

# difficultés rencontrées dans les chantiers urbains

## difficulties encountered in urban works

1. Soutènements et fondations en présence de carrières
  2. Création de sous-sols sous un bâtiment existant
1. Retaining walls and foundations in presence of cavities
  2. Making of supplementary basements under an existing building

**F. BOULET**

Ingénieur d'Etude  
Entreprise BOTTE\*

**R. DEVERGNE**

Entreprise BOTTE\*

### Résumé

Les auteurs exposent les difficultés qu'ils ont rencontrées sur les chantiers principalement parisiens et les méthodes qu'ils ont adoptées pour résoudre ces difficultés. Ces méthodes varient selon les chantiers et plusieurs d'entre elles sont développées.

Les principales difficultés ont été les suivantes :

- présence de carrière souterraine connue ou inconnue,
- reprise en sous-œuvre de mitoyens,
- création de sous-sols supplémentaires soit dans un existant, soit en cours de travaux.

### Abstract

*The authors present the difficulties encountered on mainly parisian works and the methods used to resolve these difficulties. These methods are varying according to the works, and several of them are developed.*

*The main difficulties have been the following ones :*

- presence of known or unknown underground cavities,*
- underpinning of neighbour constructions,*
- making of supplementary basements either inside an existing building or during works.*

\* 62, rue des Meuniers, 92220 Bagneux.

## 1. SÈVRES — GRANDE RUE

L'Entreprise BOUYGUES avait traité la construction de trois bâtiments et avait fait appel à notre entreprise pour l'exécution des terrassements et des soutènements.

L'un de ces bâtiments posait un problème, car il fallait adapter les solutions au site. En effet, le terrain était situé à flanc de coteau, formé de remblai et d'éboulis sur les Marnes et Caillasses. De plus, des entrées en cavage situées à proximité laissaient de profonds doutes sur la probabilité d'anciennes carrières souterraines en limite du terrain. L'Atlas souterrain indiquait des carrières plus ou moins bien connues.

Le projet entamait largement la colline et il ne suffisait pas de réaliser des voiles en tranchées blindées classiques tenus provisoirement par des batteries d'étais ou des tirants d'ancrage. Il fallait surtout résoudre le problème de l'équilibre définitif de la construction et de la stabilité définitive du site.

Les terrassements devaient en particulier respecter l'existence de nombreux murs de soutènement qui ne pouvaient être démolis de façon intempestive.

Les sondages ne permettaient pas d'avoir une connaissance exhaustive du terrain, à cause de sa complexité.

La coupe (fig. 1) montre la situation géologique.

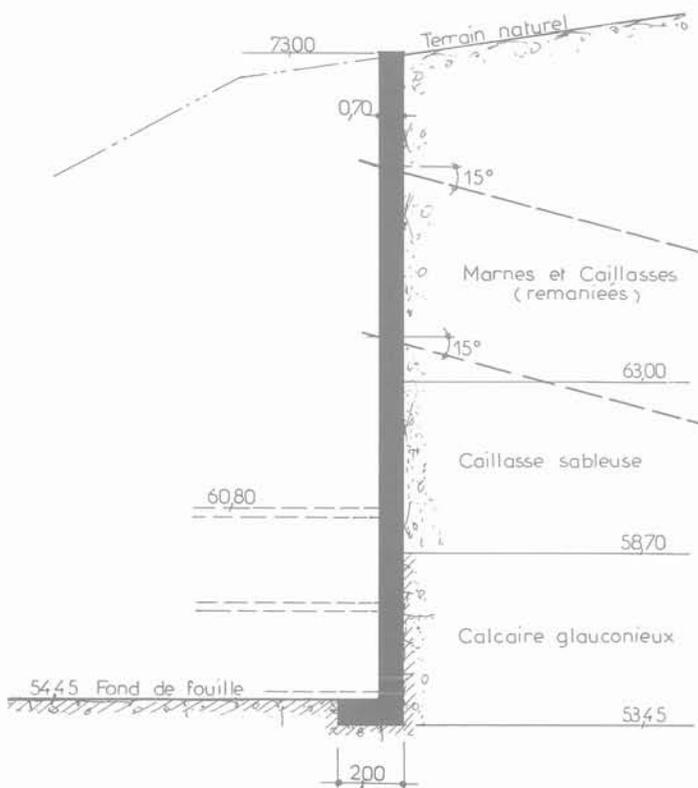


Fig. 1. — Sèvres - 170, Grande Rue. Bâtiment B, coupe 10.

Le bâtiment projeté (fig. 2) forme un «L» dont l'une des branches est perpendiculaire aux lignes de niveau et l'autre parallèle. A l'intérieur des deux branches du «L», il fallait laisser une cour intérieure de bonnes dimensions, autrement dit un vide libre de tout obstacle, pour ménager les vues sur les deux façades intérieures. La réalisation d'un soutènement important avec contreforts venait tout d'abord à l'esprit, mais les contreforts étaient en contradiction avec le projet et le budget limitait les ambitions. Plusieurs études successives ont été faites sans succès car le crédit était toujours dépassé.

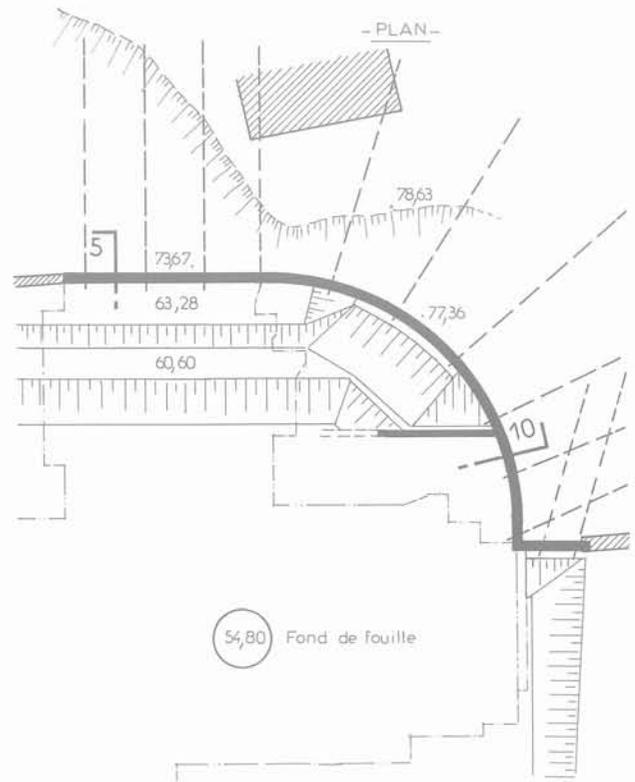


Fig. 2. — Sèvres - 170, Grande Rue. Bâtiment B.

Finalement, nous avons proposé un arc en béton armé s'appuyant sur les deux ailes de l'immeuble à construire ce qui fut accepté (fig. 3).

Toute la partie de voile en béton armé s'appuyant sur la colline et formant soutènement a été réalisée en puits blindés successifs ou en tranchée blindée. Le terrassement a été mené par phases consécutives horizontales au fur et à mesure de l'exécution des tirants d'ancrage provisoires.

En phase définitive, les planchers, refends et façades des deux ailes de l'immeuble ont assuré la stabilité et les tirants ont pu être détendus. Quant à l'arc en béton armé de 0,70 m d'épaisseur, il s'appuyait aux deux extrémités sur les deux pignons du bâtiment, ce qui a permis également de détendre les tirants provisoires. Au sujet de ces derniers, il y a lieu de signaler les difficultés rencontrées pour leur mise en œuvre. Cer-

