

# LA GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR APPLIQUÉE À L'ÉTUDE DU SITE D'UN MÉTRO DANS LE BED ROCK HOUILLER À LIÈGE

L. CALEMBERT, A. FAGNOUL, P. STASSEN,  
F. BONNECHÈRE, A. MONJOIE, H. VAN DUYSE (\*)

## ABSTRACT

The study of a subway site projected for the superior part of the coal-bearing bed rock of Liège, has aroused a considerable amount of geological, hydrogeological, and geomechanical research.

The results are set forth while successively treating the geology of the site, the water-tables, the mechanical properties of the rocks and the rocky massifs, the hardness and the abrasiveness of the different rocks. The obtained results are synthetized in the chapter *Engineering Geology*, which reunites for the ten sections distinguished in the lay-out as a function of the proper characteristics, the quantitative and qualitative information necessary to the consulting engineers.

The study tends to demonstrate the scientific and technological usefulness of the engineering geological research when the nature and the dimensions of the project call for the carrying out of a large-scale program of study on the terrain and in the laboratory.

## I. INTRODUCTION

La ville de Liège couvre une vaste partie de la plaine alluviale de la Meuse à l'altitude moyenne de 63 m (fig. 1). Le sous-sol comprend une dizaine de mètres de dépôts alluviaux (limons, sables, graviers) contenant une importante nappe aquifère et reposant sur un bed rock houiller d'âge westphalien. Le charbon a été exploité dans le sous-sol à différentes époques : les influences minières ont affecté la surface et leurs conséquences sont encore observables localement.

L'étude susceptible de fournir au maître de l'œuvre les éléments nécessaires pour le choix de la solution et la définition du tracé et de la profondeur optimale a nécessité une importante campagne de recherches *géologiques, hydrogéologiques* et *géomécaniques*. Les principaux objectifs étaient :

---

(\*) Institut de Géologie, Université de Liège, 7, place du 20-Août, Liège. Institut du Génie civil, Université de Liège, 6, quai Banning, Liège. Institut national des Industries extractives, rue du Chéra, Liège.



Figure 1

1° la définition précise de la *géologie* du sous-sol : séries sédimentaires, allures structurales, zones faillées... pour adapter la conception du projet aux conditions réelles du site et orienter l'implantation du tracé et des ouvrages importants ;

2° la reconnaissance *hydrogéologique* pour éviter les venues d'eau au cours du creusement des tunnels et les dommages que les rabattements pourraient produire en surface ;

3° la détermination des caractéristiques *géomécaniques* des terrains compte tenu des eaux souterraines et en vue de définir les modalités de creusement, de soutènement, etc.

Pour le tracé du Val-Benoît à Coronmeuse, long d'environ 8 km, on a réalisé :

— 175 sondages carottés atteignant généralement la profondeur de 40 m et équipés en doubles piézomètres pour étudier la nappe alluviale et celle du bed rock ;

— 150 piézomètres simples dans la nappe alluviale ;

— 3 puits de pompage pour les essais hydrogéologiques ;

— 700 essais Lugeon ;

— 70 essais *in situ* de mécanique des roches au dilatomètre ;

— 570 essais de mécanique des roches sur échantillons en laboratoires dont :

330 essais de résistance à la compression avec calcul des modules d'élasticité et de déformation, 165 essais de résistance à la traction, 75 essais de compression triaxiale sous haute pression ;

— 500 études pétrographiques en lames minces ;

— 340 tests de dureté et d'abrasivité.

Nous ne traitons ici que des principaux résultats obtenus en *géologie de l'ingénieur* et de leur influence sur la conception du projet de métro implanté dans la partie supérieure du bed rock. Les données détaillées de géologie structurale et sédimentaire, d'hydrogéologie, de géomécanique ont fait ou feront l'objet de publications séparées.

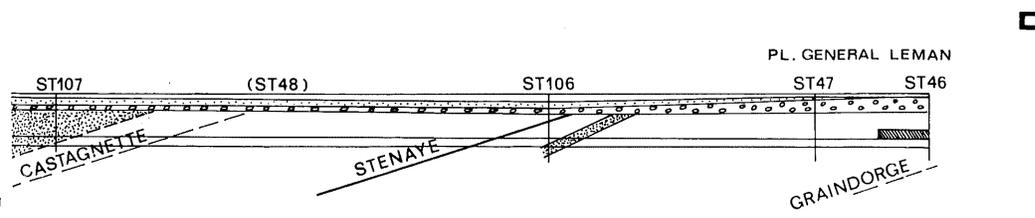
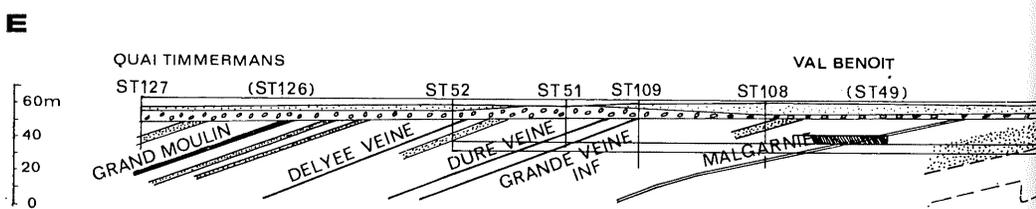
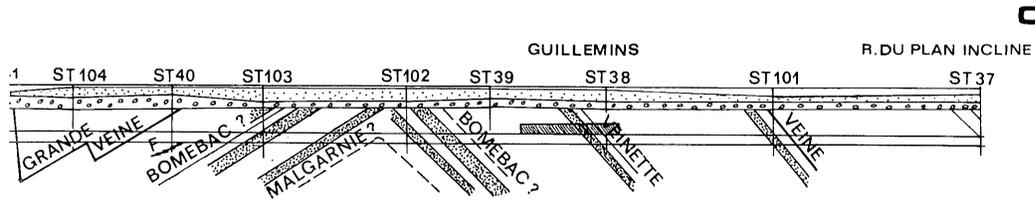
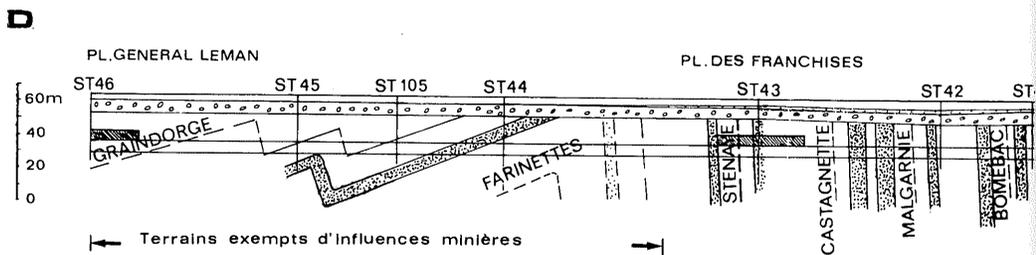
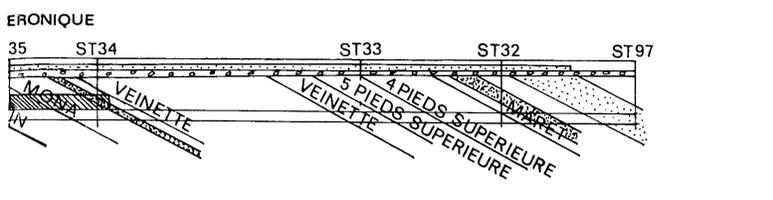
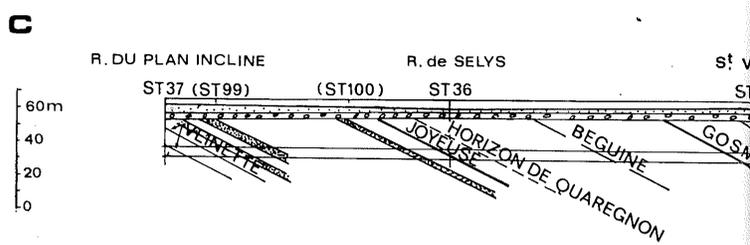
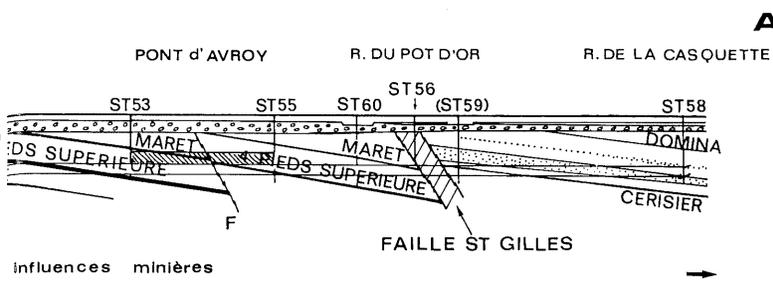
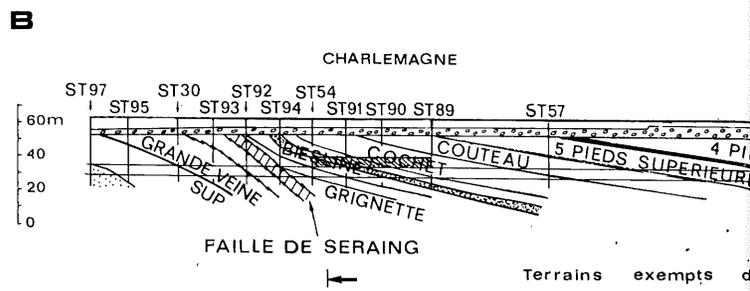
## II. GÉOLOGIE

Les roches westphaliennes présentent la séquence-type du Houiller : grès puis schistes et éventuellement couche de charbon reposant sur un sol de végétation. On observe quelques chenaux fluviaux fossiles (« wash-outs ») gréseux érodant les terrains sous-jacents (fig. 2 et 3).

