

cas, formation d'un bloc triangulaire de roches par fracture secondaire.

34. — Les conditions réglant le déplacement d'une haveuse dans une longue taille rendent le soutènement efficace du toit très difficile, en avant et en arrière de la haveuse.

Le toit, situé immédiatement au-dessus du charbon havé, ne peut être convenablement soutenu que plusieurs heures après, lorsque l'enlèvement du charbon est terminé et, à ce moment, le toit a subi déjà un tassement considérable entre les cassures parallèles, avant l'intervention de tout soutènement.

35. — Le problème à résoudre consiste à éviter ces cassures, et il semblerait qu'une modification de la méthode d'exploitation en vigueur aux temps de l'extraction à la main s'impose. Dans mon idée, il est essentiel d'étudier les mouvements des couches supérieures pour essayer de trouver une solution au problème, parce que nous savons que les couches s'affaissent une à une, en ordre ascendant, jusqu'à la surface, créant en fait quelquefois des vides qui subsistent pendant de très longues périodes aux endroits où les strates résistantes recouvrent des strates moins solides.

## Les roches houillères Leurs propriétés et leur influence dans le problème du soutènement

par

D. W. PHILIPS,

Ingénieur des Mines et Géologue au Safety in Mines Research Board,  
Grande-Bretagne.

(Communication faite à la IV<sup>e</sup> Conférence Internationale  
des Directeurs des Stations Minières d'Essais.  
Bruxelles et Pâturages, septembre 1937.)

L'auteur résume les essais qu'il a effectués sur les roches houillères pour déterminer leurs propriétés de résistance et en déduire la façon dont elles se comporteront vis-à-vis des efforts que créent les travaux de l'exploitation.

Il répartit les roches en cinq catégories, depuis les grès jusqu'aux schistes et argiles.

La résistance à la compression a été mesurée sur éprouvettes cubiques de 25 millimètres de côté.

La charge de rupture à la flexion a été déterminée sur des échantillons divers (généralement 45 mm. de longueur), reposant simplement sur leurs appuis, avec un outillage extrêmement bien conçu pour obtenir une grande multiplication de la déformation, au point de pouvoir lire le demi-millième de millimètre (exactement 0,55  $\mu$ ).

L'auteur a soumis les roches à une série de charges et décharges rapides qui font apparaître les constantes élastiques des roches avec phénomènes d'hystérésis, mais on constate : a) une déformation immédiate proportionnelle à la charge; b) une déformation retardée qui se produit avec le temps sans qu'il y ait augmentation de la charge.

La vitesse de la déformation retardée va souvent en s'accroissant, mais quelquefois elle diminue, et ce phénomène est souvent précurseur de la rupture.

L'humidité et la sécheresse jouent un rôle important sur les résistances de certaines roches.

Il en est de même de la porosité, de la solubilité dans l'acide et du produit de ces deux facteurs.

L'ordre de succession des couches, vu les caractéristiques très différentes des roches, joue un rôle très important au point de vue des éboulements et l'auteur en donne un exemple.

La traduction est principalement l'œuvre de M. F. Van Oudenhove, Ingénieur chimiste à l'Institut National des Mines; il a trouvé des conseils utiles auprès de M. Renier, Directeur du Service Géologique de Belgique, et de M. Armanet, Professeur d'exploitation des Mines à l'École des Mines de Paris.

Le programme des recherches entreprises par le Safety in Mines Research Board sur les chutes de toit comporte l'étude du caractère pétrographique et des qualités des roches houillères.

Cette étude est essentielle pour déterminer comment ces roches se comportent dans les travaux d'exploitation.

#### REMARQUES GÉNÉRALES.

Les roches rencontrées dans les mines britanniques comprennent un nombre très considérable de variétés, mais elles peuvent se ramener à cinq types, savoir :

les *sandstones* ou grès;

les *siltstones*, que l'on pourrait traduire par grès schisteux;

les *mudstones* ou schistes gréseux, schistes durs. Ces deux dernières roches sont intermédiaires entre les grès et les schistes;

les *shales* ou schistes;

les *clays* ou schistes argileux, argiles.

Comme il est difficile de rendre exactement les diverses nuances, nous conserverons souvent les termes anglais dans le texte.

Ces types peuvent se subdiviser d'après certaines de leurs caractéristiques de structure ou de constitution.

La classification principale est celle basée sur la finesse de grains.

Le tableau I ci-dessous donne la gamme de finesse de grain pour chaque type de roche.

TABEAU I

Nature	Dimension prédominante de grains (en m/m)	Type de roche
Cailloux et graviers . . .	2,0 et plus	conglomérats (fig. 1)
Très gros sable . . .	2,0 à 1,0	grès à très gros grains
Gros sable . . . . .	1,0 à 0,5	grès à gros grains
Sable moyen . . . . .	0,5 à 0,25	grès à grains moyens
Sable fin . . . . .	0,25 à 0,1	grès à grains fins
Sable très fin . . . . .	0,1 à 0,01	schiste grossier
Boues ou argile . . . . .	moins de 0,01	schiste argileux, schiste, argile

Une subdivision des schistes grossiers en variétés à gros et à fins grains n'est possible qu'à l'intervention du microscope.

L'aspect d'échantillons de poche est sans utilité sous ce rapport, quoique le simple toucher à la main donne souvent quelques indications au sujet de la finesse relative du grain, les gros grains étant les plus rudes au toucher.

Quelques *siltstones* ont un aspect rubanné dû à la présence de bandes claires et sombres de faible épaisseur.

On peut les appeler *siltstones* rubannés, par opposition aux schistes grossiers non rubannés, où ces bandes font défaut.

Il est plus difficile, même à l'intervention du microscope, d'établir une subdivision entre les schistes argileux, schistes et argiles; cependant, comme pour les *siltstones*, le toucher donnera une idée de la grosseur de grain.

On peut subdiviser encore les classes principales de roches comme suit : les grès, d'après la nature du ciment; les *siltstones*, d'après leur teneur en matériaux sableux et argileux; les schistes argileux, schistes et argiles, d'après leur teneur en matériaux siliceux, calcaires ou carbonacés.

Une telle classification, suffisante pour l'étude du contrôle du toit, ressort du tableau II ci-dessous.

TABLEAU II

Classification principale.	Classification subdivisée.
Grès . . . . .	ferrugineux sériciteux siliceux calcareux argileux
<i>Siltstone</i> . . . . .	sableux argileux
<i>Mudstone</i> . . . . .	argileux siliceux ou sableux calcareux carbonacés

Les grès peuvent encore être subdivisés d'après leurs caractéristiques de structure : suivant la distance entre les joints de stratification, ils peuvent être massifs, stratifiés ou *flaggy*, c'est-à-dire se débitant en petits cubes. Lorsque cette distance dépasse environ 1<sup>m</sup>,20, on les appelle massifs.

Dans les grès stratifiés, les joints de stratification peuvent être distants de 1<sup>m</sup>,20 à quelques pouces environ et les différentes strates sont plus aisément reconnaissables.

Lorsque les joints de stratification sont tellement rapprochés que les strates ont approximativement l'épaisseur de dalles de pavage, on dit que le grès est *flaggy* (finement stratifié), tandis que des strates encore plus minces caractérisent, par exemple, les grès feuilletés (*leafy sandstone*).

Les fausses stratifications ou faux clivages (*false bedding*) constituent une autre structure.

Les caractéristiques structurales n'interviennent pas d'une manière prédominante dans la nomenclature des roches à grains plus fins, à l'exception des *siltstones* rubanés et non rubanés.

Les grès constituent les roches les plus dures et les plus rigides généralement rencontrées dans les mines de charbon.

Les grains de sable entrant dans leur constitution sont cimentés ensemble à l'aide de silice, de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), de carbonate ou d'oxyde de fer d'un matériau feldspathique décomposé ou d'un

mélange de ces matériaux avec souvent un peu de matière carbonacée et argileuse.

Si on néglige les minéraux plus rares, le grès normal se compose, en ordre principal, de grains de quartz avec un peu de feldspath, un peu de muscovite (mica) et de chlorite (silicate alumino-magnésique, hydraté).

Quoiqu'il existe quelques spécimens à gros grains, la texture varie le plus souvent des grains moyens aux grains fins.

Les figures 2 à 15 sont des microphotographies de grès prélevés à proximité de veines de charbon dans les différents bassins miniers de Grande-Bretagne.

Les photos à faible grossissement ( $\times 50$ ) sont placés dans l'ordre de finesse croissante de grains et la variation de texture peut aisément être appréciée.

Les *siltstones* (grès schisteux), figures 14 à 20, sont de caractère intermédiaire entre les grès et les roches argileuses. Quoique formant une partie importante du groupe de roches sédimentaires de stratification, les *siltstones* n'ont pas été aussi bien étudiés pétrographiquement que les roches ressortissant au groupe des sables et argiles.

Il en résulte que bien des variétés à gros grains de ce groupe de roches sont souvent considérées comme des grès et les variétés à grains fins, comme des schistes sableux.

Dans ce groupe de roches, la proportion de matières carbonacées et argileuses augmente avec la finesse des grains. Le *siltstone* fortement rubané ou présentant une stratification entrecroisée, dont la figure 15 reproduit un échantillon de poche, est remarquable.

L'épaisseur des bandes varie jusqu'à devenir microscopique (voir fig. 16); les bandes foncées proviennent de la présence de matériaux argileux ou carbonacés, accompagnés dans certains cas d'une quantité assez importante de mica; les bandes claires proviennent de la présence de constituants sableux à gros grains.

Les figures 17 et 18 montrent des échantillons à grains encore plus fins, dont le dernier contient beaucoup de mica.

Il existe d'autres schistes grossiers dont les constituants sont distribués d'une manière plus uniforme (fig. 19).

La figure 20 donne un plus fort agrandissement de ce type de roche. Les grains ne sont pas effectivement en contact comme dans la plupart des grès, mais sont complètement enrobés d'un mélange de matériaux argileux et carbonacés.

## ROCHES HOUILLERES

(Sauf avis contraire, les microphotographies ont été prises avec nicols croisés.)

L'agrandissement est indiqué par le signe  $\times$ .



Fig. 1. — Conglomérat  
(grandeur naturelle)

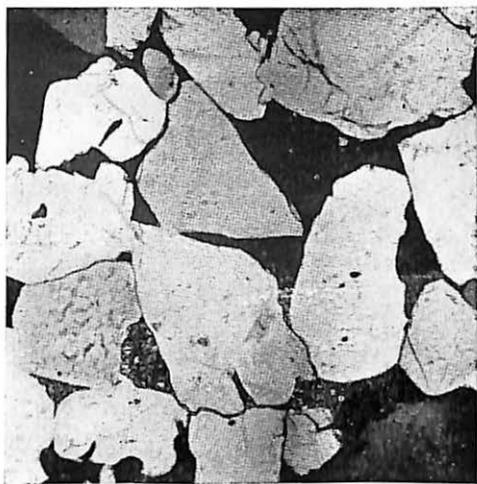


Fig. 2. — Grès à gros grains  
avec vides entre grains. ( $\times 30$ )

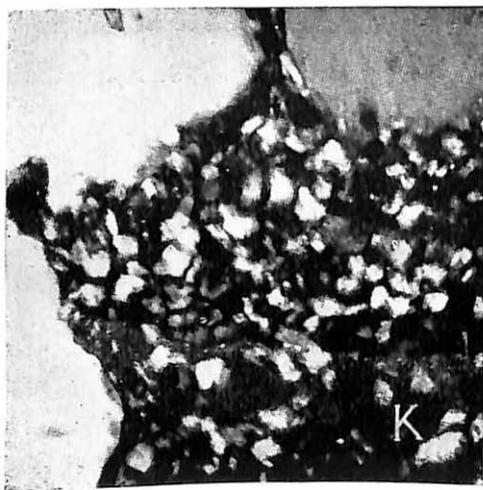


Fig. 3. — Kaolin (K) dans un grès (Fig. 2).  
( $\times 250$ )

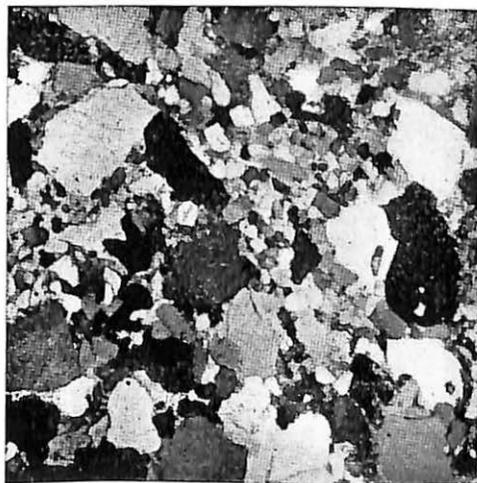


Fig. 4. — Grès grossier cimenté par  
un grès fin. ( $\times 30$ )

