

GARES SOUTERRAINES D'EOLE JET GROUTING ET RABATTEMENT

SYSTÉMATISATION ET LIMITES D'UTILISATION DE CES MÉTHODES DANS DES GRANDS PROJETS SOUTERRAINS EN SITE URBAIN

GARES SOUTERRAINES D'EOLE JET GROUTING ET RABATTEMENT

Les dimensions importantes des deux gares Magenta et Condorcet dans le contexte géologique et hydrogéologique parisien ont imposé un large recours aux techniques de jet grouting et de rabattement de nappe. Leur utilisation sur le chantier de ces deux gares fait l'objet d'articles différents.

EOLE, la future ligne E du RER reliera les banlieues Est et Ouest. Elle nécessite la création pour la traversée de Paris d'un ensemble d'ouvrages souterrains entre La Villette et Pont Cardinet. La 1^{ère} étape actuellement en cours de réalisation, reliera la banlieue Est au coeur de Paris, quartier Saint-Lazare.

La partie souterraine de la 1^{ère} étape de 4 km environ de longueur comporte deux nouvelles gares souterraines l'une située entre les gares actuelles du Nord et de l'Est, la gare MAGENTA (anciennement gare Nord-Est), l'autre située entre la gare SAINT-LAZARE et la station RER AUBER, la gare CONDORCET qui sera le terminus de la 1^{ère} étape. (Fig. 1)

La construction de ces gares, qui constituent des ouvrages imposants

Philippe FAUVEL
Département des Ouvrages d'Art
SNCF

Pierre VIGNAT
Agence Ile de France
SNCF

par leurs dimensions et complexes dans leurs organisations, a nécessité le recours à des techniques particulières pour le traitement des terrains. Ces techniques, le rabattement de nappe et le jet grouting, assez inédites en plein cœur de Paris, seront décrites dans leur application pour chacune des gares, par deux articles qui succéderont à la présentation générale du projet EOLE, le premier concernant la gare Magenta est publié dans la présente revue.

LES GARES

D'une longueur de 225 mètres, elles offriront 4 voies à quais. Elles sont de conception analogue : une voûte centrale et deux latérales prenant appuis sur des culées latérales massives et des culées centrales creuses utilisées comme ouvrages d'accès aux quais. (Fig. 2 et 2 bis)

Leur largeur est de 54 m pour la gare MAGENTA, de 58 m pour la gare CONDORCET.

Profondes d'une trentaine de mètres, elles ont près de 13,5 m de haut. Au-dessus de la partie profonde correspondant au niveau des voies et des quais se trouvent les ouvrages liés aux accès et aux circulations verticales et horizontales, les ouvrages de correspondances et les locaux techniques et commerciaux.

EOLE UNDERGROUND STATIONS ; JET GROUTING AND WATER TABLE LOWERING

The large size of the Magenta and Condorcet stations within the geological and hydrogeological context of the city of Paris has called for the use of extensive jet grouting and water-table lowering techniques. Their use on the site of these two stations is described in various articles.

LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Les campagnes de reconnaissances qui se sont déroulées de juin 90 à février 92 ont permis d'établir le profil en long géologique. (Fig. 3)

Depuis les voies de la banlieue Est, l'ouvrage s'enfonce progressivement en souterrain en traversant les formations supérieures aux médiocres caractéristiques pour se diriger vers la gare MAGENTA.

De la gare MAGENTA dont les voûtes sont dans le calcaire de Saint-Ouen, le projet s'enfonce encore au travers des Sables de Beauchamp et des Marnes et Caillasses pour se caler dans les Calcaires Grossiers avant d'atteindre la gare CONDORCET.

La coupe géologique est donc constituée par les :

- ▶ Remblais, matériaux hétérogènes aux caractéristiques médiocres de comblement d'anciennes exploitations à ciel ouvert de gypse,
- ▶ Eboulis qui sont le plus souvent des résidus de la dissolution des Masses et Marnes du Gypse mélangés à des limons des plateaux,
- ▶ Masses et Marnes du Gypse, alternances de couches de calcaire marneux et de gypse, de 6 à 10 m d'épaisseur,
- ▶ Sables de Monceau, plus ou moins gréseux avec des bancs d'argile, de Calcaire et de gypse saccharoïde sur une faible épaisseur,

