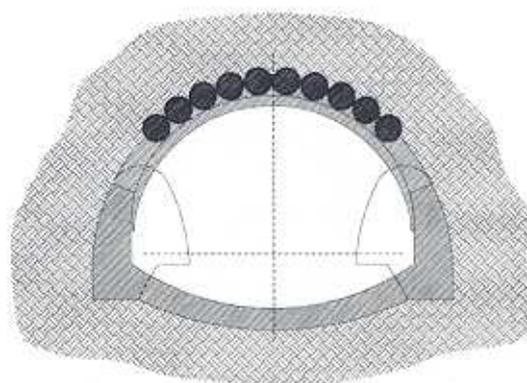


Construction des stations de grandes portées pour métro

P. Lunardi, Bureau d'études Lunardi, Milano

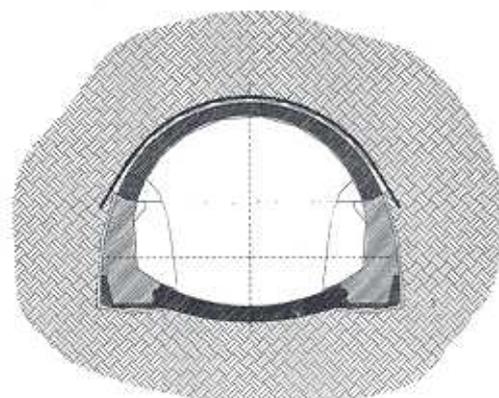
Cellular Arch (1986)



28.80m

Venezia Station Tunnel

Active Arch (1996)



21.90m

Baldo degli Ubaldi Station Tunnel

Tirage à part de l'anthologie du symposium
«Städtischer Tunnelbau: Bautechnik und funktionelle Ausschreibung»
du 18 mars 1999 à l'Ecole polytechnique fédérale à Zurich

Construction des stations de grandes portées pour métro

P. Lunardi, Bureau d'études Lunardi, Milano

1. Introduction

A l'heure actuelle, la construction des réseaux de métro des grandes villes est devenue affaire courante. L'aspect le plus délicat de la réalisation des réseaux de métro dans les grandes villes est très certainement représenté par les ouvrages de station dont la construction exige d'ouvrir de grands espaces dans le sous-sol du centre de la ville, dans des terrains souvent hostiles, avec des couvertures plutôt réduites, sous des infrastructures de différentes espèces déjà existantes. Les aspects de leur construction doivent tous être méticuleusement évalués au préalable. Quant à la conception, elle doit être complète, précise et optimisée. Les marges de tolérance sont des plus réduites. Il n'est pas rare de devoir recourir à des systèmes de construction entièrement innovants.

Nous présenterons, à titre d'exemple, deux projets qui, de par la dimension des excavations et les systèmes de construction adoptés, ont suscité un intérêt considérable dans le monde entier. Premier projet (figure 1): la station «Venezia» de la transversale ferroviaire milanaise (quelque 30 mètres de lumière et seulement 4 mètres couverts, terrain sablonneux – graveleux sous la nappe) réalisée selon la technologie de l'«arc cellulaire». Pour son invention, le projeteur s'est vu décerner un prix international des plus prestigieux. Deuxième projet: la station Baldo degli Ubaldi de la Ligne A du Métro de Rome (près de 22 mètres de lumière et 20 mètres couverts, terrain argileux et minces niveaux sablonneux) réalisée selon la technologie du prédécoupage mécanique (appliquée pour la première fois au monde sur une lumière aussi élevée) combinée au principe de la «voûte active».

