

# UTILISATION DU SOUS-SOL URBAIN EN ITALIE : COMPARAISON DE DEUX CAS EXEMPLAIRES :

## LIGNE FERROVIAIRE SOUTERRAINE DE MILAN : STAZIONE VENEZIA (TECHNIQUE DE L'ARC CELLULAIRE)

## METRO DE ROME : STAZIONE BALDO DEGLI UBALDI (TECHNIQUE DU PRÉDÉCOUPAGE)

### UTILISATION DU SOUS-SOL URBAIN EN ITALIE : COMPARAISON DE DEUX CAS EXEMPLAIRES

La station Venezia à Milan a utilisé la technique des arcs cellulaires (poutrelles longitudinales et arcs transversaux réalisés en béton armé préalablement à l'excavation) pour une largeur de 30 m. La station Baldo Degli Ubaldi à Rome a utilisé à la fois un prédécoupage mécanique et une voûte active pour une largeur de 22 m.

**P. LUNARDI**  
ROCKSOIL

*Cet article reprend le texte d'une conférence présentée aux Journées d'Études SNBATI des 19 et 20 mars 1997*

### USE OF URBAN SUBSOIL IN ITALY : COMPARISON OF TWO CASES

The Venezia station in Milan used the technique of cellular arcs (longitudinal beams and transverse arcs in reinforced concrete prior to excavation) on a width of 30 m. The Baldo Degli Ubaldi station in Rome used both mechanical presplitting and an active arch on a width of 22 m.

pénurie d'espaces pour l'établissement d'activités humaines.

C'est pour ces motifs que depuis quelques années déjà, l'Italie prend nettement conscience des bénéfices susceptibles d'être obtenus grâce à une utilisation plus répandue et plus performante de la ressource représentée par le sous-sol pour y placer des services publics.

Bien que les terrains constituant le sous-sol italien soient parmi les plus difficiles pour la réalisation d'ouvrages souterrains, de nombreux travaux sont en cours d'exécution. Ils présentent un intérêt considérable compte tenu de leur taille et des difficultés de construction dues au contexte où il faut travailler.

Nous décrirons deux de ces ouvrages : la Stazione Venezia de la Transversale Ferroviaria de Milan et la Stazione Baldo degli Ubaldi du métro de Rome (fig. 0). Tous deux font partie de projets de transports qui se placent dans un sous-sol urbain. L'intérêt qu'ils suscitent est motivé par les dimensions des excavations à réaliser tout autant que par les méthodes de construction innovantes adoptées pour leur exécution.

## 1 - INTRODUCTION

L'Italie possède un territoire essentiellement montagneux et une densité de population parmi les plus élevées du monde. Malgré cela, c'est l'un des pays les plus industrialisés. Il en résulte des problèmes considérables dans les domaines des transports commerciaux, de la pollution de l'environnement et de la pollution acoustique, ainsi qu'une grande

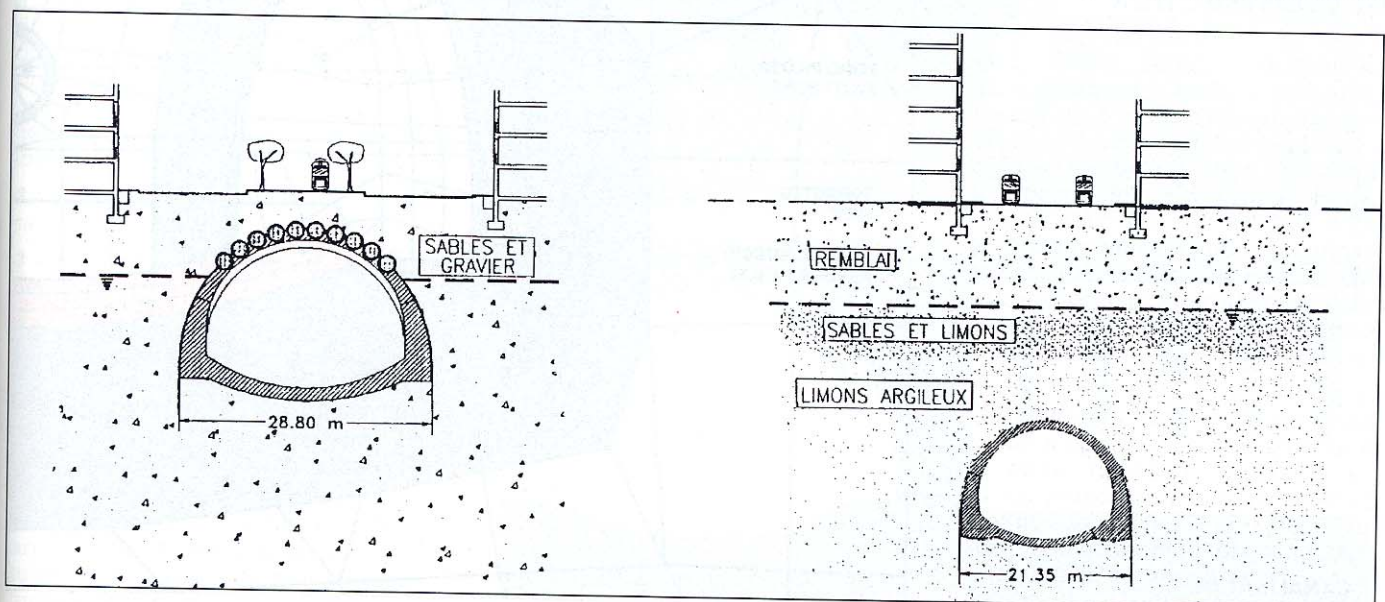


Figure 0 - Conception et exécution des tunnels système ADECO-RS

## 2 - LA TRANSVERSALE FERROVIAIRE DE MILAN ET STAZIONE VENEZIA

La Transversale Ferroviaria de Milan reliera les différents réseaux ferroviaires qui arrivent à cette métropole et permettra d'aboutir à un seul système intégré de transport comprenant les lignes de métro et les lignes de transport urbain de surface. Elle permettra tout particulièrement de réaliser la liaison entre les lignes ferroviaires provenant du secteur nord-ouest de la ville et celles provenant du secteur sud-est. Parallèlement, dans le tronçon compris entre les stations Lancetti et Porta Vittoria, on pourra utiliser les transports urbains et métropolitains. La Transversale Ferroviaria traverse en souterrain la ville tout entière à une profondeur moyenne de 20 mètres sur un développement total de 18 km environ avec dix stations dont six souterraines. Stazione Venezia est stratégiquement située dans le centre commercial de la ville et représente l'ouvrage souterrain ayant les dimensions les plus grandes de tout le réseau de transport régional.

Il s'agit d'un grand tunnel de quelque 30 mètres de diamètre extérieur et de 250 mètres de long, creusé en souterrain dans un terrain sans cohésion et sous la nappe, avec 4 mètres seulement de couverture sous les fondations d'édifices du XVIII<sup>e</sup> siècle. Sa construction a été possible grâce à l'adoption d'un nouveau système de construction connu sous le nom d' « arc cellulaire » qui permet de réaliser le revêtement final de l'ouvrage avant même de commencer son excavation

### 2.1 - CHOIX DE LA MÉTHODE DE CONSTRUCTION

Le tunnel principal de la station présente une section d'excavation de 440 m<sup>2</sup>, six fois celle d'un tunnel d'une ligne à deux voies et presque deux fois celle du tunnel le plus grand réalisé jusqu'à présent à Milan. L'excavation, effectuée en souterrain dans des terrains récents et sans cohésion, a un diamètre global de 30 m environ et une couverture sous les fondations de vieux édifices existants de 4 à 5 mètres seulement.