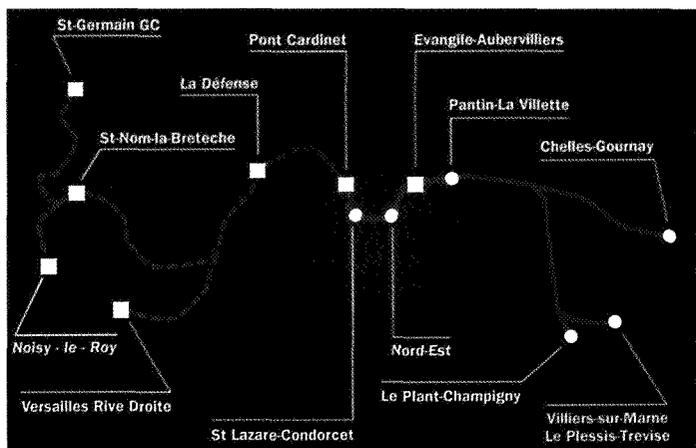


Figure 1 - EOLE, schéma général

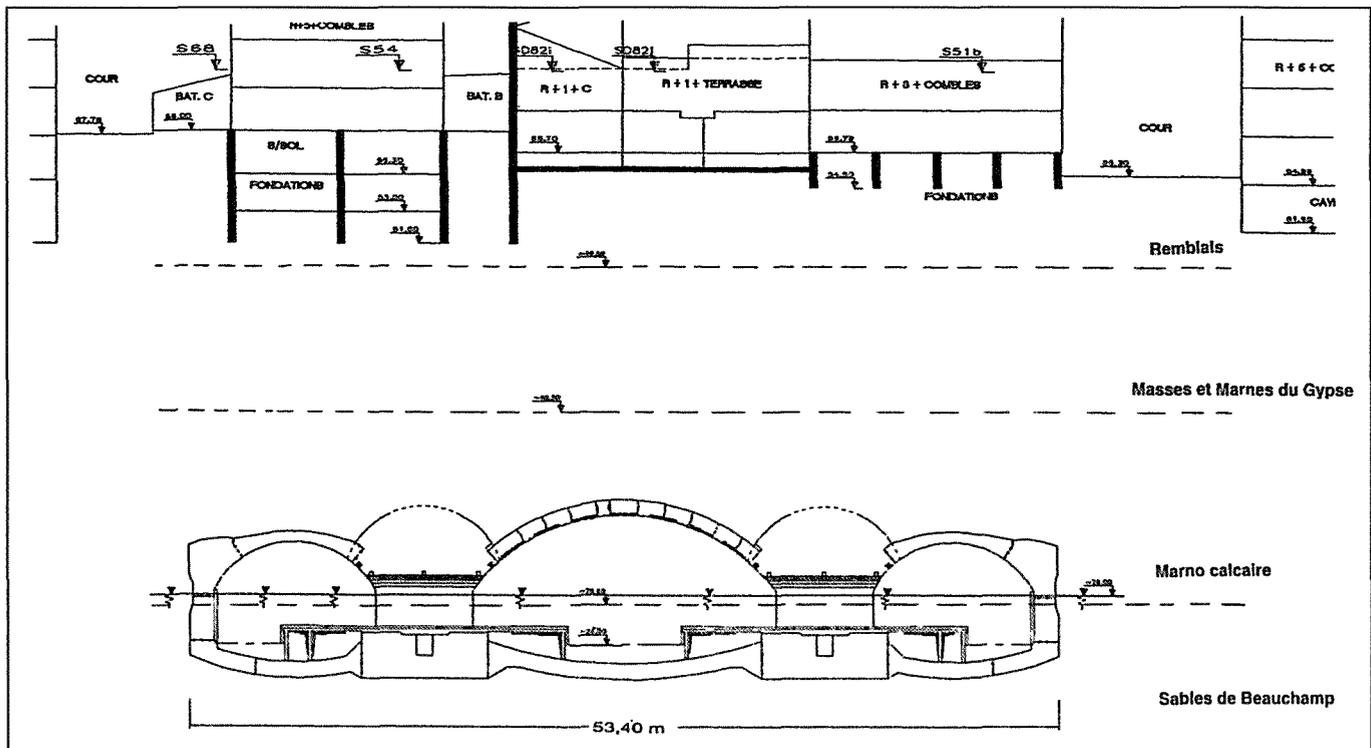


Figure 2 - Gare Magenta

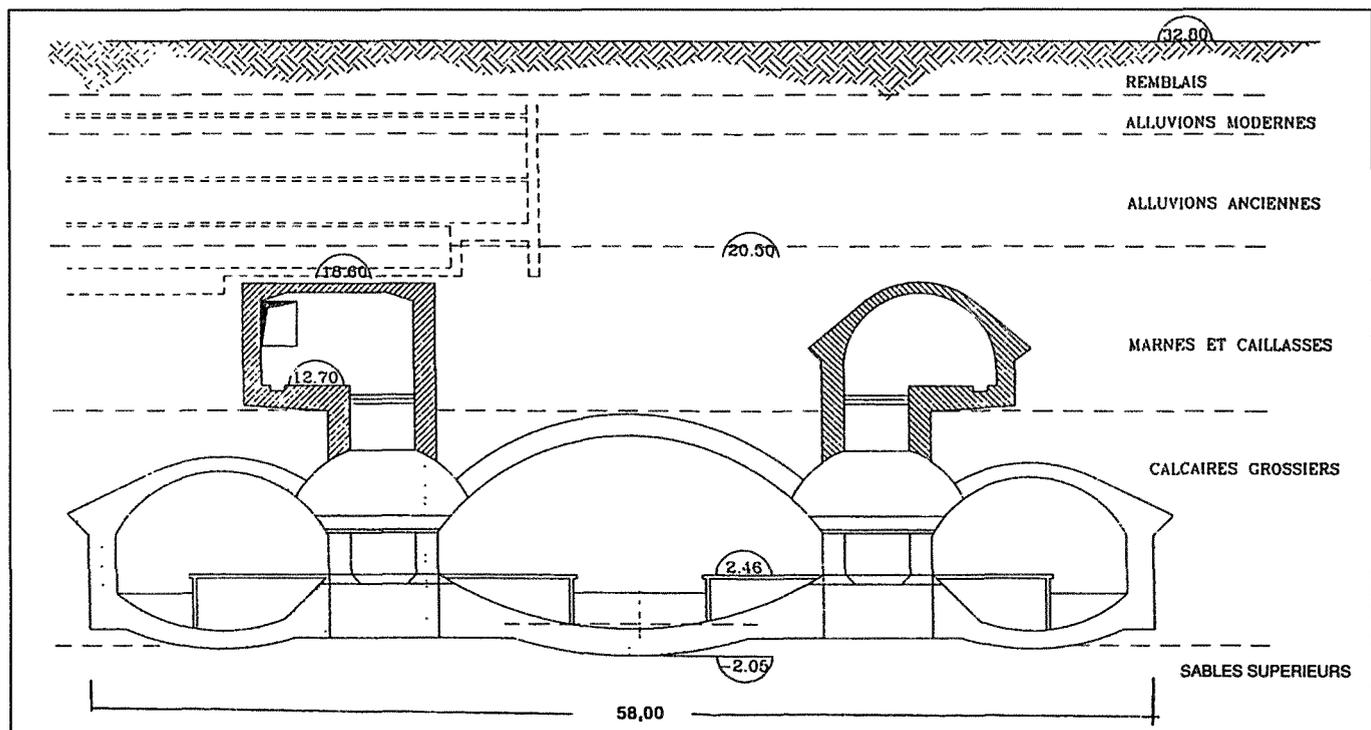


Figure 2 bis - Gare Condorcet

► Calcaires de Saint-Ouen, alternances de bancs de calcaire et de marnes à passées d'argiles sombres entrecoupés de passées gypseuses, de 12 à 18 m d'épaisseur (la voûte de la gare MAGENTA y est implantée),
 ► Sables de Beauchamp, sable argileux vert, ponctuellement grésifié et entrecoupé de lits argileux francs, de 13 m d'épaisseur environ, (il constitue l'appui de la demi section inférieure de la Gare MAGENTA),

► Marnes et Caillasses, alternance de bancs calcaires et de marnes associés à d'importants épisodes gypseux avec l'existence de vides dus à la dissolution du gypse, de 10 à 16 m d'épaisseur, (la base de cette formation concerne par endroits la voûte de la gare CONDORCET),
 ► Calcaires Grossiers, avec une couche de 13 à 18 m d'épaisseur. Son sommet est marqué par un niveau de

calcaire gris, fin et dur, nommé "banc de roche". Dans son ensemble, cette formation reste relativement homogène et paraît propice à l'exécution de travaux souterrains sous Paris (la gare CONDORCET y est implantée).

► Sables Supérieurs et Fausses Glaises, une formation argilo-sableuse noirâtre avec la présence de lignite (le radier de la gare CONDORCET s'y appuie dans sa partie Ouest).

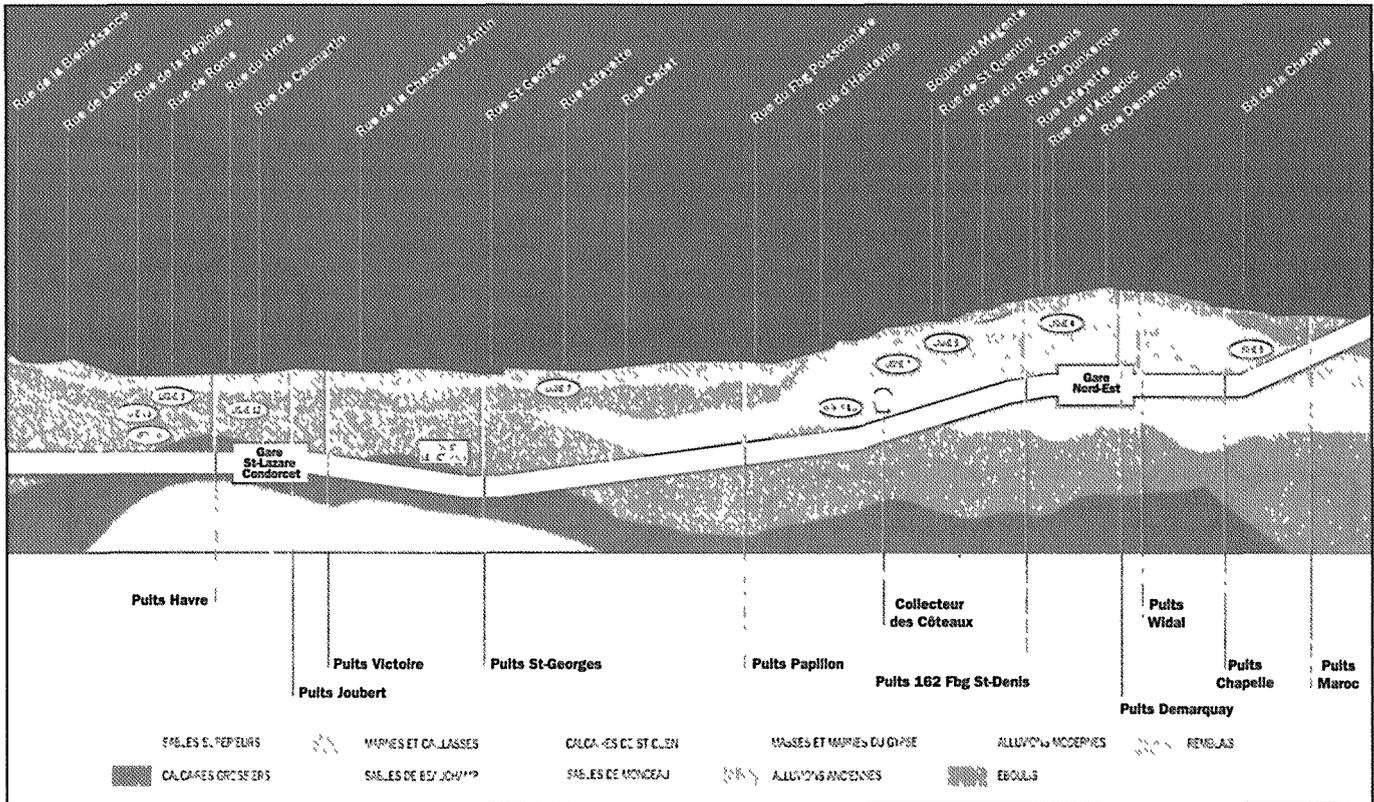


Figure 3 - Profil en long géologique

Dans le Secteur de Saint-Lazare, les niveaux supérieurs ont été érodés si bien que les alluvions de la Seine reposent sur les Marnes et Caillasses. Ces alluvions concernent certains ouvrages d'accès ou de correspondance de la gare CONDORCET.

Le projet est intéressé par quatre niveaux aquifères :

- Nappe des alluvions anciennes, peu active et dépendant de la Seine (perméabilité 10-3 m/s),
- Nappe du Bartonien, (Calcaire de Saint-Ouen et Sables de Beauchamp) (perméabilité 10-5 m/s),
- Nappe du Lutétien (Marnes et Caillasses et Calcaire Grossier), (perméabilité 10-4 m/s),
- Nappe de l'Yprésien (Sables Supérieurs et fausses glaises). Cette dernière nappe est en charge de 0,8 à 1,8 bar sous le Calcaire Grossier.

Le site est géologiquement délicat du fait de la présence des gypses, de son évolution présente et future (dissolution des gypses antéludiens, c'est-à-dire ceux des Marnes et Caillasses noyés dans la nappe), et de son exploitation passée (bancs de gypse des Masses et Marnes du Gypse actuellement remblayés).

LA PROBLEMATIQUE DE LA REALISATION DES GARES

Le principe constructif des 2 gares souterraines est le suivant :

A partir des puits de chantier, qui sont intégrés dans le projet en tant qu'émergence technique, sont creusées les parties hautes des galeries de culée.

- Culées centrales creuses et latérales pour la Gare MAGENTA,
- Culées centrales uniquement pour la gare CONDORCET,

Ces galeries ont permis de compléter les reconnaissances et d'effectuer, le cas échéant, le traitement par injections des terrains situés au niveau des voûtes et en couverture, mais aussi en profondeur.

Ensuite sont exécutés l'approfondissement des galeries et la construction des culées, puis la réalisation des tunnels latéraux, enfin la voûte centrale. (Fig. 4 et 4 bis)

Situées dans un milieu fortement urbanisé en plein cœur de PARIS, les gares devaient être implantées en respectant des contraintes multiples liées à leur fonctionnement, aux conditions de leur réalisation et au respect de l'environnement. Ces gares aux dimensions exceptionnelles et relativement peu profondes au regard des ouvertures des excavations à réaliser ne pouvaient se trouver entièrement dans la même couche de terrain. Ainsi, si les voûtes se trouvaient dans des niveaux assez favorables, les culées et radiers étaient placés dans des conditions géologiques et hydrogéologiques très défavorables : sous la nappe et

dans des matériaux fins, sensibles à l'eau. La base de la gare CONDORCET doit être excavée presque entièrement dans des matériaux argilo-sableux (Sables Supérieurs) à 20 m sous le niveau de la nappe, 1/3 au moins de la gare MAGENTA doit être excavée dans les Sables de Beauchamp, sables plus ou moins argileux dont la portance peut être réduite et qui, baignés par la nappe, peuvent présenter des difficultés de tenue à l'excavation.

Aussi, a-t-il fallu, pour résoudre les difficultés particulières liées à la réalisation de ces grandes gares dans le sous-sol parisien, rechercher les techniques répondant à la fois au respect des objectifs économiques et de planning et permettant de satisfaire les contraintes d'environnement, notamment vis-à-vis de la pollution ou des déformations. On a eu recours à des techniques auxquelles la SNCF, bien que les ayant déjà utilisées épisodiquement, n'avait pas envisagé jusqu'à une date récente, d'en faire la solution de référence pour des travaux importants.

