

RÉGIE AUTONOME DES TRANSPORTS PARISIENS

---

**LIGNE RÉGIONALE EST-OUEST**  
**CONSTRUCTION DE LA STATION ÉTOILE**





Supplément aux

# ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS

DIX-NEUVIÈME ANNÉE ■ OCTOBRE 1966 ■ N° 226

*Série : TRAVAUX PUBLICS (109)*

CENTRE D'ÉTUDES SUPÉRIEURES

SÉANCE DU 22 FÉVRIER 1966,

SOUS LA PRÉSIDENTENCE DE M. R. GUITONNEAU

Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées,

Directeur des Travaux Neufs à la R.A.T.P.

## LIGNE RÉGIONALE EST-OUEST CONSTRUCTION DE LA STATION ÉTOILE

par **L. LUPIAC,**

Ingénieur des Arts et Manufactures,  
Ingénieur en chef adjoint à la R.A.T.P.

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE  
CHAMBRE SYNDICALE NATIONALE DES CONSTRUCTEURS EN CIMENT ARMÉ  
ET BÉTON PRÉCONTRAIT  
INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS



### RÉSUMÉ

La station « Étoile » comporte un ouvrage voûté d'une seule portée : 21 m d'ouverture et 225 m de longueur avec des quais de 7 m de largeur. L'ouvrage est situé sous la place de l'Étoile dans des terrains marno-calcaires à une profondeur de 25 m environ, sa voûte étant calée directement sous le radier du souterrain de la ligne n° 2.

L'auteur décrit les dispositions spéciales prises lors de la construction pour limiter la décompression des terrains marno-calcaires traversés et éviter l'apparition de désordres dans les ouvrages supérieurs maintenus constamment en exploitation.

### ZUSAMMENFASSUNG

Die Station « Etoile » umfasst ein Bogenbauwerk mit einer Öffnung von 21 m und einer Länge von 225 m und 7 m breite Bahnsteige. Das Bauwerk befindet sich unter dem Platz « Etoile » in kalkhaltigen Mergelböden und in einer Tiefe von ungefähr 25 m; sein Bogenscheitel ist direkt unter der Sohlenplatte der Linie « 2 » gebaut.

Der Verfasser beschreibt die besonderen Massnahmen, die beim Bau berücksichtigt werden mussten, um die Druckentlastung der kalkhaltigen, durchbrochenen Mergelbodenschichten zu vermindern und um Beschädigungen und Störungen in den darüberliegenden Bauten zu verhindern, da sie während der Zeit der Bauarbeiten benützt werden sollen.

### SUMMARY

The Etoile station includes a vaulted single-span structure: opening 21 meters, a length of 225 meters, with quays 7 meters in width. The structure is located beneath the Place de l'Étoile in marl-limestone ground at a depth of approximately 25 meters, its vault being wedged directly below the floor of the no. 2 line subway.

The author describes the special measures taken during construction to limit the decompression of the marl-limestone ground passed through and to avoid the appearance of failures in the upper structures kept continually in operation.

### RESUMEN

La estación del ferrocarril metropolitano subterráneo de la « Estrella » consta de una estructura abovedada de un solo tiro de 21 m de luz y 225 m de longitud, con andenes de 7 m de anchura. La obra se encuentra situada bajo la propia plaza de la Estrella, en terrenos marnocalizos, a una profundidad de unos 25 metros, aproximadamente y su bóveda se encuentra directamente enclavada bajo la solera del subterráneo de la línea del metropolitano n° 2.

El autor procede a la descripción de las disposiciones especiales tomadas con motivo de la construcción, con objeto de limitar la descompresión de los terrenos marnocalizos atravesados y evitar la aparición de desórdenes en las estructuras superiores, que se han mantenido constantemente en funcionamiento.

*Les thèses et la méthode d'exposition adoptées par les conférenciers et les personnes qui prennent part aux discussions peuvent parfois heurter certains points de vue habituellement admis. Mais il doit être compris que ces thèses et discussions, à l'égard desquelles l'Institut Technique ne saurait prendre parti, ne visent en rien les personnes ni le principe des Institutions.*



## AVANT-PROPOS DU PRÉSIDENT

Avant de donner la parole à M. Lupiac, Ingénieur en chef à la Régie autonome des transports parisiens qui s'occupe d'un grand nombre de chantiers du Réseau Express Régional et qui va vous parler spécialement de la construction de la station « Étoile » de la ligne régionale Est-Ouest, je crois qu'il faut commencer par vous dire ce que sont les chantiers du Réseau Express Régional, où ils en sont, comment ils avancent et vous montrer les difficultés que nous pouvons avoir à rencontrer.

Je n'entrerai pas dans les considérations qui ont présidé à son début. Ce Réseau Express Régional comportera un certain nombre de lignes dont la première est en cours de réalisation : c'est la ligne Est-Ouest qui ira de Saint-Germain-en-Laye à Boissy-Saint-Léger, sur une longueur totale voisine de 45 km (v. fig. 1).

Dans un premier temps, nous réaliserons les deux tronçons extrêmes : « Auber-Saint-Germain » et « Nation-Boissy-Saint-Léger » ; nous pensons mettre en service d'abord la section « Nation-Boissy-Saint-Léger ».

Cette entreprise importante ne correspond pas cependant à la construction de 45 km de lignes nouvelles, puisqu'aux deux extrémités, de Nanterre à Saint-Germain et de Vincennes à Boissy-Saint-Léger, nous reprenons les infrastructures de la S.N.C.F. pour les moderniser. Sur ces parties de lignes existantes, il s'agira d'effectuer des travaux d'électrification, de signalisation, de modification des gares, relativement mineurs, encore que certains travaux comme la gare de Saint-Germain poseront des problèmes difficiles.

Par conséquent, les travaux d'infrastructure en cours vont de Nanterre à Auber et de Nation à Vincennes.

Je veux dire un mot de la branche Est « Nation - Vincennes ». Elle comprend 2,500 km environ de souterrains et une station sous la place de la Nation, station qui sera assez analogue à la station « Étoile » dont vous parlerez M. Lupiac. La station « Nation » est commencée. Nous allons prochainement lancer l'ensemble des souterrains et toute l'opération sera engagée dans un délai de trois à six mois.

Du point de vue infrastructure, le plus gros travail concerne la section « Nanterre-Auber ». Cette partie de ligne comporte en fait deux tronçons d'inégales longueurs et de caractéristiques nettement différentes. La partie « Nanterre-Défense », d'une part, sera construite dans une zone en cours de remodelage, si bien qu'il sera possible, presque partout sur cette section, de construire le souterrain à ciel ouvert. Le tronçon qui va de la Défense à l'Opéra, d'autre part, où tout est à faire complètement en souterrain et c'est la partie la plus difficile, le travail étant d'autant plus délicat que l'on s'approche du centre de la ville où les artères deviennent plus étroites et le sol plus encombré.

A l'heure actuelle, la gare de « La Défense » est en construction, la traversée de la Seine est en cours. Nous sommes arrêtés à cause de la crue de la Seine mais nous allons reprendre les travaux en mars. Le tronçon « Étoile-Seine » est en cours à partir de l'Étoile, sous forme d'un souterrain circulaire à deux voies de 3 km de longueur réalisé à l'aide de procédés modernes et avec l'emploi d'une machine à forer ; on a réalisé jusqu'à présent un peu moins de 1 km de tunnel entre l'Étoile et la Porte Maillot.

La station « Étoile » et le souterrain « Étoile-Auber », sur 700 m de longueur sous l'avenue Friedland, sont à peu près achevés. 500 m seront réalisés sous le boulevard Haussmann, en liaison avec la construction d'un parking dont on doit inaugurer le premier étage bientôt. Le dernier kilomètre entre le carrefour Saint-Augustin et Auber est entrepris, les travaux préparatoires à la construction de la station « Auber » sont en cours.

Sur la figure 2, j'ai fait représenter l'ensemble des stations souterraines importantes du Réseau Express Régional ; on trouve, en partant de l'Ouest, la station M qui se trouvera près de la préfecture des Hauts-de-Seine. Ce sera une station à quatre voies décalées parce qu'elle doit servir d'embranchement pour la création d'une seconde ligne qui ira en direction de Montesson. Ensuite, la station de « La Défense », qui est considérable puisqu'elle comportera quatre voies côte à côte pour permettre le retournement des trains. Elle comprend un certain nombre de niveaux construits dans les bras de l'autoroute Paris-Saint-Germain. Son exécution s'opère à ciel ouvert dans une grande fouille. Sa structure est en béton armé. Elle est réalisée pour nous par l'Établissement public pour l'aménagement de la Défense (E.P.A.D.) C'est un très bel ouvrage qui ne présente pas de difficultés exceptionnelles.

Nous en arrivons à la station « Étoile ». Nous devons insister sur sa situation relative par rapport aux stations supérieures existantes du réseau métropolitain et en particulier par rapport à cette ligne n° 2 qui traverse en biais la station et qui a posé des problèmes dont M. Lupiac vous parlera.

Sur la branche Est, la station « Nation » est assez comparable, dans le principe de sa construction, à la station « Étoile ». L'ouvrage est toutefois un peu plus important : 25 m d'ouverture au lieu de 21 m.

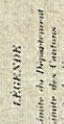
J'en arrive au morceau final, la station « Auber », que j'ai représentée à la même échelle que les autres, ce qui vous donne l'importance de cette réalisation et de ses difficultés. La station est à construire sous la rue Auber, sous la ligne n° 3 en exploitation, partiellement sous les immeubles existants et entièrement dans la nappe phréatique. C'est un travail extrêmement intéressant mais qui nous réserve certainement beaucoup de soucis.

Après ce préambule peut-être un peu long, je passe la parole à M. Lupiac qui va vous parler de la construction de la station « Étoile ».



## LIGNE REGIONALE EST-OUEST

### Tracé schématique



1112







## I — ÉLABORATION DU PROJET

## 1. SITUATION DE LA STATION « ÉTOILE »

## a) Rôle et dimensions de la station « Étoile » du Réseau Express Régional (R.E.R.) :

La station « Étoile » est située sur la branche Ouest de la ligne régionale Est-Ouest reliant Saint-Germain à Auber. Elle constituera un des nœuds d'échange les plus importants du Réseau Express Régional (R.E.R.) en raison du quartier qu'elle desservira et des correspondances qu'elle permettra avec les stations existantes du réseau urbain (lignes n°s 1, 2 et 6).

Eu égard au trafic escompté (50 000 voyageurs par heure et par direction), les dimensions de la station « Étoile » sont sensiblement plus importantes que celles des stations courantes du réseau ferré métropolitain.

La longueur intérieure totale de l'ouvrage est de 225 m, sa largeur est de 20,87 m, soit deux quais de 7 m et un entre-quai de 6,87 m pour le passage de deux voies au gabarit « chemin de fer ».

## b) Implantation en plan et en profil de la station « Étoile » (fig. 3) :

L'ouvrage est implanté sous la place de l'Étoile, entre les parties de tunnel courant à deux voies s'étendant

à l'Ouest sous l'avenue de la Grande-Armée et à l'Est sous l'avenue de Friedland. Il est donc situé légèrement au Nord des assises de l'Arc de Triomphe et à la limite des fondations des immeubles des Maréchaux, situés à l'angle des avenues de la Grande-Armée — Carnot d'une part, et des avenues Hoche et de Friedland d'autre part.

Le sous-sol de la place de l'Étoile est très encombré dans les zones intéressées (fig. 4). Il est occupé jusqu'à une profondeur de 17 m environ par les tunnels et les stations des lignes n°s 1 et 6 et par le tunnel de la ligne n° 2, ouvrage le plus profond orienté en direction de l'avenue de Wagram. A plus grande profondeur est établi le collecteur Marceau orienté dans le sens Nord-Sud entre l'avenue de Wagram et l'avenue Marceau.

La station « Étoile » du R.E.R. ne pouvait donc trouver place que sous le radier de la ligne n° 2 et entre ce radier et le collecteur Marceau dont la couverture est située à 28 m environ sous le niveau du sol. Pour éviter d'approfondir l'ouvrage et réduire au strict minimum la hauteur des escaliers mécaniques devant desservir les quais de la station, sa voûte a été calée directement sous le radier de la ligne n° 2.

## c) Données géologiques (fig. 5) :

L'ouvrage passe entièrement dans des formations de marnes et caillasses d'une puissance totale de 16 m,

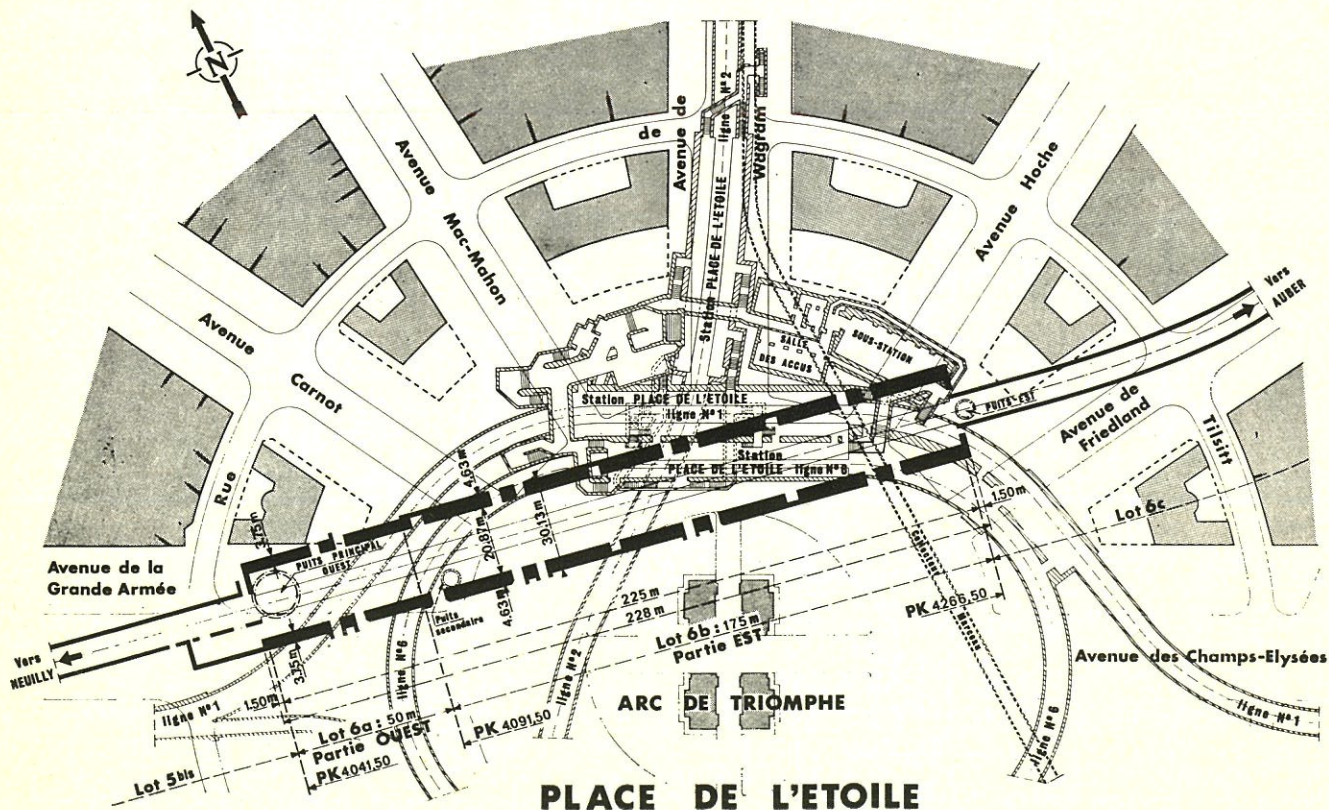


FIG. — 3. Implantation.



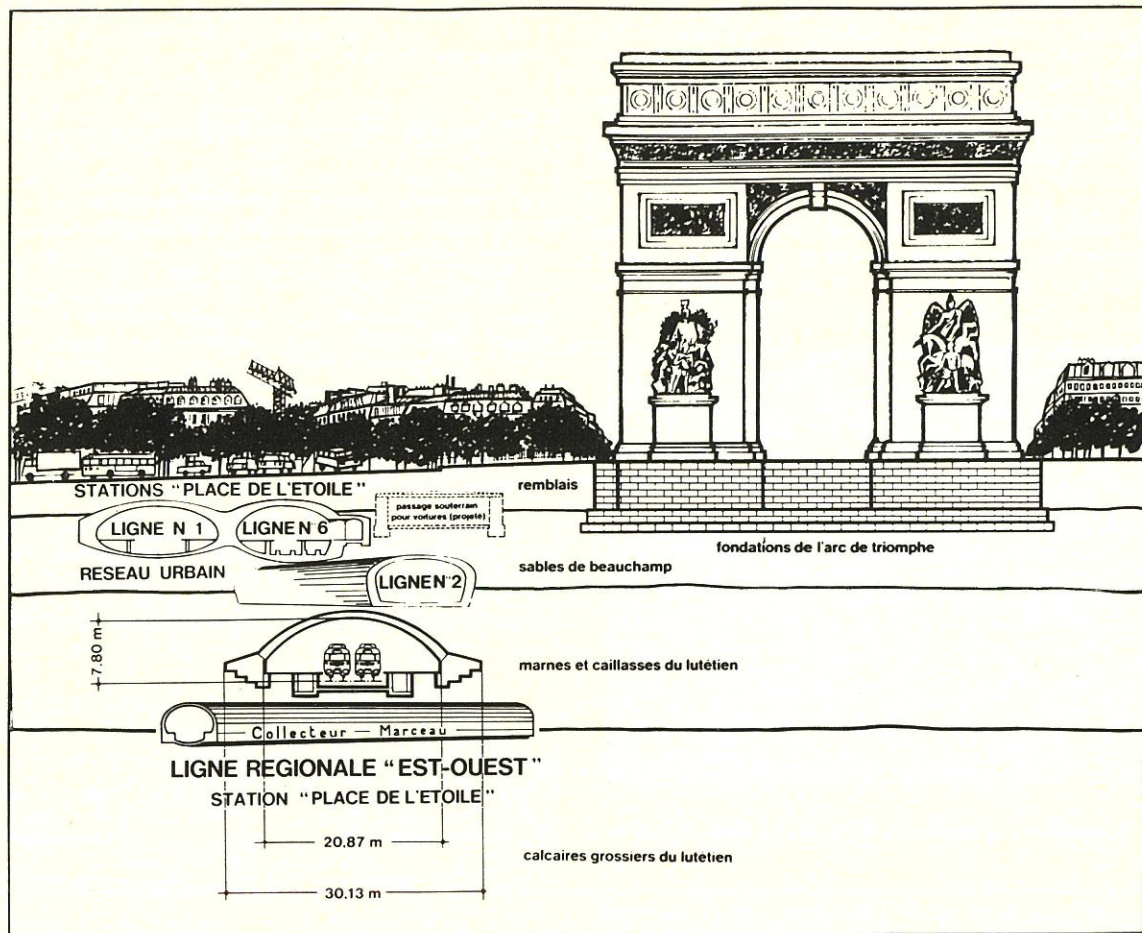


FIG. 4. — Coupe sur la station « Étoile ».