La présence de cette couverture insuffisante entraîna d'emblée des doutes sur les résultats qu'il aurait été possible d'obtenir avec la méthode traditionnelle basée sur le revêtement de la cavité dans un terrain consolidé, immédiatement protégé par des cintres métalliques et du béton projeté (fig. 1). Un traitement préalable du terrain sur le

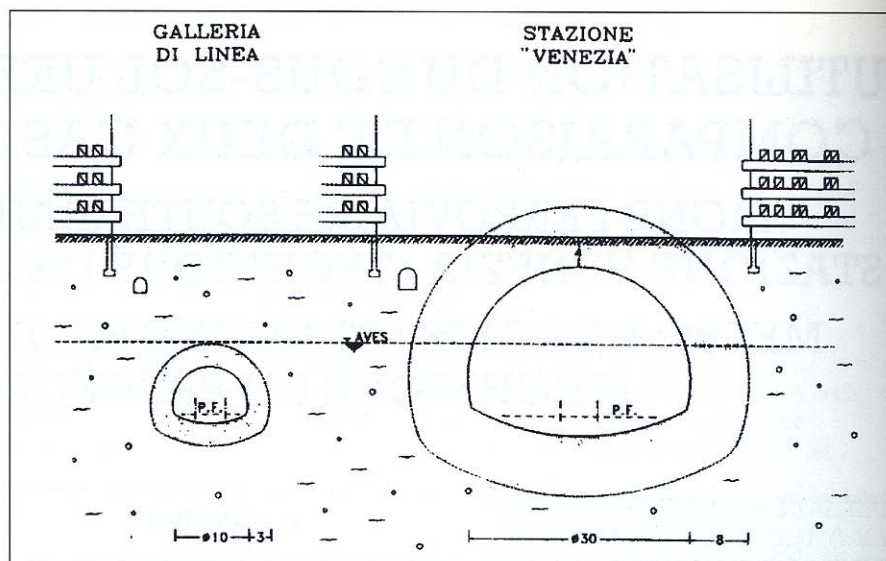


Figure 1 - Comparaison géométrique entre un tirand à deux voies et la station Venezia

contour de la voûte du tunnel, approprié aux grandes dimensions de la section d'excavation, apparaissait effectivement irréalisable. De surcroît, les analyses statiques de déformation effectuées numériquement avec la méthode des éléments finis (fig. 2) indiquaient que la structure

de confinement, réalisée avec des cintres et du béton projeté, aurait été trop déformable et incapable de limiter les tassements superficiels à l'intérieur des limites voulues pour la sauvegarde des structures limitrophes et des ouvrages existants des services publics.

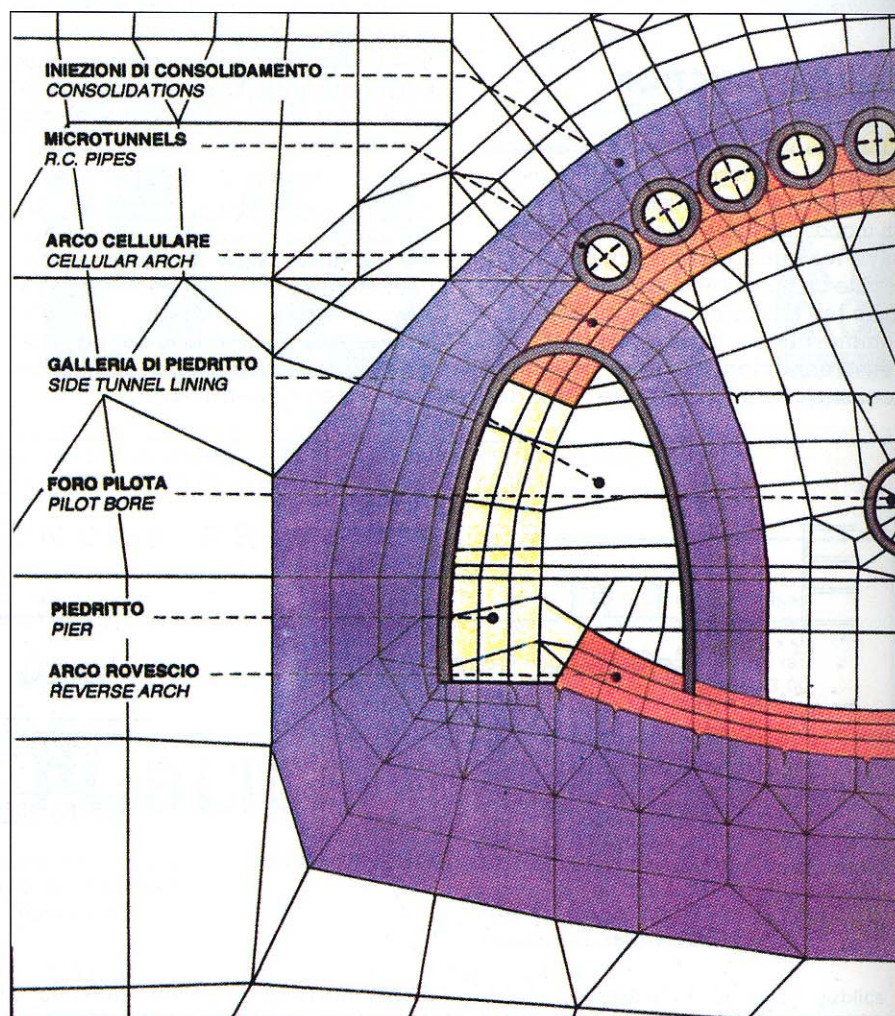


Figure 2 - Maillage pour le calcul aux éléments finis

La recherche d'une solution alternative à la solution traditionnelle en vue d'obtenir - en présence de grandes portées - une structure moins déformable et immédiatement active au moment de l'excavation, a abouti à la mise au point d'une méthode nouvelle et innovante appelée «arc cellulaire», théoriquement capable de creuser en souterrain et à pleine section des tunnels ayant un diamètre jusqu'à 60 m dans des terrains sans cohésion ou semi-cohérents et sous la nappe, en présence de couvertures même inférieures au rayon d'excavation.

L'arc cellulaire est constitué d'une structure composite assimilable à une claie à section semi-circulaire dont les éléments longitudinaux (cellules) sont constitués de tubes en béton armé rendus solidaires par une série de gros cintres transversaux (arcs) (fig. 3).

La caractéristique qui rend cette technique plus avantageuse par rapport aux méthodes traditionnelles est la manière de régler le passage de la condition d'équilibre initial du terrain encore non perturbé à une condition d'équilibre final du terrain, tunnel fini, susceptible d'éviter l'apparition de décompressions dans le matériel et donc de tassements en surface.

L'excavation est effectuée lorsque la structure portante, considérablement rigide, est déjà complètement construite et à même de fournir au terrain le confinement indispensable sans subir des déformations significatives.

La réalisation pratique de l'«arc cellulaire» se fait en 9 phases principales (fig. 4)

**1 - Traitement de consolidation du terrain :**

à partir d'un petit tunnel de service de petit diamètre, creusé dans l'axe du tunnel final, nous procédons à des préconsolidations systématiques du terrain sur le contour des futurs tunnels de piédroit et éventuellement le long de la voûte

**2 - Excavation des deux tunnels latéraux de piédroit**

**3 - Bétonnage des piédroits du tunnel final**

**4 - Dans un chantier indépendant du chantier inférieur du tunnel de piédroit a lieu la préparation de la chambre de poussée pour la mise en place, côte à côte, d'une série de tubes en béton armé à la hauteur du profil de calotte du futur tunnel**

**5 - Scellement des tubes en béton armé selon la méthode du pousse-tube pour la réalisation des micro-tunnels de calotte**

