		
CELLULE UNITAIRE	CRISTAUX GRAINS	BLOCS UNITAIRES			
DOMAINES D'APPLICATION DE LA MECANIQUE DES ROCHES	--- BROYAGE --- FORAGE	--- CONCASSAGE	EXCAVATIONS ET FONDATIONS		
ESSAIS DE PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	---	---	SAUTAGE	---	---
ÉCHELLE	10 ⁻⁷ cm	10 ⁻² cm	10 ³ cm	10 ⁸ cm	10 ¹³ cm
					10 ¹⁸ cm

L'établissement des propriétés des matériaux requises pour la solution de problèmes pratiques, implique nécessairement la conduite d'essais. Les minéraux, les roches et les massifs rocheux ne font pas exception à la règle. Mais à cause des effets mécaniques des éléments structuraux, les essais en laboratoire usuels sont limités à la détermination des propriétés des roches; la détermination des propriétés des massifs rocheux requiert la conduite d'essais en place (en chantier, in situ). La détermination indirecte des propriétés des massifs rocheux à partir des propriétés des roches requiert un modèle d'extrapolation qui doit faire intervenir l'influence des éléments structuraux propres aux massifs.

Au point de vue propriétés mécaniques, le principal phénomène associé à la notion d'échelle est l'effet d'échelle. Cet effet peut être résumé à l'aide de la figure I.

Cette figure illustre le fait qu'au fur et à mesure que le volume de matériaux consolidé de la croûte terrestre mis à l'essai croît, la valeur de la propriété mesurée diminue. La relation peut montrer des discontinuités lors des passages minéraux-roches et roches-massifs rocheux.

La conséquence de ce phénomène est qu'il faut savoir prévoir à tout coup l'échelle des problèmes lorsqu'on veut les résoudre. Lorsque l'échelle est connue on sait alors où il faut lire sur les graphiques comme celui de la figure I, les valeurs des propriétés mécaniques à utiliser pour la solution. Le tableau I montre d'ailleurs l'échelle de problèmes typiques dans divers secteurs d'activité.



