

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

TUNNEL DANS LE SABLE DE BRUXELLES PAR LA METHODE DU BOUCLIER

SHIELD TUNNELLING IN BRUSSELS' SAND

Cl. VINNEL, Ir.

A. HERMAN, Ir.

Electrobel, Bruxelles, Belgique

SOMMAIRE

Dans le cadre de la construction de tunnels pour Métro à Bruxelles, il a été décidé d'essayer un bouclier dans un des tronçons de tunnel particulièrement dégagé de construction importantes : le Parc Royal. Un tel essai était prudent vu la très faible résistance du sable de Bruxelles. Pour assurer l'équilibre du revêtement circulaire on a placé un tirant étallique à hauteur du radier de circulation des métros. La technique s'est avérée satisfaisante et n'a pas entravé la bonne marche du chantier. On a placé dans le sol des appareils de mesures de façon à déterminer les mouvements du terrain pendant toute la période des travaux.

INTRODUCTION

La présente communication vise à montrer comment on est arrivé à construire un tunnel circulaire de 10 m de diamètre extérieur par la méthode du bouclier dans un sable lâche devenant bouillant à sa partie inférieure.

L'ouvrage a été construit à Bruxelles grâce à la collaboration de deux entreprises belges importantes, les entreprises François d'une part avec la collaboration du Professeur Roisin et la firme Pieux Franki avec le concours de Monsieur Wallays d'autre part. Les calculs et l'élaboration des plans ont été confiés au bureau d'études Electrobel.

L'emploi de ce bouclier avait un caractère expérimental : Il fallait prouver d'abord qu'il était possible de faire progresser un bouclier dans un tel terrain, montrer ensuite quelles étaient l'étendue et l'importance des tassements en surface. L'expérience avait un but d'enseignement de façon à prévoir à l'avenir les mesures à prendre pour passer sous une chaussée même étroite tout en évitant tout risque de sinistre dans les immeubles riverains.

La première partie de l'exposé vise à décrire le terrain tel qu'il s'est présenté sous le jour des essais géotechniques. Nous montrerons ensuite quels furent les mouvements du sol lors du parcours de ce bouclier. Enfin, nous décrirons quelles ont été les mesures prises pour résoudre les problèmes de stabilité d'un revêtement circulaire dans ce sable très compressible.

NATURE DU TERRAIN

Le sol dans lequel le bouclier a évolué est constitué par deux couches géologiques différentes superposées : la couche Bruxellienne supérieure et la couche Yprésienne sous-jacente.

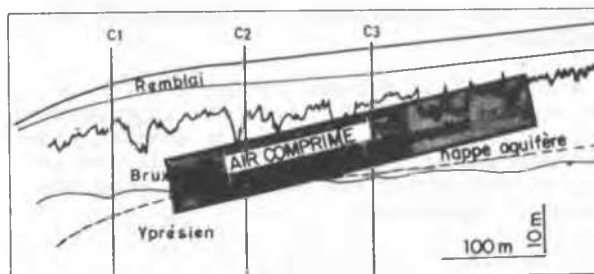


Fig. 1 Coupe géologique du terrain

Au début de sa course le bouclier a circulé pratiquement à la limite des deux couches entamant d'une façon égale l'une et l'autre. On l'a progressivement relevé et il termine son trajet entièrement dans la couche Bruxellienne.

La couche géologique supérieure est constituée de sable calcaire pouvant contenir des blocs de grès. La partie supérieure de

VINNEL et HERMAN

la couche a été décalcifiée par les eaux atmosphériques, cette décalcification s'est manifestée de façon plus ou moins profonde et accentuée la porosité et le manque de cohésion du sable.

La couche Yprésienne est constituée d'un sable fin argileux noyé dans la nappe aquifère.

Afin de mieux connaître les terrains que nous allons rencontrer nous avons fait une campagne de reconnaissance géotechnique comprenant :

- Des essais de pénétration
- Des forages avec prélèvement d'échantillons non remaniés
- Des essais de laboratoire sur les échantillons prélevés dans les forages
- Des essais à la plaque dans les terrains semblables à ceux que le bouclier allait rencontrer.