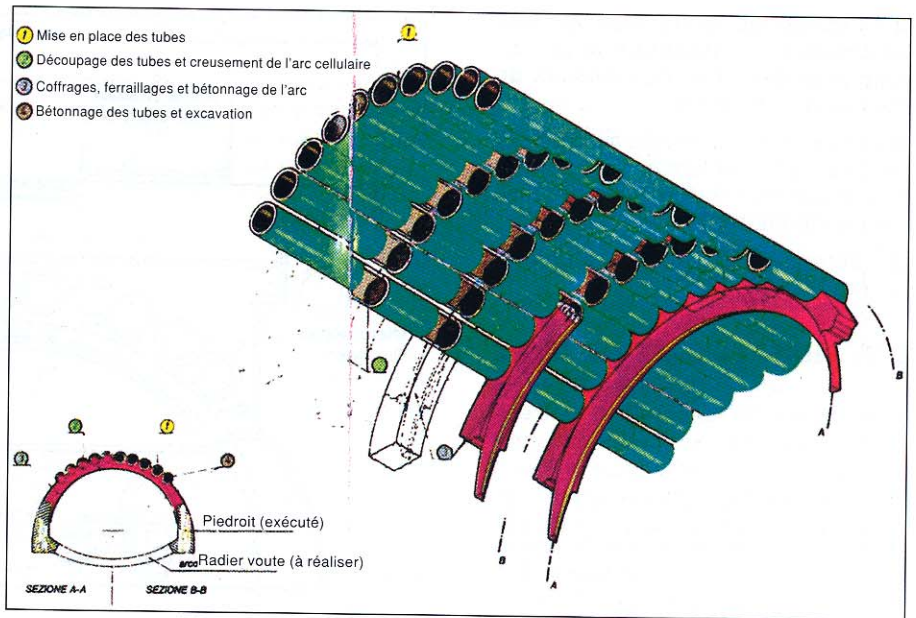


Figure 3 - Arcs cellulaires - Phases d'exécution

**6. Excavation** (dont les parois sont constituées par le terrain lui-même) perpendiculairement aux micro-tunnels, et pose des coffrages pour le

bétonnage des arcs de liaison en béton armé. L'élimination des déblais se fait à travers les tunnels latéraux

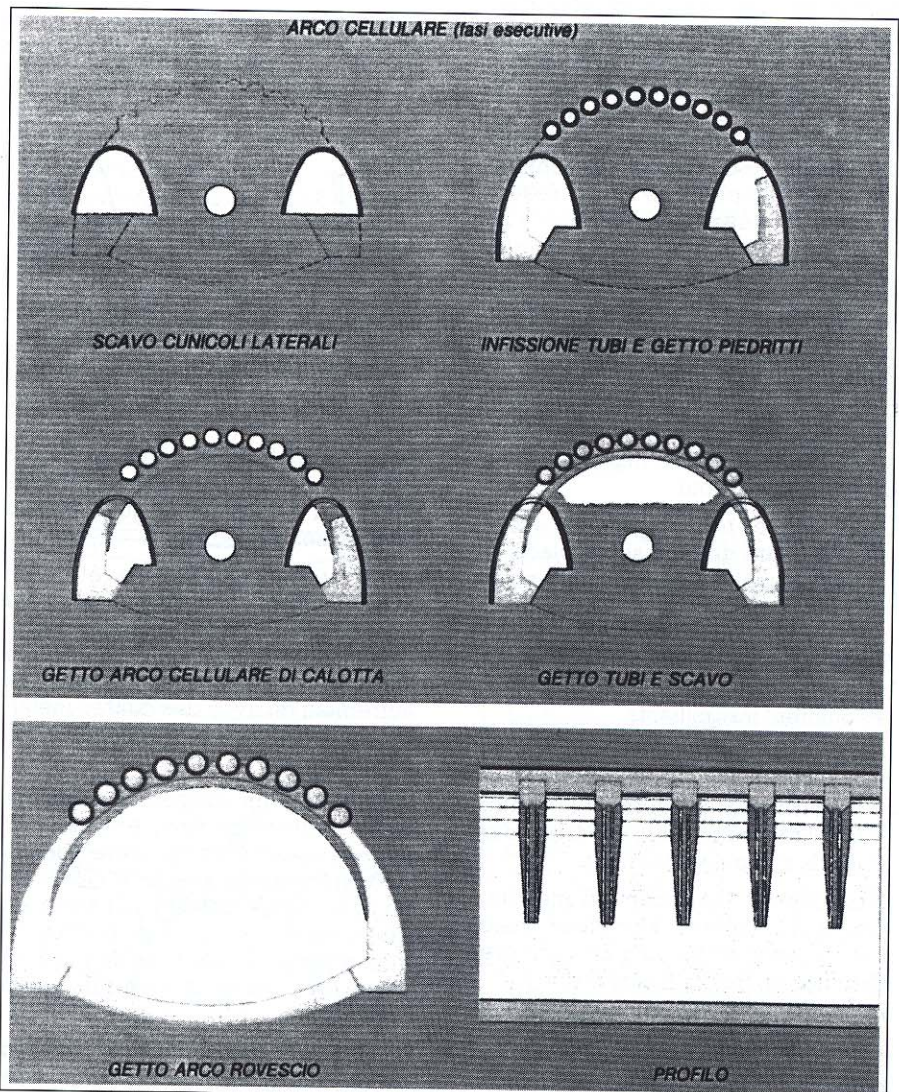


Figure 4 - Phases d'exécution

**7** - Ferrailage et remplissage des microtunnels longitudinaux de calotte et des arcs transversaux de liaison avec du béton

**8** - Excavation du terrain à l'intérieur de la section du tunnel final sous la protection de l'«arc cellulaire» déjà pratiquement actif

**9** - Bétonnage en plusieurs phases du radier

## 2.2 - PHASE OPÉRATIONNELLE

La longueur du tunnel - 215 mètres - a comporté l'exécution de 10 microtunnels en calotte et la mise en place de 2.159 tubes en béton armé. Les tubes, préfabriqués selon le système de précompression radiale par congélation de ciment haute résistance, ont un diamètre extérieur de 2.100 mm, un diamètre intérieur de 1.800 mm et une longueur de 2 mètres.

Leur mise en place a été effectuée au moyen d'un équipement comprenant un bouclier métallique cylindrique de 2.100 mm de diamètre et de 7,7 mètres de long, divisé en deux parties. La partie avant, de 4,2 mètres, à tête mobile, contient une fraise hydraulique (fig. 5) à mouvements informatisés et des bandes transportées pour le marin. La partie arrière de 3,50 mètres, contient les moteurs, les pompes et les réservoirs pour l'huile hydraulique.

L'avancement des tubes était obtenu à l'aide de deux vérins hydrauliques à course longue, placés à l'intérieur du puits de poussée, qui opéraient à une pression de 600 bar.

Le travail avec deux équipements nous a permis d'obtenir des productions journalières de mise en place de 8 à 9 mètres/jour.

Des contrôles topographiques effectués au cours de la mise en place et une fois qu'elle a été terminée nous ont permis de vérifier la bonne qualité de l'exécution. Les relevés des déviations de la direction et de la hauteur ont donné des résultats absolument insignifiants.

Parallèlement à la phase de mise en place des tubes, nous procédions à la construction de tunnels latéraux pour la réalisation des piédroits sur lesquels s'appuient les arcs.

Ces tunnels - largeur 7,6 mètres, hauteur 11,0 mètres et surface totale d'excavation 60 m<sup>2</sup> (fig 6) - ont été effectués en deux phases :