EFFET D'EACHELLE
FIGURE 1

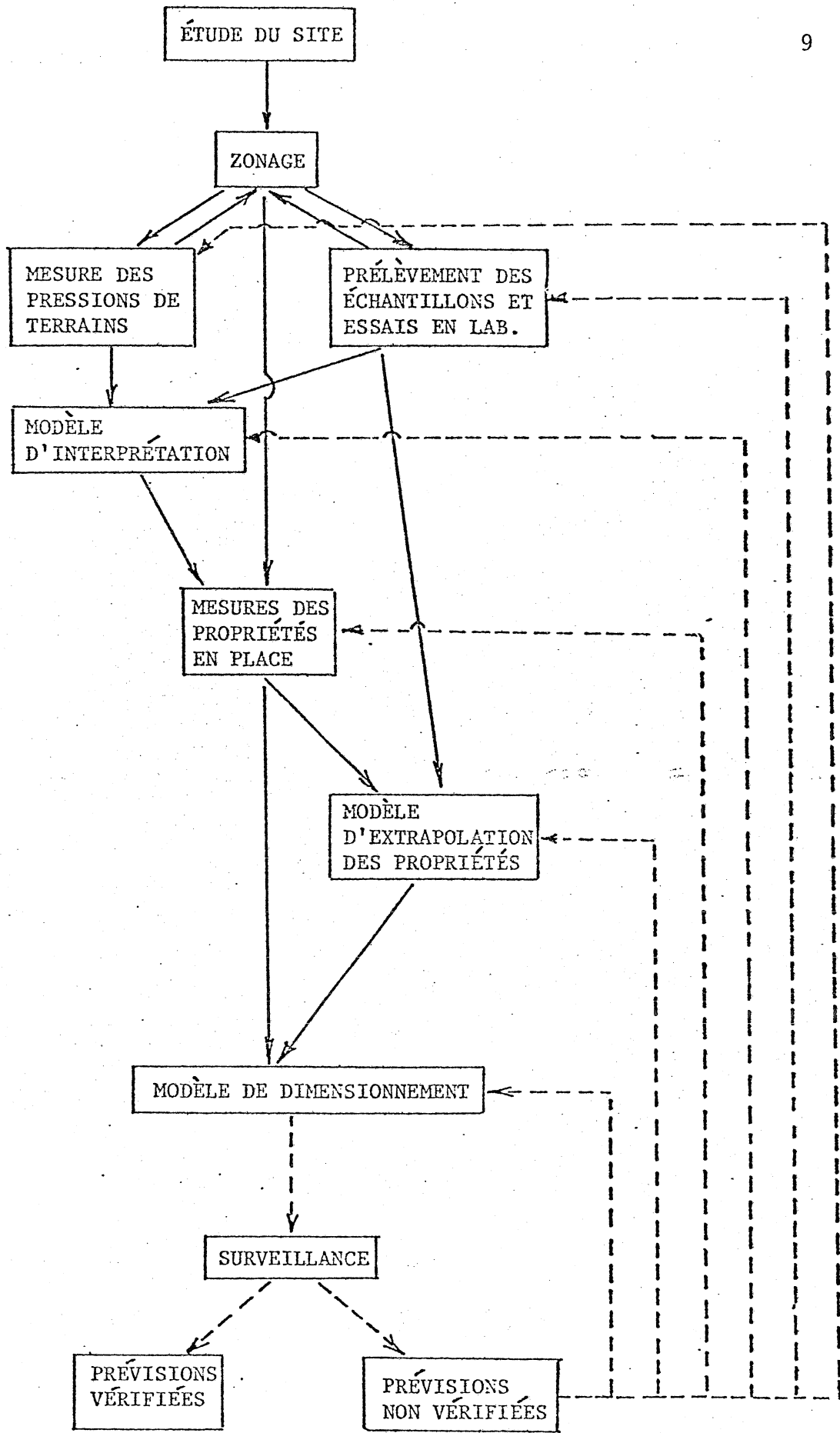
5.- LA METHODOLOGIE DU DESIGN EN MECANIQUE DES ROCHES

Le processus de design ou de dimensionnement en mécanique des roches est passablement différent de ceux qui caractérisent les disciplines conventionnelles du génie, les raisons étant:

- a) les propriétés des matériaux impliqués sont "à priori" inconnues;
- b) les matériaux impliqués sont déjà soumis à des contraintes et ces dernières sont "à priori" inconnues;
- c) la détermination de (a) et de (b) est longue et coûteuse.

Le tableau II illustre le cheminement à suivre pour procéder, d'une façon rigoureuse, à un dimensionnement. Décrivons brièvement ce cheminement.

L'étude du site implique la cartographie géologique et les relevés structuraux. Le zonage consiste à diviser le site en secteurs à l'intérieur desquels on prévoit un comportement mécanique donné, les critères de zonage découlant de l'étude du site. Chaque zone est considérée subséquentement comme un secteur de design. Viennent ensuite, pour chaque secteur de design, les mesures des pressions de terrains, le prélèvement d'échantillons servant à la préparation d'éprouvettes d'essais en laboratoire et la conduite de ces essais. Certains résultats d'essais en laboratoire sont entrés dans le modèle d'interprétation des résultats de mesure de pressions de terrains. Les essais en place, s'il y a lieu, sont exécutés dans chaque secteur de design; avec plusieurs types d'essais en place, les pressions de terrains doivent être prises en considération lors de la détermination des propriétés auxquelles ils conduisent. Les propriétés de la portion de massif impliquée par l'ouvrage sont prédites à partir des essais en place, des essais en laboratoire et des relevés structuraux à l'aide du modèle d'extrapolation. Lorsque les pressions de terrains et les propriétés à l'échelle de l'ouvrage sont connues, on peut procéder au dimensionnement de ce dernier. Le dimensionnement peut évidemment différer d'un secteur à l'autre. A cette étape du cheminement, l'ingénieur est en mesure de prédire certains aspects du comportement de l'ouvrage durant sa réalisation et/ou après (en exploitation des mines et en travaux publics) ou encore prédire certains aspects de la réaction des minéraux, des roches ou des massifs rocheux à l'attaque des explosifs, des outils ou des machines (en comminution, en forage ou en sautage).



TABEAU II

Etant donnée qu'il y a un certain nombre d'impondérables le long de ce cheminement, il est habituellement souhaitable de procéder à une surveillance (monitoring) de l'ouvrage à compter, autant que possible, s'il y a lieu, des débuts de son exécution (en exploitation des mines et en travaux publics) ou à une surveillance qui permettra de vérifier la réaction des minéraux, des roches ou des massifs rocheux à l'attaque des explosifs, des outils ou des machines (en communiton, en forage ou en sautage).