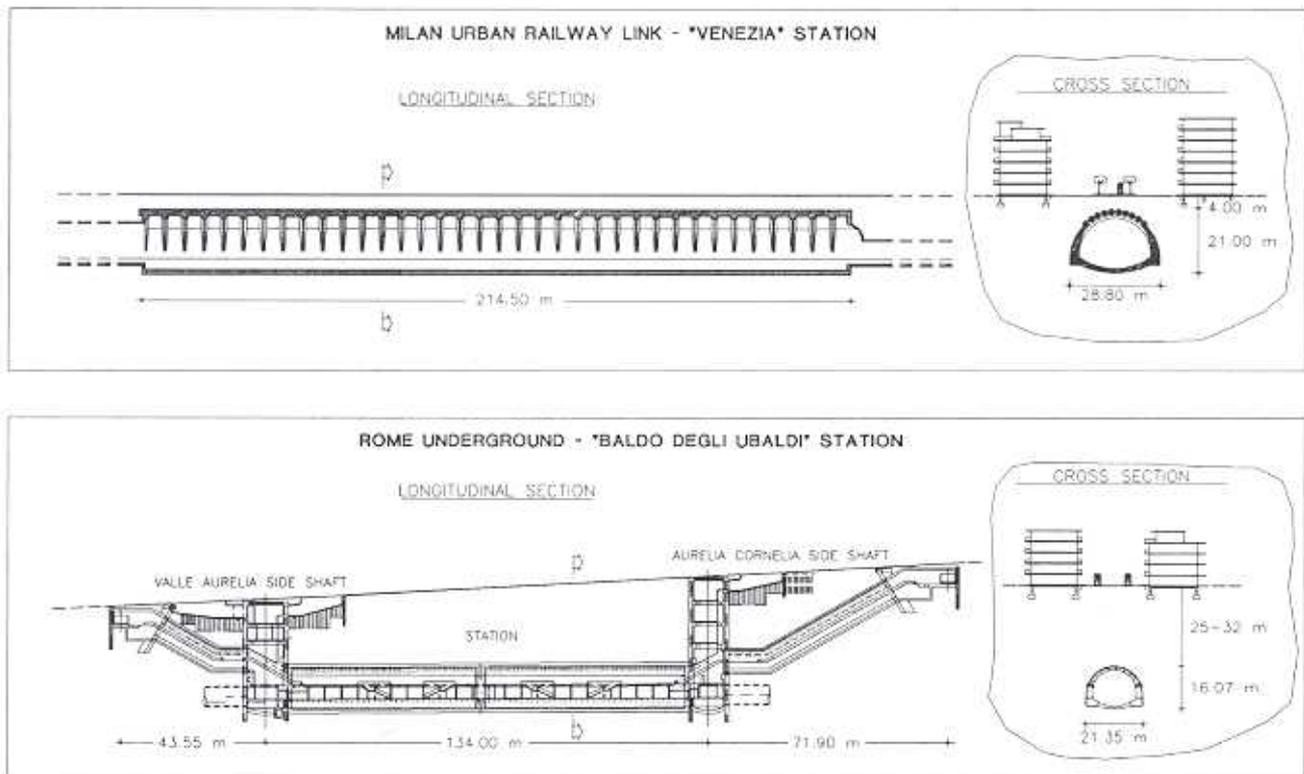


Figure 1: Profils en long et sections de la station Venezia et de la station Baldo degli Ubaldi

2. La Transversale Ferroviaire de Milan et la Station Venezia

La Transversale Ferroviaire de Milan reliera les différents réseaux ferroviaires qui arrivent à la métropole et permettra d'aboutir à un seul système intégré de transport comprenant les lignes métropolitaines 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, le transport pourra être utilisé au niveau urbain et métropolitain. Pour obtenir ce résultat, la Transversale Ferroviaire 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.

La station Venezia, déjà en fonction, 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 trou borgne dans un terrain incohérent et sous la nappe, avec 4 mètres seulement de couverture sous les fondations des édifices du XVIII^e 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 Motivations et caractéristiques de l'«arc cellulaire»

Le tunnel principal de la station présente une section d'excavation de 440 m², six fois le tunnel de ligne à deux voies et presque deux fois le deuxième tunnel le plus grand réalisé jusqu'ici à Milan. L'excavation, effectuée en trou borgne dans des terrains récents et incohérents, avait un diamètre global de 30 m environ et une couverture sous les fondations des anciens édifices qui existaient déjà de 4 – 5 mètres seulement. Au niveau du projet, la présence de cette couverture aussi réduite posa d'emblée de très forts doutes quant aux résultats qu'il aurait été possible d'obtenir avec la méthode traditionnelle basée sur l'élimination de terrain par échantillons après l'avoir consolidé sur le contour du tunnel à réaliser, par des injections de mélanges de ciment et la mise en place immédiate de cintres métalliques et de béton projeté (figure 2). Ceci parce que l'absence de couverture aurait rendu irréalisable un traitement préventif du terrain d'une épaisseur appropriée aux grandes dimensions de la section d'excavation. De surcroît, les analyses effectuées par la voie numérique utilisant un programme de calcul à éléments finis indiquaient entre autres choses qu'une structure de confinement traditionnelle, réalisée avec des cintres et du béton projeté, aurait été excessivement déformable et incapable de contenir – même dans une première phase – les tassements superficiels à l'intérieur des limites voulues pour la sauvegarde des structures limitrophes et des sous-services existants.

La recherche d'une solution alternative permettant d'obtenir – en présence de grandes lumières – 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 d'ouvrir en trou borgne des tunnels ayant un diamètre jusqu'à 60 m dans des terrains incohérents ou semi-cohérents et sous la nappe, en présence de couvertures même inférieures au rayon d'excavation.

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

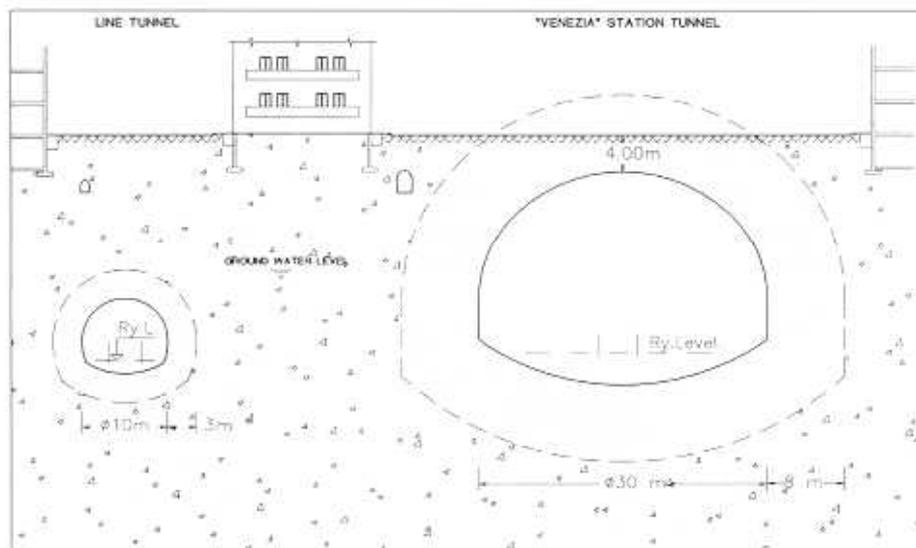


Figure 2: Station Venezia: Le recouvrement de la station n'était pas suffisant pour creuser le tunnel de station par le système traditionnel (basé sur la consolidation d'une adéquate épaisseur de terrain au contour)