**1)** Excavation de 40 m<sup>2</sup> jusqu'au niveau de la nappe.

**2)** Exécution (du niveau de la première phase) d'injections de consoli-

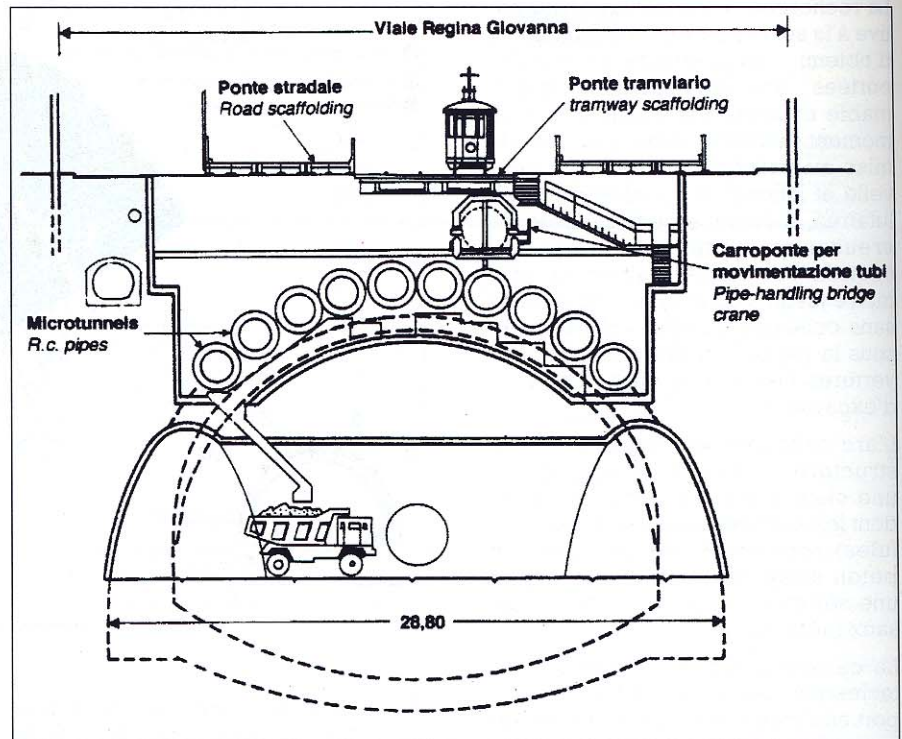


Figure 5 - Réalisation des microtunnels

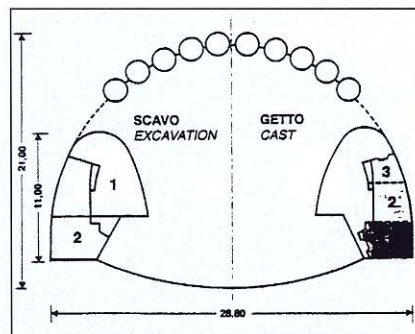


Figure 6 - Phases de réalisation des tunnels de piédroits

dation dans la nappe sous les futurs piédroits et radier, puis, abaissement de l'excavation jusqu'au niveau de la base du piédroit.

L'excavation et le prérevêtement consécutif des tunnels latéraux qui avaient tous la même longueur que le tunnel principal, ont été effectués selon les méthodes traditionnelles autrement dit avec des cintres métalliques, un grillage électrosoudé et du béton projeté.

La production moyenne a été de deux mètres linéaires environ par jour de piédroit fini de sorte que les 430 mètres de piédroit (215 de chaque côté) ont été achevés en quelque 11 mois, à peu près le même temps utilisé pour la mise en place des tubes qui se faisait en parallèle.

La structure transversale de soutien de la calotte est constituée d'une série de 35 arcs intermédiaires

espacés de 6,00 m plus deux aux extrémités.

La construction des arcs a représenté la partie la plus difficile de la technique de l'«arc cellulaire». Dans ce cas particulier, elle a été particulièrement complexe à cause de la section rétrécie vers l'intrados, imposée par des exigences architecturales.

Les phases de l'exécution se sont succédé de la manière suivante (fig. 7) :

**1)** Découpage et élimination de la partie de tube intéressant la section de l'arc.

**2)** Excavation de l'arc effectuée essentiellement à la main, jusqu'à atteindre les tunnels latéraux de piédroit.

**3)** Assemblage à l'intérieur de l'excavation des coffrages préfabriqués en acier.

**4)** Ferrailage des arcs et des tubes.

**5)** Bétonnage des arcs et des tubes de calotte.

Le radier du tunnel principal a, sur un développement de 92 mètres, une épaisseur de 1,5 à 2 mètres et une section totale de béton de 38 m<sup>3</sup>/ml. Le niveau inférieur à 6,5 mètres au-dessous du niveau de la nappe.

L'exécution s'est faite par tronçons de 5 m de long, réalisés chacun en moyenne en une semaine de sept jours ouvrables. Les travaux ont été coordonnés de manière à limiter la

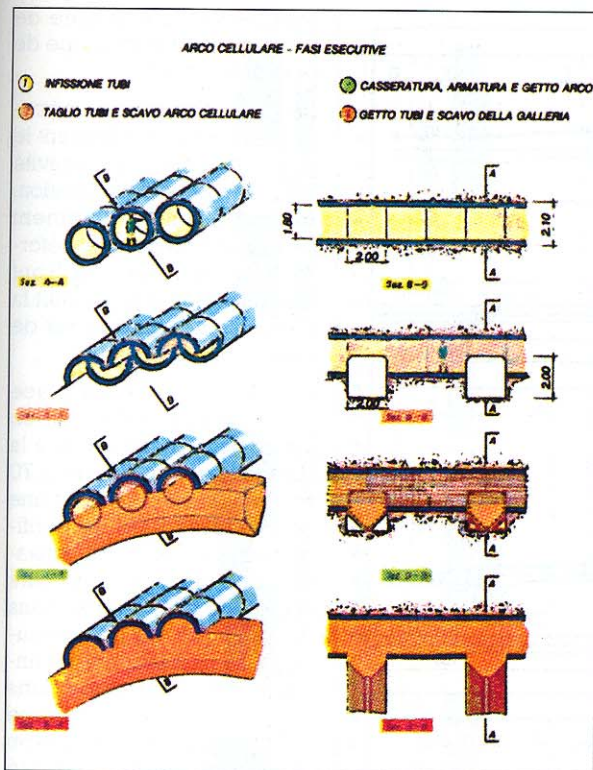


Figure 7 - Arcs cellulaires - Phases d'exécution

durée de l'excavation à trois jours seulement.

### 2.3 - SYSTEME DE SURVEILLANCE

Les dimensions considérables de la cavité, l'originalité des structures, les contraintes de surface réellement existantes nous ont obligé à étudier et à réaliser un vaste programme de

monitorage permettant d'évaluer :

▮ les déplacements en surface, tout particulièrement au niveau de la fondation des édifices existants, au cours de toutes les phases du travail

▮ les déformations du terrain à proximité des tunnels

▮ les contraintes et les déformations dans les structures de revêtement définitives.

L'enregistrement et l'élaboration des mesures effectuées avec chacun des instruments (fig.8) a fourni un tableau suffisamment complet de l'état des contraintes et des déformations du terrain ainsi que de la structure dans les différentes phases d'exécution tout en permettant une comparaison utile et permanente tant avec les résultats de l'étude qu'avec

les limites imposées pour le maintien de l'efficacité fonctionnelle de la structure.

En ce qui concerne notamment les déplacements en surface, après les soulèvements initiaux, conséquence des injections de consolidation, l'excavation postérieure des piédroits n'a pas produit de déformations appréciables. Dans la phase d'excavation de la calotte, des tasse-

ments plus marqués se sont manifestés. L'augmentation des déformations, lente au début, puis plus rapide aussitôt que le front de taille avait dépassé la section de mesure, s'est réduite petit à petit au fur et à mesure que le front s'éloignait. Ce comportement, mis en évidence par les points topographiques dans l'axe du tracé (fig. 9) est confirmé bien que dans une mesure moindre par ceux situés au niveau des édifices. Là, les déplacements maximaux au cours du passage du front de taille n'ont pas dépassé la valeur de 1-2 mm.

### 3 - STAZIONE BALDO DEGLI UBALDI DU MÉTRO DE ROME

La station Baldo degli Ubaldi est une des cinq nouvelles stations appartenant au prolongement de la « ligne A » Ottaviano - Battistini dans la ville de Rome qui complètera la liaison entre les quartiers de la banlieue de la zone ouest et le centre historique ainsi que le territoire du Vatican.

La station - 22 mètres de portée - est située en plein centre ville, dans un sous-sol fondamentalement argileux.

Les nombreuses reconnaissances géologiques et géotechniques effectuées entre 1987 et 1994 nous ont permis de reconstruire d'une manière détaillée la stratigraphie des terrains concernés par le chantier. Deux catégories de terrains ont été définies :

▮ une formation de base constituée d'argiles bleues pliocènes avec des niveaux sablonneux d'une épaisseur allant du centimètre au décimètre

▮ une formation plus superficielle constituée de terrains sablo-limoneux qui ont, localement, des valeurs de résistance extrêmement basses.

La figure 11 montre la stratigraphie.

