

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE  
**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**  
SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 – 45018 Orléans Cédex – Tél.: (38) 63.00.12

**TRAVAUX RÉALISÉS**  
**SOUS LA NAPPE PHRÉATIQUE**  
**A PARIS**  
**(Étude documentaire)**

par

Ph. DIFFRE



**Service géologique régional BASSIN DE PARIS**

65, rue du Général-Leclerc, 77170 Brie-Comte-Robert – Tél.: 405.01.46

**Annexe PARIS**

17-19, rue de la Croix Nivert, 75015 Paris – Tél.: 306.36.54

**75 SGN 237 BDP**

Brie-Comte-Robert, août 1975

## SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	
1. METRO-RESEAU URBAIN . . . . .	2
2 . METRO-RESEAU EXPRESS REGIONAL . . . . .	8
2.1 - Traversée de la Seine à proximité du pont de Neuilly	8
2.2 - Section Pont de Neuilly-Auber . . . . .	8
2.3 - Station Auber . . . . .	9
2.4 - Section Auber-Nation . . . . .	11
2.5 - Epuisements dans les postes en service . . . . .	11
3 . GALERIES . . . . .	13
3.1 - Emissaires et collecteurs . . . . .	13
3.2 - Galerie P.T.T. St Michel-Châtelet . . . . .	13
4. BATIMENTS SOUTERRAINS . . . . .	17
4.1 - Banque de France . . . . .	17
4.2 - Station de pompage de la Centrale E.D.F. de Vitry.	22
4.3 - Bâtiment souterrain de l'UNESCO . . . . .	24
4.4 - Sous-sol de l'immeuble 16, rue J. César . . . . .	24
4.5 - Sous-sol de l'ensemble Bercy-Rapée . . . . .	25
4.6 - Sous-sol de l'immeuble C.F.P. Total à Levallois .	27
4.7 - Sous-sol de l'immeuble S.C.A.C. à Puteaux . . . . .	29
4.8 - Sous-sol de l'immeuble U.I.F. à Neuilly . . . . .	29
4.9 - Sous-sol de l'immeuble E.D.F. à Issy-les-Moulineaux	32
4.10 - Sous-sol du Centre culturel Beaubourg . . . . .	32
4.11 - Forum des Halles . . . . .	34

<b>5. VOIES SOUTERRAINES . . . . .</b>	<b>36</b>
5.1 - Voie express rive droite - Passage Cours la Reine-Cours Albert 1er . . . . .	36
5.2 - Boulevard périphérique - Traversée du Bois de Boulogne.	37
<b>6. PARCS DE STATIONNEMENT . . . . .</b>	<b>38</b>
6.1 - Parking Harlay . . . . .	38
6.2 - Parking Haussmann-Berri . . . . .	38
6.3 - Parking Saint-Germain . . . . .	40
6.4 - Parking Velpeau . . . . .	40

## TRAVAUX REALISES SOUS LA NAPPE PHREATIQUE A PARIS

### FIGURES

- Fig. 1 - Relation entre le niveau de la Seine et les apports d'eau horaires dans deux postes d'épuisement R.A.T.P.
- Fig. 2 - Relation entre le niveau de la Seine et le débit moyen mensuel de l'ensemble des postes d'épuisement R.A.T.P.
- Fig. 3 -- Variation du volume d'eau déversé annuellement en égoût dans Paris par les postes d'épuisement de la R.A.T.P.
- Fig. 4 - R.A.T.P. - Réseau urbain - Chambres d'eau recueillant plus de  $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$ .
- Fig. 5 - R.E.R. Station Auber
- Fig. 6 - R.E.R. Souterrain est de la station Auber
- Fig. 7 - Galerie P.T.T. sous la Seine entre St Michel et Chatelet
- Fig. 8 - Salle souterraine de la Banque de France
- Fig. 9 - Amphithéâtres souterrains des Arts et Métiers
- Fig. 10 - Sous-sol de l'immeuble du journal "L'Intransigeant"
- Fig. 11 - Station de pompage de la Centrale de Vitry
- Fig. 12 - Ensemble Bercy-Rapée.

Fig. 13 - Immeuble Total C.F.P. à Levallois

Fig. 14 - Immeuble S.C.A.C. à Puteaux

Fig. 15 - Immeuble U.I.F. à Neuilly s/Seine

Fig. 16 - Aménagement du quartier des Halles - Forum R.E.R.

## INTRODUCTION

Un grand nombre d'ouvrages souterrains a été réalisé sous Paris et ceci depuis fort longtemps (galeries, carrières, caves, cryptes, canalisations), mais la plupart ont été creusés à quelques mètres seulement de profondeur dans des terrains secs.

Les travaux exécutés en-dessous du niveau phréatique sont relativement peu nombreux. Avant la mise au point des traitements par injection et des parois moulées ou préfabriquées, il était difficile et coûteux de descendre dans les parties noyées des alluvions de la Seine, des marnocalcaires (Saint-Ouen et Marnes et caillasses) et des sables (Beauchamp et Yprésien).

Les premiers ouvrages immergés importants de la capitale sont dus à la R.A.T.P. (ligne n° 1 inaugurée en 1900).

Les ouvrages les plus profonds sous la nappe ont été réalisés pour les émissaires du réseau d'assainissement.

L'aménagement de sous-sols profonds "habitables" est plus récent. La première réalisation de ce type a été la salle souterraine de la Banque de France, descendue à la cote + 10 NGF, à plus de 10 m sous la nappe, en 1927.

L'amphithéâtre en sous-sol du Conservatoire des Arts et Métiers (fig.19), réalisé en 1933, rue Saint-Martin (double coque étanche, fond de l'ouvrage à + 16,7 à 17 m sous le sol naturel, 6 m en-dessous de la nappe), et les sous-sols du journal "l'Intransigeant" (fig.20) réalisés en 1930 (5 sous-sols, fond de l'ouvrage à + 18 à 18 m sous le sol naturel, 6 m en dessous de la nappe) ont été également des ouvrages souterrains pionniers. De nombreux ouvrages, parkings, tunnels du RER, atteignent maintenant cette profondeur. Les stations du RER récentes ou en cours de construction détiennent le record : radier en-dessous du niveau de la mer, à 18 m sous la nappe à la station Auber.

## - I. METRO - RESEAU URBAIN

L'ensemble du réseau urbain de petit gabarit est relativement près de la surface. La voûte de la plupart des voies et des stations se trouve à quelques mètres sous la chaussée. Les tronçons profonds sont exceptionnels. Le point le plus profond par rapport au sol est situé dans la colline de Montmartre entre Abbesses et Lamarck, à 63 m sous la rue Norvins. Le point le plus bas par rapport au niveau de la mer est à la cote + 10 entre Concorde et Invalides.

Moins de la moitié des tunnels est creusée en-dessous du niveau de la nappe (sous la Seine ou à proximité, passages inférieurs au croisement de lignes). L'abaissement du niveau de la nappe depuis l'époque de la construction fait qu'actuellement une bonne partie de ces lignes est maintenant hors d'eau..

D'une manière générale, la méthode qui avait été adoptée au début du siècle consistait à revêtir les tunnels d'une maçonnerie très soignée, aussi étanche que possible, sans toutefois prétendre à l'étanchéité absolue, et à installer un dispositif d'exhaure aux points les plus bas. Les eaux recueillies par un drain longitudinal disposé sous le ballast sont accumulées dans des "chambres d'eau" situées aux points les plus bas et rejetées en égoût par des groupes motopompes électriques à fonctionnement automatique.

Les apports, relativement faibles par rapport à la longueur de galeries immergées, varient suivant les saisons et le niveau de la Seine (Fig. 1 et 2).

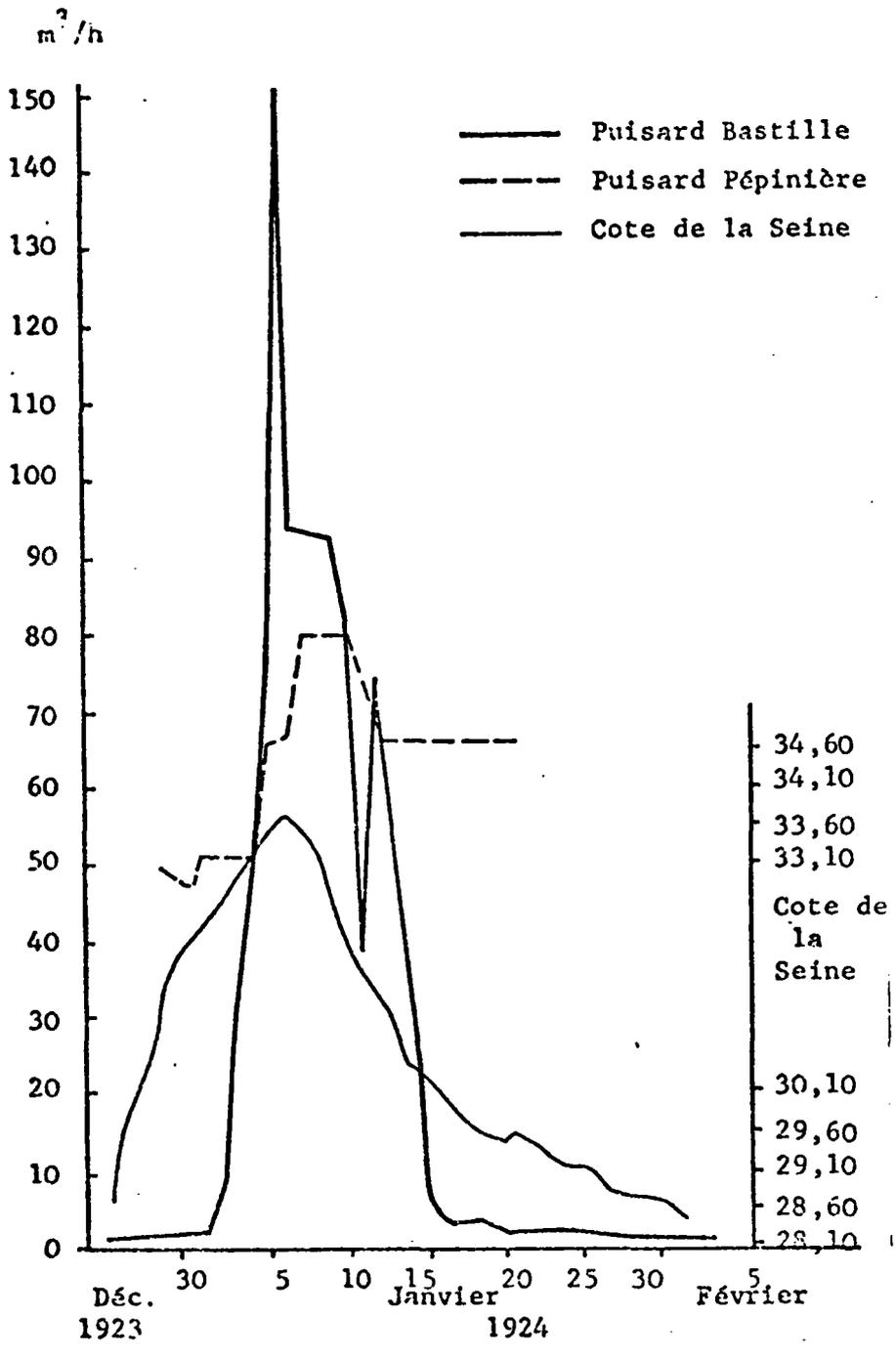


Fig. 1 - Relation entre le niveau de la Seine et les apports d'eau horaires dans 2 postes d'épuisement R.A.T.P. proches et éloignés du fleuve (d'après A.BOIS 1948)