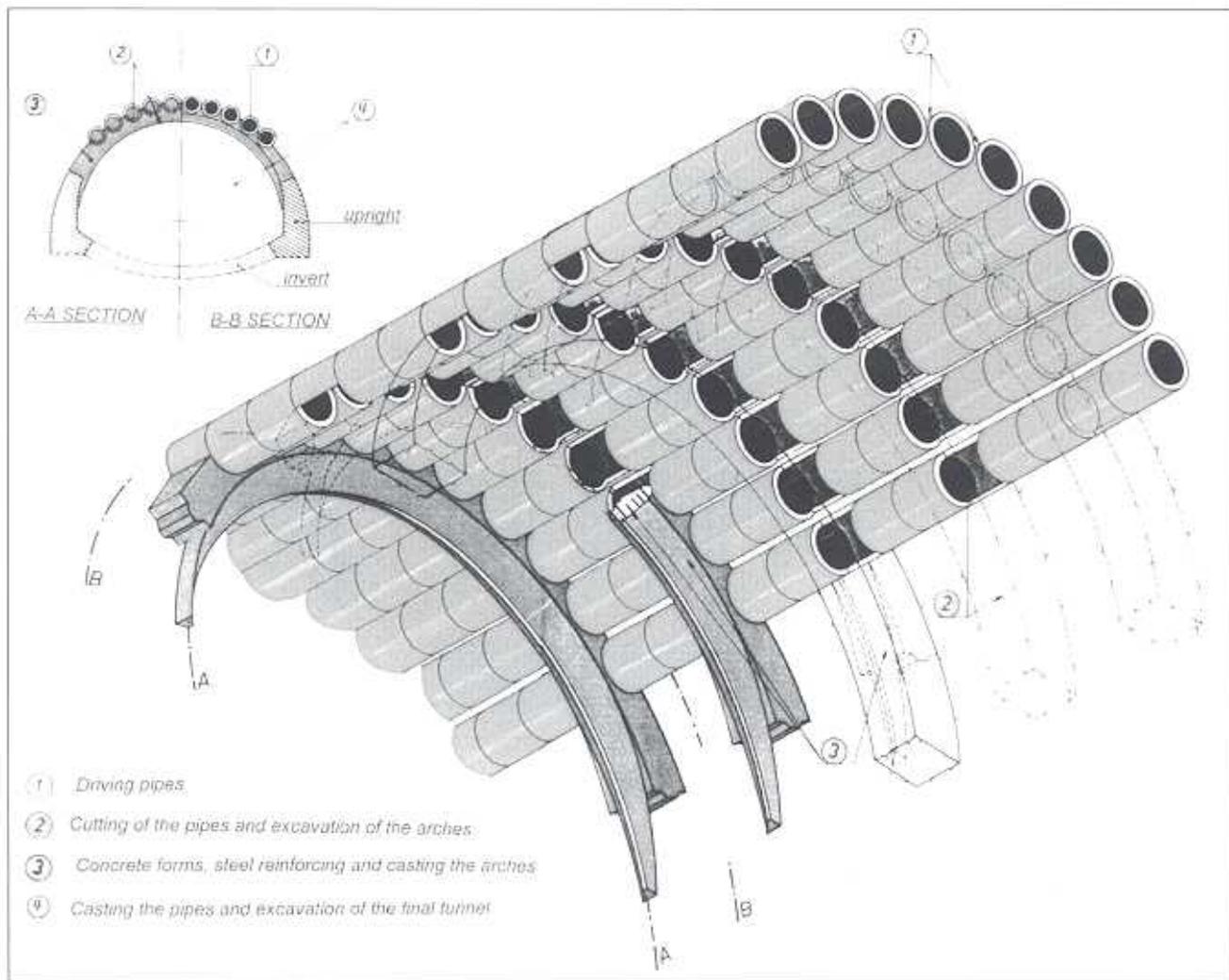


Figure 3: Structure de l'arc cellulaire

La caractéristique qui rend cette technique plus avantageuse par rapport aux techniques 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 n'est effectuée que 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.

Pour obtenir ce résultat, la méthode prévoit de réaliser la structure entière à «arc cellulaire» en 5 phases principales (figure 4):

1. Excavation à mi-section des tunnels de piédroit et achèvement de la consolidation sur le contour du tunnel final
2. Achèvement de l'excavation des tunnels de piédroit et coulée, à l'intérieur, des piédroits du tunnel de station alors que dans un chantier supérieur, complètement indépendant, s'effectue l'en-

foncement – depuis une chambre de poussée (méthode du pousse-tube) au niveau du profil de la calotte du futur tunnel de station – d'une série de tubes en béton armé côte à côte (microtunnels)

3. Excavation, à travers les microtunnels, des tunnels transversaux qui seront utilisés en tant que coffrages (dont les parois sont constituées du terrain même) pour la coulée des arcs de liaison en béton armé; à ce stade s'effectuent la pose de l'armature et la coulée des arcs
4. Coulée des microtunnels longitudinaux de calotte et excavation du terrain à l'intérieur de la section du tunnel de station sous la protection de l'«arc cellulaire» déjà pratiquement actif
5. Coulée par échantillons du radier.