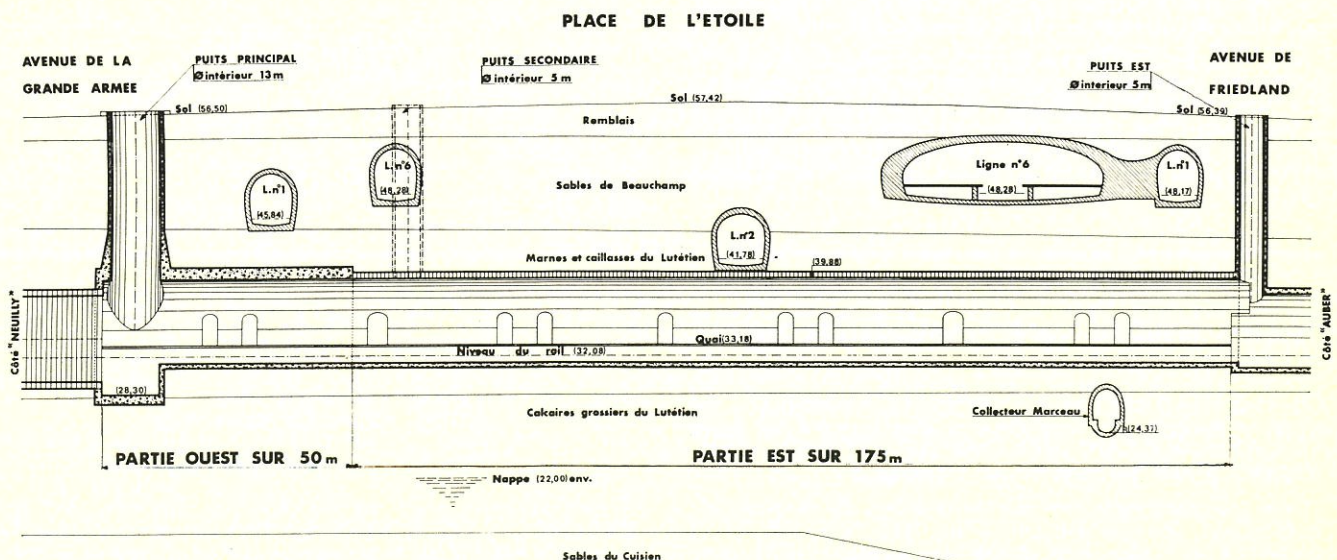


FIG. 5. — Profil en long.



assurant au-dessus de sa voûte une couverture de 3 à 4 m. Ces marnes et caillasses sont surmontées d'une couche d'environ 9 m de sables de Beauchamp, étage dans lequel ont été établis les ouvrages des lignes n°s 1 et 6.

Sous les marnes et caillasses et environ 3 m sous le radier de l'ouvrage on rencontre les calcaires grossiers du lutétien. Le niveau de la nappe phréatique est situé 8 m sous le radier de la station.

Le terrain à excaver se compose donc d'une alternance de marnes blanchâtres calcaires et magnésiennes, de marnes argileuses, de bancs calcaires et de calcaires siliceux (fig. 6).

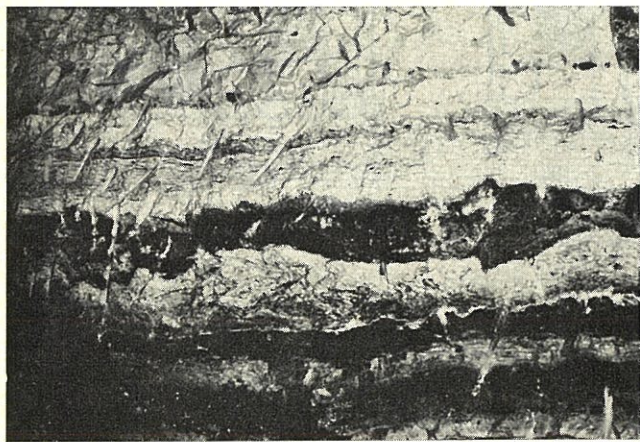


FIG. 6. — Formations de marnes et caillasses au front de taille.

Dans la partie haute où est établie la voûte de l'ouvrage, le faciès marneux domine très nettement. A divers niveaux apparaissent de petits lits d'épaisseur variable composés d'un amas de cristaux de calcite et de quartz. Ces bancs bruns rouille sont tantôt très durs, tantôt inconsistants et se résolvent facilement en poussière cristalline laissant apparaître des poches de dissolution dans la paroi.

A la base de la série et à la hauteur des fondations de la station, les caillasses forment une séquence nettement plus siliceuse. Les bancs sont, en général, constitués de plaques disjointes verticalement et fissurées horizontalement. Les caillasses représentent dans cet ensemble la partie la plus résistante de toute la série du lutétien supérieur.

## 2. CONCEPTION DE L'OUVRAGE

a) Solution initiale de deux stations accolées (fig. 7 - vue haute) :

Il avait tout d'abord été projeté de construire deux ouvrages accolés abritant chacun une seule voie et un quai latéral, les deux voûtes de ces ouvrages contigus reposant sur un piédroit central commun.

Une telle solution rendait plus aisée l'exécution de l'excavation sous le complexe d'ouvrages existants et permettait de moins approfondir les quais de la station. En revanche, elle sacrifiait complètement l'aspect architectural. La station se serait présentée, en effet,

comme un ouvrage formé de deux tunnels accolés relativement étroits (ouverture 10,80 m) par rapport à leur longueur (225 m).

b) Projet retenu comportant un ouvrage unique :

Il fallait pour une station de l'importance de la station « Étoile » concevoir un ouvrage voûté d'une seule portée et d'une hauteur suffisante pour que, malgré sa longueur considérable, les proportions intérieures demeurent acceptables. Donc, en dépit des difficultés d'exécution sensiblement accrues et de l'obligation d'abaisser les quais qui s'ensuivait, le projet finalement retenu par la Régie autonome des transports parisiens comporta un ouvrage voûté unique de grande portée supporté par des culées massives.

c) Profil transversal intérieur de l'ouvrage (fig. 7 - vue basse) :

L'ouverture de la voûte est de 20,87 m, les piédroits ont une hauteur verticale de 1,65 m au-dessus des quais établis à la cote 33,14. La voûte est intradosée suivant un cercle de rayon égal à 13,30 m. Sa flèche est de 5,05 m, ce qui correspond à un surbaissément d'un quart environ.

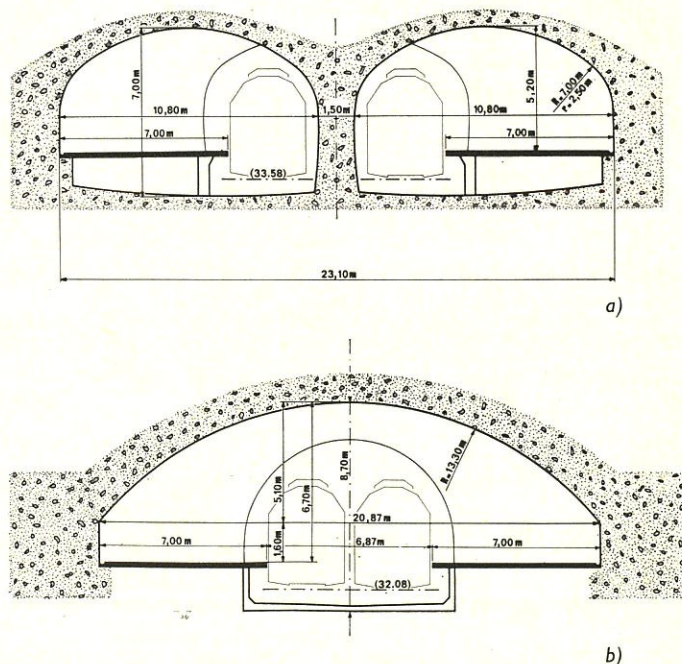


FIG. 7. — Conception de l'ouvrage — Profils en travers.

- (a) Projet initial : 2 stations accolées
- (b) Projet retenu : Une station unique.

Le radier est plat et constitué par une simple forme légèrement armée. Il est situé à 1,75 m sous le niveau des quais à la cote 31,39, le niveau du rail étant à la cote 32,08. Les deux dalles des quais de 7 m de largeur sont, côté culées, appuyées directement sur le terrain.



### 3. FRACTIONNEMENT DE L'OUVRAGE EN DEUX LOTS D'INÉGALES LONGUEURS

#### a) Nécessité d'exécuter la station en deux tronçons successifs.

Bien que l'ouvrage présente un profil intérieur uniforme sur la totalité de sa longueur, la Régie s'est vue dans l'obligation d'en fractionner l'exécution en deux tronçons d'inégales longueurs, la partie Ouest d'une part, sur 50 m (lot désigné 6 a), la partie Est d'autre part, sur 175 m (lot désigné 6 b) (fig. 3).

En effet, les exigences du programme général des travaux, place de l'Étoile, ont nécessité de disjoindre de l'ensemble de la station la réalisation de l'extrémité Ouest sur 50 m, partie située sous l'avenue de la Grande-Armée et dans une zone relativement moins dense en souterrains existants. Ce tronçon devait, par ailleurs, être exécuté en premier lieu et dans des délais très réduits, afin de servir d'ouvrage de dégagement et permettre le montage et le lancement de la machine à forer « Robbins », qui de l'Étoile jusqu'à la Seine à Neuilly devait effectuer le percement de 2,7 km environ de souterrain circulaire courant à deux voies.

Cette partie d'ouvrage était également intéressée à son extrémité Ouest par le puits principal d'accès du chantier d'un diamètre intérieur de 13 m prévu, en particulier, pour descendre les éléments de la machine à forer. L'intersection de cet ouvrage cylindrique vertical avec la voûte de la station à axe horizontal nécessitait l'exécution en souterrain d'un ouvrage spécial en adoptant des dispositions constructives toutes différentes de celles de la partie courante de la station.

#### b) Partie Ouest sur 50 m :

La partie Ouest de la station « Étoile » sur 50 m de longueur a donc été confiée en premier lieu au groupement des entreprises Billiard, Société Générale d'Entreprises, Compagnie Industrielle de Travaux, groupement qui avait par ailleurs la charge d'exécuter le tunnel courant entre Étoile et Neuilly à l'aide de la machine à forer Robbins.

Pour son exécution, il a été fait appel aux méthodes traditionnelles en essayant de les améliorer afin de réduire les risques de tassement. Les procédés classiques permettaient un démarrage rapide des travaux et donnaient plus de facilité pour construire, en souterrain, l'ouvrage d'intersection entre le puits et la voûte de la station.

#### c) Partie Est sur 175 m :

Il aurait été possible de généraliser l'emploi de ces méthodes pour exécuter la partie Est.

En raison, toutefois, de la longueur du lot correspondant (175 m), de l'absence de points singuliers, de la présence de nombreux ouvrages supérieurs chargeant directement la voûte de la station, il paraissait intéressant d'expérimenter d'autres procédés dans le but d'accroître, d'une part, le rendement et de limiter, d'autre part, la décompression du terrain supérieur.

C'est dans cette optique que la partie Est de la station a été confiée au groupement Moinon-Dumesny et Chapelle.

Les deux formules retenues seront examinées successivement, le fractionnement en deux lots de l'ouvrage de la station ayant permis l'application de deux procédés différents dont on exposera, ci-après, les mérites respectifs.

## II — PARTIE OUEST DE LA STATION « ÉTOILE » SUR 50 M

### 1. DESCRIPTION DES OUVRAGES

#### a) Situation :

La partie Ouest de la station « Étoile », d'une longueur intérieure de 50 m s'étend sous le terre-plein Nord de l'avenue de la Grande-Armée, entre la rue de Tilsitt et l'avenue Carnot (fig. 3).

Elle passe entièrement sous la ligne n° 1, qui traverse en biais, pour regagner l'axe de l'avenue de la Grande-Armée et partiellement sous la ligne n° 6, avec une charge de terre intermédiaire d'environ 4 m d'épaisseur.

#### b) Partie courante :

La partie courante de cet ouvrage se limite, côté Étoile, à une longueur d'environ 30 m. Elle comprend des culées massives en béton tassé mécaniquement, de forme rectangulaire, 4,25 m de large et 4,50 m de hauteur,

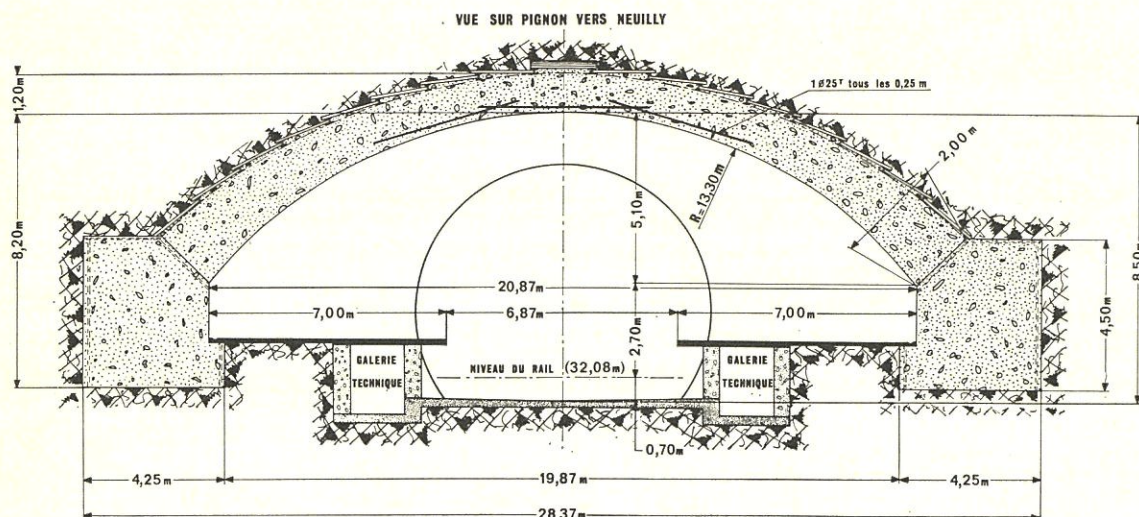
supportant une voûte de 20,87 m d'ouverture également exécutée en béton tassé mécaniquement et dont l'épaisseur est de 1,20 m en clef et de 2 m à l'encastrement dans les culées (fig. 8).

#### c) Partie intersectée par le puits d'accès Ouest :

L'extrémité Ouest de l'ouvrage, sur une longueur de 20 m environ, comprend une voûte renforcée, en béton armé, largement échancrée par la pénétration du puits de 13 m de diamètre, destiné à assurer la desserte du chantier de construction du tunnel courant entre Étoile et Neuilly.

Ce puits cylindrique est désaxé de 2,15 m par rapport à l'axe de la station et a des parois d'une épaisseur de 0,50 m en béton tassé mécaniquement. Il est supporté latéralement par deux anneaux de voûte d'épaisseur renforcée à 1,50 m. Son embase est très solidement frettée pour reprendre la poussée des retombées de la voûte.





## 2. CALCULS DES OUVRAGES

### a) Analyse des efforts et contraintes globales calculées :

La voûte courante, dont la fibre moyenne a été assimilée à un cercle de 15 m de rayon, a été calculée comme une série d'arcs encastrés dans les culées. Il a été admis que la voûte recevait verticalement la totalité de la charge de la colonne de terre qui la surmonte.

Il a été pris en compte les 45/100 de la composante horizontale de la pression des terres qui s'exerçait normalement sur l'extrados.

Pour tenir compte des effets des ouvrages souterrains situés au-dessus de la voûte (souterrain des lignes n°s 1 et 6) et de ceux à créer ultérieurement (passage souterrain routier sous la place de l'Étoile), on a considéré le cas d'un déchargement de la moitié de la voûte. Il a été pris égal à 10 t/m<sup>2</sup>.

Compte tenu des résultats des essais de sol, on a admis un écartement des culées faible (4,5 mm), dont l'effet a été conjugué avec celui du retrait du béton (5,5 mm).

Toutefois, en raison de la distribution des contraintes de butée le long des parements de la culée et de la rotation possible des culées, les efforts, dans les sections de la zone centrale de la voûte, ont été calculés dans l'hypothèse la plus défavorable d'un arc à deux articulations. Dans ces conditions, un léger ferrailage de l'intrados s'est révélé nécessaire (un acier Tor Ø 25 mm tous les 25 cm à la clef) et les contraintes calculées ont été les suivantes :

— à l'encastrement :

$$\begin{aligned}\sigma_{b1} &= 47 \text{ bars} \\ \sigma_{b2} &= - 7 \text{ bars}\end{aligned}$$

— en clef :

$$\begin{aligned}\sigma_{b1} &= 95 \text{ bars} \\ \sigma_a &= 1\,250 \text{ bars.}\end{aligned}$$

### b) Résultats comparatifs des mesures effectuées après construction de l'ouvrage :

Lors de la construction de l'ouvrage, une série de témoins sonores a été mise en place dans l'anneau de la

FIG. 8. — Partie Ouest de la station (50 m) (Voûte exécutée en béton tassé mécaniquement) — Coupe transversale de l'ouvrage terminé.

voûte le plus central de la partie courante. Ces témoins ont révélé que la voûte travaillait sensiblement dans les conditions de l'épure de Mery avec 44 bars et 2 bars en clef et que les effets des déplacements des culées étaient assez faibles pour ne pas avoir d'incidence sur les contraintes dans l'ouvrage.

Les essais ont également montré que la poussée en clef était de l'ordre de 250 t au lieu des 310 t théoriques du calcul, ce qui correspond à une charge de terre effective, sensiblement égale aux trois quarts de la charge prise en compte en tous points.

## 3. EXÉCUTION DES TRAVAUX

### a) Partie courante :

Pendant qu'il était procédé au fonçage et au bétonnage du puits principal de 13 m de diamètre à l'extrémité Ouest, on exécutait simultanément un puits annexe de 5 m de diamètre intérieur, en dehors des 50 m de l'ouvrage et à la pointe du terre-plein Carnot-Grande-Armée. A partir de ce puits, rapidement descendu, ont été entreprises les fouilles des culées de la station (fig. 9).

Le terrassement a été exécuté, à l'avancement, suivant la pleine section des culées avec pose d'étais en profilés métalliques et, en ciel, d'un blindage ajouré en madriers.

Les culées ont été coulées en pleine fouille en abandonnant les étais métalliques dans la masse du béton.

La voûte a été terrassée, à partir d'une galerie de faite 2 m × 3 m de section moyenne, par abatages successifs des différents anneaux et après avoir exécuté deux galeries auxiliaires basses permettant la reprise des terres et leur évacuation vers le puits annexe, le puits principal servant à l'amenée du matériel et du béton (fig. 10).

Aux cadres en bois de la galerie de tête étaient substitués des profilés métalliques constitués par des H N de 160, supportés par des montants également métalliques.