Le tunnel de la station est plongé dans l'argile pliocène, formation constituée du point de vue granulométrique de limons argileux surconsolidés au-dessous de la nappe.

Ses dimensions, le contexte d'une grande densité urbaine avec une forte présence de fondations d'édifices à deux mètres seulement de l'extrados du tunnel et la nature complexe des terrains à excaver rendaient sa réalisation particulièrement délicate.

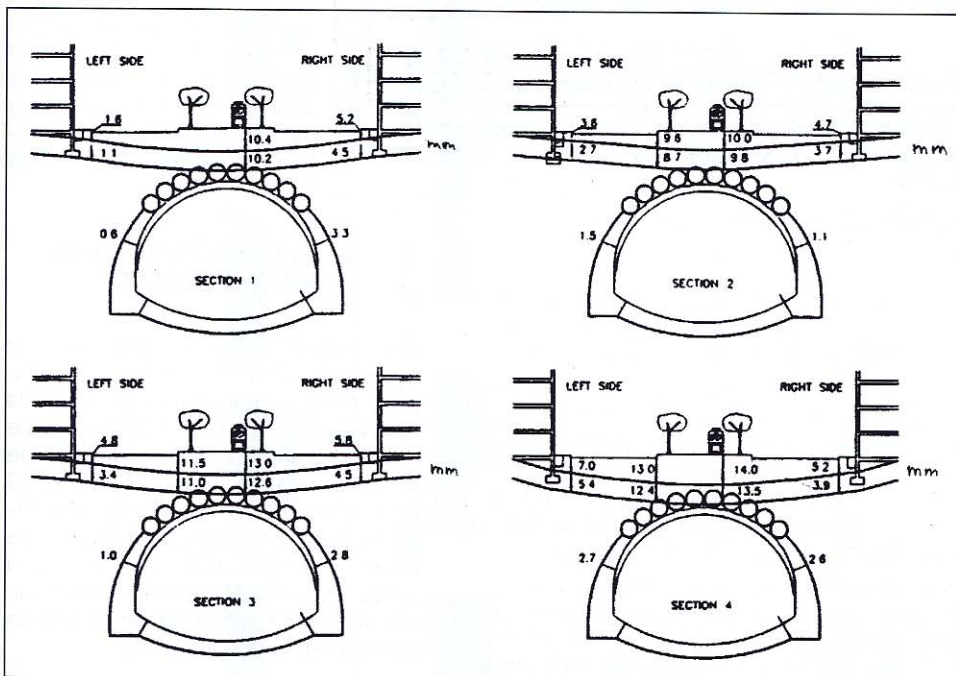


Figure 8 - Mesures des tassements de surface

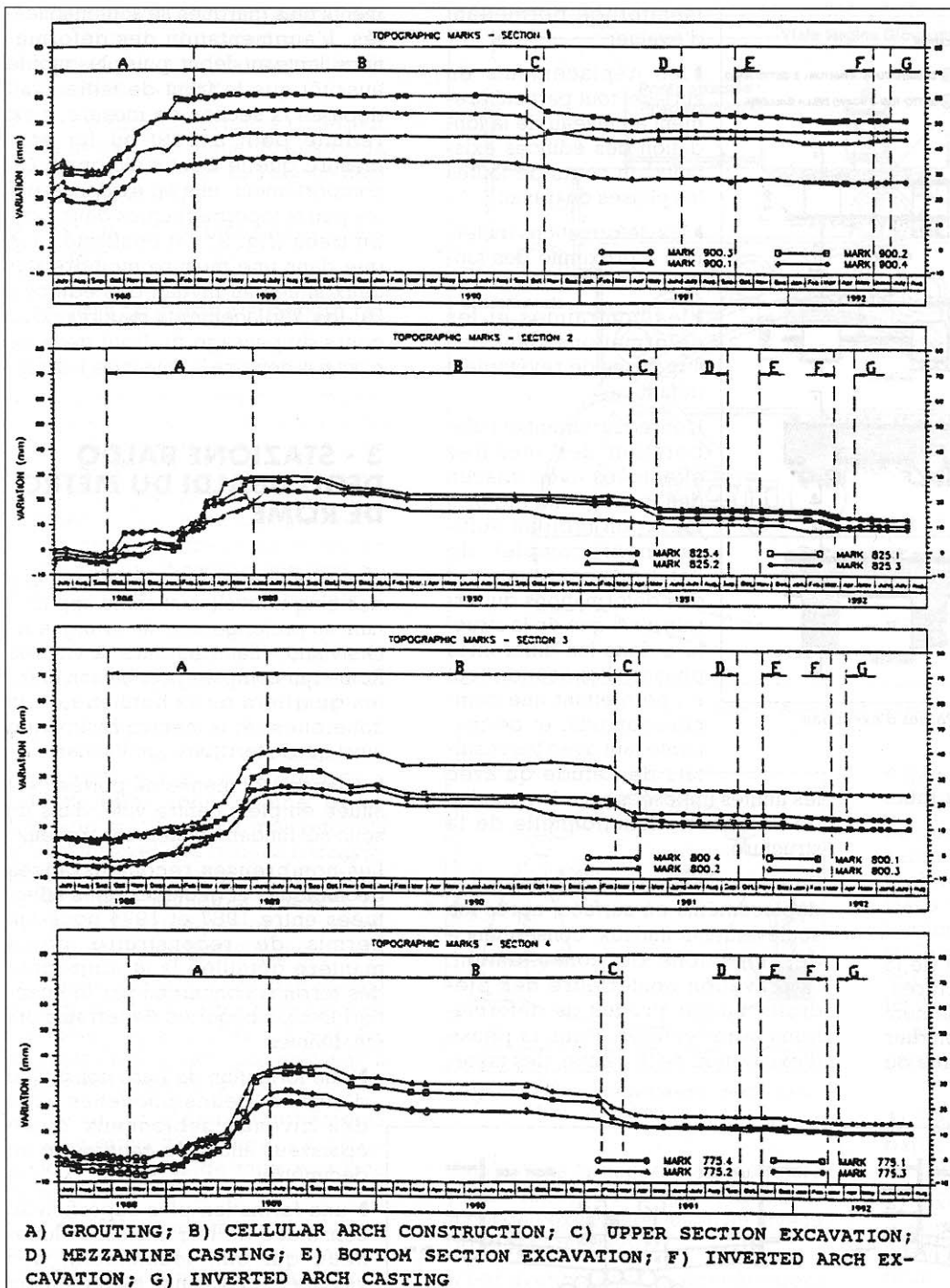


Figure 9 - Résultats des mesures de tassements de surface

### 3.1 - CHOIX DE LA METHODE DE CONSTRUCTION

Dans ce cas tout comme dans le précédent, la proximité de nombreux édifices résidentiels a exigé impérativement de limiter les phénomènes de déformation bien en dessous de l'ordre de grandeur qui caractérise les tunnels creusés dans des terrains cohérents. En l'absence de mesures appropriées, l'état de contraintes induit par les opérations d'excavation aurait effectivement produit, sur le front de taille, des phénomènes d'extrusion bien plus dangereux

pour les édifices se trouvant au-dessus et aurait donné lieu à des tassements superficiels importants.

L'adoption de méthodes de construction traditionnelles basées sur le revêtement de l'excavation dans un terrain consolidé au moyen de cintres métalliques et de béton projeté n'aurait pas permis de faire face à ce genre d'inconvénients.

Pour réaliser le revêtement de la calotte du tunnel, nous avons donc conçu un système de construction particulier qui conjugue la technologie du prédécoupage mécanique effectuée pour la première fois au

monde sur une portée de 22 mètres, et le principe de la «voûte active».

Le prédécoupage mécanique permet notamment le préconfinement de la cavité dans la phase d'excavation. Il produit un confinement des phénomènes de déformation en amont du front d'excavation et il garantit la sécurité des opérations de construction du tunnel.

De plus, la mise en place du revêtement définitif en voussoirs préfabriqués à la distance maximum de 2,70 mètres du front produit une action immédiate de confinement tandis que l'utilisation des vérins produit une réduction des déformations de la coque de prédécoupage aussi bien qu'un centrage des contraintes dans les voussoirs et l'absence de traction dans le béton afin de garantir la stabilité de la structure à long terme.