2.2 La réalisation de l'arc cellulaire pour la station Venezia

Sur le plan opérationnel, les tunnels de piédroit, de 60 m² de section (largeur 7,6 mètres, hauteur 11,0

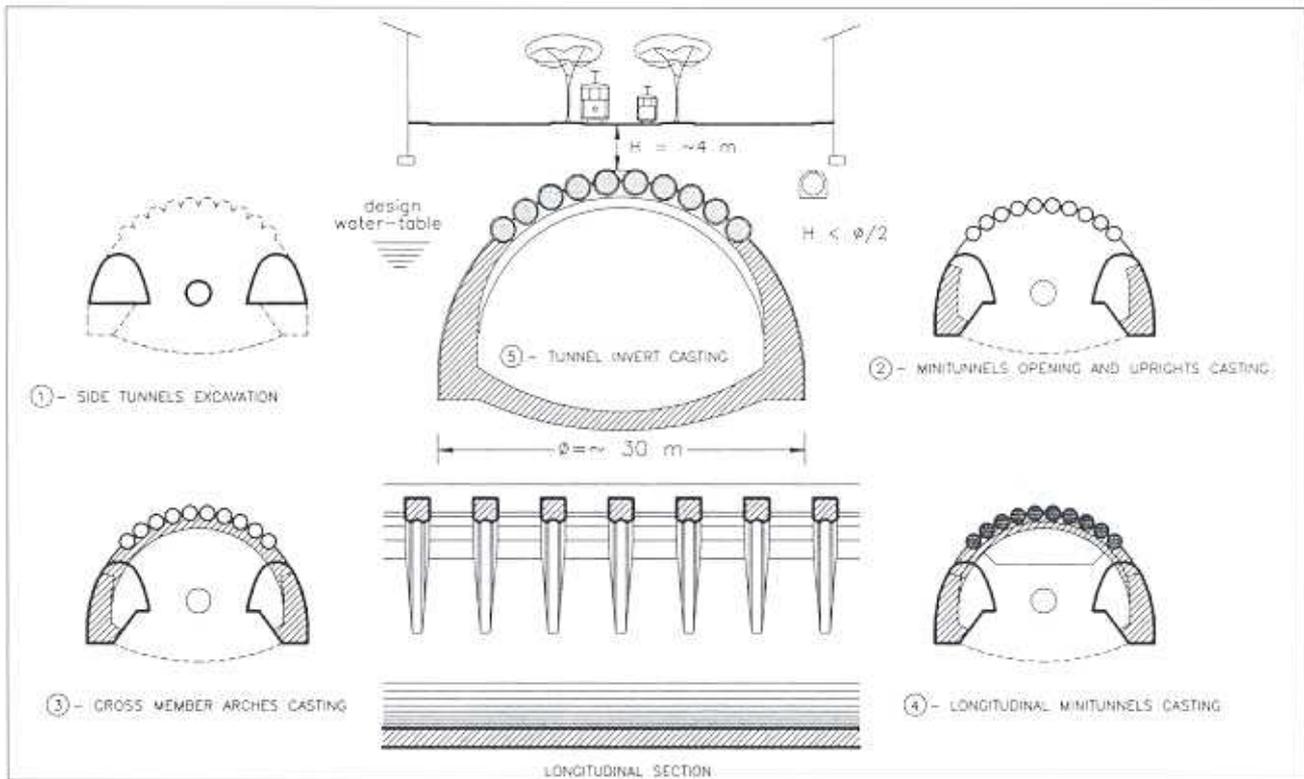


Figure 4: Phases de construction de l'arc cellulaire

mètres] et d'une longueur égale à celle du futur tunnel de station, ont été effectués en deux phases:

1. excavation de 40 m² jusqu'à la hauteur de la nappe
2. exécution – du niveau de la première phase – d'injections de consolidation dans la nappe sous les futurs piédroits et le radier, puis, abaissement de l'excavation jusqu'au niveau de l'imposte de la base du piédroit.

Leur revêtement a consisté à mettre en place des cintres métalliques, un réseau soudé à l'électricité et du spritz-béton.

Une fois leur construction achevée, il a été procédé à la coulée, à leur intérieur, des piédroits du futur tunnel de station. Calculant également le temps passé pour les opérations d'excavation, la production moyenne a été de deux mètres linéaires environ par