A. *L'étude stratigraphique* fait apparaître cinq grandes séries formées de séquences plus ou moins complètes. Ce sont de haut en bas :

1° la série allant de l'horizon marin de Domina à la couche Grande Veine : puissance de l'ordre de 175 m ; elle est riche en bancs de grès et en wash-outs puissants de 5 à 10 m (grès sur Cerisier, grès sur Crusny, grès sur Pestay) ;

2° la série allant de la couche Grande Veine à la couche Cinq Pieds Supérieure : puissance de l'ordre de 100 m ; on y observe de nombreuses couches et veinettes avec de petits bancs de grès ;



ST SONDAGES

TUNNEL

REMBLAIS

GARE

LIMONS ET SABLES

COUCHE DE CHARBON

GRAVIERS

BANC DE GRES



Figure 2

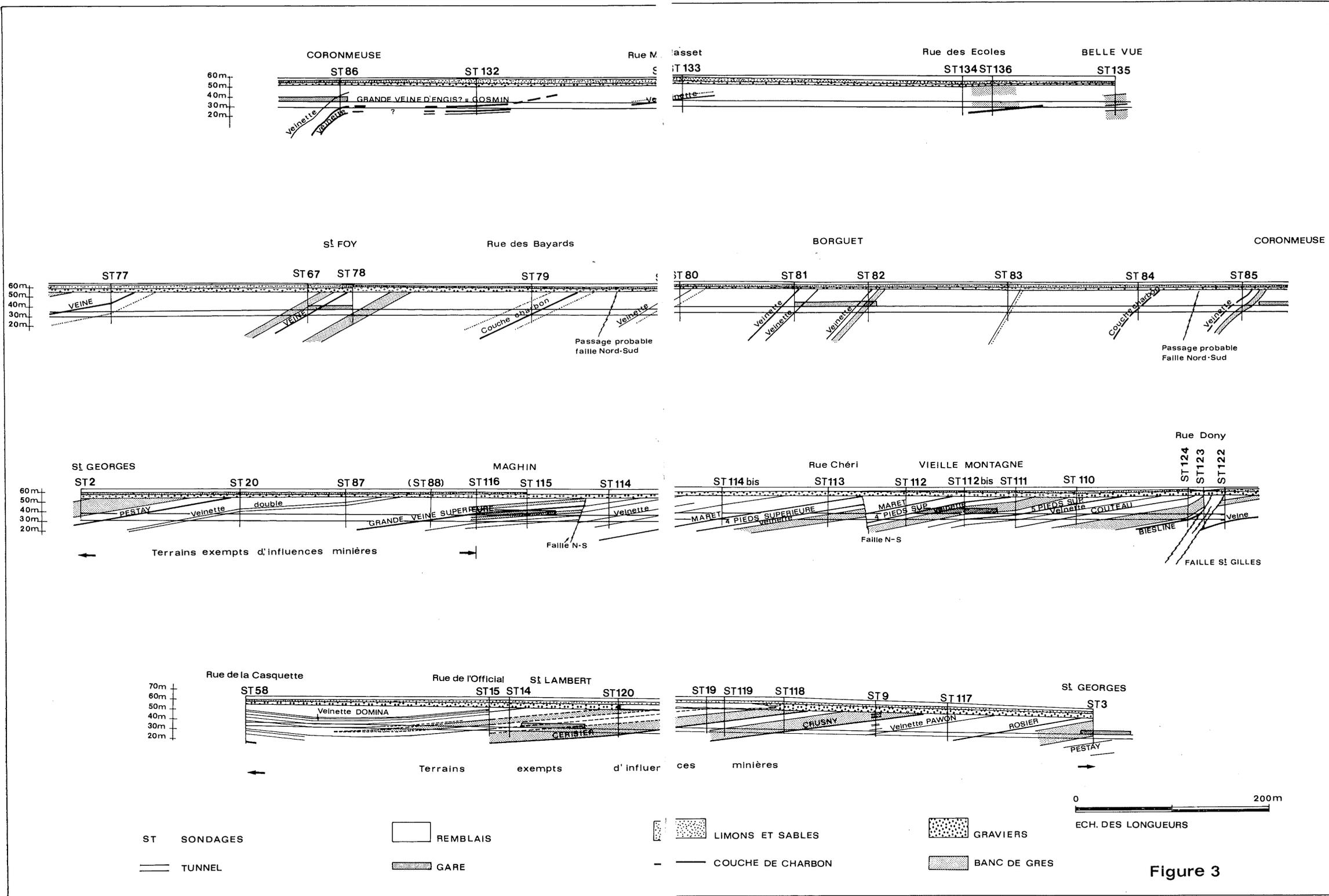


Figure 3

3° la puissante série allant de la couche Couteau à la couche Dure Veine ; puissante de 450 m environ, elle comprend une vingtaine de couches de charbon et de nombreuses veinettes, des schistes prédominants et quelques formations de grès épaisses de quelques mètres ;

4° la série à prédominance schisteuse allant de la couche Dure Veine à la couche Malgarnie : puissance de l'ordre de 75 m ;

5° la série de 200 m de puissance allant de la couche Malgarnie à la couche Stenaye. Les couches de charbon y sont relativement espacées et les séries gréseuses représentent près de 30 % de la puissance totale de la série.

#### B. La *structure* géologique comporte du sud au nord :

1° l'anticlinal de Cointe-La Chartreuse, vaste structure déversée vers le nord. Le flanc méridional, du Val-Benoît à la place des Franchises, présente une faible inclinaison sud et est affecté de quelques plis mineurs et de petites failles de cisaillement principalement vers le Val-Benoît plus proche de la Faille Eifélienne. Le flanc nord subvertical s'étend des Franchises aux Guillemins où un pli en chaise (synclinal des Guillemins) se montre assez tectonisé.

Dans l'axe de l'anticlinal de Cointe-La Chartreuse, affleure sous la plaine alluviale la série inférieure riche en grès (Stenaye-Malgarnie). Sur les flancs, on recoupe la série sus-jacente plus schisteuse (Malgarnie-Dure Veine) ;

2° au nord des Guillemins et jusqu'à Charlemagne, on recoupe un monoclinal à 45° nord, constitué par la puissante série à couches de charbon. Il vient buter sur les failles de Seraing et Saint-Gilles, grands décrochements orientés sensiblement N/57°/E, inclinés de 45° à 60° N, avec des zones broyées puissantes de 5 à 15 m ;

3° au nord, le synclinal de Liège, large structure assez plate (5 à 10°) à léger ennoyage ouest, est constitué à l'ouest par la série supérieure (Domina-Grande Veine) riche en grès et à l'est, par la série sous-jacente plus schisteuse (Grande Veine-Maret).

En moyenne, sous les alluvions, l'altération chimique des roches est limitée aux 5 mètres supérieurs du bed rock, sauf dans les zones tectonisées. Par contre, les influences minières ont fortement affecté les roches peu résistantes, principalement les schistes à radicules au mur des couches de charbon.

### III. HYDROGÉOLOGIE

Le tronçon étudié se situe sous la plaine alluviale de la Meuse. Deux nappes aquifères superposées intéressent les travaux :

1° la nappe alluviale des graviers de la Meuse ;

2° la nappe sous-jacente du bed rock houiller logée dans les fissures.

Si la première nappe n'intervient pratiquement pas pour les ouvrages du Métro, sauf pour les accès, elle joue un rôle important pour les tunnels, car elle assure à la nappe sous-jacente du bed rock une alimentation pratiquement infinie et subit les conséquences du drainage souhaité.

Elle présente une perméabilité  $K = 2 \text{ à } 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  avec quelques axes de drainage où la perméabilité atteint  $9 \text{ à } 10 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  et quelques secteurs peu perméables comme à Saint-Georges où elle tombe à  $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ .

La surface piézométrique montre une allure très plate vers la cote 60 depuis le Val-Benoît jusqu'à Charlemagne, suralimentée en bordure du versant et principalement par le cône de déjection déformant la nappe dans le secteur de Sainte-Véronique. A partir de Charlemagne, la nappe présente un gradient faible vers la place Saint-Lambert où la cote est de 58,50. Vers Saint-Georges, on observe un axe de drainage particulièrement net le long du Palais des Princes-Evêques et la rue Hors-Château. Entre cet axe et la Meuse, une nappe cylindrique s'établit.

Entre Saint-Georges et Coronmeuse, la nappe présente une allure relativement plate à la cote 58 avec une légère zone déprimée à la cote 57 vers la place Vieille-Montagne. A Coronmeuse se dessine un sillon de rabattement accusé atteignant la cote 55 vers le charbonnage de Belle-Vue : il résulte vraisemblablement des pompages réalisés par les stations de démergement à l'aval de Liège.

Les fluctuations dans le temps sont extrêmement limitées et de l'ordre de 20 à 40 cm.

La surface piézométrique de la nappe de fissures du bed rock présente une allure subparallèle à la nappe alluviale avec généralement une légère mise en charge de l'ordre de 10 à 20 cm.

Dans les zones non influencées par les exploitations minières, la perméabilité est faible à nulle (0 à 10 uL) <sup>(1)</sup> dans les schistes tandis que dans les séries gréseuses, principalement dans les wash-outs, elle atteint des valeurs élevées dépassant 200 uL. En zones influencées par les exploitations minières, les perméabilités varient irrégulièrement et peuvent atteindre des valeurs élevées (30 à 50 uL) principalement dans les plis et au mur des couches de charbon. De plus, certaines structures particulières, notamment les dressants du flanc nord de l'anticlinal de Cointe-La Chartreuse, possèdent des perméabilités très élevées en raison de la communication directe par les joints de stratification redressés, entre la nappe du bed rock et celle des alluvions.

Par contre, les zones failleuses (faille Saint-Gilles et de Seraing) présentent généralement des remplissages argileux imperméables et seules les épontes constituées de grès ou situées en zones d'actions minières, sont aquifères.

#### IV. GÉOMÉCANIQUE

La détermination des propriétés mécaniques des roches et des massifs rocheux a fait apparaître trois groupes principaux de roches :

- 1° les schistes argileux, les schistes à nodules carbonatés et les schistes à radicales (SRC) ;
- 2° les schistes sableux homogènes et straticulés (SS) ;
- 3° les grès, les grès schisteux et les schistes très gréseux (G).

Elle a également mis en évidence les dégradations des propriétés dues aux exploitations minières.

En laboratoire, on a déterminé notamment :

- 1° la résistance à la compression simple  $R_c$  sur des éprouvettes cylindriques dont la hauteur était environ double du diamètre (compris entre 50 et 86 mm) ;

(1) uL : unité Lugeon.

2° la résistance à la traction  $R_t$  par compression diamétrale d'éprouvettes cylindriques, de même diamètre que pour les essais de compression simple et de longueur quelconque ;

3° le module de déformation globale  $E_d$ , défini par la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte axiale en fonction de la déformation axiale enregistrée lors de la première mise en charge d'une éprouvette soumise à compression simple (fig. 4) ;

4° le module d'« élasticité »  $E_e$ , défini comme  $E_d$  mais pour des cycles de mise en charge (fig. 4).

La figure 4 représente une courbe d'enregistrement typique d'un essai de compression simple. Toutes les courbes présentent à l'origine une courbure causée par la fermeture de fissures ou de microfissures, le module de déformation à l'origine est toujours plus faible que  $E_d$ .

Le nombre important d'essais a permis de caractériser les résultats obtenus par la valeur moyenne désignée par un indice  $m$  et par l'écart type désigné par  $\sigma$ .