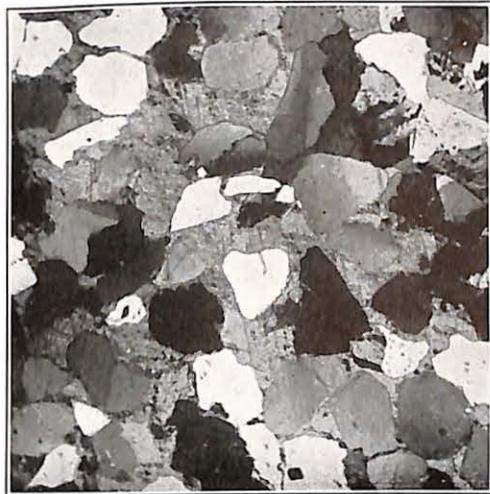


Fig. 5. — Grès calcaireux de grain moyen.  
( $\times 30$ )

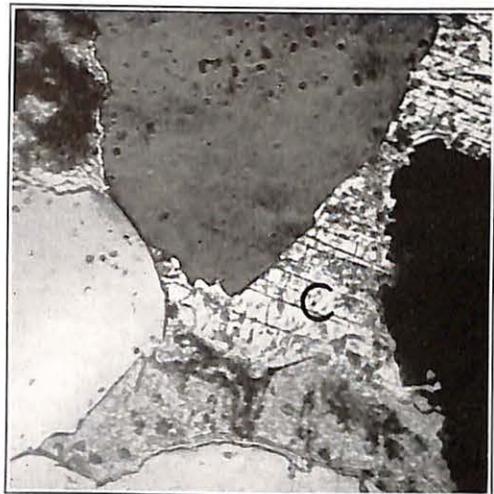


Fig. 6. — Calcite (C) entre des grains  
de quartz dans un grès (Fig. 5).  
( $\times 250$ )



Fig. 7. — Grès siliceux de grain moyen.  
( $\times 30$ )



Fig 8. — Grès à texture quartzitique.  
(Fig.7) ( $\times 250$ )

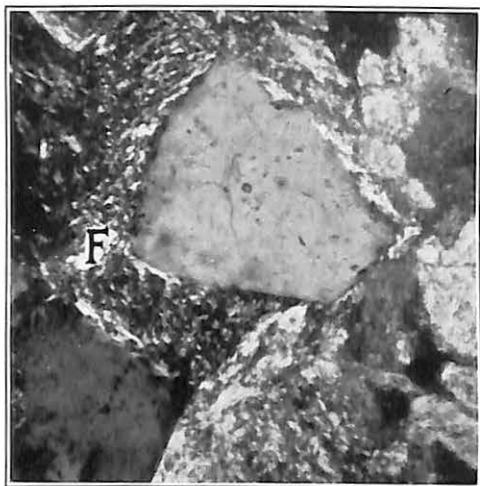


Fig. 9. -- Produits de décomposition de feldspaths (F) entre les grains de quartz de grès (Fig. 7).  
(250)

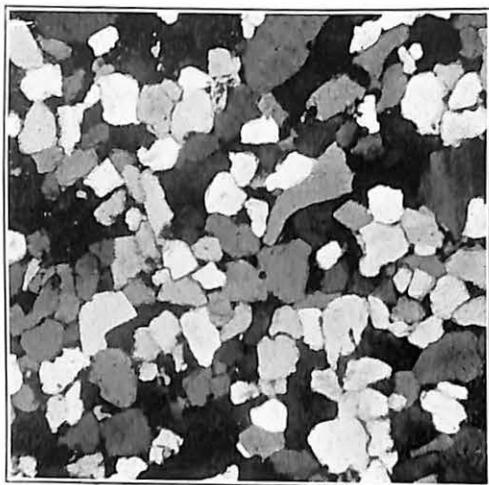


Fig. 10. -- Grès siliceux à grain fin.  
( $\times 30$ )

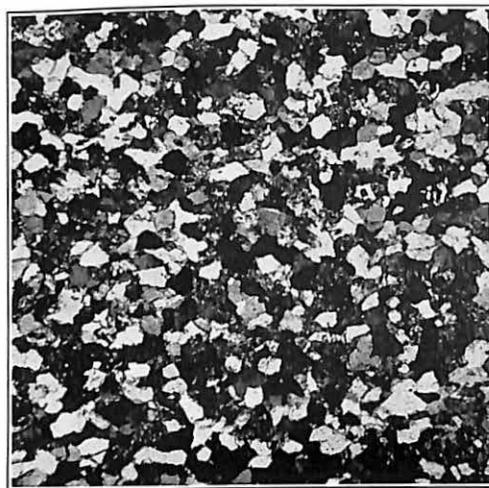


Fig. 13. -- Grès sériciteux à grain fin.  
( $\times 30$ )

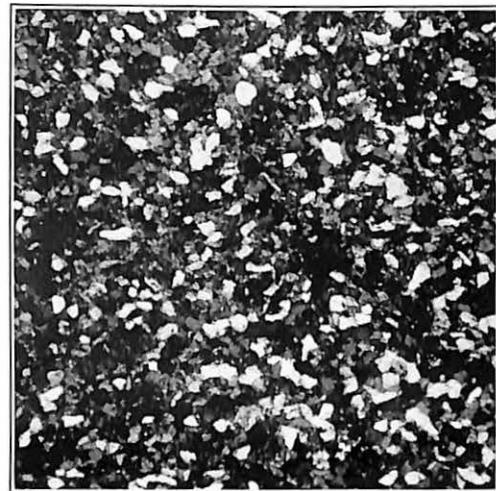


Fig. 14. -- Grès schisteux à gros grains,  
( $\times 30$ )

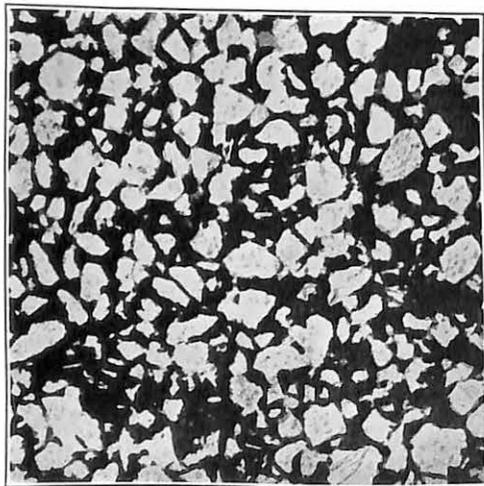


Fig. 11. -- Grès ferrugineux à grain fin.  
(Lumière naturelle;  $\times 30$ )

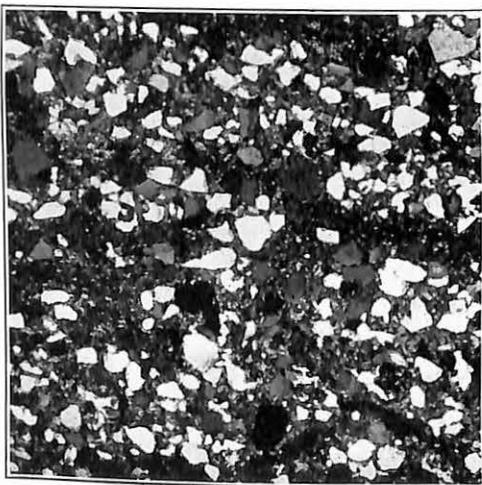


Fig. 12. -- Grès argileux à grain fin.  
( $\times 30$ )



Fig. 15. -- Grès schisteux rubané à fausse stratification (grandeur naturelle).

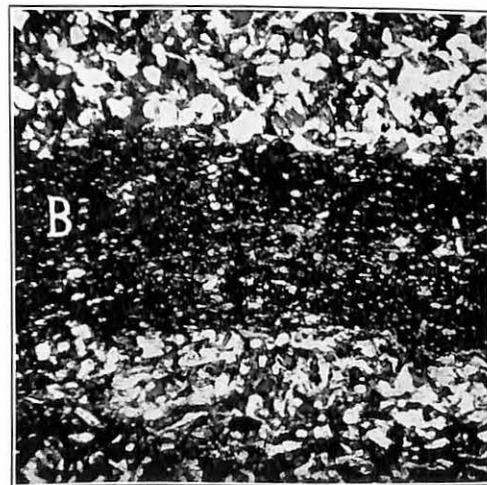


Fig. 16. -- Bande argilo-charbonneuse (B) dans un grès schisteux à gros grains.  
( $\times 30$ )



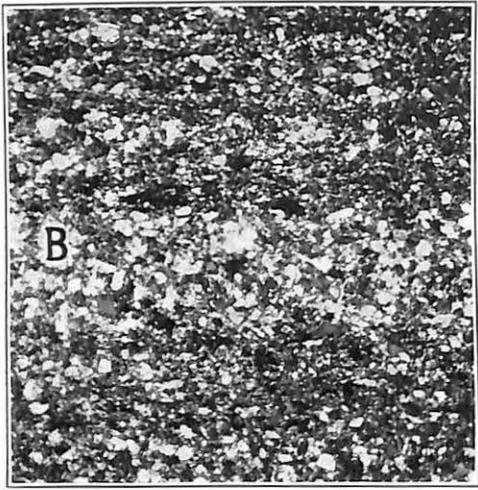


Fig. 17. — Bande sableuse (B) dans un grès schisteux à grain fin.  
( × 30)

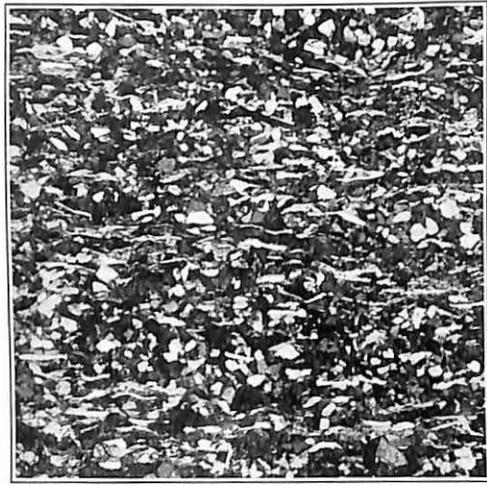


Fig. 18. — Grès schisteux à grain fin et micaci.  
( × 30)

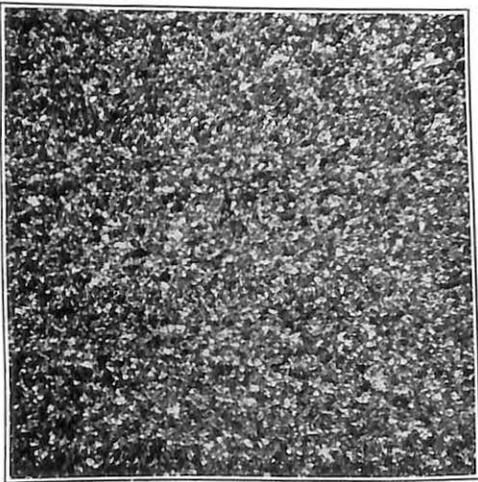
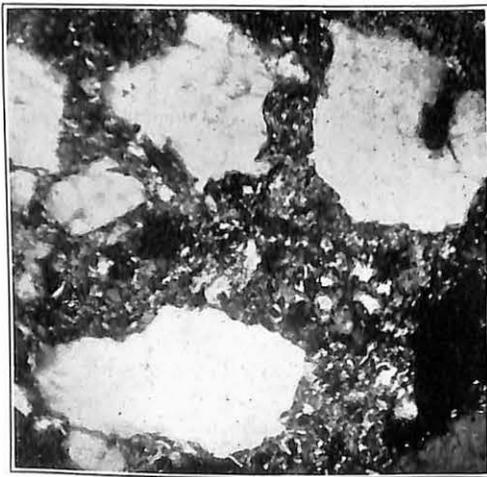


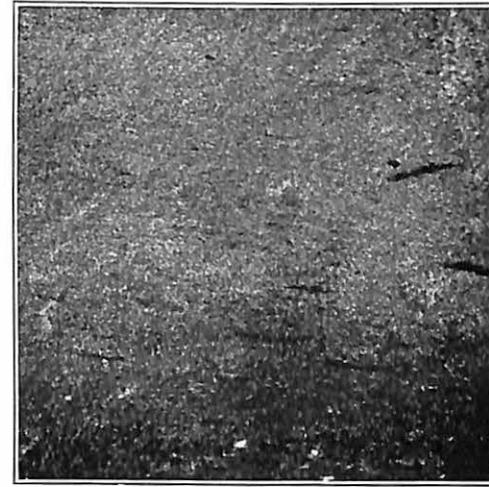
Fig. 19. — Grès schisteux fin homogène.  
( × 30)



F.g. 20. — Grains de quartz dans un grès schisteux.  
( × 250)



(b)



(a)

Fig. 21. — Schiste argileux (dur) présenté dans deux orientations différentes sous le microscope pour mettre en évidence le parallélisme des constituants.  
( × 30)