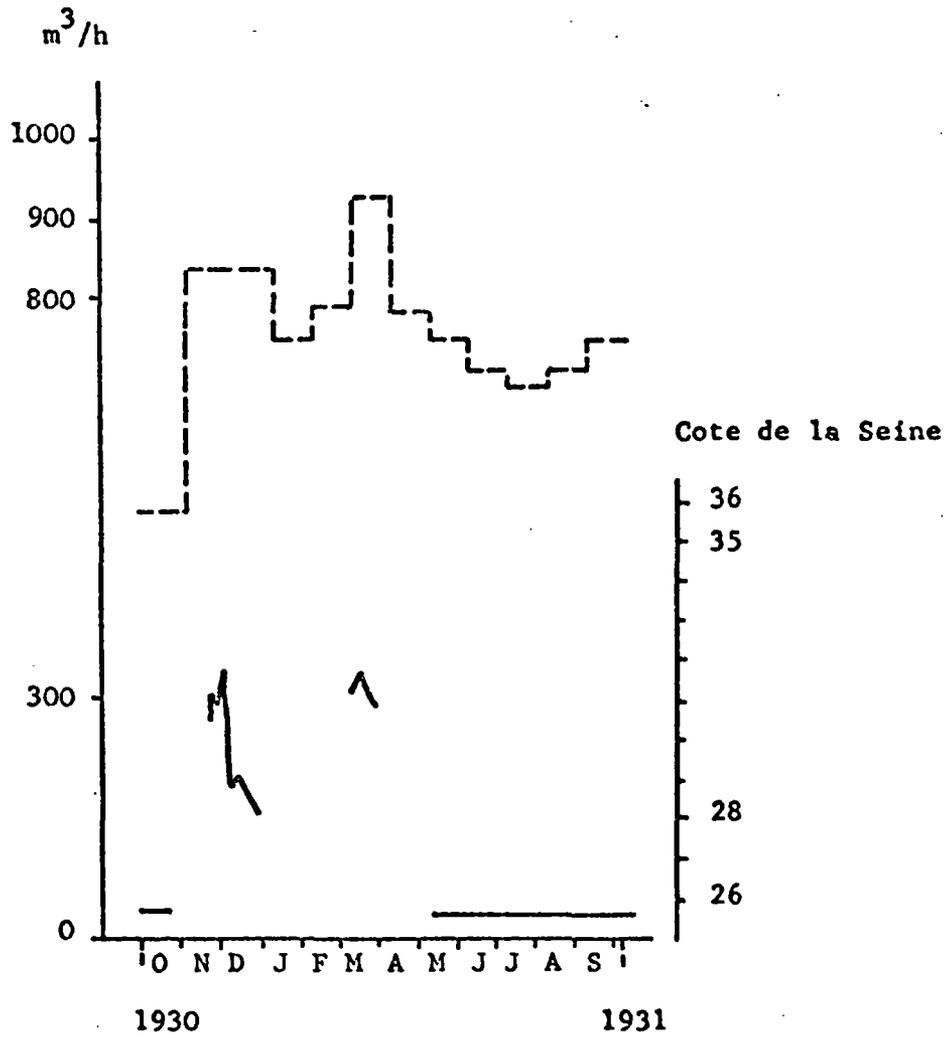


Fig. 2 - Relation entre le niveau de la Seine et le débit moyen mensuel de l'ensemble des postes d'épuisement R.A.T.P. (d'après A. BOIS 1948)

Le graphique de la figure 3 indique les volumes déversés dans les égouts de la Ville de Paris depuis 1924. Ces débits sont augmentés d'un quart environ par les déversements en Seine et dans les égouts des communes de banlieue.

En 1974, le débit refoulé dans les égouts de la Ville de Paris a été de l'ordre de 2,5 millions  $m^3$ , le débit total prélevé dans la nappe phréatique sur l'ensemble du réseau ayant été de l'ordre de 3 millions de  $m^3$ , soit 360  $m^3/h$  environ.

En 1946, les postes d'épuisements ayant les débits les plus importants en périodes de crue étaient ceux de Diderot (600  $m^3/h$ ), Bercy (196  $m^3/h$ ), Cité (195  $m^3/h$ ), Strasbourg-St Denis (172  $m^3/h$ ) et St Martin (160  $m^3/h$ ), situés dans l'ancien chenal de la Seine, et Marcel-Sembat (590  $m^3/h$ ) dans les alluvions sur la craie de la boucle de Boulogne).

La figure 4 indique les chambres d'eau ayant reçu plus de 0,1  $m^3/h$  en 1967.

Les traversées de la Seine en souterrain ont demandé des traitements spéciaux. Pour la première traversée, ligne n° 4 entre Chatelet-Cité-St Michel en 1909, les alluvions ont été congelées par des tubes-sondes, puis les travaux poursuivis par caissons.

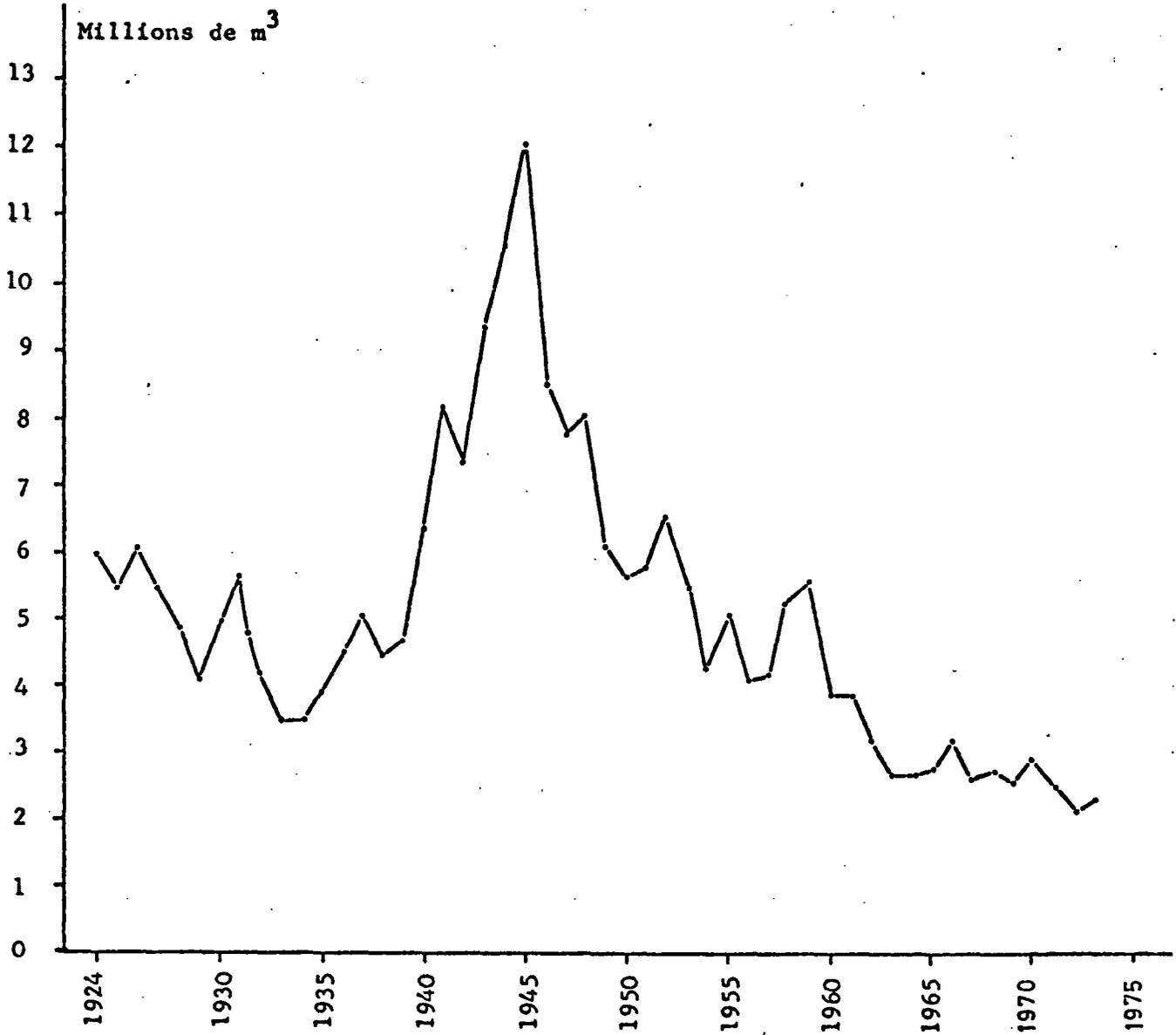


Fig. 13 - Variation du volume d'eau déversé annuellement en égout dans Paris par les postes d'épuisement de la R.A.T.P. (d'après A.BOIS 1948. Courbe prolongée d'après les valeurs communiquées par la R.A.T.P. Service des épuisements)