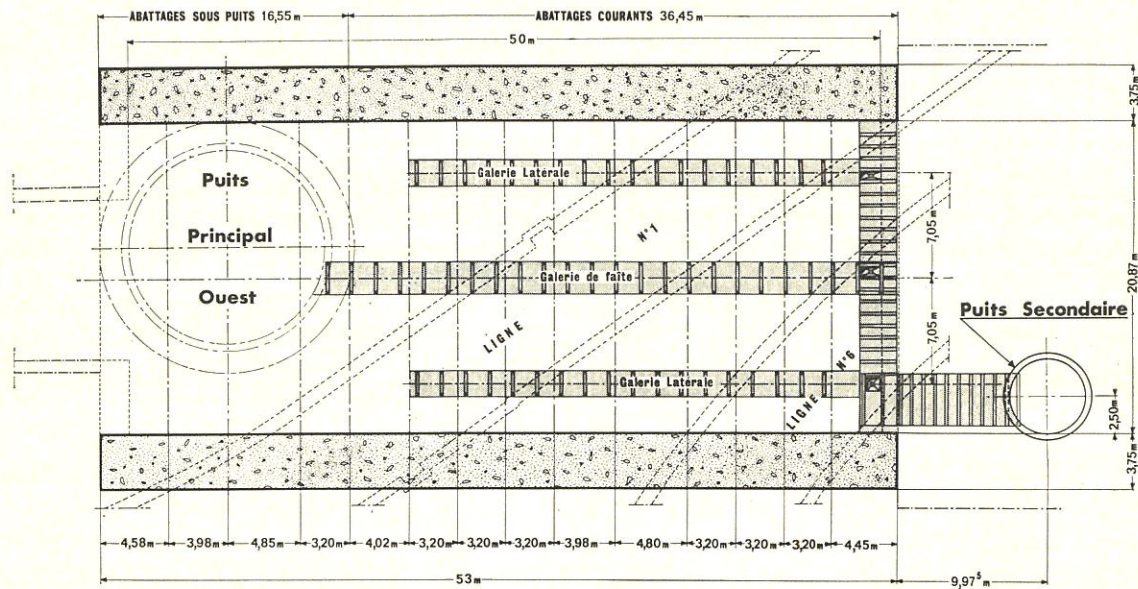


FIG 9. — Partie Ouest de la station (50 m). Plan des galeries préparatoires à l'exécution des abattages.

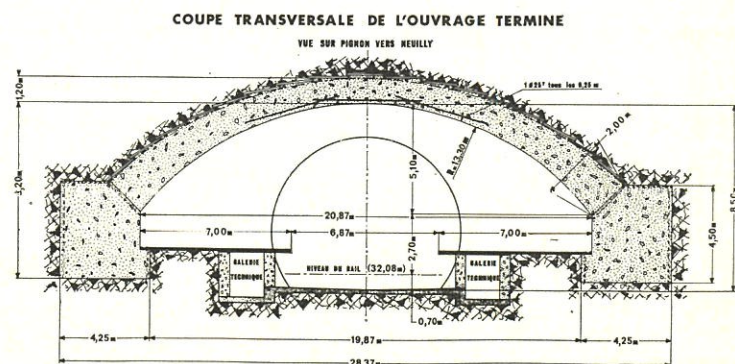
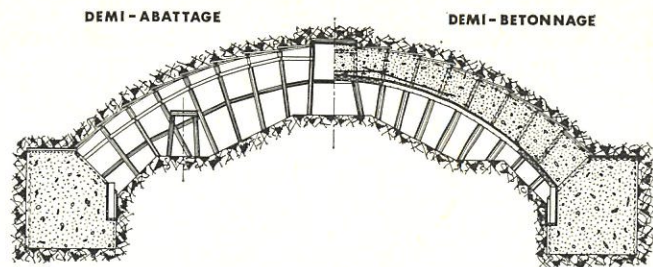
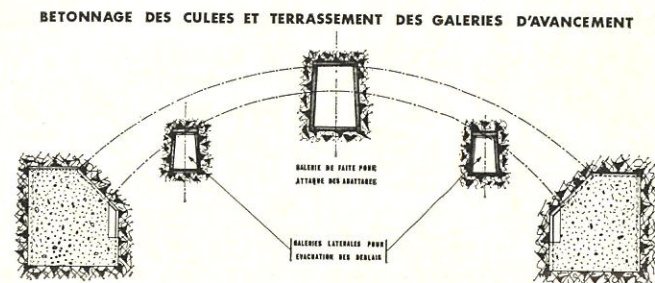


FIG. 10. — Partie Ouest de la station (50 m) (Voûte exécutée en béton tassé mécaniquement). — Méthode d'exécution.



Les anneaux de voûte, d'une largeur variable entre 3,20 m et 4,80 m, ont été coulés alternativement à l'Est et à l'Ouest en se rapprochant du centre, les charpentes métalliques de soutènement étant également abandonnées dans la masse du béton.

Le béton mis en place à l'air comprimé était soigneuse-

ment vibré et le clavage était assuré par la pression d'air. La composition du béton était la suivante :

sable 0/6 : 760 kg; gravillon 5/25 : 1 240 kg; eau : 140 l; ciment CLK 325 Poliet et Chausson : 350 kg, avec addition de plastocrète.

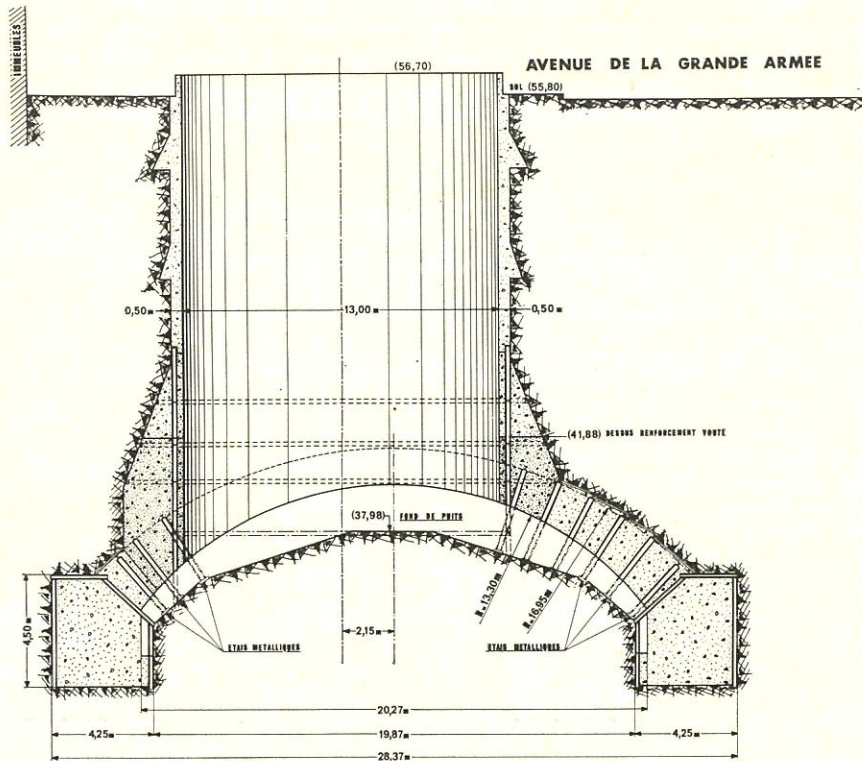


FIG. 11. — Partie Ouest de la station (50 m). Puits principal et ouvrage d'intersection.

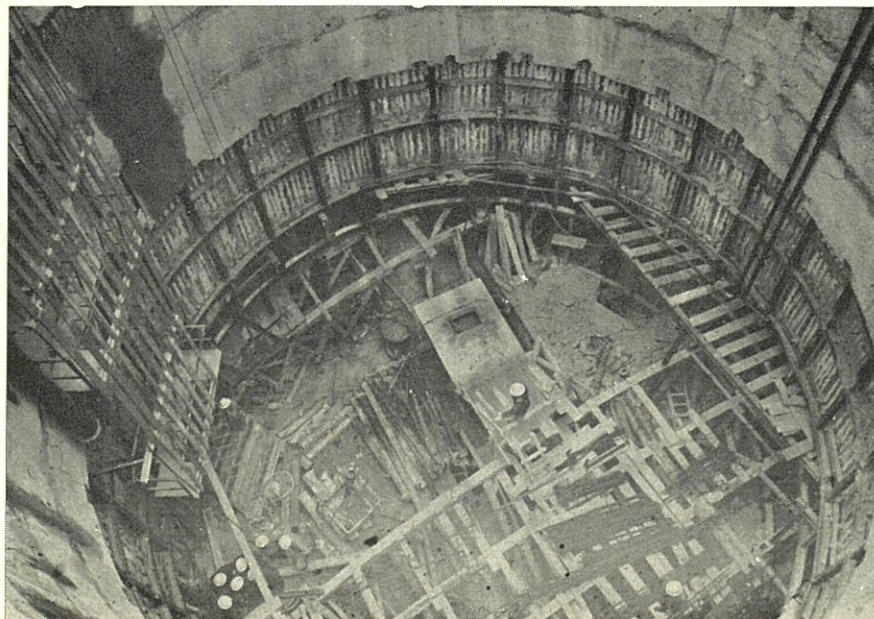


FIG. 12. — Exécution de la partie basse du puits principal.



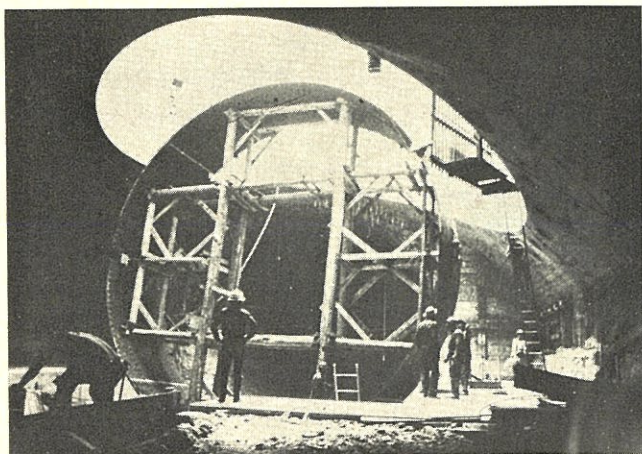


FIG. 13. — Montage de la première virole de la machine à forer dans la partie Ouest de la station « Étoile ».

#### b) Ouvrage d'intersection du puits et de la voûte :

En même temps qu'était exécutée la voûte de la partie courante de la station, on procédait à la construction de l'ouvrage d'intersection du puits de 13 m de diamètre et de la partie de voûte correspondante (fig. 11).

L'exécution en souterrain de l'embase fortement armée du puits a demandé un soin tout particulier et une organisation de chantier très étudiée, en raison de la nécessité d'opérer toujours par petites parties, tout en maintenant la continuité des armatures.

Grâce à la généralisation de l'abandon, dans le béton, des éléments métalliques assurant le soutènement, il a été possible d'exécuter l'ouvrage d'intersection sans créer de désordre à l'immeuble voisin situé entre la rue de Tilsitt et les avenues de la Grande-Armée et Carnot.

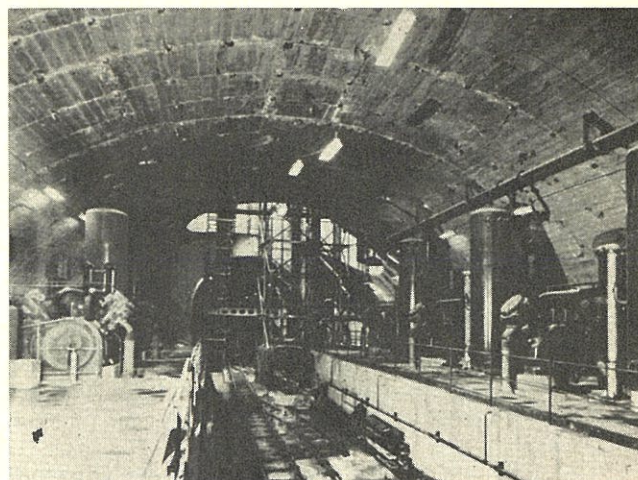


FIG. 14. — Centrale de compression d'air aménagée dans la partie Ouest de la station « Étoile ».

La maçonnerie de l'ouvrage a été coulée en même temps que les retombées latérales de la voûte et en remontant pour être finalement clavée au chemisage courant du puits entrepris depuis le sol (fig. 12 et 13).

#### 4. AMÉNAGEMENT PROVISOIRE DE LA PARTIE OUEST DE LA STATION

La partie de la station ainsi construite et située hors de l'emprise du puits principal desservant le chantier, a été aménagée en usine souterraine de compression d'air après départ de la machine à forer. Un décaissement central a été réservé pour permettre l'installation des voies de garage qui servent à la manœuvre des trains d'acheminement des voussoirs composant les anneaux du revêtement du tunnel courant Étoile-Neuilly (fig. 14).

### III — PARTIE EST DE LA STATION « ÉTOILE » SUR 175 M

#### 1. PRINCIPE DU PROCÉDÉ D'EXÉCUTION

##### a) Consultation des entreprises :

La partie Est de la station « Étoile », sur 175 m de longueur, était la plus difficile à exécuter, en raison de la présence des nombreux ouvrages supérieurs et sa construction exigeait de prendre des dispositions toutes spéciales (fig. 3).

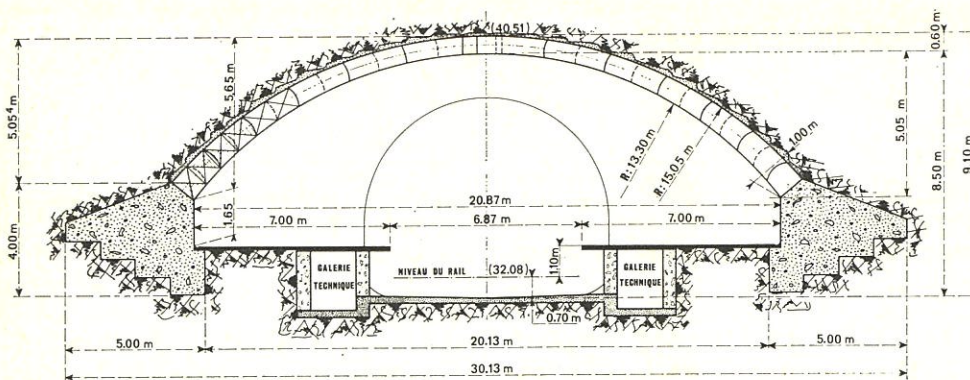
La Régie a procédé, le 16 mai 1963, à un appel d'offres, en attirant l'attention des concurrents sur les risques de décompression du terrain dont les conséquences pouvaient être particulièrement graves dans le cas considéré. En plus d'un projet classique qui constituait la solution de base, la Régie suscitait dans cette consultation

la présentation de tout procédé variante permettant de limiter au strict minimum la décompression du terrain.

A la suite de cette consultation, la Régie n'hésitait pas à retenir une solution variante novatrice comportant l'application d'un procédé de mise en compression du revêtement contre les terrains, le revêtement étant constitué par des anneaux successifs composés de voussoirs préfabriqués en béton armé.

Cette solution particulièrement bien adaptée aux données du projet n'avait jamais, jusqu'à présent, été mise en application pour des ouvrages souterrains de si grande portée. Elle était conçue par l'entreprise Dumesny et Chapelle sur les conseils de M. Jacobson et était présentée par le groupement des entreprises Moinon-Dumesny et Chapelle.





APPAREILLAGE DES VOUSSOIRS

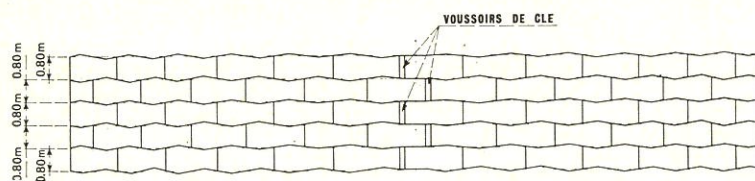


FIG. 15. — Partie Est de la station (175 m).

Coupe transversale de la station.

Plan développé de la voûte.

## b) Principes du procédé de construction de l'ouvrage :

La construction à l'avancement des culées de la voûte devait être entreprise en premier. Le terrassement des culées était exécuté à l'aide d'un abattage latéral effectué à partir d'une galerie disposée en bordure du piedroit. La voûte était formée d'une succession d'anneaux en béton armé de 0,80 m de largeur, le terrassement correspondant étant effectué en pleine section par tranches successives de 0,80 m (fig. 15).

La tenue des couches marno-calcaires à traverser était suffisante pour pouvoir laisser sans soutènement le terrain entre le dernier anneau posé et le front de taille (1,50 m maximum).

Il fallait opérer, ensuite, sans retard, la mise en place et le blocage au terrain de l'anneau suivant.

Chaque anneau de voûte de 0,80 m de largeur comportait treize voussoirs en béton armé, dont un voussoir de clef dans lequel étaient incorporés deux vérins plats Freyssinet. La mise en compression de ces vérins assurait le blocage de l'arc contre le terrain en compensant le raccourcissement élastique de l'arc et éventuellement le déplacement des culées.

Chaque anneau avait une épaisseur de 1,10 m aux naissances et de 0,60 m en clef.

Les extrémités des voussoirs en contact dans chaque arc étaient cylindriques, de manière à réaliser une articulation lors de leur mise en contact. Ces articulations étaient enduites de résine « Epoxy » pour favoriser, au montage, la lubrification des articulations et verrouiller ensuite les différents voussoirs après complète polymérisation.

De plus, pour assurer la solidarité des différents arcs entre eux, chaque voussoir comportait, sur les faces en contact avec les anneaux latéraux, des saillies et des creux en pointes de diamant permettant une légère interpénétration des arcs successifs, le vide résiduel étant bloqué au coulis de ciment après réglage définitif.

Les joints de voussoirs entre deux arcs successifs étaient croisés grâce à la mise en place alternativement sur les culées Nord et Sud d'un demi-voussoir.

Les vérins étaient mis en compression grâce à l'injection d'un mortier semi-liquide de sable très fin. La force totale exercée à la clef de chaque anneau était de 360 t.

## c) Avantages de la méthode d'exécution retenue :

Deux séries d'arguments ont prévalu lors du choix de ce procédé d'exécution : d'une part, la rapidité d'exécution de la méthode et le bon rendement d'un chantier organisé n'exigeant pas l'emploi d'une main-d'œuvre spécialisée; d'autre part, la sécurité de la mise en œuvre, du fait de la réduction des risques de tassement en surface qu'elle permet d'escompter.

Ces deux aspects, souvent inconciliables dans la plupart des travaux, sont ici complémentaires.

Les terrains traversés, armés par les couches de caillasses, autorisent, en effet, l'exécution d'une fouille sans blindage immédiat, à condition d'en limiter la profondeur.

L'exécution d'un terrassement à pleine calotte sur une surface de 85 m<sup>2</sup> et une profondeur de 0,80 m, sans qu'il soit nécessaire de procéder à l'étalement provisoire classique, en bois ou en métal, procure un rendement important.

L'obligation de disposer rapidement d'éléments de revêtement avec la résistance définitive impose l'emploi de voussoirs préfabriqués. La préfabrication de ces éléments, coulés en atelier, dans des moules métalliques, permet d'obtenir un béton d'excellente qualité susceptible de subir des contraintes élevées. Un avantage secondaire de la préfabrication, d'une valeur non négligeable dans le cas présent, résulte de la réduction des occupations de la voie publique autour du puits d'accès place de l'Étoile.