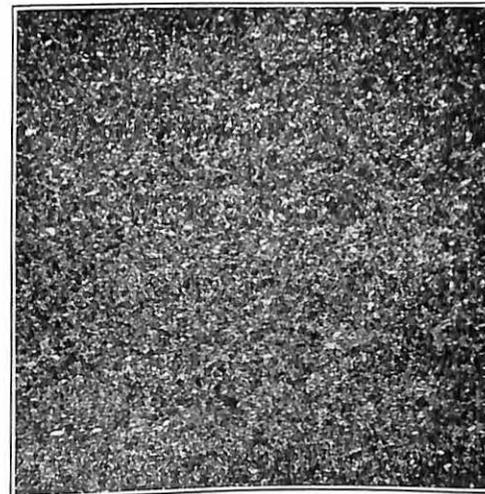


Fig. 22. — Schiste dur (mudstone) à gros grain.  
( × 30)

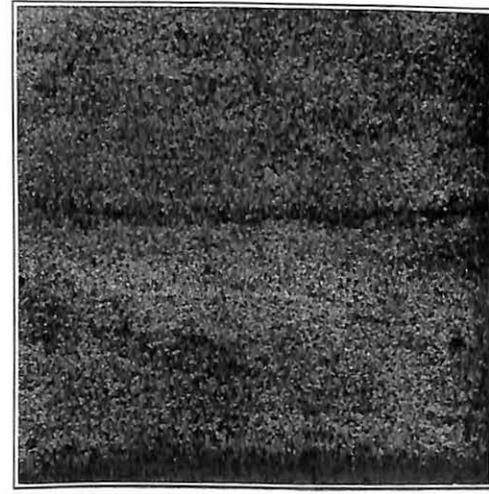


Fig. 23. — Schiste dur (mudstone) à grain fin.  
( × 30)



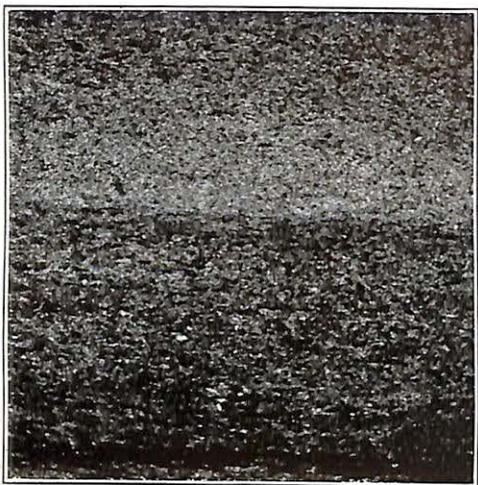


Fig. 24. — Schiste  
( $\times 30$ )

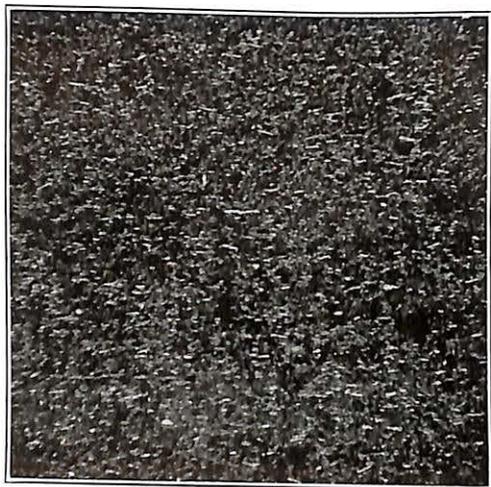


Fig. 25. — Schiste avec séricite abondante.  
( $\times 30$ )  
( $\times 30$ )



Fig. 29. — Faux mur (Underlay) présentant  
des traces de surfaces de décollement.  
(lumière naturelle;  $\times 30$ )

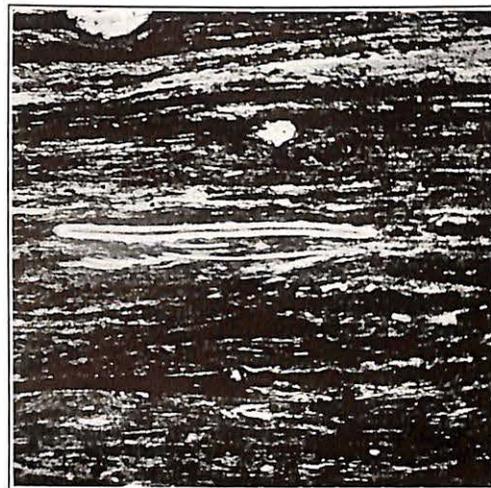


Fig. 30. — Roche argilo-charbonneuse avec  
spores et bandes charbonneuses.  
(lumière naturelle;  $\times 30$ )

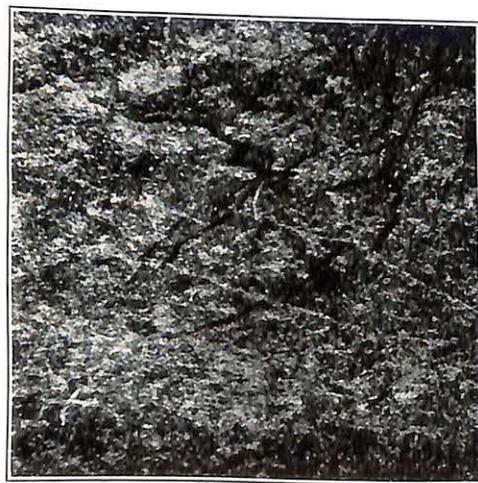


Fig. 27. — Faux mur (Underlay).  
( $\times 30$ )

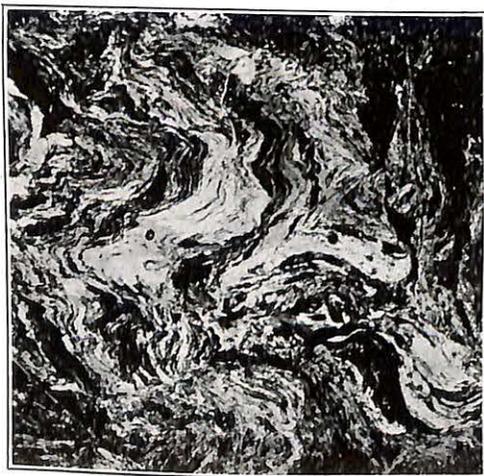


Fig. 28. — Argile charbonneuse présentant  
de nombreuses surfaces de décollement.  
(lumière naturelle;  $\times 30$ )



Fig. 31. — Trace d'une surface de mouve-  
ment dans une roche argileuse.  
( $\times 30$ )

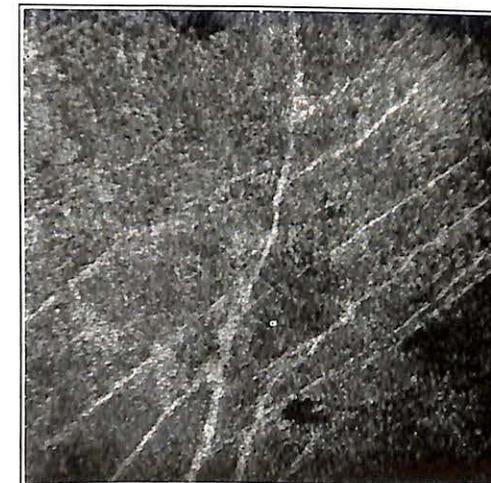


Fig. 32. — Traces de surfaces de déplacement  
dans une roche argileuse.



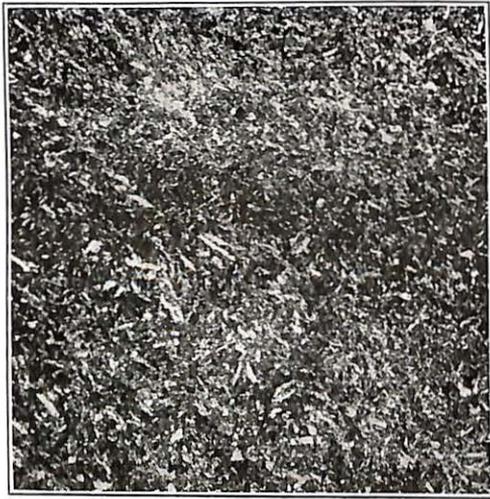


Fig. 26. -- Faux mur (Underclay).



Les schistes argileux (fig. 21<sup>a</sup> et 21<sup>b</sup>) sont formés par la consolidation des produits les plus ténus de la désintégration rocheuse. Cette consolidation ne résulte pas tant de la cémentation, comme dans le cas de grès, mais d'une espèce de soudure, sous pression, qui a expulsé en même temps la majorité de l'eau contenue dans les boues et les argiles primitives.

La stratification constitue la différence principale entre les trois variétés de roches. Ces roches, schistes argileux, schistes et argiles diffèrent des grès et des grès schisteux non seulement par la finesse des grains, mais également par une teneur inférieure en quartz.

Les composants minéraux de roches argileuses sont difficiles à identifier en raison de leur état de division très poussé.

Ils varient en finesse, de la limite supérieure de la variété argileuse, aux dimensions ultra-microscopiques.

Les forts grossissements permettent quelquefois de déceler l'enveloppe micacée des constituants qui se présentent sous forme de fines touffes (*wisps*) et d'écaillés (*flakes*).

Dans les variétés plus grossières, on peut trouver du quartz, de la calcite, de la sidérose, de la chlorite (silicate alumino-magnésique hydraté) et de la muscovite ou un matériau séricitique; il y a toujours du matériau carbonacé qui se présente sous le microscope, en lumière ordinaire, sous la forme d'une substance brune, semi-opaque, qui peut être uniformément répartie à travers toute la masse ou disposée en bandes le long des plans de stratification.

La texture très fine de ces roches ressort des microphotographies figures 22 et 23 de schistes grossiers gros et fins (*mudstones*) et des figures 24 et 25 qui sont des schistes, dont le dernier contient beaucoup de séricite qui accentue la stratification.

Les argiles ne possèdent généralement pas une disposition analogue des constituants; les figures 26 et 27 montrent deux exemples de murs argileux.

La disposition irrégulière des constituants ressort clairement de la première figure, tandis que la coloration par plages de la dernière figure est due à une irrégularité similaire.

Les figures 28 à 30 montrent les variétés plus carbonacées des roches argileuses; ces dernières contiennent souvent des résidus abondants de plantes et ou de matériaux charbonneux, et, les argiles spécialement, sont fréquemment traversées de surfaces unies brillantes (surfaces de décollement).

Certaines variétés tendres de roches argileuses, observées sous le microscope, montrent à une petite échelle des signes d'un déplacement relatif du matériau rocheux susceptible d'expliquer leur plus faible résistance par rapport à d'autres roches de composition quelque peu similaire.

Dans certains cas, le joint de stratification le long duquel ce mouvement relatif s'est produit traverse et déplace un résidu de plante, comme indiqué dans la figure 31. On peut voir des traces de ces surfaces de mouvement, sous la forme d'une série de lignes différemment colorées du reste de la roche par suite du transport, dans la direction du mouvement, des minéraux se trouvant au voisinage des surfaces de mouvement.

Il en résulte une orientation différente de ces minéraux par rapport aux autres.

Les lignes de couleur plus claire de la figure 32 sont des traces de deux séries de surfaces de mouvement dont l'une a cédé la place à l'autre.

#### PROPRIÉTÉS DES ROCHES HOUILLÈRES

Les strates en surplomb sont sujettes à chacune des trois forces, compression, tension et cisaillement, et la connaissance de leur comportement sous l'action de chacune de ces forces est essentielle pour l'étude du contrôle du toit.

La charge de rupture des roches est un point important.

Beaucoup de recherches ont été faites en Grande-Bretagne sur la résistance et les propriétés élastiques des roches sollicitées par des forces transversales et de compression, ainsi que sur leur résistance au cisaillement.

#### *Résistance à la compression.*

Des essais ont été effectués sur des cubes d'un pouce, dont les faces soumises à la compression avaient été préparées spécialement. Aucune matière n'était interposée entre les faces des cubes et les plateaux métalliques de la machine d'essai.

Unwin et Beare (*The Testing of Materials of Construction*, Longmans, p. 420, et *Proc. Soc. Civil, Eng.* Vol. 107, 1892, p. 345) ont indiqué que l'emploi d'un matériau tel que du plomb en feuilles ou du bois de pin réduisent considérablement la charge requise pour provoquer l'écrasement de la roche, à cause des forces tangentielles

le long des surfaces du cube qui diminuent la résistance à la compression.

L'intercalation d'une couche de plâtre de Paris, comme recommandé par Beare, n'est pas possible, car les schistes houillers sont facilement influencés par l'humidité.

Les résistances à l'écrasement trouvées pour ces roches n'indiquent pas la résistance effective *in situ* où règne un état de tensions différent.

La résistance moyenne à l'écrasement de 12 grès et de 6 schistes est indiquée dans le tableau III.

TABLEAU III

Résistance à l'écrasement en  $\text{kgs/cm}^2$ .

Matériau		Pression appliquée perpendiculai- rement à la stratification	Pression appliquée parallem nt à la stratification
Grès	1. . . . .	1.400	980
	» 2. . . . .	1.407	—
	» 5. . . . .	1.400	1.358
	» 4. . . . .	1.365	—
	» 5. . . . .	1.050	840
	» 6. . . . . (1)	716	1.156
	» 7. . . . .	1.023	630
	» 8. . . . .	888	—
	» 9. . . . .	807	464
	» 10. . . . .	721	441
	» 11. . . . .	378	315
	» 12. . . . .	723	—
Schiste	1. . . . .	805	269
	» 2. . . . .	707	378
	» 3. . . . .	667	420
	» 4. . . . .	518	262
	» 5. . . . .	448	—
	» 6. . . . .	401	252

(1) Pression dirigée à  $60^\circ$  par rapport à la stratification.