Pour l'ensemble des essais sur les roches des trois groupes, les résultats obtenus sont résumés aux tableaux 1 et 2 qui font apparaître l'influence des exploitations minières et de l'état d'humidité des échantillons. Les échantillons qualifiés « secs » ont été conservés sans précaution particulière dans le laboratoire et essayés tels quels, ceux qualifiés « mouillés » ont été plongés quatre jours dans de l'eau avant essai.

L'importance des coefficients de variance provient du fait que l'on a voulu seulement dans cette communication, donner des caractéristiques globales des roches. Les résultats sont sensibles notamment à l'altération, au pendage, à la tectonisation...

Les exploitations minières ont réduit de 30 % environ la résistance à la compression simple des roches à l'état sec et de 10 % les modules de déformation et d'élasticité. Pour les roches mouillées, les influences minières ne sont pas nettes.

Le fait de conserver les éprouvettes quatre jours dans de l'eau, réduit la résistance jusqu'à dix fois pour les schistes (sans tenir compte des éprouvettes qui se sont brisées lors de la préparation ou de l'immersion). Pour les grès, la variation de résistance est de 30 % environ.

Des essais triaxiaux avec pression latérale jusqu'à 1 900 kgf/cm<sup>2</sup> ont permis de tracer les courbes intrinsèques (fig. 5 à 9) des roches suivantes :

- 1° roches gréseuses du tronçon Saint-Lambert - Saint-Georges ;
- 2° roches schisteuses du même tronçon ;
- 3° schistes argilo-silteux du tronçon Saint-Lambert - Val-Benoît ;
- 4° schistes argilo-silteux à nodules carbonatés du même tronçon ;
- 5° schistes sableux homogènes du même tronçon.

Le nombre important d'éprouvettes du tronçon Saint-Lambert - Saint-Georges conduit au tracé, dans le domaine des contraintes considérées, d'un fuseau limité par deux courbes d'équation

$$\sigma = 0,012\ 42\ \tau^{1,584\ 3} - 195 \quad \text{et} \quad \sigma = 0,038\ 91\ \tau^{1,444\ 1}$$

pour les grès et

$$\sigma = 0,045\ 76\ \tau^{1,512\ 3} - 75 \quad \text{et} \quad \sigma = 0,024\ 81\ \tau^{1,593\ 1}$$

pour les schistes (les contraintes étant exprimées en kgf/cm<sup>2</sup>) (fig. 5 et 6).

Figure 4 - ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE -

Sondage : SR18 Hauteur de l'éprouvette : 14,0cm Diamètre : 8,5cm

Profondeur : 51,0 m Régime de la presse : 50 tonnes

Nature : schiste

Charge en tonnes

50

37,5

25

12,5

$E_0$

$E_d$

Déformation en 1/100mm

0

50

100

150

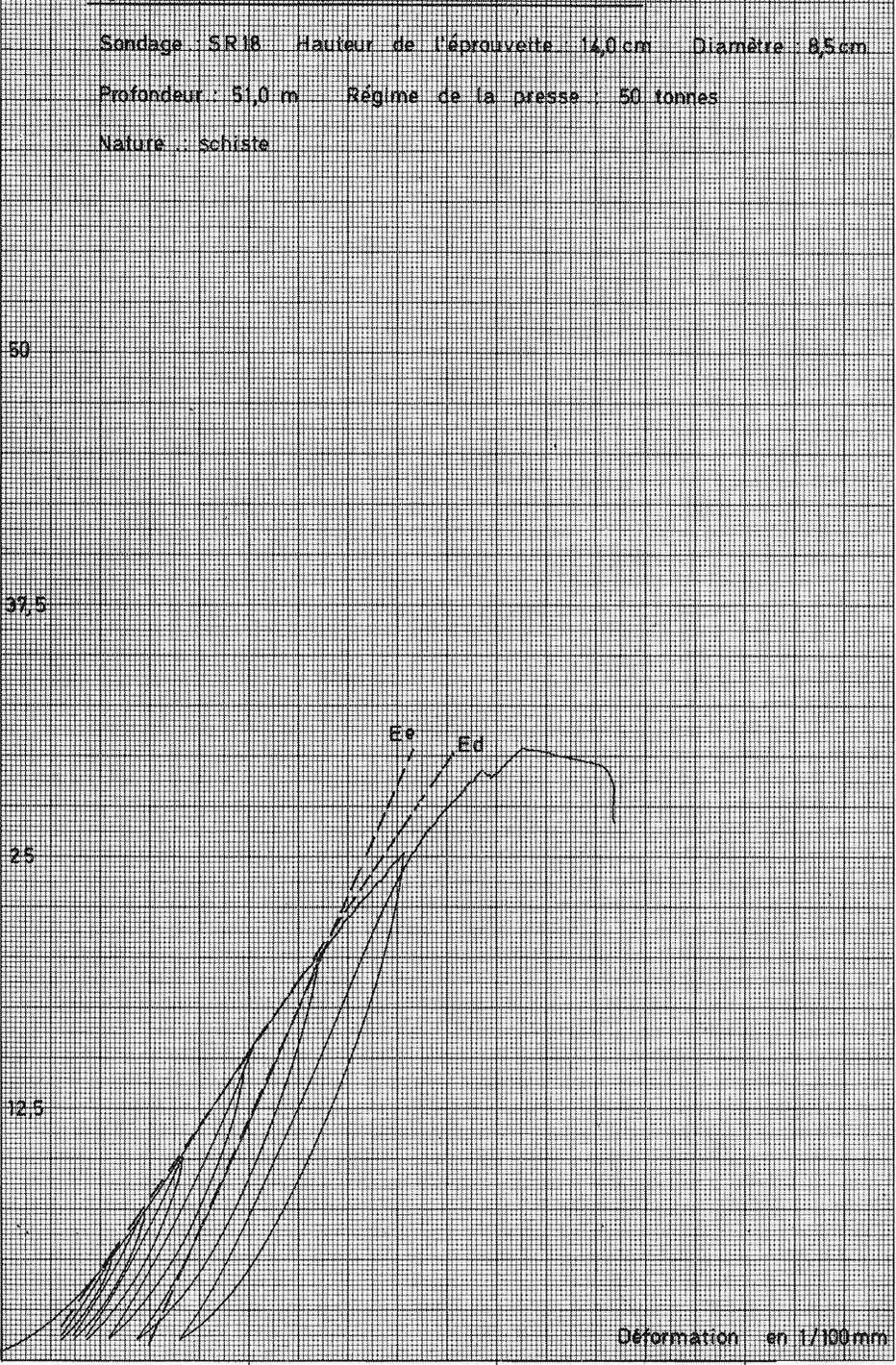


TABLEAU 1. — Résistance à la compression simple et diamétrale

Influences minières	État d'humidité	Groupe de roches	Compression simple			Compression diamétrale			
			Nombre d'essais	$R_c$ , m kgf/cm <sup>2</sup>	$\sigma R_c$ kgf/cm <sup>2</sup>	Nombre d'essais	$R_c$ , m kgf/cm <sup>2</sup>	$\sigma R$ kgf/cm <sup>2</sup>	Coeff. de variation
Aucune	Sec	SRC	14	251	163	15	29	6	0,20
		SS	32	538	279	17	62	27	0,44
		G	27	1 523	391	22	108	32	0,30
	Mouillé	SRC	4	68	42	2	13	—	—
		SS	19	272	192	4	16	14	0,83
		G	6	998	437	7	80	31	0,39
Directes	Sec	SRC	29	194	109	9	30	13	0,44
		SS	55	381	233	22	35	23	0,65
		G	21	934	479	8	100	49	0,49
	Mouillé	SRC	12	84	106	6	9	6	0,68
		SS	20	128	119	5	30	24	0,82
		G	10	931	567	7	38	23	0,61

TABLEAU 2. — *Modules de déformation globale et d'« élasticité » déterminés en laboratoire*

Influences minières	Etat d'humidité	Groupe de roches	Module de déformation			Module d'« élasticité »				
			Nombre d'essais	$E, m$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\Delta E_r$ kgf/cm <sup>2</sup>	Coeff. de variation	Nombre d'essais	$E, m$ kgf/cm <sup>2</sup>	$\Delta E_r$ kgf/cm <sup>2</sup>	Coeff. de variation
Aucune	Sec	SRC	14	60 000	38 000	0,64	14	95 000	49 000	0,52
		SS	32	130 000	74 000	0,57	32	170 000	95 000	0,56
		G	27	305 000	78 000	0,26	27	342 000	83 000	0,24
	Mouillé	SRC	1	19 000	—	—	1	35 000	—	—
		SS	16	65 000	47 000	0,73	16	100 000	55 000	0,55
		G	6	237 000	206 000	0,45	6	265 000	88 000	0,33
Directes	Sec	SRC	28	53 000	32 000	0,59	28	85 000	38 000	0,44
		SS	52	115 000	69 000	0,60	52	158 000	74 000	0,47
		G	21	267 000	102 000	0,38	21	301 000	104 000	0,35
	Mouillé	SRC	5	28 000	15 000	0,53	5	45 000	29 000	0,64
		SS	11	73 000	45 000	0,61	11	96 000	50 000	0,51
		G	9	315 000	146 000	0,46	9	344 000	148 000	0,43

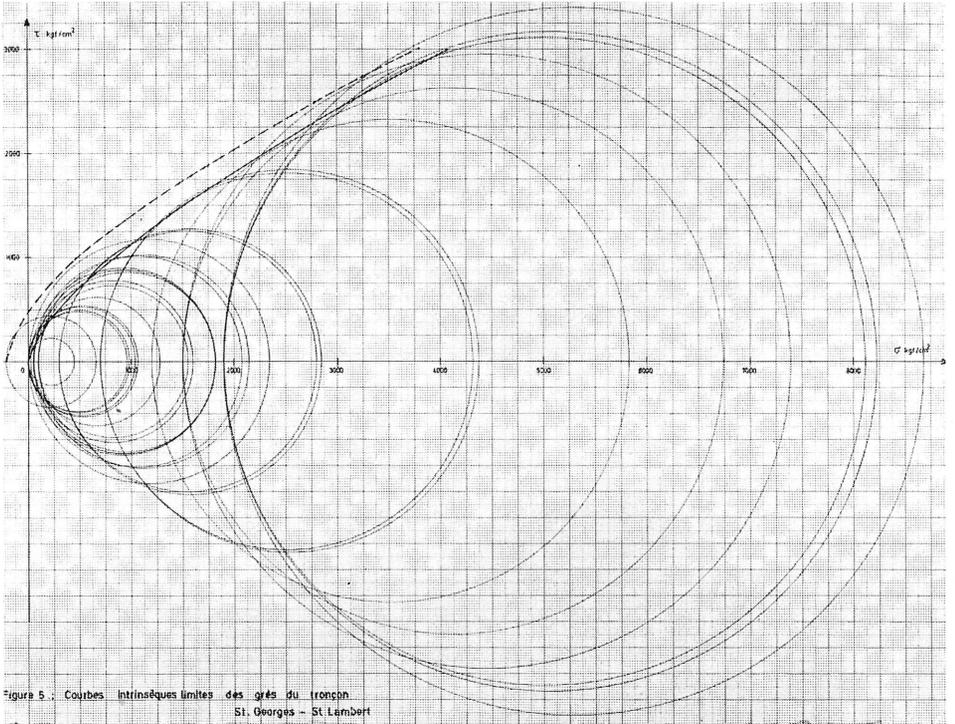


Figure 5. Courbes intrinsèques limites des grès du tronçon St. Georges - St. Lambert