L'articulation des voussoirs constituant chaque anneau de voûte permet de centrer la ligne des pressions et de faire travailler l'arc rationnellement. Il s'ensuit une réduction notable de l'épaisseur du revêtement par rapport aux procédés classiques de construction en souterrain.

A ces avantages, qui se rapportent plus spécialement à la conduite du chantier et à l'économie de la conception du projet, s'ajoutent ceux relatifs à l'amélioration de la sécurité.

L'application directe du revêtement au terrain, sans abandon d'étais ou de planches de soutènement, par la mise en compression des vérins de clef, évite toute modification de l'état des contraintes des terrains et par là même les risques de tassement des ouvrages supérieurs.

Simultanément, grâce à la compensation de la majeure partie des variations linéaires et des déplacements des culées, on confère à l'ouvrage les meilleures conditions de tenue dans le temps.

Enfin, le durcissement de la résine appliquée sur les articulations des voussoirs, le remplissage des joints entre les arcs, l'injection finale complémentaire obturant les vides résiduels entre la voûte et le terrain sont autant de précautions permettant de donner à la voûte les caractéristiques d'une coque monolithique.

## 2. CALCUL DES OUVRAGES

### a) Les cas de charge sur la voûte - Leur superposition - Valeurs des contraintes :

#### Charges radiales

Comme le terrain au-dessus de la voûte est traversé par de nombreux ouvrages, il a paru prudent de ne pas prendre en compte sa cohésion et son frottement interne autrement dit son aptitude à former une voûte de décharge. Aussi n'a-t-on pas retenu la pression en clef de 22 t/m<sup>2</sup> donnée par la formule de MM. Caquot et Kerisel :

$$n_r = \frac{\gamma h}{j-2} \left[ \frac{r_o}{h} - \left( \frac{r_o}{h} \right)^{j-1} \right] \quad \text{avec } \varphi = 20^\circ,$$

cette formule suppose, en effet, que les isostatiques des contraintes principales sont des cercles concentriques à l'extrados et des rayons. Il a été simplement admis que la pression au contact de la voûte et du terrain serait uniformément radiale et égale à 32 t/m<sup>2</sup>, correspondant au poids propre du terrain au niveau de la clef de voûte, soit 0,85 de la charge verticale moyenne intéressant l'ensemble de la voûte. Il en résulte qu'aucun moment n'existe dans l'arc sous cette charge. L'effort de compression uniforme, tout le long de l'arc, atteint 450 t/m et provoque des contraintes de compression de 75 bars à la clef et de 45 bars aux naissances.

#### Variations linéaires

Les raccourcissements compensés qui n'interviennent donc pas dans les calculs sont :

— l'écrasement des joints (4 mm) résultant d'essais de laboratoires;

— le raccourcissement instantané du béton (4 mm calculé avec  $E = 350\,000$  bars);

— la demi-différence entre le raccourcissement différé et le raccourcissement instantané, hypothèse faite en

raison de la mise en pression décalée du deuxième vérin par rapport au premier (4 mm);

— l'écartement instantané des culées de l'ordre de 10 mm.

Au total 22 mm facilement compensés, chacun des deux vérins réservés dans la clef permettant une course de 25 mm.

Le raccourcissement différé de l'arc estimé à 4 mm provoque des moments de 4 t/m en clef, et de 14 t/m aux naissances, d'où une contrainte supplémentaire de  $\pm 9$  bars.

Le calcul a fait apparaître que l'écartement différé des culées, 6 mm environ, ne donne pas de contrainte supplémentaire, cet effet étant compensé par une rotation simultanée des culées résultant du chargement excentré du sol.

Le tassement différentiel des culées dans les hypothèses prises en compte et mentionnées ci-après donne une contrainte supplémentaire de 4 bars aux naissances.

#### Décharges.

La décharge dissymétrique de 10 t/m<sup>2</sup>, intéressant la moitié de l'arc, provoque les moments les plus importants de la voûte (110 t/m à l'encastrement, — 35 t/m en travées entre la clef de l'appui, côté décharge).

Aux naissances, il en résulte une contrainte supplémentaire de 60 bars de compression à l'intrados, de 70 bars en traction à l'extrados.

#### Contraintes totales.

En définitive, sous le cumul des trois cas de charges énoncées et compte tenu des tassements différés, la contrainte du béton armé atteint 120 bars sur la face d'intrados des naissances. En clef, c'est la compression pure sous l'effet du chargement radial qui donne la contrainte la plus forte, laquelle ne dépasse pas 75 bars comme on l'a noté.

### b) Résultats des mesures effectuées après construction de la voûte :

#### Dispositifs d'essais.

Les deux anneaux n° 15 et n° 198, repérés par rapport à l'extrémité Est du lot de 175 m, ont été équipés de témoins sonores. La ligne n° 6 passe à 6 m environ au-dessus de la moitié Nord de l'anneau 198; les lignes n° 1 et n° 6 passent à la même distance de l'anneau 15, sur les trois quarts Sud de sa portée.

Sur treize voussoirs que comporte chaque anneau, huit ont été munis de témoins. Ces témoins, deux en haut et deux en bas, longitudinalement (suivant la directrice de la voûte) et transversalement (suivant l'axe de la station), ont été mesurés sous les valeurs suivantes de la poussée en clef :

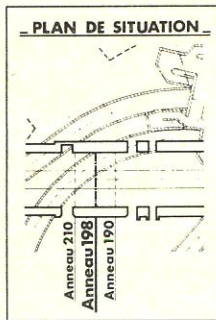
— pour l'anneau n° 15 : 360 t, instantanément, puis après trois semaines

— pour l'anneau n° 198 : 170 t, puis 300 t instantanément

300 t, à différentes époques pendant quatre mois

360 t, instantanément, puis après un mois.





## COUPE TRANSVERSALE AU DROIT DE L'ANNEAU N°198

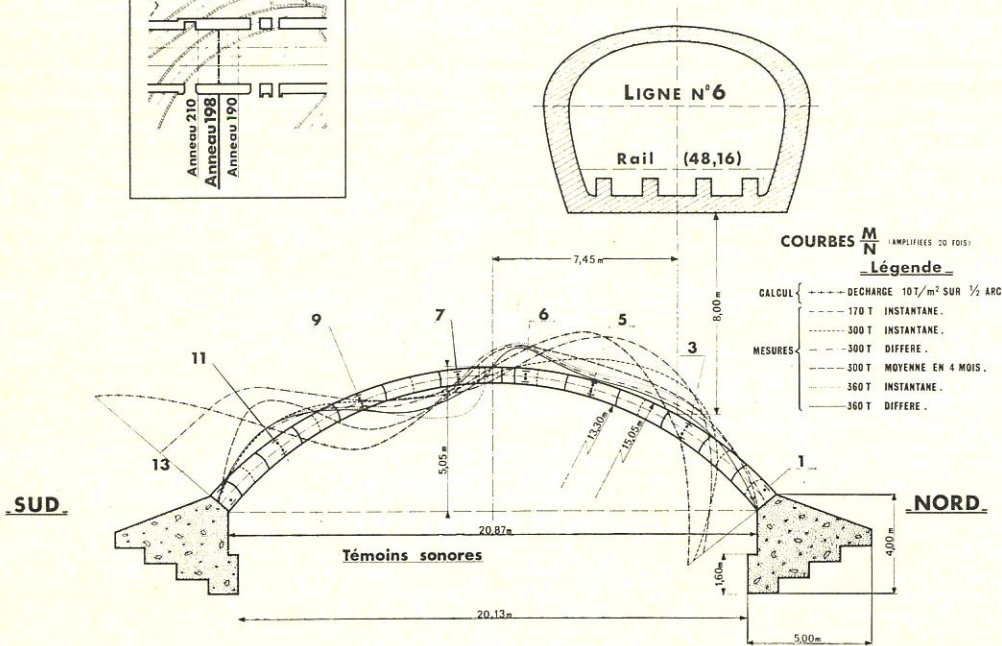


FIG. 16. — Partie Est de la station (175 m) — Auscultation de la voûte par témoins sonores.

VOUSSOIRS	170 <sup>T</sup> (INSTANTANÉ)	300 <sup>T</sup> (INSTANTANÉ)	300 <sup>T</sup> MOY. EN 4 MOIS	300 <sup>T</sup> (DIFFÉRE)	360 <sup>T</sup> (INSTANTANÉ)	360 <sup>T</sup> (DIFFÉRE)
	CONTRAINTES EN BARS	EFFORT NORMAL N. EN TONNES	MOMENT DE FLEXION en Lm	CONTRAINTES EN BARS	EFFORT NORMAL N. EN TONNES	MOMENT DE FLEXION en Lm
1	51 4,7	226 +31	84,2 5	360 +53	55,8 57,2	440 0
3	20 4,7	216 -11,6	28 76,5	325 -19	60,5 106	535 -19,5
5	0 53	135 -14,7	55 114	385 -22,5	72 124	490 -12,8
6	23,5 47,5	170 -5,7	47,5 78	300 -7,2	25 100	300 -18
7	44,5 25,5	168 +4,5	75,5 49,5	300 +6,25	82 85,5	355 +4,1
9	11,5 16,5	65 0	49,5 49,5	277 0	83 57	340 +2
11	0 28,4	97 -13,7	23,5 47,5	250 -11,3	79 70,5	370 -16
13	0 14	57 -9,5	24,5 29,1	215 -3,00	29 36	260 -5

Tableau 1  
Efforts longitudinaux pour les différentes poussées du vérin (suivant la directrice).

VOUSSOIRS	170 <sup>T</sup> INSTANTANÉ	300 <sup>T</sup> INSTANTANÉ	300 <sup>T</sup> MOY. EN 4 MOIS	300 <sup>T</sup> DIFFÉRE	360 <sup>T</sup> INSTANTANÉ	360 <sup>T</sup> DIFFÉRE
1	1,33	12	1,67	1,45	1,42	1,64
3	1,27	1,08	1,47	1,77	1,55	1,70
5	0,80	1,28	1,57	1,63	1,39	1,36
6	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1,18	1,2	0,78	1,04
9	0,58	0,92	1,13	1,32	1,28	1,30
11	0,57	0,83	1,2	1,23	1,14	1,04
13	0,34	0,72	0,87			1,35

Tableau 2  
Valeurs de  $\frac{N_i}{N_6}$  pour les différentes poussées en clef.

## Tendances observées.

L'auscultation rapide de l'anneau 15, un des premiers montés, avait essentiellement pour but de vérifier si la compression exercée en clef se transmettait bien tout le long de l'arc, sans se perdre par frottement dans le sol.

Les premiers résultats trouvés ont mis en évidence qu'il en était bien ainsi, prouvant que les dispositions adoptées pour bloquer l'arc au terrain étaient satisfaisantes et que la valeur de l'effort exercé dans les vérins de clef avait été convenablement choisie.

Il a même été constaté, aussi bien sur l'anneau 198 que sur l'anneau 15, que l'effort normal augmentait de la clef vers la culée Nord. De la clef vers la culée Sud, la tendance a été moins nette, sauf sous la poussée de 360 t, après adaptation (tableau n° 2, fig. 16).

On trouverait une explication logique à cette observation, en admettant que vienne se superposer, à la charge radiale prise en compte dans les calculs, un déplacement vers la culée du massif de terre chargeant la voûte. Cet effort pourrait se justifier par la décompression du sol au voisinage des culées, lors des abattements qui précéderent leur exécution.

La dissymétrie de cet effort normal pourrait provenir de la présence de la ligne n° 6, laquelle aurait pu accentuer le glissement des terres vers la culée Nord. On a, en effet, au cours des travaux, noté une légère fissuration dans le piedroit de la ligne n° 6, indice probable d'un mouvement du sol avoisinant.

Enfin, la dissymétrie observée dans la ligne de pression lui donne, au moins pour les premiers cas de charges,



la même allure que la ligne théorique sous décharge dissymétrique de 10 t/m<sup>2</sup>; on peut penser que la présence de la ligne n° 6 explique ce phénomène.

L'excentricité de la ligne de pression diminue avec le temps dans la zone des reins, tandis qu'une perturbation apparaît en clef, *a priori*, anormale.

### c) Les fondations :

Le taux de travail sur les couches alternées de marnes et caillasses s'élève, en partie courante, à 13 bars sous l'arête interne de la culée et à 8 bars sous l'arête externe. A l'endroit particulièrement chargé où la voûte de la station a une culée commune avec la voûte de la gaine de l'escalier mécanique qui lui est parallèle (fig. 39), le taux de travail du sol atteint 16 bars.

Afin de savoir à quelles déformations pouvaient conduire ces contraintes, des essais ont été effectués par la Société Simecsol. Ces essais ont consisté à charger, par des vérins hydrauliques, un plateau dont on mesurait l'enfoncement dans le sol à éprouver.

Les résultats ont montré qu'avec un module de déformation du sol de 1 700 bars, la culée, en partie courante, risquait de tasser au maximum de 26 mm, côté quai, et de 16 mm, côté terre, perpendiculairement à la semelle.

La rotation corrélative de  $1,8 \times 10^{-3}$  radian des culées devait annuler les effets de leur écartement. Quant au déplacement vertical de 20 mm environ, il tendait à supprimer l'action du terrain et en déchargeant l'arc, favorisait la formation de voûte dans le sol.

La culée chargeant le sol localement entre les pénétrations donnant accès aux escaliers mécaniques à 16 bars était susceptible de tasser verticalement de 39 mm, en fait on a estimé que ce tassement pourrait être réduit de 25 à 30 % si on tenait compte de la continuité du piédroit dans la section courante et que l'on considère dans la section intéressée la poutre comme reposant sur appui élastique, partant de l'idée que deux sections voisines ne peuvent subir des tassements aussi différents (20 mm et 39 mm). C'est alors un tassement vertical de 30 mm pour cette culée de l'arc que l'on a admis, la culée opposée, dans le cas le plus défavorable, pouvant avoir un tassement limité à 20 mm. Il en est résulté la prise en compte, dans les calculs, d'un tassement différentiel de 10 mm.

On a vu que la contrainte correspondante du béton résultant de ce tassement différentiel était peu importante.

### d) Les pénétrations :

Les pénétrations des couloirs de 3,20 m de largeur suppriment les appuis de quatre anneaux successifs, la force de compression de 360 t de chacun de ces anneaux est transmise aux culées, de part et d'autre de l'ouverture, par un arc de décharge qu'on a supposé parabolique et dont la contrainte en clef atteint 85 bars, si l'on attribue à l'arc une hauteur de 1 m (fig. 39).

On peut considérer qu'une partie des efforts de compression de la voûte privée d'appui se transmet par cisaillement tout le long des surfaces de contact de cette voûte par les anneaux voisins qui s'appuient sur les culées. Si tout l'effort se transmettait de cette façon, le cisaillement moyen n'excéderait pas 7,5 kg/cm<sup>2</sup>. En raison de la présence des pointes de diamant, dans

la réalité, c'est une combinaison des deux systèmes qui se produit. On voit que chacun d'eux pris isolément est suffisant.

## 3. ESSAIS PRÉALABLES

Avant d'entreprendre la construction de la voûte, un certain nombre d'essais, portant essentiellement sur la tenue des voussoirs et leur liaison, ont été effectués au Centre expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics.

Une première série d'essais a eu pour but de vérifier la liaison des voussoirs entre eux en effectuant le contrôle du collage à l'Epoxy, d'une part, pour la liaison transversale des éléments d'un même anneau et la solidarité des anneaux entre eux, d'autre part, du fait de l'interpénétration des pointes de diamant et de l'injection de ciment entre les anneaux. Il fallait, en effet, avoir la certitude de réaliser un ouvrage monolithe travaillant en coque.

### a) Contrôle du collage des voussoirs d'un même anneau :

Les produits de collage ont été fournis par la Société Neobitum. Les polykottes utilisés étaient de la série K 21 de constitution ternaire comportant du brai de houille dur, de l'huile anthracénique et de la résine époxydique liquide. Cette combinaison ternaire était additionnée au moment de l'emploi d'un catalyseur provoquant la réticulation de la résine époxydique, l'huile anthracénique et le brai de houille intervenant également dans la réaction.

La série K 21 et ses dérivés est caractérisée par une prise longue s'étendant sur une période de huit à dix jours à la température de 20° C et des résistances mécaniques voisines de celles d'un bon béton.

Le choix de la viscosité la plus appropriée a fait l'objet de nombreux essais. Le polykotte K 21-80 SFF, employé au début du chantier s'est révélé trop visqueux pour le système d'application et a été remplacé par le polykotte K 21-40 SFF.

Un dispositif d'essais, de forme assimilable à la fois à celle d'une ferme et d'une voûte, comportait un bloc central terminé par deux rotules s'emboîtant sur deux blocs inclinés à 45° et réunis par des tirants constitués par 12 barres de 32 mm en acier TOR (fig. 17).

Après avoir enduit les faces en contact des articulations à la résine, la maquette a été mise en charge alors que le polykotte jouait le rôle de lubrifiant permettant ainsi aux voussoirs de se déplacer sur les deux rotules de clef. Le chargement a été effectué progressivement de 50 t jusqu'à 680 t.

La difficulté a résidé dans le maintien de la charge à 680 t. Après plusieurs essais de serrage de la collerette du vérin, la charge a pu être maintenue à 550 t pendant neuf jours, représentant le temps nécessaire à la polymérisation totale du polykotte K 21, à une température ambiante comprise entre 18° C et 20° C.

Les déformations ont été mesurées pendant toute la durée de polymérisation de la résine, dans les mêmes conditions que pendant le déchargement de la maquette. Alors que la valeur calculée de la force résiduelle dans le tirant, compte tenu de la déformation élastique des pièces d'appui, était de 61 t, l'expérience a donné 60 t. Le taux de travail correspondant dans l'articulation



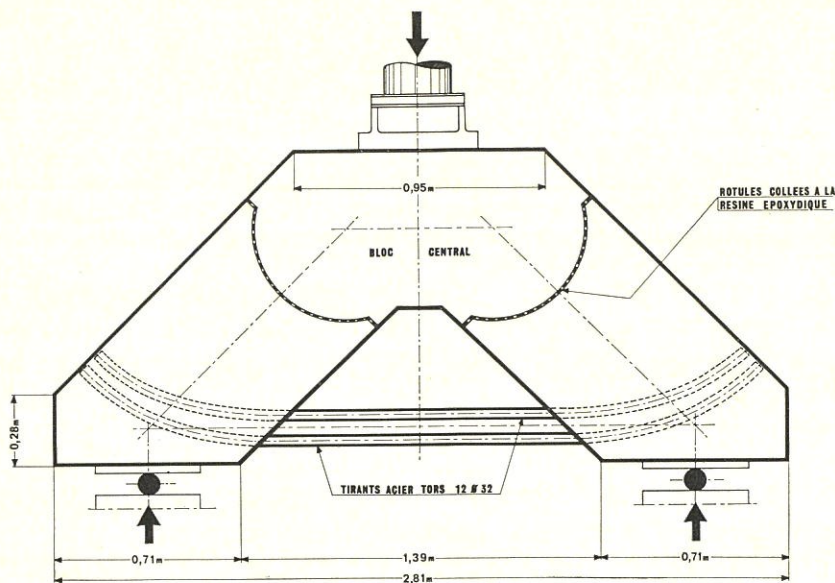


FIG. 17. — Partie Est de la station (175 m). Collage des voussoirs. Essai d'articulation.

bloquée était de 40 bars en traction et 55 bars en compression. L'Époxy a donc parfaitement joué son rôle en verrouillant complètement l'articulation.

