

**L'« ARC CELLULAIRE » POUR LA STATION « VENEZIA » DU
« PASSANTE FERROVIARIO METROPOLITANO » DE MILAN
THE « CELLULAR ARC » FOR « VENEZIA » STATION OF
METROPOLITAN RAILWAY BYPASS » OF MILAN**

COLOMBO A.

Metropolitana Milanese, Italie

LUNARDI P.

Université de Parme, Milan, Italie

LUONGO E.

Société Gemme, Milan, Italie

PIZZAROTTI E.M.

Rocksoil Srl, Milan, Italie

L'exposé illustre les caractéristiques particulières d'une nouvelle méthodologie constructive, qui a été spécialement étudiée et adaptée pour la réalisation de la Station "Venezia" du "Passante Ferroviario Metropolitano" de Milan. Celle-ci aurait été irréalisable avec les systèmes traditionnels à cause de ses dimensions exceptionnelles par rapport à la nature des terrains et au recouvrement fort réduit et aussi à cause de la contrainte de maintenir le trafic de surface.

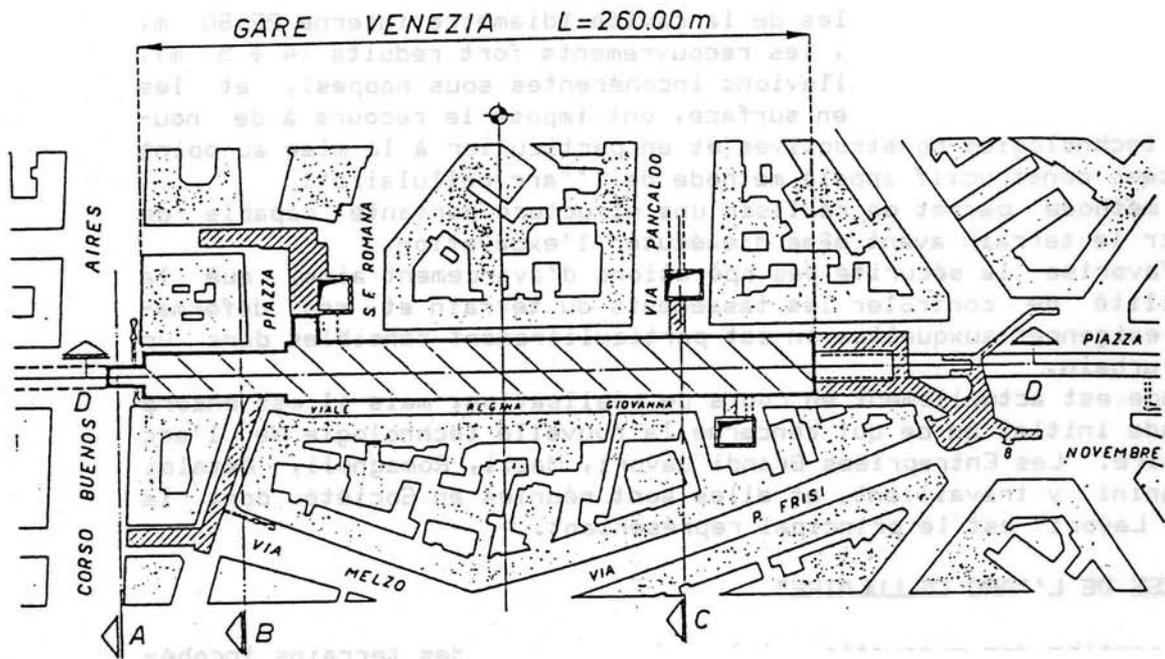
This note presents the particular features dealt with a new constructing method specially planned and adapted in order to carry out Venezia Station of Passante Ferroviario Metropolitano di Milano (Metropolitan Railway Bypass of Milan), which would have never been performed with traditional methods, according to its exceptional dimensions, soil's nature and thin covering and because of the restraint about traffic-flow maintenance.

INTRODUCTION

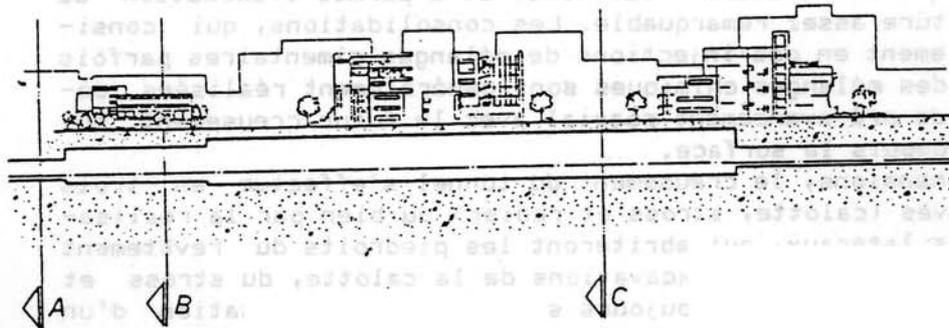
La liaison ferroviaire "passante" de Milan est une ligne des Chemins de Fer de l'Etat italien qui réunit en un seul système de transport ferroviaire régional, le réseau ferroviaire géré par les mêmes Chemins de Fer de l'Etat, celui des Chemins de Fer Nord de Milan, les lignes du métropolitain et des principaux tramways de surface.

Son tracé se développe surtout en souterrain par des tunnels de ligne et de station qui ont été réalisés le plus souvent à trou borgne.

Parmi celles-ci la Station "Venezia" (fig. 1) est le plus important ouvrage en souterrain à réaliser à trou borgne.