Enfin, la préconsolidation du noyau de terrain sur le front, avec un nombre approprié d'éléments structurels en VTR réduit les phénomènes d'extrusion du terrain et par voie de conséquence, l'amorce de phénomènes de préconvergence et de convergence de la cavité qui pourraient déterminer des tassements de surface.

Les analyses par la méthode des éléments finis effectuées nous laissent prévoir que les tassements maximaux de surface, dus exclusivement à l'excavation du tunnel, seront de l'ordre de 1,5 cm.

### 3.2 - LA PHASE OPÉRATIONNELLE

Afin d'atteindre la côte prévue pour le creusement du tunnel de la station, nous avons réalisé deux puits (Pozo Aurelia Cornelia et Pozo Valle Aurelia) d'une profondeur de 30 et de 40 mètres, avec une section de 200 m<sup>2</sup> environ. Les structures de confinement des puits sont constituées de paroi de poteaux Ø 1200 en béton armé. Une fois les travaux achevés, les deux puits serviront de locaux de service techniques (fig. 10).

Après l'exécution des puits, nous avons procédé à l'excavation de

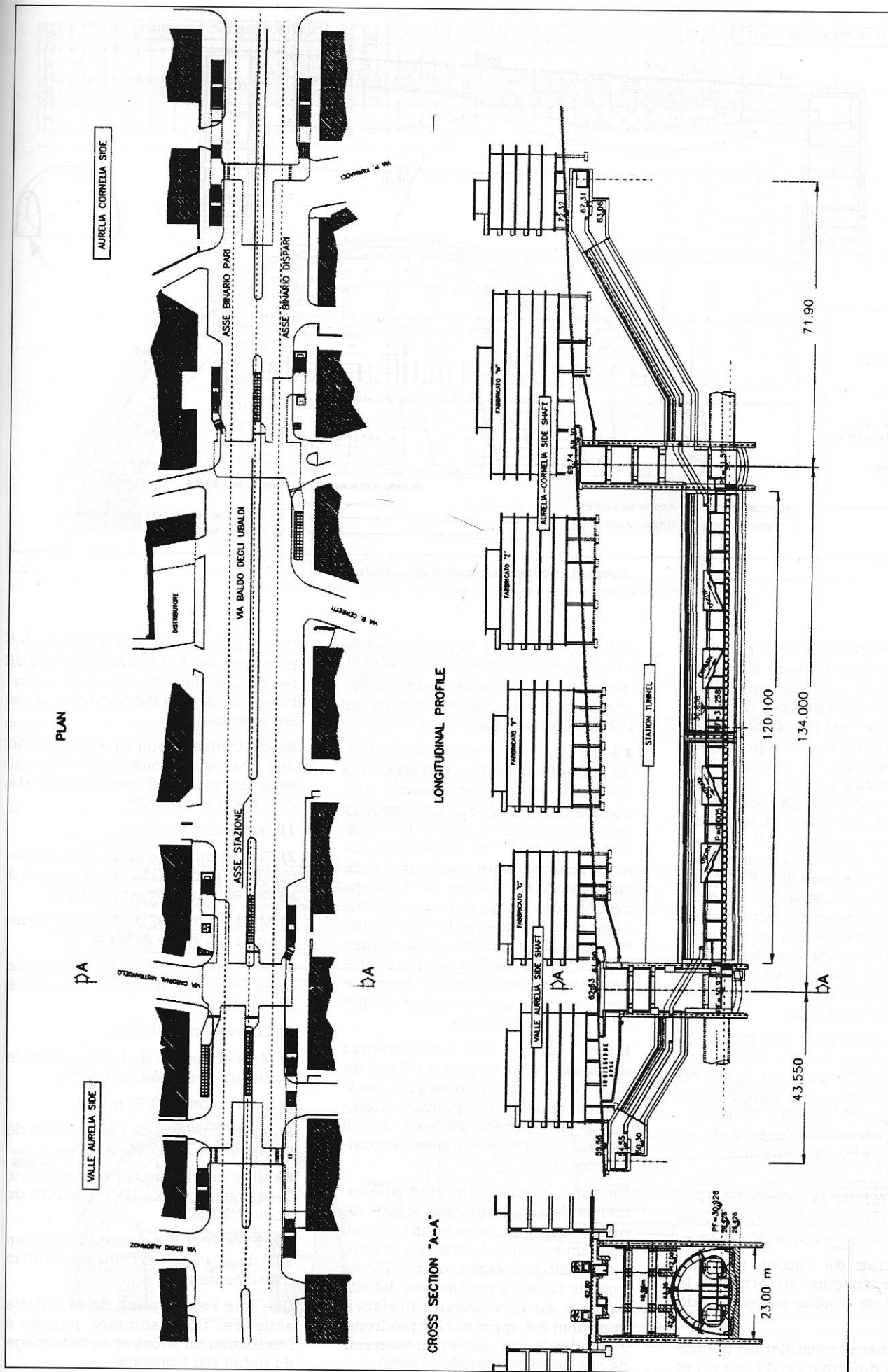


Figure 10 - Projet et construction des tunnels par la méthode ADECO-RS - Métro de Rome - Station «Baldo Degli Ubaldi»