Si les prévisions de comportement ou de réaction sont vérifiées par les mesures de surveillance le choix des modèles d'interprétation des résultats de mesures de pressions de terrains, d'extrapolation des résultats d'essais de propriétés mécaniques et de dimensionnement ont été bien faits et que les "inputs" dans ces modèles étaient justes. Un mauvais choix de modèles d'interprétation de mesures de pressions de terrains ou/et un mauvais choix de modèles d'extrapolation des résultats d'essais ou/et un mauvais choix de modèles de dimensionnement et/ou des "inputs" erronés dans ces modèles feront que les mesures de surveillance ne vérifieront pas les prévisions de comportement ou de réaction. Dans ce cas, l'ingénieur doit revérifier la justesse des données (résultats de mesures et d'essais) et remettre en question les modèles d'interprétation des résultats de mesure des pressions de terrains ou/et d'extrapolation des résultats d'essais de propriétés mécaniques ou/et de dimensionnement choisis jusqu'à ce qu'il puisse prédire le comportement ou la réaction observé. Si ce comportement ou cette réaction n'est pas acceptable, l'ingénieur doit concevoir des mesures correctives. Ceci implique au moins des modifications dans le dimensionnement et entraîne de nouvelles prévisions à être vérifiées par la surveillance et ainsi de suite. L'exploitation des mines, par sa nature, se prête admirablement bien à la mise en oeuvre de ce processus. Il en est de même pour le sautage.

6.- LA MECANIQUE DES ROCHES ET LE SAUTAGE

6.1- Mécanisme de l'abattage

Plusieurs modèles du mécanisme de l'abattage des massifs rocheux à l'explosif ont été proposés en mécanique des roches. Ces modèles prenaient en ligne de compte les points suivants en tout ou en partie:

- i) la formation d'une zone broyée et compactée par l'onde de choc émise lors de la détonation, zone enveloppant le trou de mines;
- ii) la formation d'une zone à fissuration radiale enveloppant la zone broyée;
- iii) la poussée des gaz produits par la détonation de l'explosif remplissant la zone broyée et/ou s'infiltrant dans les fissures radiales produisant éventuellement l'éclatement de la paroi advenant la présence d'une surface libre à proximité;
- iv) la génération d'ondes de compression à l'extérieur de la zone de fissuration radiale, onde de compression éventuellement réfléchies en ondes de tension advenant la rencontre d'interfaces à impédance mécanique appropriée et produisant une fissuration.

6.2- Modèles de calcul des schémas de tir.

Plusieurs modèles permettant le calcul des schémas de tir pour l'abattage en banc ou pour l'avancement des galeries ont été proposés par les mécaniciens des roches. Les plus traditionnels sont ceux de Livingstone et Langefors pour le sautage par tranches alors que celui de Tincelin pour les schémas de tir en galerie.

La quasi-totalité de ces modèles fait appel à la connaissance du mode d'action d'une seule charge sur un massif rocheux. Ce mode d'action s'obtient d'essais de cratère. Ces derniers conduisent à une relation entre la profondeur optimale d'enfouissement (profondeur d'enfouissement de la charge qui maximise le volume de roche abattu) et divers paramètres de tir. A partir de cette relation, il est généralement facile de calculer les charges d'une volée, leur répartition dans la volée ainsi que, si on introduit de plus le foisonnement dynamique, les retards qui doivent séparer les mises à feu successives.

6.3- Les essais en laboratoire

Les différents modèles dont il a été question à la section 6.2 font appel, en plus de paramètres mesurables lors d'essais de cratère, à certaines propriétés physico-mécaniques conventionnelles. Ce sont, en tout ou en partie, les suivantes:

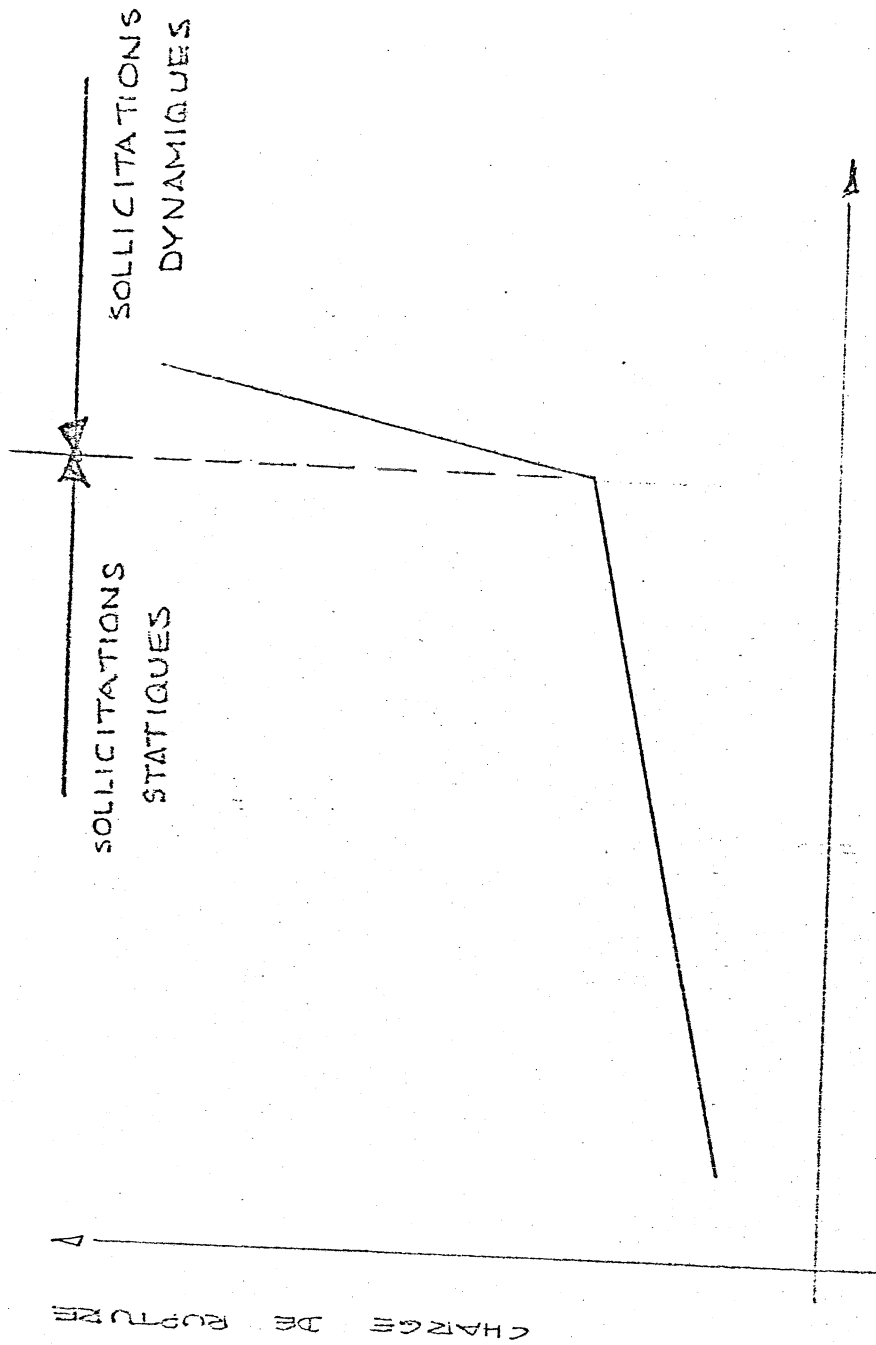
- i) la résistance en compression uniaxiale;
- ii) la résistance en tension;
- iii) le module d'élasticité;
- iv) le coefficient de Poisson;
- v) la vitesse de propagation des ondes longitudinales;
- vi) la densité.

Ces essais font appel habituellement, à des sollicitations statiques. L'obtention des propriétés qui en découlent ne présentent guère de difficultés. Il existe d'ailleurs des normes d'essais détaillées et reconnues pour y arriver.

Certains modèles tiennent compte du fait que les sollicitations en sautage proviennent de tir d'explosifs et requièrent alors qu'on utilise des propriétés dynamiques. Les propriétés dynamiques des roches sont supérieures aux propriétés statiques. De fait, il est reconnue, en mécanique des roches, que plus la vitesse de mise en charge des éprouvettes est grande plus la valeur de la charge de rupture est élevée.

La figure II montre une relation typique pour un type de sollicitation donnée et pour une roche donnée. La discontinuité se présente au point de passage chargement statique - chargement dynamique. (Ce passage correspond dans le cas de sollicitations de compression uniaxiale et de traction axiale à la vitesse de propagation des ondes longitudinales). Les résistances dynamiques calculées pour des vitesses de chargement correspondant aux explosifs usuels sont souvent jusqu'à trois (3) fois plus grandes que les résistances statiques.

Il serait possible de montrer que les modules de Young dynamiques peuvent être 50% plus grands que les modules statiques alors que les coefficients de Poisson dynamiques peuvent être 20% plus petits que les coefficients statiques.



LOG. VITESSE DE CHARGEMENT

FIGURE II