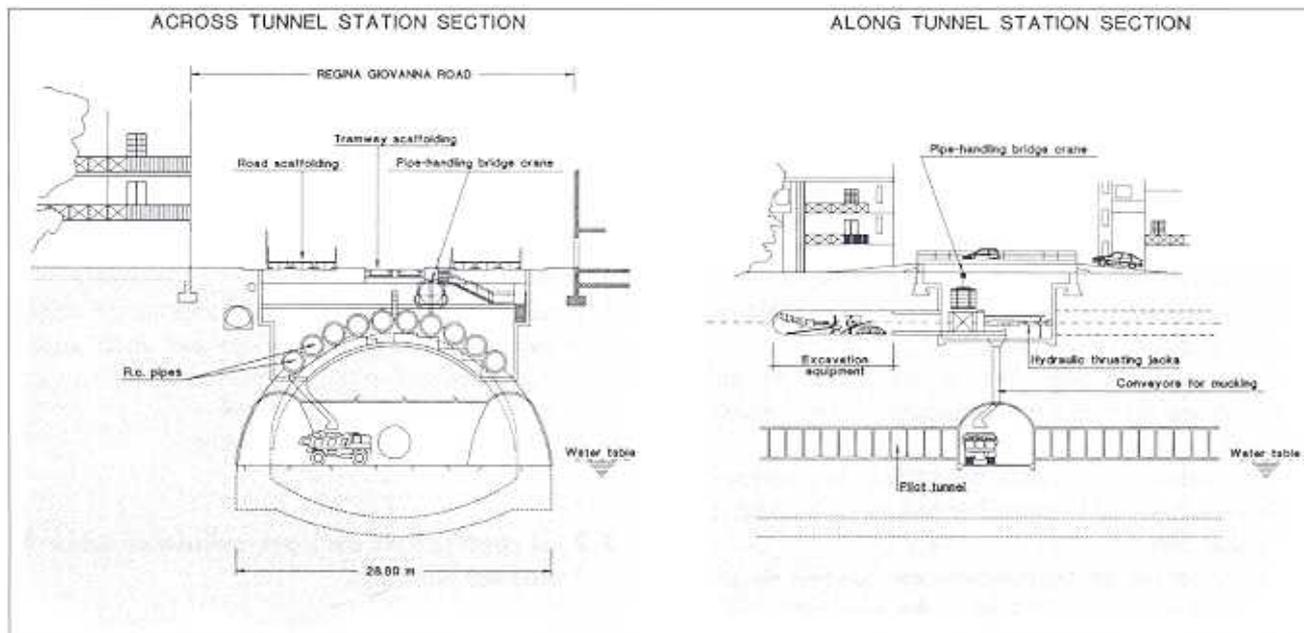


Figure 5: Réalisation de la station Venezia par arc cellulaire: sections en correspondance de la chambre de poussée

jour de piédroit fini de sorte que les 430 mètres de piédroit (215 de chaque côté) ont été achevés en quelque 11 mois, plus ou moins le même temps qui a servi à l'enfoncement des tubes qui se faisait en parallèle dans un chantier complètement indépendant. À cet égard, le projet de la station Venezia prévoyait la réalisation de 10 microtunnels, le long du profil de la calotte. Cela a signifié l'enfoncement de quelque 1080 tubes, sur une longueur totale de l'ordre de 2160 m. Ces tubes, préfabriqués selon le système de la compression radiale, utilisent un conglomérat de ciment à haute résistance. Ils présentent 2100 mm de diamètre extérieur, 1800 mm de diamètre interne et 2 m de long.

Leur enfoncement a été effectué en opérant de l'intérieur d'une chambre de poussée (figure 5) selon la technique du pousse-tube. L'équipement comprenait un bouclier métallique cylindrique de 2100 mm de diamètre et de 7,7 mètres de long, divisé en deux parties. La première partie, dotée d'un tranchant et articulée pour permettre à l'opérateur de guider les mouvements plano-altimétriques contient un tunnelier hydraulique ponctuel à mouvements informatisés et des bandes transporteuses pour l'évacuation des déblais. La partie arrière de 3,50 mètres de longueur, contient les moteurs, les pompes et les réservoirs pour l'huile hydraulique. L'équipement de poussée comprend deux vérins hydrauliques à course longue, les structures de répartition indispensables et une pompe hydraulique de 600 bar.

Le travail avec un équipement double nous a permis d'obtenir des productions journalières d'enfoncement de 8 à 9 mètres/jour.

Des contrôles topographiques effectués au cours de l'enfoncement et une fois l'enfoncement terminé nous ont assuré de la bonne qualité de l'exécution. Les relevés des déviations de la direction et de la hauteur ont donné des résultats absolument insignifiants.

Une fois les piédroits coulés et une fois l'enfoncement des

tubes achevé, nous avons procédé à la construction de la structure transversale de soutien de la calotte du futur tunnel de station dont la construction constitue incontestablement la partie qui caractérise le mieux la technique de l'«arc cellulaire».

La structure est constituée de 35 arcs intermédiaires placés à un interaxe de 6.00 m plus deux arcs d'extrémité. Pour son exécution nous avons procédé comme suit (figure 6):

1. Découpage et élimination des parties des tubes correspondant à la section des arcs, excavation de ces derniers, en général manuellement, jusqu'à atteindre les tunnels latéraux de piédroit
2. Assemblage – à l'intérieur des excavations – des coffrages préfabriqués en acier, pose de l'armature des arcs et des tubes, enfin coulée de ces derniers appuyés sur les piédroits déjà construits
3. Coulée des tubes.