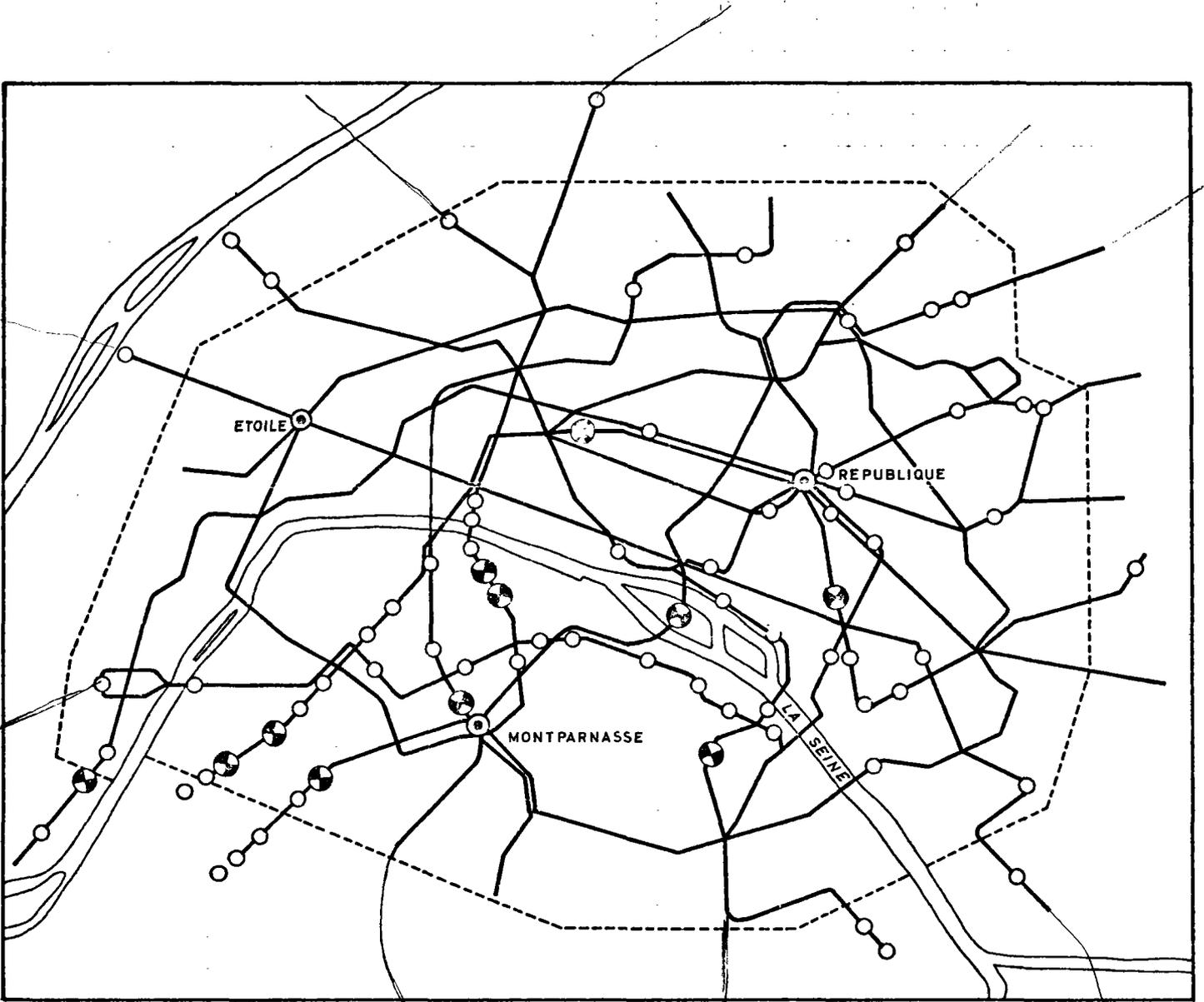


Fig. 4 - R.A.T.P. - Réseau urbain

- Chambre d'eau recueillant de 0,1 m<sup>3</sup>/h à 10 m<sup>3</sup>/h
  - ⊗ Chambre d'eau recueillant plus de 10 m<sup>3</sup>/h
- (débits moyens en 1967)

## 2 . METRO - RESEAU EXPRESS REGIONAL

### 2.1 - Traversée de la Seine à proximité du pont de Neuilly

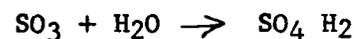
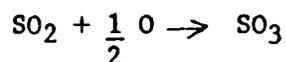
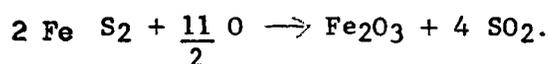
Pour ce tronçon sous-fluvial de 220 m de long, on a utilisé des caissons immergés. Les éléments amenés par flottaison ont été immergés dans une souille préalablement draguée et descendus à leur cote définitive (5 m plus bas) par havage à l'air comprimé. Il s'agissait de sept caissons de 8,90 m de largeur intérieure et 6,20 m de hauteur intérieure, d'une longueur variant de 21 à 35 m, en béton précontraint dans les trois dimensions.

Pour éviter la décompression du banc de sable qui aurait pu provoquer un affaissement des appuis du pont voisin, un masque de protection d'environ 3 m d'épaisseur a été réalisé sur toute la longueur des couches du Calcaire grossier et de Sables yprésiens jusqu'au niveau des Fausses glaises, puis l'intervalle existant entre le caisson et les parois de la tranchée a été rempli à l'aide de glaise pour éviter les remontées de sables.

### 2.2 - Section Pont de Neuilly-Auber

Sous la porte Maillot, les travaux ont provoqué un réchauffement important de la nappe des Sables yprésiens (80°C), avec un abaissement inquiétant du pH.

La réaction chimique exothermique responsable semble avoir eu lieu en dehors de la nappe dans la zone asséchée par l'air comprimé. Il s'agissait sans doute d'une combustion de lignites riches en pyrite, l'allumage ayant pu être provoqué par le frottement d'outils métalliques contre des bancs siliceux du Lutétien susjacent. Le grillage des pyrites a pu aboutir à la formation d'acide sulfurique



### 2.3 - Station Auber

Dimensions :

- longueur 228 m, hauteur 20 m, largeur 40 m, sol + 34 NGF, radier à 36 m au-dessous de la rue Auber - 2 NGF.

Terrains : alluvions anciennes, Sables de Beauchamp, Marnes et caillasses, Calcaire grossier.

L'ouvrage se développe dans la nappe sur presque toute sa hauteur.

Pour étancher le terrain encaissant les galeries de travail latérales et les piedroits de l'ouvrage définitif, des injections ont été faites dans des faisceaux de forages à partir d'une galerie de faite au niveau de la clé de voûte et partiellement hors d'eau.

La partie inférieure des piedroits et le radier de la station ont été injectés par des forages à partir des galeries latérales. Les alluvions ont été injectées de gel à l'acétate, les Sables de Beauchamp ont été injectés à la résine phénoplaste, les Marnes et caillasses par de l'argile-ciment. (fig.5)

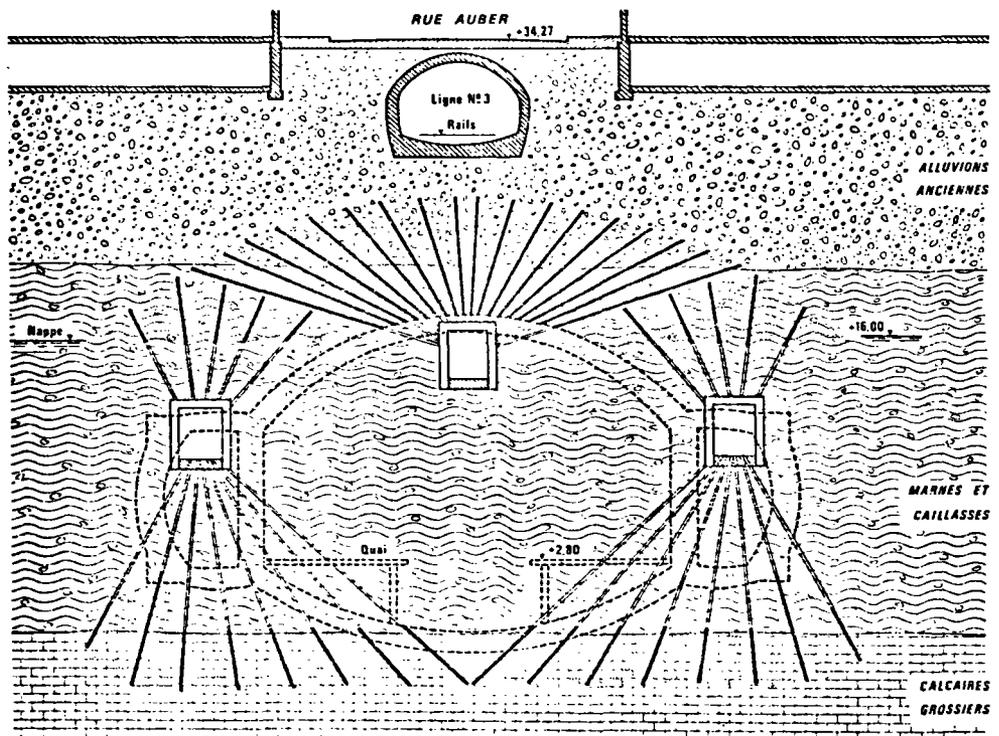
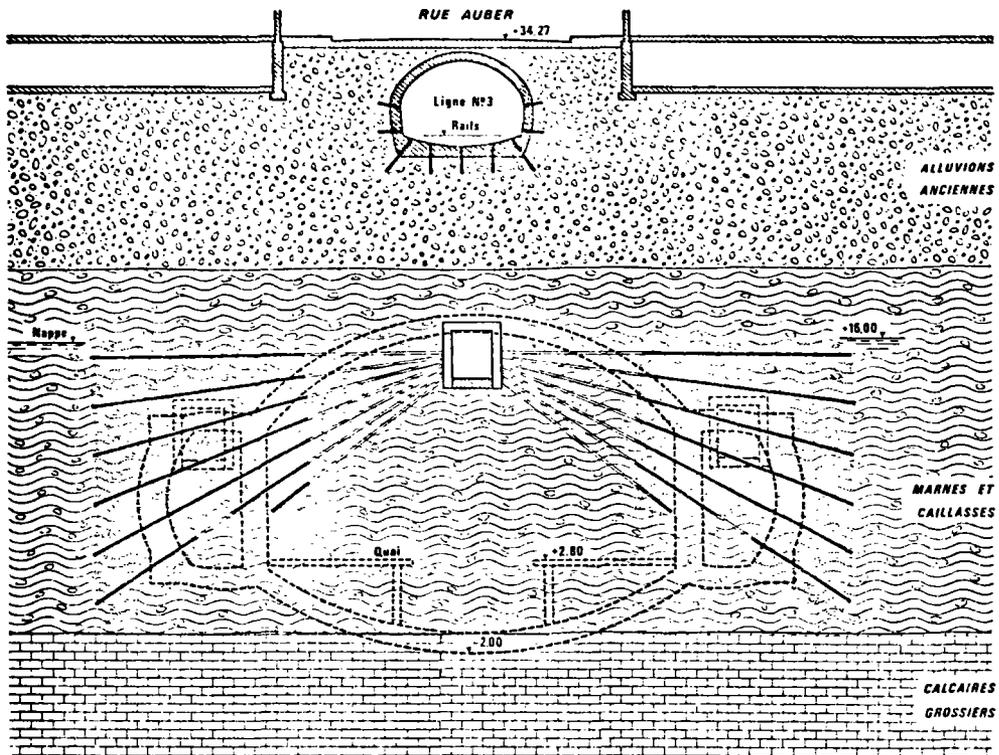


Fig. 5 - R.E.R. Station Aubier - débit résiduel pendant les travaux : 40 m<sup>3</sup>/h (document SOLETANCHE)

Pour la voie de garage, prolongement de la station vers l'Est, le terrain a été injecté à partir de la galerie de faite. (fig.6)

Dans la station elle-même, le débit d'exhaure a été de 40 m<sup>3</sup>/h en moyenne entre août 1964 et janvier 1968.

Dans la voie de garage, il a été de 100 m<sup>3</sup>/h en moyenne entre octobre 1966 et octobre 1967.

#### 2.4 - Section Auber-Nation

Le tunnel se développe entièrement dans la nappe (au maximum 16 m de charge), les rails étant situés entre 20 et 30 m de profondeur.

Entre Bourse et Châtelet, la galerie se situe dans les Marnes et caillasses, entre Châtelet et Gare de Lyon elle a été creusée dans le Calcaire grossier surtout, sans injection systématique avec épuiement à l'avancement, de même qu'entre Gare de Lyon et Nation (Marnocalcaires et Sables de Beauchamp) où les débits de certains postes provisoires ont atteint 70 m<sup>3</sup>/h.