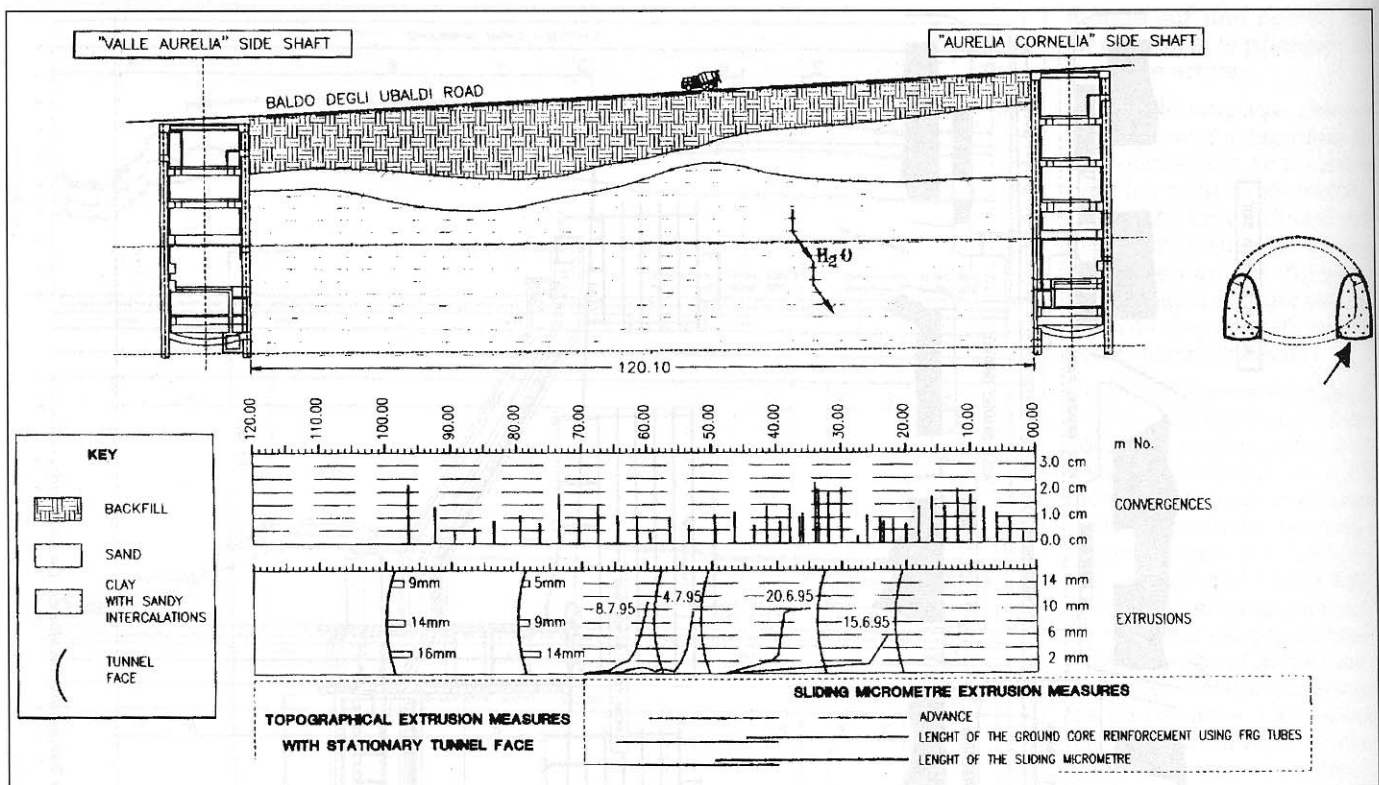


Figure 11 - Géologie et résultats des mesures

deux tunnels latéraux de 9 mètres de hauteur sur 5 de largeur, à l'emplacement futur des piédroits. Pour contrôler les phénomènes de déformation qui se sont manifestés durant l'excavation, nous avons procédé à des interventions de préconsolidation du noyau par des éléments structuraux en VTR et de confinement de la cavité par des cintres métalliques doubles type IPN 180, en combinaison avec du béton projeté renforcé de fibres de 20 cm d'épaisseur. Les deux tunnels de piédroit ont été creusés en conservant toujours une distance non inférieure à 40 mètres entre les deux fronts. Sur ce, nous sommes passés au bétonnage des piédroits en béton armé, réalisé en deux phases.

Une fois l'exécution des piédroits achevée, nous avons commencé l'excavation du tunnel de la station qui a avancé du puits Valle Aurelia vers le puits Aurelia Cornelia. Toujours en cours d'exécution en avril 1997, elle procède par deux phases :

► excavation de la calotte (dimensions 8,50 mètres de hauteur et 21 de largeur pour une surface de 125 m<sup>2</sup>)

► excavation du radier (surface 90 m<sup>2</sup>) par tronçons au terme de la réalisation de chaque excavation de calotte.

Pour confiner et contrôler les phénomènes de déformation du terrain et

donc pour réduire le plus possible les répercussions sur les édifices au-dessus, nous avons procédé à différentes interventions en fonction de l'objectif à atteindre.

► Pour garantir la préconsolidation de la cavité, nous avons réalisé, tous les 2,70 m d'avancement, des coques par prédécoupage remplies de béton renforcé de fibres de 3,50 m de long et de 20 cm d'épaisseur. La superposition entre une coque et la suivante est de 0,80 m. Le développement des coques de prédécoupage est de 28 mètres pour une portée nette de 21 mètres. Les coques sont inclinées de 8° pour permettre l'exécution de la coque suivante avec la superposition minimum que nous venons d'indiquer

► Pour limiter les phénomènes d'extrusion du terrain au front de taille (de l'ordre de quelques décimètres) nous avons appliqué 47 éléments structuraux en VTR de 25 mètres de long avec une superposition de 6,10 m

De plus, pour éviter des phénomènes de surcharge des coques de prédécoupage, nous avons mis au point un système de pose du revêtement à faible distance (max. 2,70) du front de taille. Le revêtement définitif consiste en 12 voussoirs préfabriqués dont 2 d'appui sur les piédroits, 9 standards (fig. 12) et un voussoir de clé.

Une fois l'arc terminé, une recompression est faite pour garantir le recentrage des contraintes et contribuer à limiter les déformations, donc les tassements.

Bref, la succession opérationnelle des phases de construction organisées en cycles d'avancement de 2,70 m est la suivante.

1) Excavation = 0,90 m

2) Exécution de la coque de prédécoupage remplie de béton projeté à haute résistance et prise rapide

3) Mise en œuvre de l'arc de voussoirs de la «Voûte Active»

4) Mise en charge du premier vérin dans le voussoir avec une force N=40 t

5) Excavation de 0,90 m

6) Mise en œuvre de l'arc suivant de voussoirs de la «Voûte Active»

7) Excavation de 0,90 m

8) Mise en œuvre de l'arc suivant de voussoirs de la «Voûte Active»

9) Mise en charge du second vérin avec une force N2=360 t, distance du front d=20-30 m

10) Exécution de consolidations en VTR de 25 m de long tous les 18,90 m d'avancement.

Une fois l'excavation de la calotte achevée, nous sommes passés à l'exécution du stross et au bétonnage du radier par tronçons.



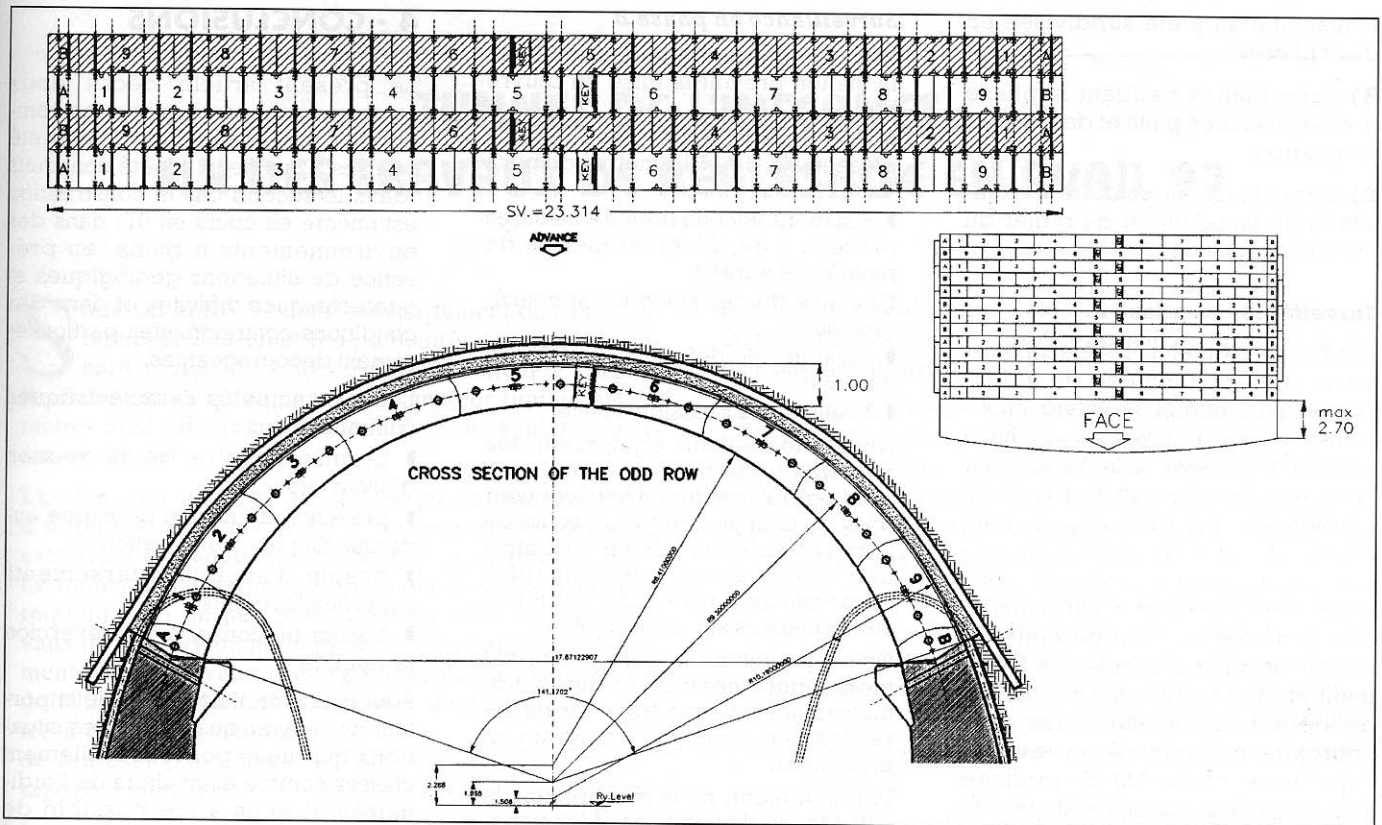


Figure 12 - Prédécoupage et revêtement définitif pour voussoirs «voûte active»

### 3.3 - SYSTEME DE SURVEILLANCE

En plus de la vérification du comportement du tunnel, comme nous l'avons dit plus d'une fois, le contexte dans lequel nous avons opéré a exigé une attention très particulière

de notre part à l'égard du contrôle des effets des travaux en termes de subsidence en surface.