COUPE D-D



COUPE B

COUPE C

COUPE A

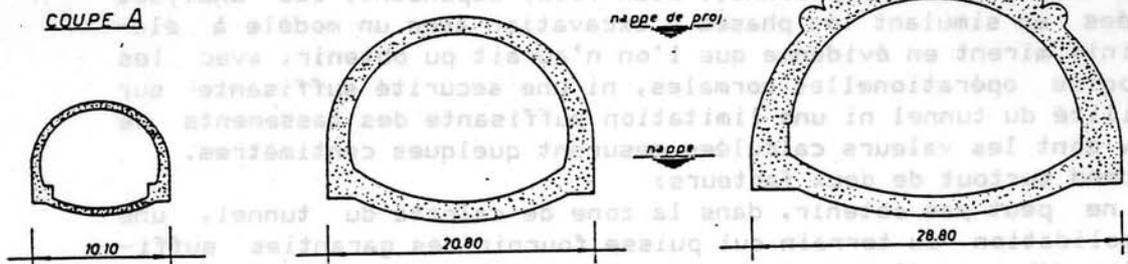


fig. 1

Les dimensions exceptionnelles de la cavité (diamètre interne 22.80 m, diamètre externe 28.80 m), les recouvrements fort réduits (4 ÷ 5 m), la nature des terrains (alluvions incohérentes sous nappes), et les contraintes qui existent en surface, ont imposé le recours à de nouvelles technologies constructives et en particulier à la mise au point du système constructif appelé méthode de l'"arc cellulaire".

Cette méthode permet de réaliser une structure portante capable de contenir le terrain avant même d'exécuter l'excavation.

Ceci favorise la sécurité des opérations d'avancement ainsi que la possibilité de contrôler les tassements du terrain et ses déformations, exigences auxquelles on est particulièrement sensible dans un milieu urbain.

L'ouvrage est actuellement en cours de réalisation, mais il est encore au stade initial en ce qui concerne la nouvelle technologie de l'arc cellulaire. Les Entreprises Grandi Lavori, Mazzi, Romagnoli, Astaldi et Vianini y travaillent, et elles sont réunies en Société dont la "Grandi Lavori" est le principal représentant.

LA GENESE DE L'"ARC CELLULAIRE"

La réalisation des excavations à trou borgne dans des terrains incohérents s'effectue en général après l'exécution d'une consolidation du terrain tout autour du tunnel. Cette méthodologie opérationnelle est déjà devenue courante à Milan pour la construction soit des lignes du métropolitain que du "Passante" lui-même, et a permis l'exécution de tunnels d'ouverture assez remarquable. Les consolidations, qui consistent principalement en des injections de mélanges cimentaires parfois intégrées par des mélanges chimiques sont généralement réalisées depuis un boyau de pré-avancement coaxial avec le futur creusement ou, plus rarement, depuis la surface.

D'après ses dimensions, le creusement du tunnel s'effectue en trois phases successives (calotte, stross et radier) ou bien par la réalisation de tunnels latéraux, qui abriteront les piedroits du revêtement définitif et ensuite par les excavations de la calotte, du stross et du radier. Ces derniers sont toujours suivis par la réalisation d'un revêtement de première phase constitué de spritz-béton armé avec des cintres, et par la coulée du revêtement en béton armé.

Au début de l'étude du projet pour la Station "Venezia", on a essayé d'adapter le système de construction habituel aussi à ce problème nouveau et tout à fait exceptionnel. Bien vite, cependant, les analyses effectuées en simulant les phases d'excavation avec un modèle à éléments finis mirent en évidence que l'on n'aurait pu obtenir, avec les technologies opérationnelles normales, ni une sécurité suffisante sur la stabilité du tunnel ni une limitation suffisante des tassements de surface, dont les valeurs calculées mesurent quelques centimètres.

Ceci dépend surtout de deux facteurs:

- a - on ne peut pas obtenir, dans la zone de calotte du tunnel, une consolidation du terrain qui puisse fournir des garanties suffisantes d'homogénéité et de résistance, à cause des faibles recouvrements;
- b - la structure du prérevêtement des parois d'excavation de la calotte du tunnel se révèle excessivement déformable.

Les figures 3, 4 et 5 décrivent schématiquement les principales phases de réalisation de l'ouvrage, qui comprennent essentiellement:

- a - la réalisation de la consolidation sur le périmètre des tunnels latéraux depuis le boyau de service central;
- b - l'excavation en deux phases des tunnels latéraux; l'achèvement de la consolidation sur tout le périmètre de la Station; la coulée des piedroits en béton armé;
- c - la réalisation de 10 microtunnels, formés par des tuyaux en béton armé \varnothing 2.1 m (voir fig. 6), par la méthode du "pousse-tubes", depuis un puits de poussée placé sur la section C de la figure 1;
- d - l'excavation des tunnels de connexion entre les microtunnels et entre ces derniers et les tunnels latéraux. Ils constituent le coffre à l'intérieur duquel on réalise les arcs cellulaires;
- e - le coffrage et la coulée des arcs et des microtunnels;
- f - l'excavation en plusieurs phases de la section du tunnel avec, en même temps, l'exécution des finissages de la voûte;
- g - l'excavation et la coulée du radier par tranches successives.

Il faut souligner que la consolidation du terrain dans la zone où les microtunnels sont creusés, a pour but d'éviter les décompressions et l'instabilité du terrain pendant l'enfoncement des tuyaux et l'excavation des tunnels de connexion. Ceci est nécessaire dans le cas considéré, vu la nature incohérente du terrain de Milan et la faible couverture des microtunnels, mais ne constitue pas une "constante" du système.