Deux articles, le premier traitant de la gare Magenta et du jet grouting, le second publié ultérieurement et traitant de la gare Condorcet, du jet grouting et du rabattement de nappe, vont évoquer les solutions retenues qui seront présentées non seulement au travers de leur mise en œuvre, mais également au travers des démarches qui ont conduit à les adopter.

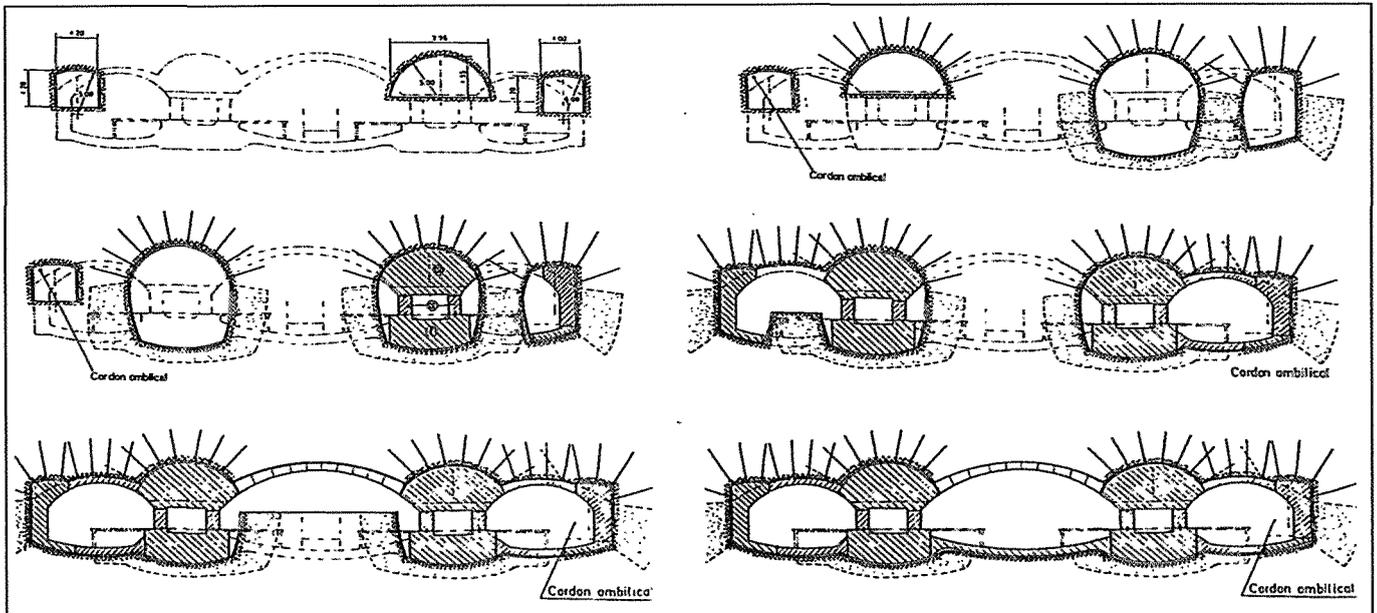


Figure 4- Gare Magenta - phasage des travaux

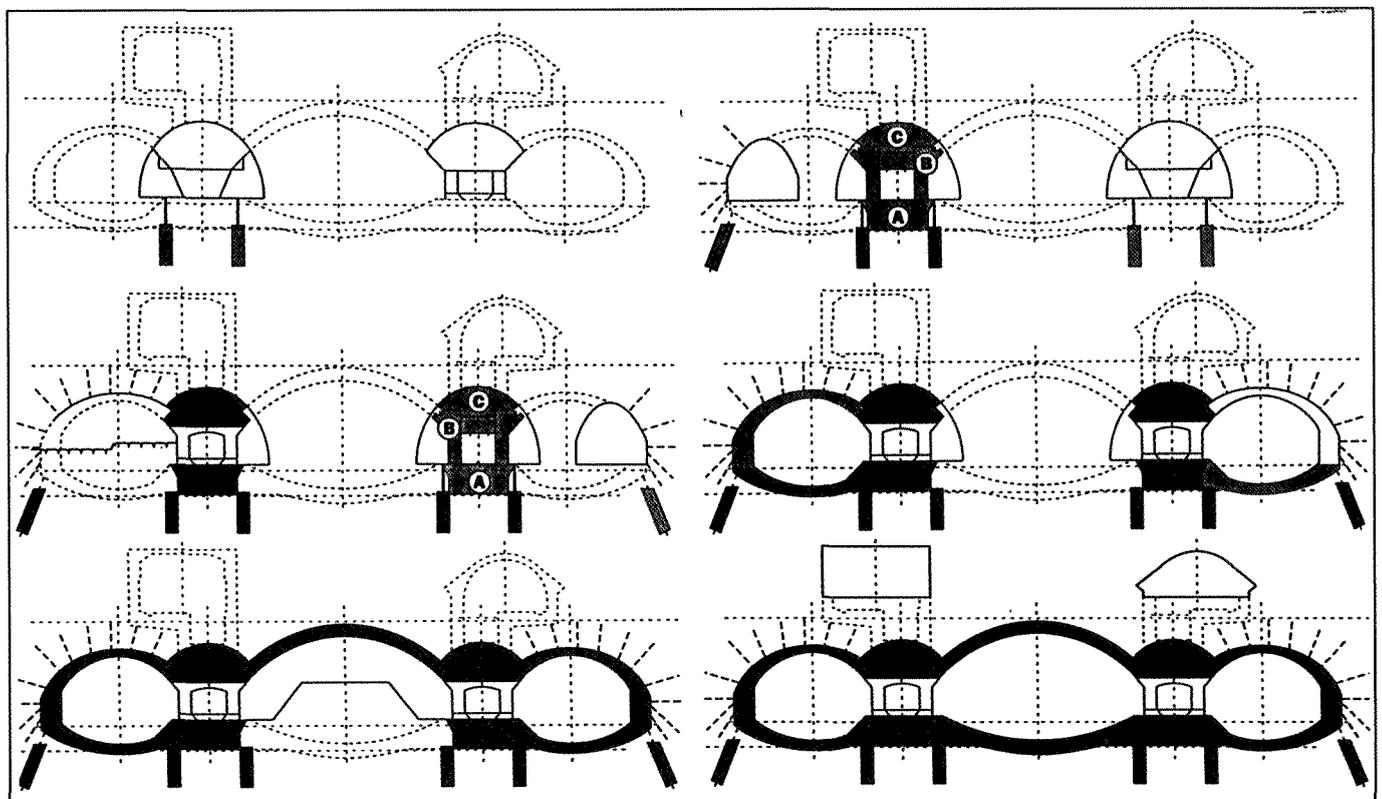


Figure 4 bis - Gare Condorcet - phasage des travaux

BIBLIOGRAPHIE

EOLE - Un grand chantier souterrain dans Paris. A. BALAN - G. LAPLACE (SNCF) - Y. LEBLAIS (SIMECSOL) - *Revue Travaux* - Septembre 1993

EOLE - La ligne qui touche Paris au cœur. D. ANDRE - A. BALAN - (SNCF) - Y. LEBLAIS (SIMECSOL) - AFTES -

Journées d'études internationales de Toulon - Octobre 1993

EOLE - La future ligne E du RER - C. SEIGNEURET - Ph. FAUVEL - J.- P. REY (SNCF) - *L'Ingénieur Constructeur* - Janvier-Février 1995

EOLE - Une nouvelle dimension de chantier- D. ANDRE - A. BALAN - R. LEGRAND (SNCF) - *Tunnels et Ouvrages souterrains* - Février 1996

Les travaux de génie civil - A. BALAN - P. VIGNAT (SNCF) - *Revue Générale des Chemins de Fer* - Novembre 1996

EOLE - Une architecture exigeante - R. LEGRAND (SNCF) - *Espaces souterrains* - Montréal 1997

L'insertion d'EOLE dans la ville - G. LAPLACE (SNCF) - *Espaces Souterrains* - Montréal 1997

.../...

GARE MAGENTA

GARE MAGENTA

Pour la construction de la gare Magenta, les traitements traditionnels par injection de silicate ont été abandonnés au profit du jet grouting, pour les culées de la gare. Deux plots d'essais ont permis d'en préciser l'utilisation. Cette méthode a également été utilisée pour la galerie Demarquay.

Philippe FAUVEL
Département des Ouvrages d'Art
SNCF

vrages mettent la gare MAGENTA en communication avec la gare du Nord et notamment les RER B et D, et avec la ligne n° 5 du métro. (Fig. 1)

La gare Magenta (anciennement dénommée gare Nord-Est), présentée dans l'article introductif précédent, est implantée sous les bâtiments de construction ancienne du X^{ème} arrondissement de Paris, entre les gares de l'Est et du Nord.

Parmi les ouvrages conçus pour les accès, les circulations, les correspondances et les locaux techniques et commerciaux, les plus importants sont, du côté Nord, la galerie souterraine Demarquay et, du côté opposé, le Hall Sud qui s'est réalisé à ciel ouvert, sur 5 niveaux jusqu'à la surface, à l'abri d'une fouille blindée. Ces ou-

LE CONTEXTE GEOLOGIQUE

Cet ouvrage étant situé assez près de l'origine de la partie souterraine du projet EOLE, il était difficile de l'implanter trop en profondeur, dans les horizons géologiques les plus favorables.

Aussi, compte-tenu des pentes maximales admissibles pour un projet ferroviaire, la couche la plus favorable accessible était celle du calcaire de Saint-Ouen dans laquelle ont été calées les voûtes tout en cherchant à conserver une garde suffisante vis-à-vis des couches superficielles plus médiocres.