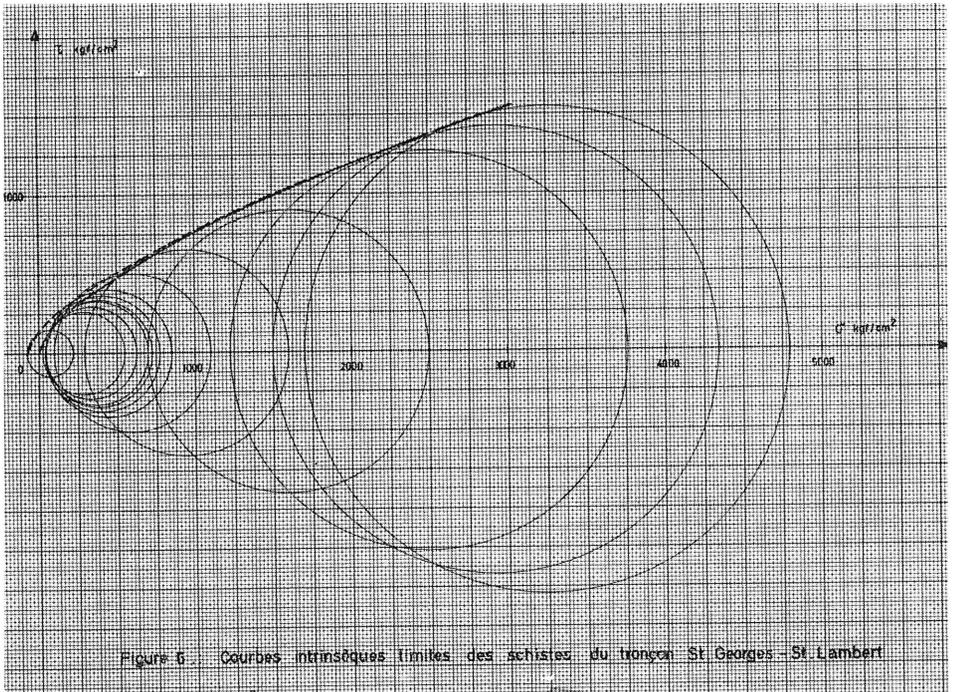


Figure 6. Courbes intrinsèques limites des schistes du tronçon St. Georges - St. Lambert

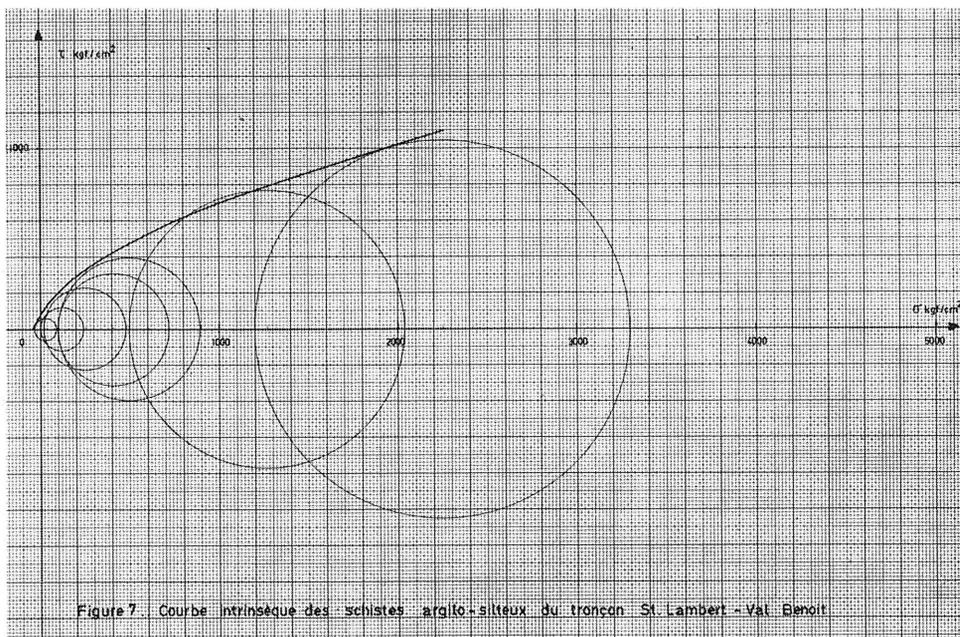
La dispersion des résultats d'essais des schistes argilo-silteux et sableux homogènes est faible, une seule courbe intrinsèque a pu être tracée, tangente à tous les cercles expérimentaux. Pour les schistes argilo-silteux, elle a pour équation

$$\sigma = 0,009\ 66\ \tau^{1,766\ 8} - 30$$

et pour les schistes sableux homogènes

$$\sigma = 0,001\ 158\ \tau^{2,091\ 1} - 40$$

(fig. 7 et 9).



Les éprouvettes de schistes argilo-silteux à nodules carbonatés étaient trop petites par rapport aux dimensions des nodules, ce qui a conduit à des résultats très dispersés ne permettant pas de définir valablement une courbe intrinsèque du matériau (fig. 8).

TABLEAU 3. — *Modules de déformation globale et d'élasticité, déterminés in situ*  
Zones sans influences minières

	Secteur non tectonisé		Secteur tectonisé	
	$E_d$ in situ	$E_e$ in situ	$E_d$ in situ	$E_e$ in situ
SRC	50 000 kgf/cm <sup>2</sup>	83 000 kgf/cm <sup>2</sup>	30 000 kgf/cm <sup>2</sup>	70 000 kgf/cm <sup>2</sup>
SS	58 000 kgf/cm <sup>2</sup>	93 000 kgf/cm <sup>2</sup>	20 000 kgf/cm <sup>2</sup>	83 000 kgf/cm <sup>2</sup>
G	60 000 kgf/cm <sup>2</sup>	100 000 kgf/cm <sup>2</sup>	20 000 kgf/cm <sup>2</sup>	100 000 kgf/cm <sup>2</sup>

## Zones influencées par des exploitations minières

$E_d$ <i>in situ</i>	$E_e$ <i>in situ</i>
7 000 kgf/cm <sup>2</sup>	21 500 kgf/cm <sup>2</sup>
9 800 kgf/cm <sup>2</sup>	47 000 kgf/cm <sup>2</sup>
10 500 kgf/cm <sup>2</sup>	60 000 kgf/cm <sup>2</sup>

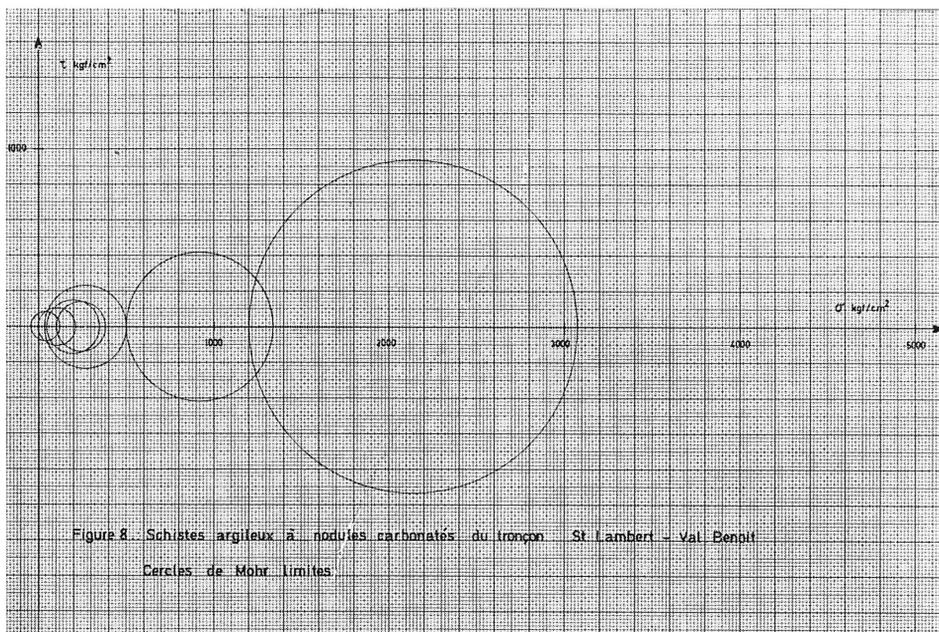


Figure 8. Schistes argileux à nodules carbonatés du tronçon St Lambert - Val Benoît  
Cercles de Mohr limites

Les caractéristiques mesurées *in situ* par dilatomètre permettent également de caractériser les trois groupes. Les influences minières se marquent plus encore pour les massifs que pour les matériaux, comme le montre le tableau 3 dans lequel on a aussi repris l'effet des phénomènes tectoniques.