Nous allons parcourir rapidement les résultats de ces essais pour nous faire une idée de la nature du terrain.

ESSAIS DE PENETRATION

On a effectué des essais de pénétration tout le long du trajet du bouclier (un essai de pénétration tous les 20 m.). Ces essais de pénétration montrent une résistance à la pointe très variable et relativement élevée dans la couche Bruxellienne. Dans la couche Yprésienne, la résistance du terrain est généralement moindre tandis que le sol paraît plus homogène.

FORAGES AVEC PRELEVEMENT D'ECHANTILLONS NON REMANIES

On a prévu trois forages profonds qui nous ont permis d'identifier les sols à traverser. De ces forages on a prélevé des échantillons non remaniés de façon à pouvoir analyser le sol, et déterminer ses caractéristiques physiques et mécaniques.

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

- Courbes granulométriques

En passant des couches supérieures (Bruxellien) aux couches inférieures, on voit les courbes granulométriques se déplacer de la catégorie des sables moyens à celle des sables très fins et même celles des silts.

Explication des abréviations du tableau n° 1

- Bx : Bruxellien
- Yp : Yprésien
- u : granulométrie uniforme
- e : granulométrie étendue
- d60 : ouverture de tamis laissant passer 60 % en poids de grain

Tableau n° 1 : Etude de la granulométrie

Forage	n° d'échantillon	Profondeur E	d 60	d 10	Coefficient d'uniformité (Hazen)	d 60	d 10
			mm	mm		d 60	
C1	17 (1)	8m	0,23	0,155	1,48	u	Bx
	38 (2)	18m	0,065	0,016	4,05	e	Yp
	49 (3)	23m	0,080	0,012	9,5	e	
	60 (4)	28m	0,092	0,010	9,2	e	
C2	81	8m	0,23	0,12	1,91	u	Bx
	92	13m	0,23	0,15	1,53	u	
	103 (5)	18m	0,083	0,015	5,53	e	Yp
	114 (6)	23m	0,06	0,013	4,62	e	
125 (7)	27m	0,055	0,002	28	e		
C3	142 (8)	6m	0,185	0,005	37	e	Bx
	153 (9)	11m	0,22	0,150	1,47	u	
	164 (10)	16m	0,22	0,100	2,2	u	
	175 (11)	21m	0,082	0,012	6,85	e	Yp
186 (12)	26m	0,048	0,002	24	e		

Sur le tableau ci-dessus on remarque que dans la couche Yprésienne 60 % des grains ont un diamètre supérieur à 0,05 mm alors que dans la couche Bruxellienne le même pourcentage de grains a un diamètre supérieur à 0,23 mm.

En plus la granulométrie est uniforme dans le Bruxellien (la plupart des grains ont la même dimension) alors que dans l'Yprésien elle est étendue.

- Poids volumétrique, pourcentage de vide (porosité), perméabilité (voir tableau n° 2)

On remarque :

1. le faible poids spécifique du Bruxellien ce qui révèle que le sol est peu compact. Cette constatation est renforcée par le grand pourcentage des vides observés.
2. le poids spécifique de l'Yprésien est plus important mais cela est dû à la présence de l'eau : le poids spécifique sec reste faible. Le pourcentage de vide de l'Yprésien est très élevé : semblable à celui du Bruxellien alors qu'on s'attendrait à avoir un sol plus compact vu sa profondeur et la continuité de sa granulométrie.

L'état de serrage du sol est donc en général très faible et cela fait pressentir que la réaction élastique du sol sera faible également. Le coefficient de perméabilité de l'Yprésien est petit, fait qui concorde avec la finesse des grains et l'étendue de la courbe granulométrique observées.