#### 2.5 - Epuiements dans les postes en service sous le RER

En 1974, les débits aux trois principaux postes de drainage : Courteline (station Nation), Boudreau (station Auber) et Maillot (Porte Maillot) ont été respectivement de 38.800 m<sup>3</sup>, 113.530 m<sup>3</sup> et 58.000 m<sup>3</sup>, ce qui correspond à un débit horaire de 25 m<sup>3</sup>/h environ pour l'ensemble du RER en service à cette date.

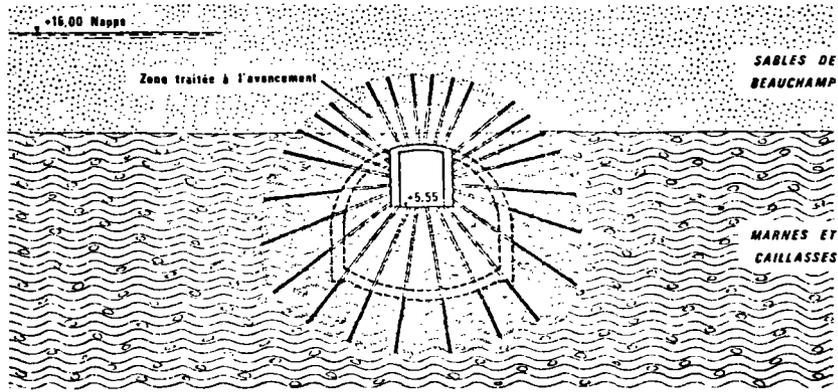


Fig. 6 - R.E.R. Souterrain est d'Auber - débit résiduel pendant les travaux : 100 m<sup>3</sup>/h (document SOLETANCHE)

### . 3. GALERIES

#### .3.1 - Emissaires et collecteurs

Les grands collecteurs du réseau d'assainissement de Paris sont des ouvrages circulaires ou ovoïdes, de plus de 4 m de diamètre, situés sur certains tronçons à plusieurs dizaines de mètres sous le sol en-dessous du niveau de la nappe. Le collecteur Marceau passe à 40 m sous l'Etoile. Le nouvel émissaire Clichy-Achères, branche d'Argenteuil, se développe à travers les Sables de Beauchamp et les Marnes et caillasses à 60 m de profondeur par endroits. Pendant les travaux, les débits d'exhaure ont dépassé 500 m<sup>3</sup>/h sous Sartrouville.

#### .3.2 - Galerie P.T.T. sous la Seine entre St Michel et Châtelet (1)

Cette galerie, de 2,2 m de diamètre et 626 m de longueur, a été exécutée en 1955 à l'air libre, après consolidation et étanchement du terrain. (fig.7)

Base du radier à la cote + 7 NGF.

(1) BARDOUT (1956) - Construction d'une galerie téléphonique sous la Seine.  
Annales I T B T P n° 106 - Octobre 1956

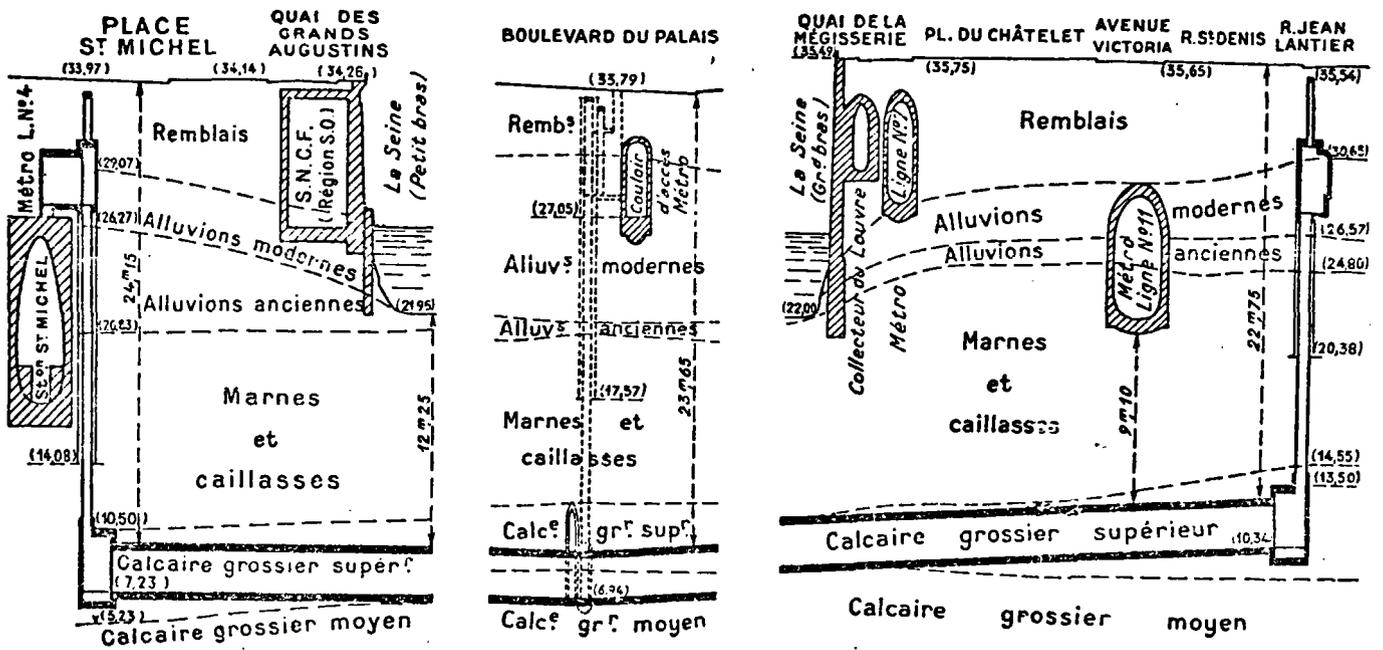


Fig. 7 - Galerie P.T.T. sous la Seine entre Saint-Michel et Chatelet (d'après BARDOUT 1956)

La nappe des alluvions a été rencontrée à la cote + 27,1 sous la place St Michel, en période de hautes eaux (22 mars 1955), à la base des alluvions modernes.

Sur la rive droite, elle se tenait vers la cote + 25,5, dans les alluvions anciennes.

Les puits d'accès ont été réalisés par 32 pieux sécants, de 20 m de longueur, 0,50 m de diamètre, forés à percussion, et se recoupant entre eux sur 0,10 m.

Un pieu sur quatre était équipé sur toute sa hauteur d'une tube de 65 mm, destiné au traitement des terrains sous-jacents, par injection sous l'enceinte des pieux. Le traitement a été commencé par une tranche de 2 m de hauteur immédiatement sous l'enceinte des pieux. Cette tranche a été reperforée et chaque forage a été descendu 2 m en-dessous du fond du puits dans le Calcaire grossier supérieur. L'injection a été faite ensuite en remontant par tranches successives de 2 m. Le coulis, composé de 50 kg de ciment de laitier au clinker 100-160, de 50 kg d'argile, de 20 l de Sable de Clamart et de 100 l d'eau, était injecté jusqu'au refus dans le Calcaire grossier et à moins de 10 kg/cm<sup>2</sup> dans les marnes pour éviter les claquages.

Les infiltrations dans le puits étaient très faibles après les terrassements (quelques m<sup>3</sup>/h).

La galerie, elle-même, a été creusée dans le Calcaire grossier supérieur constitué de bancs plus ou moins fissurés, séparés par des lits de bousins; à partir du front de taille, des injections ont été réalisées par deux auréoles concentriques de forages divergents de 25 m de longueur et 65 mm de diamètre, ce qui permettait l'excavation sur 20 m en laissant un bouchon de protection de 5 m.

Le débit des venues d'eau rencontrées était mesuré à chaque phase de traitement. Il était maximum pour le premier sondage de l'aurole la plus longue exécuté avant toute injection : 10 à 25 m<sup>3</sup>/h selon les phases. Après traitement, le débit maximum total sur 626 m de galerie s'élevait à 64 m<sup>3</sup>/h, soit 100 l/h au mètre en moyenne.

#### .4 . BATIMENTS SOUTERRAINS

##### .4.1 - Salle souterraine de la Banque de France (1924-27)

Dimensions : 108 x 102 m,  
                  hauteur hors oeuvre 6,85 m  
                  toit soutenu par 714 piliers.

Le fond de la salle est à la cote NGF + 10, à 27 m en-dessous du niveau de la rue Croix des Petits Champs. Elle était entièrement dans la nappe à l'époque de sa construction.(fig.8)

Terrains : remblais de + 36 à + 31  
          alluvions de + 31 à + 24  
          marnes et caillasses de + 24 à + 22  
          calcaire grossier à partir de + 22

L'ouvrage est entièrement creusé dans le Calcaire grossier, l'épaisseur du calcaire au-dessus de la salle est de 5,15 m et au-dessous de 3,5 m.

Les travaux furent réalisés de façon que l'ouvrage en béton armé réalisé à la place du calcaire enlevé vienne recevoir et transmettre sur les bancs sous-jacents toutes les charges dues aux terrains. (1)

(1) SCLEEVEIS E., 1933 - La salle souterraine de la Banque de France.  
TRAVAUX, Décembre 1937.

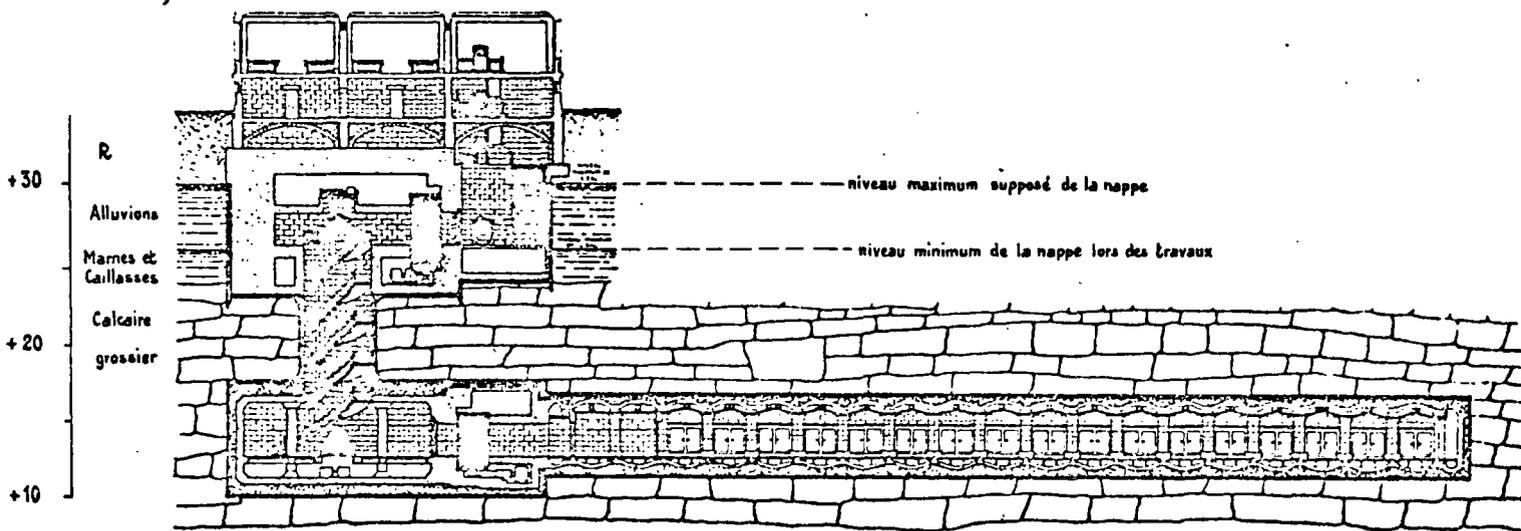


Fig. 18 - Salle souterraine de la Banque de France (Document Sainrapt et Brice)

Eléments du gros oeuvre :

- écran en béton armé exécuté contre le plafond, les parois et le sol, d'une épaisseur de 0,15 m à 0,24 ancré au moyen de saignées pratiquées dans le calcaire ;
- piliers en béton, en files parallèles, écartés les uns des autres de 3,54 m ;
- série de voûtes à extrados horizontal tant à la partie supérieure qu'à la partie inférieure ;
- bourrage en béton ;
- revêtement intérieur d'étanchéité de Callendrite hydrofuge ;
- deuxième système de voûte dont l'extrados est plaqué contre l'intrados du premier revêtement après interposition de la chape de Callendrite et destiné à résister seul aux pressions de l'eau (calculé en supposant la nappe à la cote + 30,50) ;
- faux plafond et un plancher.