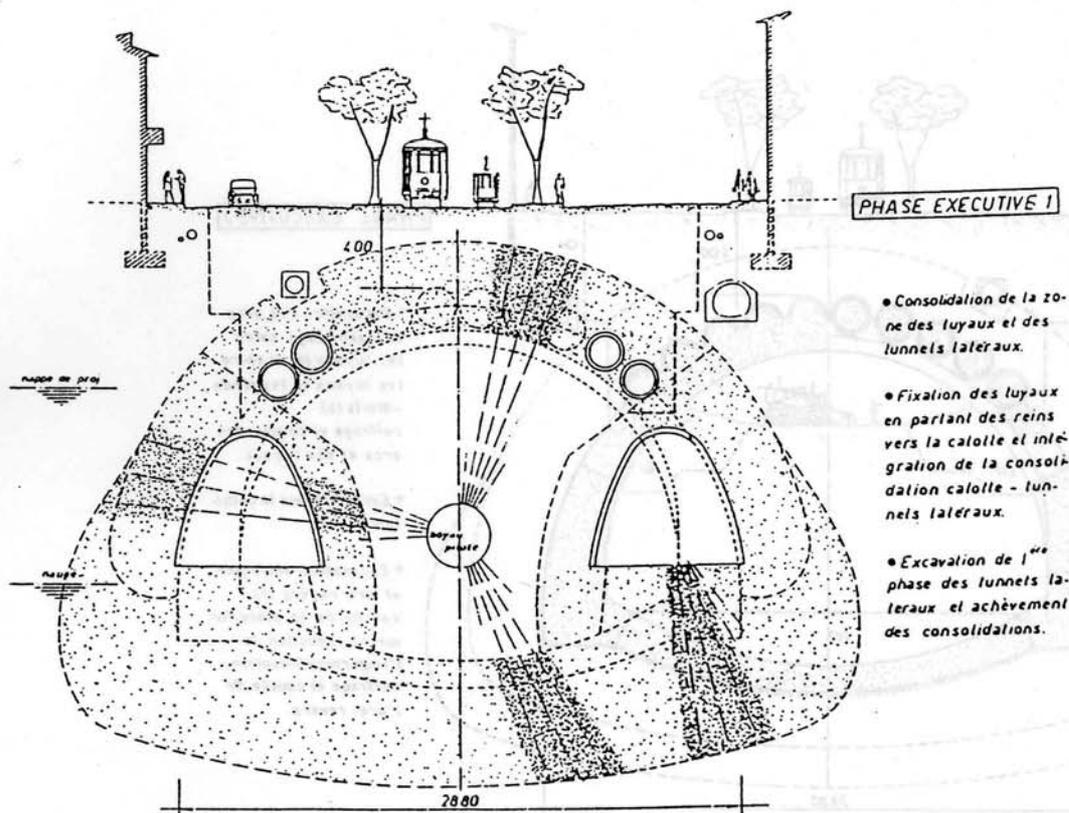


fig. 3

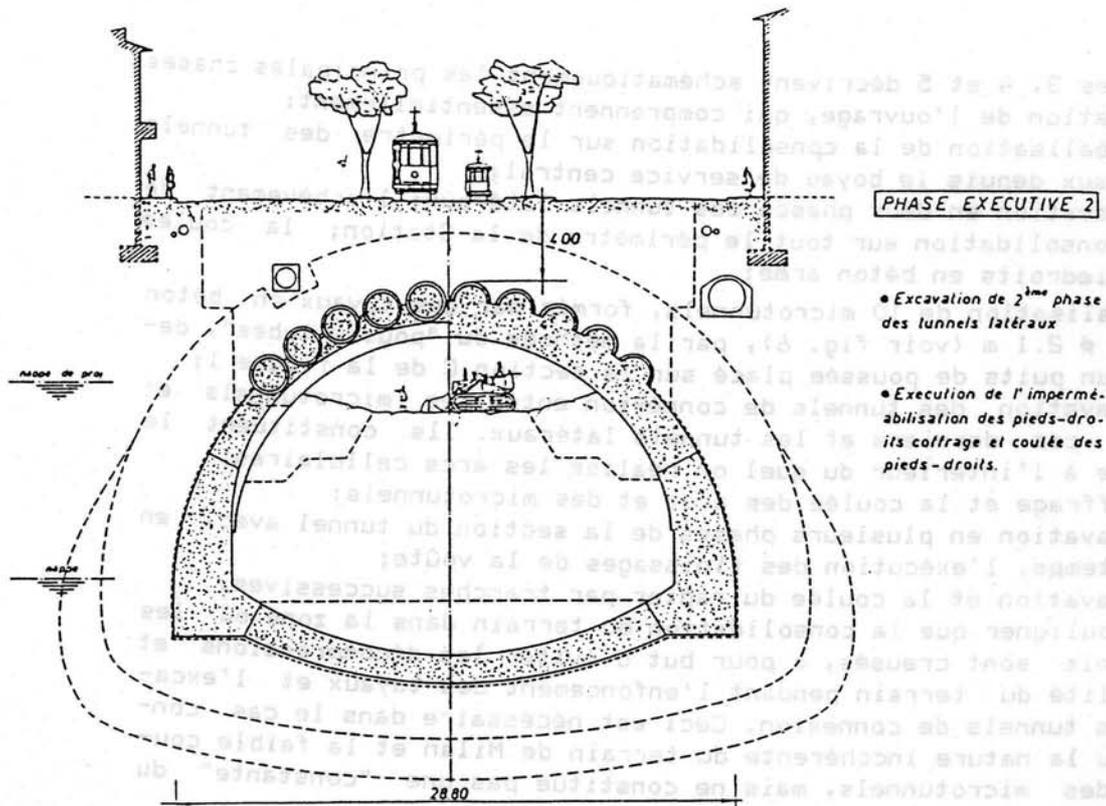


Fig. 4

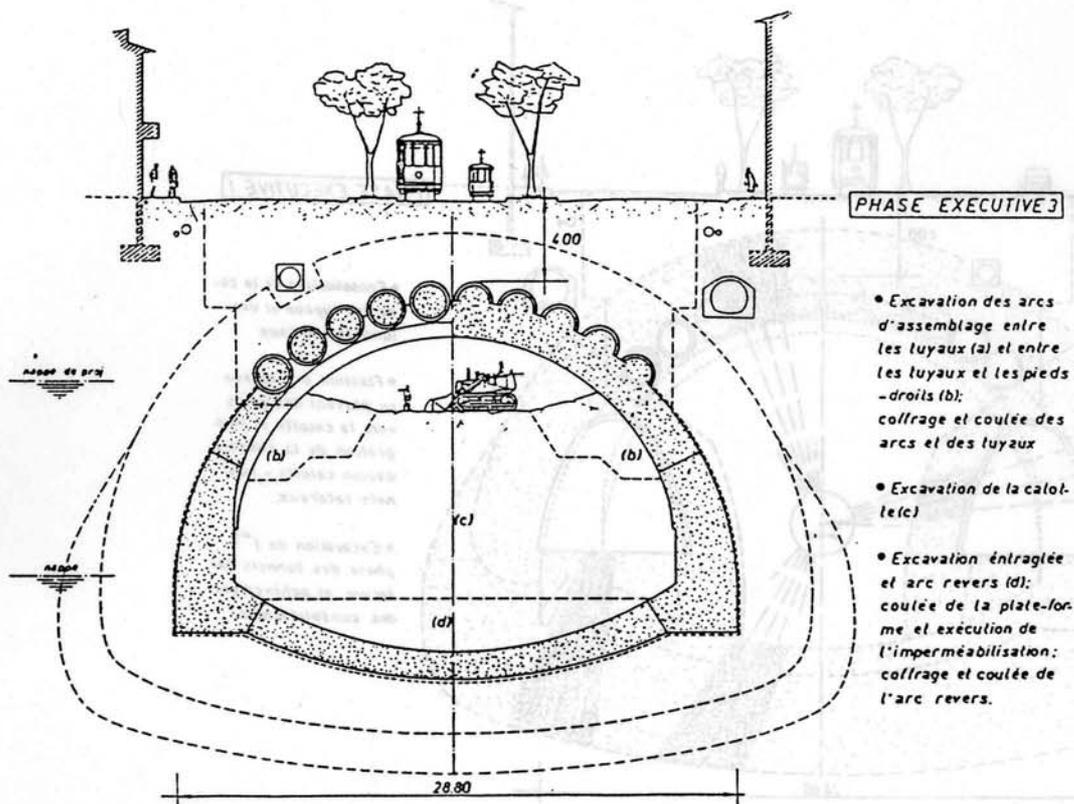


Fig. 5

PUITS DE FOUÇAGE DES TUBES