Les résultats des essais de Müller sur les roches houillères (Glückauf, 66, 47, 22-11-30, pp. 1601-1612, et Glückauf, 66, 48, 29-11-30, pp. 1646-1652) sont indiqués dans le tableau IV.

TABLEAU IV

Résistance à l'écrasement en  $\text{kgs/cm}^2$ .

Matériau	Pression à angle droit avec la stratification	Pression parallèle à la stratification
Grès . . . . .	796	766
Schiste argileux ( <i>clay slate</i> ) . . . . .	811	554
Charbon I . . . . .	208	—
Charbon II . . . . .	245	—

Nebelung et Welter (Glückauf, 69, 44, 4 nov. 1933, p. 1058) ont trouvé que la résistance moyenne à l'écrasement de 3 schistes était de  $346 \text{ kgs/cm}^2$ .

Dans les essais avec plaques dont les dimensions latérales étaient égales à deux fois la hauteur, ils ont obtenu la moyenne, élevée, de  $88,4 \text{ kgs/cm}^2$ .

Il peut être intéressant de noter que des recherches ont été faites sur la résistance de charbons aux Etats-Unis d'Amérique et dans l'Inde.

Les résultats obtenus présentent des variations considérables et peuvent être considérés comme sujets à caution. Les chiffres les plus élevés obtenus se rapprochent de  $210 \text{ kgs/cm}^2$ .

Penman, qui opérait sur des charbons indiens, note qu'il était difficile d'éviter des fissures, des cassures et des plans de clivage qui, naturellement, affectaient les résultats (Glückauf, 69, 44, 4 nov. 1933, p. 1058).

*Résistance à la flexion.*

On a découpé des éprouvettes en forme de poutres dans des échantillons de roches prélevés au voisinage du front de taille. La préparation des éprouvettes de schistes a présenté des difficultés. Il ne fut pas toujours possible de les couper aux dimensions voulues.

Des essais préliminaires ont été effectués en ordre principal pour trouver le module d'élasticité. Dans ces essais, les poutres furent simplement supportées à leurs extrémités et chargées au centre.

Les tensions engendrées dans une poutre chargée entre les limites d'élasticité sont données par la formule :

$$f = \frac{My}{I} \quad (1)$$

où :  $f$  est la tension;

$M$  est le moment de flexion;

$I$  est le moment d'inertie de la section droite de la poutre;

$y$  est la distance du point pour lequel on calcule la tension au plan neutre.

En général, la tension trouvée pour un moment de flexion  $M$  maximum se trouve entre la résistance limite à la traction et à la compression, et constitue le module de rupture.

Elle donne une bonne indication sur la résistance de différents matériaux sous des charges transversales.

Pour la plupart des roches houillères, la relation entre les efforts appliqués et la contrainte créée est approximativement linéaire pour une mise en charge rapide de la poutre en roche.

Oherste-Brinke considère le module de rupture ou capacité de flexion comme égal à 4 fois la résistance à la traction.

Les valeurs moyennes du module de rupture pour les 13 grès et les 10 schistes figurent dans le tableau V ci-dessous, où nous avons transformé les valeurs en livres par pouce carré en valeurs kgs/cm<sup>2</sup>.

#### Résistance à la compression. — Analyse des résultats obtenus.

Les grès n<sup>os</sup> 1, 2, 3 et 4 possèdent approximativement la même résistance à la compression.

Le grès n<sup>o</sup> 1 contient une bonne partie de matériau feldspathique décomposé et est beaucoup plus grossier que les n<sup>os</sup> 2, 3 et 4. Les grains sont plus angulaires et il renferme en outre beaucoup de zones quartzitiques, tandis que l'observation au microscope à fort grossissement décele une quantité considérable de silice dans les zones feldspathiques.

Le grès n<sup>o</sup> 4, qui est un peu plus tendre que les trois autres, renferme la plus grande quantité de calcite, comme le montre aussi la solubilité à l'acide.

TABLEAU V  
Module de rupture en kgs/cm<sup>2</sup>.

Matériau	Eprouvette chargée perpendiculairement à la stratification	Eprouvette chargée parallèlement à la stratification
Grès 1. . . .	252	—
» 2. . . .	231	—
» 3. . . .	214	208
» 4. . . .	175	180
» 5. . . .	197	—
» 6. . . .	130	231
» 7. . . .	95	94
» 8. . . .	153	219
» 9. . . .	89	110
» 10. . . .	146	—
» 11. . . .	57	—
» 12. . . .	224	—
» 15. . . .	135	—
Schiste 1. . . .	266	—
» 2. . . .	185	—
» 3. . . .	134	—
» 4. . . .	136	—
» 5. . . .	195	—
» 6. . . .	134	—
» 7. . . .	157	—
» 8. . . .	133	—
» 9. . . .	80	—
» 10. . . .	54	—

Le grès n<sup>o</sup> 5, qui est la roche suivante au point de vue résistance, possède une dimension de grains similaire aux n<sup>os</sup> 3 et 4, mais elle renferme une quantité anormale de sidérose, cause incontestable de la moindre résistance de cette roche.

Les données obtenues pour le grès n<sup>o</sup> 6 sont intéressantes à cause de la direction des efforts de pression par rapport à la stratification.

La faible valeur de 716 kgs/cm<sup>2</sup> a été obtenue avec la pression à 60° par rapport à la stratification, cas favorable pour céder au cisaillement.

La roche la plus résistante suivante est le grès n° 7. Cette roche peut être comparée, au point de vue des grains, aux n°s 2, 3 et 4, mais elle est un peu plus poreuse. La faible résistance à la compression, parallèlement à la stratification, peut être due aux constituants argileux disposés en formes de « touffes » (*wisps*) le long de la stratification.

Le grès n° 8 est similaire, sous la plupart des rapports, au n° 7, à l'exception peut-être d'une plus forte teneur en calcite, quoique cela ne ressorte pas de la solubilité à l'acide.

La moindre résistance du grès n° 9 peut être expliquée par la teneur plus grande en matériaux micacés et argileux. La diminution de grain est également beaucoup moindre.

Le grès n° 10 contient des joints de stratification micacés, prononcés, et une grande quantité de kaolin, deux facteurs qui conduisent à une résistance à la compression plus faible.

La résistance à la compression encore plus faible du grès n° 11 présente un intérêt spécial, à cause de la grosseur de grain considérable qui le fait ressembler, sous cet aspect, au grès n° 1.

Le grès 11, cependant, contient une quantité considérable de feldspaths désagrégés (*weathered*) et de kaolin, ce dernier exerçant incontestablement une influence prononcée sur la résistance de la roche.

Il ne semble pas exister de relation entre la finesse de grain et la résistance à la compression de ces roches.

La présence de calcite ou de sidérose ( $\text{FeCO}_3$ ) donne lieu à une résistance à la compression plus faible.

Lorsqu'une roche renfermant de la calcite est soumise à la compression, la calcite, beaucoup plus tendre, est broyée par le quartz et n'intervient plus dans la résistance aux forces appliquées.

Les deux grès qui contenaient une grande quantité de kaolin étaient beaucoup plus tendres que les autres grès à finesse de grain équivalente ou moindre.

La présence de matériau micacé ou carbonacé diminue également la résistance à la compression.

Il faut aussi tenir compte de la porosité des roches; la résistance à la compression semble diminuer avec l'augmentation de la porosité; la même relation existe entre le produit de la porosité par la solubilité à l'acide et la résistance à la compression.

Les schistes n°s 1 et 2, les plus arénacés essayés, sont les plus résistants à la compression.

Le schiste n° 6, qui est à grains très fins et non arénacés, a la plus faible résistance à la compression.

#### *Résistance aux charges transversales.*

Les résistances transversales des grès sont approximativement proportionnelles aux résistances à la compression.

Les grès n°s 1, 2 et 3 sont les plus résistants aux charges transversales.

Le grès n° 4 est un peu plus faible, probablement pour la même raison que celle motivant la moindre résistance à la compression, c'est-à-dire une plus grande teneur en calcite.

Le grès n° 5, qui présentait une résistance à la compression moindre que le grès n° 4, est un peu plus résistant aux charges transversales.

Le grès n° 6 renferme plus de matériau micacé et carbonacé, donnant lieu à une résistance transversale plus faible.

La moindre résistance du grès n° 7 est due aux joints de stratification carbonacés prononcés qui se révèlent sous forme de lits en touffes (*wispy bedding*) dans une section de roche.

Les efforts de cisaillement engendrés longitudinalement et qui agissent le long de ces plans provoquent facilement la rupture d'une éprouvette en forme de poutre de cette roche.

La même chose s'applique au grès n° 10, qui contient des joints micacés prononcés.

Le grès n° 9 ressemble au grès n° 6 au point de vue constitution et résistance transversale.

Le grès n° 11, qui avait la résistance à la compression la plus faible, est un peu plus résistant que certains autres échantillons vis-à-vis des charges transversales.

À l'exception des n°s 1, 2 et 9, la résistance transversale des schistes est approximativement de 140 kgs/cm<sup>2</sup>. Les n°s 1 et 2 sont les plus résistants. Ce sont aussi les plus arénacés, comme indiqué lors des essais de résistance à la compression.

La faible résistance du n° 9 résulte vraisemblablement de la stratification prononcée provenant d'inclusions calcareuses.

Le schiste n° 10 est un vrai charbon, d'où le chiffre peu élevé obtenu.

## EXPOSE DES RESULTATS

## CONSTANTES ELASTIQUES DES ROCHES

## a) FLEXION.

*Détermination du module d'élasticité à la flexion.*

L'appareil pour les essais de flexion des éprouvettes (fig. 33) se composait d'une table en fonte AB comportant une fente sur toute sa longueur, comme le montre la vue en plan. Cette table était soutenue par deux pieds en fonte CD.

L'éprouvette de roche EF reposait sur deux supports réglables G et H fixés à la table, par en dessous. Les charges étaient appliquées au centre de l'éprouvette en roche à l'aide d'un crochet J fixé à un collier entourant l'éprouvette.

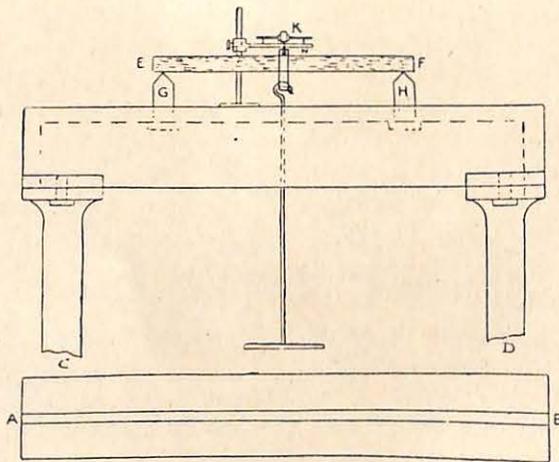


Fig. 33. — Appareillage pour les essais de flexion des éprouvettes.

La figure 34 donne une coupe de l'appareil montrant l'application de la charge.

Le support H est fixé en L sur la table AB. EF constitue une section droite de l'éprouvette.

La flexion est mesurée à l'aide du levier optique K. Le support arrière de ce levier traverse une ouverture pratiquée dans le collier

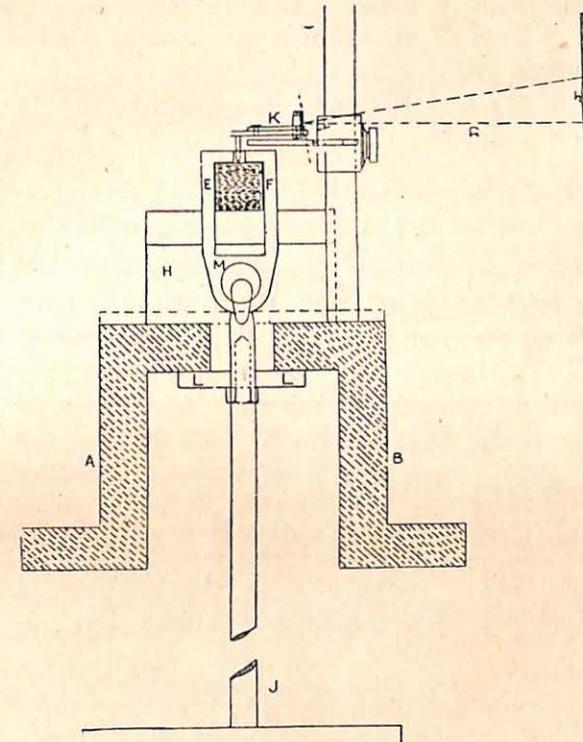


Fig. 34. — Coupe montrant l'application de la charge.

M et prend appui sur la poutre; les deux supports antérieurs s'appuyent sur une plate-forme fixe N.