Les piliers ont été entourés d'une colonne laissant un vide pour l'écoulement des eaux de condensation qui se forment dans le faux plafond. Ces eaux recueillies dans le caniveau inférieur sont rejetées par pompage à l'égout.

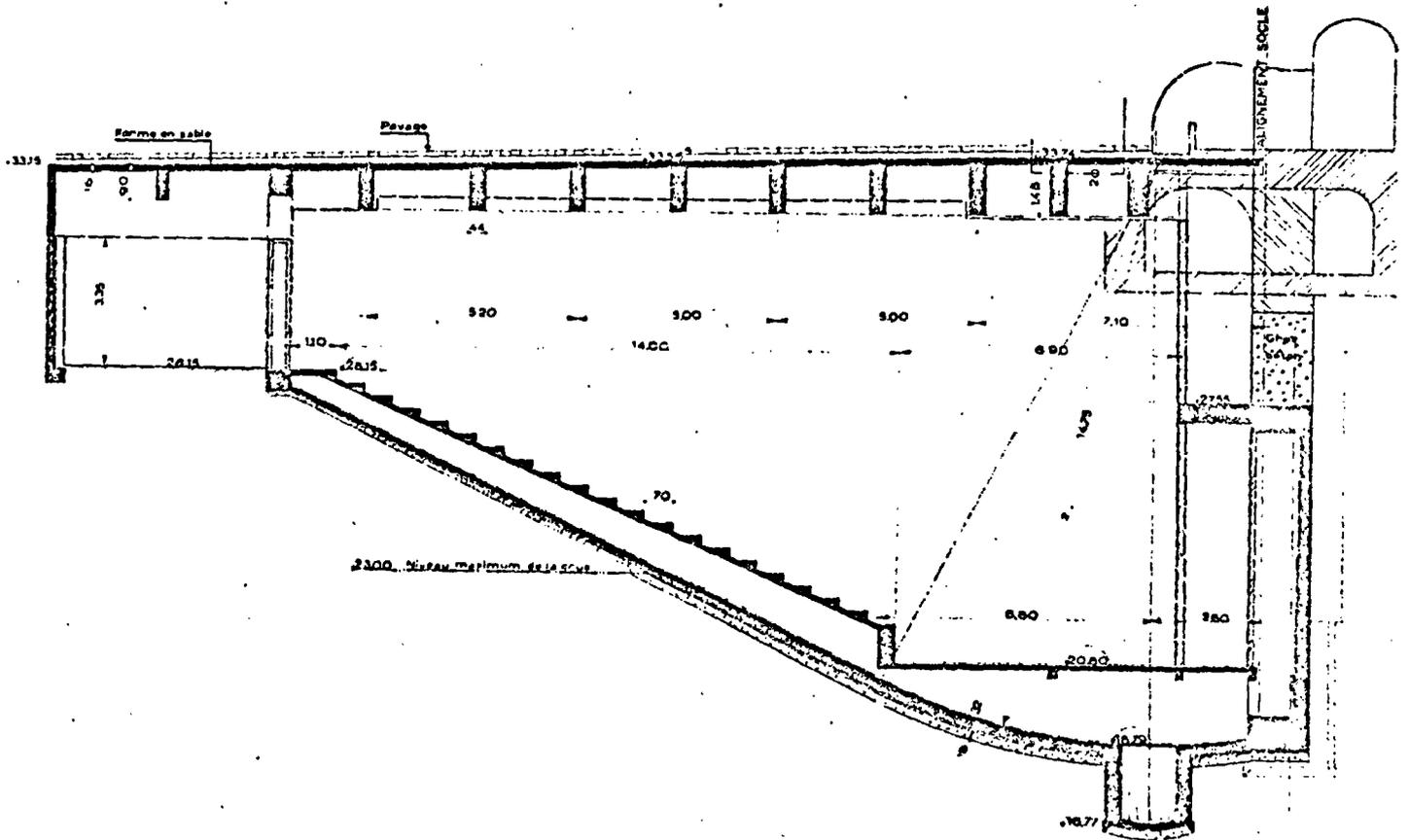


Fig. 9 - Amphithéâtres souterrains des Arts et Métiers. Coupe longitudinale dans l'axe de l'amphithéâtre principal. Superficie 2.000 m<sup>2</sup>. Pendant les travaux le niveau de la nappe a été abaissé par pompage dans un puits foré au point le plus bas de la construction (Document Sainrapt et Brice)

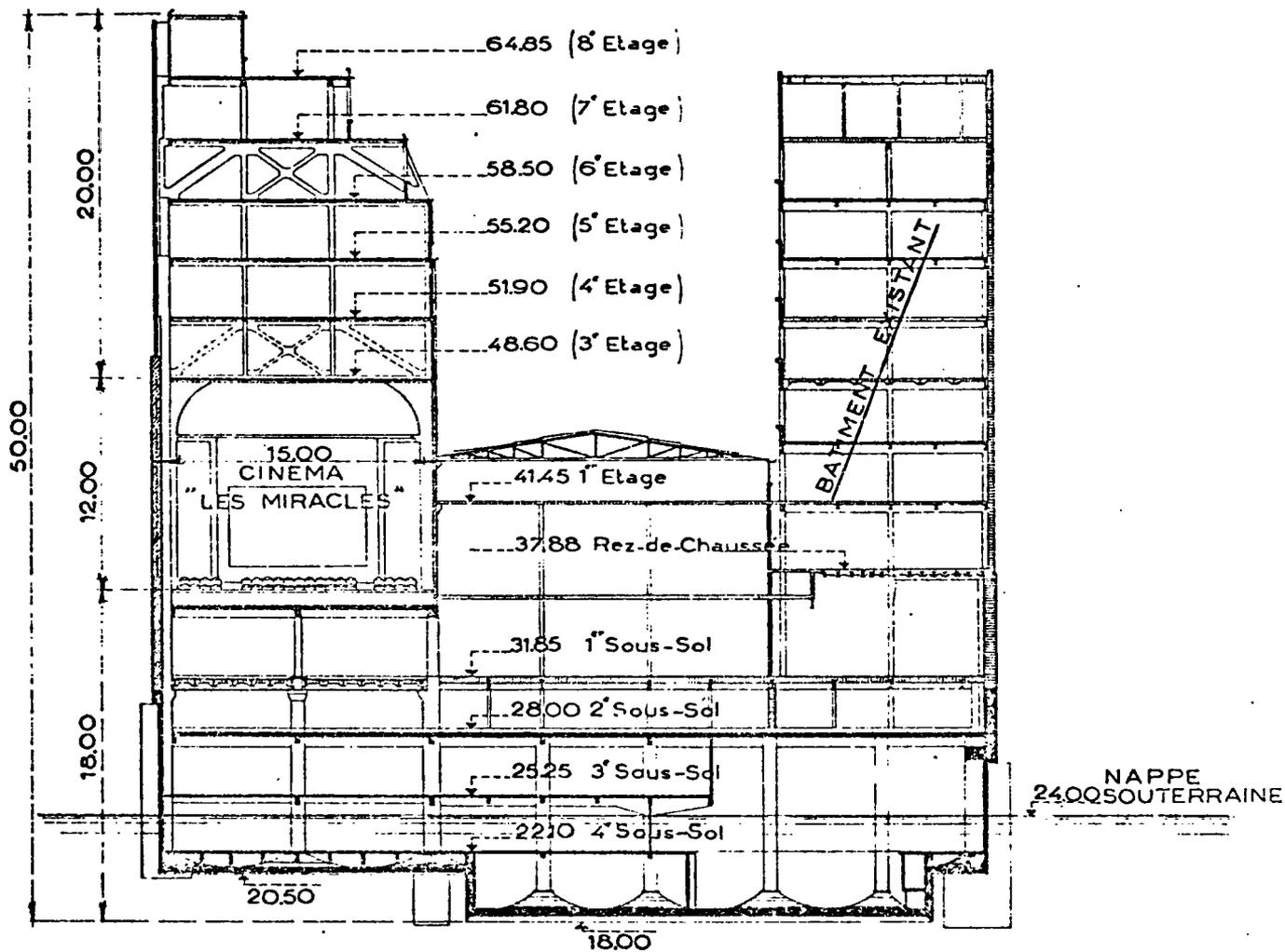


Fig. 10 - Sous-sol de l'immeuble du Journal "L'Intransigeant", rue Réaumur (Document Sainrapt et Brice)

4.2 - Station de pompage de la centrale thermique de Vitry (fig.11)

Ce bassin circulaire, de 36 m de diamètre et 12,50 m de profondeur, a été creusé (1965) pour abriter des pompes assurant une circulation d'eau de Seine de 16 m<sup>3</sup>/s. (1)

Coupe des terrains :

0 - 4,7	Remblais récentes	
4,7 - 9	Alluvions argileuses	$k \leq 10^{-5}$ m/s
9 - 13,8	Alluvions anciennes graveleuses	$k \neq 4.10^{-3}$
13,8 - 17,6	Marno-calcaire de St Ouen	$k \leq 10^{-5}$

Nappe à 6 m de profondeur.

Les travaux ont été réalisés comme suit :

- pré-fouille de 4,75 m de profondeur et 50 m de diamètre,
- paroi moulée circulaire de 0,60 m d'épaisseur et 10 m de profondeur ancrée à 1 m environ dans les Marno-calcaires de St Ouen et descendant 2,2 m en-dessous du niveau du fond de fouilles,
- rabattement de nappe par 30 puits filtrants, crépinés dans les alluvions anciennes et le Calcaire de St Ouen, sur un cercle de 40 m de diamètre. Niveau rabattu à 12,25 m de profondeur pour que la poussée de l'eau sur la paroi soit pratiquement nulle et qu'il n'y ait pas de sous-pression à l'intérieur de la fouille.