TUNNEL PAR LA METHODE DU BOULIER

TABLEAU N° 2

Forage	Profondeur	Poids vo- lumétrique	Poids vo- lumétrique sec	Teneur en eau	Pourcen- tage de vides	Degré de satura- tion	Coefficient de perméabilité
		γ	γ_d	w	n	Sr	k
n°	m	t/m ³	t/m ³	%	%	%	cm/sec
C1	8,00	1,408	1,374	2,5	48,2	7,1	1,1 à 1,2 x 10 ⁻³
C1	18,00	1,851	1,440	28,5	45,7	90,0	1,0 à 1,1 x 10 ⁻⁵
C1	23,00	1,914	1,499	27,7	43,4	95,4	1,3 à 1,4 x 10 ⁻⁵
C1	28,00	1,822	1,301	40,0	50,9	100,0	1,9 à 2,0 x 10 ⁻⁶
C2	8,00	1,599	1,460	9,6	44,9	31,0	3,7 à 3,8 x 10 ⁻³ *
C2	13,00	1,432 *	1,352	6,5	49,0	17,9	5,9 à 6,2 x 10 ⁻³ *
C2	18,00	1,838	1,545	18,9	41,7	70,2	2,2 à 2,3 x 10 ⁻⁶
C2	23,00	1,891	1,501	26,0	43,4	89,8	1,4 x 10 ⁻⁵
C2	27,80	1,796	1,302	37,9	50,9	97,0	7,1 à 7,3 x 10 ⁻⁶
C3	6,00	1,674	1,478	13,2	44,2	44,2	1,8 à 1,9 x 10 ⁻⁴
C3	11,00	1,450	1,338	8,4	49,5	22,7	1,8 à 1,9 x 10 ⁻⁴
C3	16,00	1,609	1,549	3,9	41,6	14,5	6,3 à 6,4 x 10 ⁻⁵
C3	21,00	1,868	1,497	24,8	43,5	85,2	1,6 à 1,7 x 10 ⁻⁶
C3	26,00	1,872	1,416	32,2	46,6	97,9	5,2 à 5,4 x 10 ⁻⁷

* sur éprouvette
de l'essai triaxial

* sur éprouvette re-
compactée à n = 41 %

TABLEAU N° 3

Forage	Profondeur m	Limites d'Atterberg		Teneur en eau w	Indice de plasticité Ip	Consistance relative lc
		WL	WP			
C1	18	29,9	27,6	28,5	2,3	+ 0,61
	23	27,2	24,5	27,7	2,7	- 0,185
	28	31,2	24,9	40,0	6,3	- 1,4
C2	18	26,8	24,9	18,9	1,9	+ 4,2
	23	28,8	24,4	26,0	4,4	+ 0,638
	28	47,6	25,7	37,9	21,9	+ 0,443
C3	21	21,4		24,8		0
	26	54	25,6	32,2	28,4	+ 0,77

Limites d'Atterberg et teneur en eau du
sable argileux Yprésien

dessus nous prévient de ce danger.

Les limites d'Atterberg permettent de juger
de la plasticité du terrain; comparées avec
la teneur en eau, elles permettent de pré-
dire le comportement du sol après tritura-
tion : Si la teneur en eau est plus grande
que la limite de liquidité (consistance
relative négative), la trituration du ter-
rain risque de le transformer en boue.

Pour éviter de transformer l'argile
Yprésienne en argile bouillante, on s'est
efforcé d'en diminuer la teneur en eau en
rabattant la nappe aquifère. Le rabattement
s'étant effectué de façon peu satisfaisante,
on a exécuté les travaux sous air comprimé.

Dans trois prises d'échantillons différen-
tes, le tableau de résultats d'analyses ci-

CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Les caractéristiques de cohésion, angle de frottement compressibilité du sol sont peut-être les plus importantes si non les plus parlantes pour se faire une idée du terrain. Elles sont par ailleurs à la base du calcul du revêtement.

Afin de déterminer la cohésion et l'angle de frottement interne, on a exécuté des essais de compression triaxiale sur échantillons non remaniés prélevés dans les forages. Les résultats de ces essais sont assez concordants.