Le levier s'incline donc avec le miroir perpendiculaire qui en est solidaire.

La figure 35 donne le principe du levier optique. La lumière d'une échelle fixe, éclairée et disposée à 5<sup>m</sup>,40 du miroir, est réfléchie dans un télescope permettant la lecture de la déformation. Cette échelle est graduée en millimètres et se trouve fixée à un arc de 5<sup>m</sup>,40 de rayon de courbure.

Lorsque l'éprouvette fléchit de la quantité  $d$ , le miroir du levier optique tourne d'un angle  $\theta$ . Si  $r$  est la distance entre les supports avant et arrière du levier optique, nous aurons :

$$d = r \sin \theta \quad (1)$$

En même temps, la lecture à l'échelle variera d'une quantité  $h$  et passera de P en Q, équivalent à une déviation angulaire  $2\theta$  du rayon lumineux :

$$h = R \times 2\theta \quad (\text{en radians}) \quad (2)$$

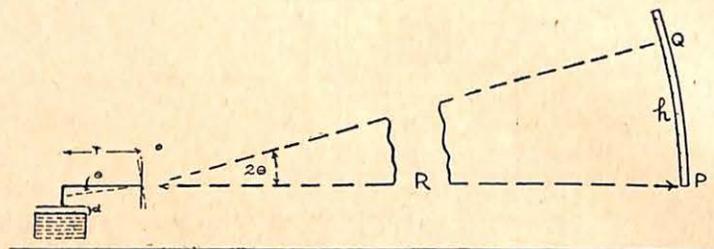


Fig. 35. — Principe du levier optique.

On tire de (1) et de (2) :

$$\frac{d}{h} = \frac{r \sin \theta}{R \times 2\theta} \quad (3)$$

$\theta$  étant très petit, on peut admettre  $\theta = \sin \theta$ , d'où :

$$\frac{d}{h} = \frac{r}{2R} \quad (4)$$

$$d = \frac{hr}{2R}$$

Si  $r = 12$  mm. et  $R = 4^m,40$  (5.400 mm.) une division, soit 1 mm., de l'échelle équivaut à :

$$d = \frac{1 \times 12}{10800} = 0,00111 \text{ mm.}$$

soit 1,1  $\mu$ .

On peut facilement faire des lectures à une demi-graduation près.

On peut donc mesurer une déformation de 0,55  $\mu$ .

La relation entre  $d$  et la lecture à l'échelle a été déterminée également par une méthode directe. Le support arrière du levier optique était placé sur un micromètre.

On déplaçait la tête du micromètre d'une ou de plusieurs unités tout en notant la variation correspondante de la lecture à l'échelle.

### Essais préliminaires.

Les essais préliminaires sur les éprouvettes de roche se bornaient à les soumettre à des cycles de mise en charge et décharge aussi rapides que possible.

Toutes les roches présentaient une certaine déformation permanente (*permanent set*) après le premier cycle.

Cette déformation augmentait après le premier ou les deux cycles suivants; ensuite, pourvu que la charge maximum restât la même, il se produisait un rétablissement complet de la roche, mais toujours avec une courbe d'hystérésis.

Nadai (*Plasticity*, Eng. Soc. Monographs, Mc Graw Hill Co, p. 27) pense que la cause principale de ces courbes d'hystérésis pour des matériaux comme le grès, le béton et la fonte, etc. est le glissement, l'un sur l'autre, sous pression, de cristaux granulés ou d'agrégats de grains le long de surfaces internes de défauts (points faibles).

Ces surfaces internes de moindre résistance sont dues à des occlusions tendres ou à une intercalation de matière peu résistante entre les grains.

Dans le cas de la fonte, il affirme que les constituants les plus résistants sont déplacés comme des corps rigides le long des pellicules de graphite, si ces petites surfaces de glissement se trouvent sous pression.

Le frottement interne tend à s'opposer à ce glissement, et la direction de la tension étant inversée, provoque un déplacement de la courbe tension-contrainte, donnant lieu à ce qui a été appelé hystérésis élastique.

Ces considérations peuvent être appliquées aux roches dont les grains tiennent ensemble à l'aide d'un ciment plus tendre, comme les grains de silice cimentés à l'aide de matériaux calcaires, ferrugineux ou argileux.

Il importe de souligner que la description ci-dessus du comportement des éprouvettes sous l'action de charges transversales est uniquement vraie pour des opérations de mise en charge et de décharge rapides.

Comportement d'éprouvettes de roche, sous l'action de charges transversales, en rapport avec la théorie élastique de la flexion.

La formule donnant la relation entre la déformation, la charge appliquée et les dimensions d'éprouvette dans les conditions des essais est :

$$Y = \frac{WL^3}{48.E.I}$$

où : E est le module d'élasticité;

W est la charge appliquée;

Y est le déplacement du point central de l'éprouvette;

I est le moment d'inertie de la section d'éprouvette.

En appliquant une charge constante à des longueurs différentes de la même éprouvette, nous avons la relation suivante :

$$Y = KL^3$$

où  $K = \frac{W}{48.E.I}$ .

Pour étudier la similitude entre les éprouvettes de roche et les corps élastiques, sous le rapport de la longueur, une série d'essais a été effectuée sur différentes longueurs d'un certain nombre d'éprouvettes.

Le tableau suivant donne les résultats obtenus pour un schiste. (Nous avons transformé les résultats en mesures métriques.)

Matériau : schiste n° 8.

Charge en kg.	Déformation (en cm x 10 <sup>4</sup> ) pour une longueur d'éprouvette en centimètres de			
	15	20	25	30
1,8	1,5	3,1	5,9	10,2
2,7	2,4	4,7	8,9	15,5
3,6	2,9	6,5	11,6	21,6
4,5	3,7	8,5	14,6	25,5
5,4	4,4	9,8	17,6	31,1
6,3	5,2	11,4	20,3	36,1

La relation entre la déformation Y, correspondant à une charge de 4,55 kgs, et la longueur de l'éprouvette est de la forme  $Y = kL^n$ , d'où :

$$\log Y = \log k + n \log L$$

Pour une charge de 4,5 kgs :

$$\log Y = 0,1703 \quad 0,5224 \quad 0,7672 \quad 1,0090$$

$$\log L = 0,7782 \quad 0,9031 \quad 1,0000 \quad 1,0792$$

La relation entre  $\log Y$  et  $\log L$  est une ligne droite, permettant de déterminer la valeur de n :

$$0,7672 = \log k + n.1,0000$$

$$0,1703 = \log k + n.0,7782$$

$$\frac{0,5969}{n} = \frac{n.0,2218}{n} \quad n = 2,7$$

Les valeurs de n correspondant à un autre schiste et pour 4 grès sont respectivement :

Schiste	n° 4. . . .	n = 2,99
Grès	n° 2. . . .	n = 2,91
»	n° 3. . . .	n = 2,84
»	n° 8. . . .	n = 2,83
»	n° 14. . . .	n = 2,72

Influence de l'épaisseur des éprouvettes (en forme de poutre).

Des essais ont été effectués sur 3 éprouvettes de schiste n° 3, de même longueur et largeur, mais d'épaisseur différente.

Les dimensions étaient les suivantes :

	Longueur cm.	Largeur cm.	Épaisseur cm.
(1)	45	7,25	7,5
(2)	45	7,25	4,6
(3)	45	7,25	16,9

Chaque éprouvette a été soumise à un certain nombre de cycles de mise en charge et décharge. Sauf pour le premier cycle, elles se comportaient toutes d'une manière élastique.

La charge était de nature à ne pas créer des tensions élevées dans l'éprouvette, chose importante, car les deux autres éprouvettes ont été découpées de celle-ci.

La relation entre les déformations et l'épaisseur des éprouvettes est de la forme :

$$y = kD^n$$

La relation entre le logarithme des déformations et celui des épaisseurs est encore une ligne droite, l'exposant  $n$  valant pratiquement  $-3$ . C'est pourquoi :

$$y = \text{env.} \frac{1}{D^3}$$

ce qui est conforme à la théorie élastique de la flexion.

Que les éprouvettes en roche se comportent élastiquement ressort encore de la constance du module d'élasticité correspondant à chacun des cas ci-dessus; ces modules s'établissent comme suit :

Module d'élasticité (en tonnes/cm<sup>2</sup>).

Epaisseur cm.	en ne tenant pas compte du cisaillement	en tenant compte du cisaillement $n = 3$
7,5	278	303
4,6	288	298
1,9	296	298

#### Influence de la largeur des éprouvettes en roche.

D'autres essais ont été effectués avec le grès n° 3, sur des éprouvettes de même longueur et épaisseur, mais de largeur différente. Les dimensions étaient (en centimètres) :

Longueur	Largeur	Epaisseur
45	7,2	1,9
45	3,9	1,9
45	2,5	1,9

La relation entre le log B et le log Y est une ligne droite, et  $n$ , dans la relation  $y = kB^n$ , vaut  $-1$  environ.

Les résultats de ces essais montrent que ces éprouvettes de roche ne s'écartent guère de la théorie élastique de la flexion.

Les essais sur des longueurs différentes d'éprouvettes permettent des conclusions mieux établies à cause du plus grand nombre d'essais effectués.

Il est plus aisé de déterminer l'effet de la longueur, une éprouvette suffisant pour chaque série d'essais.

Pour étudier l'effet de la largeur et de l'épaisseur, il est nécessaire de réduire la section d'éprouvette, pour chaque essai, dans chaque cas.

Les essais avec différentes épaisseurs, largeurs et longueurs d'éprouvette ont été effectués avec la même roche et, dans chaque cas, les éprouvettes se comportaient conformément à la théorie élastique.

L'auteur croit que pour les tensions comparativement faibles employées dans les essais, les éprouvettes de roche obéissent à la théorie de la flexion et que l'emploi de la formule :

$$E = \frac{WL^3}{48yl}$$

est justifiée.

#### Module d'élasticité.

Les valeurs moyennes du module d'élasticité de 15 grès et de 13 schistes sont données dans le tableau VI avec d'autres renseignements.

#### Facteurs influençant le module d'élasticité.

La cause des variations des constantes élastiques de ces roches doit être recherchée dans la nature et la disposition des minéraux de constitution.

La solubilité dans l'acide et la porosité ont été déterminées pour la plupart des grès. La première peut être prise comme mesure de la teneur en calcaire et en sidérose.

L'effet de la porosité sur le module d'élasticité résulte de l'examen des grès 1 et 11 ou 15.

Le module d'élasticité est d'autant plus faible que la valeur de chacun des deux facteurs, porosité et solubilité à l'acide, est plus élevé.

Ce ne sont pas les seuls facteurs exerçant une influence sur les constantes d'élasticité, car l'éparpillement des points obtenus montre clairement l'effet d'autres facteurs.

TABLEAU VI

Roche		Module élastique en tonnes/cm <sup>2</sup>	Porosité	Solubilité à l'acide	Produit de la porosité par la solubilité à l'acide
Grès	1.	632	1,45	3,29	4,7
»	2.	602	1,37	3,34	4,5
»	3.	293	2,25	9,88	22,2
»	4.	164	5,08	18,97	96,3
»	5.	443	1,54	27,29	36,5
»	6.	328	1,39	9,60	13,3
»	8.	545	5,85	6,01	35,1
»	9.	368	4,77	6,50	31,0
»	10.	294	10,62	2,15	22,8
»	11.	63	13,21	6,08	80,3
»	12.	484	—	—	—
»	13.	276	1,62	5,27	8,5
»	14.	256	1,31	8,89	11,6
»	15.	89	16,07	8,16	131,3
»	16.	139	10,07	8,37	34,3

Roche		Module d'élasticité en tonnes/cm <sup>2</sup>	Composition	
			Silt et sable	argile
Schiste	1.	395	—	—
»	2.	412	63,50	36,50
»	3.	329	23,83	76,17
»	4.	351	40,04	59,96
»	5.	383	39,00	61,00
»	6.	344	42,40	57,60
»	7.	272	—	—
»	8.	338	17,00	83,00
»	9.	359	—	—
»	10.	55	—	—
»	11.	351	24,80	75,20
»	12.	133	—	—
»	13.	593	—	—
»	14.	295	—	—
Schiste ardoisier (slate)		852	—	—
Marbre		532	—	—

Le faible module d'élasticité du grès n° 2 est probablement dû à une plus grande finesse de grains et au fait que les grains sont un peu plus arrondis.

Le module d'élasticité encore plus faible du grès n° 8 est dû à une augmentation de la solubilité à l'acide et de la porosité.

La position du grès n° 5 est plus difficile à expliquer. Il contient une quantité considérable de sidérose — non uniformément répartie, mais sous forme d'occlusions — d'où solubilité à l'acide extrêmement élevée. La porosité est très faible et la finesse de grain ne diffère pas beaucoup de celle du grès n° 8.

Le produit solubilité à l'acide par porosité ne diffère pas beaucoup pour les grès nos 8 et 9, mais également, dans ce cas, la différence de module d'élasticité peut être expliquée par la finesse de grain considérablement plus grande du grès n° 9.