**b) Efficacité de la liaison longitudinale entre les anneaux :**

Dans les faces latérales de chaque voussoir ont été réservées deux pointes de diamant permettant un relief maximal de 35 mm et un creux total de 45 mm, le jeu subsistant permettant un glissement relatif vertical de 6 cm des anneaux entre eux au moment du montage.

Deux essais ont été faits pour apprécier la valeur du cisaillement des joints, l'un avec des voussoirs à pointes de diamant, l'autre avec des voussoirs à surface lisse.

Chaque dispositif d'essai comportait un bloc central représentant le voussoir de clef et deux blocs latéraux représentant les voussoirs des arcs voisins (fig. 18).

Les trois éléments accolés avaient une section de 0,60 m × 1 m, correspondant aux dimensions réelles.

Un coulis d'injection comportant trois parties de sable pour une partie de ciment CLK a été injecté dans le vide existant entre les voussoirs, ceux-ci étant enserrés dans des cadres métalliques s'opposant à leur écartement.

L'essai suivant a été entrepris après dix-huit jours de durcissement de ce montage, soit pour des valeurs de 40 bars en moyenne de la résistance du coulis.

La maquette était placée sur des massifs indéformables avec interposition de plaques d'assises et de rouleaux en acier.

Des extensomètres gradués au centième de millimètre ont été disposés sur le modèle, de manière à mesurer :

- les déformations dues aux glissements verticaux à la clef par rapport aux deux voussoirs latéraux ;
- les déformations dans les joints dues à la pression de l'ensemble des trois voussoirs.

Des jauges électriques, au nombre de 28, étaient placées dans le cadre et indiquaient les déformations locales.

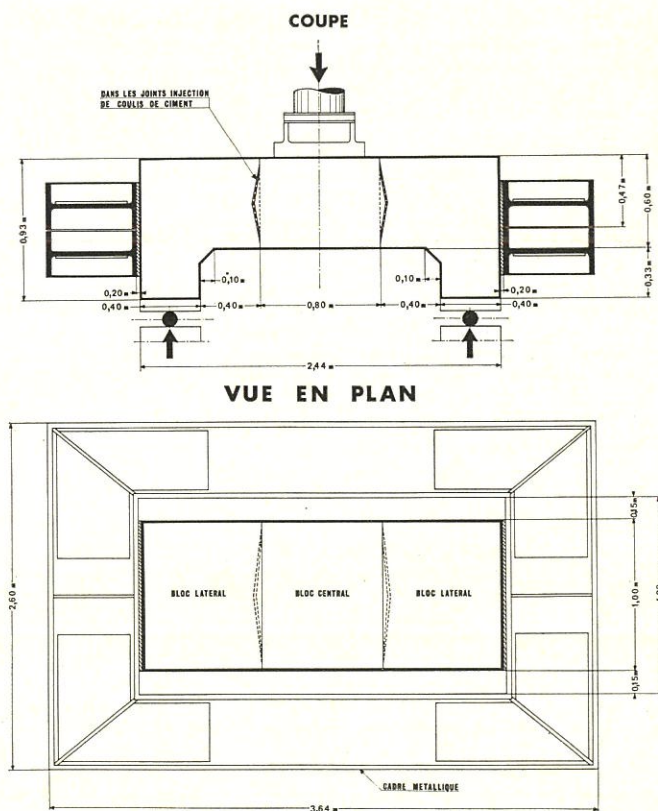


FIG. 18. — Partie Est de la station (175 m). Voussoirs à pointes de diamant. Essai de liaison.

La mise en charge s'est faite par paliers de 20 t pour des chargements allant de 50 à 200 t, puis par paliers de 50 t jusqu'à la charge de 600 t.



Il est ressorti de ces essais de liaison que les faces latérales en pointes de diamant ont satisfait à la fonction qui leur a été assignée. On a noté, en particulier, que le glissement du bloc central à pointes de diamant a été de 13 mm pour un chargement de 600 t, alors que dans un deuxième essai comparatif exécuté dans les mêmes conditions, mais avec des blocs à faces lisses, le glissement a atteint 43 mm pour un chargement de 350 t.

Il a été constaté néanmoins une rupture verticale des joints des blocs lisses à 100 t, le fleximètre marquant 6 mm alors que le bloc à pointes de diamant s'est déplacé régulièrement et progressivement de 0 à 10 mm pour des charges variant de 0 à 250 t.

Ceci a montré les possibilités réelles d'adaptation des voussoirs à pointes de diamant qui exercent progressivement leur effort sur les voussoirs latéraux grâce au meilleur effet de voûte procuré par la forme pyramidale des faces en contact.

Si l'on analyse cet effet de voûte on peut en déduire que la charge de 600 t sur le voussoir central se répartit en un cisaillement le long des faces des voussoirs de 50 bars en moyenne et une compression horizontale dans les voussoirs de 300 bars.

#### c) Essai d'une articulation entre voussoirs :

Cet essai a eu pour but de vérifier le comportement à l'encastrement d'une articulation de voussoir en vraie grandeur. Les blocs d'essais ont été coulés dans les moules métalliques servant à la fabrication des voussoirs en y plaçant des cloisons intermédiaires pour réaliser des faces d'extrémité droites.

Le rayon moyen de l'articulation cylindrique était de 473 mm. La différence des rayons entre la partie concave et la partie convexe était de 5 mm.

Le programme d'essais a consisté à enduire de polykotte les faces des articulations en contact, à superposer les deux blocs et à exercer une charge maximale de 400 t par palier de 100 t en ayant placé au préalable des appareils mesurant les mouvements des lèvres des articulations.

L'écrasement du Néobitum a représenté un raccourcissement de 0,11 mm. Le polykotte avant polymérisation s'est révélé présenter les propriétés d'un excellent lubrifiant. Après chargement à 400 t on n'a constaté, bien entendu, aucune fissure des blocs. Seules les bavures de résine s'étaient étendues.

L'essai a été maintenu pendant cinq jours sous la charge de 400 t, de manière à obtenir une polymérisation suffisante de la résine.

Il a été alors procédé à une mise en charge progressive de l'articulation bloquée. La rupture de la maquette s'est produite pendant le maintien de la charge au palier de 1 900 t par dégradation continue.

Les premières fissures filiformes sont apparues verticalement pour une charge de 900 t sur la partie concave de l'articulation.

#### 4. INSTALLATIONS EN SURFACE ET APPROVISIONNEMENT DU CHANTIER SOUTERRAIN

##### a) Emprise de chantier place de l'Étoile (fig. 19) :

Une emprise de surface relativement réduite (1 700 m<sup>2</sup>) eu égard à l'importance du chantier a été établie sur le terre-plein de la place de l'Étoile compris entre l'avenue

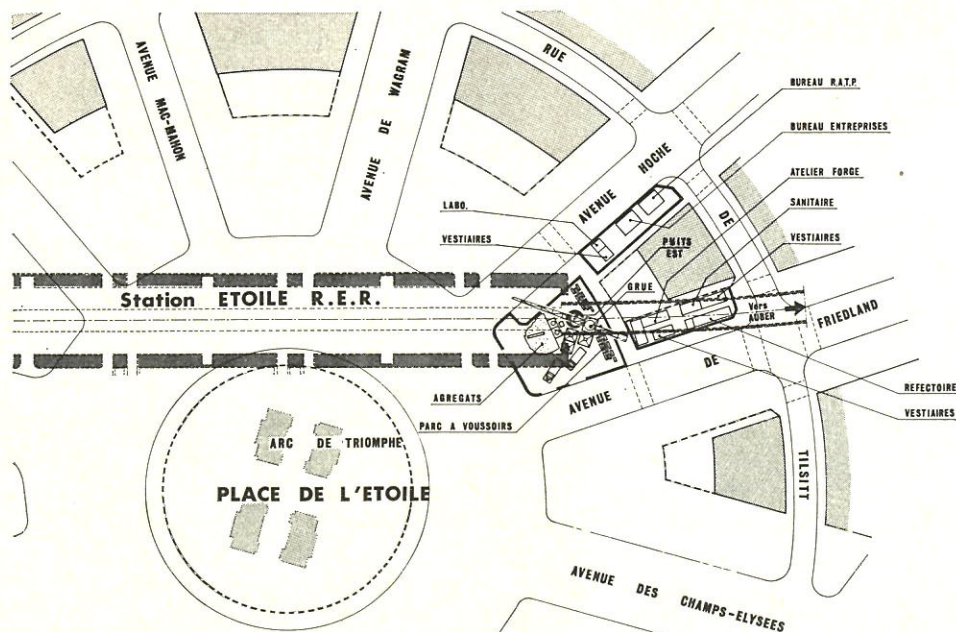


FIG. 19. — Partie Est de la station (175 m). Emprises de chantier place de l'Étoile.



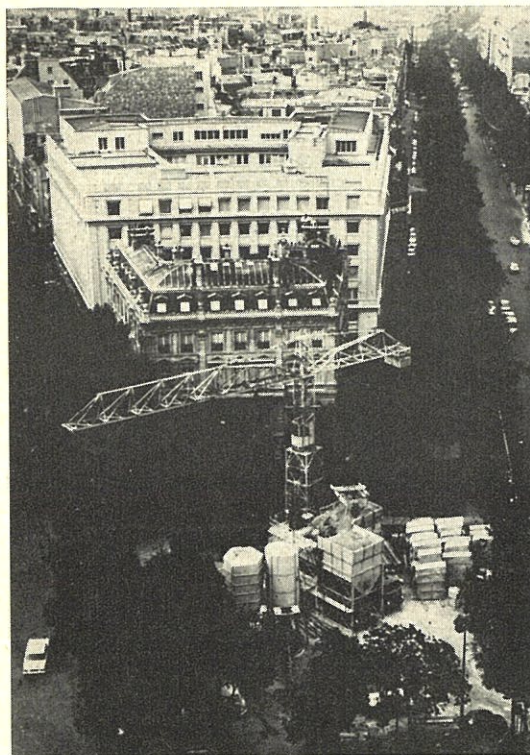


FIG. 20. — Vue d'ensemble du chantier depuis l'Arc de Triomphe.

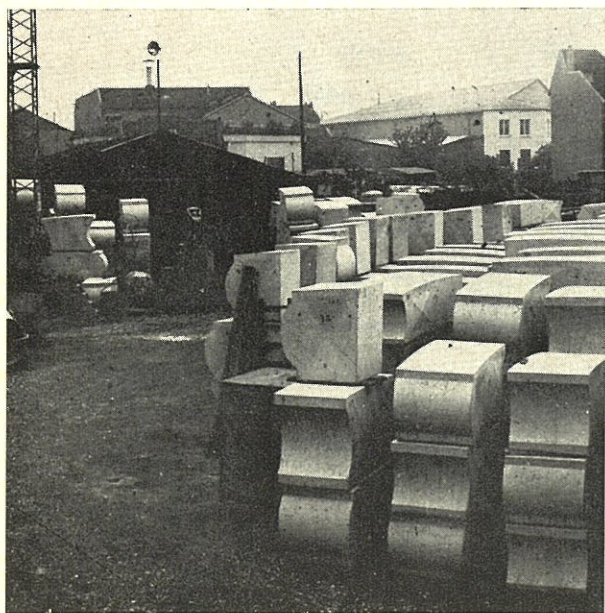


FIG. 21. — Stockage des voussoirs dans les ateliers de « Nanterre » de l'entreprise Moinon.

de Friedland et l'avenue Hoche. Elle était occupée par une centrale à béton et sa réserve d'agréats, une grue tour, les ateliers et baraques de l'entreprise et de la Régie, enfin le stock de voussoirs assurant les besoins d'une journée (fig. 20).

#### b) Préfabrication des voussoirs :

Les voussoirs ont été fabriqués à Nanterre dans les ateliers de l'entreprise Moinon (fig. 21), l'utilisation de moules métalliques permettant d'obtenir une précision de fabrication de l'ordre de  $\pm 2$  mm.

L'entreprise disposait de quatre jeux de fonds de moule et deux jeux de joues, ce qui permettait de démouler les joues vingt-quatre heures après le coulage pour équiper un autre anneau et de ne manutentionner les voussoirs que quatre jours après le coulage. Les fonds et joues des moules étaient en tôle de 5 mm d'épaisseur.

Trois entretoises en tube de 26/34 maintenaient constante la distance de 0,80 m entre les joues, les trous laissés après démoulage servant au passage des broches pour le levage et la manutention.

Un voussoir sur deux était équipé d'un drain en éternit de 40 mm de diamètre servant à l'injection de blocage, après mise en compression de la voûte. Les joues latérales des voussoirs étaient équipées de tubes en « Y » laissant au démoulage une saignée de  $30 \times 30$  mm de section pour permettre l'injection destinée à remplir les joints entre les pointes de diamant.

Des douilles filetés de 12 mm et 16 mm de diamètre étaient systématiquement réservées au coulage pour faciliter la fixation ultérieure sur la voûte des équipements du tunnel.

Le béton utilisé comprenait :

- 1 100 kg de gravillon 15/25 (735 l)
- 665 kg de sable 0/5 (415 l)
- 400 kg de ciment CLK 325
- 150 l d'eau.

La fabrication s'est effectuée à la cadence d'un anneau complet par jour.

Le poids d'armature était de 80 kg au m<sup>3</sup>. Une vibration dans la masse était opérée à l'aide d'aiguilles de 50 mm de diamètre.

Un réseau de canalisations enterrées et calorifugées alimentait les quatre rangées de moules en vapeur, de manière à réchauffer le béton et à maintenir le voussoir jusqu'à prise complète à la température de 25 à 30° C, chaque voussoir étant abrité sous une housse en nylon.

#### c) Puits d'accès et chambre de départ :

Pour l'approvisionnement et la desserte du chantier souterrain, un seul puits de 5 m de diamètre intérieur, implanté dans l'emprise de la place de l'Étoile a été exécuté. Il a été situé en dehors de l'aplomb de la station, mais immédiatement à son extrémité, au droit du tunnel courant. A sa partie inférieure, un tronçon de tunnel courant de 8,70 m de largeur a été construit en premier sur 7 m de longueur pour constituer la chambre de départ destinée à permettre l'attaque à l'avancement du terrassement de la station (fig. 22).



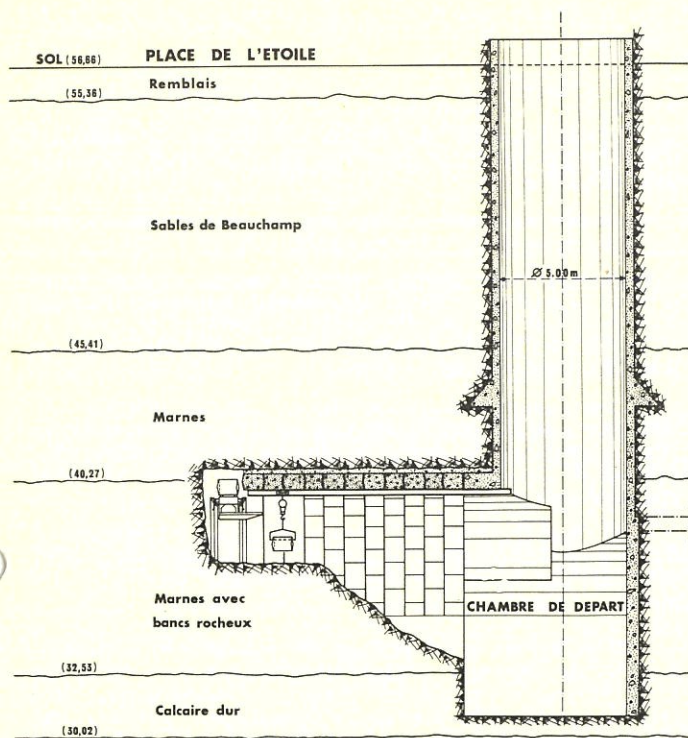


FIG. 22. — Partie Est de la station (175 m). Puits d'accès. Terrassement de la voûte à l'avancement et mise en place des anneaux.

## 5. CONSTRUCTION DES CULÉES

### a) Terrassement :

A partir de cet ouvrage d'amorce et après exécution de deux rameaux transversaux, deux galeries latérales de 1,60 m de largeur par 2,40 m de hauteur ont été terrassées en bordure des culées et à l'intérieur de la station (fig. 23).

La fouille des culées a été exécutée sous abattements latéraux de 5 m de largeur, avec un soutènement constitué par des étais métalliques et un blindage de ciel en madriers non jointifs. Du fait de l'assise en gradins de la culée, l'approfondissement local de la fouille était exécuté dans une deuxième phase après changement d'étais.

Il était procédé, toutes les travées terrassées, à un contrôle de la position des bancs durs et à une adaptation des dimensions des fondations, de telle sorte que chaque gradin d'assise de la culée soit directement appuyé sur un banc de caillasses.

### b) Maçonnerie :

Les culées ont été coulées en gros béton par éléments successifs de 3,20 m de largeur et en abandonnant les étais métalliques dans la masse de l'ouvrage (fig. 24).

Au droit des décaissements à établir ultérieurement pour constituer les machineries des escaliers mécaniques accolés à la station, ainsi qu'à l'aplomb des pénétrations des couloirs d'accès, la fondation des culées a été approfondie pour éviter tout risque d'affouillement et mieux répartir sur le sol les charges concentrées.

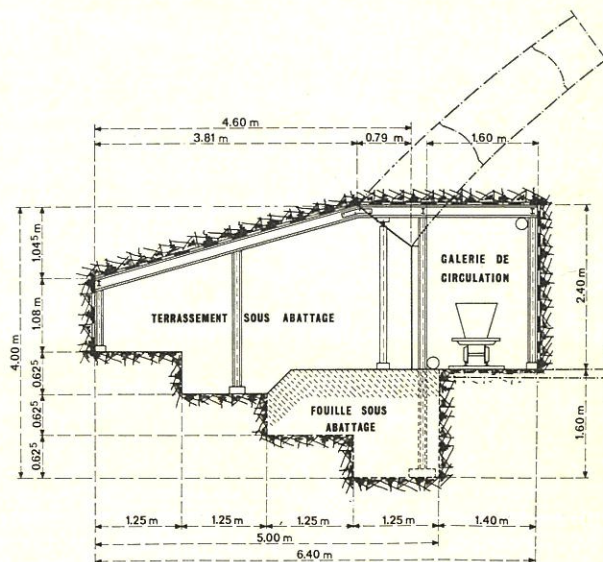


FIG. 23. — Partie Est de la station (175 m). Terrassement des culées.