Les terrassements et les travaux ont été exécutés à sec. Pour le cas de déficience du rabattement de nappe pendant les travaux, il avait été décidé de drainer le dessous du radier et de permettre une décharge de celui-ci par des tubes verticaux de 2 m de hauteur.

(1) LADREYT J. (1966) Centrale thermique de Vitry-sur-Seine  
Construction t.XXI, n° 3, mars 1966

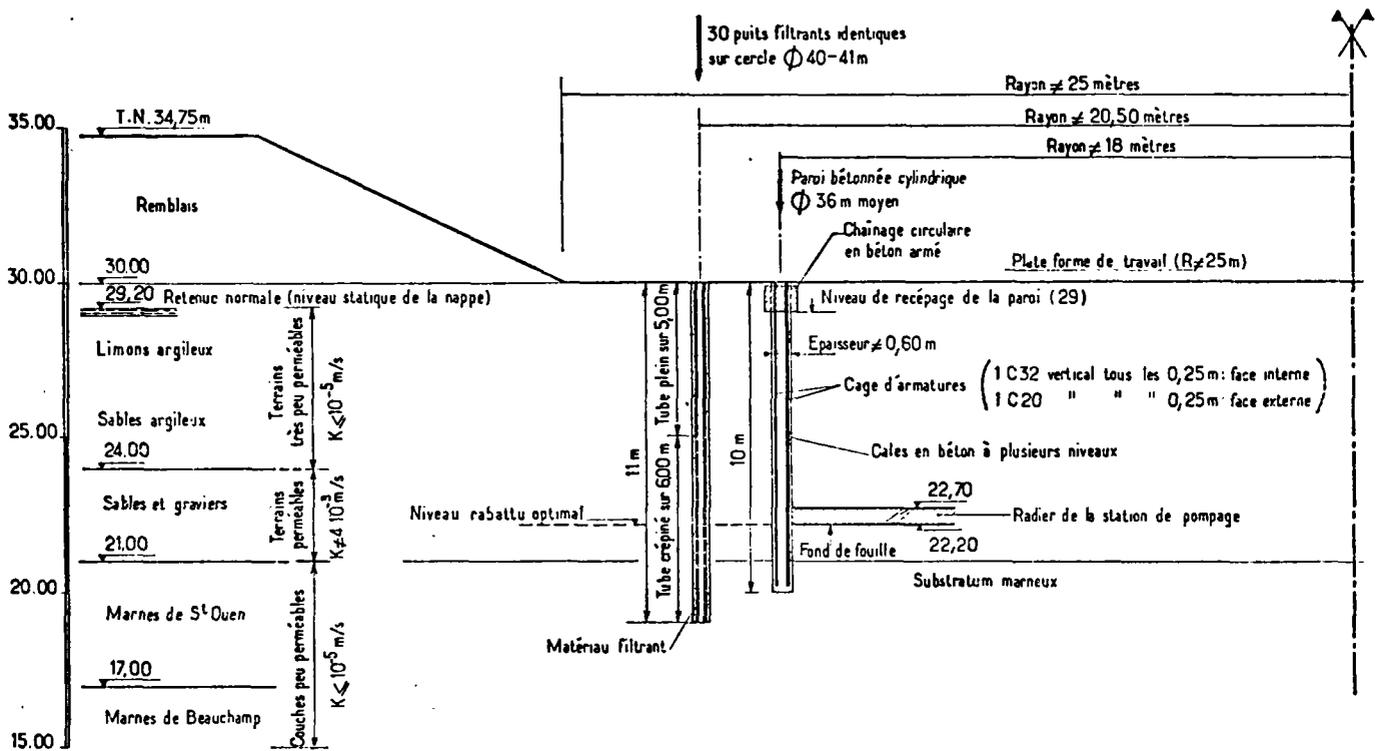


Fig.11 - Station de pompage de la Centrale de Vitry (d'après LADREYT.J, 1966)

Pour le cas d'une vidange du réservoir pendant une remontée exceptionnelle de la nappe au-dessus de 4,75 m, des drains ont été disposés à cette profondeur (4,75m) pour renvoyer automatiquement l'eau à l'intérieur du réservoir, ceci pour économiser sur un ferrail- lage de la paroi pouvant encaisser à la fois la poussée des terres et la poussée de l'eau.

#### 4.3 - Bâtiment souterrain de l'UNESCO (1965)

Le bâtiment, d'environ 10.000 m<sup>2</sup> au sol, repose sur un radier d'épaisseur variable fondé sur les Fausses glaises. Sui- vant le projet d'origine, la surface de ce radier se trouvait à la cote + 26,60.

L'épaisseur des planchers et du radier ont été réduites de façon à remonter le niveau des assises de 0,70 à 1 m et échapper ainsi au travail de la nappe. Le radier a été réalisé par zones de surfaces limitées en épuisant à l'avancement. Il a été constitué par des poutres de 60 cm de hauteur, de 5 m de portée, espacées de 8,5 m, entre lesquelles s'étend une dalle de 30 cm de hauteur. Cette dalle a été calculée pour résister à l'effet des sous-pressions en considérant le niveau supérieur de la nappe à + 29.

#### 4.4 - Sous-sol de l'immeuble 16 rue Jules César - Paris 12<sup>e</sup>

Dimensions : périmètre 215 m - superficie de 3750 m<sup>2</sup>  
5 sous-sols creusés dans les alluvions  
anciennes et le Calcaire grossier  
radier à 4 m sous le niveau d'étiage de la  
nappe à 9 m sous le niveau des crues "exception-  
nelles".

Principe : paroi moulée ancrée au toit du Calcaire grossier. Fond injecté.

Débits garantis : 10 m<sup>3</sup>/h à l'étiage  
30 m<sup>3</sup>/h en crue exceptionnelle

En cas de panne simultanée de toutes les pompes, l'inondation du dernier sous-sol se produirait à la vitesse de 3 mm/h (étiage) et de 8 mm/h (crue exceptionnelle). (CARDINAL ET CAZENOVE, 1971)

Installation de pompage automatique : drains rassemblant les eaux dans une fosse où elles sont reprises automatiquement par des pompes immergées électriques ou, en cas d'arrêt d'électricité, par un aéro-éjecteur alimenté par l'air comprimé urbain (SUDAC).

Sur plusieurs années de fonctionnement, le débit de relevage moyen a été de 10 m<sup>3</sup>/h.

#### .4.5 - Sous-sol de l'ensemble Bercy-Rapée (1969) (fig.12)

Cinq niveaux en sous-sol, sur une surface de 7600 m<sup>2</sup>. Fouille de 14,5 m de profondeur dans les alluvions et le Lutétien, à proximité de la Seine.

Le niveau de la nappe, situé vers + 27 en temps normal, pouvait atteindre + 29 au moment de la crue annuelle et + 32 lors des crues exceptionnelles.

Dispositif mis en place : - une paroi moulée périphérique avec une fiche de 0,5 m dans le Calcaire grossier.

- un fond horizontal injecté se raccordant à la paroi par un voile injecté exécuté dans le prolongement de celle-ci.

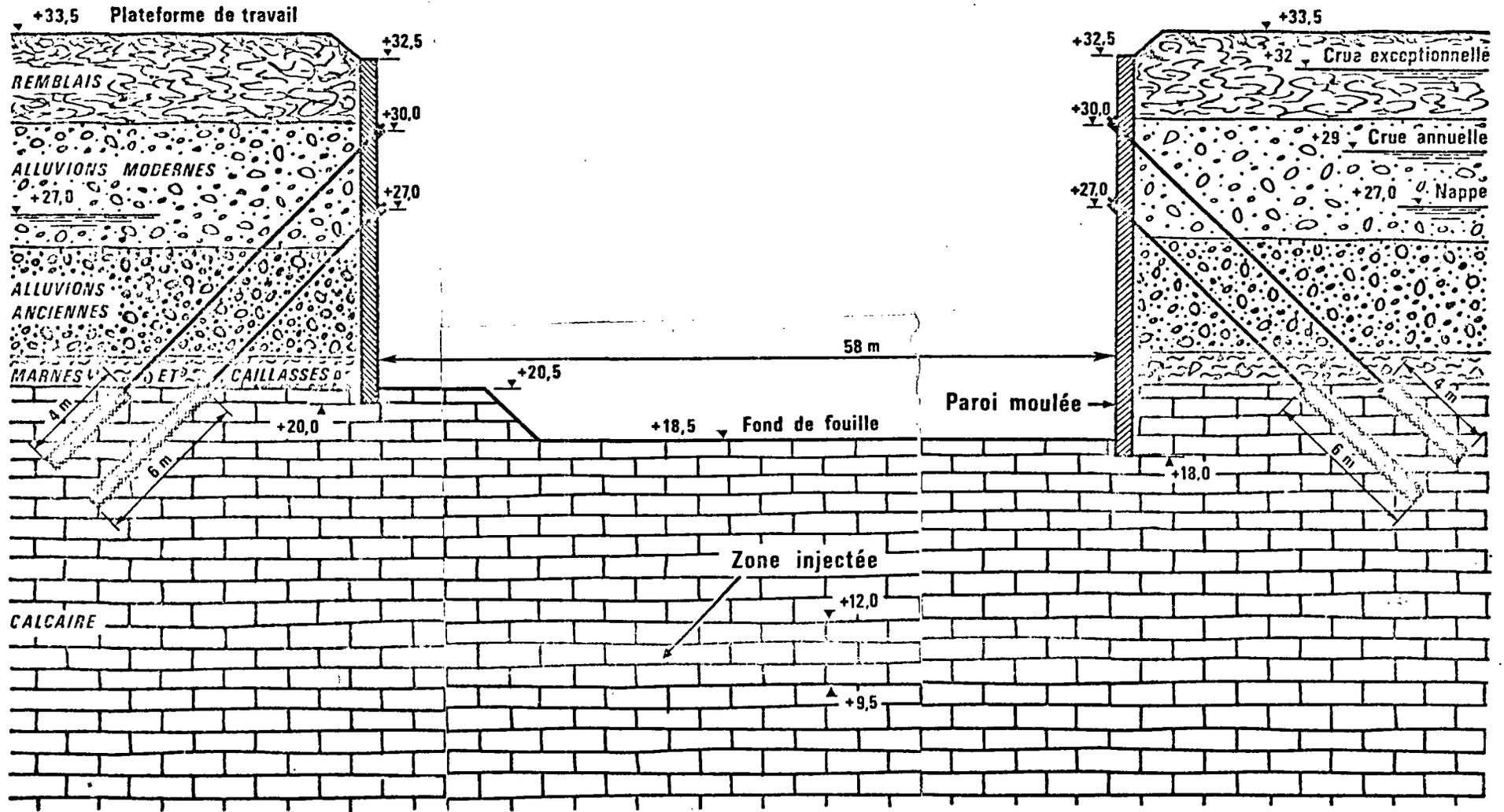


Fig.12 - Ensemble Bercy-Rapée (d'après Document SOLETANCHE)

Le fond injecté sur 2,50 m environ d'épaisseur a été réalisé à une profondeur telle que le poids des terres le chargeant, une fois la fouille creusée, suffise à équilibrer les sous-pressions à son niveau.