Nous avons adopté un angle de frottement moyen de 35° et une cohésion nulle.

La compressibilité du sol a été mesurée de différentes façons vu l'importance que le module de réaction élastique du sol peut avoir sur un ouvrage de ce type. On a effectué sur des échantillons prélevés dans les forages des essais oedométriques et des essais de consolidation dans l'appareil triaxial, toute déformation radiale de l'éprouvette étant empêchée.

Dans le cas des essais oedométriques on a prélevé les éprouvettes de telle façon que les compressions s'exercent dans le sens horizontal des couches du terrain.

Dans le cas des essais exécutés dans l'appareil triaxial, vu les dimensions des éprouvettes, celles-ci ont été prises verticalement dans le sol. Ces essais donnent donc les caractéristiques verticales du sol.

On a prévu également des essais à la plaque qui ont l'avantage de se faire sur une plus grande échelle et dans le terrain en place.

Un chantier était ouvert à quelques centaines de mètres de l'emplacement où allait avancer le bouclier (Rond Point Schuman). Dans ce chantier on rencontrait un terrain semblable à celui sous-jacent au Parc Royal. Nous avons fait faire des essais de mise en charge horizontale sur plaque de $75 \times 75 \text{ cm}^2$ dans une tranchée de 1 m de large à 12 m 50 de profondeur (Sable Bruxellien). Plus tard on a répété l'expérience sur une butte de sable constituant le stross de la gare située sous le parc au niveau de séparation des couches Bruxelliennes et Yprésiennes.

Les résultats de ces expériences sont consignés sur les diagrammes ci-contre, l'essai exécuté dans la Gare du Parc donne un module d'élasticité du sol encore plus faible que celui opéré dans une tranchée du chantier voisin.

Le module d'élasticité a été calculé à partir de la formule de Talobre exposée dans son ouvrage sur la Mécanique des Roches.

RESULTATS DES DIFFERENTES MESURES DU MODULE DE YOUNG

Les résultats obtenus sont assez dissemblables suivant l'essai opéré; nous donnons un résultat moyen de chaque expérience

A. Essai de compressibilité dans l'appareil à pression triaxiale	$\pm 250 \text{ kg/cm}^2$
B. Essai de compressibilité dans oedomètre	$\pm 160 \text{ kg/cm}^2$
C. Essai à la plaque du Rond Point Schuman	$\pm 140 \text{ kg/cm}^2$
D. Essai à la plaque dans la gare du Parc Royal	$\pm 110 \text{ kg/cm}^2$

En conclusion de ces essais, nous pouvons dire que la valeur du module de Young est inférieure à 200 kg/cm^2 .

LES MOUVEMENTS DU SOL LORS DU PARCOURS DU BOUCLIER

Alors que l'on conçoit aisément en théorie que le terrain puisse n'être perturbé en aucune façon par le passage du bouclier, chaque volume de terre prélevé étant remplacé systématiquement soit par des voussoirs, soit par des injections de mortier, quand on envisage la pratique, on constate que différents facteurs difficilement pondérables provoquent des mouvements dans le terrain. De ces mouvements, les tassements en surface sont la manifestation la plus visible.

Les désordres sont en partie inhérents à la nature du bouclier, tel l'entraînement des terres par frottement sur la paroi extérieure du bouclier ou l'action poinçonnante de sa trousse coupante. Ils proviennent aussi et peut-être principalement de la manière avec laquelle on a conduit le travail : plusieurs points sont à contrôler : d'une part il convient d'empêcher le front d'attaque de s'ébouler librement à l'intérieur du bouclier, d'autre part, lors de l'avancement de celui-ci, il faut éviter d'enfoncer le front de taille dans le sol. L'équipement plus ou moins perfectionné du bouclier peut viser à réaliser ce programme. De toute façon, une conduite progressive du bouclier sera toujours préférable à un avancement par à-coups.