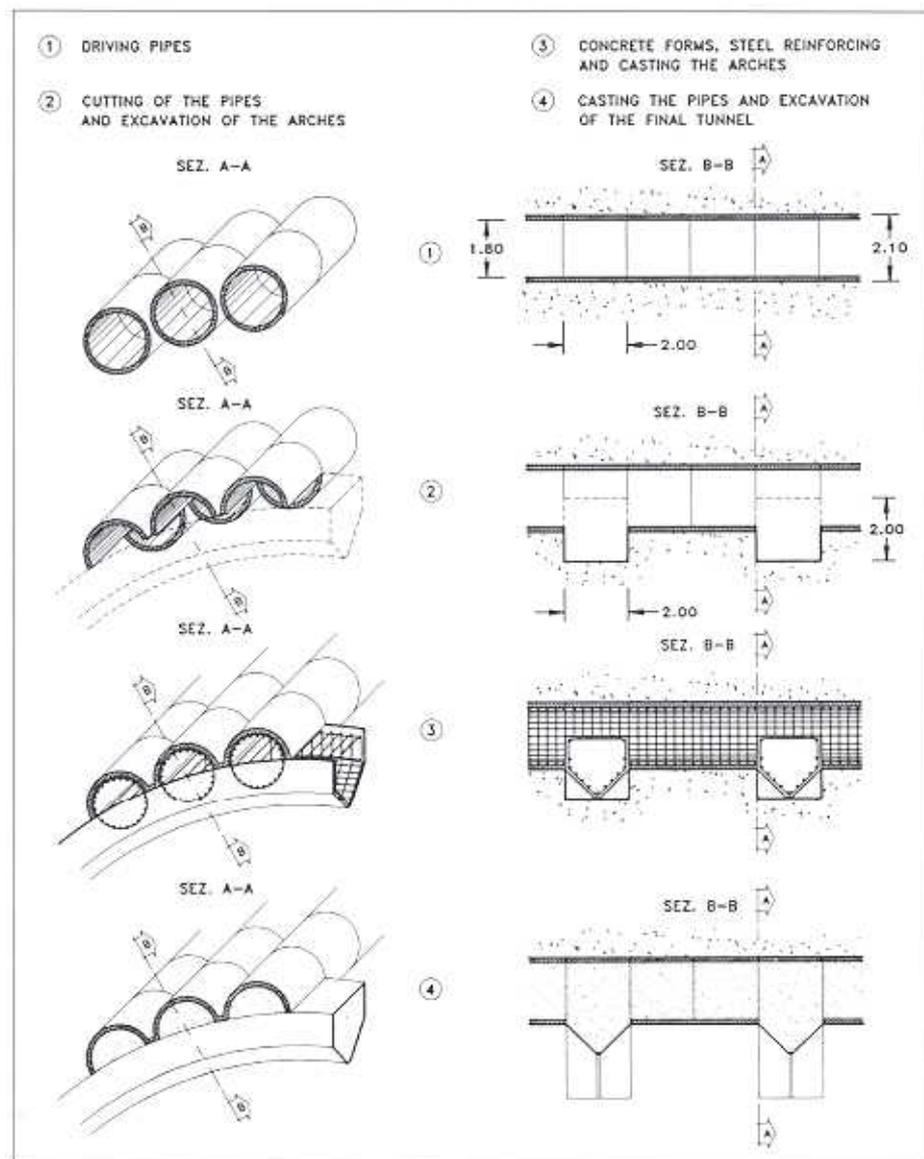


Figure 6: Phases de construction de la structure de l'arc cellulaire

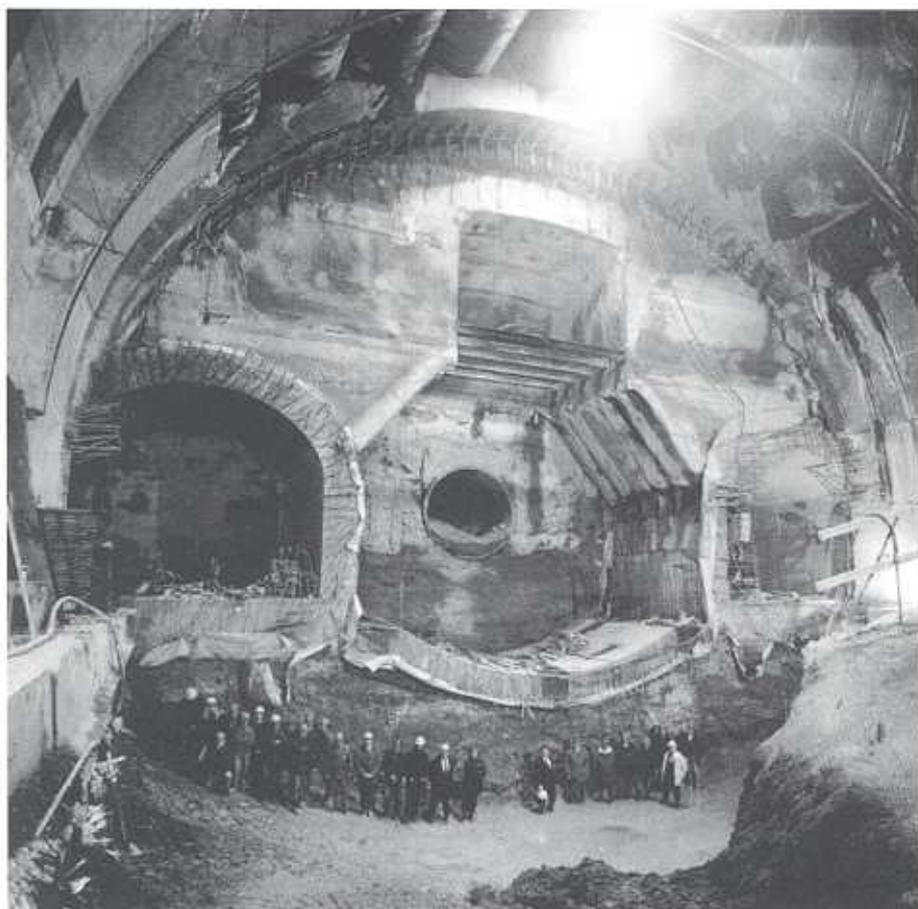


Figure 7: Vue de la station Venezia pendant la construction

Sous la structure portante à arc cellulaire déjà opérationnelle, il a été possible d'entamer, en toute sécurité les opérations d'excavation par échantillons de la calotte et de l'étranglement du tunnel de station (figure 7), dont la structure de revêtement a été enfin complétée par l'exécution du radier dont

l'épaisseur varie entre 1,5 à 2 mètres.