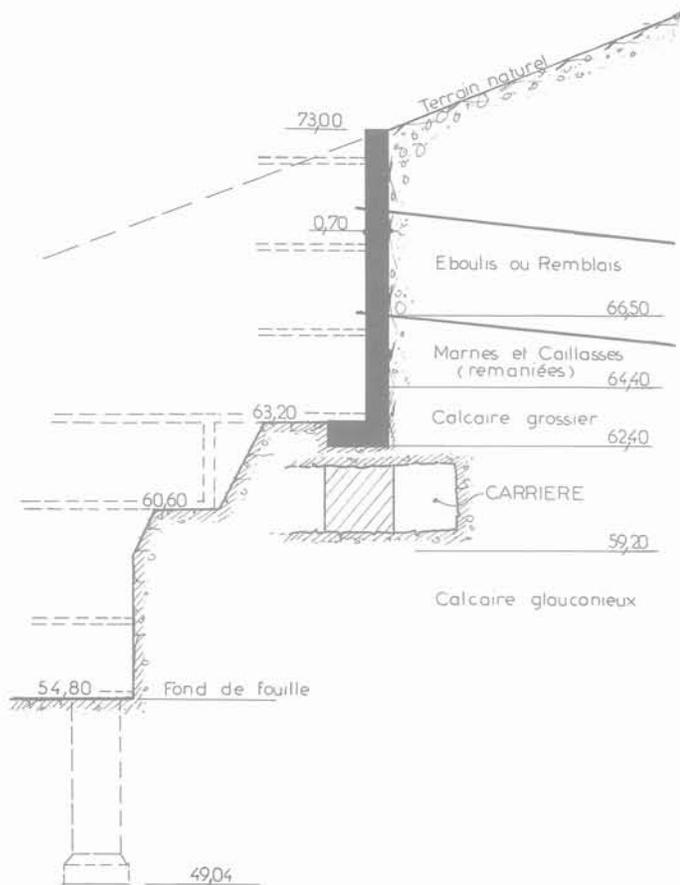


Fig. 3. — Sèvres - 170, Grande Rue. Bâtiment B, coupe 5.

tains forages ont traversé des failles et des zones de terrain décomprimées, vraisemblablement dues à la présence de carrières souterraines. Plusieurs remèdes ont été apportés :

- injection de la zone de scellement en plusieurs phases ;
- allongement des forages pour dépasser les zones décomprimées ;
- multiplication des tirants quand les efforts repris apparaissaient insuffisants au moment de la mise en tension.

La figure 4 montre une phase avancée du chantier, on y voit également un soutènement complémentaire, à gauche de l'immeuble, fait de contreforts en maçonnerie et fondé sur puits.

D'après les sondages, on était sûr de rencontrer le bon sol, à savoir le calcaire, pour asseoir toutes les fondations. Mais en cours de travaux, il y a eu des surprises sous le pignon amont et sous une partie de l'arc. En effet, les fouilles de puits blindés ont rencontré une poche de carrière inconnue, siège d'un vide important, de l'ordre de 150 m<sup>3</sup>.

Les sondages, du fait de leur implantation, gênée par les difficultés d'accès, n'avaient pu déceler cette anomalie. Pour pallier cette difficulté nous avons été alors amenés à construire des piliers en maçonnerie et des

puits en béton dans les remblais et les vides de la cavité, pour servir de fondation au voile de l'arc et du pignon du bâtiment. Les vides résiduels ont été comblés.

Que peut-on conclure? Au départ, une étude insuffisante avait sous-estimé les difficultés techniques et fixé un budget en deçà de la réalité. Avant d'ouvrir le chantier, il fallut donc trouver une solution élégante, valable techniquement et pouvant être acceptable pour l'économie de l'opération.

Malgré les investigations préliminaires et les précautions, des imprévus sont toujours possibles, telle la découverte d'une poche de carrière inconnue.

## 2. NANTERRE — LA DÉFENSE — BOULEVARD PESARO

La construction d'un immeuble de bureaux dans le quartier de la préfecture de Nanterre prévoyait trois sous-sols et dix étages sur rez-de-chaussée, dans la zone d'aménagement d'une ville nouvelle. Le terrain était supposé vierge, donc a priori sans problème. Et pourtant...

D'après les sondages de reconnaissance de sol, le terrain était situé au-dessus d'une ancienne carrière souterraine du Calcaire Grossier exploitée sur une grande hauteur. Les investigations étaient imprécises, mais nous avions la chance d'avoir en archives des sondages d'un bâtiment projeté au même endroit puis abandonné. La proximité de la gare du R.E.R. «Nanterre préfecture» obligeait à prendre des précautions pour le terrassement. De plus, la présence d'immeubles en construction (MB 5 et MB 6) sur les autres faces du terrain apportait certaines sujétions supplémentaires.

La coupe géologique schématique se présentait comme indiqué sur la figure 5.

Il est à noter que la nappe se caractérisait par la présence d'une légère charge en raison de niveaux très argileux à la partie supérieure.

**2.1. Les pieux :** le bâtiment a été fondé sur des pieux ancrés dans les sables de Cuise avec un taux de travail de 4 MPa. En effet, la couche de calcaire restant au sol de l'ancienne exploitation était insuffisante tant en qualité qu'en puissance. Les pieux ont été armés sur toute hauteur. Les armatures ont, en outre, été vérifiées à la flexion. En effet, étant donné la configuration du site, il n'y avait pas équilibre des poussées dues aux terres et des efforts horizontaux devaient être repris en tête des pieux.

Compte tenu de l'importance des charges, la gamme de diamètres retenue a été de 0,80 m à 1,20 m. Leur fiche a été de 24 m depuis le fond de fouille (44,70) NGF. Les pieux périphériques nécessaires au soutènement ont été forés depuis une plateforme intermédiaire située à (53,00) NGF ce qui portait la longueur de foration à 32 m.

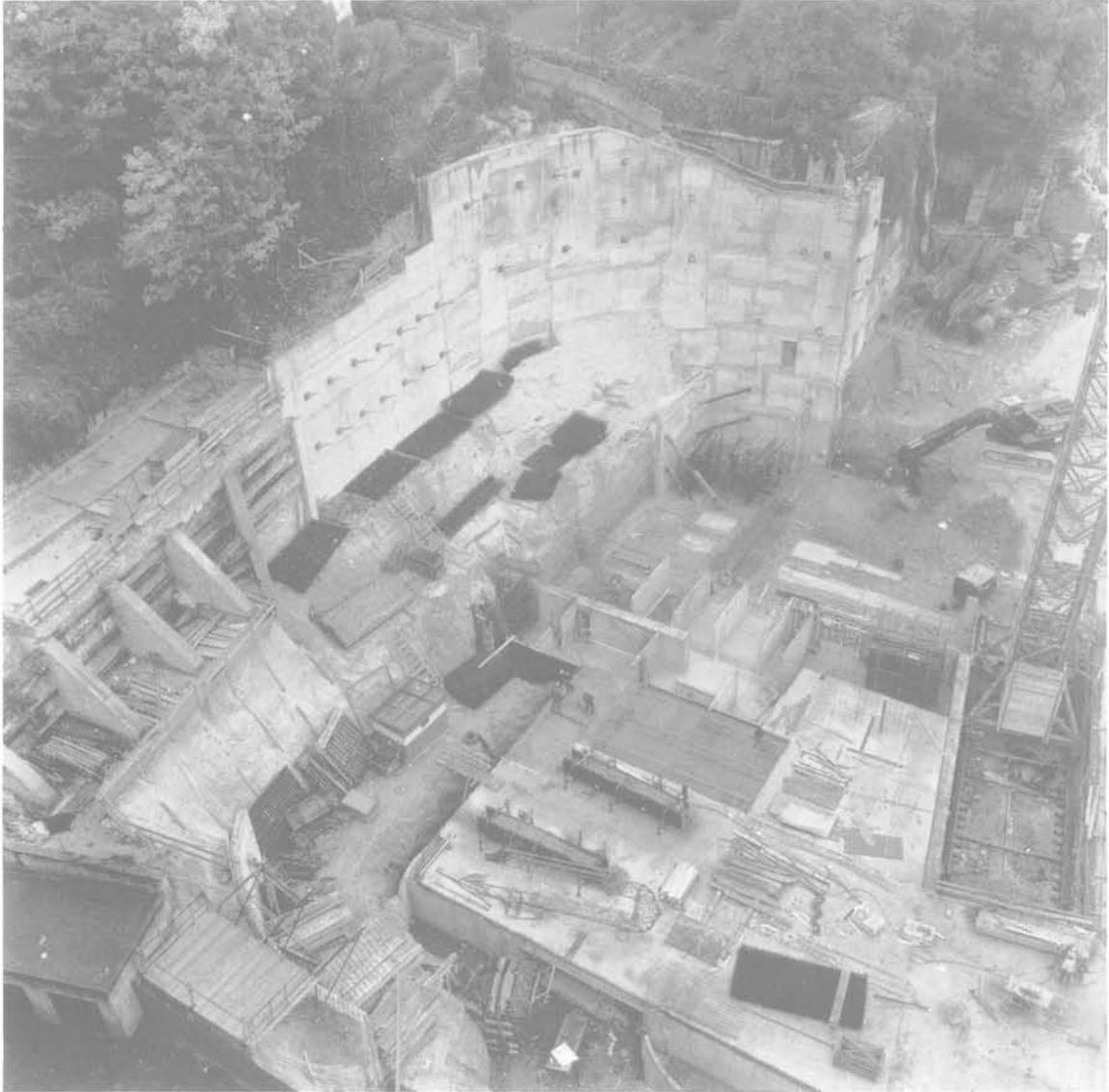


Fig. 4. — Sèvres: Grande Rue.  
Vue générale du chantier.