Les tassements en surface dépendent également de la façon dont on aura effectué l'injection des vides entre terre et voussoirs derrière le bouclier. Si ces vides ne sont pas immédiatement comblés lors de leur formation, ils se remplissent de sable au

TUNNEL PAR LA METHODE DU BOUCLIER

détriment de la couverture du tunnel, et de proche en proche ce mouvement de terrain se poursuit jusque la surface.

Afin de contrôler l'étendue et l'importance des mouvements du sol, de découvrir leurs causes et les améliorations à apporter dans l'avenir au mode d'exécution du tunnel, on a effectué plusieurs séries d'observations sur le parcours du bouclier.

Ces observations comportent :

- des relevés de tassements en surface et en profondeur
- des mesures de glissement du sol au moyen d'inclinomètres
- des mesures de décompression du sol au moyen de cellules de pression
- des contrôles du niveau de la nappe phréatique.

On a mesuré en outre les tensions dans les voussoirs et dans les tirants afin de vérifier la théorie établie pour le calcul du revêtement.

Le grand nombre d'observations n'a pas encore été entièrement examiné, nous pouvons néanmoins donner les conclusions qui apparaissent au premier abord.

Nous avons observé des tassements assez importants au-dessus du tracé du bouclier. Toutefois, ces tassements sont restés localisés si bien qu'il a été possible, moyennant précautions, de faire passer le bouclier sous une grosse artère de pénétration de la ville. La figure 2 ci-dessous montre un profil transversal du terrain avant et après le passage du bouclier.

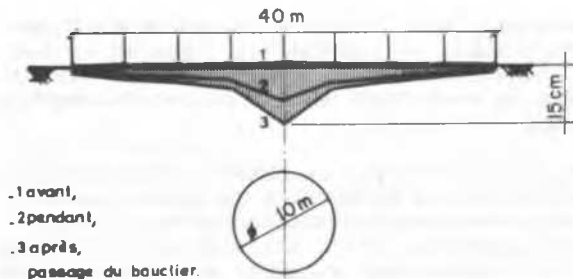


Fig. 2 Coupe transversale Tassements en surface.

Les tassements sont précédés d'un soulèvement du sol à l'avant du bouclier : Il semble que celui-ci ébranle le terrain devant lui par un excès de poussée de ses vérins. Avec ce sol peu cohésif au départ, et ameubli par la suite, il est bien difficile de ne pas effectuer des déblais excessifs au front de taille et de combler les vides derrière les voussoirs

avant que ceux-ci ne se remplissent de sable. Dans la figure 3 on voit les mouvements verticaux des terres après passage du bouclier à différentes profondeurs dans le sol : les tassements sont plus importants et plus localisés en profondeur qu'en surface.

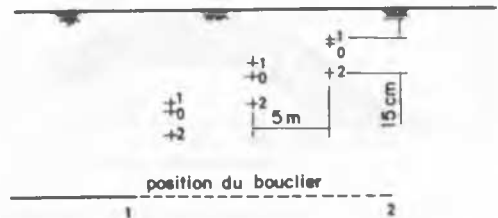


Fig. 3 Coupe longitudinale Tassements en profondeur.

Afin de mesurer les mouvements horizontaux du terrain à l'approche du bouclier on a placé dans le sol des tubes creux d'une raideur si faible qu'ils suivent les mouvements du sol sans s'y opposer efficacement. Pendant l'approche du bouclier il est possible à tout moment de déterminer la déformée de ce tube et ce, en intégrant les inclinaisons que prend un mobile qui parcourt le tube sur toute sa hauteur (inclinomètre de la Slope Indicator Cy).