Mais l'épaisseur relative réduite du banc calcaire interdisait d'y implanter la gare en totalité, ce qui a contraint à réaliser la partie inférieure de l'ouvrage dans les Sables de Beauchamp dans lesquels la diffusion des charges apportées par les culées de la gare devait se faire. C'est aussi sur cette formation que venaient s'appuyer les voûtes en phase provisoire. Ces sables aux faciès variables, argileux ou grésifiés, nécessitaient une consolidation préalable à l'excavation des demi-sections inférieures des galeries pour obtenir une meilleure assise, mais aussi li-

MAGENTA STATION

For the construction of the Magenta station, conventional silicate grouting techniques were abandoned, and use was made of jet grouting for the station's piers. Two test sections made it possible to determine requirements. This method was also used for the Demarquay gallery.

miter les convergences dans le but de réduire des tassements préjudiciables à l'environnement.

La consolidation se justifiait aussi par l'amélioration de la cohésion apportée aux sables permettant d'assurer la stabilité des piédroits sur de grandes hauteurs. Enfin, on pouvait attendre une limitation des venues d'eau par la réduction de la perméabilité de masse.

LES TRAITEMENTS TRADITIONNELS

Un traitement par injection, solution traditionnellement employée dans les chantiers précédents du RER fut un temps envisagé. Il faut cependant savoir que les Sables de Beauchamp ont toujours posé un problème vis-à-vis de l'injection. (Fig. 2)

Leur perméabilité de 10^{-5} m/s en moyenne les situe à cheval sur le domaine des gels de silice et celui des résines comme l'indique le tableau ci-après, extrait des recommandations pour les injections de l'AFTES et indiquant le domaine d'application des coulis. (Tabl. 1)

Les résines, trop onéreuses, ont le plus souvent été exclues au profit des silicates de soude. C'est donc l'injection de ces produits qui a été employée par la R.A.T.P. et la S.N.C.F. dans les chantiers passés mais avec bien des déboires et des résultats décevants. Sur les chantiers de la ligne C du RER et sans doute ailleurs, des débousses se sont produits à cause d'un défaut d'injection. Déjà très limite dans les perméabilités les plus fortes (10^{-4} m/s), le traitement est totalement inefficace pour les plus faibles perméabilités pouvant descendre à 10^{-8} m/s.

Très vite d'ailleurs, l'imprégnation des terrains initialement recherchée

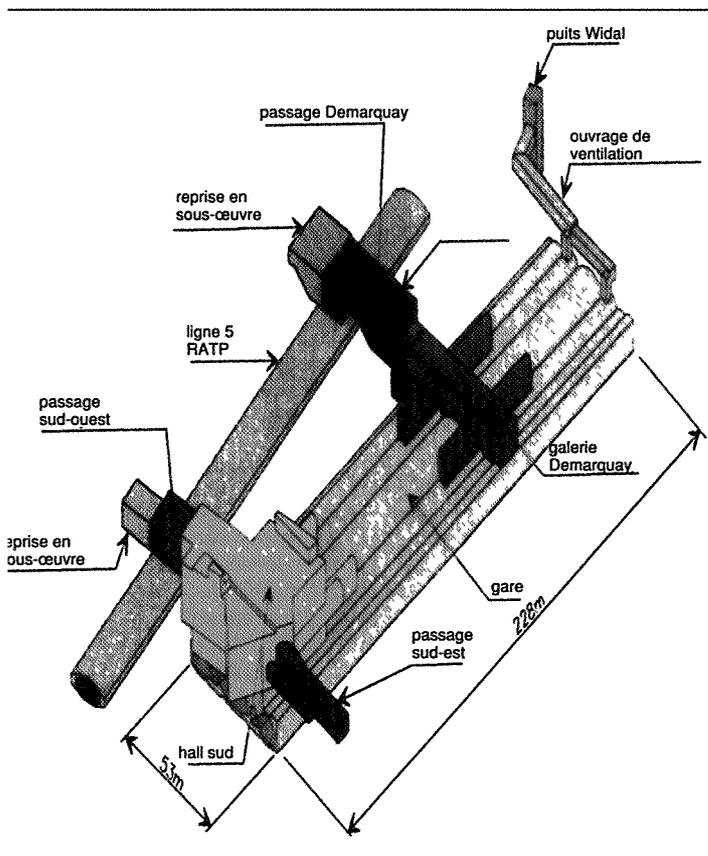


Figure 1 - Perspective de la gare Magenta

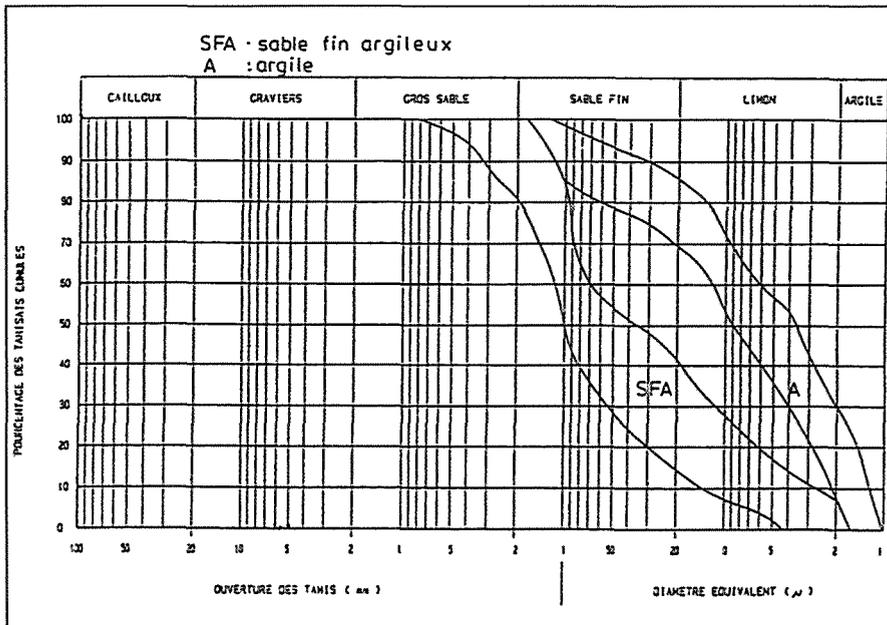


Figure 2 - Fuseau granulométrique des Sables de Beauchamp

COULIS		Consolidation (C) ou Etanchement (E)		domaine d'application courant		limité par le prix de revient				
CIMENT		C								
ARGILE-CIMENT		EC								
COULIS avec charges COULIS cellulaires		EC								
GEL D'ARGILE BENTONITE déflocculée rigidifiée		E								
COULIS à pénétration améliorée		EC								
EMULSION DE BITUME		E								
GEL DE SILICE	de consolidation	concentré	C							
		faible viscosité	C							
	d'étanchement	concentré	E							
		très dilué	E							
RESINES	ACRYLIQUE	E								
	PHENOLIQUE	C								
CARACTERISTIQUES DU TERRAIN		Perméabilité initiale k en (m/s)	10 ⁻⁷	5 10 ⁻⁶	5 10 ⁻⁵	5 10 ⁻⁴	5 10 ⁻³	5 10 ⁻²	5 10 ⁻¹	5
			Alluvions grossières, prétraitées Alluvions fines (gravier et sable, sables, sables silteux)				Terrains grossiers, éboulis Alluvions grossières			

Tableau 1 - Domaines d'application des coulis (AFTES)

a été abandonnée car les forages auraient dû être trop resserrés

La finesse des terrains conduisait à la formation de claquages. Inévitables, on a cherché à les exploiter en espérant que, par la création d'une réticulation en nid d'abeille prolongeant en quelque sorte le réseau des forages, on augmenterait le rayon d'action de ces derniers

Mais au lieu d'une mini imprégnation à partir de cette réticulation, c'est plutôt un engraissement des claquages qui se produisait favorisant le phénomène de décomposition du gel (synerèse) qui caractérise les silicates à l'état libre. Seul l'emploi de gels durs à base de réactifs organiques pouvait, de par la lenteur de la réaction, permettre les plus fortes concentrations en silicate nécessaires à la

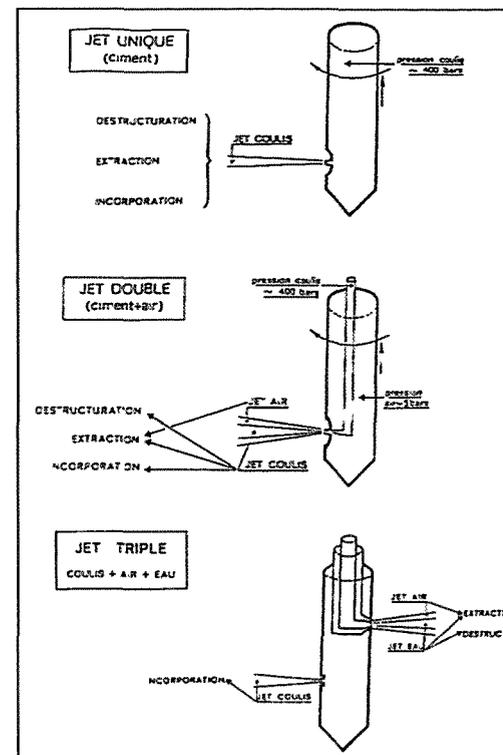


Figure 3- Différents procédés de jet grouting

consolidation recherchée. Mais alors la synerèse s'accompagnait d'une décomposition des produits organiques qui favorisait la prolifération de bactéries. Ces bactéries avaient aussi une action réductrice sur les sulfates très présents dans les terrains parisiens et produisaient des émanations sulfureuses nauséabondes.

Cette dernière mésaventure contraire au confort du voyageur a conduit les directives administratives à interdire l'emploi de ces produits polluants. Accumulée aux précédentes, elle a emporté la décision d'abandonner ce type de traitement dans les Sables de Beauchamp qu'il faut bien reconnaître économiquement injectables.