## V. DURETÉ ET ABRASIVITÉ

Les tests ont été conduits suivant les normes admises à l'Institut national des Industries extractives (I.N.I.E.X.). Ils ont porté uniquement sur le tronçon Val-Benoît - Saint-Georges et ont comporté les essais suivants :

- compression uniaxiale sur éprouvettes de diamètre 36 mm et hauteur de 36 mm ;
- traction par fendage sur carottes de diamètre 36 mm, longueur 12 mm ;

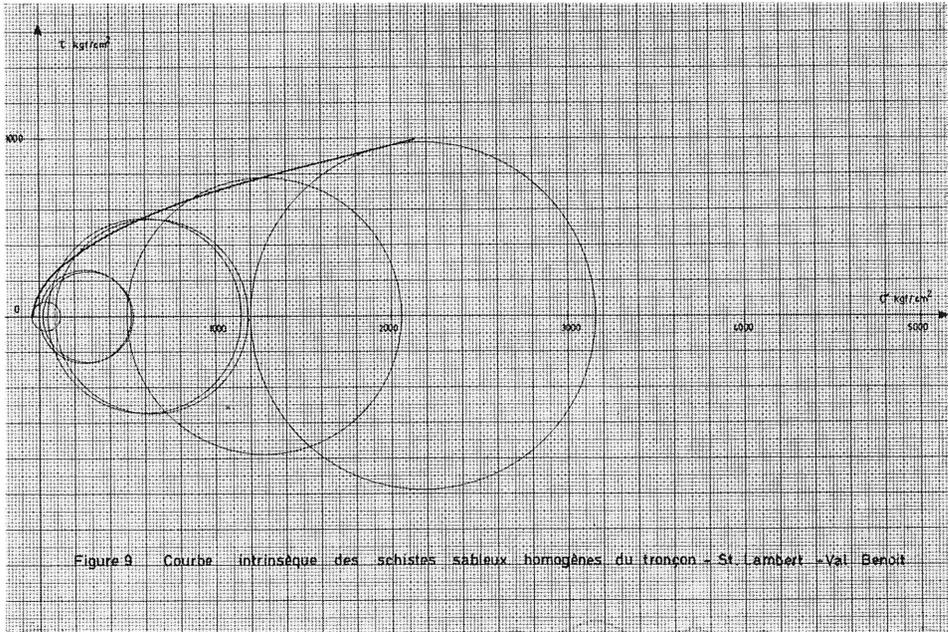


Figure 9 Courbe intrinsèque des schistes sableux homogènes du tronçon - St Lambert - Val Benoit

— essais de dureté suivant la méthode Cerchar-Verneuil : un foret de diamètre 8 mm terminé par un dièdre de 99° d'angle, tourne à une vitesse de 190 tours/min et est chargé par un poids de 20 kg. On enregistre la vitesse de pénétration. La dureté définie par Cerchar est basée sur la vitesse initiale de pénétration et l'indice de dureté est le nombre de secondes nécessaire pour obtenir un enfoncement de 1 cm. L'unité est exprimée en s/cm ;

— test d'abrasivité suivant la méthode Cerchar-Verneuil. Une tige d'acier de dureté déterminée terminée par un cône est appliquée sur la roche et ensuite déplacée de 1 cm à vitesse lente. L'abrasivité est donnée par le diamètre de méplat 1/10 mm. En première approximation, une roche dont l'abrasivité est inférieure à 0,3 point peut être considérée comme très faiblement abrasive ; par contre, une roche dont l'indice est supérieur à 1 peut être considérée comme abrasive et cette roche est très abrasive si l'indice est supérieur à 2 points ;

— les teneurs en quartz et dimensions des grains de quartz déterminées par comptage de grains au microscope.

Les résultats sont synthétisés sous la forme d'un facteur d'usure  $F$  établi par le D<sup>r</sup> Schimazek du Steinkohlenbergbauverein suivant la formule

$$F = (t/100) \times d \times R_t \times 1,4$$

où  $F$  est exprimé en kg/cm ;

$t$  est la teneur en quartz exprimée en % ;

$d$  est la dimension moyenne des grains de quartz exprimée en cm ;

$R_t$  est la résistance à la traction de l'échantillon exprimée en kgf/cm<sup>2</sup> ;

1,4 est le facteur correctif qui tient compte de ce que le plan suivant lequel les grains ont été sciés ne correspond pas nécessairement à leur plus grande surface.

D'après M. Schimazek, la valeur limite du coefficient  $F$  pour des pics est de 0,50 kg/cm et pour des molettes, de 2,7 kg/cm.

Dans cette étude, une attention particulière a été accordée aux roches gréseuses qui sont les plus résistantes et les plus abrasives pour le travail des outils de coupe.

Les principaux résultats sont :

#### 1° *Compression uniaxiale* (fig. 10)

Un nombre important d'échantillons donne des résistances à la compression supérieures à 1 000 kgf/cm<sup>2</sup>. Sur les 147 essais dépassant cette valeur, on compte :

- 102 essais dont la résistance est comprise entre 1 000 et 1 500 kgf/cm<sup>2</sup> ;
- 25 essais dont la résistance est comprise entre 1 500 et 2 000 kgf/cm<sup>2</sup> ;
- 14 essais dont la résistance est comprise entre 2 000 et 2 500 kgf/cm<sup>2</sup> ;
- 6 essais dont la résistance est comprise entre 2 500 et 3 000 kgf/cm<sup>2</sup>.

Dans le cas du creusement par tunnelier armé de molettes, nous pensons qu'aucun problème de coupe ne se posera pour les différentes roches du sous-sol liégeois.

Dans le cas, par contre, d'un creusement par machines à attaque ponctuelle armées de pics, il existe une limite dans la résistance à la compression des roches que ces machines peuvent couper. La résistance limite est d'environ 700 kgf/cm<sup>2</sup> si les bancs sont épais et d'environ 1 000 kgf/cm<sup>2</sup> si les roches sont bien stratifiées.

#### 2° *Dureté Verneuil* (fig. 11)

En général, la dureté des schistes et des grès est comprise entre 4 et 10 points. Cependant, quelques grès particuliers donnent des valeurs de 200 points.

#### 3° *Abrasivité Verneuil* (fig. 11)

On a observé de nombreux essais où l'abrasivité est supérieure à 2 :

- 38 essais où l'indice est compris entre 2 et 3 ;
- 15 essais où l'indice est compris entre 3 et 4 ;
- 16 essais où l'indice est compris entre 4 et 5.

#### 4° *Essais de traction* (fig. 12)

On a rencontré très souvent des valeurs élevées de résistance en traction :

- 75 essais donnaient des valeurs comprises entre 100 et 150 kgf/cm<sup>2</sup> ;
- 60 essais donnaient des valeurs comprises entre 150 et 200 kgf/cm<sup>2</sup> ;
- 35 essais donnaient des valeurs comprises entre 200 et 250 kgf/cm<sup>2</sup> ;
- 7 essais donnaient des valeurs comprises entre 250 et 300 kgf/cm<sup>2</sup> ;
- 6 essais donnaient des valeurs comprises entre 300 et 350 kgf/cm<sup>2</sup> ;
- 1 essai donnait des valeurs comprises entre 350 et 400 kgf/cm<sup>2</sup> ;
- 1 essai donnait des valeurs comprises entre 400 et 450 kgf/cm<sup>2</sup>.

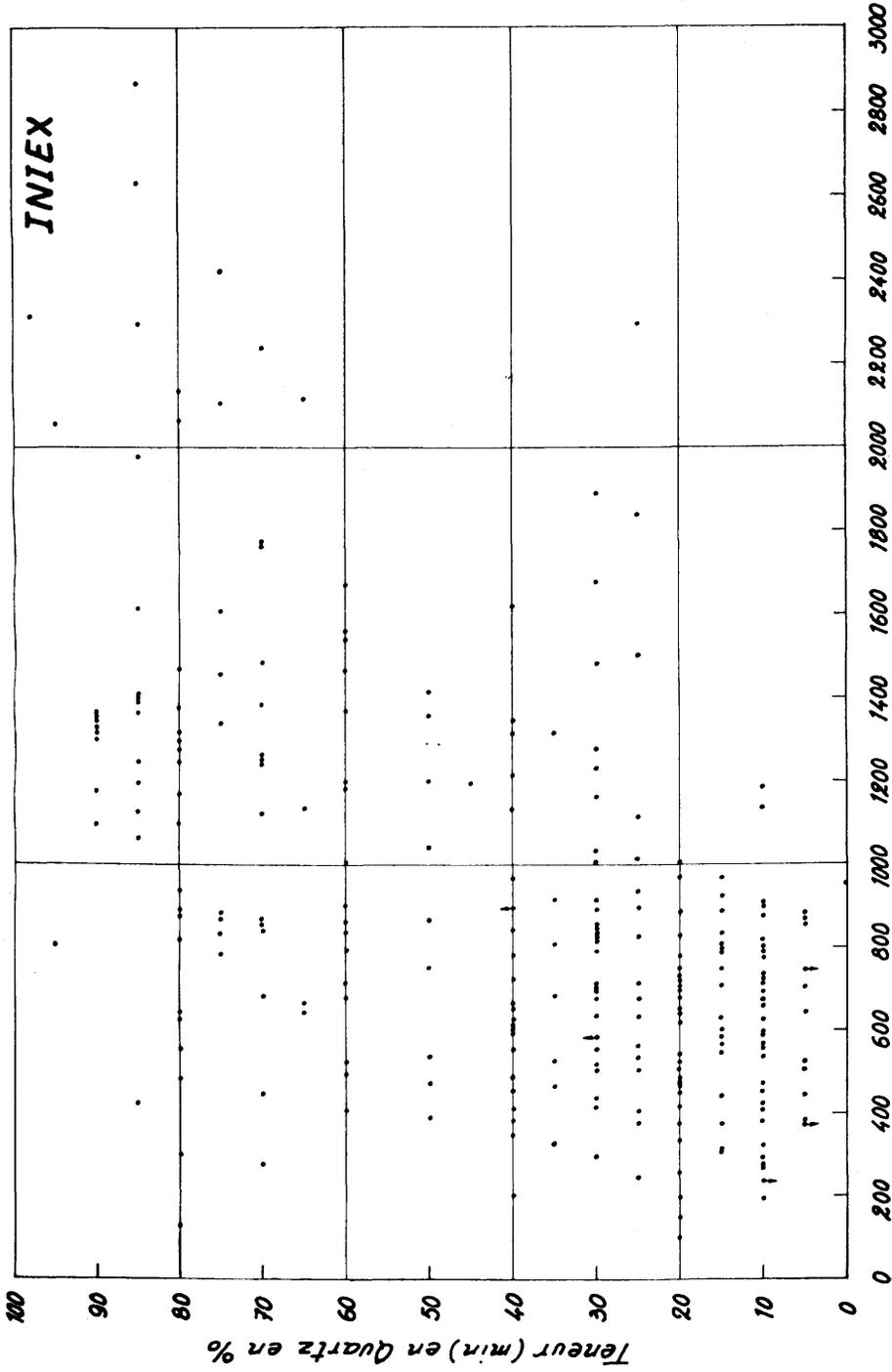
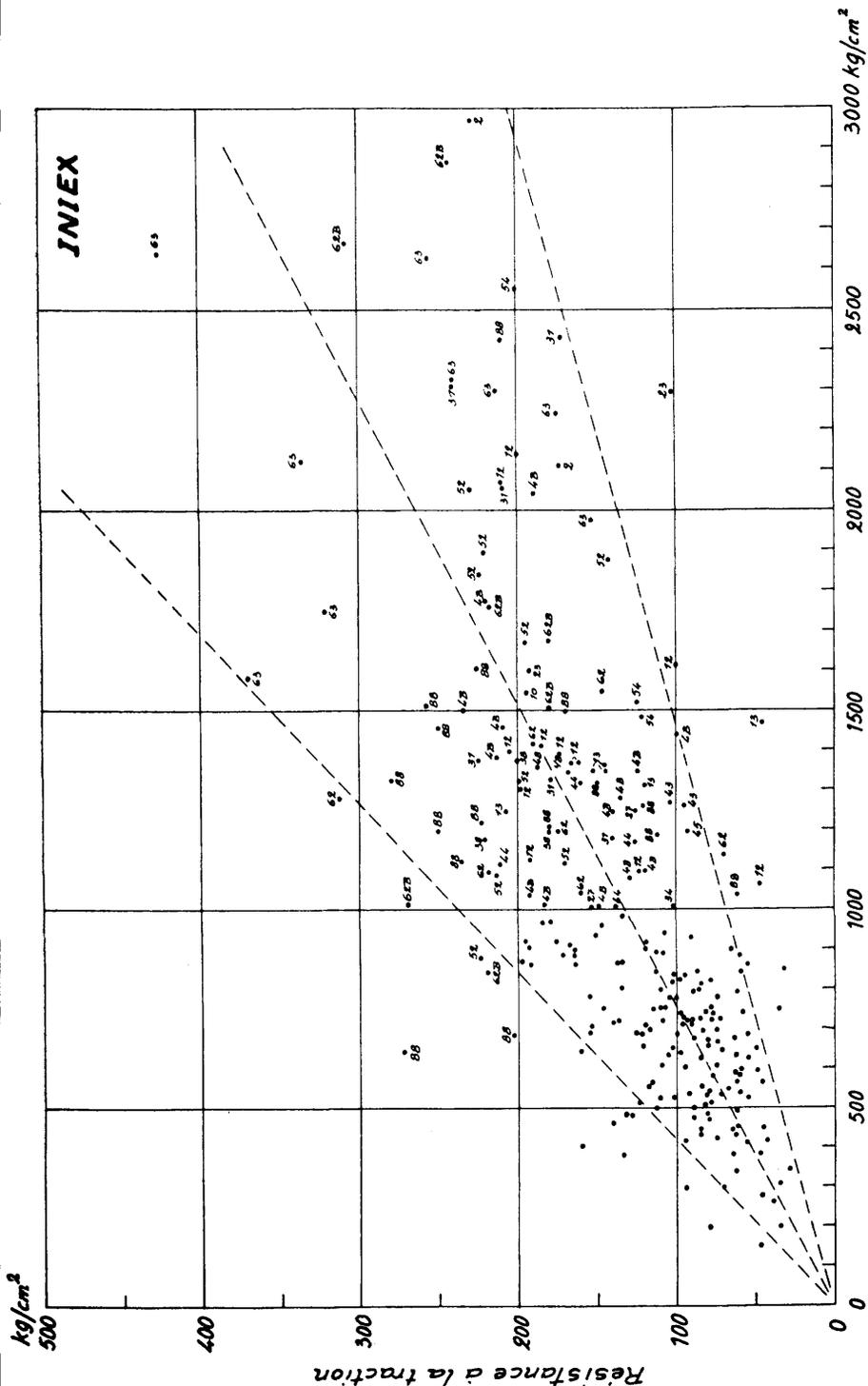