On obtient la figure 4 ci-après qui montre différentes déformées du tube dans la direction du parcours du bouclier au moment de l'approche de celui-ci

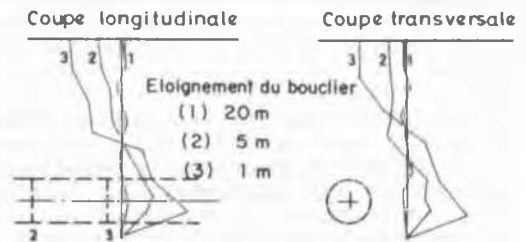


Fig. 4 Déformée du terrain devant le bouclier

Lorsque le bouclier est à 15 m, le tube commence à s'incurver; lorsqu'il n'est plus qu'à 6 m du tube, la poussée de ses vérins est telle qu'il repousse violemment la terre à sa hauteur alors que les couches supérieures du terrain continuent à se diriger vers l'arrière.

Les cellules de pression Glötzl et Ménard placées dans le sol montrent clairement l'action du bouclier qui comprime et décomprime le sol devant lui au rythme de sa progression. La figure 5 représente la variation de la

pression dans une cellule Ménard placée devant le bouclier pendant l'approche de celui-ci.

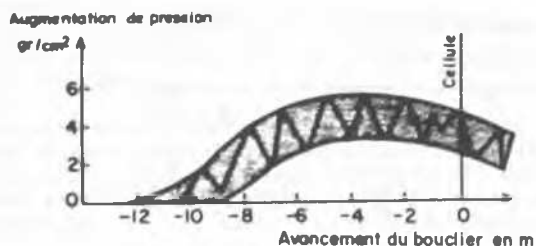


Fig. 5 Variation de pression dans le terrain à l'approche du bouclier.

En conclusion, les observations effectuées dans le terrain montrent l'influence prépondérante de la manière de conduire le bouclier laquelle dépendra fort de son équipement et de son automaticité. Les efforts dans le revêtement, comme l'attestent les tensomètres Géonor placés dans les voussoirs, peuvent atteindre momentanément des valeurs très importantes lors de la poussée du bouclier, ils se stabilisent par après à des valeurs acceptables.

La stabilité du revêtement a demandé, comme nous allons l'exposer, la présence d'un tirant métallique horizontal dans le tiers inférieur de l'anneau. On a intercalé dans certains de ces tirants des extensomètres axiaux Géonor à corde vibrante afin de comparer l'effort effectivement atteint avec celui prévu dans le calcul. Nous obtenons ainsi le tableau suivant qui, malgré une certaine dispersion, met en évidence l'action des tirants.

Les mesures présentées ont toutes été effectuées plus d'un mois après la pose des voussoirs et l'on peut espérer que la stabilisation de l'effort soit atteinte.

N° du tirant	Effort mesuré	Effort théorique
1	11 t	23,5 t
2	26 t	
3	16 t	
4	23 t	
5	-	
6	18 t	

DISPOSITIONS PRISES POUR LA STABILITE DE L'OUVRAGE

La stabilité de l'anneau dépend du rapport des charges verticales aux poussées ou réactions horizontales des terres.

Les réactions horizontales des terres peuvent provenir non seulement des poussées actives du sol mais de la déformation de l'anneau. En ce cas la formule de Winkler est généralement admise, donnant une relation linéaire entre la déformation élastique du sol et la réaction des terres. Ce principe est à la base des méthodes soviétiques de calculs présentées notamment par Davidov, Bougayeva, Bordov et Gorelik. Il permet de concevoir des revêtements de tunnel relativement plus légers en faisant coopérer à la stabilité de l'ensemble le terrain tout proche de la construction. Encore faut-il s'assurer que le terrain soit capable de recevoir les efforts sans se déformer rapidement de façon incompatible avec la fonction du tunnel ou ce sans se dérober dans le temps.

Remarquons enfin que cette conception de la stabilité du tunnel suppose parfait le contact entre le revêtement et le sol adjacent, contact qu'il est malaisé de réaliser dans un sable boulant.