Comme les couches de terrain à traverser étaient très différentes, et parce que l'ancrage se faisait dans les sables en présence d'eau, il a été nécessaire d'employer la technique du forage sous boue.

La traversée ponctuelle de bancs calcaires durs a nécessité l'emploi du carottier, le trépan étant proscrit dans ce type de travaux, afin de limiter les ébranlements en particulier au niveau du ciel de carrière.

**2.2 Fontis:** vers le bâtiment voisin MB 5, la sujétion de la carrière souterraine s'est aggravée par la présence d'un fontis dû vraisemblablement à un effondrement localisé du ciel de carrière. Ce fontis a fait l'objet d'un traitement par injection.

Pour cela des forages destructifs tubés ont été exécutés depuis la plateforme intermédiaire, à partir desquels, un remplissage hydraulique par gravité a été effectué

avec un coulis sablon-ciment faiblement dosé, complété par un traitement plus richement dosé, sous pression.

**2.3. Soutènements et terrassements:** la façade nord de la construction projetée était parallèle au boulevard Pesaro, sous lequel circule le R.E.R. et où se trouve la station «Nanterre préfecture». (fig. 6 et 7).

Le terrassement général a donc dû être mené en deux phases successives:

— a. de (59,00) à (53,00) NGF, on a exécuté un talus avec une pente de 1/1 taillée dans les remblais et protégée par un gunitage.

— b. de (53,00) au FF (44,70), le terrassement général n'a pu être mené qu'à l'abri d'un soutènement préalable à savoir une paroi berlinoise. Des profilés métalliques verticaux ont été alors scellés dans les pieux du voile périphérique depuis la plateforme

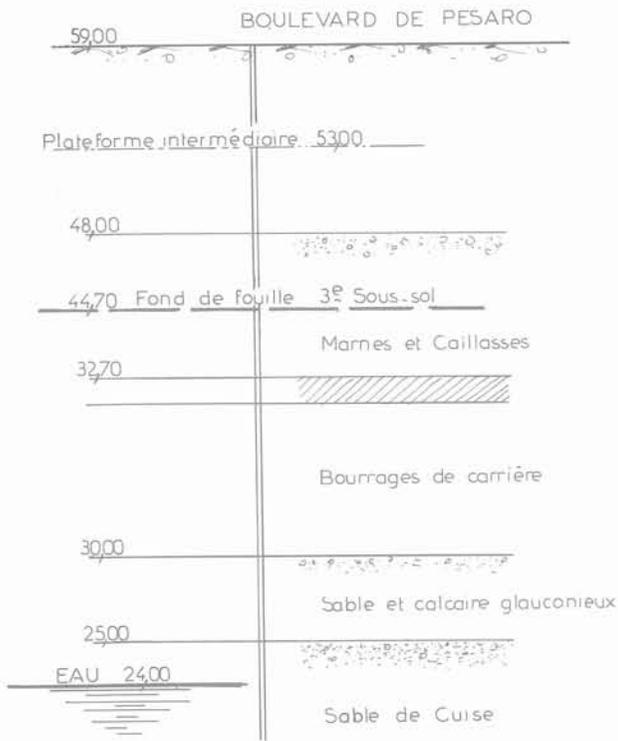


Fig. 5. — Nanterre. Bâtiment MB7, coupe géologique.

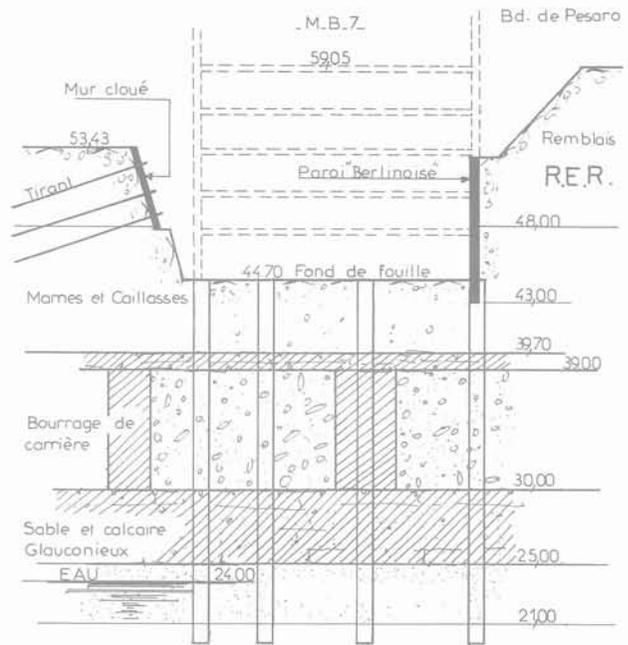


Fig. 7. — Nanterre. Bâtiment MB7, coupe transversale.

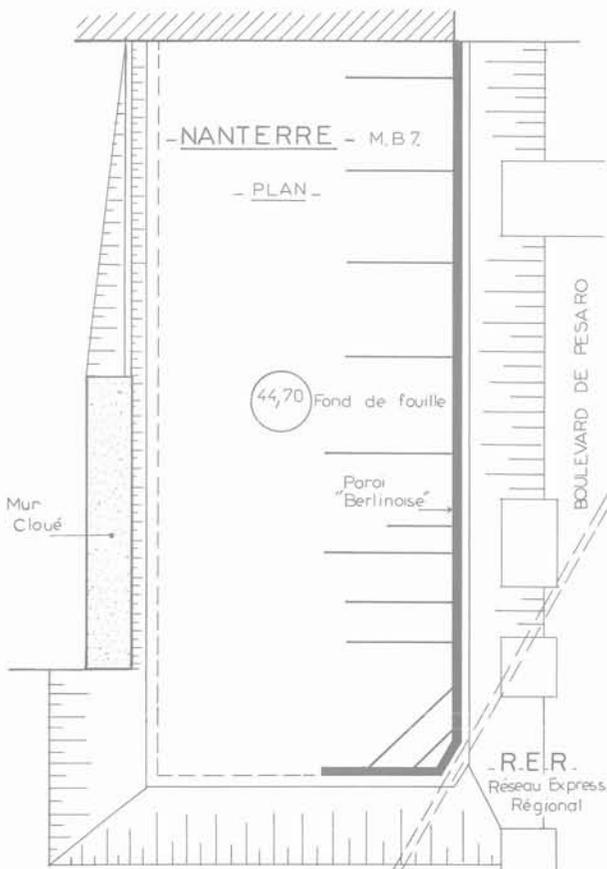


Fig. 6. — Nanterre. MB7.

(53,00) NGF. Leur entre-axe était de 3,20 m. Le voile en béton armé exécuté entre profilés servait à la fois de soutènement provisoire pour permettre les terrassements et de soutènement définitif pour le bâtiment. Après mise en place des armatures, ce voile a été exécuté en béton projeté. La stabilité définitive de ce voile est assurée par les planchers et les refends.

Mais sa stabilité provisoire a posé quelques problèmes. Elle avait été prévue initialement en partie par des tirants d'ancrage scellés dans les Marnes et Caillasses sous-jacentes et en partie par des batteries de butons métalliques. Le projet ainsi bâti par le Bureau d'Etudes a été présenté tardivement à la R.A.T.P. (Régie Autonome des Transports Parisiens) qui a opposé un refus absolu à la présence de tirants d'ancrage provisoires à proximité de ses ouvrages.

Le système fut donc modifié et il fut mis sur toute la longueur de la façade (51,30 m) des batteries de butons métalliques (fig. 8). Afin d'éviter de décompresser les terres et de provoquer tout mouvement dû à leur poussée, ces batteries ont été mises en place dans des tranchées blindées perpendiculaires à la paroi berlinoise. Ces batteries étaient fondées sur des semelles ancrées dans les Marnes et Caillasses du fond de fouille.

Afin de limiter la densité des ouvrages, les poussées dues aux terres ont été transmises par les profilés verticaux de la paroi berlinoise aux batteries de butons, au moyen de lisses horizontales métalliques maintenues par des corbeaux, soit métalliques, soit exécutés en béton armé.



Fig. 8. — Nanterre-La Défense.  
Paroi berlinoise en cours d'exécution.