L'ORIENTATION VERS LE JET GROUTING

La difficulté et les coûts des méthodes traditionnelles, mais aussi l'expérience acquise sur d'autres ouvrages qui permettaient de juger de la fiabilité des méthodes du type jet grouting ont donc assez rapidement conduit la S N C F à s'orienter vers une telle solution. Encore fallait-il déterminer les zones à traiter et la méthode constructive permettant d'assurer l'objectif visé afin d'en faire la solution de référence du projet.

Le jet grouting consiste à déstructurer le terrain en place, à l'extraire totalement ou en partie jusqu'à la sur-

face et à lui substituer ou mélanger un coulis de ciment. Cette opération se fait à partir de forages dans lesquels on envoie un jet de fluides (coulis de ciment, eau, air) à haute énergie cinétique.

Mais le terme de jet grouting recouvre toute une série de techniques, le monojet (jet de coulis de ciment), le double jet (adjonction d'un jet d'air comprimé enveloppant celui du coulis), ou le triple jet (association d'un jet d'air et d'un jet d'eau à celui du coulis). (Fig. 3)

Certaines de ces techniques peuvent être associées à un prédécoupage réalisé par un jet d'eau destiné à limiter le gaspillage très important de ciment dans le spoil (rejet produit par le Jet Grouting), à augmenter le diamètre de la colonne et à fluidifier le spoil ce qui facilite la sortie vers la surface.

En l'absence de méthodes fiables permettant de déterminer a priori les paramètres, la S.N.C.F. a adopté une démarche très pragmatique en réalisant des essais en place.

DEUX PLOTS D'ESSAI AU STADE DE L'AVANT-PROJET

Le premier plot d'essai, réalisé par la Société SOLETANCHE durant le

premier trimestre 1992 dans une chambre aménagée au fond du puits Widal, l'un des premiers réalisés sur le site, était destiné à valider la méthode.

Il comportait 20 colonnes, 4 dans une première étape pour tester les paramètres de base (seuls le double jet et le triple jet ont alors été réalisés), 16 dans un second temps pour réaliser une enceinte rectangulaire constituée de 4 parois différentes en faisant varier le type et l'assemblage de colonnes et modélisant des possibilités de traitement en piédroits de galerie. (Fig 4) (Tabl. 2)

Au cours des travaux, il a été constaté que les déblais du double-jet étaient plus riches en ciment et étaient pelletables au bout de 4 à 5 heures. Au bout de 48 heures, ils devenaient trop durs pour une mini-pelle.

Les déblais du triple-jet, moins riches en ciment, étaient à la limite du pelletable au bout de 12 heures.

Les têtes des 4 premières colonnes ont été découvertes pour être observées avant d'entreprendre les 16 autres. L'enceinte délimitée par celles-ci a été excavée sur une profondeur de 5 m, mesurée à partir de la tête des colonnes. Le puits ainsi réalisé n'a pas été blindé, mais les cadres en HEB ont été mis en place par sécurité.

Cet essai a prouvé que les colonnes de jet formaient un élément de soutènement tout à fait adapté et que la perméabilité globale pouvait être diminuée d'un facteur 10. Cependant, des discontinuités ont été observées aux passages des zones grésifiées, ce qui nécessitait une amélioration.

Les colonnes réalisées en triple jet sont apparues plus homogènes mais de diamètre moins important qu'en double jet.

Un second plot a été réalisé par la Société SOLETANCHE entre novembre 1992 et février 1993 dans la galerie centrale Ouest de la gare déjà creusée au titre des reconnaissances.

Ce plot avait pour but d'affiner les paramètres issus du plot précédent afin d'éviter les défauts constatés et d'effectuer trois essais de chargement comparatifs, l'un sur une colonne de double jet, le deuxième sur une colonne de triple jet, le troisième sur les Sables de Beauchamp non traités. Ce plot devait aussi modéliser à l'échelle 1 le terrassement des piédroits de galerie. En outre, des colonnes en mono jet avec et sans prédécoupage ont été réalisées. Comme l'indique le schéma ci-dessous, on a cherché également à faire varier des paramètres de "second ordre" par rapport au premier plot pour évaluer leur influence sur la qualité des colonnes.

Colonne	2, 6, 7, 9 11, 13, 16, 18	4	20	1, 5, 8, 10 12, 14, 15, 17	3	19
Type de jet	TRIPLE	TRIPLE	TRIPLE	DOUBLE	DOUBLE	DOUBLE
Prédécoupage	non	non	non	non	9,0 m/h	non
Vitesse de remontée (m/h)	9,0	10,3	8,0	9,0	8,0	10,3
Pression Air (MPa)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	
Pression Coulis (MPa)	2/4	2/4	2	40	40	40
Pression Eau (MPa)	40	40	40		40 en prédécoupage	40

Tableau 2 - Paramètres retenus pour les colonnes du premier plot d'essai

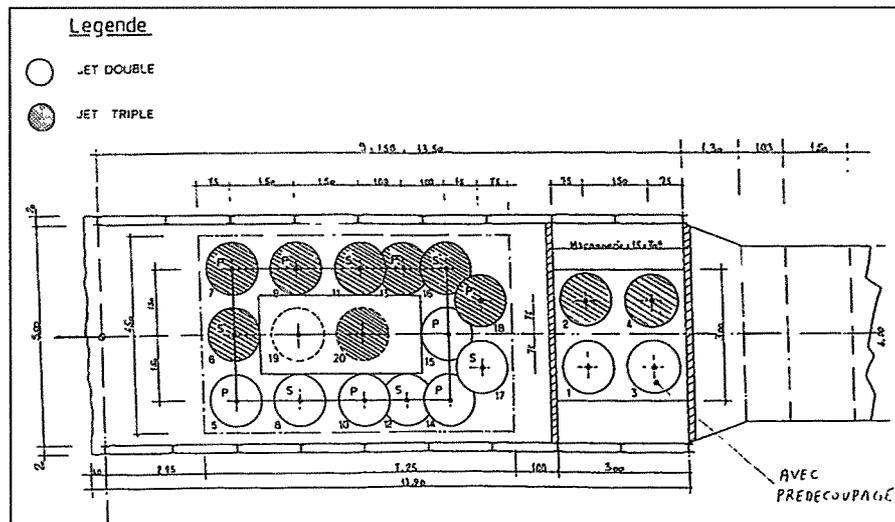


Figure 4 - Implantation des colonnes du premier plot d'essai

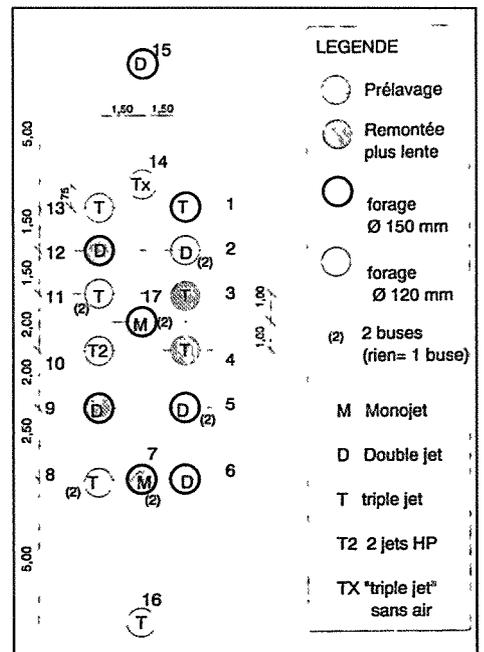


Figure 5 - Implantation et paramètres retenus pour les colonnes du deuxième plot d'essai

Les défauts de continuité de colonnes ont été résolus en augmentant le diamètre de foration (passage de 120 mm à 150 mm), en densifiant le coulis et en assurant un recouvre-



Figure 6 - Une colonne d'essai totalement dégagée

ment de 10 cm à chaque changement de tige.

Les diamètres atteints ont été d'au moins 0,80 m pour atteindre souvent 1,20 m. En mono et double jet, une augmentation du diamètre de près de 50 % était obtenue par le prédécoupage. Les meilleurs résultats concernant la résistance à la compression et la densité de colonnes ont été obtenus avec le double jet. (Fig. 6)

Les essais de chargement ont prouvé la nette amélioration apportée par le traitement (facteur 5 à 10).

Tout cela a permis de mieux caler les modèles de calcul servant de base au prédimensionnement de l'ouvrage et définissant notamment la valeur du tassement final attendu, de conclure à la faisabilité de la méthode et de l'adopter en solution de base pour la consultation des entreprises.

Les calculs aux éléments finis ayant comparé les tassements théoriques dans les cas avec ou sans jet grouting ont montré, sur la base des caractéristiques déduites des mesures in situ, que le traitement procurait un gain de 25 mm sur les tassements de surface dans l'axe de la gare, soit un gain de 0,85 ‰ en différentiel.