La compressibilité du sol de Bruxelles est telle qu'elle exige des grandes déformations pour faire coopérer le sol à la résistance de l'anneau. Plutôt que de nous confier entièrement aux caractéristiques de ce sol, nous avons préféré substituer son action élastique aléatoire à l'action plus sûre et équivalente d'un tirant métallique situé au niveau du plancher de circulation des metros. Lorsque l'anneau constitué sort du bouclier et reçoit la charge des terres le tirant se met en traction. Celui-ci peut par ailleurs exercer une légère traction à la pose de façon à régler la tension finale dans les voussoirs.

Lorsque l'équilibre des terres et de l'anneau est établi, le plancher de circulation des convois peut être bétonné. Dans le cas du Parc de Bruxelles, il enrobe complètement la nappe de tirants.

En ce qui concerne la charge verticale des terres sur le revêtement du tunnel, on a admis une certaine diminution de la charge par rapport au poids total de la couverture. Cette diminution de charge est basée sur les formules de Terzaghi et Davidov d'une part, sur les expériences sur modèle réduit de l'Université de Lausanne d'autre part. Rappelons que ces expériences ont été confiées au laboratoire géotechnique de l'Université de Lausanne par les ingénieurs responsables de la construction du tunnel de Donnerbühl à Berne. Les formules théoriques et les expériences précitées s'accordent bien et permettent de tracer une courbe représentative de la diminution de charge verticale sur le tunnel en fonction de l'épaisseur de la couverture de terre.

DISPOSITIONS PRISES POUR LE MODE DE CONSTRUCTION

Le bouclier mis en oeuvre sous le Parc de Bruxelles étonne au premier abord par son aspect rudimentaire : l'abattage des terres se fait à la main ce qui explique l'avancement relativement lent du travail : un à deux mètres par jour. Vu la faible longueur du trajet à parcourir (360 m) on n'a pas voulu mettre en oeuvre l'outil hautement mécanisé que l'on utiliserait sur un parcours de plusieurs kilomètres. Par ailleurs un bouclier muni d'une fraise tournante comme celui employé dans les chantiers de Paris se serait sans doute mal accommodé des bancs gréseux que l'on a rencontrés dans le sable Bruxellois.

Le front de taille a été divisé en 16 compartiments dans lesquels un homme peut prendre place pour abattre le sable et le déverser dans une trémie commune située à l'arrière. Il peut avancer son plancher de travail au fur et à mesure de l'abattage et ce sur toute la longueur de l'avant bec du bouclier soit 1 m.

Par compartiment on a disposé 4 vérins destinés à maintenir le blindage du front d'attaque.

Derrière les compartiments de travail se trouve l'érecteur destiné à la pose des voussoirs préfabriqués. Il s'agit d'un bras qui peut être animé d'un mouvement de rotation autour de l'axe du bouclier et dont la tête peut être déplacée radialement de façon à présenter chaque voussoir dans sa position prévue.

L'avancement du bouclier se fait par l'action de 28 vérins de 200 t s'appuyant sur les anneaux de voussoirs déjà mis en place.

Le cylindre constituant le bouclier a une longueur totale de 4m65 soit 1 m d'avant bec 2m20 correspondant aux chambres d'abattage et 1m45 de jupe dans laquelle se fait la pose des voussoirs. Cette faible longueur totale lui permet de prendre une courbe suivant un rayon minimum de 160 m.

Lors de son avancement tout bouclier laisse derrière lui un vide entre le terrain et les voussoirs mis en place. Si le terrain est très meuble, ce vide sera bien souvent la cause des tassements en surface. Il provient de la différence entre le diamètre extérieur du bouclier et celui du revêtement de voussoirs préfabriqués. Il tient compte de l'épaisseur de la jupe du bouclier et du jeu nécessaire entre voussoirs et jupe pour éviter tout coïncement du bouclier dans les courbes.