L'évaluation des poussées dues aux terres a été faite à partir des hypothèses suivantes :

Remblai .....  $\phi = 25^\circ$   $C = 0$   
Marnes et Caillasses .....  $\phi = 30^\circ$   $C = 50$  kPa

Le soutènement exécuté sur 8,30 m de hauteur encaissait, en outre, le poids d'un talus de 6 m de haut. La poussée totale était de l'ordre de 300 kN par mètre de paroi.

Le terrassement général a été poursuivi au fur et à mesure de l'exécution du voile en béton projeté, par passes horizontales de 2 m à 2,50 m de hauteur, et au fur et à mesure de la mise en place des batteries d'étais assurant la stabilité provisoire.

Côté ouest, le terrassement ne présentait aucune difficulté; le bâtiment voisin était en effet nanti de plusieurs sous-sols déjà construits.

Côté est, les emprises de chantier ont permis l'exécution de talus.

Côté sud, la présence d'une rampe d'accès aux bâtiments voisins MB 5 et MB 6 a limité sévèrement les possibilités de talutage. Il fallut soit protéger les talus par un gunitage, soit sur 18 m environ, épinglez cette peau en béton armé projeté au moyen de tirants

passifs. Dans des forages de 8 à 10 m suivant une maille de  $3,00 \times 1,60$  m, des barres en acier de type GEWI ont été scellées. Le remblai sous la rampe se comportait alors un peu comme un massif de terre armée.

L'ensemble de tous ces travaux a été réalisé entre septembre 1981 et mars 1982.

### 3. PARIS RUE GALILÉE RUE VERNET

Pour une reconstruction dans un site urbanisé depuis longtemps, il était prévu de créer en particulier quatre sous-sols. Le projet nécessitait la démolition d'anciens hôtels particuliers situés sur le terrain. Mais la Commission des sites ayant exigé la conservation des façades sur rues, elles furent étayées préalablement à la démolition.

La coupe géologique se présentait de façon favorable (fig. 9). La façade sur la rue Galilée fut reprise en sous-œuvre par un voile en béton armé exécuté classiquement dans des puits blindés successifs alternés. Il en a été de même des mitoyens (fig. 10). Malgré la qualité du sol, les poussées dues aux terres ajoutées à celles engendrées par le poids des bâtiments situés en

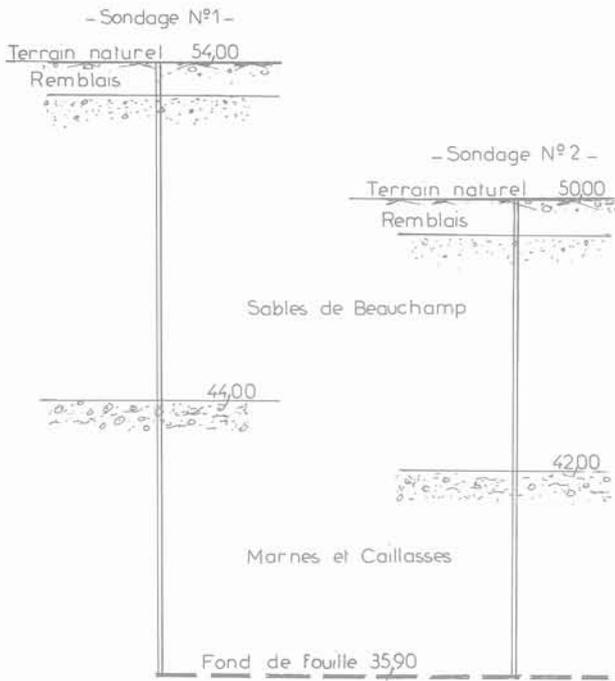


Fig. 9. — Paris 8<sup>e</sup>. Rues Galilée-Vernet. Coupes géologiques.

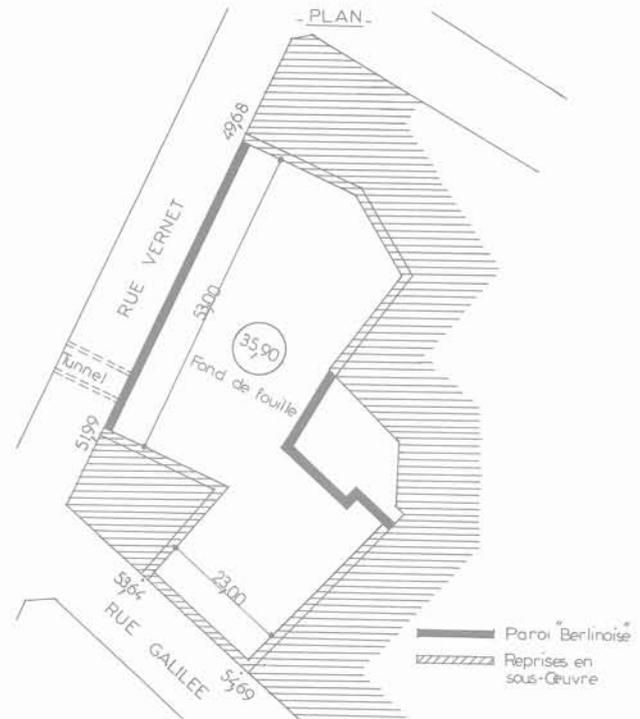


Fig. 10. — Paris 8<sup>e</sup>. Rues Galilée-Vernet.

mitoyenneté, étaient importantes. La mise en œuvre d'étais s'étant révélée problématique, la stabilité provisoire fut assurée par des tirants d'ancrage implantés sur deux ou trois nappes suivant les cas. Le terrassement général fut mené par tranches horizontales successives au fur et à mesure de la mise en œuvre des tirants.

Pour la façade sur la rue Vernet (longueur 53 m), on a cherché une solution permettant à la fois un gain de temps et une économie. La façade préalablement étayée n'a pas été reprise en sous-œuvre comme celle de la rue Galilée. Il fut décidé d'exécuter une paroi berlinoise à son pied. La perte de surface disponible en sous-sol n'offrait pas un gros inconvénient.

Tout le service du chantier, devenu inaccessible à cause des façades conservées, se faisait par une baie de 9,00 m d'ouverture créée rue Vernet (fig. 11). L'achèvement du terrassement a nécessité la réalisation d'une plate-forme en béton armé provisoire construite en porte-à-faux au niveau trottoir, supportant une pelle de 500 kN.

Sur la figure 12, on voit la reprise en sous-œuvre de bâtiments anciens vétustes et une paroi berlinoise soutenant un terre-plein conservé.

Le chantier se déroulait dans de bonnes conditions, lorsque, le maître d'œuvre nous a demandé de créer un cinquième sous-sol dans la zone où le fond de fouille prévu pour le quatrième sous-sol était déjà atteint par le terrassement général.

Compte tenu de l'état d'avancement des travaux, il fut décidé de réaliser ce cinquième sous-sol en retrait des mitoyens. Le pied des voiles exécutés fut maintenu par un nouveau lit de tirants d'ancrage reliés entre eux par une poutraison métallique provisoire.

Le client manifesta alors le désir de créer une galerie souterraine de liaison sous la rue Vernet sur 12 m au niveau des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> sous-sols. Or, les services de la Police et de la Voirie interdisaient tous travaux pouvant interrompre la circulation des voitures. Le recouvrement au-dessus de la galerie était composé de remblai et sables de Beauchamp sur les Marnes et Caillasses. Il a été proposé et accepté d'ouvrir la chaussée pendant le minimum de temps, c'est-à-dire, pendant un week-end de 48 heures et cela en deux tranches successives pour laisser le passage permanent des véhicules. Des profilés métalliques verticaux de 13 m ont été scellés dans des forages, puis la dalle de couverture appuyée sur ces profilés a été coulée. Ensuite à l'abri de cette dalle et depuis l'intérieur du chantier on a exécuté la fouille blindée, le radier, les piédroits, le plancher intermédiaire.

En conclusion, on peut signaler que dès l'avant-projet, le Bureau d'Etudes, devant la complexité des problèmes divers posés par la création de ces sous-sols dans un site relativement exigu, a fait appel à notre collaboration. Une préparation minutieuse du chantier a permis de respecter un plan de phases rigoureux.

#### 4. CLERMONT-FERRAND EXTENSION DE LA PRÉFECTURE

Dans le cadre d'une modernisation de ses locaux et de ses services administratifs, la Préfecture de Clermont-Ferrand avait décidé de construire un nouveau bâtiment de un rez-de-chaussée et six étages sur quatre niveaux de sous-sols.