Les grès nos 14, 15, 10 et 6 se trouvent complètement en dehors de la zone des points représentant tous les autres grès.

Les grès nos 14 et 15 contiennent une quantité considérable de matières argileuses, ainsi que des intercalations de matière carbonacée, qui ont une tendance à réduire le module d'élasticité.

Le grès n° 6 est de nature similaire.

Le grès n° 10 peut être appelé grès *flaggy*; il contient des joints abondamment garnis de mica. Il a une finesse de grain comparativement faible, mais la présence du mica le long de joints bien définis ainsi que d'une quantité non négligeable de kaolin dans les autres parties de la roche expliquent le module d'élasticité peu élevé.

Le grès n° 15 est une roche de la surface et possède approximativement le même module d'élasticité que le grès n° 11.

Il y a une différence considérable dans la finesse de grain de ces deux roches : la première contient plus de calcite (CaCO<sub>3</sub>) et est la plus poreuse, mais la seconde contient plus de feldspaths décomposés ainsi qu'une quantité considérable de kaolin. Le grès n° 11 a une finesse de grain plus petite que la plupart des autres grès, mais sa porosité plus élevée et la présence de kaolin diminuent considérablement la constante d'élasticité.

Une finesse de grain plus grande et une quantité plus importante de matières argileuses ou carbonacées conduisent à un module d'élasticité plus faible.

Les schistes nos 1 et 2, les plus arénacés de ces roches, possèdent le module d'élasticité le plus élevé.

Le schiste n° 5 vient ensuite; il est également plutôt arénacé.

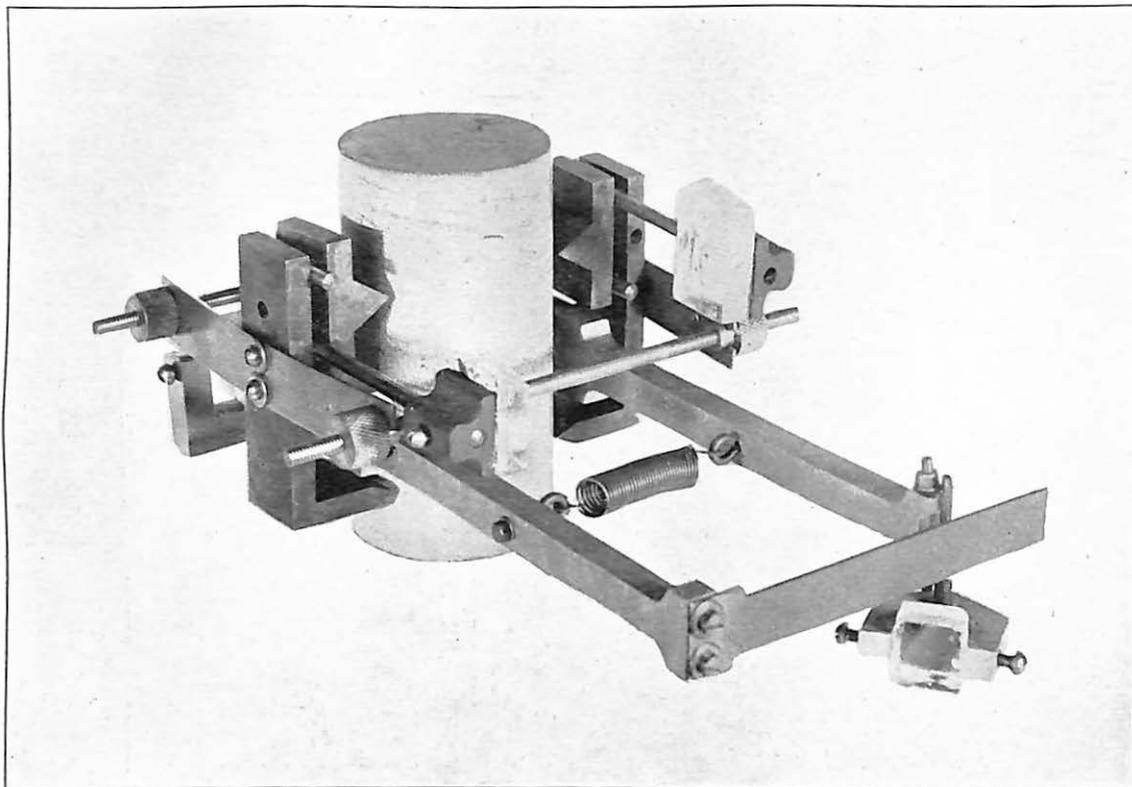


Fig. 36. — Dispositifs optiques montés sur les cylindres de roche pour la mesure de la déformation longitudinale et latérale.

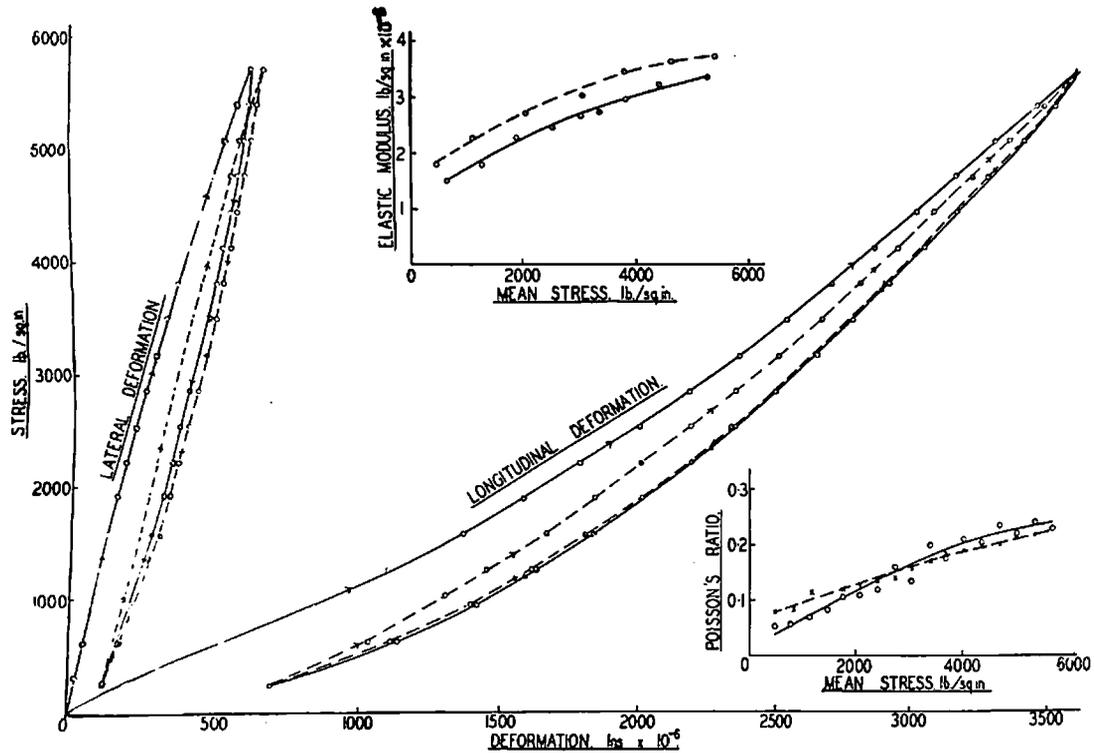


Fig. 37. — Déformation d'un grès en fonction de la charge

Légende.

Poisson's ratio; rapport de Poisson.

Mean stress; tension moyenne.

Stress; tension.

Le module le plus faible correspond au schiste n° 12, à cause, vraisemblablement, de la teneur comparativement élevée en matières carbonacées et des grains micacés plutôt grands, qui constituent une caractéristique importante de cette roche.

Le schiste n° 10 est un vrai charbon et son module d'élasticité de 55 tonnes/cm<sup>2</sup> est analogue au chiffre trouvé par Müller pour un charbon soumis à la compression, à savoir 58 tonnes/cm<sup>2</sup>.

Le schiste n° 13 est extrêmement ferrugineux, ce qui explique le module d'élasticité élevé de 593 tonnes/cm<sup>2</sup>.

Le schiste ardoisier (*slate*) et le marbre ont été ajoutés dans un but de comparaison.

#### b) COMPRESSION.

Les modules d'élasticité à la compression ont été déterminés sur des cylindres d'environ 5 centimètres de diamètre et de 7,5 centimètres de long. Les dispositifs optiques montés sur les cylindres pour mesurer à la fois la déformation longitudinale et latérale sont représentés dans la figure 36.

Si on emploie une échelle graduée en millimètres, placée à une distance de 3<sup>m</sup>,90, une graduation représente une déformation de 0,2  $\mu$  environ, longitudinalement, et de 0,1  $\mu$  environ, latéralement.

Les courbes donnant la déformation d'un grès en fonction de la charge sont représentées dans la figure 37 et sont typiques. Elles se raidissent lorsque la charge augmente, ce qui est dû probablement à un contact plus étroit entre les grains.

Comme dans le cas de charges transversales, on observait un tassement (*set*) après le premier cycle de mise en charge et un état d'élasticité totale fut atteint après le second ou troisième cycle, avec formation cependant d'une courbe d'hystérésis dans chaque cas.

Le tableau ci-après donne les modules maxima et minima correspondant à certains grès, un grès schisteux (*siltstone*), des schistes arénacés et des charbons.

#### c) NOMBRE DE POISSON.

Pour l'usage minier, on a trouvé préférable d'utiliser cette constante que son inverse : *Poisson's Ratio* (rapport de Poisson).

Le nombre de Poisson est le rapport entre la contraction longitudinale et la dilatation latérale d'une éprouvette soumise à la compression.

TABLEAU VII

*E*, tension totale (première mise en charge).

Roche	Gamme de tensions (e kg/cm <sup>2</sup> )	Module d'élasticité en tonnes/cm <sup>2</sup>	
		minimum	maximum
Grès A . . . . .	3,80 - 281	74,9	104,3
» B . . . . .	0 - 402	119,0	168,0
» C (hum.) . . . . .	0 - 429	75,6	132,3
» D . . . . .	0 - 429	145,6	182,0
» E . . . . .	0 - 825	93,8	186,2
» F . . . . .	36,47 - 729	168,7	216,3
» G . . . . .	0 - 385	57,4	163,8
Schiste grossier . . . . .	0 - 714	161,7	186,9
Schiste arénacé A . . . . .	6,37 - 322	91,0	159,6
» » B . . . . .	0 - 825	157,5	169,4
» » C . . . . .	0 - 719	94,5	182,0
» » D . . . . .	0 - 713	197,4	241,5
Charbon A . . . . .	0 - 111	22,4	40,6
» B . . . . .	0 - 438	24,5	35,7

Cette constante d'élasticité a été déterminée à l'aide des mesures directes des déformations longitudinales et latérales sous l'application d'une charge de compression.

Ce travail n'a été effectué jusqu'ici que sur des échantillons de roches chargées à angle droit par rapport à la stratification.

On a trouvé que le nombre de Poisson était fonction :

1) de la charge appliquée : pour toute vitesse de mise en charge donnée, il diminuait avec l'accroissement de la charge;

2) de la vitesse de mise en charge;

3) du cycle de mise en charge.

Le nombre de Poisson *m* pour certains grès, un grès schisteux, des schistes arénacés et des charbons est représenté graphiquement dans la figure 38, tandis que la figure 39 montre l'effet de la vitesse de mise en charge, la courbe A correspondant à une vitesse rapide et B à une vitesse lente. L'effet d'une mise en charge répétée ressort de la figure 40; la courbe A correspond à une première mise en charge et B à une seconde mise en charge et à des mises en charge subséquentes.

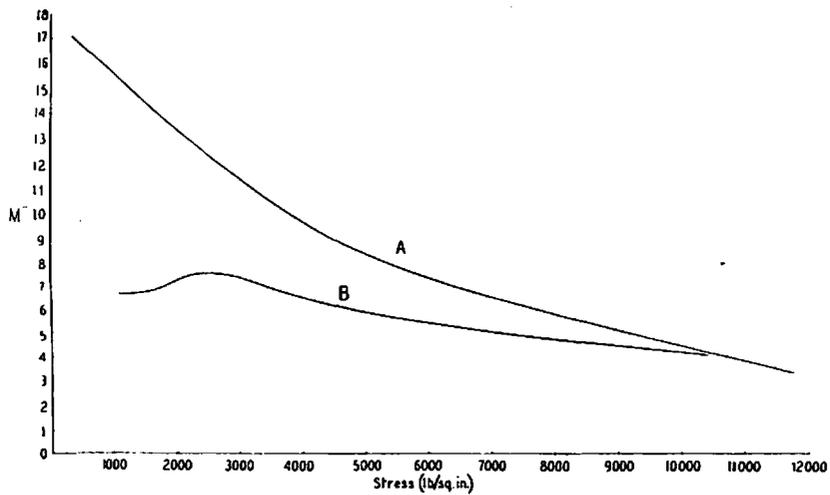


Fig. 39. — Effet de la vitesse de mise en charge.  
 A: mise en charge rapide.  
 B: mise en charge lente.