Les grandeurs soumises à une surveillance attentive (fig. 11 et 13) sont les suivantes :

► affaissements des édifices dans la zone concernée par les travaux

► variations des niveaux de nappe, à la fois superficielle et profonde

► mouvement du terrain de fondation des édifices

► déformations du noyau de terrain sur le front de taille et déformation de la cavité des tunnels

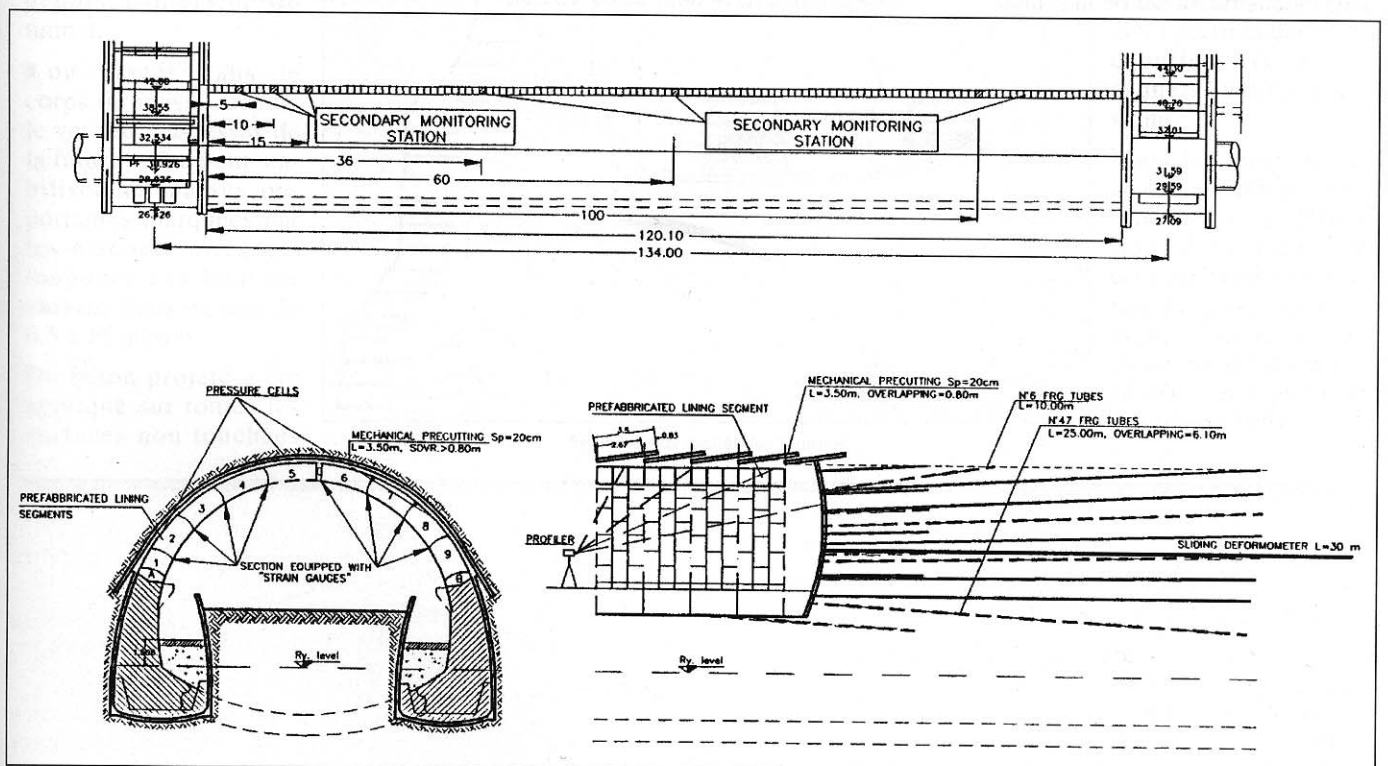


Figure 13 - Auscultation définitive

L'auscultation a été subdivisée en deux phases :

**A)** Surveillance pendant la phase d'excavation des puits et des tunnels de piédroit

**B)** Surveillance au cours de l'excavation de la calotte et du radier du tunnel de la station

#### **Surveillance en phase A**

Les résultats obtenus révèlent l'existence d'un phénomène de subsidence qui a atteint sa valeur maximum (50 mm) au niveau de l'édifice situé près du puits Valle Aurelia et à la hauteur du côté pair des rails. Le phénomène est provoqué par un processus de consolidation du terrain. L'analyse de toutes les données recueillies (mesures d'extrusion et convergence au front de taille du tunnel, mesures concernant le tassement et l'inclinaison) nous a permis de définir les mesures les plus appropriées à contrecarrer les phénomènes en cours. Afin de produire une action de confinement du terrain de fondation des édifices, nous avons effectué en plusieurs phases, deux barrières de confinement selon la technologie du jet-grouting (env. 250 traitements colonnaires Ø 600, interaxe moyen  $i=60$  cm). De cette façon, nous avons atteint le double but de limiter les tassements des édifices et de fournir un confinement approprié au terrain de fondation des édifices au cours de l'excavation de la calotte du tunnel de la station.

#### **Surveillance en phase B**

Le projet d'auscultation du tunnel de la station prévoit la mise en œuvre de :

▶ 3 stations primaires de mesures placées à 5, 10 et 15 mètres du puits Valle Aurelia

▶ 3 stations secondaires de mesures placées à 36, 60 et 90 mètres du puits Valle Aurelia

Chacune de ces stations est constituée de :

▶ 3 «jauges de déformation» à corde vibrante

▶ 3 cellules de pression à huile.

Nous effectuerons également des mesures d'extrusion avec des «Sliding Deformeter» d'une longueur de 30 m chacun, installé au cours de la pose des éléments en VTR ainsi que des mesures laser capables d'évaluer la position de certaines cibles placées sur les voussoirs.

Des appareils de mesure des tassements incrémentiels et des clinomètres nous permettront de mesurer les déplacements du terrain en profondeur.

Parallèlement, nous mesurerons la subsidence des édifices et les variations du niveau de la nappe.

Dans l'état actuel des choses, les mesures faites nous indiquent que

▶ les valeurs des extrusions cumulées se maintiennent au dessous de 2 cm ce qui révèle un comportement du terrain dans le domaine élastique.

▶ les tassements superficiels au niveau des édifices, dus au passage du front, ne mesurent que 2 - 3 millimètres, alors que pour cette phase, nos prévisions étaient de 8 - 10 mm.

## **4 - CONCLUSIONS**

Le présent article décrit deux ouvrages importants qui ont en commun le contexte dans lequel ils ont été réalisés. Tous deux ont été construits (dans le second cas la construction est encore en cours en 97) dans des environnements urbains, en présence de situations géologiques et géotechniques difficiles et dans des conditions contraignantes particulièrement décourageantes.

Leurs principales caractéristiques communes sont :

▶ grand diamètre de la section d'excavation

▶ présence du niveau de nappe au-dessus du plan d'excavation

▶ besoin d'avoir des tassements superficiels réduits

▶ besoin de conserver en exercice la viabilité

Pour conclure, il nous semble important de relever que face à des situations que nous pouvons facilement classer comme étant «hors de l'ordinaire», il nous a été possible de développer une méthode d'exécution «sur mesure» résolument innovante telle que l'«arc cellulaire», et combiner une méthode déjà connue comme le prédécoupage mécanique à celle de la «Voûte Active» mais pour une portée supérieure de beaucoup aux applications normales ce qui nous a incontestablement permis de résoudre avec succès les multiples problèmes que nous avons dû affronter. ■