Fig. 11. — Rue Galilée - Paris (16<sup>e</sup>). Façade rue Vernet avec paroi berlinoise.

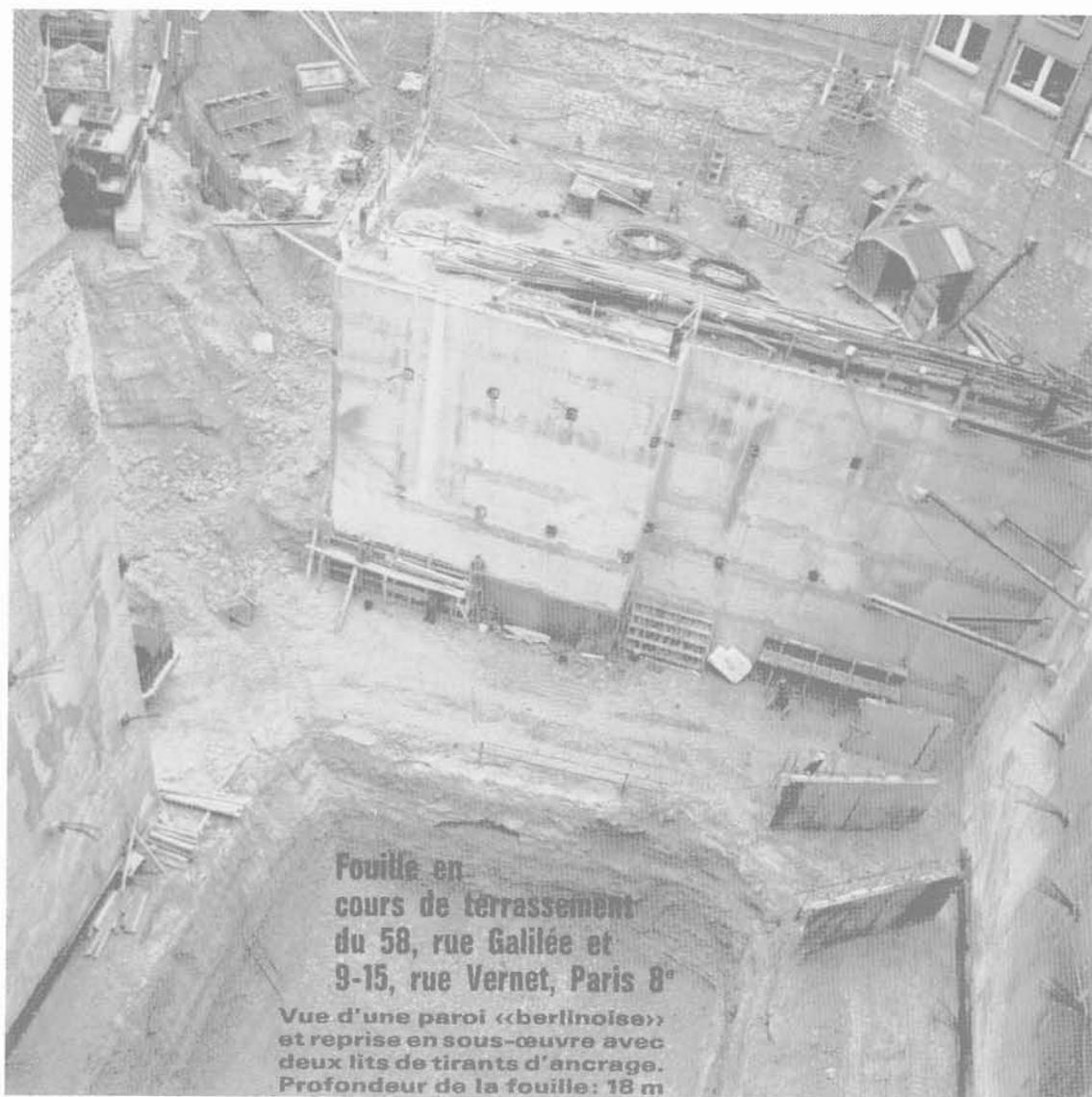


Fig. 12. — Rue Galilée - Paris (16<sup>e</sup>). Vue générale depuis la rue Galilée.

Nous allons décrire les travaux nécessaires aux soutènements périphériques, aux terrassements ainsi qu'aux fondations spéciales.

Le terrain sur lequel devait s'édifier l'extension de la Préfecture se situe dans le centre ville sur l'emplacement de l'ancienne rue d'Assas et d'anciennes constructions diverses datant des siècles passés.

Le terrain naturel accusait une assez forte pente. Dans le sens longitudinal la dénivellation était de 6,00 m sur 70 m. Outre le déplacement des réseaux, la proximité des voies adjacentes imposait la construction des murs périphériques préalablement à toute excavation. Ce vieux quartier de la ville de Clermont-Ferrand comportait la présence de deux à trois niveaux superposés de caves creusées dans le Tuf, à différentes époques, pour les besoins domestiques des habitants. Ces cavités, peu ou pas maçonnées, avaient été recoupées parfois entièrement par le mur périphérique des sous-sols projetés et créaient un environnement dangereux. Enfin comme pour compliquer notre prise de posses-

sion du chantier le terrain avait été ouvert sur toute sa longueur par une immense tranchée archéologique.

La situation géologique est indiquée sur les figures 13 et 14. Les sondages de reconnaissance du sol ont révélé que les couches de terrain accusaient un pendage sensiblement parallèle au terrain naturel. Des remblais superficiels d'épaisseur importante, de l'ordre de 5 mètres, ont été rencontrés au-dessus de la formation des Marnes de Limagne. Toutefois, ces marnes étaient très altérées et gorgées d'eau jusqu'au fond de fouille dans la partie amont du terrain. Elles étaient remplacées par des alluvions dans la partie aval. Le fond de fouille uniforme du projet recoupait donc deux types de sols ce qui a conduit à adopter un double système de fondation: semelles reposant sur les Marnes, côté amont, et pieux forés à travers les alluvions baignées par la nappe phréatique et ancrés dans les Marnes sous-jacentes, côté aval. Les sondages ont également montré que les Marnes étaient le siège de failles parallèles au cratère volcanique du Fond de Jaude, situé à proximité. Les caractéristiques médiocres

des sols rencontrés ont conduit le géotechnicien à retenir des hypothèses pessimistes pour les calculs de poussée des terres :

Remblai, Limon, Argile (voile Nord)	$\phi = 20^\circ$ ou $25^\circ$ C = 0
Marne	$\phi = 12^\circ$ C = 70 kPa

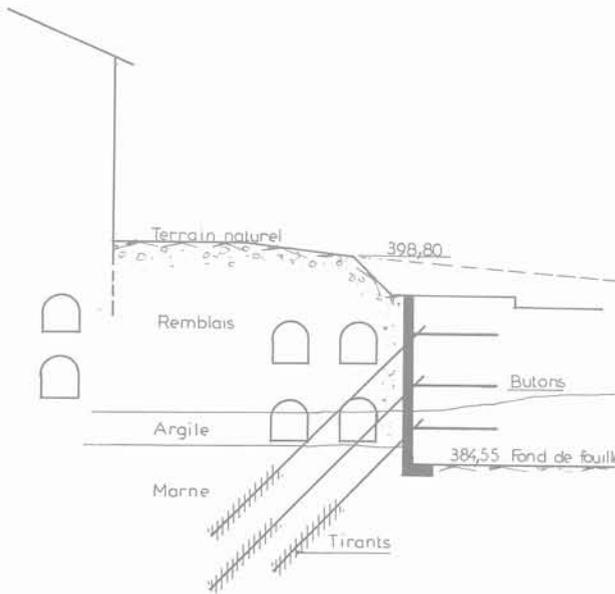


Fig. 13. — Clermont-Ferrand.  
Avenue Georges-Clemenceau, coupe amont.

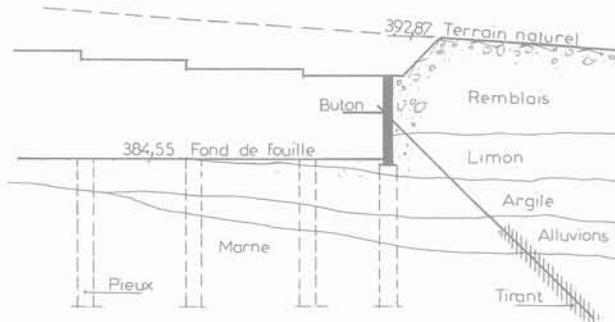


Fig. 14. — Clermont-Ferrand.  
Avenue Georges-Clemenceau, coupe aval.