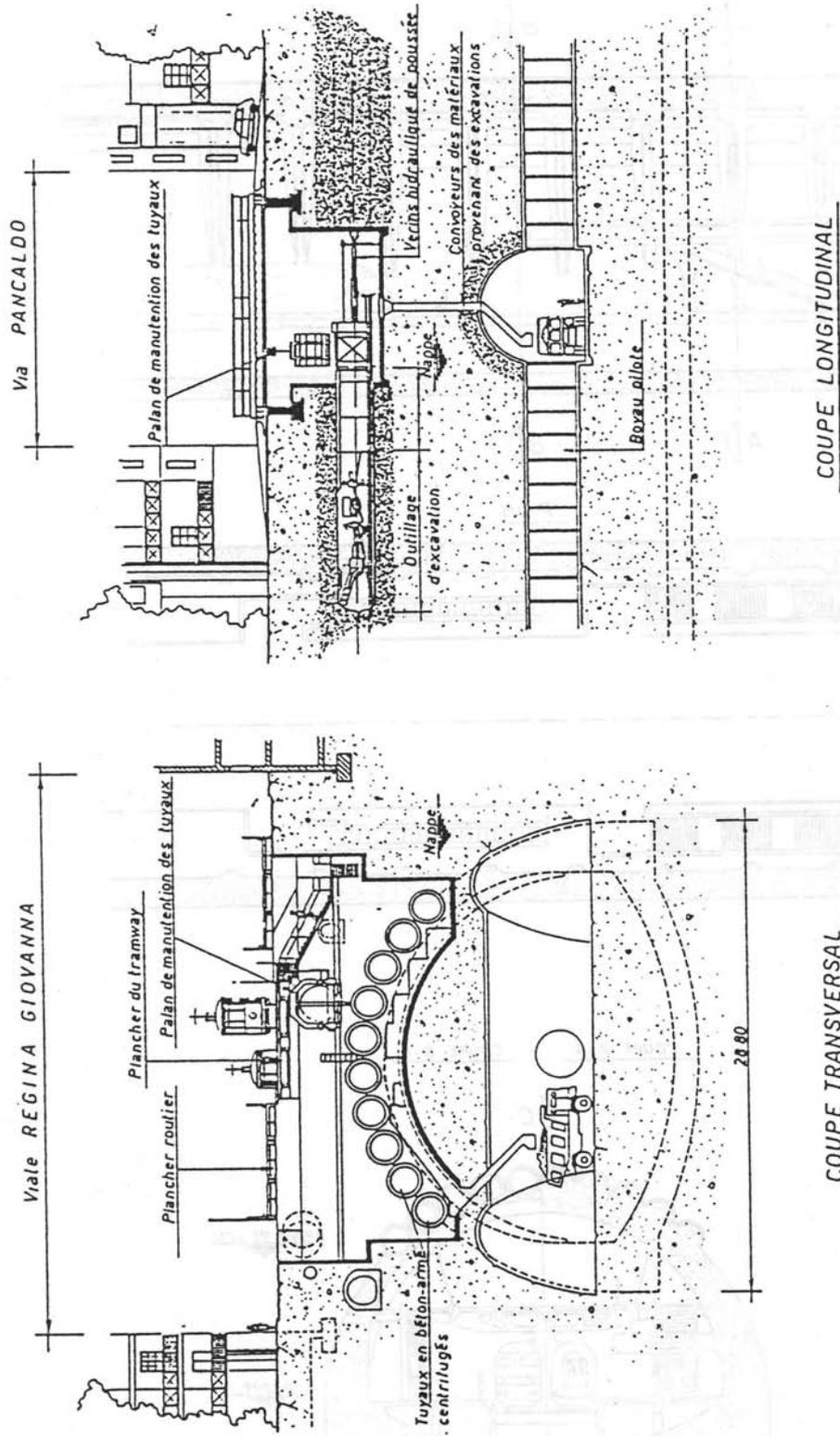


fig. 6

La figure 7, illustre quelques détails de la Station tel qu'elle se présentera lorsque sa construction sera achevée.