Fig. 10. — Relation entre la résistance à la compression et la teneur minimale en quartz pour chacun des échantillons de roches essayés.





Résistance à la compression

Fig. 12. — Comparaison entre les résistances à la compression et les résistances à la traction de tous les échantillons de roches essayés.

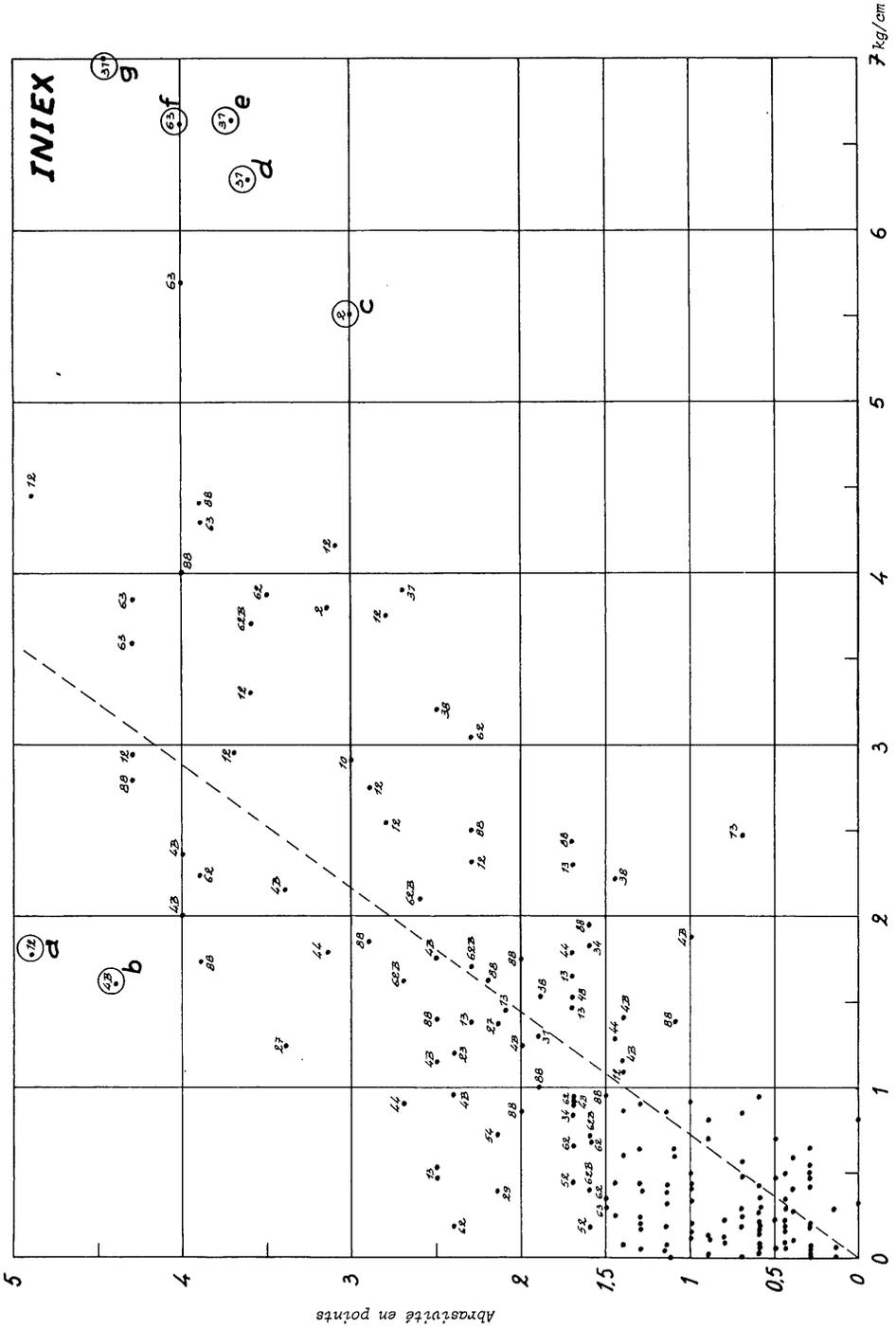


Fig. 13. — Diagramme donnant le facteur d'usure F. et l'abrasivité de tous les échantillons essayés. Les caractéristiques mécaniques des roches a à g s'éloignant le plus de la droite moyenne sont examinées dans le texte.

### 5° Facteurs d'usure (fig. 13)

On a rencontré de nombreux facteurs d'usure supérieurs à 0,5 kgf/cm :

- entre 0,5 et 1 : 45 essais ;
- entre 1 et 2 : 33 essais ;
- entre 2 et 3 : 18 essais ;
- entre 3 et 4 : 11 essais ;
- entre 4 et 5 : 4 essais ;
- entre 5 et 6 : 2 essais ;
- entre 6 et 7 : 3 essais ;
- entre 7 et 8 : 1 essai.

## VI. GÉOLOGIE DE L'INGÉNIEUR

La zone d'altération du bed rock a une épaisseur variable de 1 à 8 mètres.

Le massif est à fissuration dense, même parfois très dense, les dimensions des blocs étant décimétriques. En se référant au *Dossier pilote des tunnels* (Panet, 1973), sous la zone d'altération les schistes et les charbons sont des roches tendres ( $\sigma_c < 300$  kgf/cm<sup>2</sup>) et les grès des roches dures ( $\sigma_c > 300$  kgf/cm<sup>2</sup>). Le massif est une formation sédimentaire avec alternance de roches de dureté différente et il est aquifère. Au point de vue coût de l'exécution, il est classé suivant le dossier précité, difficile à mauvais. En ce qui concerne la stabilité de l'excavation, il y est indiqué : « Les parties les plus tendres peuvent évoluer rapidement. Nécessité d'un soutènement. » Les procédés habituels d'exécution cités sont l'excavation par demi-section ou par section divisée.

La fissuration du massif, parfois augmentée par les exploitations minières, rend celui-ci très perméable en certains endroits et nécessiterait des travaux d'étanchéisation.

Les caractéristiques mécaniques du massif ne varient pas de façon sensible dans le bed rock non altéré jusqu'à une quarantaine de mètres (profondeur atteinte par les sondages).

Pour la clarté, le tracé Val-Benoît - Coronmeuse est divisé en 10 tronçons présentant des caractéristiques propres en géologie de l'ingénieur. Nous les examinons en insistant sur les données susceptibles d'influer sur les modalités d'exécution des travaux. Toutefois, dans l'état de fracturation, le risque de chutes de blocs en voûte existe pour tous les tronçons.

### 1. Tronçon Val-Benoît - Leman

Il recoupe suivant un angle de 50 à 60° des terrains principalement schisteux affectés de petits plis et failles. Les exploitations minières ont été nombreuses même à faible profondeur et les actions tectoniques ont été intenses. Il en résulte des propriétés mécaniques médiocres :

$$R_{cm} = 597 \text{ kgf/cm}^2 \quad \sigma R_c = 308 \text{ kgf/cm}^2 ;$$

$E_a$  *in situ* de 5 000 à 15 000 kgf/cm<sup>2</sup> ;

$E_e$  *in situ* de 25 000 à 60 000 kgf/cm<sup>2</sup>.

Au point de vue dureté et abrasivité, les grès sur et sous Stenaye donnent des valeurs d'abrasivité de 1 à 3,15 et des facteurs d'usure de 0,04 à 2,20. Ils présenteront donc des difficultés de creusement en cas d'utilisation de machines ponctuelles et une usure importante des outils de coupe quelle que soit la machine adoptée.