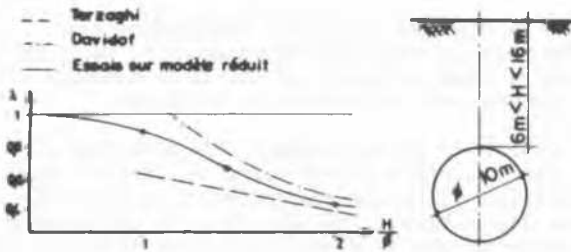


Fig. 6 Facteur de diminution de la charge verticale en fonction de l'épaisseur de la couverture de terre

La poussée horizontale des terres sur l'anneau a été calculée en considérant le terrain comme un corps élastique soumis à une action verticale (le poids des terres) et empêché de se dilater horizontalement. Dans ce calcul on suppose donc nulle la déformation de l'anneau ce qui est justifié vu la faible déformabilité d'un anneau muni de tirants d'une part et la grande compressibilité du sol d'autre part.

La valeur de l'effort dans le tirant se calcule en rendant compatibles la déformation du tirant et celle de l'anneau sous l'action des diverses forces extérieures agissant sur le tunnel. Les tirants du tunnel de Bruxelles sont constitués de barres en acier doux de 60 mm de diamètre filetées aux deux extrémités. L'attache du tirant aux voussoirs constitue une difficulté théorique vu la concentration des efforts à cet endroit; elle a fait l'objet d'une étude spéciale avec essais sur modèle en vraie grandeur. Les essais ont montré la bonne tenue du système d'attache adopté.

Les caractéristiques principales du tunnel de Bruxelles sont les suivantes :

Diamètre extérieur	9m90
Épaisseur de l'anneau	80cm
Couverture de terre	de 16 à 6 m
13 voussoirs préfabriqués	en béton armé
Poids d'un voussoir	3 t
Nombre de tirants	2 par m
Diamètre des tirants	60mm (51mm à fond de filet)

Effort total théorique par tirant : 23,5 t
 Effort à la pose des tirants : env. 8,5 t

La présence des tirants constitue un artifice utilisable chaque fois qu'il est prévu un plancher horizontal suffisamment haut dans le tunnel circulaire. Il permet de diminuer fortement les sollicitations dans l'anneau et donne au système davantage d'indépendance vis-à-vis des caractéristiques de compressibilité du sol.

TUNNEL PAR LA METHODE DU BOUCLIER

Dans le cas du bouclier du Parc de Bruxelles on a décidé d'injecter ce vide au fur et à mesure de l'avancement du bouclier. Pour ce faire on a prévu des conduits d'injection aboutissant à l'arrière de la jupe à l'extérieur des voussoirs. L'épaisseur du vide à combler s'en est trouvée accrue du diamètre des tuyaux d'injection, par contre on pouvait espérer par cet artifice exécuter une injection plus entière.

On a chassé de cette façon de la gravette et du kift derrière les voussoirs. En outre on a exécuté une deuxième injection plus à l'arrière du bouclier et directement à travers les voussoirs. Cette deuxième injection était constituée d'une laitance de ciment.

Tel que prévu le système n'a pas donné le résultat escompté. Après divers tâtonnements on a choisi d'injecter à travers les voussoirs un coulis sous forte pression. Ce coulis était composé principalement de ciment, de plâtre, de cendres volantes et de boue de bentonite.

CONCLUSION

Dans ce terrain de faible résistance qui constitue le sous-sol de Bruxelles, on a pu mener à bien la construction d'un tronçon de tunnel par la méthode du bouclier.

La stabilité du revêtement est garantie par la mise en place d'une nappe de tirants métalliques au niveau du plancher de circulation des métros. Cet artifice, d'une grande simplicité d'exécution, peut être appliqué dans tous les pertuis munis de planchers intermédiaires. Il réduit fortement les sollicitations du revêtement et a donné pleine satisfaction dans le cas du tunnel de Bruxelles.

Les observations des mouvements du terrain ont mis en évidence l'influence du creusement au bouclier dans ce sable sans cohésion. Ces observations ont suscité des améliorations dans la technique d'excavation et d'injection des vides, si bien que, lorsqu'en fin de parcours on est arrivé sous une artère importante de la ville les immeubles riverains, même faiblement fondés, n'ont pas souffert du passage du bouclier.