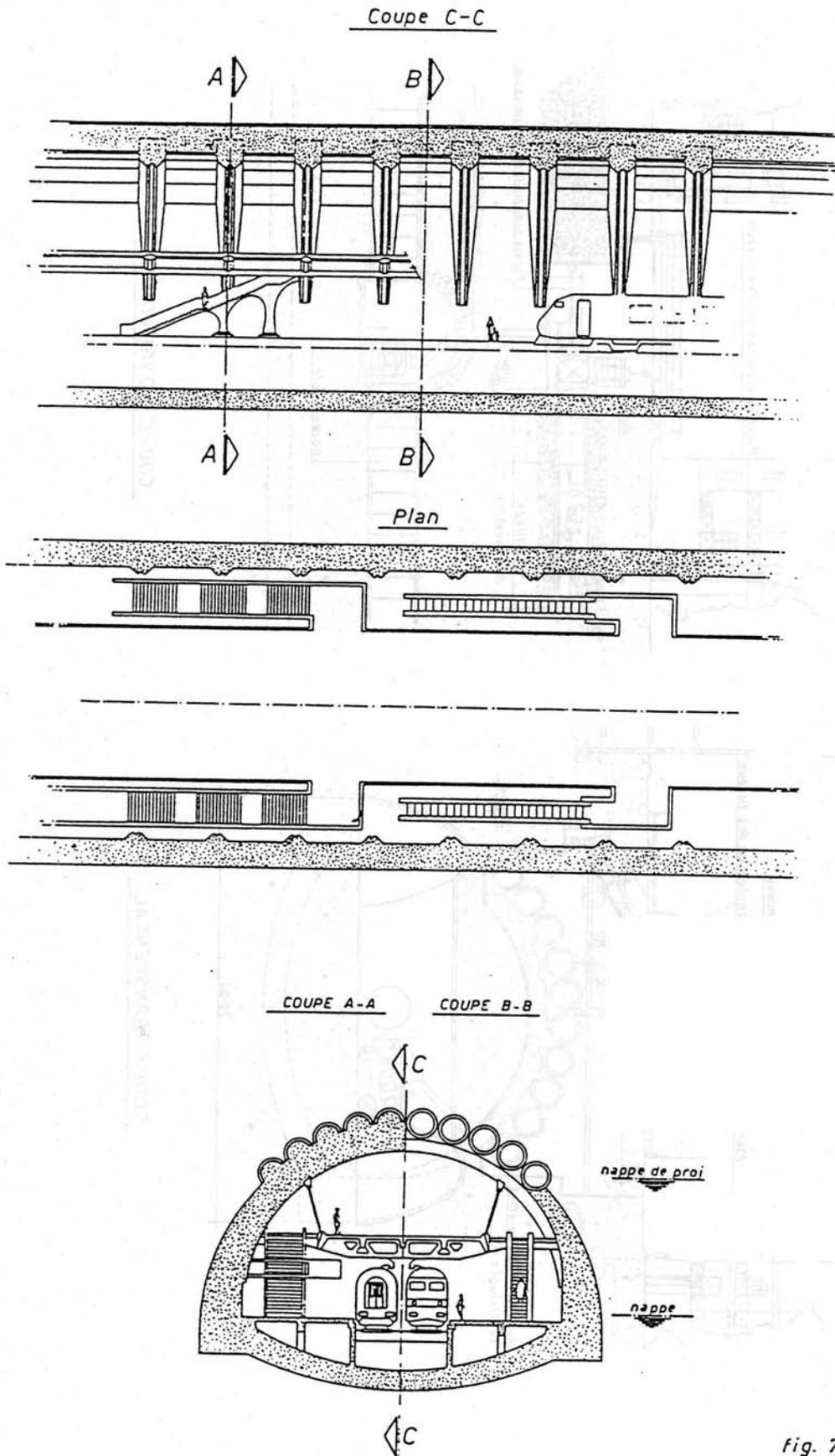


fig. 7

Par contre la figure 8, illustre un modelage de la structure, obtenu par ordinateur.

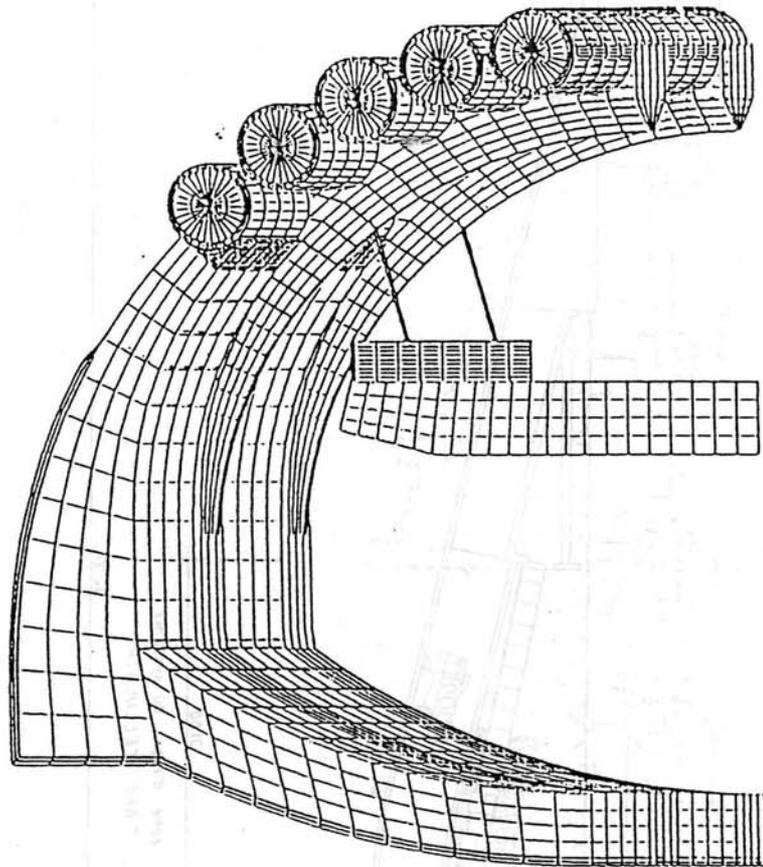


fig. 8

ESSAIS EXPERIMENTAUX POUR LA MISE AU POINT DE LA METHODE

Pour vérifier la faisabilité de l'application de l'"arc cellulaire" et pour mettre au point tous les aspects de construction, on a effectué une expérimentation complexe qui avait pour but de:

- a - s'assurer de la nécessité d'un traitement du terrain dans la zone d'enfoncement des tuyaux;
- b - vérifier la possibilité de creuser les microtunnels avec la méthode du "pousse-tubes" à l'intérieur du terrain consolidé;
- c - simuler les opérations de démolition des tuyaux, d'excavation des tunnels de connexion, de coffrage et de coulée des arcs cellulaires;
- d - définir les caractéristiques des mélanges de consolidation et l'intensité du traitement approprié à l'avancement des microtunnels;
- e - acquérir des informations et approfondir les connaissances des caractéristiques mécaniques soit du terrain naturel que du terrain traité;
- f - mesurer les déformations du terrain et les déplacements de la surface pendant les phases du travail.