La perméabilité est élevée avec souvent des pertes totales en forage. Les tunnels rencontreront donc des terrains très déconsolidés (surtout les murs des couches), avec venues d'eau et risques d'éboulements.

Aucune des variantes étudiées — tant en plan qu'en altitude — n'ayant permis d'éviter les aléas signalés, il faudra s'adapter aux terrains médiocres et éventuellement les améliorer (injections). L'occupation de la surface est donc à considérer dans le choix du tracé pour que les opérations de traitement soient réalisables et aussi pour que les tassements possibles n'entraînent pas des dommages prohibitifs. Le tracé retenu évite le campus universitaire et au sud du Val-Benoît, les terrains fortement influencés par les actions minières et la proximité de la faille Eiffélienne.

## 2. Tronçon Leman - Franchises

Les tunnels recouperont en majorité des grès et des schistes sableux. Les bancs d'orientation N/60°/E, inclinés de 15 à 20° S, sont affectés de quelques petits plis. Le massif n'a pas subi d'influence minière. Les caractéristiques géomécaniques sont moyennes :

$$R_{cm} = 426 \text{ kgf/cm}^2 \quad \sigma R_c = 262 \text{ kgf/cm}^2 ;$$

$$R_{tm} = 44 \text{ kgf/cm}^2 \quad \sigma R_t = 44 \text{ kgf/cm}^2 ;$$

$$E_a \text{ *in situ* } = 20\,000 \text{ kgf/cm}^2 ;$$

$$E_e \text{ *in situ* } = 80\,000 \text{ kgf/cm}^2.$$

Le banc le plus dur, grès de Stenaye, n'offre pas une résistance exagérée pour le creusement :

$$R_c < 800 \text{ kgf/cm}^2 ;$$

$$R_t < 100 \text{ kgf/cm}^2.$$

Au point de vue dureté et abrasivité, les grès encadrant la couche Stenaye présenteront les mêmes caractéristiques que dans le tronçon précédent.

Sous 25 m de profondeur, la perméabilité des terrains est très réduite. Les tunnels disposés en travers-bancs se trouveront dans de bonnes conditions de creusement sauf le risque de chute de blocs en voûte, en particulier pour un creusement progressant du sud vers le nord, en raison du pendage sud des bancs.

## 3. Tronçon Franchises - Guillemins

On a affaire aux mêmes séries gréseuses mais en structure subverticale. On relève de nombreuses exploitations minières. Les caractéristiques géomécaniques intrinsèquement bonnes sont réduites du fait de la fracturation et de la structure :

$$\begin{aligned}
 R_{cm} &= 309 \text{ kgf/cm}^2 & \sigma R_c &= 246 \text{ kgf/cm}^2 ; \\
 R_{tm} &= 11 \text{ kgf/cm}^2 & \sigma R_t &= 6 \text{ kgf/cm}^2 ; \\
 E_a \text{ in situ} &= 10\,000 \text{ kgf/cm}^2 ; \\
 E_e \text{ in situ} &= 40\,000 \text{ kgf/cm}^2 .
 \end{aligned}$$

La disposition des bancs provoque une perméabilité élevée. Le creusement se fera à travers-bancs dans des terrains subverticaux, ce qui réduit les inconvénients de la déconsolidation due aux exploitations minières. Les venues d'eau risquent d'être importantes.

Au nord, vers les Guillemins, on traversera le pli en chaise signalé plus haut, dans des terrains surtout schisteux qui présentent des caractéristiques médiocres du fait de la nature lithologique, de la tectonique et des influences minières.

Au point de vue dureté et abrasivité, les grès de Stenaye, Malgarnie et Bomebac présenteront des caractéristiques semblables à celles des tronçons précédents. Au droit de la station des Guillemins, les bancs de grès présentent des abrasivités atteignant 3,15 et des facteurs d'usure de 2,23 à 3,2, ce qui implique des difficultés de creusement relativement importantes.

La recoupe des couches de charbon et de leurs murs sera particulièrement délicate. Les venues d'eau locales peuvent entraîner des « déboussures » dans les roches déconsolidées surtout au mur des couches de charbon. Les tunnels creusés à travers-bancs rencontreront des conditions peu favorables, les variations rapides de pendage augmentant les risques de chute de blocs.

La station des Guillemins pourra être déplacée vers le nord où les conditions structurales s'améliorent quelque peu.

#### 4. Tronçon Guillemins - Charlemagne

Les roches comportent de nombreuses couches de charbon dans une série riche en schiste, schiste à radicles, schiste à nodules carbonatés. Les bancs sont orientés N/45°/E-50° N. Les influences minières sont nettes. De vieux travaux pourraient être recoupés par les tunnels. Les caractéristiques géomécaniques sont fortement dégradées, principalement au mur des couches de charbon et des veinettes :

$$\begin{aligned}
 R_{cm} &= 455 \text{ kgf/cm}^2 & \sigma R_c &= 432 \text{ kgf/cm}^2 ; \\
 R_{tm} &= 33 \text{ kgf/cm}^2 & \sigma R_t &= 25 \text{ kgf/cm}^2 ; \\
 E_a \text{ in situ} &< 15\,000 \text{ kgf/cm}^2 ; \\
 E_e \text{ in situ} &< 50\,000 \text{ kgf/cm}^2 .
 \end{aligned}$$

Au point de vue dureté et abrasivité, aucun des bancs de grès testés n'a présenté de valeurs particulièrement élevées.

La perméabilité variable est dans l'ensemble assez réduite sous 25 m de profondeur sauf dans les zones de vieux travaux où elle dépasse 25 uL. Alors que les tunnels recoupent les couches quasi à travers-bancs des Guillemins à Sainte-Véronique, ils deviennent presque parallèles à celles-ci entre Sainte-Véronique et Charlemagne. Une attention particulière est à accorder à la couche Béguine (station Sainte-Véronique) dont les épontes contiennent des minéraux argileux gonflants, et plus généralement aux « déboussures » des murs de couches qui risquent de se transmettre jusqu'aux alluvions aquifères sus-jacentes en raison du pendage élevé des bancs.

### 5. Tronçon Charlemagne - Pont-d'Avroy

A Charlemagne, on recoupe des grès et des schistes sableux dessinant une flexure marquant la transition entre les dressants du sud (pendage 50° N) et le synclinal de Liège (pendage 10° N). La proximité immédiate de la faille de Seraing et les actions minières ont entraîné une fracturation notable des grès. Il en résulte une perméabilité élevée (25 à 30 uL) et une diminution de la résistance mécanique des terrains mais leur nature gréseuse maintient des caractéristiques satisfaisantes :

$$\begin{aligned} R_{cm} &= 317 \text{ kgf/cm}^2 & \sigma R_c &= 205 \text{ kgf/cm}^2 ; \\ R_{tm} &= 60 \text{ kgf/cm}^2 & \sigma R_t &= 45 \text{ kgf/cm}^2 ; \\ E_a \text{ in situ} &= 10\,000 \text{ kgf/cm}^2 ; \\ E_e \text{ in situ} &= 40\,000 \text{ kgf/cm}^2 . \end{aligned}$$

Au point de vue abrasivité et dureté, les grès situés à Charlemagne présentent des abrasivités de 1,7 à 4,6 et des facteurs d'usure de 3,9 à 7, valeurs très élevées entraînant des problèmes de creusement particulièrement importants. Entre Charlemagne et Pont-d'Avroy, les nombreux bancs de grès recoupés présentent des abrasivités de 1,4 à 4,3 et des facteurs d'usure de 1,37 à 5,04. Ces valeurs élevées rendront le creusement difficile et coûteux notamment en raison de la structure sub-horizontale des couches.

La faille de Seraing et la faille Saint-Gilles sont des décrochements nets mais encadrés par 5 à 15 m de matériaux broyés de qualité médiocre. La traversée des zones failleuses aussi perpendiculairement que possible nécessitera les précautions classiques. Le massif entre les deux failles est faiblement incliné et constitué de terrains à résistance moyenne, peu affectés par la tectonique. Deux variantes ont été examinées, suivant le tracé Pont-d'Avroy où les actions minières existent mais sont limitées, les caractéristiques sont moyennes :

$$\begin{aligned} E_a \text{ in situ} &: 5\,000 \text{ à } 16\,000 \text{ kgf/cm}^2 ; \\ E_e \text{ in situ} &: 20\,000 \text{ à } 50\,000 \text{ kgf/cm}^2 . \end{aligned}$$

Suivant le tracé Roi-Albert, elles sont élevées :

$$\begin{aligned} E_a \text{ in situ} &: 40\,000 \text{ à } 70\,000 \text{ kgf/cm}^2 ; \\ E_e \text{ in situ} &: 80\,000 \text{ à } 90\,000 \text{ kgf/cm}^2 , \end{aligned}$$

mais on recoupe plus obliquement la faille de Seraing et l'on risque d'influencer d'anciens monuments : Eglise Saint-Jacques, Cathédrale. La perméabilité du bed rock est faible suivant le tracé Pont-d'Avroy (0 à 10 uL), nulle suivant le tracé Roi-Albert.

La faible pente des terrains augmente le risque de décollement des bancs en voûte des tunnels.

### 6. Tronçon Pont-d'Avroy - Saint-Lambert - Saint-Georges - Maghin

Les bancs appartiennent au synclinal de Liège et présentent une faible pente. La série assez gréseuse contient plusieurs wash-outs. Le secteur n'a pas fait l'objet d'exploitations minières. Les caractéristiques géomécaniques des terrains sont élevées :

$$R_{cm} = 706 \text{ kgf/cm}^2 \quad \sigma R_c = 596 \text{ kgf/cm}^2 ;$$

$$R_{tm} = 71 \text{ kgf/cm}^2 \quad \sigma R_t = 46 \text{ kgf/cm}^2,$$

mais la fracturation réduit les valeurs du module de déformation *in situ* : 20 000 kgf/cm<sup>2</sup>. La perméabilité est faible dans les schistes : 0 à 5 uL, élevée dans les grès : plus de 20 uL.

Au point de vue abrasivité et dureté, tous les grès de « wash out », grès sur Cerisier et sur Pestay, grès sur et sous Grande Veine, présentent des abrasivités de 1,5 à 5 et des facteurs d'usure de 0,5 à 5,5. Ils entraîneront une usure notable des outils à molettes et ne sont pas traversables par les machines à attaque ponctuelle.

Il y aura donc des problèmes de creusement et de coût particulièrement importants, accrus par l'allure subhorizontale des couches.

Les ouvrages se trouveront dans des conditions favorables, n'étaient la dureté des grès et la possibilité de venues d'eau dans les fractures ouvertes des formations gréseuses. Les gares Saint-Lambert et Saint-Georges sont situées dans des wash-outs gréseux (grès sur Cerisier et grès sur Pestay). Un tracé en tunnel sous la colline de Pierreuse a été étudié et éliminé du fait d'anciennes exploitations de charbon et de grès réalisées à flanc de coteau : les vieux travaux ont entraîné une déconsolidation générale et une perméabilité élevée du massif aquifère.