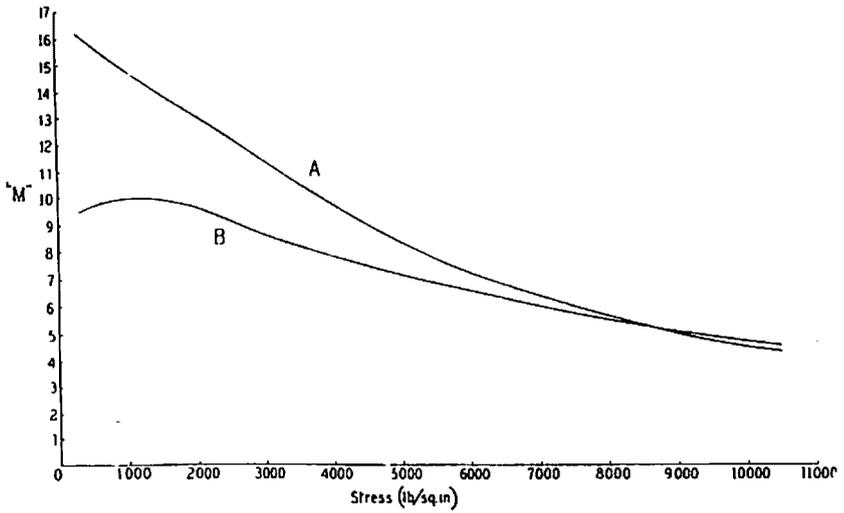
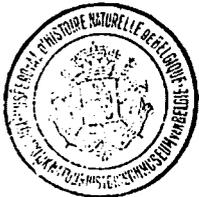


Fig 40. — Effet d'une mise en charge répétée.  
 A: première mise en charge.  
 B: seconde mise en charge.



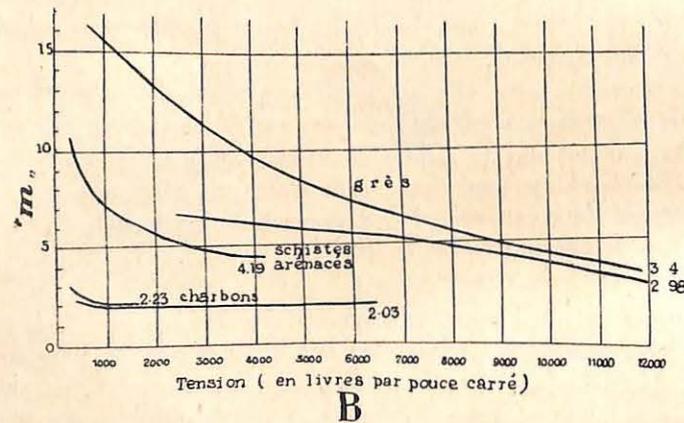
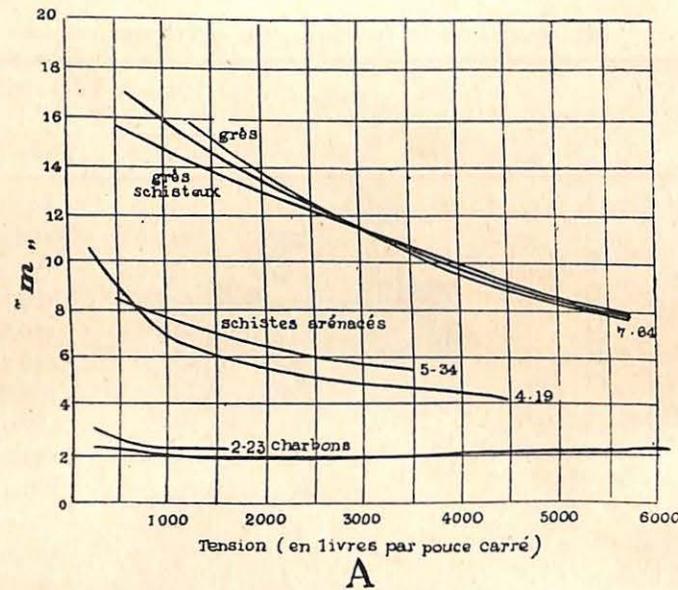


Fig. 38. — Variation du nombre de Poisson ( $m$ ) pour certains grès, un schiste grossier, des schistes arénacés et des charbons.

## INFLUENCE DU TEMPS SUR LA DEFORMATION DES ROCHES

### Charges transversales.

La déformation subséquente en fonction du temps, sous l'action d'une charge extérieure constante, a été observée pour la première fois au cours d'un essai avec mise en charge transversale d'une éprouvette de schiste.

Elle s'est produite pour une tension assez élevée et fut trop rapide pour permettre une lecture exacte à l'échelle.

On s'attendait à une rupture de l'éprouvette, mais celle-ci ne se produisant pas, la charge fut enlevée et un effet similaire, mais de sens opposé, fut observé.

Une étude détaillée de l'influence du facteur temps a montré que la mise en charge donne lieu à une déformation en deux phases :

- 1°) une déformation immédiate;
- 2°) une déformation subséquente qui s'accroît avec le temps (déformation retardée).

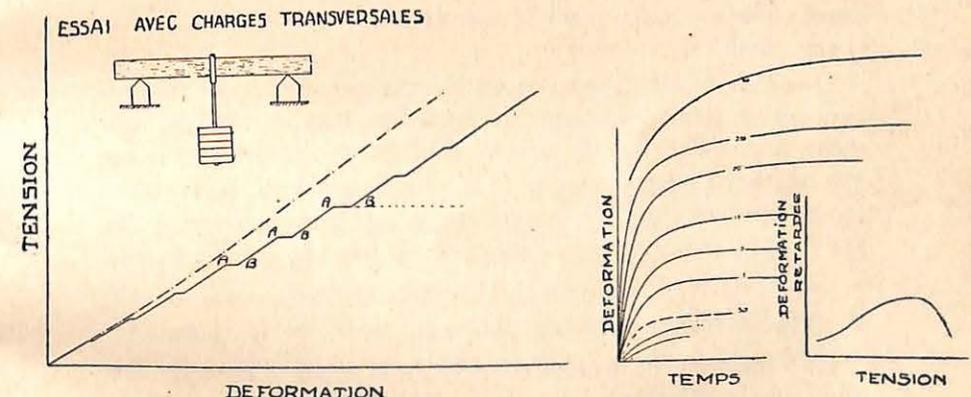


Fig. 41.

L'allure générale de la courbe donnant la déformation en fonction de la charge est représentée par la figure 41. Lorsque la charge atteint des valeurs représentées par les points A et est maintenue constante, des déformations subséquentes se produisent, comme indiqué par les lignes A-B.

Ces déformations, en fonction du temps, augmentent d'une manière continue avec l'accroissement de la charge pour beaucoup de roches.

Cependant, pour certaines d'entre elles, spécialement des schistes, la déformation décroît à nouveau et cette décroissance amène souvent la rupture de l'éprouvette.

La forme finale de la courbe donnant la déformation en fonction de la charge sera conditionnée par les intervalles de temps entre les accroissements de charge successifs.

Pour des intervalles égaux entre chaque accroissement de charge, la courbe prendra en premier lieu une forme concave vers le bas, en raison de l'effet croissant de la durée pour chaque accroissement de charge successif, mais elle peut devenir ensuite convexe, vers le bas, ce qui est dû à un effet décroissant du facteur temps.

En règle générale, le taux de déformation en fonction du temps augmente avec la charge, mais pour certaines roches, surtout des schistes, il diminue de nouveau lorsque la charge approche de celle de la rupture.

La déformation en fonction du temps n'exerce aucune influence appréciable sur celle produite par l'application immédiate de la charge totale.

Lorsqu'on établit la relation entre cette dernière et la déformation qui en résulte, on trouve presque dans tous les cas une ligne droite, c'est-à-dire que la tension résultant de la mise en charge immédiate est proportionnelle à la charge appliquée, constatation assez importante, car elle montre qu'aucune analogie ne peut être établie entre le comportement de roches et celui de certains métaux.

Les roches n'ont pas une limite définie de déformation au delà de laquelle celle-ci augmente plus rapidement que la charge.

Le phénomène de tension au delà de la limite d'élasticité avec phase plastique ne se produit pas pour les roches.

L'humidification d'une roche exerce un effet prononcé sur l'accroissement de la déformation en fonction du temps, et peut même, pour de très faibles charges, provoquer la rupture.

Le séchage subséquent donnera lieu à une diminution de la déformation même avec la roche chargée, à cause surtout des effets de rétrécissement.

#### *Compression.*

L'effet de la compression en fonction du temps au point de vue des déformations longitudinales et latérales est considérable pour les grès et les schistes.

Pour de faibles charges, l'effet latéral en fonction du temps est faible en comparaison de l'effet longitudinal, mais pour des charges élevées, les deux effets peuvent avoir des vitesses égales.

#### *Torsion.*

Lorsqu'on soumettait des échantillons préparés à la torsion, la déformation en fonction du temps a été observée pour un couple de torsion constant.

#### SIGNIFICATION PRATIQUE DES DIFFÉRENTES PROPRIÉTÉS DES ROCHES

Les propriétés des roches houillères sont des facteurs essentiels dans le problème du soutènement dans les mines.

L'auteur croit que le comportement des couches en surplomb, c'est-à-dire des roches sous-cavées par les travaux d'exploitation, constitue un vrai problème de résistance des matériaux.

Nous sommes en présence d'une structure naturelle préformée et la résistance ainsi que les autres propriétés doivent être utilisées au mieux des intérêts.

Le champ d'investigations dont on dispose dans le fond par rapport à la zone entière de perturbation est très faible et les phénomènes observés sont des effets dont les causes se trouvent en des points inaccessibles et souvent éloignés du centre d'investigation.

L'auteur croit que l'explication de beaucoup de phénomènes qui se produisent sous la forme de fractures ou de mouvements de roches dans les mines ne peut résulter que de l'étude de l'ordre de succession des couches, leurs propriétés relatives et une analyse des forces développées et des tensions résultantes.

Outre l'examen des propriétés des terrains, il est essentiel de tenir compte dans toute étude de l'influence de facteurs tels que l'éten due du chantier, la vitesse d'avancement, la qualité du remblai, etc., parce que les résultats obtenus peuvent ne pas être vrais dans d'autres conditions de succession des couches.

*Résistances relatives des roches.*

Les résultats obtenus au laboratoire fournissent une échelle relative de résistance. Les résistances réelles *in situ* sont beaucoup plus considérables.

Une règle employée par des ingénieurs des mines pour évaluer l'effort de compression vertical à une profondeur quelconque est d'adopter une livre par pouce carré par pied de profondeur (0,253 kgs/cm<sup>2</sup> par mètre de profondeur).

A une profondeur de 1.200 mètres, qui est le maximum permettant encore l'extraction du charbon à l'heure actuelle, la force de compression est de 280 kgs/cm<sup>2</sup>.

Même si les résistances des roches sont celles déterminées au laboratoire, la plupart d'entre elles sont parfaitement capables de supporter ces efforts.

Les forces agissant sur les couches préalablement à l'enlèvement du charbon sont surtout des forces de compression, et si on suppose les roches élastiques, on peut montrer que, pour chaque élément de roche soumis à une force verticale  $P_1$ , nous avons :

$$\left(P_1 - \frac{P_1}{m-1}\right) \quad (m : \text{nombre de Poisson}).$$

Le facteur  $\left(\frac{P_1}{m-1}\right)$  est la tension latérale résultante due à la contrainte latérale totale à laquelle on suppose les roches soumises *in situ*.

Préalablement à l'enlèvement du charbon, les tensions latérales qui prennent naissance ont probablement la même valeur et si on prend  $m$  égal à 5 et  $P$  égal à 4.000 livres/pouce carré (280 kgs/cm<sup>2</sup>) :

$$P_1 - \frac{P_1}{m-1} = 4000 - \frac{4000}{5-1} = 3.000 \text{ livres/pouce carré}$$

soit 210 kgs/cm<sup>2</sup>.

Sur la base de ces considérations et de la résistance des roches déterminées au laboratoire, on peut affirmer que les fractures simplement dues au poids des strates supérieures ne se produiront pas aux profondeurs actuelles d'extraction.

Lorsque les travaux miniers approchent une section donnée du gisement, il y a détente latérale dans le sens des travaux qui approchent et la tension latérale se manifestant dans cette direction diminue.

Lorsqu'elle passe par zéro, la différence de tension maximum dans un plan vertical à angle droit avec le front de taille avançant est  $P_1 - 0$ , qui, dans les premiers stades et à une profondeur de  $D$  pieds, peut ne valoir que  $D$  livres par pouce carré et ne pas encore dépasser la résistance des roches.

Cependant, lorsque les travaux miniers se rapprochent, les couches deviennent soumises à des forces transversales qui donnent lieu à une flexion dont l'importance est fonction de leur module d'élasticité.

A ce moment, les efforts de compression exercés sur la couche inférieure deviennent assez considérables pour causer la fracture.

La flexion différentielle des couches provoquera une séparation des lits et le poids des lits supérieurs sera reporté en des régions où la séparation commence.