Les essais ont comporté l'enfoncement dans le terrain de trois séries d'éléments circulaires en béton armé (fig. 9), en partant d'un puits de poussée qui a été obtenu en utilisant les structures de la rampe d'accès de via Pancaldo.

SORTIE DE SÉCURITÉ VIA PANCALDO

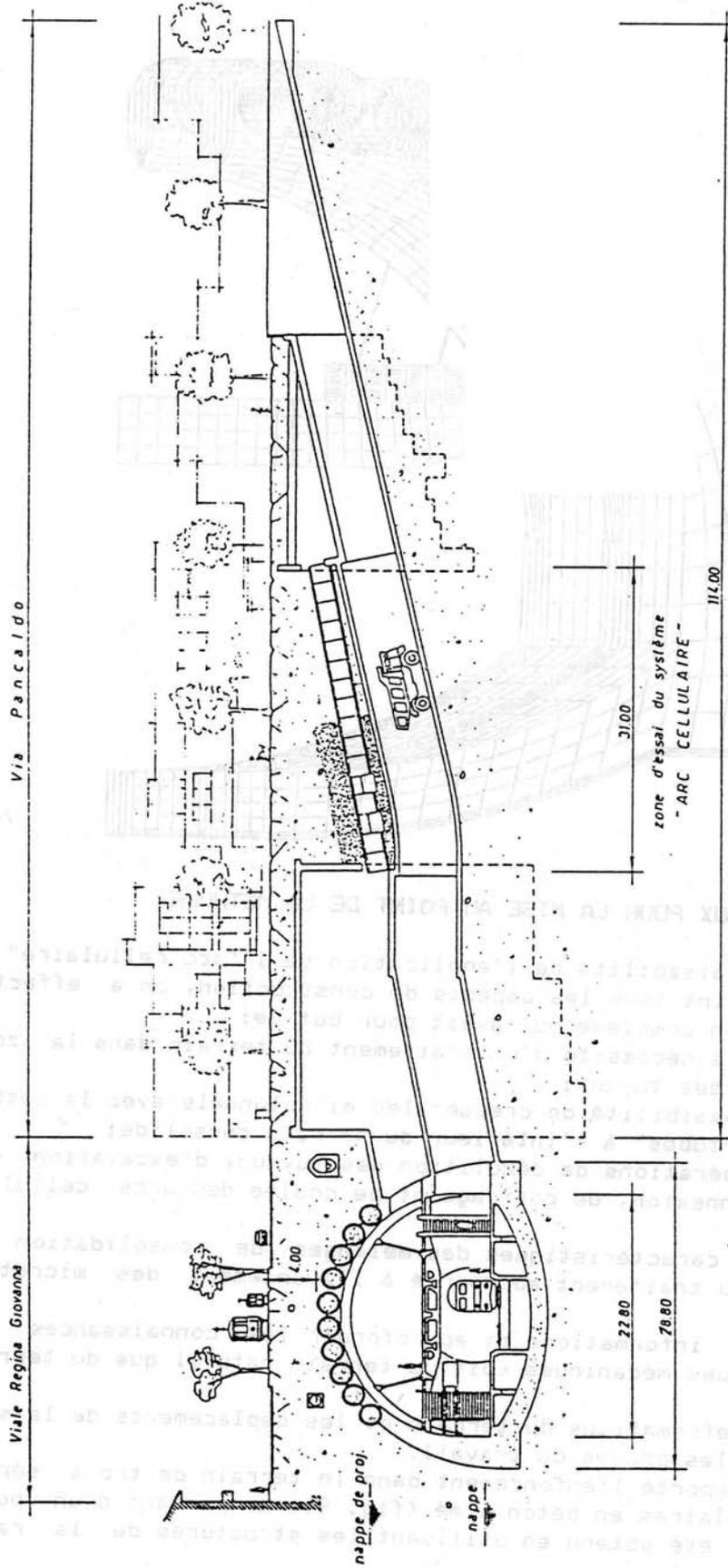


fig. 9

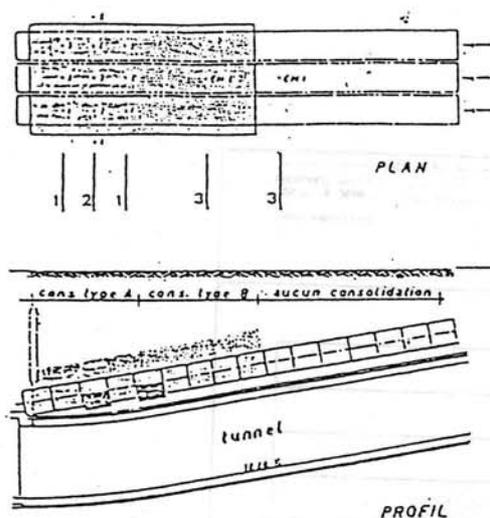


fig.10

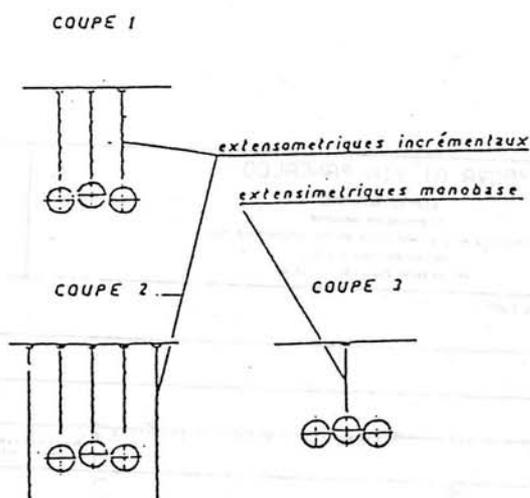


fig.11

En correspondance du lieu d'essai (fig. 10), le terrain qui est surtout composé de sable et de gravier en rapports granulométriques différents, a été traité par secteurs avec des consolidations et des caractéristiques différenciées.