## 7. Tronçon Maghin - Vieille-Montagne

On se trouve à l'est du synclinal de Liège dans une série riche en schistes et nettement influencée par les exploitations minières. Les bancs sont peu inclinés : 5 à 15°. Quelques failles subméridiennes recouperth orthogonalement la structure. La perméabilité est généralement faible.

Les ouvrages rencontreront des conditions assez favorables moyennant des précautions relatives aux venues d'eau, recoupe de couches de charbon (surtout en voûte dans les gares) et chutes de blocs.

Les caractéristiques géomécaniques sont bonnes :

$$R_{cm} = 393 \text{ kgf/cm}^2 \quad \sigma R_c = 393 \text{ kgf/cm}^2 ;$$

$$R_{tm} = 51 \text{ kgf/cm}^2 \quad \sigma R_t = 38 \text{ kgf/cm}^2 ;$$

$$E_a \text{ in situ} = 50\,000 \text{ à } 90\,000 \text{ kgf/cm}^2 ;$$

$$E_e \text{ in situ} = 100\,000 \text{ kgf/cm}^2,$$

sauf à la gare Maghin du fait de la proximité de la faille Saint-Gilles et d'exploitations minières plus intenses :

$$E_a : 3\,000 \text{ à } 15\,000 \text{ kgf/cm}^2 ;$$

$$E_e : 10\,000 \text{ à } 35\,000 \text{ kgf/cm}^2.$$

## 8. Tronçon Vieille-Montagne - Sainte-Foy

Les ouvrages traversent aussi perpendiculairement que possible la faille Saint-Gilles, orientée N/55°/E, 50° à 55° N, avec un remplissage d'une douzaine de mètres de matériaux broyés et fracturés.

La solution consistant à traverser la faille près de la gare Maghin et à rejoindre Sainte-Foy par le massif sud conduirait à recouper des dressants fortement exploités et des roches affectées par une flexure : les conditions y sont nettement moins favorables que pour le tracé précédent.

### 9. Tronçon Sainte-Foy - Coronmeuse

Au-delà de la faille Saint-Gilles, le massif est formé par des bancs inclinés de 45° à 65° N principalement gréseux de Sainte-Foy à Borgnet, schisto-sableux de Borgnet à Coronmeuse où ils sont en grès massifs.

La proximité de la faille Saint-Gilles et les actions minières entraînent une fissuration élevée et les caractéristiques géomécaniques sont relativement faibles compte tenu de la nature gréseuse des roches :

$$\begin{aligned} R_{cm} &= 346 \text{ kgf/cm}^2 & \sigma R_c &= 428 \text{ kgf/cm}^2 ; \\ R_{tm} &= 39 \text{ kgf/cm}^2 & \sigma R_t &= 31 \text{ kgf/cm}^2 ; \\ E_a \text{ in situ} &= 3\,000 \text{ à } 20\,000 \text{ kgf/cm}^2 ; \\ E_e \text{ in situ} &= 30\,000 \text{ à } 80\,000 \text{ kgf/cm}^2. \end{aligned}$$

La perméabilité est souvent élevée surtout à Coronmeuse : 30 à 200 uL. Les tunnels recouperont presque en direction les terrains déconsolidés et fracturés en position structurale redressée, avec la possibilité de venues d'eau importantes. Les conditions sont peu favorables. Suivant les méthodes de creusement choisies, elles nécessiteront diverses précautions (injections...).

### 10. Tronçon Coronmeuse - Bellevue

Les caractéristiques géologiques sont semblables à celles du tronçon précédent mais les actions minières ont entraîné des affaissements de plusieurs mètres en surface. Les caractéristiques géomécaniques *in situ* sont faibles :

$$E_a = \text{inférieur à } 500 \text{ kgf/cm}^2 \text{ pour des pressions de } 0 \text{ à } 10 \text{ kgf/cm}^2 ; \text{ de } 3\,000 \text{ à } 7\,000 \text{ kgf/cm}^2 \text{ pour des pressions supérieures ;}$$

$$E_e = \text{inférieur à } 15\,000 \text{ kgf/cm}^2.$$

La perméabilité est élevée et dépasse 250 uL dans les assises gréseuses.

## VII. CONCLUSIONS

Pour les variantes de tracé que permettent les impératifs quant au trafic voyageurs et à l'implantation des stations souterraines, les recherches géologiques, hydrogéologiques et géomécaniques ont conduit à définir les caractéristiques de nature à orienter le choix des bureaux d'études. En particulier, les décisions concernant l'implantation des stations et la profondeur des galeries doivent tenir compte de la zone d'altération épaisse de 1 à 8 m, moins résistante et très perméable, sous-jacente aux alluvions.

Les recherches poussées généralement jusqu'à 40 m de profondeur ont montré que la résistance et la perméabilité dépendent de la lithologie, de la structure tectonique et des influences minières, facteurs indépendants de la profondeur. A des profondeurs supérieures à 50 m, probablement à éliminer dans le cas présent, existe le danger de rencontrer d'anciens travaux miniers inondés.

L'étude réalisée a fourni les données que les ingénieurs doivent connaître pour prévoir les difficultés à surmonter, choisir le matériel de creusement et de soutènement et les modalités d'exécution et estimer le coût et la durée de l'entreprise. On a notamment recueilli les éléments susceptibles d'éviter les dégradations en surface que les travaux souterrains et les modifications du régime des eaux souterraines pourraient provoquer.

Au point de vue scientifique, les connaissances sur la géologie urbaine mal connue, la sédimentologie du terrain houiller en zone non exploitée, les caractéristiques des nappes aquifères et surtout la mécanique des roches dans des conditions complexes du fait de la Nature et des travaux de l'homme, ont considérablement progressé. Il est évident qu'en dehors de l'objectif direct de l'étude, les progrès dans la connaissance de la géologie de l'ingénieur valent pour l'aménagement de la ville, d'autres travaux d'infrastructure en cours ou envisagés et également pour la sauvegarde de l'environnement urbain.

## Bibliographie

- CALEMBERT, L. (1965). — Observations dans la plaine alluviale de la Meuse, en aval de Liège. *Publication du Service géologique du Luxembourg*, vol. XIV, p. 115-136, Luxembourg.
- CALEMBERT, L., MONJOIE, A., SCHROEDER, Ch. et WATHELET, J. C. (1971). — La géologie de l'ingénieur au site de la gare souterraine Saint-Georges à Liège (Belgique). *Bull. de l'Association internationale de Géologie de l'Ingénieur*, n° 4, p. 21-31, 3 fig., 2 tabl., Paris.
- CALEMBERT, L., LAMBRECHT, L. et MONJOIE, A. (1973). — 64 sondages au centre de la ville de Liège. *Service géologique de Belgique, Professional Paper n° 12*, Bruxelles.
- CALEMBERT, L., LAMBRECHT, L. et MONJOIE, A. (1973). — La géologie du centre de Liège. *Ann. Soc. géol. de Belgique*, t. 96, p. 157-163, 3 fig., 1 h.t., Liège.
- CALEMBERT, L., LAMBRECHT, L. et MONJOIE, A. (1974). — 75 sondages au sud de Liège sur la rive gauche de la Meuse. *Service géologique de Belgique, Professional Paper* (sous presse).
- CALEMBERT, L., LAMBRECHT, L. et MONJOIE, A. (1974). — La géologie au sud de Liège sur la rive gauche de la Meuse. *Ann. Soc. géol. de Belgique* (sous presse).
- MICHOT, P. (1958). — Classification et terminologie des roches lapidifiées de la série psammopélique. *Ann. Soc. géol. de Belgique*, t. 81, p. 311-342, Liège.
- MONJOIE, A. et POLO-CHIAPOLINI, Cl. (1973). — Influence des travaux miniers sur les caractéristiques hydrogéologiques et géomécaniques des massifs rocheux. *Ann. des Mines de Belgique*, n° juillet-août (sous presse).
- MONJOIE, A. (1970). — Propriétés mécaniques des schistes siluriens à Tihange (Belgique). *Rapports du deuxième Congrès de la Société internationale de Mécanique des Roches*, t. 1, n° 1-29.
- MONJOIE, A. (1973). — Hydrogéologie du centre de Liège. *Ann. Soc. géol. de Belgique*, t. 96, Liège (sous presse).
- PANET (1973). — *La stabilité des ouvrages souterrains. Soutènement et revêtement*. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Équipement, du Logement et du Tourisme. Laboratoires des Ponts et Chaussées. France. Rapport de recherches n° 28. Sept. 1973, Paris.
- POLO-CHIAPOLINI, Cl. (1974). — Caractéristiques géomécaniques des roches du bassin houiller de Liège. *Publications du Centre d'Études de Recherches et d'Essais scientifiques du Génie civil*, Mémoire CERES, nouvelle série, n° 46, Liège (sous presse).

- SCHIMAZEK, J. et KNATZ (1970). — Der Einfluß des Gesteinsaufbaus auf die Schnittgeschwindigkeit und den Meisselverschleiß von Streckenvortriebsmaschinen. *Glückauf*, Heft 196, p. 274-278.
- SCHNEIDER, B. (1967). — Moyens nouveaux de reconnaissance des massifs rocheux. *Ann. de l'Inst. techn. du Bâtiment et des Travaux publics*, n° 234-236, juillet-août.
- SCHROEDER, Ch. (1972). — Influence de la lithologie sur le comportement des roches soumises à essais de compression simple et brésiliens. *Engineering Geology*, vol. 6, p. 31-42, Amsterdam.
- VALANTIN, A. (1973). — Examens des différents procédés classiques de détermination de la nocivité des roches vis-à-vis de l'abattage mécanique. *Journées d'information « Technique de Creusement »*, Luxembourg, 28 au 30 novembre 1973.
- VAN DUYSSE, H. (1971). — Résistance des épontes de la couche 63-64 au siège Beringen. INIEX, *Information technique*, fol. 3286, septembre.
- VAN DUYSSE, H. et DESLAGMULDER, J. M. (1973). — Creusement mécanisé des traçages au moyen d'une Dosco MK 2 A au siège Beringen. INIEX, *Bulletin technique « Mines et Carrières »*, n° 141, avril, 29 pages, 20 fig., 10 tabl.
- VAN DUYSSE, H. (1974). — Essais en laboratoire sur des échantillons de roche prélevés dans les carottes des sondages de reconnaissance, Métro de Liège, Implantation dans le terrain houiller. INIEX, *Information technique*, fol. 3882, mars, 58 pages.