Les débits pompés à l'intérieur de la fouille n'ont pas dépassé 36 m<sup>3</sup>/h.

4.6 - Sous-sol de l'immeuble C.F.P.-TOTAL, rue de Villiers à Levallois (fig.13)

5 niveaux en sous-sol, fond à + 15 NGF

Parois moulées périphériques formant une surface de 5400 m<sup>2</sup>.

Terrains :

Remblais + 30,5 à + 27,5

Alluvions + 27,5 à + 21,50

Marnes et caillasses + 21,5 à + 13,5

Calcaire grossier + 13,5

La couche imperméable étant à une profondeur économiquement inaccessible, la solution du radier injecté dans la masse du calcaire a été retenue. Ce radier a été réalisé sur une épaisseur de 2 m à 11 m au-dessous du fond de la fouille et raccordé au pied des parois au moyen d'un écran vertical également injecté.

Ce radier injecté a été calculé pour être autostable à une poussée correspondant à une crue à la cote + 28 NGF, soit une submersion de 1 m du radier en béton. La cote du radier injecté a été fixée à + 5 NGF. Les débits résiduels constatés dans la fouille après terrassements ont été de 15 à 20 m<sup>3</sup>/h.

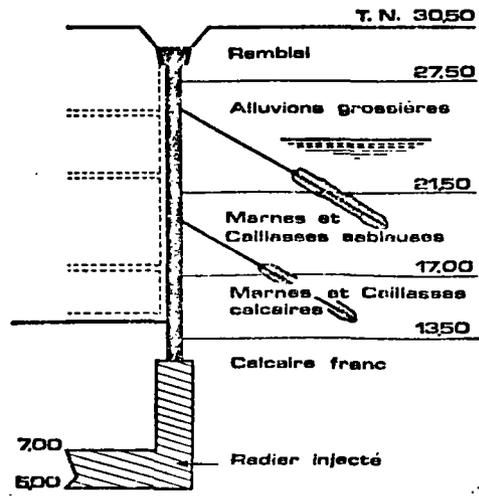


Fig.13 - Immeuble TOTAL - C.F.P. à Levallois (Document SIF.BACHY)

.4.7 - Sous-sol de l'immeuble SCAC - quai National à Puteaux (fig.14)

3 niveaux en sous-ol. Sol à + 30 NGF

Fouille de 3000 m<sup>2</sup>

Terrains :

0 - 13 Alluvions anciennes  
13 - 16,5 Fausses glaises (+ 17)  
16,5 - Sables yprésiens (+ 13,5)

Panneaux préfabriqués (PREFASIF) de 0,35 à 0,40 m d'épais-  
seur.

La paroi a été excavée avec une fiche de 2,5 m dans les  
Fausses glaises, soit à la cote + 14,5 NGF et la partie de la tranchée  
comprise entre le pied de la paroi préfabriquée située à la cote  
+ 17 NGF et le fond de la tranchée a constitué le voile périphérique  
d'étanchéité de la fouille. Le débit résiduel pompé dans l'enceinte  
était inférieur à 15 m<sup>3</sup>/h.

.4.8 - Sous-sol de l'immeuble UIF - Bd du général Leclerc à Neuilly (fig.15)

5 niveaux en sous-sol - Fouille de 14,5 m de profondeur  
et de 7850 m<sup>2</sup> de superficie.

Terrains :

Remblai de + 29 à + 26  
Alluvions modernes de + 26 à + 17,8  
Alluvions anciennes de + 17,8 à + 16,5  
Calcaire grossier de + 16,5 à + 7,7  
Sables yprésiens de + 7,7 à + 2,3  
Fausses glaises à partir de + 2,3

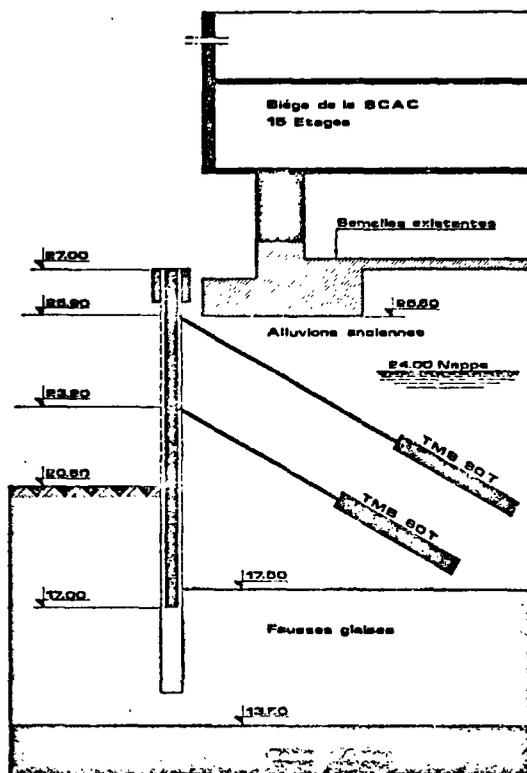


Fig.14 - Immeuble S.C.A.C., quai National à Puteaux  
(document SIF: BACHY)

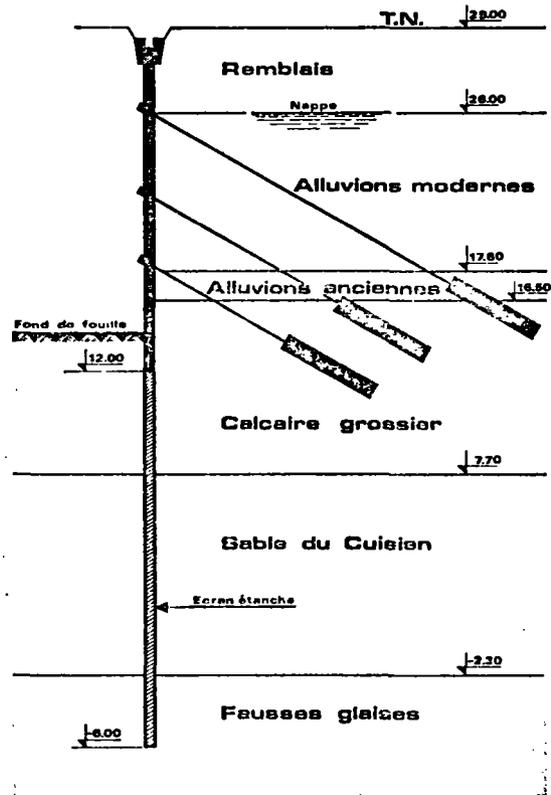


Fig.15 - Immeuble U.I.F. à Neuilly-sur-Seine (d'après document SIF.BACHY)

La paroi moulée en béton armé a été descendue à 16 m dans le Calcaire grossier. Pour réaliser l'étanchéité, cette paroi a été prolongée, jusqu'aux Fausses glaises, à 35 m de profondeur, par un voile en béton plastique. Des forages de décharge ont été pratiqués dans le banc de Calcaire.

Le débit résiduel dans la fouille, après terrassements, était de 29 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.9 - Sous sol de l'immeuble EDF à Issy-les-Moulineaux

Fouille de 15.000 m<sup>2</sup>, 530 m de périmètre et 12 m de profondeur dans les alluvions sablo-graveleux ( $k = 2.10^{-3}$  m/s), la nappe étant à + 26.

La paroi préfabriquée (PANOSOL) ceinturant la fouille ne rejoignait pas un horizon étanche, mais étant arrêté dans la craie fissurée ( $k = 2,8.10^{-3}$  m/s), la nappe a été rabattue (pendant la réalisation des travaux) de 7 m par une ligne de puits filtrants, de diamètre disposés de 560 mm, à environ 0,80 m de la face extérieure de la paroi, crépinés de + 19 à + 7 m dans les alluvions et dans la craie. Le débit total a été de 5000 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.10 - Centre culturel Beaubourg (1)

18.700 m<sup>2</sup> de superficie (155 m x 122 m) - Profondeur 15 m

Terrains :

Remblai, alluvions, marnes et caillasses - Nappe + 19 NGF

(1) NOTE - Travaux liés au soutènement des fouilles du Centre culturel de Beaubourg. Chantiers de France n° 65, décembre 1973

Avant l'exécution d'un mur berlinois, il a été réalisé une voile périphérique étanche , , à partir de la cote + 27 (ayant été considérée, pour ce projet, comme le niveau maximum que peut atteindre la nappe en cas de crue de la Seine), en descendant jusqu'à 2 m au-dessous du toit de banc de Calcaire grossier sous-jacent aux Marnes et caillasses (au minimum jusqu'à la cote + 13 NGF).

Cette boîte sans fond a pour objet de limiter les venues d'eau qui seront pompées en permanence (radier drainant) pendant toute la durée d'existence du centre culturel et, en même temps, de faciliter l'exécution des travaux de sous-oeuvre par la suppression des venues d'eau latérales.

L'écran étanche doit réduire le coefficient de perméabilité  $k$  en-dessous de  $10^{-6}$  m/s (il était de  $10^{-4}$  m/s dans la partie haute remaniée des Marnes et caillasses et de  $5 \times 10^{-4}$  m/s dans la partie basse non remaniée). Il a été réalisé à partir de forages de 23 à 36 m , implantés sur deux lignes périphériques espacées de 1,5 m, l'écartement entre deux forages d'une même ligne étant de 3 m.

Le volume des vides pouvant exister dans les Marnes et caillasses avait été estimé à 12 %, ce chiffre tenant compte des pertes de coulis d'injection , en dehors de l'emplacement de l'écran.

L'injection a été réalisée en deux phases :

- coulis bentonite-ciment, comprenant, par  $m^3$  de coulis, 250 kg de ciment CLK et 30 kg de bentonite ;
- gel bentonite silicate.

Le voile étant terminé, les débits de pompage mesurés à l'intérieur de l'enceinte était de  $60 m^3/h$  pour les  $18.700 m^2$ .

.4.11 - Halles - Forum et station RER (fig.16)

La gare RATP-SNCF est fondée à la cote + 10 NGF environ. Les ouvrages réalisés par la SEMAH (Société anonyme d'économie mixte d'aménagement de rénovation et de restauration du secteur des Halles) au-dessus et de part et d'autre de cette station sont fondés à la cote + 17 NGF.

Terrains :

Remblais	3 à 6 m d'épaisseur
Alluvions	5 à 9 m d'épaisseur
Marnes et caillasses	5 à 14 m d'épaisseur
Calcaire grossier	15 m d'épaisseur.

La hauteur maximum de la nappe phréatique retenue pour le projet est + 27 NGF (charge de la nappe du Calcaire grossier pour une crue centennale).

Les ouvrages, fondés à la cote + 17, n'ayant pas un poids propre suffisant pour compenser la sous-pression, le banc de calcaire grossier a été utilisé comme lest.

Dans la zone centrale descendant à la cote + 10, le poids du calcaire et des ouvrages ne suffisant pas à équilibrer la pression qui peut apparaître exceptionnellement dans les Sables yprésiens sous-jacents, il a été prévu un pompage sous le Calcaire grossier.