La longueur globale du tronçon d'essai est d'environ 32 m et a été recouverte par 16 éléments circulaires en béton armé pour chacun des 3 tuyaux.

En même temps que l'essai d'enfoncement des tuyaux, on a procédé au relèvement des déformations provoquées dans le terrain environnant. Pour cela on a utilisé des extensomètres monobase et incrémentaux ainsi que des relèvements topographiques de surface (fig. 11).

On a aussi effectué:

- 3 essais de charge sur dalle depuis l'intérieur des tuyaux, dont 2 verticaux sur terrain consolidé et 1 horizontal sur terrain naturel;
- 9 essais dilatométriques autant sur terrain vierge que sur terrain traité;
- des relèvements de carottage sonique. L'essai s'est achevé en simulant la réalisation de deux arcs de connexion entre les tuyaux.

L'expérimentation a permis non seulement de dissiper toute réserve quant'à la faisabilité du système, mais aussi d'établir la nécessité d'un traitement du terrain tout autour de l'excavation des microtunnels. En effet, dans le cas du terrain traité on a mesuré des tassements atteignant au maximum quelque dixième de mm, tandis que dans le cas du terrain naturel on a obtenu des tassements de surface qui peuvent se reléver, pour la réalisation successive de plusieurs microtunnels rapprochés, incompatibles avec les limitations qui sont imposées par le Cahier Technique (ces limitations sont particulièrement sévères et imposent des tassements de 5 mm maximum) (fig. 12).

Lors des essais "in situ" on a mesuré des valeurs du module élastique du terrain naturel et du terrain traité parfois supérieures à celles qui ont été employées pour les vérifications numériques.

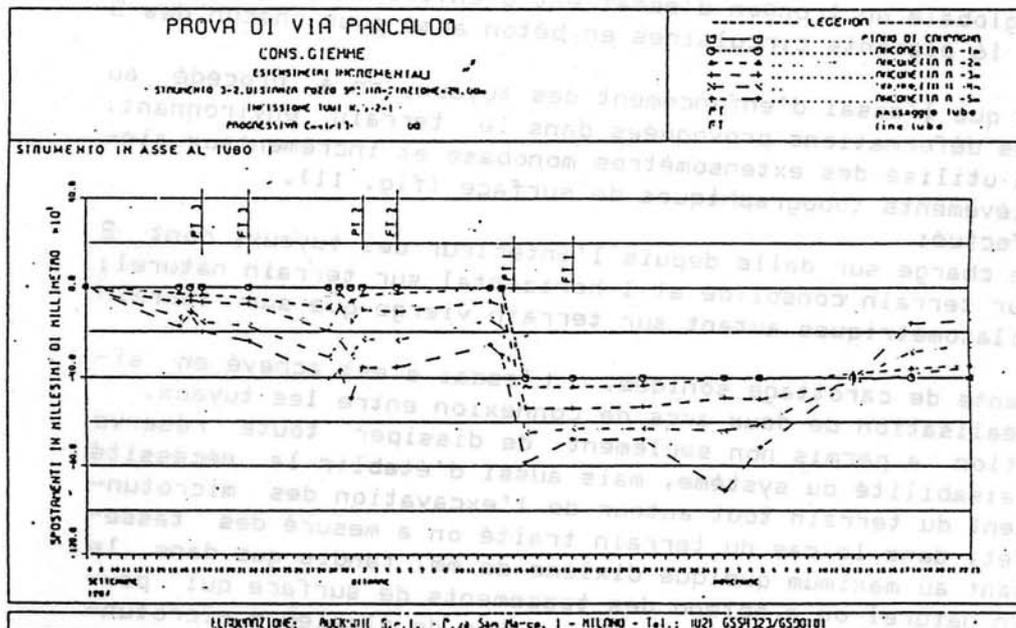
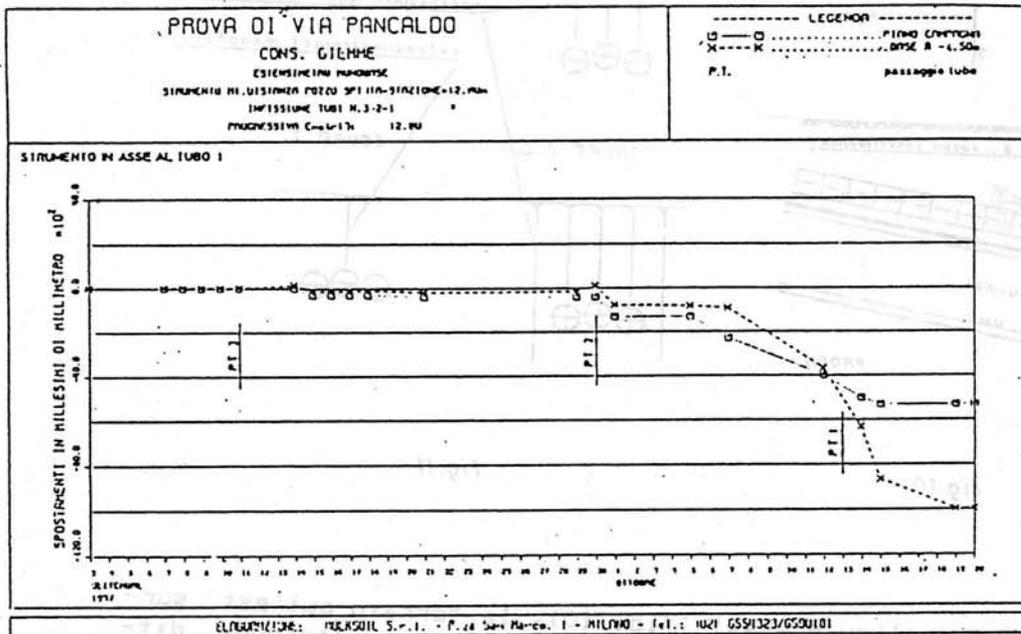


fig.12

ASPECTS OPERATIONNELS POUR LA CONSTRUCTION DE L'"ARC CELLULAIRE"

L'enfoncement des tuyaux pour la réalisation de l'arc de calotte est effectué par un seul puits de poussée, vu qu'on ne pouvait pas réaliser deux puits aux extrémités de la station (un de poussée et l'autre de sortie des boucliers) car il fallait absolument éviter les interruptions du trafic pendant la phase de manutention des outillages et des tuyaux.