La coulée – sur un développement de 92 mètres et une section totale de coulée de $38 \text{ m}^3/\text{m}$ – s'est faite par échantillons 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 l'ouverture de l'excavation à trois jours seulement.

Il est enfin intéressant de constater que la production moyenne globale pour la réalisation des ouvrages civils de la station Venezia a été, grâce à la technique de l'arc cellulaire, de $57 \text{ m}^3/\text{jour}$.

2.3 Système de monitoring

Les dimensions considérables de la cavité, l'originalité du système de construction, la présence de contraintes délicates de surface nous ont obligé à réaliser un vaste programme de monitoring ciblé permettant de tenir sous contrôle:

- les tassements superficiels, tout particulièrement au niveau de la fondation des édifices existants, au cours de toutes les phases du travail
- les déformations du terrain sur le contour des tunnels
- les contraintes et les déformations dans les structures de revêtement définitives. Le programme comprenait (figure 8):
- des contrôles topographiques
- des mesures de niveau, de déviation et d'inclinaison afin de tenir sous contrôle l'évolution des déformations des constructions existantes
- des mesures de convergence des excavations
- des mesures de pression et de déformation sur les structures de revêtement.

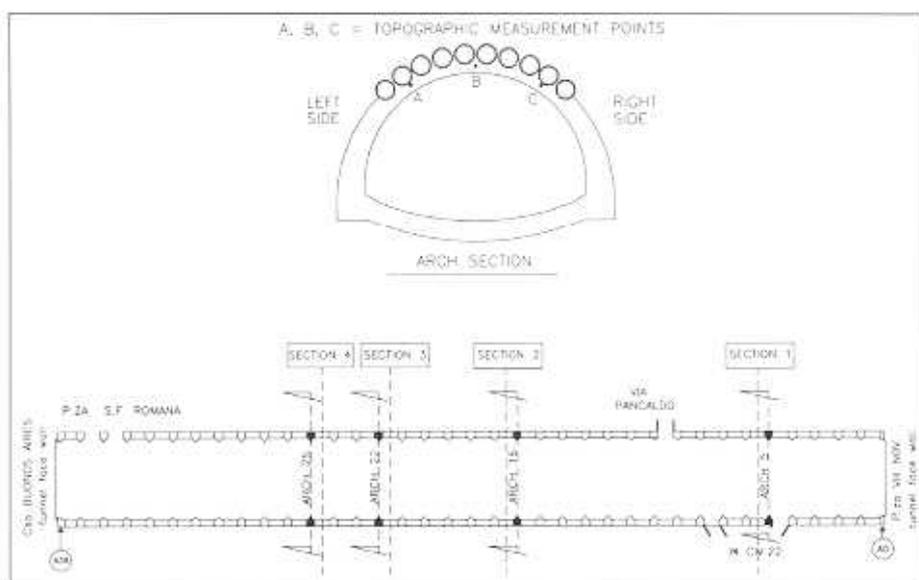


Figure 8: Station Venezia; position des stations topographiques de contrôle

L'enregistrement et l'élaboration en continu des différentes mesures nous ont fourni le tableau de l'évolution de la situation de tension et déformation du terrain ainsi que des structures de revêtement dans les différentes phases de construction tout en permettant une comparaison utile et constante tant avec les prévisions du projet qu'avec les limites imposées pour le maintien de l'efficacité fonctionnelle des structures pré-existantes.

La figure 9 le montre bien, les tassements superficiels se sont toujours maintenus inférieurs aux valeurs prévues par le calcul. Naturellement, les tassements les plus marqués ont été observés lors de la phase relative à l'excavation de la calotte. 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 bornes signales dans l'axe de la rue (figure 10) est confirmé bien que dans une mesure moindre par ceux

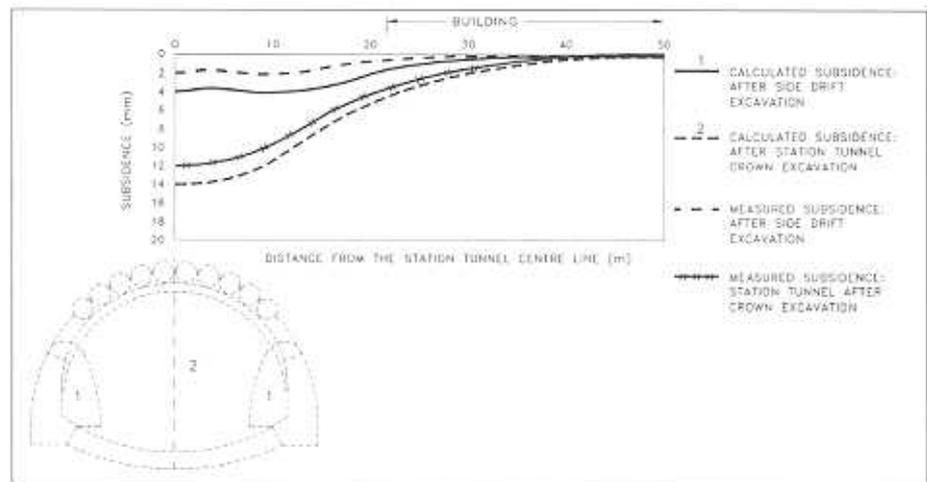


Figure 9: Station Venezia: tassements en surface mesurés et calculés

situés au niveau des édifices. C'est là qu'ont été constatés les tassements les plus importants au cours du passage du front de taille mais ils n'ont toutefois jamais dépassé 1-2 mm.