LE DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

Ce dossier définissait les objectifs fixés au traitement de terrain par jet

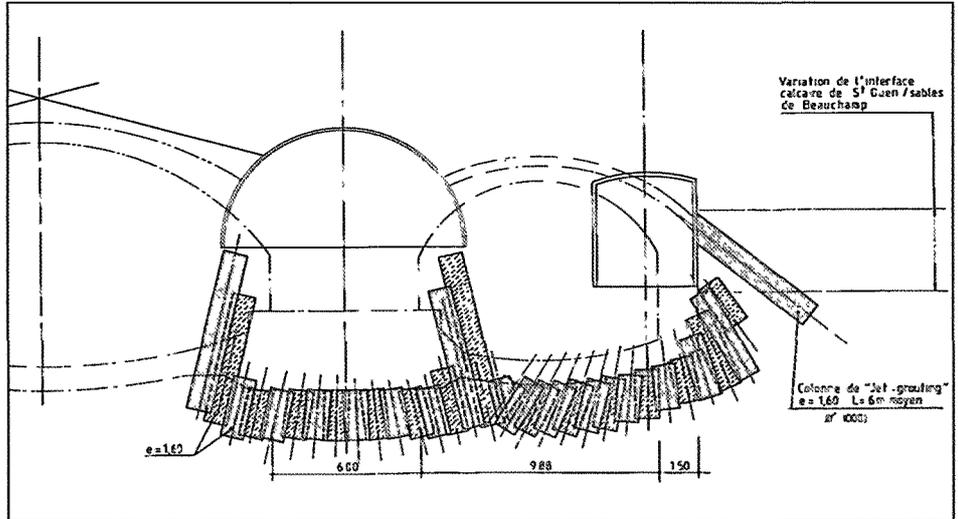


Figure 7 - Disposition des colonnes prévues à l'appel d'offre

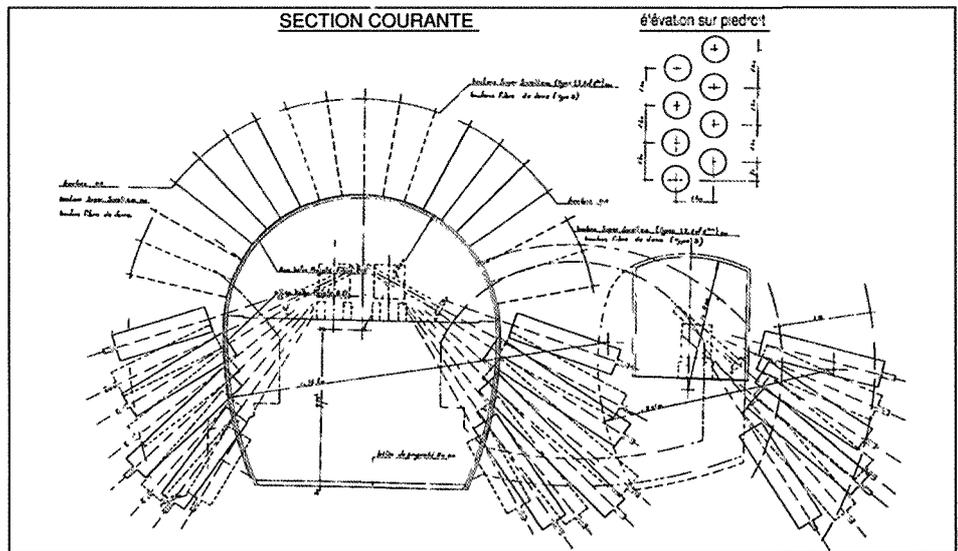


Figure 8 - Disposition des colonnes retenues à l'exécution

grouting : assurer la diffusion des contraintes au contact des culées de la gare souterraine, assurer un appui au soutènement provisoire des voûtes, améliorer la stabilité des fouilles dans les terrains de faible cohésion et baignés par la nappe, améliorer la traficabilité des fonds de fouille.

La géométrie du traitement était définie. Il était demandé des colonnes d'au moins 1 m de diamètre et une résistance à 28 jours d'au moins 5 MPa. Certaines prescriptions étaient aussi imposées au coulis : ciment CLK 45, dosage minimal différent selon la technique utilisée (750 kg à 1000 kg/m³), densité minimale de 1,6. (Fig. 7).

En revanche, la technique n'était pas imposée. Il appartenait à l'entreprise de la fixer en tenant compte des résultats des plots d'essais qui étaient intégrés dans le dossier de consultation. Des essais de convenance étaient demandés au démarrage du chantier afin de valider définitive-

ment les paramètres à adopter pour le traitement.

LES TRAVAUX

Ils ont été attribués en juillet 1993 à l'entreprise Chantiers Modernes sur la base d'une variante concernant les soutènements en voûte (systématisation du boulonnage). Les principes de traitement définis en avant-projet ont été retenus avec cependant une adaptation de sa géométrie. En particulier, le dispositif proposé par l'entreprise comportait des colonnes plus inclinées et privilégiait le traitement des piédroits des galeries de culée pour mieux assurer l'effet "d'arc rocheux" dans le terrain, nécessaire à la réussite de la solution variante retenue. Cela permettait aussi d'assurer une meilleure butée latérale s'opposant à la rotation des culées centrales en phase d'excavation du tunnel central. (Fig. 8)

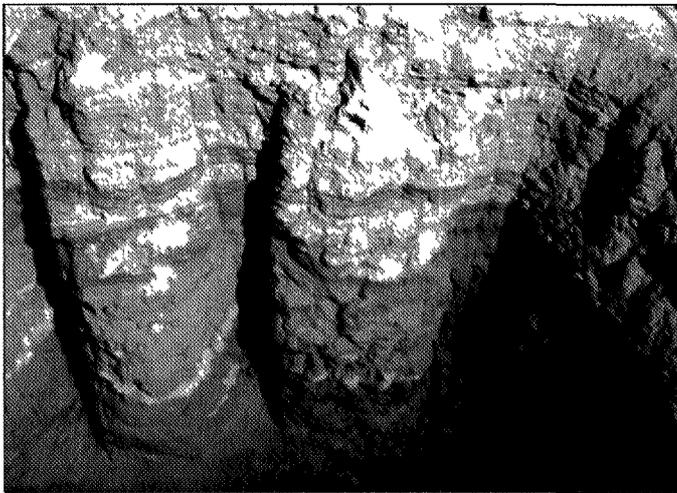


Figure 9 - Colonnes du plot d'essai de convenance

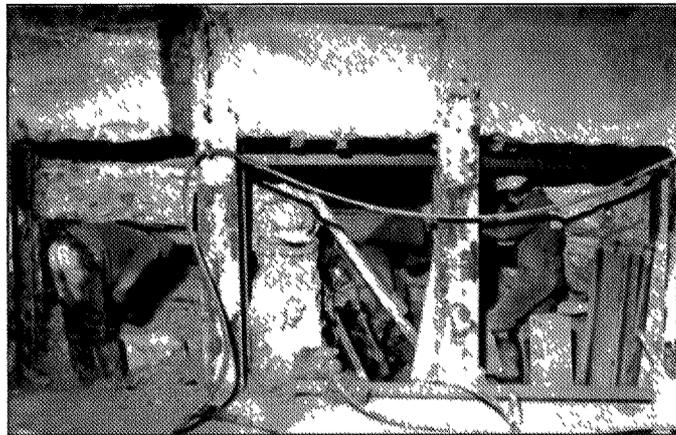


Figure 10 - Dégagement des colonnes subhorizontales en base de voûte, essais de convenance

L'entreprise Chantiers Modernes a confié la réalisation du jet grouting pour le confortement des assises de la gare à l'entreprise BACHY qui a retenu la solution double jet sans prédécoupage à l'eau. Selon les essais en effet, cette technique permettait d'atteindre un diamètre de 1 m et de satisfaire aux exigences requises. Le prédécoupage à l'eau qui donnait aussi de bons résultats n'a pas été retenu car il génère des quantités de spoils plus conséquentes difficilement gérables en galerie.

ESSAIS DE CONVENANCE

En début de chantier, les essais de convenance que le marché prévoyait ont servi à la mise au point du dispositif et à l'étalonnage des paramètres, notamment la pression d'air, la pression et le débit d'injection des coulis, la vitesse de remontée des tiges.

Ainsi, 16 colonnes implantées conformément au dispositif prévu par l'entreprise pour le confortement des terrains et selon les différentes inclinaisons envisagées, ont été réalisées. Leur mise à nu a permis de contrôler l'homogénéité et le diamètre des colonnes ainsi que la résistance des massifs traités. (Fig. 9)

Cependant, pour les colonnes les plus inclinées par rapport à l'horizontale (10°), un défaut de clavage en partie supérieure a été constaté. Il a fallu le traiter par une injection complémentaire à réaliser en 2^{ème} phase. Ce point était d'autant plus important qu'il concernait le plus souvent le sable de Mortefontaine, au contact du calcaire de Saint-Ouen et des Sables de Beauchamp, interface constituant parfois une faiblesse à cause des circulations d'eau. (Fig. 10)

Enfin, après une longue concertation entre la S.N.C.F. et l'entreprise, le dosage minimal du ciment fut arrêté à 900 kg/m³ pour être en mesure d'assurer la densité de 1,6 requise au marché. Compte-tenu du contexte, ce choix d'un coulis fortement dosé en ciment donnait en effet tout chance d'obtenir les qualités d'homogénéité et de continuité des colonnes. Ce dosage fut adopté malgré les craintes de l'entreprise vis-à-vis d'une obstruction à la remontée du spoil et a permis d'obtenir de fortes résistances des colonnes (10 MPa moyen), ce qui allait dans le but recherché de la moindre déformation des terrains. La résistance mesurée du spoil comparable à celle des colonnes permit par la suite de faire le contrôle sur les échantillons de spoil jugés représentatifs de la résistance des colonnes en place.

TRAVAUX PROPREMENT DITS

Le confortement des Sables de Beauchamp a nécessité la confection de 3 570 colonnes réalisées de novembre 1993 à juillet 1994. Cela représente un total de 26 700 m de forage, 16 700 m de colonnes et une consommation globale de 9 000 T de ciment.

Le dispositif était constitué d'auréoles distantes entre elles de 1,40 m dont les 4 colonnes avaient une longueur moyenne de 4,70 m. La progression des travaux, dans chaque galerie se faisait par plots d'une trentaine de mètres.

Un phasage très précis prévoyait un pianotage consistant à ne traiter en première phase qu'une auréole sur 4, en seconde phase encore une auréole sur 4, puis en troisième phase le solde, c'est-à-dire une auréole sur 2. Cela permettait de ne pas réaliser d'auréole à proximité immédiate

d'une auréole récemment exécutée et n'ayant pas encore atteint une résistance satisfaisante. Cette précaution n'était pas inutile comme le montre ce qui suit. Elle s'est même révélée insuffisante sur une section limitée de la gare particulièrement déconsolidée par l'effet d'un fontis. En effet, malgré le strict respect de ce phasage, des tassements à peine stabilisés suite aux terrassements ont été réactivés par les travaux de jet grouting. Ce phénomène que l'on a pu, par la suite, maîtriser par augmentation du délai de réalisation entre chaque auréole confirmait, mais cela était connu, que tout type de confortement de terrain passe par une phase préalable de déconsolidation qu'il faut savoir intégrer dans la conception des travaux.