Le puits a été placé, comme on l'a déjà dit, en correspondance de via Pancaldo, au-dessus de la rampe d'accès au tunnel (fig. 6).

L'enfoncement a été effectué en deux phases (voir fig. 2):

- au début, sur 50 mètres environ, vers la place VIII Novembre;
- ensuite, par l'inversion du matériel de poussée, sur plus de 160 mètres vers "Corso Buenos Aires".

Les parois du puits de poussée, qui ont comme dimensions 10 x 20 m en plan, sont formées par des cloisons de terrain consolidé, qui ont été effectuées avec la méthode jet-grouting.

Avant d'exécuter l'excavation, et pour éviter les interruptions du trafic, on a mis en oeuvre un pont rail et deux ponts routes préfabriqués en acier.

Le puits a été ensuite complètement équipé pour le déplacement des boucliers, l'alimentation et le déplacement des tuyaux.

L'outillage d'excavation proprement dit est composé d'un bouclier métallique d'une longueur totale de 8 m, divisé en trois parties, dont la première d'une longueur de 1.30 m est pourvue de trousse coupante et articulée, ce qui permet à l'opérateur de contrôler les mouvements plano-altimétriques.

Le bouclier est aussi pourvu d'une foreuse ponctuelle qui creuse, d'après un programme élaboré par ordinateur, en attaquant une section circulaire d'un diamètre inférieur d'environ 3 cm par rapport au diamètre externe du bouclier, de façon à limiter la formation de vides au dos des tuyaux.

Le matériel d'excavation est chargé sur des chariots par une bande transporteuse. Ensuite, par déplacement sur rail, il est porté au puits d'où il est déversé dans le tunnel sous-jacent.

L'outillage de poussée est composé de deux vérins hydrauliques, de structures répartitrices et d'une pompe hydraulique de 600 bar.

Les tuyaux en béton armé (diamètre externe 210 cm, diamètre interne 180 cm et longueur 200 cm) sont construits avec la méthode de fabrication à compression radiale, qui assure la réalisation de valeurs élevées de compactage du matériel et un finissage complet de la surface interne.

Ils sont renforcés par des incidences importantes du coffrage longitudinal et transversal, mis en oeuvre avec des machines automatiques.

Comme nous l'avons expliqué auparavant, l'enfoncement des tuyaux s'effectue à l'intérieur d'un terrain consolidé par des injections d'un mélange cimentaire appelé Mistra-S, expressément étudié et mis au point par la Rodio S.p.A, qui garanti un traitement assez uniforme et diffusé et donc, un développement régulier des phases d'enfoncement des tuyaux.

Les injections ont été effectuées depuis le boyau central de service, sur une bande de terrain de plus de 3 mètres qui comprend aussi l'épaisseur des tuyaux et des arcs.

MESURES EN COURS D'OUVRAGE

De pair avec l'enfoncement des tuyaux et avec les autres phases de réalisation de la Station, qui ont rejoint la phase de stross des tunnels latéraux, et après avoir effectué le complètement presque total des consolidations du terrain, on a prévu l'exécution d'opérations de recherche en cours d'ouvrage pour évaluer:

- les levées et les tassements de la surface pendant toutes les phases du travail;
- les déformations du pourtour de la cavité et celles du terrain en proximité des ouvrages déjà existants et qui interagissent avec le tunnel;
- les contraintes dans les structures de revêtement du tunnel;

Dans ce but on a prévu l'installation de:

- nivelomètres, déflectomètres, inclinomètres et extensomètres pour mesurer les déplacements de surface et les déformations du terrain;
- stations pour les mesures de convergence, cellules de pression et transducteurs électriques de déformation pour évaluer les déformations propres aux structures de revêtement.

CONCLUSIONS

Le système de l'arc cellulaire a permis de résoudre le problème de la réalisation d'une grande cavité dans des terrains difficiles partiellement immergés sous nappe et dans des conditions extrêmes (faibles recouvrements par rapport aux dimensions du tunnel) puisqu'on peut compter sur une structure résistante avant même de passer à la réalisation de l'excavation.

Jusqu'à présent on a exécuté le puits de poussée de dimensions de 10 x 20 m, réalisé dans le Viale Regina Giovanna sans devoir interrompre le trafic, avec des parois formées par des cloisons de colonnes dans un terrain consolidé par jet-grouting. L'enfoncement des 10 premiers tuyaux sur le tracé de 50 m est en phase d'achèvement.

La production moyenne journalière d'enfoncement des tuyaux a été d'environ 8 ml/jour.

Jusqu'à présent on a constaté le développement régulier des phases d'enfoncement en relevant des déplacements plano-altimétriques maximums d'environ 2 cm. Aucun tassement ne s'est vérifié en surface.

BIBLIOGRAPHIE

LUNARDI P.

Problemi geomeccanici nella realizzazione delle grandi cavità. Actes du Congrès sur le thème: "L'espace en souterrain comme nouvelle utilisation du territoire" Bolzano, Septembre 1982

LUNARDI P.

L'emploi de microtunnels pour la réalisation d'ouvrages souterrains de grande portée: l'arc cellulaire. Comptes-Rendus du Congrès international sur les tunnels et l'eau Madrid, 12-15 Juin 1988