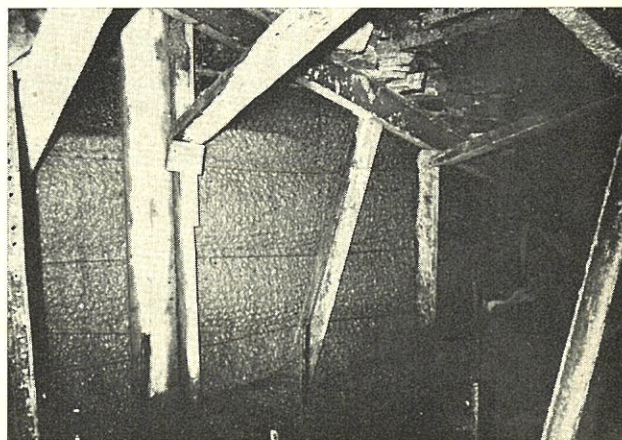


FIG. 24. — Bétonnage des culées de la station par travées successives.



## 6. ÉTABLISSEMENT DE LA VOUTE EN PARTIE COURANTE

### a) Terrassement :

Le terrassement de la voûte à pleine calotte a été entrepris à l'avancement, par tranches successives de 0,80 m de largeur, sans autres engins que les outils classiques de perforation pneumatique (fig. 25).

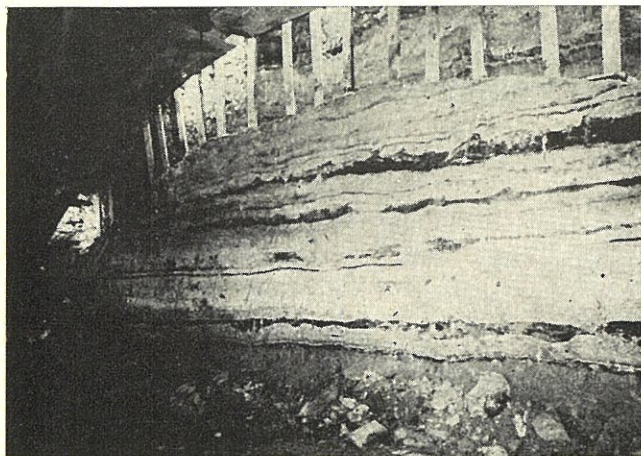


FIG. 25. — Terrassement du front de taille.

En raison de la stratification très marquée des couches, le terrassement du ciel a été pratiquement effectué en escalier de manière à éliminer les couches marneuses décomprimées sous les bancs de caillasses.

A titre de sécurité pour le personnel, les bancs de caillasses très fracturées ont été maintenues par des profilés métalliques en fer U de 80 mm, disposés tous les mètres environ, reposant à une extrémité sur le dernier anneau monté, empothés à l'autre extrémité dans le terrain et soutenus par un gendarmage en planches (fig. 26).

30 m environ derrière le front de taille, le terrassement du stross était effectué à l'aide d'un traxcavator Caterpillar, type 955 H de 105 ch à moteur thermique. Le transport des déblais vers la benne établie dans le puits de desserte du chantier était assuré par deux dumpers.

### b) Montage d'un anneau (fig. 27) :

La mise en place des voussoirs en béton armé préfabriqués constituant les anneaux de voûte, a nécessité l'utilisation d'un appareil construit par la Société Mecaneral et spécialement conçu à cet effet.

Le bon fonctionnement de cet appareil alliant les fonctions d'un engin de levage à celles d'un cintre mobile a joué un rôle déterminant dans la réussite des travaux.

La succession des différentes opérations de levage, de mise en place et de réglage était la suivante pour chaque anneau de voûte, l'appareil étant placé dans la partie

nouvellement terrassée et devant le dernier anneau posé (fig. 28 et 29) :

- acheminement des voussoirs descendus par le puits d'accès vers le front de taille à l'aide d'un monorail se déplaçant sur un profilé fixé sous la clef de voûte en utilisant les douilles réservées dans les voussoirs lors de leur coulée;

- application sur les bossages et les creux d'extrémités des voussoirs de résine Epoxy;

- réception de chaque voussoir sur un plateau muni de galets, reprise de l'ensemble par un appareil élévateur constitué par un parallélogramme articulé fixé sur le cintre de montage et élévation du voussoir entre les deux jambages constituant le cintre;

- enclenchement des galets du chariot, support de voussoirs, dans les rails latéraux réservés à l'intérieur du cintre et accompagnement du chariot par chaîne jusqu'au contact du voussoir sur le sommier de la voûte ou sur le voussoir précédemment mis en place;

- pose du voussoir sur le cintre grâce à l'effacement du chariot sous le voussoir, reprise par la chaîne du chariot vide et mouvement inverse pour aller reprendre un autre voussoir.

Les différents mouvements nécessaires au fonctionnement de l'appareil étaient obtenus à partir de vérins hydrauliques à moyenne pression contrôlés par des électro-vannes. Un pupitre de commande par boutons poussoirs permettait de sélectionner les différentes manœuvres.

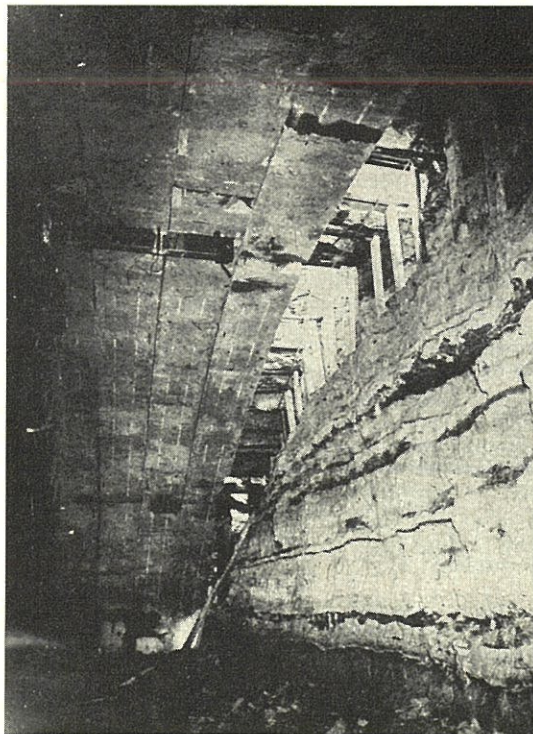
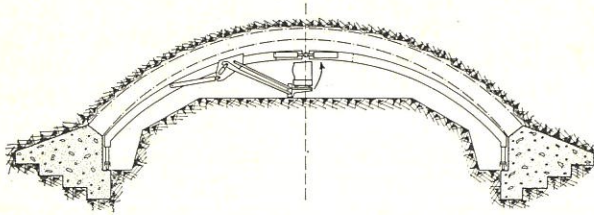


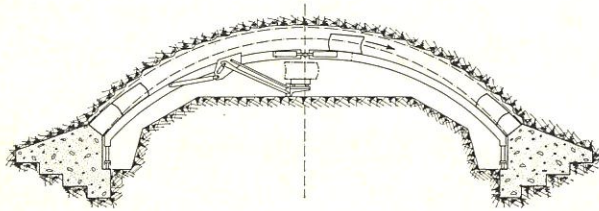
FIG. 26. — Terrassement sur 80 cm permettant la pose d'un nouvel anneau.



MISE EN PLACE DU PREMIER VOUSOIR



MISE EN PLACE D'UN VOUSOIR COURANT



CLAVAGE DE L'ANNEAU APRES SURELEVATION DU CINTRE

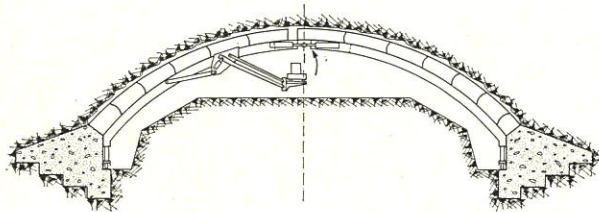


FIG. 27. — Partie Est de la station (175 m). Montage d'un anneau.

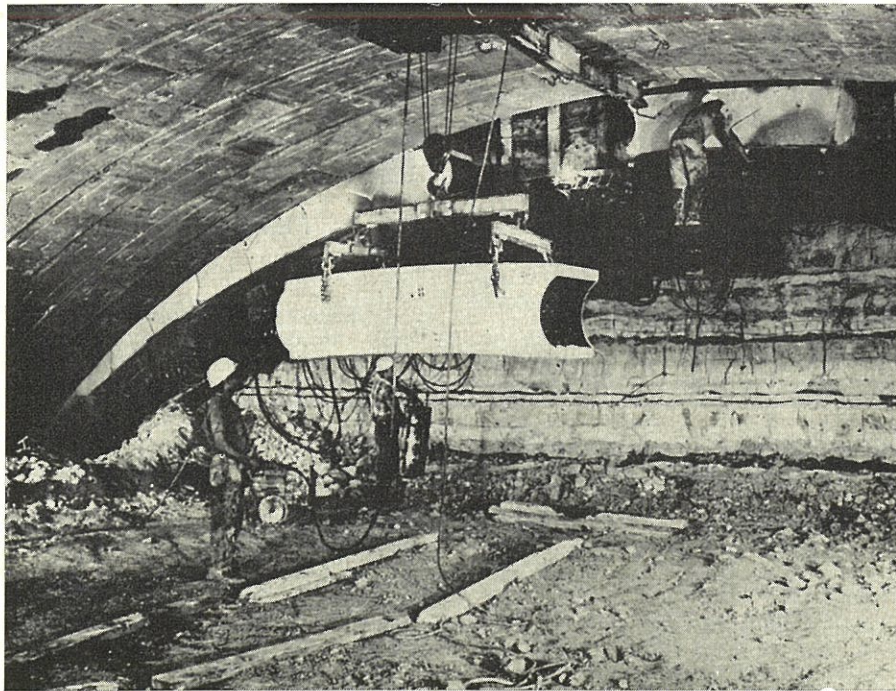


FIG. 28. — Mise en place des voussoirs lors du montage d'un anneau.

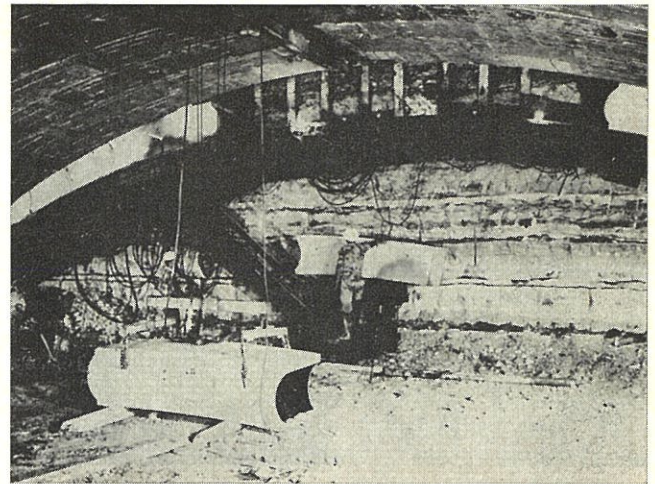


FIG. 29. — Montage d'un arc composé de voussoirs préfabriqués.

Les douze voussoirs courants posés alternativement à droite et à gauche une fois montés, il restait à claver l'anneau par l'introduction et le réglage du voussoir de clef.

Dans ce but, des vérins situés en partie haute du cintre mobile, permettaient d'écarter les deux mâchoires du cintre et de surélever suffisamment les deux branches de



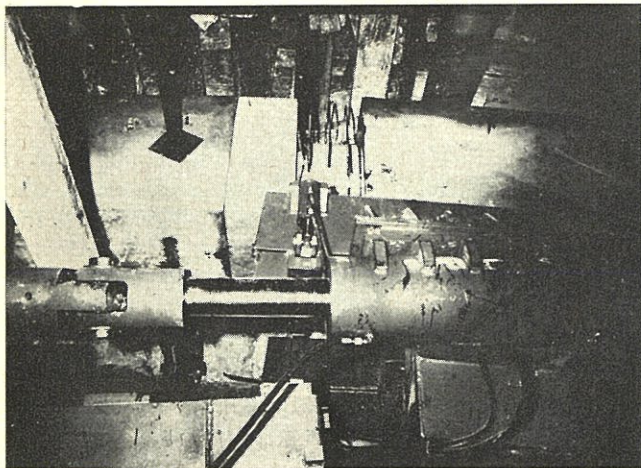


FIG. 30. — Mise en place du voussoir de clef comportant les vérins plats.

l'arc en cours de montage pour pouvoir y insérer en partie haute l'élément de clef (fig. 30). Dans ce voussoir spécial de largeur réduite, étaient incorporés deux vérins plats Freyssinet, de forme circulaire et d'un diamètre de 600 mm.

Il était alors possible d'abaisser et d'effacer le cintre sous l'anneau ainsi constitué.

La durée moyenne du montage et du clavage d'un anneau d'un poids de 37 t, par ce procédé très mécanisé, était de deux heures environ.

Après cette opération, il restait à procéder au réglage et au placage du nouvel anneau contre l'anneau précédent définitivement réglé.

Des vérins portatifs prenant appui sur le front de taille permettaient d'effectuer, dans le sens de l'axe longitudinal de la voûte, un léger déplacement de chaque voussoir de manière à introduire les pointes de diamant des faces latérales dans les creux correspondants des voussoirs de l'anneau précédemment posé.

#### c) Mise en compression d'un anneau :

Une fois ce réglage effectué, il fallait entreprendre l'opération principale de mise en contact et de serrage de l'anneau de voûte contre le terrain (fig. 31).

Après un certain tâtonnement, lors du montage des premiers anneaux, le processus suivant a été finalement adopté :

- bourrage soigné au mortier de ciment, à l'aide d'un transporteur à béton, du vide subsistant entre l'extrados de l'anneau et le terrain supérieur sur tout le développement de la voûte;

- mise en pression d'un premier vérin plat de manière à réaliser l'étalement du mortier de bourrage et à le faire fluer sur toute la surface de l'extrados.

Un effort de 80 à 100 t dans le vérin suffisait pour élever de 15 à 20 mm l'arc et pour assurer une bonne répartition du mortier et un parfait contact au terrain. Simultanément se produisait un raccourcissement de l'arc du fait de la mise en compression des joints entre voussoirs;

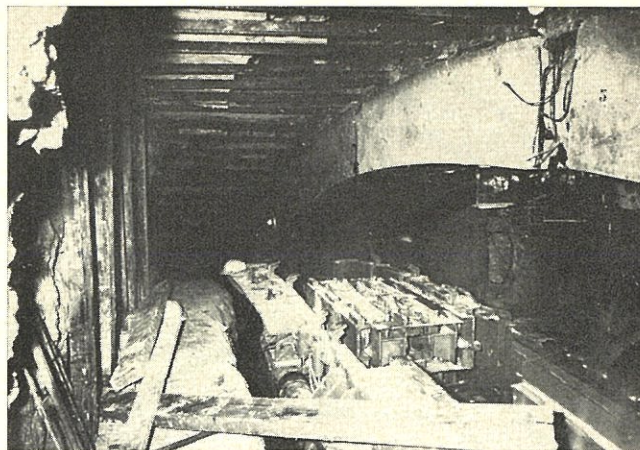


FIG. 31. — Vue d'un anneau après blocage de l'extrados au terrain.



FIG. 32. — Vue d'ensemble de la voûte.

— après environ huit heures : le mortier de blocage avait une consistance suffisante, de l'ordre de 5 bars au minimum, pour effectuer la mise en charge de l'anneau. A ce moment, le deuxième vérin de clef était mis en pression jusqu'à ce qu'un effort maximal de 360 t ait été obtenu.

Le déplacement de l'arc était minutieusement contrôlé pendant cette dernière opération. Son raccourcissement était de l'ordre de 5 mm, sa montée, par contre, était pratiquement nulle.

Le respect de la cote théorique de l'arase des sommiers et le parfait surfacage de ces derniers, le réglage de l'anneau, la mise en compression des vérins, la répartition du mortier de bourrage constituaient autant d'opérations délicates exigeant une grande précision et un certain entraînement. Il était, en effet, impératif de caler définitivement l'anneau à la cote théorique définie au projet, ceci avec une tolérance de l'ordre du centimètre.



Il était ensuite procédé, le plus près possible du front de taille, à l'injection des vides subsistant dans les pointes de diamant, de manière à solidariser les anneaux entre eux. Plus loin derrière, à une dizaine de mètres environ, était injecté, en pression, un coulis liquide de ciment et d'argile destiné à parachever le blocage de la voûte au terrain.

#### d) Cadences d'avancement :

Une fois mis au point ce cycle d'opérations et après éducation des équipes, un anneau de 0,80 m de large et de 20,87 m d'ouverture était régulièrement monté chaque jour.

En partie courante, la régularité du chantier a été remarquable, toutes les opérations s'effectuant sans précipitation et dans les temps prévus. L'avancement régulier a été un des facteurs importants de la réussite, le terrain n'ayant pas le temps de se décompresser en profondeur avant que l'anneau correspondant de la voûte ait été mis à son contact et exerce son étreinte.

Ainsi, pendant les mois de décembre 1964, janvier, février, mai, juin, juillet, août 1965, l'avancement

moyen a été de vingt-cinq anneaux de 0,80, soit 20 m de voûte par mois.

Par contre, pendant les mois de mars et avril 1965, la cadence d'avancement a dû être ralentie en raison du cas difficile que constituait le passage sous le souterrain de la ligne n° 2.

#### 7. ÉTABLISSEMENT DE LA VOUTE SOUS LA LIGNE N° 2

##### a) Croisement de la station du R.E.R. et de l'ouvrage de la ligne n° 2 :

Il faut rappeler que le radier de la ligne n° 2 se situait à quelques centimètres seulement au-dessus de la voûte de la station.

L'axe de la ligne n° 2 et celui de la station se croisaient à 45° environ (fig. 33).

Sur la longueur du biais, quarante anneaux de voûte étaient intéressés par la présence de l'ouvrage supérieur. Le passage critique sur la longueur duquel se produisait la décharge des terrains, du fait de la présence de la ligne n° 2, ne concernait que quinze anneaux de voûte

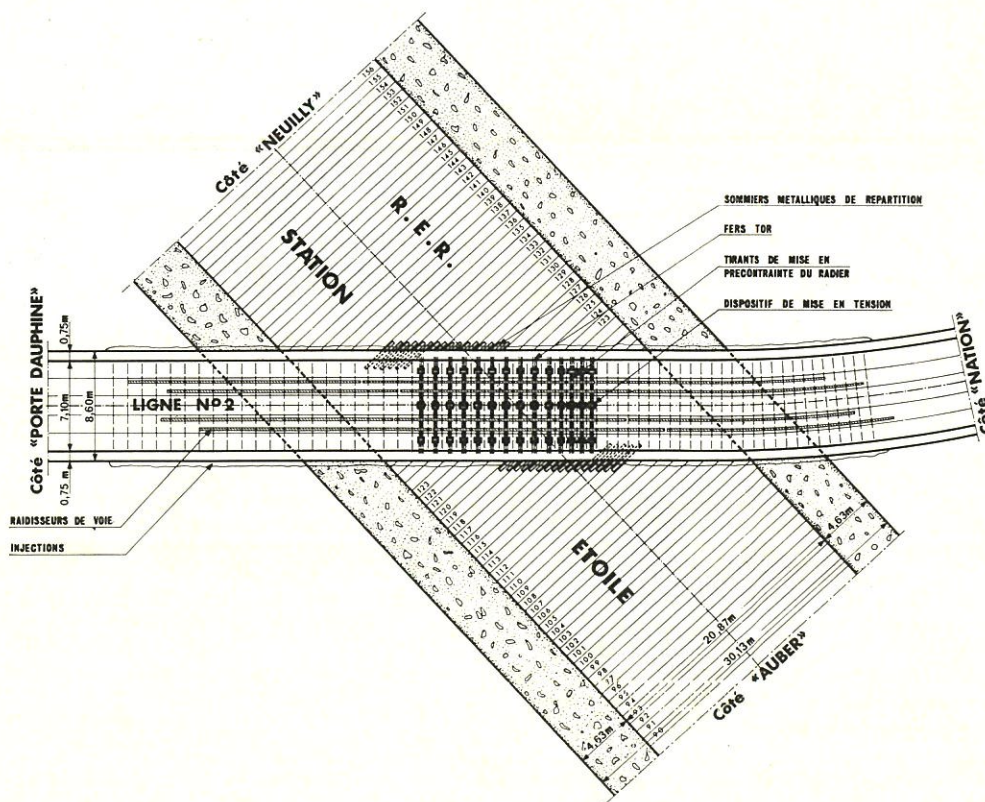


FIG. 33. — Partie Est de la station (175 m).  
Passage de la station sous le tunnel de la ligne n° 2.