L'emprise du chantier étant plus vaste que le périmètre des sous-sols projetés, il a été d'abord procédé à un décapage général donnant naissance à un ensemble de plates-formes horizontales se succédant en escalier, compte tenu de la forte pente générale du terrain naturel. Les anciennes fondations rencontrées étaient démolies au fur et à mesure au brise-roche. Parallèlement à ces premiers terrassements, il a été procédé au comblement des vides souterrains dus à la présence des anciennes caves. Une campagne de forages destructifs a permis le remplissage par gravité au moyen

d'un coulis composé de ciment, sable et eau. Une centrale de fabrication, composée d'un malaxeur de  $2\text{ m}^3$  et de mélangeurs de reprise était installée en amont du chantier et des pompes envoyaient le coulis vers les forages de remplissage. Ce comblement préalable des vides était indispensable afin de pallier les conséquences d'une rupture éventuelle d'une voûte de cave voisine et afin de permettre la mise en œuvre des tirants d'ancrage provisoires de la paroi périphérique.

Compte tenu de l'exiguïté du chantier, de la profondeur de l'excavation qui atteint 15 mètres à son point extrême, et de l'ensemble des obstacles soulignés précédemment, on a décidé d'exécuter les murs périphériques des sous-sols projetés au moyen d'une paroi berlinoise. Cette méthode consiste essentiellement à forer des trous de diamètre 0,65 à 1,00 mètre, dans lesquels sont scellés en contrebas du fond de fouille des profilés métalliques du type HEB 320 à HEB 280 de 10 à 17 mètres de longueur. Les forages ont été réalisés par deux machines WILLIAMS type LDH 100 à partir des plates-formes exécutées au préalable. Le béton de la paroi, d'une surface totale de  $1\ 800\text{ m}^2$ , sur une hauteur variable de 7 à 12 mètres, a été exécuté en béton projeté par voie sèche, à l'aide de deux gunitieuses du type Meynadier et d'une centrale à air comprimé de 32 000 litres/minute. La paroi en béton armé qui s'appuie sur les profilés métalliques a été exécutée par bandes horizontales de haut en bas, au fur et à mesure du terrassement général et de la mise en œuvre des tirants d'ancrage provisoires. La mauvaise tenue des remblais et les poussées importantes dues aux Marnes détrempées par des venues d'eau ont nécessité un blindage en bois soigneusement exécuté en coulage par des puisatiers-mineurs, au fur et à mesure de l'avancement des terrassements. La présence d'eau dans le sol a d'ailleurs créé un problème aigu sur ce chantier. Les drains sub-horizontaux prévus au niveau de chaque plancher ont débité en permanence. La mise en place du béton a dû de plus être souvent accompagnée de mini-drains d'étanchement.

En phase définitive, la paroi périphérique doit s'appuyer sur les planchers. Mais, en phase provisoire les profilés de la paroi étaient maintenus par des tirants d'ancrage provisoires. Ces tirants précontraints, du type STUP, d'une force maximale de 1 100 kN étaient scellés dans les Marnes de Limagne. Dans les angles, des butons métalliques assuraient la stabilité de la paroi. Le scellement des tirants a présenté des difficultés. Dans la partie amont du chantier, la forte teneur en argile des Marnes a contraint à mobiliser un massif plus important pour le scellement. Dans la partie aval du chantier, les matériaux de substitution contenus dans les failles volcaniques ont dû être traités au ciment avant le scellement des tirants (fig. 15).

Le terrassement général (fouille de 20 000 mètres cubes environ) a été conduit, à l'aide d'un bull chargeur de  $2\text{ m}^3$ , par passes successives et au fur et à mesure de l'exécution de la paroi berlinoise et de la mise en œuvre des tirants d'ancrage. La difficulté principale a été de maintenir carrossables les aires de circulation des camions, étant donné les conditions climatiques hivernales. En effet, 35 jours de gel et de neige ont perturbé la marche du chantier.



Fig. 15. — Clermont-Ferrand. Vue partielle du chantier.

Comme il est indiqué plus haut, les résultats des sondages ont conduit à adopter deux systèmes de fondation: semelles reposant sur les Marnes, côté amont et pieux forés à travers les alluvions et ancrés dans les Marnes sous-jacentes, côté aval. La paroi berlinoise repose donc sur des semelles côté amont, mais en aval les forages pour scellement des profilés de la paroi berlinoise servent de pieux de fondation de la paroi. Dans cette zone aval, les points d'appui centraux ont été fondés sur des pieux de diamètre 1,40 m travaillant à 5 MPa; ces derniers pieux ont été forés également avec une machine Williams LDH 100 à partir du fond de fouille définitif des sous-sols livré par le terrassement. L'accès au fond de fouille se faisait par une rampe extérieure exécutée en tranchée blindée devant servir de voie d'accès aux sous-sols réalisés.

Malgré les difficultés importantes dues à la période hivernale (gels jusqu'à  $-12^{\circ}$ , chutes de neige jusqu'à 32 cm d'épaisseur), les travaux décrits ci-dessus ont été réalisés en treize semaines.

En conclusion il faut noter que les hypothèses de calcul des soutènements étaient mal définies et trop pessimistes pour un projet économique. Au niveau de la conception, les intervenants étaient nombreux et il

est né un désaccord sur la méthode de calcul du soutènement. Compte tenu de la nature hétérogène des couches de terrain et la présence d'anciennes caves sur plusieurs niveaux, des essais préliminaires ont été faits sur les tirants d'ancrage et se sont révélés satisfaisants. Bref, la mise au point du projet a été laborieuse, mais une fois mis en route, le chantier s'est bien déroulé.

## 5. RUE PAUL BAUDRY ET RUE DE PONTIEU — PARIS 8<sup>e</sup>

Il s'agissait de transformer un ensemble formé de plusieurs immeubles et anciens hôtels particuliers entourant une cour et un jardin et de créer trois sous-sols de parkings s'étendant sous cette cour intérieure et sous une partie des immeubles l'encadrant.

La rénovation des constructions existantes était importante, puisqu'on n'en conservait que le squelette: façades et refends.

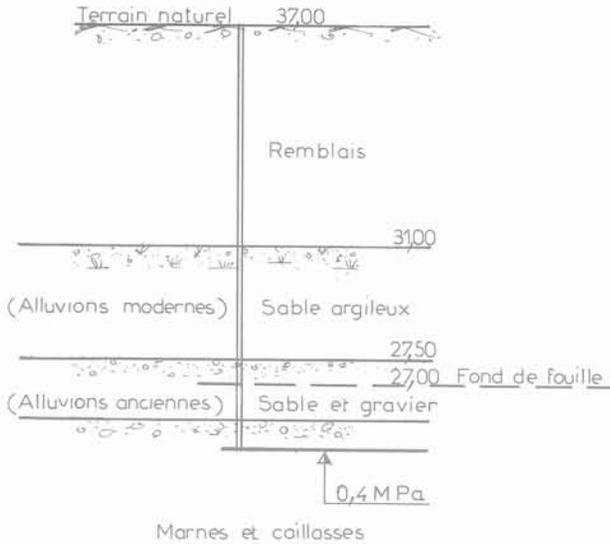


Fig. 16. — Paris 8<sup>e</sup>. Rue Paul-Baudry, coupe géologique.

La coupe géologique est indiquée sur la figure 16. La figure 17 montre l'état existant et l'ampleur du projet sur un terrain de 70 × 80 m environ. Nous avons effectué les travaux de reprises en sous-œuvre, soutènements et terrassements préalables à cette rénovation, sous la direction du Bureau d'Etudes DHEILLY. La réalisation de l'excavation a nécessité plusieurs techniques :

Suivant la ligne AB, il a été exécuté un voile en tranchée blindée.

Suivant les lignes B, C, D, les façades des constructions existantes ont été reprises en sous-œuvre.

La stabilité provisoire était assurée par des butons métalliques dans les angles et des tirants d'ancrage provisoires.

Le problème le plus délicat était de permettre l'excavation des trois sous-sols sous une partie des constructions conservées et de créer de nouveaux points d'appui devant à la fois :

- respecter la trame des circulations du parking projeté ;
- porter les planchers des sous-sols nouveaux ;
- reprendre les charges des bâtiments existants.