En période normale, l'équilibrage de cette zone centrale est assuré par le poids des ouvrages additionné à celui du banc de calcaire. Celui-ci est mobilisé par un système constitué par une enceinte fermée étanche sous les murs de soutènement de la fouille et un réseau de drainage général du calcaire.

Pendant la période des travaux (fouille ouverte et ouvrages non construits), la pression dans les Sables yprésiens a été abaissée par pompage dans trois puits provisoires.

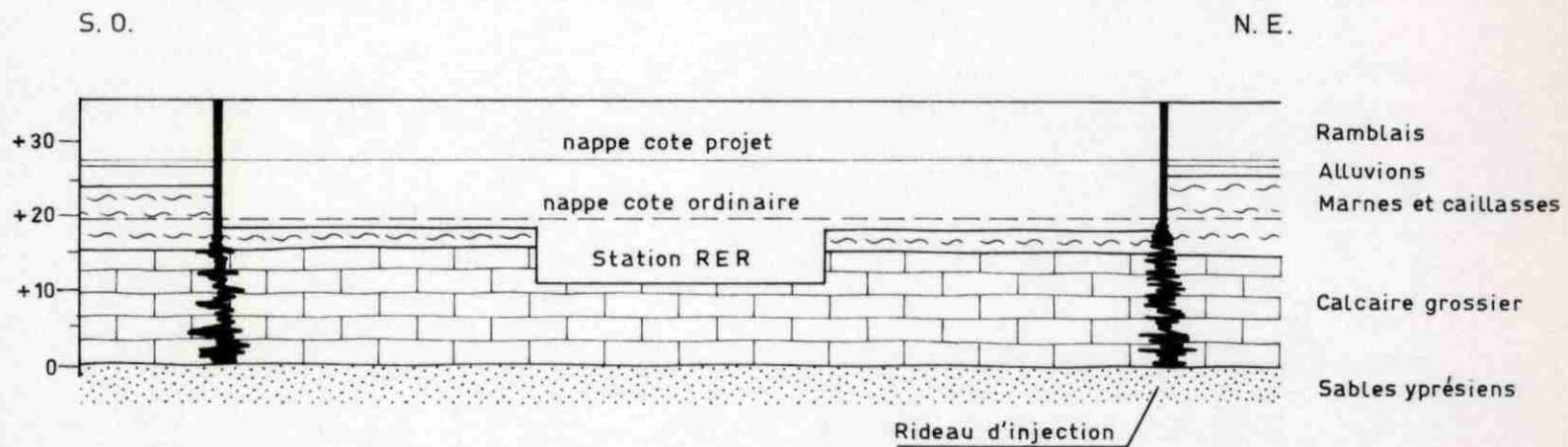


Fig. 16 - Aménagement du quartier des Halles - Forum R E R

## .5. VOIES SOUTERRAINES

### .5.1 - Passage souterrain Cours La Reine-Cours Albert 1er

Cet ouvrage, situé en bordure immédiate de la Seine, a été construit en partie dans la nappe phréatique, d'un niveau légèrement inférieur à celui de la Seine (1). Les alluvions sableuses reposent ici sur l'argile plastique dans la partie ouest et sur le Calcaire grossier dans la partie est. Des parois moulées ont été descendues jusqu'à ces deux niveaux. Des écrans transversaux ont été réalisés aux extrémités pour permettre de mieux assurer l'étanchement de la boîte créée entre les parois moulées lors de l'aménagement intérieur du souterrain. De même en trois autres points des écrans transversaux doubles ont été réalisés pour faciliter la construction de trois chambres sous-chaussée destinées à l'accumulation et à l'évacuation des eaux de pluie ou d'infiltrations.

Les terrassements ont été conduits en deux phases :

- la première, jusqu'au niveau de la nappe, a permis de mettre en place des pointes filtrantes destinées à assécher la fouille lors de la 2ème phase de terrassement. Celle-ci a été réalisée pendant une forte crue de la Seine provoquant une remontée du niveau extérieur de la nappe de plus de trois mètres.

(1) FAUVEAU- 1971. Quelques exemples d'utilisation des parois moulées dans la réalisation d'ouvrages routiers souterrains. TRAVAUX, Novembre 1970.

.5.2 - Boulevard périphérique ouest - Traversée du Bois de Boulogne

Le boulevard périphérique a été construit en tranchée, couverte pour plus de 75 %, sur 1200 m de longueur dans des alluvions anciennes, recouvrant les Fausses glaises peu perméables, et contenant une nappe libre. Les Sables d'auteuil, présents entre les Fausses glaises et l'Argile plastique, contenaient une autre nappe captive, plus ou moins ascendante. La chaussée se trouve au niveau de l'Argile plastique ou des Sables d'auteuil, suivant les sections, 3 à 8 m sous le niveau de la nappe.

Deux parois moulées continues, isolant entièrement une enceinte intérieure, ont été réalisées à partir d'une pré fouille de 2 m environ. Ces parois forment les piedroits de l'ouvrage et sont ancrées dans l'Argile plastique. Le terrassement général a été réalisé à l'abri de la couverture qui assurait leur butonnage en tête pour résister à la pression combinée des terres et de l'eau extérieure.

Pour éviter que l'écran étanche ainsi réalisé ne modifie les conditions d'écoulement de la nappe phréatique et, par là même les conditions de vie de la végétation du Bois de Boulogne, des drains ont été placés de chaque côté de l'ouvrage. Les eaux recueillies d'un côté sont restituées de l'autre.

## 6. PARCS DE STATIONNEMENT

### 6.1 - Parking Harlay-Place Dauphine (1967)

Les travaux ont été exécutés en quatre phases :

- terrassements jusqu'à 3 m
- réalisation des parois moulées
- terrassements jusqu'à la cote du fond de fouille  
et mise en place du dispositif de rabattement de la nappe rencontrée  
à la cote + 26,40
- exécution du radier.

La proximité de la Seine a entraîné l'interruption des travaux pendant la période de crue et l'exécution d'un cuvelage permettant de mettre le 3ème sous-sol hors d'eau lors des crues saisonnières. Pour des crues exceptionnelles qui entraîneraient une montée des eaux supérieure à la cote du plancher bas du premier sous-sol (cote + 30,19), un dispositif de noyade du 3ème sous-sol serait utilisé.

### 6.2 - Parking Haussmann-Berri

6 niveaux en sous-sol et tunnel RER.

Largeur hors tout : 15,10 - Longueur : 506 m.

Niveau du rail + 16,40.

Le fond de fouille se trouve à 17 m environ sous le niveau du Bd Haussmann (+ 38).

**Terrains :**

Remblai jusqu'à + 34,3

Sables de Beauchamp jusqu'à + 17,9

Marnes et caillasses

Le niveau de la nappe phréatique est à 2 m au-dessus de la cote du radier du métro.

Sur une zone de 150 m, une flexure de Marnes et caillasses, près de la rue de Monceau, supportait une petite nappe suspendue.

Pour l'ouvrage RER, sur une longueur de 150 m, une paroi moulée a été forée sur toute la hauteur des Sables de Beauchamp et ancrée dans les Marnes et caillasses, formant batardeau de la galerie.

La nappe suspendue dans les Sables de Beauchamp, sur la flexure de Marnes et caillasses, risquant de provoquer, lors de la fouille, des écoulements dans les sables, il a été procédé à un rabattement de la nappe par pointes filtrantes et à la construction de voiles latéraux en murs moulés entre le 2ème et le 6ème niveaux.

La nappe a été rabattue par cent pointes filtrantes, disposées tous les mètres à partir du 2ème niveau, de haut en bas, et étage par étage. Le débit a été de l'ordre de 400 l/h.

Un second rabattement de nappe a été exécuté au niveau du radier du 6ème sous-sol pour se prémunir contre un relèvement de la nappe phréatique se trouvant à l'étage à 2 m en-dessous du radier dans les Marnes et caillasses.

.6.3 - Parking St Germain

Dimensions : longueur 200 m, largeur hors tout 24 m,  
profondeur totale 14,6 m.

Terrains traversés :

Alluvions de 0 à 7,5 m

Marnes et caillasses de 7,5 à 12,5 m

Calcaire en-dessous de 12,5 m

Nappe à 11 m de profondeur.

Un voile d'étanchéité a été réalisé entre 11 et 17,6 m de profondeur, sous le boulevard, par des injections de coulis de ciment-argile effectuées au moyen de tubes disposés à la maille de 2 m au large de la paroi moulée.

.6.4 - Parking Velpeau-Boucicaut

Le fond de la fouille se trouve à 15 m en-dessous du niveau du sol naturel.

Terrains :

Remblais de + 36,2 à 32,20

Alluvions + 32,20 à 28,20

Calcaires altérés + 28,20 à 27,50

Calcaire grossier en dessous de + 27,5

La fouille a recoupé la nappe phréatique à la cote + 26,50 soit 5,50 environ au-dessus du fond.

Le chantier a été isolé par un écran étanche injecté entre les niveaux + 27 et + 18, à partir de 127 sondages, espacés de 3 m et inclinés de 4° vers l'extérieur de la fouille, sauf côté métro et côté Bon Marché où les sondages étaient verticaux.

La partie injectée est ancrée dans le Calcaire grossier, de 1,5 à 2 m sous le niveau inférieur des pieux.

Par suite des communications entre sondages, les injections ont été menées en trois cycles successifs, chaque cycle intéressant un forage sur trois. Le coulis d'injection était composé de ciment et d'argile dosés à 600 kg de matières sèches par mètre cube.

BIBLIOGRAPHIE

- BARDOUT M.G. (1956) ; - Construction d'une galerie téléphonique sous la Seine entre la place St Michel et la place du Châtelet - Annales de l'Institut technique du bâtiment des travaux publics - n° 106 - octobre 1956.
- BEAU M. (1933) - L'immeuble de "L'Intransigeant" et le cinéma des "Miracles" - Science et Industrie - Construction et travaux publics - Mai 1933.
- BOIS A. (1948) - L'épuisement des eaux au chemin de fer métropolitain de Paris - Chemin de fer du métropolitain de Paris - Centre de perfectionnement technique et administratif.
- CARDINAL J. et de CAZENOVE E. (1971) - Ouvrages profonds à radiers perméables - stations de pompage automatique, écrans d'étanchéité - Reconnaissances et calcul des débits. Travaux n° 439 - octobre 1971.
- FAUVEAU (1971) - Quelques exemplaires d'utilisation des parois moulées dans la réalisation d'ouvrages routiers souterrains. TRAVAUX, Novembre 1970.
- GUITONNEAU et BOUGARD (1966) - La construction du réseau express régional de la R.A.T.P. - Revue des Ponts et Chaussées - Janvier 1966.

LADREYT J. (1966) - Centrale thermique de Vitry s/Seine -  
Utilisation d'une paroi moulée dans le sol pour l'exécution de la station de pompage - Construction t XXI n° 3, mars 1966.

SCHLEEVEIS E. (1933) - La salle souterraine de la Banque de France - Travaux - Décembre 1937.