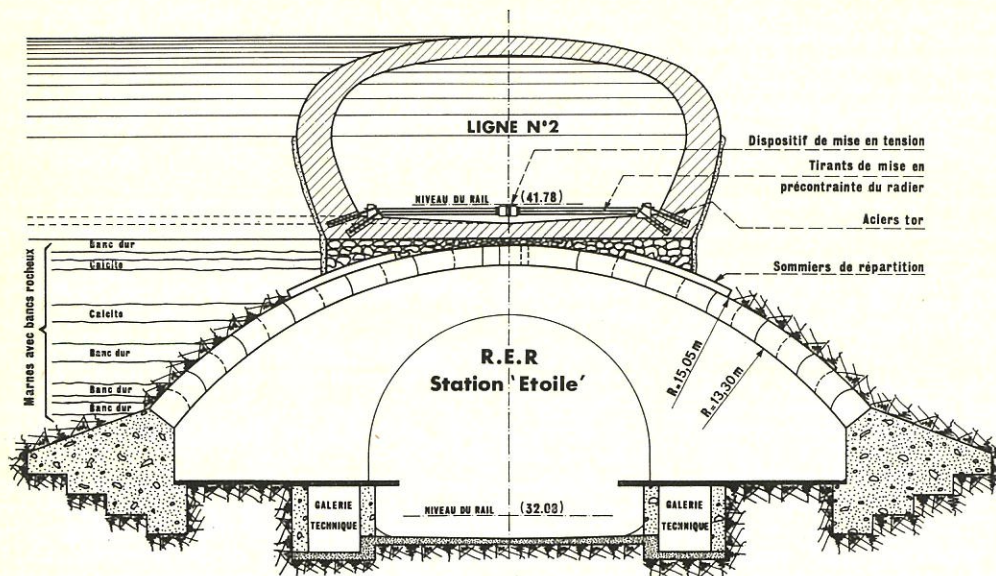


FIG. 34. — Partie Est de la station (175 m). Passage de la station sous le tunnel de la ligne n° 2. Coupe transversale.

Dans cette partie centrale du croisement (fig. 34), la diminution locale de la charge de terre en faite de la voûte de la station, d'une part, et la charge concentrée des piédroits du tunnel, d'autre part, nécessitaient l'adoption de dispositions spéciales de manière à assurer la stabilité de la voûte et la tenue du radier de la ligne n° 2. L'étude de ce cas particulier a été conduite, comme indiqué ci-après, suivant les conseils de MM. Caquot et Kérisel.

#### b) Données des calculs :

La voûte en charge exerçait une pression de 21,5 t au mètre carré sur le radier du souterrain de la ligne n° 2. Une telle pression prise uniquement par un radier en mauvais état de 6,50 m d'ouverture, de 0,60 m d'épaisseur et de faible courbure, 0,55 m de flèche, exigeait un renforcement difficile à réaliser.

En conséquence, cet effort de soulèvement a dû être pris, partie par la voûte dont la résistance a été localement accrue, partie par le radier du tunnel de la ligne n° 2 qui a été renforcé à l'aide de tirants.

En ce qui concerne la voûte de la station, les voussoirs ont été dosés à 450 kg de ciment et le ferrailage renforcé par 6 Ø 32 haut et bas. Le moment résistant en clef était dans ces conditions de 44 t/m avec un taux de travail maximal du béton de 115 bars.

Après avoir tracé l'épure de la ligne d'influence des moments en clef suivant les diverses positions de la ligne n° 2 et considéré une valeur moyenne, tenant compte d'une certaine rigidité longitudinale de la voûte de la station, il a été admis que cette dernière pouvait absorber une dépression de 11 t/m<sup>2</sup>.

Il restait à demander au radier de pouvoir résister à une sous pression de  $21,5 - 11 = 10,5$  t/m<sup>2</sup>.

Cette sous pression transmise au radier provoquait une poussée de 100 t au m/l sur le terrain qui seul n'aurait pu la contrebuter. Il a donc été décidé de mettre sur tirants la partie du radier intéressée, la poussée étant absorbée sensiblement moitié par les tirants et moitié par le sol. Le taux de travail sur le sol se limitait ainsi à 4 bars environ, valeur acceptable compte tenu du

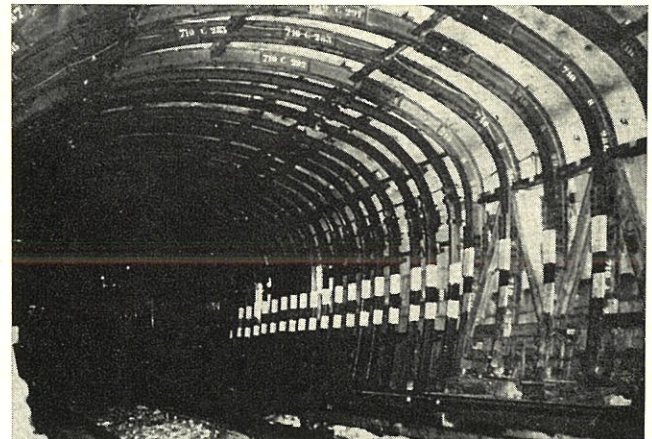


FIG. 35. — Consolidation par cintres de la ligne n° 2.

fait que par mesure de précaution supplémentaire un blocage systématique de la maçonnerie contre le terrain au moyen d'injections sous pression devait être effectué.

#### c) Mesures de protection de la ligne n° 2 :

Avant passage sous la ligne n° 2, les mesures de protection courantes ont été prises, consistant au sondage et à l'examen de l'état des maçonneries du tunnel et à l'injection des vides qui pouvaient subsister derrière le revêtement de l'ouvrage.

Un corset de cintres a été mis en place dans le tunnel. Des profils de renfort tirefonés sur les traverses avaient pour but d'améliorer la raideur du travelage des voies (fig. 35). Des dispositifs de contrôle, des repères de niveau étaient également installés pour déceler toute amorce de mouvement de l'ouvrage :



— mesures au déformètre de l'écartement des fissures pré-existantes de l'ouvrage;

— mise en place dans deux sections du tunnel de huit témoins sonores sur le radier, les piédroits et la voûte.

Enfin, la vitesse des trains circulant sur la ligne n° 2 a été réduite à 10 km/h pendant toute la durée de ces opérations.

#### d) Exécution des travaux par étapes successives :

Le terrassement et la pose des quinze arcs comprenant des voussoirs renforcés dans la zone de croisement des ouvrages se sont effectués comme en partie courante, en opérant par tranches successives de 0,80 m de largeur (fig. 36). Toutefois, un découpage supplémentaire en hauteur du terrassement a été rendu nécessaire pour procéder au blocage du souterrain de la ligne n° 2 en montant des quilles en maçonnerie de hauteur variable sous les piédroits et le radier. Ainsi, au fur et à mesure de l'exécution de chaque tranche de terrassement, les charges transmises par l'ouvrage de la ligne n° 2 étaient reportées sur les anneaux de voûte de la station du R.E.R.

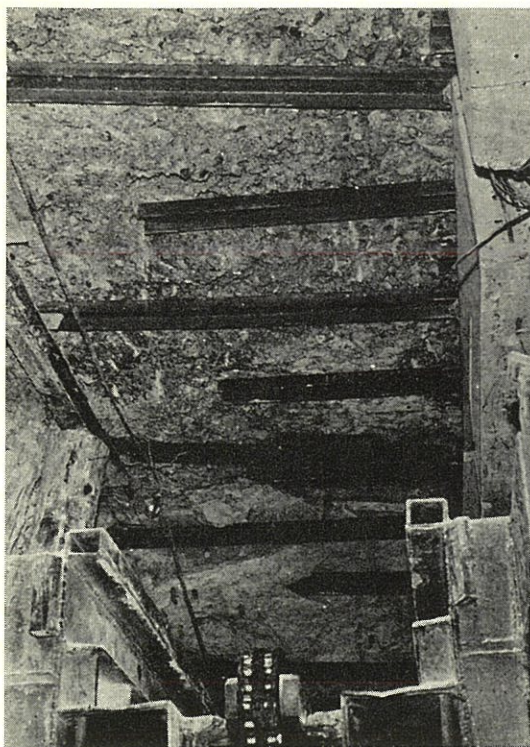


FIG. 36. — Passage sous la ligne n° 2. Dégarnissage du radier de la ligne n° 2.

De plus, à l'aplomb des piédroits du souterrain de la ligne n° 2, et sous les quilles de reprise des maçonneries étaient mis en place, sur l'extrados de la voûte de la station, des sommiers de répartition constitués par des

profilés métalliques très rigides en vue de réduire le poinçonnement sur l'ouvrage inférieur. Ces sommiers comportant 2 fers H spéciaux à très larges ailes de 140 mm de hauteur et 230 mm de largeur, d'une longueur de 2,50 m disposés sur chaque anneau de voûte, étaient soigneusement enrobés d'un mortier plastique pour faire bloc avec la maçonnerie de remplissage solidarissant les deux ouvrages.

Le radier du souterrain de la ligne n° 2 n'ayant pu être renforcé en temps utile, il a été nécessaire d'opérer la mise en compression des anneaux de la voûte en deux étapes successives.

Tout d'abord, les arcs de la zone du croisement ont été mis en compression en faisant varier progressivement l'effort dans la clef en fonction de la position relative de la ligne n° 2 par rapport à l'axe de la station du R.E.R. jusqu'à un minimum de 70 t au point d'intersection des axes. Cette limitation de l'effort normal de mise en compression des arcs a nécessité dans la zone critique centrale, c'est-à-dire sur la longueur des quinze anneaux intéressés, la pose d'étais pour éviter la déformation de la voûte pendant la période transitoire. Cet étaieement a été assuré par un entretoisement de bois en grumes calés sur le merlon central de l'excavation (fig. 37).

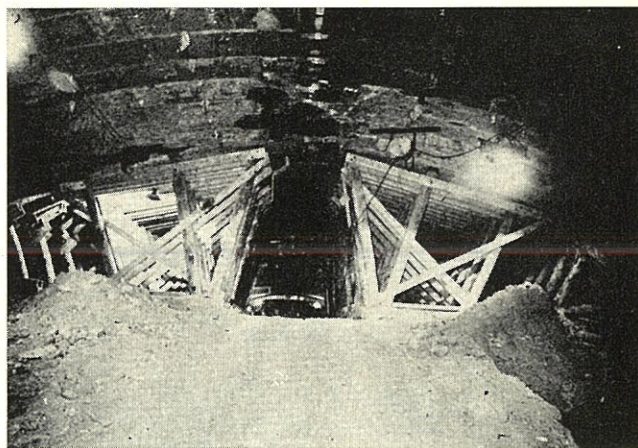


FIG. 37. — Étaieement provisoire de la voûte de la station au passage sous la ligne n° 2.

Il était procédé simultanément à une opération qui s'est révélée longue et délicate, en raison du maintien en exploitation du tunnel, celle de la mise sur tirants du radier de l'ouvrage de la ligne n° 2.

Un dispositif comprenant des vérins plats écartant deux flasques provoquait la mise en tension de fils ancrés dans des blochets en béton armé disposés à la base des piédroits (fig. 38). Ces blochets étaient amarrés dans l'ouvrage de la ligne n° 2 par des fers TOR scellés dans la maçonnerie, à la jonction du piédroit et du radier, à l'aide d'un produit de collage à base de résine Époxy. La traction sur les tirants, espacés tous les 1,10 m ou 0,80 m suivant la position des cintres de renfort du tunnel, était telle qu'elle correspondait à une mise en compression du radier de 45 t au m/l, soit sensiblement la moitié de la poussée du radier.



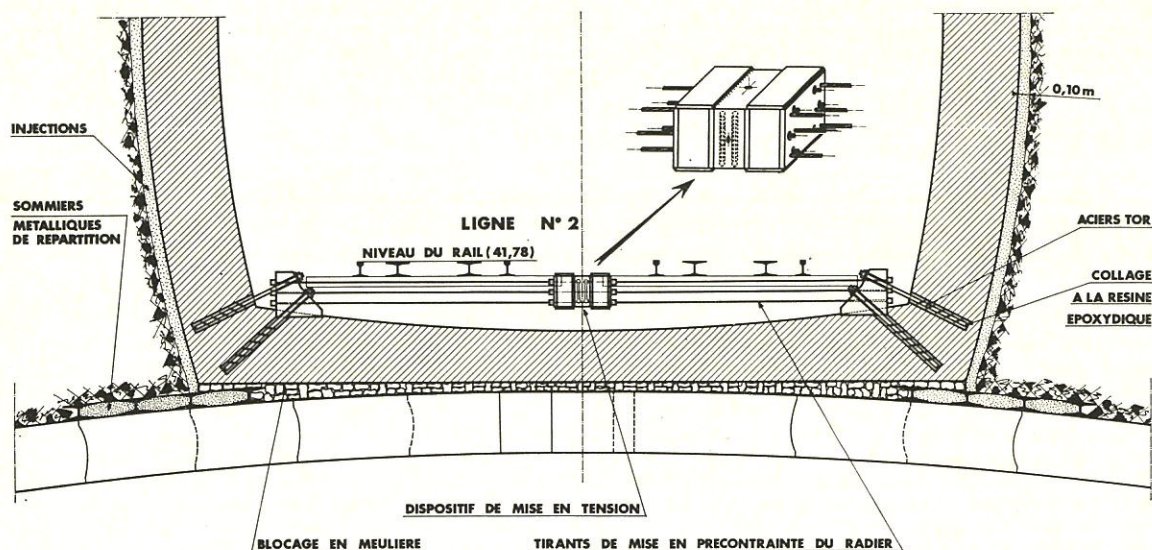


FIG. 38. — Partie Est de la station (175 m). Mise sur tirants du radier de la ligne n° 2.

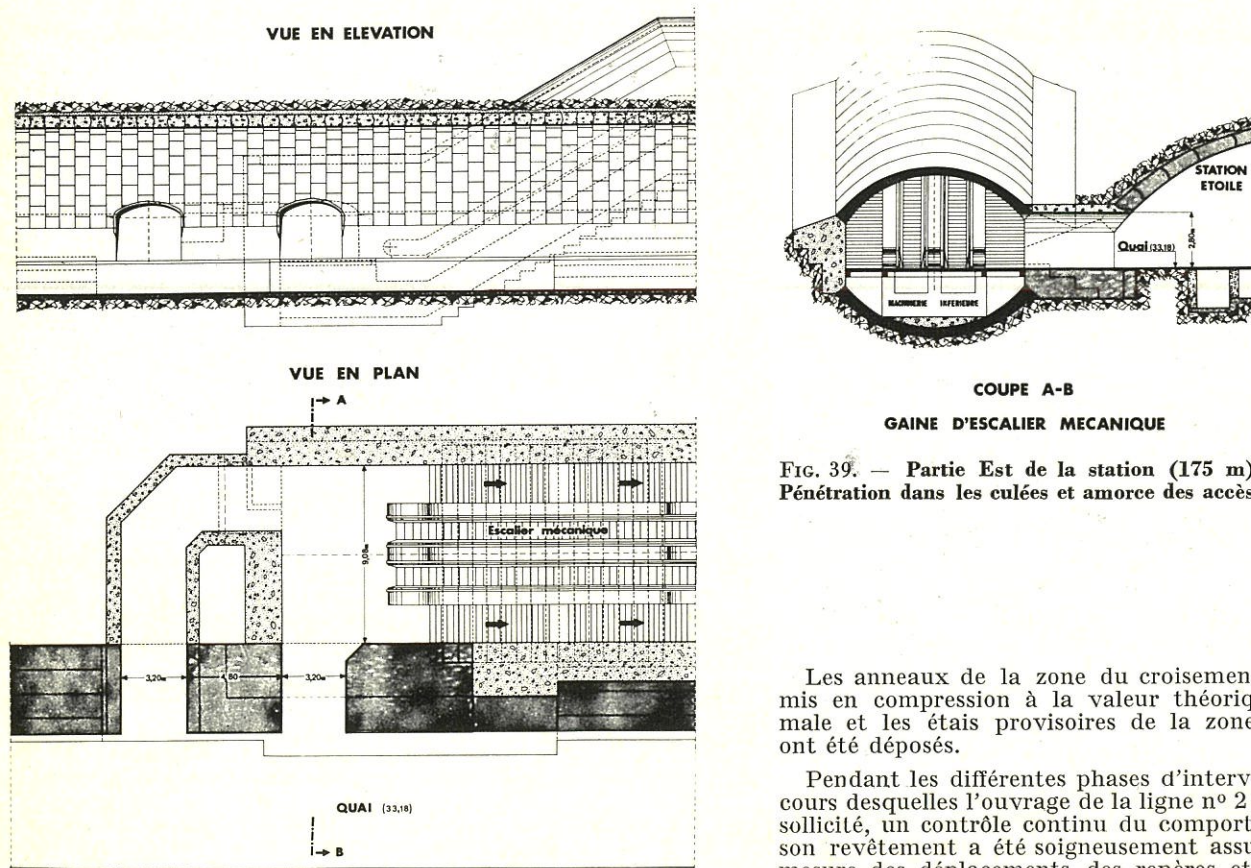


FIG. 39. — Partie Est de la station (175 m). Pénétration dans les culées et amorce des accès.

Au fur et à mesure de la mise en traction des tirants, une injection de coulis fluide était exécutée derrière les piédroits.

Une fois le radier mis en précontrainte, la deuxième partie du programme a pu être entreprise.

Les anneaux de la zone du croisement ont été mis en compression à la valeur théorique maximale et les étais provisoires de la zone centrale ont été déposés.

Pendant les différentes phases d'intervention au cours desquelles l'ouvrage de la ligne n° 2 a été très sollicité, un contrôle continu du comportement de son revêtement a été soigneusement assuré par la mesure des déplacements des repères et les indications des témoins sonores.