Les nécessités architecturales empêchaient parfois de placer les nouveaux points d'appui directement sous les charges existantes les plus importantes. Pour résoudre ce problème on pouvait :

- étayer au moyen de chevalements importants ;
- réaliser des poteaux dans des puits blindés ;
- créer par parties des longrines en béton armé en sous-œuvre des façades et des refends, avec toutes les sujétions d'armatures en acier doux pliées puis redéployées pour assurer les recouvrements.

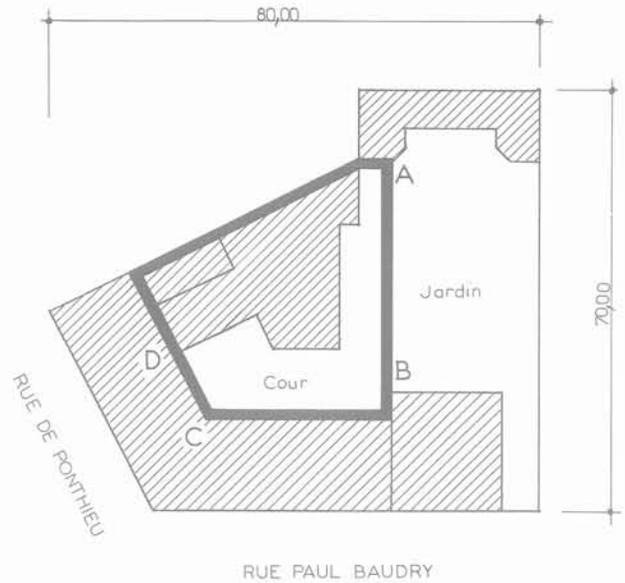


Fig. 17. — Paris 8<sup>e</sup>. Rue Paul-Baudry. Plan.

Constatant l'envahissement certain du chantier par une forêt d'étais, une autre solution a été retenue. Après étrésolement systématique des baies des constructions conservées, on a tout d'abord réalisé des *poutres moisantes* (fig. 18). Il s'agit de poutres en béton armé enserrant de part et d'autre les maçonneries des sous-sassements existants.

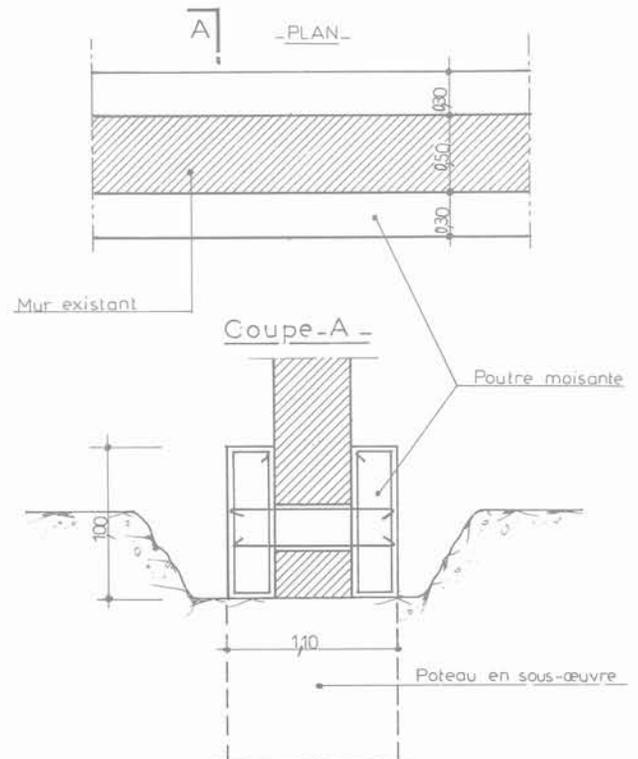


Fig. 18. — Paris 8<sup>e</sup>. Rue Paul-Baudry. Détails poutre moisante.



Fig. 19. — Rue Paul-Baudry - Paris (8<sup>e</sup>). Achèvement de l'excavation générale.

Ces poutres moisantes permettaient d'éviter des étaielements dispendieux et des longrines difficiles à réaliser en sous-œuvre. Elles étaient calculées pour transmettre les charges aux futurs poteaux. Ces derniers ont été exécutés dans de grands puits blindés, suivant le rythme imposé par l'architecture des sous-sols à créer. Les poteaux étaient fondés sur des semelles ancrées au niveau du fond de fouille dans les Marnes et Caillasses.

Une fois l'ensemble des existants repris sur de nouvelles fondations, on a procédé à l'excavation générale (fig. 19 et 20).

La reprise en sous-œuvre, les soutènements et les terrassements ont été terminés en six mois.

## 6. CONSTRUCTION D'UN ÉQUIPEMENT SPORTIF ET SOCIO-ÉDUCATIF A IVRY-SUR-SEINE

En 1978, la Mairie d'Ivry-sur-Seine avait projeté la construction d'un équipement sportif et socio-éducatif. D'après les cartes, le terrain était situé au-dessus d'une ancienne carrière du calcaire grossier, sur au moins un

ou deux étages; mais on n'avait aucune indication précise sur les limites des anciennes exploitations.

En 1979, trois sondages carottés ont été exécutés et ont recoupé les bourrages de carrière à des niveaux différents entre 15 et 19,00 m de profondeur. Deux sondages avaient rencontré l'étage supérieur, le troisième l'étage moyen (fig. 21). Notre rapport de sol proposait plusieurs solutions:

1. Des fondations superficielles sur les alluvions anciennes rencontrées près de la surface. Mais cela exigeait une consolidation souterraine préalable par piliers en maçonnerie. Il était alors nécessaire de prévoir un puits de sondage et des galeries de recherche dans les bourrages pour vérifier l'état de la carrière et savoir si elle était consolidable. Une autre méthode était également proposée: la consolidation souterraine par injections. Nous y reviendrons.

2. Des pieux ancrés dans le calcaire sous le plancher de l'exploitation la plus basse. Ces fondations profondes devaient être précédées par un comblement des vides résiduels.

En 1980, l'Inspection Générale des Carrières avait préconisé des fondations profondes traversant tous les



Fig. 20. — Rue Paul-Baudry - Paris (8<sup>e</sup>). Vue des immeubles repris en sous-œuvre.

étages de carrière ainsi que le remblaiement complémentaire de tous les vides sous l'ensemble de la propriété.

En 1982, nous avons exécuté un puits de reconnaissance de 20,00 m de profondeur avec des galeries de recherche. Les ciels de carrière (photo galerie souterraine: fig. 22) étaient en bon état; on pouvait donc consolider.

En 1983, il est apparu qu'une fondation profonde par pieux ne s'imposait pas techniquement et était prohibitive économiquement. Finalement, le Service des Carrières a accepté, après examen des sondages, une solution de consolidation souterraine par piliers en maçonnerie ou par injections.

Fin 1983, la décision était prise de réaliser une consolidation souterraine par injections, procédé rapide d'exécution et plus économique qu'une consolidation souterraine par piliers en maçonnerie (à peu près moitié moins cher dans le cas particulier de ce chantier). La méthode de travail a été la suivante. Profitant de l'existence d'un puits de sondage et de galeries de visite, il a été d'abord procédé au murage de ces galeries en limite de propriété; ensuite pour combler les vides, on a exécuté des forages destructifs

depuis le terrain naturel et suivant une maille de  $5,00 \times 5,00$  m. Ces perforations étaient assorties de la mesure des paramètres de forage. Le coulis était dosé à 80 kg de ciment pour une tonne de cendres volantes; les quantités mises en œuvre étaient de 15 à  $30 \text{ m}^3$  par forage. Le traitement des bourrages et des anomalies du recouvrement éventuellement rencontrées a constitué la deuxième phase importante de l'opération pour laquelle une deuxième série de forages a été exécutée suivant une maille de  $3,50 \times 3,50$  m. Ils ont été tubés et équipés de tubes à manchettes pour injecter sous pression un coulis dosé à 250 kg de ciment et 750 kg de cendres volantes par mètre cube, soit 5 à  $6 \text{ m}^3$  par forage (fig. 23).

Le chantier a été achevé par quatre sondages de contrôle carottés à des endroits déterminés par le maître d'œuvre. Ces sondages ont montré qu'il n'était plus rencontré de vide, que les bourrages de carrière étaient largement imprégnés de coulis de ciment et qu'une fondation superficielle était acceptable.