Ce fut l'unique incident de ce chantier qui, par ailleurs, a été très bien organisé malgré les contraintes multiples qui lui étaient imposées.

La centrale de préparation des coulis insonorisée était installée en surface aux abords de l'un des puits d'accès de la gare souterraine. Elle fabriquait quotidiennement 60 m³ de coulis. En galerie, deux ateliers de jet étaient organisés en 3 postes, si bien que la production fut continue selon un rythme moyen de 4 à 5 colonnes par atelier et par poste soit une production quotidienne de 25 à 30 colonnes. (Fig. 11 et 12)

Deux foreuses alimentées par une armoire électrique de 250 KVA et disposant d'une glissière de 3,50 m (tiges de 1,50 m) ont été utilisées. Elles étaient alimentées de coulis par une pompe de 570 CV à une pression de 470 bars. (Fig. 13)

Les spoils étaient refoulés vers des bacs de stockage (8 unités de 45 m³ chacune) implantés en galerie. Les spoils solidifiés après durcissement étaient évacués en décharge (on a

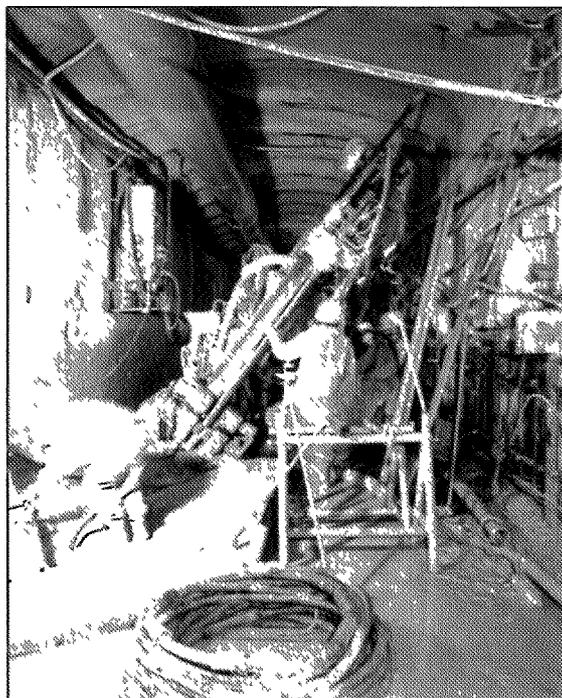


Figure 11 - Foreuse en galerie latérale

atteint 100 m³/jour), alors que les déblais liquides étaient pompés en surface et évacués par citernes en décharge. (Fig. 14)

Ce traitement des spoils qui étaient considérablement épaissis à cause de la forte proportion de fines argileuses présentes dans les sables fut l'un des soucis majeurs du chantier. Il a permis cependant, grâce à une bonne collaboration entre les entreprises, de garder des plates-formes de travail et de circulation tout à fait convenables pour assurer l'ensemble des activités du chantier.

LE CAS DE LA GALERIE DEMARQUAY

La galerie DEMARQUAY est un des grands accès (10 m de large) de la gare MAGENTA qui permettra une correspondance avec la gare du Nord. Elle est axée sous la rue Demarquay d'où son nom. Sa réalisation fait partie intégrante des travaux de la gare.

D'altitude plus élevée que la gare, elle ne bénéficie pas comme cette dernière d'une calotte de calcaire. Le terrain de couverture d'une dizaine de mètres de hauteur est essentiellement constitué de remblais et de Masses et Marnes du gypse aux médiocres caractéristiques. Afin de limiter les tassements, la conception en phase APD avait prévu la réalisation d'une voûte à l'abri de tubes poussés jointifs de gros diamètre (2 m).

L'entreprise Chantiers Modernes avait, lors des soumissions, proposé

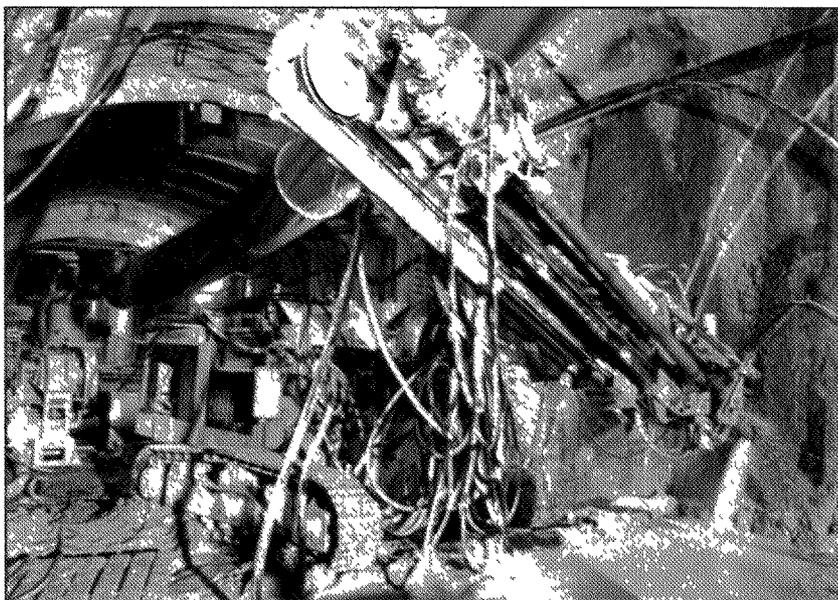


Figure 12 - Foreuse en galerie centrale

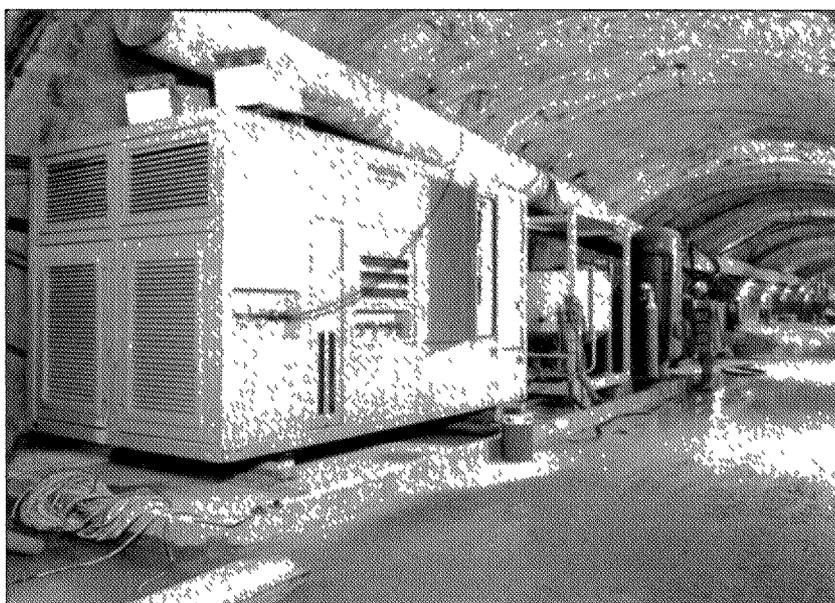


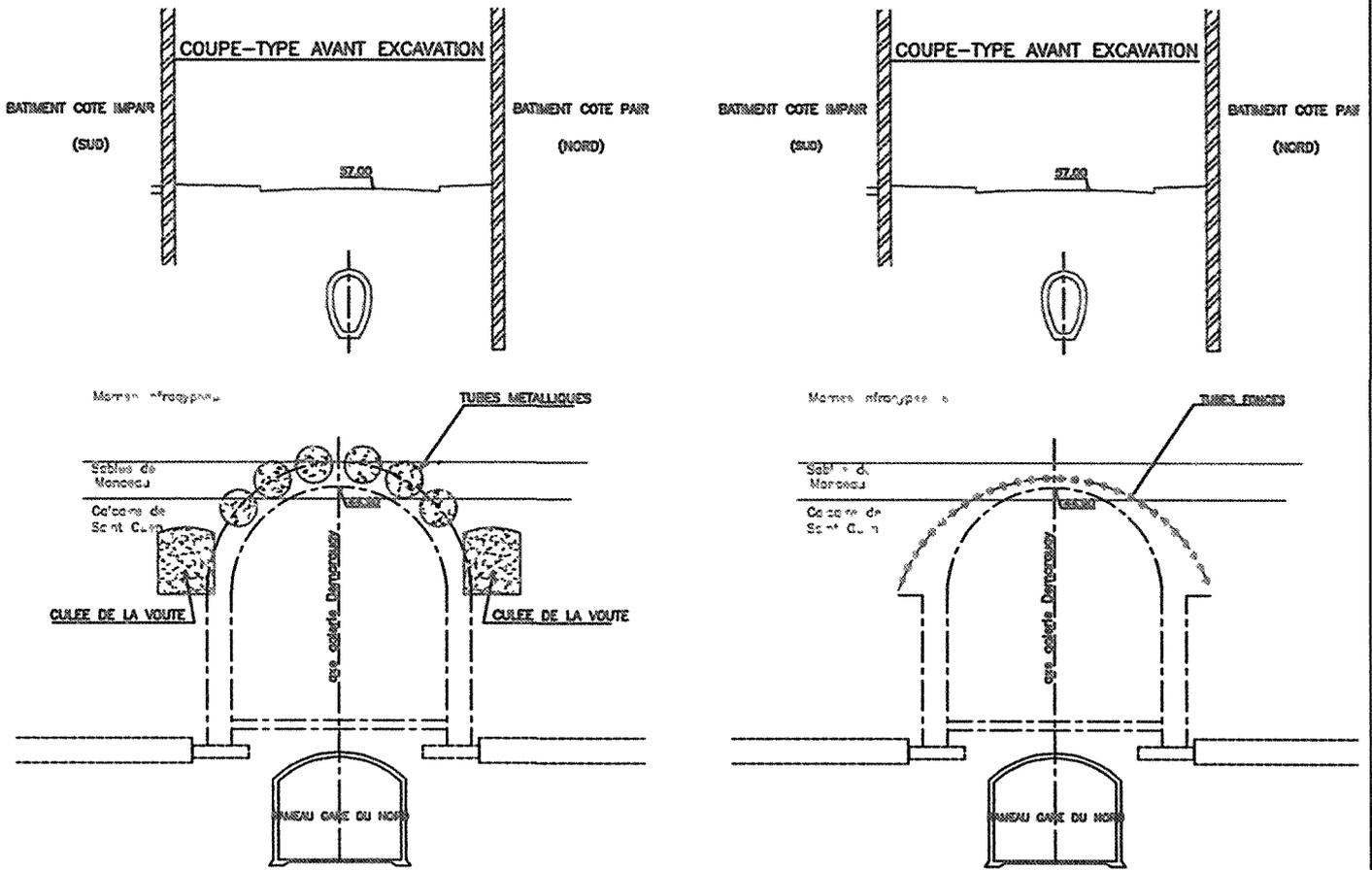
Figure 13 - Pompe installée en galerie centrale