Une très légère déformation, de l'ordre du millimètre, des fissures existantes s'est produite mais dans l'ensemble l'opération s'est effectuée sans qu'apparaisse le moindre désordre et, bien entendu, sans jamais interrompre le trafic des trains.



## 8. TRAVAUX ANNEXES DE FINITION

### a) Pénétration dans les culées et amorce des accès :

Au fur et à mesure de l'avancement de la voûte, des pénétrations de 3,20 m de largeur ont été exécutées dans les piédroits et dans les retombées de la voûte. Ces pénétrations devaient donner accès au réseau de couloirs et d'intercommunications desservant les quais de la station « Étoile » du R.E.R. (fig. 39).

Comme il a été précisé plus haut, les parties correspondantes des piédroits, à l'emplacement de ces ouvertures,

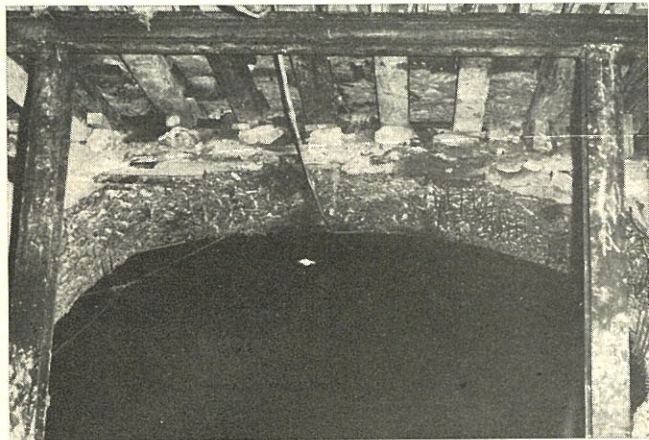


FIG. 40. — Pénétration dans une culée.

avaient été provisoirement maçonnées en moellons pour permettre l'assise des arcs correspondants lors de leur montage. La retombée de voûte intéressée était équipée de voussoirs non armés, de manière à faciliter leur démolition ultérieure (fig. 40).

Les pénétrations ont été faites sans prendre de précautions spéciales du fait de l'excellente liaison des anneaux entre eux (fig. 41).

### b) Parement définitif de la voûte :

Le parement brut de la voûte ne présentant pas un aspect suffisamment satisfaisant, du fait du dessin des joints et du désaffleurement de certains voussoirs, un enduit ciment de 0,04 m d'épaisseur maintenu par une armature métallique a été prévu. Avant d'appliquer cet enduit, il sera nécessaire de procéder au repiquage de la face vue des voussoirs. En effet, malgré les nombreux essais effectués (sous couche en matière plastique ou en sable au fond du moule), il n'a pas été possible d'obtenir au démoulage une surface suffisamment rugueuse et régulière pour permettre l'accrochage direct de l'enduit. Il aurait fallu, en effet, malgré la complication qui s'ensuivait dans la construction des moules, couler le voussoir à l'envers en finissant par le surfacage à la main de l'intrados et non de l'extrados.

### c) Radier et quais :

L'exécution des quais avec la création d'une galerie technique en bordure des voies, ainsi que l'établissement du radier plat sous les voies n'ont présenté aucune difficulté particulière (fig. 42).

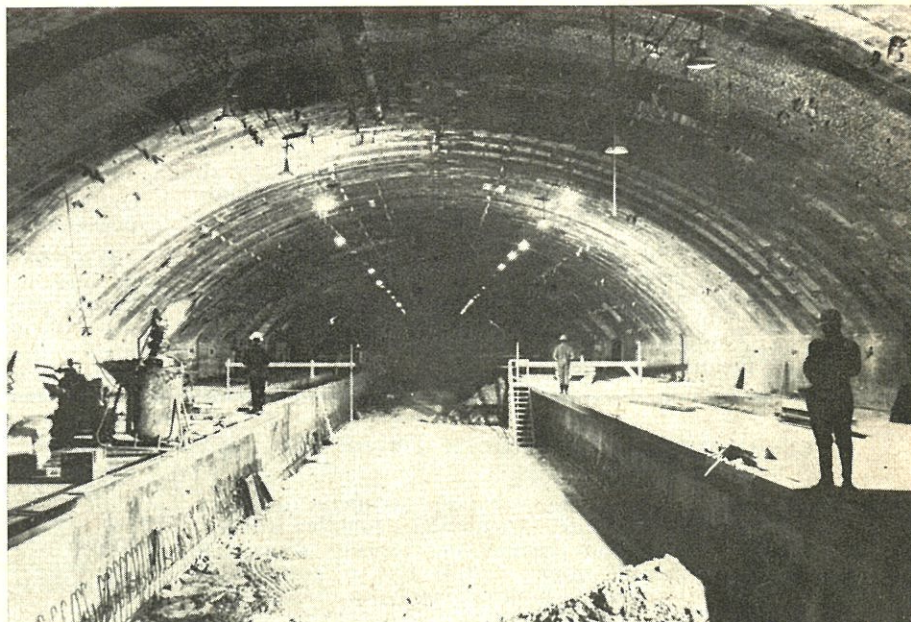
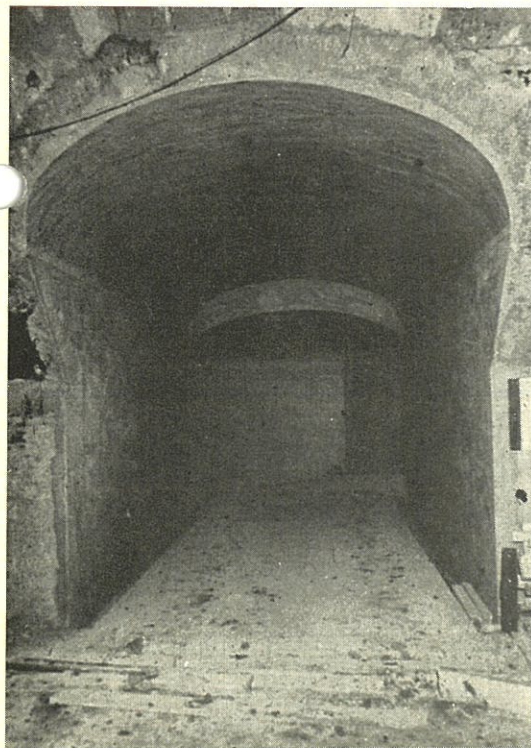


FIG. 41. — Couloir d'intercommunication avec les lignes existantes. Pénétration sur le quai de la station « Étoile » du R.E.R.

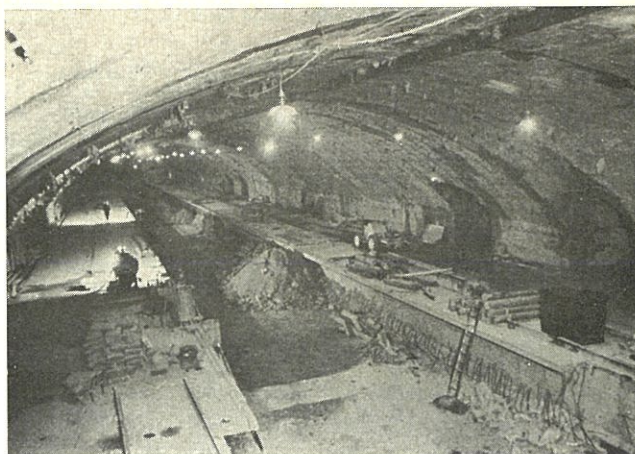
FIG. 42. — Vue générale de la station après construction des galeries latérales.



Avant de poursuivre plus avant les aménagements de la station, il sera procédé, à partir du dégagement souterrain ainsi créé sous la place de l'Étoile, à l'exécution de la plus grande partie des accès et intercommunications remontant vers la surface; en particulier, un passage de 3,50 m de largeur contigu au piédroit a été réservé pour permettre le roulage et l'approvisionnement des différents chantiers à entreprendre à partir de chacune des pénétrations créées dans les piédroits de la station (fig. 43).

L'évacuation des déblais s'opérera dans le décaissement central entre quais et l'ensemble des chantiers sera constamment desservi par le seul puits d'extrémité établi à l'origine pour la construction de la station.

FIG. 43. — Partie Est — Vue générale de la station après exécution des quais.



#### IV — CONCLUSION

##### 1. CALENDRIER DES PRINCIPALES OPÉRATIONS ET DÉLAIS D'EXÉCUTION

En partie Ouest de la station, le puits d'accès principal a été entrepris le 6 juin 1963.

Le souterrain de cette partie de station a été commencé le 30 août 1963 et terminé le 3 juin 1964, soit neuf mois après.

En partie Est, le puits Friedland a été commencé le 10 février 1964. Son fonçage ainsi que l'aménagement de la chambre de départ ont duré jusqu'au 12 mai 1964.

A partir du 21 mai 1964, ont été entreprises, à l'avancement, les culées dont l'achèvement a été effectué le 5 mai 1965.

Le premier anneau de voûte a été monté le 7 octobre 1964.

En fait, le montage des premiers anneaux a demandé un assez long temps pour mettre au point la méthode d'exécution et entraîner les équipes.

La jonction du dernier anneau de la station avec la partie Ouest de la voûte précédemment exécutée a été effectuée le 10 septembre 1965, soit onze mois après le montage du premier anneau, l'avancement global moyen, compris le passage sous la ligne n° 2, étant de vingt anneaux par mois.

##### 2. EFFICACITÉ DES MÉTHODES UTILISÉES

Les travaux ont progressé sans qu'aucun désordre grave n'ait été provoqué. Comme dans tous les travaux souterrains, une décompression des terrains supérieurs n'a pu être complètement évitée. Elle a entraîné la formation de quelques fissures nouvelles, rapidement stabilisées, et surtout l'élargissement d'anciennes fissures existantes.

Dans la partie Ouest, où la voûte a été exécutée par une méthode dérivant des procédés traditionnels, des fissures de l'ordre du centimètre se sont manifestées dans le piédroit Nord de la ligne n° 1 au droit de la

zone de croisement du tunnel et de la culée Sud de la station.

Ces incidents ont été très limités en amplitude. Ils ont demandé une surveillance attentive mais n'ont jamais compromis la sécurité de l'exploitation.

Dans la partie Est où les anneaux de la voûte ont été mis en compression contre le terrain, quelques manifestations sans conséquence se sont produites au cours du développement du chantier.

A deux reprises, au droit des extrémités Est et Ouest des stations des lignes n° 1 et 6 et dans les accès de correspondance voisins, des fissures ne dépassant jamais 1 à 2 mm de largeur sont apparues, provoquant parfois le décollement de carreaux de faïence du revêtement et nécessitant d'opérer localement dans le terrain des injections de complément pour compenser les légers tassements de sol qui s'étaient créés.

Une constatation très systématique a pu être faite. Toutes les fissures relevées étaient situées dans des zones placées à l'aplomb de l'attache de la voûte sur les culées.

Il semble donc que le procédé de remise en compression du terrain supérieur, s'il a donné entière satisfaction dans la partie centrale de la voûte, n'était pas suffisamment efficace en retombée. Cela s'explique du fait de la formation initiale au-dessus des culées d'une voûte naturelle dans le terrain, suffisante pour s'opposer à la propagation d'une décompression si ultérieurement il n'avait pas été procédé à l'excavation à pleine section de la voûte de la station.

Cette dernière fouille venant supprimer l'appui de la voûte naturelle au-dessus des culées provoquait un léger tassement des terrains supérieurs. Il n'était pas possible de s'opposer à cet abaissement, du fait du très faible déplacement vertical de la voûte dans cette zone de retombée et de l'impossibilité de remonter le terrain.

Dans l'ensemble, ces quelques imperfections d'ampleur très limitée ont été sans conséquence sur la solidité de masse des ouvrages et sur la sécurité de l'exploitation. On peut donc affirmer que les procédés choisis pour passer sous un ensemble d'ouvrages aussi important se sont finalement soldés par une complète réussite.



## DISCUSSION

M. le PRÉSIDENT. — Je crois qu'il m'appartient de remercier M. LUPAC pour cette très brillante conférence qui vous a donné une vue très complète des travaux réalisés sous la place de l'Étoile. Il n'a pas spécialement insisté sur les difficultés qui se sont présentées et c'est à son honneur.

Je crois que ce que l'on peut retenir de cette conférence, c'est d'abord que le gros œuvre de la station « Étoile » est complètement terminé. C'est la première fois à Paris que l'on réalise en souterrain une voûte de 21 m de portée sous un réseau d'ouvrages en exploitation sans interrompre la circulation des trains, ne serait-ce que quelques minutes.

Je sais bien que nous avons été aidés par le site géologique. Les marnes et caillasses sèches sont un matériau très favorable à la mise en œuvre du procédé choisi. Par contre, nous avons été très gênés par la présence de trois lignes de métro sur nos têtes et en particulier la ligne n° 2. A cette occasion, je dois remercier MM. KÉRISEL et CAQUOT, grâce auxquels nous avons pu surmonter ces difficultés.

Celles-ci ont été également surmontées grâce à la qualité des entreprises qui ont eu à réaliser les travaux. Je sais qu'on a coutume, dans l'exécution, de louer la bonne collaboration qui règne entre maître d'œuvre et entrepreneurs. Je crois qu'ici elle a été tout particulièrement remarquable, qu'il s'agisse des entreprises Billiard, Société Générale d'Entreprises et C.I.T.R.A. pour la partie Ouest, ou des entreprises Moinon, Dumesny et Chapelle pour la partie Est de la station.

Je voudrais insister sur les procédés nouveaux de construction de ces stations, utilisés avec un très grand succès grâce à la remise en compression du terrain aussi près que possible du front d'attaque. Ces procédés simples se sont avérés d'une mise en œuvre facile et efficace, car si l'on a bien signalé quelques fissures dans les couloirs ou dans les stations qui se trouvaient au-dessus, ces fissures ont été extrêmement limitées.

Je crois que c'est tout de même un tour de force d'avoir réalisé cette opération sans plus d'incidents et ce tour de force est dû en grande partie aux procédés mis en œuvre par les entreprises Moinon, Dumesny et Chapelle.

Je pense que ces problèmes de recompression du terrain après ouverture des fouilles sont essentiels dans les travaux souterrains, en site urbain et particulièrement à Paris et je crois que, pour conclure, j'inviterai volontiers les entrepreneurs à réfléchir en vue de nous aider à trouver des moyens pour mettre le terrain en

compression dans des conditions favorables afin d'éviter les tassements en surface.

Maintenant, si vous voulez bien, nous allons procéder à la discussion et M. LUPAC se fera un plaisir de répondre aux questions que vous voudrez bien lui poser.

M. CHAUMONT. — Vous avez parlé des tassements qui se sont produits dans les stations des lignes n°s 6 et 2 : est-ce que dans les immeubles bordant la place de l'Étoile, il y a eu également quelques désordres ?

M. LUPAC. — Les immeubles étaient relativement éloignés par rapport aux lignes n°s 2 et 6.

M. le PRÉSIDENT. — J'ajouterai un mot, c'est que si cette station, pour le gros œuvre, est achevée, tout n'est pas fini car il faut régler les problèmes d'accès et d'intercommunications entre la nouvelle ligne et les lignes existantes. Je préciserai que cette station a coûté 30 millions de nouveaux francs et que les ouvrages d'accès coûteront 70 millions de nouveaux francs.

M. KÉHRER. — Vous nous avez dit que les voussoirs étaient armés : quelle est l'utilité des armatures ?

M. LUPAC. — Ces armatures, au départ, quand l'anneau est encore articulé, ne servent à rien, mais une fois que l'anneau est réglé et rendu monolithe, après polymérisation de la résine appliquée sur les articulations, ces armatures assurent la continuité. D'autre part, les voussoirs sont croisés, donc il y a une certaine interpénétration et la voûte travaille comme une coque. En raison des efforts dissymétriques, il fallait armer la voûte.

M. le PRÉSIDENT. — Par le biais du croisement du voussoir, tout se passe finalement comme s'il y avait une certaine continuité des armatures.

M. RIFUS. — Avez-vous des possibilités d'utilisation de cette méthode dans d'autres terrains ?

M. LUPAC. — Dans un terrain moins favorable peut-être faudrait-il prendre des précautions supplémentaires.

M. le PRÉSIDENT. — Il faudrait commencer par le rendre favorable !

Il est évident que l'on dispose actuellement de techniques qui permettent de donner à ces sables une certaine cohésion et une résistance à l'écrasement.

M. BARBOT. — Est-ce que vous avez examiné la répercussion sur les prix entre la méthode traditionnelle et la méthode perfectionnée ?



M. LUPAC. — C'est une question à laquelle je m'attendais. La répercussion sur les prix, on peut l'analyser dans une première étape, celle de l'application à la station « Étoile » qui représente une étape provisoire.

On peut dire en gros que la différence de coût de l'ouvrage de la partie Ouest par les méthodes classiques, par rapport à la partie Est par les méthodes perfectionnées, est de l'ordre de 10 %, ceci dans un chantier à caractère prototype. Il a fallu bien des mises au point au début. Il y a également à tenir compte du fait que l'engin qui servait à monter les voussoirs ne s'est amorti que sur 175 m, du fait que l'on ne disposait que d'un puits, parce que sur la place de l'Étoile on n'a pas pu trouver un autre emplacement. Tous les mouvements devaient être faits par ce seul puits et, par conséquent, il y a eu des pertes de temps.

Au point de vue rendement on doit donc pouvoir gagner sur les prix de la station « Étoile ».

M. le PRÉSIDENT. — Je crois qu'on peut dire que, dans ce type de terrain, le procédé est assez nettement moins cher qu'un autre et qu'il permet de réaliser des ouvrages avec une sécurité un peu plus grande que le procédé traditionnel. Il ne s'agit pas de faire de procès, mais la sécurité qu'on obtient avec les voussoirs mis en compression contre le terrain est un peu plus grande qu'avec les procédés classiques et, en plus, a l'avantage d'être légèrement meilleur marché. Le bénéfice est de l'ordre de 10 %.

M. de VIARIS. — Que va-t-il advenir du puits ? Est-ce qu'il garde de l'utilité dans l'ouvrage définitif ?

M. LUPAC. — Le grand puits de treize mètres, moyennant certains aménagements, va être utilisé partiellement comme ouvrage d'aération ; l'autre sera sans doute bouché.

M. KÖHRER. — Qu'est-il prévu comme remontée pour les voyageurs ?

M. le PRÉSIDENT. — Une série d'escaliers mécaniques et je vous dirai ceci : sur le métro, actuellement, il doit exister 90 escaliers mécaniques ; la station « Étoile » en comportera une quarantaine, la station « Auber » 60 ou 70, ce qui veut dire que nous allons être amenés dans les jours qui viennent à passer commande d'environ 250 escaliers mécaniques, c'est-à-dire près de trois fois ce qui existe actuellement sur le réseau.

M. BATARD. — Avez-vous prévu une liaison entre le piédroit et la voûte ?

M. LUPAC. — Les voussoirs de retombées de la voûte sont simplement collés à l'époxy sur les piédroits.

M. le PRÉSIDENT. — Pas d'autres questions ?

Non, je vais donc vous remercier d'être venus aussi nombreux et remercier encore une fois M. LUPAC pour cette remarquable conférence.