La position de ces régions dépend de facteurs tels que l'étendue du front de taille, la direction du front, les résistances du charbon et du mur, la qualité du remblai, etc.

On a observé dans une mine la fracture des couches jusqu'à concurrence de 46 pieds (13<sup>m</sup>,80) en avant du front de taille.

Il y a aussi la question de la fracture des roches due à des forces engendrées dans un plan parallèle situé en arrière de longues tailles. Les fractures provenant des tensions étudiées ci-dessus sont en général parallèles au front de taille.

A un stade ultérieur, les strates au voisinage de galeries se rompent par suite du développement de fractures normales au front de taille et parallèles aux galeries.

On peut donner comme raison de leur développement, l'établissement d'états de résistance différente, ainsi que la rupture à l'endroit du maximum de soutènement.

Considérons par exemple un matériau de toit à résistance à la compression de 8.000 livres/pouce carré (560 kgs/cm<sup>2</sup>) et situé à une profondeur de 2.500 pieds (750 m.).

Si la résistance offerte par les étais permanents est uniforme sur toute la surface excavée et si on suppose qu'un poids de strates égal seulement à celui dû à la profondeur agit sur la strate du toit.

La tension de compression sera d'environ 2.500 livres par pouce carré (17.5 kgs/cm<sup>2</sup>). Si, cependant, comme c'est généralement le cas dans la pratique, des étais sont placés le long de régions déterminées de la zone excavée, par exemple le long des galeries, la tension augmentera proportionnellement. Si la zone excavée est étayée sur 50 % de son étendue, les tensions augmenteront jusqu'à concurrence de 5.000 livres par pouce carré, soit 350 kgs/cm<sup>2</sup>.

Si des étais ne sont placés que sur 25 % de l'étendue, les tensions augmenteront jusqu'à concurrence de 10.000 livres par pouce carré, soit 700 kgs/cm<sup>2</sup>, etc.

La quantité d'étais à placer, pour maintenir la tension inférieure à celle qui provoquerait la fracture d'un toit de mine, sera fonction de la résistance du toit et de la profondeur des travaux.

Un autre problème intéressant à étudier est l'influence de la pression latérale résultante sur la fracture des roches dans les mines.

Les résistances des roches très stratifiées sont bien inférieures dans le sens de la stratification que perpendiculairement avec celui-ci, et

la pression latérale réduite  $\frac{P_1}{m-1}$  peut suffire à fracturer les roches.

Ceci met en jeu le nombre de Poisson. La diminution de ce nombre avec la charge de compression appliquée montre que la pression latérale augmente avec la profondeur.

Ceci a été confirmé par des recherches dans des exploitations par chambres et piliers (traçage et défilage) dans le bassin charbonnier du nord de l'Angleterre.

#### *Propriétés élastiques des roches.*

En se basant sur les modules d'élasticité déterminés au laboratoire, on peut dire que le taux de flexion réelle possible n'est qu'une faible fraction des déformations enregistrées.

Il serait difficile d'admettre que les propriétés physiques des roches aux profondeurs d'exploitation minière comparativement faibles sont très différentes de celles déterminées à la surface.

Les divergences peuvent être interprétées comme suit :

1) Les déformations observées ne sont pas de vraies déformations par flexion, mais résultent de mouvements le long de fractures non aisément décelées dans la mine;

2) La déformation avec le temps dépasse plus la déformation immédiate que dans le cas de petites éprouvettes.

On ne peut pas négliger l'importance du phénomène de résilience dans la question du développement des éboulements.

La résilience des roches, permettant un rebondissement élastique au moment de la disparition de la charge, peut constituer une source de danger considérable au cours de l'exploitation.

L'énergie développée par les forces transversales (efforts de flexion) est potentielle aussi longtemps que les roches sont sous tension.

La rupture en un point d'une strate, par exemple au-dessus de la zone excavée, donnera lieu à un rebondissement élastique en un autre point, probablement au voisinage des travaux.

La résilience est directement proportionnelle à l'étendue de strates non étayée et inversement proportionnelle à leur module élastique. Il en résulte que la résistance et les propriétés élastiques des strates sont importantes dans l'étude de certains éboulements de roches dans les mines.

#### *Déformation en fonction du temps.*

Il n'est pas nécessaire de souligner l'importance du facteur temps sur la rupture des roches. Le fait que sous l'action d'une charge transversale par exemple, une couche peut continuer à descendre sans application de nouvelles charges, montre qu'il est dangereux de laisser une strate quelconque non étayée.

Dans le cas de faibles tensions, la déformation, en fonction du temps, n'ira pas jusqu'à la fracture, mais il y a des charges qui peuvent provoquer la rupture de la roche si le temps alloué est suffisamment long, et il est important de ne pas perdre la chose de vue dans la question du soutènement à donner à un toit de mine.

L'hypothèse a souvent été accréditée d'une limite élastique déterminée pour les roches, au delà de laquelle elles se comporteraient comme une matière plastique.

Les recherches faites sur les roches ne corroborent pas cette manière de voir.

Ni la déformation enregistrée en fonction du temps, ni le rétablissement en fonction du temps ne semblent permettre l'hypothèse d'une phase plastique.

D'autre part, quelle que soit la charge pour laquelle on observe la déformation en fonction du temps, et quelle que soit son importance, l'application d'une nouvelle charge donnera lieu à une tension égale seulement ou peut-être inférieure à celle correspondant à un accroissement identique de charge à un stade antérieur; ce qui indique de nouveau que la roche ne se comporte pas comme une matière plastique.

La conclusion s'impose donc à l'auteur que ce soi-disant écoulement de roches dans le fond n'est pas un vrai phénomène d'écoulement, mais plutôt un ajustage de particules de roche le long de plans de mouvement relatif.

Pour résumer ce travail, il suffit de dire que les différentes résistances et propriétés élastiques des roches houillères font ressortir l'importance de l'ordre de succession, suivant la verticale des strates, dans l'étude de tout problème de contrôle de strates en surplomb.

Il a été montré que les roches ont des résistances à la compression et au cisaillement différentes et présentent également des variations de résistance dans différentes directions.

Elles présentent de la résilience même en charge — que ce soit à la compression ou à la flexion — presque jusqu'au point de fracture. Cette résilience peut constituer un facteur important dans la question des éboulements.

La valeur du nombre de Poisson indique que l'effet de la pression latérale — qui est très important dans les travaux à grand front ou dans les travaux par traçage et défilage — devient considérable dans les mines profondes.

L'effet produit au front de taille reflète les propriétés relatives des roches houillères. Dans un cas, une zone comparativement rigide peut être suivie d'une zone plus rigide, et inversement. Il est possible d'avoir beaucoup de variations sur une faible épaisseur, mais il est facile d'établir de grandes divisions ayant chacune des propriétés différentes.

Les coupes 1 à 4 de la figure 42 montrent les différences de nature et d'épaisseur des strates situées au-dessus d'une couche de charbon dans un bassin minier anglais.

Dans la coupe 1, la zone A, qui se compose de grès et de schistes grossiers, aura toujours à supporter le poids de la zone B, composée d'un chiste bleu plus flexible et déformable avec le temps.

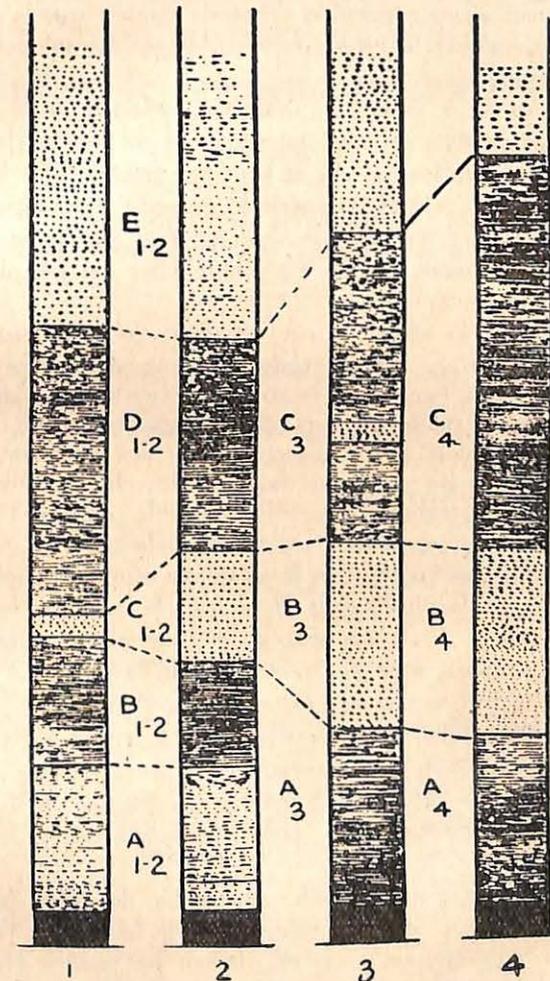


Fig. 42. — Variations de nature et d'épaisseur des strates au-dessus d'une couche de charbon, dans un bassin minier anglais.

La mince couche de grès  $C_1$ , suivie d'une épaisseur considérable de schiste  $D_1$ , n'exercera aucun effet notable après extraction du charbon et la zone  $A_1$  subit probablement l'influence des zones  $B_1$ ,  $C_1$ ,  $D_1$  immédiatement après le début du mouvement, la limite du premier mouvement étant constituée par la surface inférieure de la zone  $E_1$  de grès épais.

Dans la coupe 2, située à 1 mille au sud-ouest de la coupe 1, le schiste de la zone  $A_2$  avec intercalations de bandes de grès est moins résistant que la zone  $A_1$  et peut être fracturé plus facilement sous l'action de la zone  $B_2$  susceptible de céder davantage; la zone de grès  $C_2$  est ici beaucoup plus épaisse, mais est encore suivie de la zone  $D_2$ , formation épaisse de schiste bleu qui pèsera sur elle d'une manière continue.

Dans ce cas, la zone  $C_2$  peut contrôler le mouvement de la zone  $D_2$  pendant un certain temps, au cours duquel la zone  $A_2$  n'est soumise qu'à l'action de la zone  $B_2$ ; mais des conditions dangereuses peuvent naître par suite de l'augmentation trop considérable de portée de la zone  $C_2$  pour résister aux forces qui agissent sur elle, par suite de son propre poids et de celui de la zone  $D_2$ .

La coupe 3 est à deux milles à l'ouest de la coupe 1. Dans cette coupe, la zone de schiste  $A_3$  est suivie de la zone de grès  $B_3$  et le rapport entre les zones  $A$  et  $B$  se trouve maintenant renversé, la zone  $A_3$  ayant la plus grande flexibilité (la zone  $B_3$  correspond aux zones  $C_1$  et  $C_2$ ). La zone de grès est plus épaisse dans la coupe 3 que dans les coupes 1 et 2. Seule la zone  $A_3$  participe au premier mouvement après l'extraction du charbon.

La même disposition existe dans la coupe 4, qui est à 3 1/2 milles à l'ouest de la coupe 1. Là, cependant, la zone de grès est suivie d'une plus grande épaisseur de schiste. La fracture de la zone  $B$  peut produire la fracture de la zone  $C$  et donner lieu à des charges élevées.

Il en résulte donc qu'un poids considérable de roches peut, dans un cas, exercer une action immédiate sur le toit d'une couche de charbon et que, dans un autre cas, le toit est protégé contre cette charge par une solide strate de roche.

La connaissance de la nature des forces entrant en jeu et des tensions créées est aussi nécessaire pour la compréhension totale du comportement des strates après extraction du charbon.

## Note sur l'activité des mines de houille du Bassin du Nord de la Belgique pendant le deuxième semestre 1937

PAR

M. A. MEYERS,

Ingénieur en chef-directeur du 10<sup>e</sup> arrondissement des Mines, à Hasselt

### Recherches en terrain non concédé

#### Sondage n° 107, à Mol

Le sondage a été arrêté, le 20 juillet 1937, à la profondeur de 2.054 mètres, dans un grès très dur; son diamètre, à cette profondeur, était encore de 135 millimètres. Le trou, tubé jusqu'à 1.200 mètres de profondeur, a été recouvert d'une tôle, en vue d'une reprise éventuelle du forage.

#### Sondage n° 108, à Meerhout

Un second sondage de recherche du gisement houiller a été entrepris à Meerhout, par M. F. Vingerkoets. Ce forage, auquel a été attribué le numéro 108 dans la liste des sondages de recherche du Bassin de la Campine, est situé à 1.140 mètres à l'Ouest de la limite occidentale de la réserve A, au hameau de Lill, de la commune de Meerhout.

Commencé le 27 octobre 1937, au diamètre de 230 millimètres, il atteignait, le 29 octobre, la profondeur de 244 mètres; 30 mètres furent tubés au diamètre de 217 millimètres et le reste au diamètre de 204 millimètres. Repris le 2 novembre au diamètre de 180 millimètres, il a atteint, le 30 novembre, la profondeur de 387 mètres et, le 31 décembre, celle de 512<sup>m,60</sup>.

Le Maestrichtien a été recoupé dès la profondeur de 483 mètres. Le sondage est foré au moyen d'un appareil Rotary.