Figure 14 - Evacuation du spoil solidifié

SOLUTION APPEL D'OFFRE

SOLUTION MARCHE



SOLUTION VARIANTE

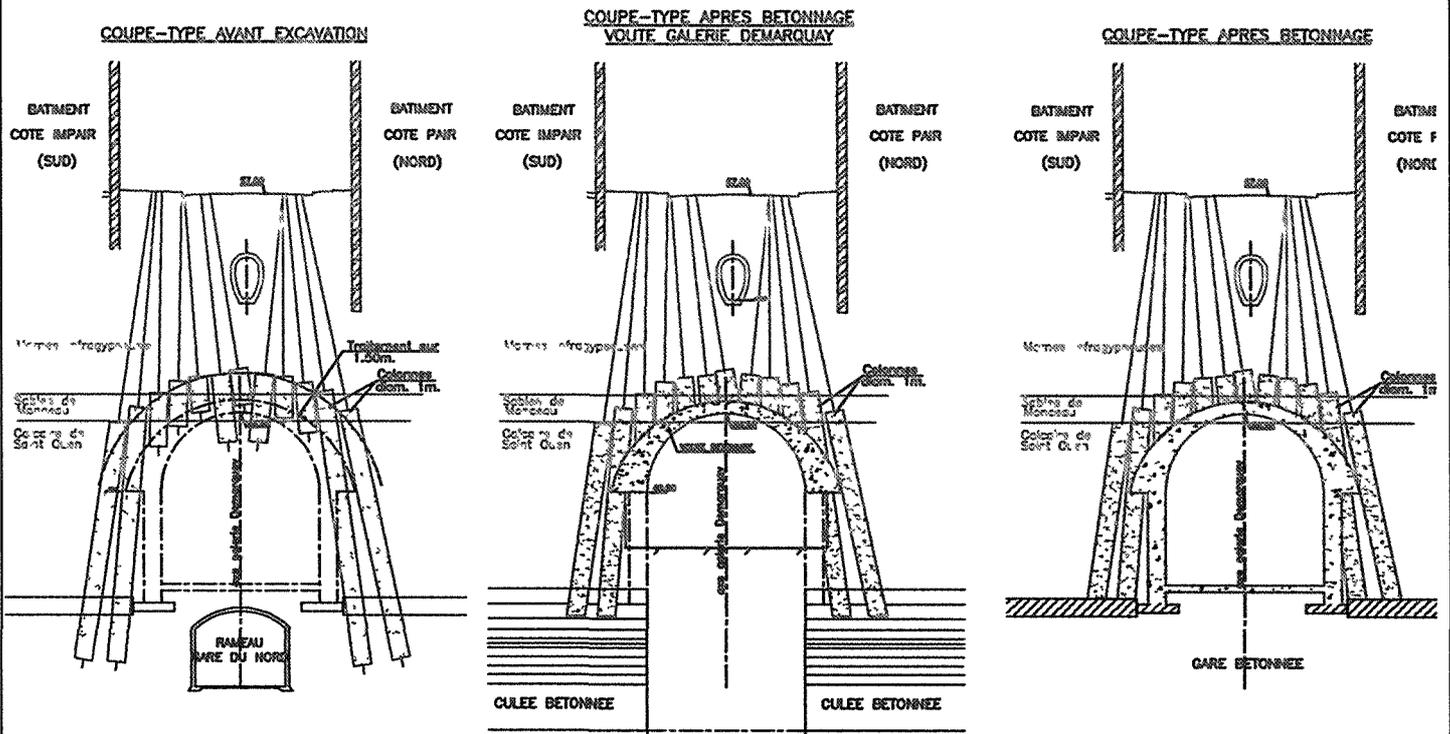


Figure 15 - Différentes solutions envisagées pour la galerie Demarquay et dispositions des colonnes retenue pour les travaux

une variante consistant à réaliser une succession de voûtes parapluie à partir de chambres souterraines transversales. Cette solution fut finalement abandonnée au profit de colonnes de jet grouting sub-verticales de 2 m de hauteur environ, réalisées depuis la rue et disposées en couronnes autour de la voûte. (Fig. 15)

La voûte était ensuite excavée par travées réduites de 0,90 m, soutenue à l'avancement par des cintres associés au béton projeté, le terrain étant boulonné par des barres HA 25 de 3 m scellées sur leur longueur. Malgré cette reconstitution d'une arche rocheuse par l'ensemble jet, boulon, béton projeté, s'appuyant sur la couche supérieure du calcaire de Saint-Ouen, par mesure de sécurité du chantier et du voisinage, le revêtement bétonné a été réalisé à distance réduite du front de taille (moins de 15 m).

Les calculs justificatifs aux éléments finis furent menés en faisant varier différents paramètres, notamment le module des colonnes (1 000 à 5 000 MPa). Leurs résultats furent en concordance avec les conditions imposées par le marché.

Ce dispositif fut mis en œuvre par l'entreprise SMET BORING. Il comprenait 34 auréoles espacées de 1,30 m, composées chacune de 7 à 11 colonnes de diamètre 1 m. Elles furent réalisées depuis la rue en deux phases alternées pour laisser un couloir de circulation. (Fig. 16)

La technique employée fut celle du double jet avec prédécoupage à l'eau. Le spoil était pompé à la tête du forage et évacué sous forme liquide. En partie centrale de la voûte, des colonnes étaient prolongées pour participer à la tenue du front de taille. Ces colonnes prolongées, mises à nu lors de l'excavation, permettaient aussi un contrôle à l'avancement de leur qualité, la réalisation d'un plot d'essai rue Demarquay n'étant pas envisageable.

L'expérience de la gare souterraine a bénéficié à la mise au point de ce nouveau projet pour définir les caractéristiques des colonnes (identiques à celles de la gare) et en garantissant leurs valeurs (résistance, dosage, densité) par contrôle du spoil complété par des carottages sur colonnes.

Le parti retenu pour la voûte fut par la suite généralisé à l'approfondissement de la galerie Demarquay dans le calcaire de Saint-Ouen pour améliorer ses caractéristiques par substitution de ses phases marneuses par du coulis. Ainsi, les colonnes latérales furent elles prolongées jusqu'à la base des piédroits.

CONCLUSION

Le chantier d'EOLE constitue probablement en France le premier chantier, en tout cas le premier chantier de cette importance et de cette difficulté, où l'utilisation des techniques de jet a été intégrée dès les phases de conception et a constitué la solution de référence pour répondre à des difficultés techniques exceptionnelles. Ces travaux ont permis de montrer que l'on pouvait exécuter des colonnes dans des espaces relativement restreints et selon des angles de tir proches de 10° sur l'horizontale.

Un des domaines de pertinence actuellement accordés à ce type de méthodes, le traitement de terrains granulaires ouverts face à des problèmes géotechniques a été étendu à des terrains de granularité plus fine, tels que des sables argileux. Il a été vérifié que le jet y constituait une réponse adaptée par la réduction de la déformabilité du massif et une amélioration des paramètres de résistance.

Le terme générique de jet recouvre de nombreuses possibilités de mise en œuvre, ce qui, d'une part constitue une source de souplesse et d'adaptabilité de la méthode, en particulier lorsqu'on se situe à la frontière des techniques habituelles d'injection. Mais un tel procédé nécessite encore une approche prudente et en partie expérimentale afin de s'assurer qu'il est bien adapté au problème posé, et que le résultat attendu satisfait aux exigences d'un projet, avec la fiabilité requise.

À cet effet, les puits et les galeries de reconnaissance constituent des essais géotechniques à l'échelle d'un chantier qui ont une importance fondamentale sur laquelle il faut insister.

Un autre domaine de pertinence de cette technique est la réponse à des problèmes de nature hydrogéologique par la réduction des perméabilités, ce qui fut observé à Magenta. Ainsi, le jet grouting peut être adopté notamment pour la constitution d'écrans étanches, ce qui sera le sujet d'un autre article portant sur la gare CONDORCET de ce même projet EOLE, article où il sera aussi question de rabattement de nappe.



Figure 16 - Jet grouting depuis la rue Demarquay

BIBLIOGRAPHIE

J. MOREY (SIF BACHY) - *Revue Française de Géotechnique n° 61 - Décembre 1992*

A. BALAN (SNCF) D. VIARGUES (SIF BACHY) - Gare Magenta : le jet grouting - *Revue Travaux 1995*

A. LE MOUËL (SNCF) - Utilisation du jet grouting sur le chantier EOLE - *Session de formation de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - Juin 1995*

F. BERTRAND (Chantiers Modernes) - Eole : le chantier de la gare MAGENTA, Méthodes modernes et procédés innovants pour un chantier traditionnel - *AFTES - Journées d'études internationales de Chambéry - Octobre 1996*

J. LAUNAY (DUMEZ GTM) - Conception du revêtement extérieur de la gare MAGENTA - EOLE Paris - *AFTES - Journées d'études internationales de Chambéry - Octobre 1996*

J.-M. FREDET - Y. LEBLAIS (SIMECSOL) - Caractérisation du traitement de terrain par jet grouting pour les travaux souterrains d'EOLE, Paris, France - *14^{ème} ICSMFE HAMBOURG - 1997.*