On a pu noter, en conclusion, que le volume total mis en œuvre lors du comblement a un peu dépassé la prévision. Cela s'explique par le fait que dans une zone non explorée avant l'ouverture du chantier, on a rencontré des vides plus importants que prévus. Par

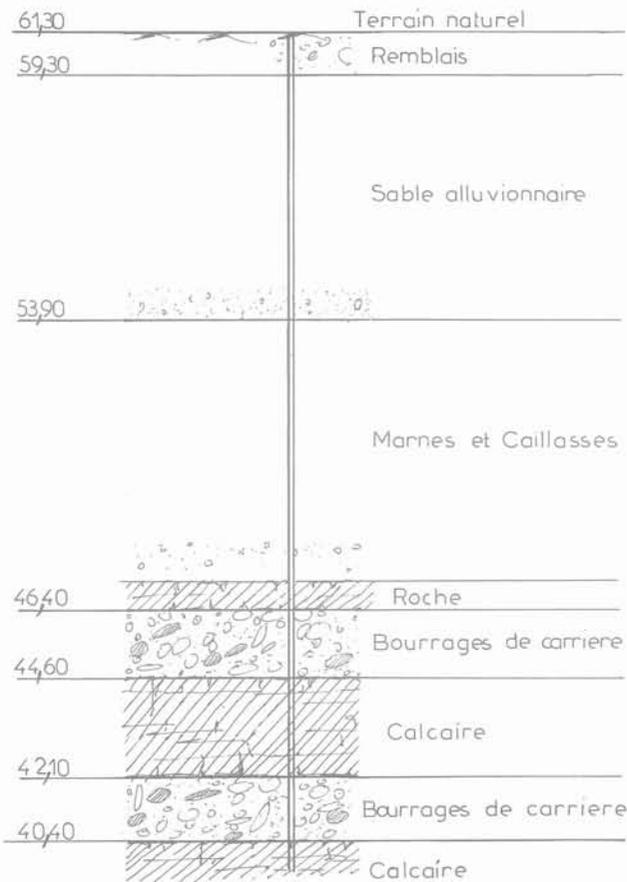


Fig. 21. — Ivry-sur-Seine. Coupe géologique.



Fig. 22. — Ivry-sur-Seine. Galerie souterraine.



Fig. 23. — Ivry-sur-Seine. Installation d'injection.

contre, le volume réel mis en œuvre lors de la phase de traitement a été équivalent à la prévision. On a constaté que seul un maillage serré de traitement a permis une exécution efficace. Un maillage plus lâche aurait nécessité de fortes pressions qui auraient risqué de désorganiser les bourrages.

Les techniques mises en œuvre ont permis finalement de sauver un projet qui avait été remis en cause plusieurs fois, pour des raisons économiques.

## 7. AMIENS AVENUE FRANKLIN ROOSEVELT

Le projet initial prévoyait une construction comportant un rez-de-chaussée fondé sur terre-plein au niveau du terrain naturel. Aucun sondage n'avait été exécuté bien que l'existence d'anciennes exploitations souterraines de craie dans tout le quartier ait été connue. Aucun document ne faisait apparaître de carrière au droit du terrain intéressé. Le client ne voulant pas engager de frais, les sondages devaient être exécutés par l'entreprise chargée du gros-œuvre. Après trois sondages à la tarière dont l'un a rencontré un vide de 5,00 m de profondeur, il a été décidé en accord avec le maître d'œuvre et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) d'exécuter une campagne de reconnaissance systématique: dix-huit sondages à la tarière et deux puits à la pelle mécanique permettaient alors de déceler de nombreux vides entre 3,50 m et 11 m de profondeur (fig. 24) et de l'ordre de 40 à 100 m<sup>3</sup>. Tous ces vides (galeries et salles) confirmaient l'existence d'une ancienne exploitation souterraine plus ou moins remblayée.

Mais la mission du B.R.G.M. avait été mal définie. Son rapport n'était qu'un relevé cartographique et ne concluait pas sur un mode de fondations. C'est à ce



Fig. 24. — Amiens. Plan des vides rencontrés.

moment seulement que notre entreprise a été consultée pour donner son avis. Le budget du maître d'ouvrage était très limité a priori. Nous avons proposé un comblement systématique des vides au moyen d'une injection gravitaire à partir de forages destructifs associés à une rigidification de la structure en béton armé. Des forages ont été exécutés suivant une maille de  $2,0 \times 2,0$  m et de 7,00 m de profondeur environ. Le coulis injecté par gravité était dosé à 80 kg de ciment pour  $1 \text{ m}^3$  de cendres volantes. Certains sondages avaient même fait apparaître des vides aux abords de la construction projetée au droit d'un parc de stationnement situé en surface. Cela nous a conduit à insister pour réaliser sous ces abords quelques forages complémentaires suivant une maille plus large de  $3,0 \times 3,0$  m. Le volume initial de coulis prévu pour l'ensemble de l'opération avait été estimé à  $360 \text{ m}^3$ . Il fut en réalité mis en œuvre près de  $1\,000 \text{ m}^3$ , ce qui a montré l'importance des vides existants et l'ampleur du problème sous-estimé au départ par certains responsables de la construction.

Après ces travaux préparatoires, on a décidé de fonder superficiellement la construction projetée, mais en prenant certaines précautions pour rigidifier le bâtiment :

- suppression des points d'appui isolés ;
- structure porteuse avec poutre-voiles ou semelles filantes traitées en longrines fortement armées et soumises à une condition de fontis de 3 m ;
- chaînages verticaux et horizontaux ;
- dallage au sol remplacé par un plancher soumis également à la condition de fontis de 3,00 m.

En conclusion, il est évident que la solution technique la plus sûre aurait été une fondation sur pieux assortie d'un comblement préalable des vides souterrains. Mais cette méthode avait été refoulée dès le début par le client et le maître d'œuvre, à cause de son prix.

## CONCLUSION

Nous avons essayé de présenter, un peu rapidement peut-être, quelques chantiers difficiles qui ont fait appel à plusieurs techniques assez différentes.

Deux observations peuvent être faites :

— D'abord dans la mesure où un chantier a été bien préparé, où la collaboration maître d'œuvre, Bureau d'Etudes et Entreprises a permis de faire le tour des problèmes avant le démarrage des travaux, le chantier a toutes les chances de se dérouler à la satisfaction de tous et de respecter les délais. Cette affirmation est évidente. Mais ne faut-il pas la répéter. En effet, même un chantier bien étudié n'est pas exempt de surprises (poche de carrière inconnue, zone de terrain aux caractéristiques différentes que les sondages n'ont pas recoupée,...). A fortiori, un projet pour lequel la campagne de sondage a été insuffisante, pour lequel les fondations ont été mal définies au départ ou bien où les problèmes de soutènement ont été sous-estimés, risque de provoquer beaucoup de pertes de temps et d'argent pour les intervenants.

— La deuxième observation que l'on peut faire est la suivante : nous avons constaté plus d'une fois, et cela plus souvent en province qu'à Paris, que la nature des investigations préliminaires est insuffisante, ou bien que le mode d'investigation ne convient pas au site. La conception de l'ouvrage est alors mauvaise, qu'il s'agisse de fondations ou de soutènements. Il s'ensuit des conséquences fâcheuses tant sur le plan technique que sur le plan économique. Cela pose des questions sur la compétence des intervenants.

Enfin une dernière remarque qui découle de l'observation précédente : il est dommageable pour la profession que certains travaux soient réalisés n'importe comment, par n'importe qui. Bien souvent dans les appels d'offres, les lots ne sont pas scindés. Les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre ont alors l'illusion de n'avoir qu'un seul responsable. L'entreprise de gros-œuvre doit alors résoudre des problèmes de fondations et de soutènements qui lui échappent. Elle appelle plusieurs sous-traitants en créant entre eux une concurrence farouche au détriment de la sécurité. Au contraire, dans les cas difficiles tels que ceux que nous venons de décrire, il est nécessaire que les lots soient séparés et que le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre fassent directement appel à des entreprises spécialisées très compétentes qui font passer la qualité de la technique avant tout. Un seul intervenant est préférable pour avoir une bonne méthodologie et pour respecter le phasage des travaux. Quand un immeuble est projeté sur plusieurs niveaux de sous-sols, l'expérience montre qu'il est souhaitable, pour l'économie du projet, qu'une seule entreprise spécialisée livre à l'entreprise de gros-œuvre une « fouille clefs en mains ». Une fouille avec soutènement difficile doit être menée avec diligence, pour obtenir la qualité et l'efficacité.

Quelquefois des projets sont abandonnés malheureusement parce qu'on a oublié de consulter des entreprises spécialisées capables de maîtriser les techniques qui s'imposent.