Ce système de surveillance a assuré le maintien constant du contrôle sur les conditions réelles prouvant de la sorte la compatibilité entre l'efficacité du système de construction et l'environnement urbain, non sans fournir un tableau d'ensemble rassurant.

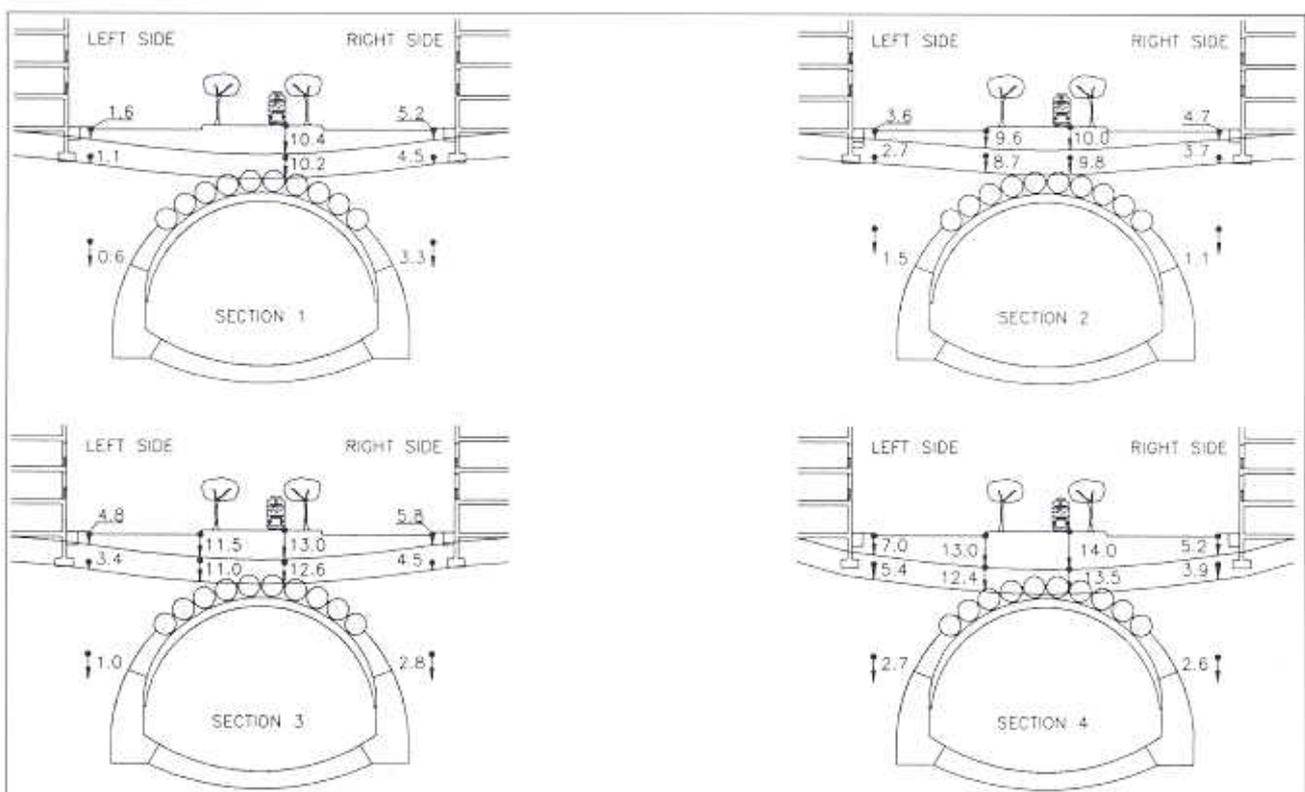


Figure 10: Station Venezia: tassements en surface [mm] aux différents niveaux (rapportés à la phase de consolidation du terrain par injections) mesurés à la fin de la construction

2.4 Développements possibles du système

Des études ont été faites pour définir les limites d'application de la méthode de l'arc cellulaire pour la construction de tunnels à grande portée dans des terrains incohérents à basse couverture et en présence d'une nappe.

Après avoir schématisé le problème et déterminé les paramètres variables, nous avons procédé au avant-dimensionnement des principaux éléments de construction. Nous avons adopté un modèle d'éléments finis monodimensionnels capables de simuler le comportement de la structure et l'interaction entre celle-ci et le terrain. Nous avons tout particulièrement pris en considération trois différentes géométries caractérisées par un rapport L/H égal à 2,09, 1,73 et 1,5 avec une portée L variable jusqu'à 60 m.

Les résultats du calcul ont débouché sur la rédaction d'abaques et de tableaux capables de fournir les épaisseurs minimum des éléments structurels et les tassements superficiels avec les variations de la géométrie, en fonction du diamètre extérieur, du niveau de la nappe et de la couverture (voir l'exemple sur la figure 11). Conformément à ces résultats, la méthode de l'arc cellulaire semble pouvoir être appliquée avec succès pour la réalisation en trou borgne de cavités

corticales de grande portée, pouvant même dépasser 60 m, dans des terrains incohérents et sous nappe, sans tassements superficiels significatifs.

3. Station 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 du métro de Rome qui a complété la liaison entre les quartiers de la banlieue de la zone ouest et le centre historique ainsi que la Cité du Vatican.

La station – 22 mètres de portée – est située en plein centre ville, dans un sous-sol fondamentalement argileux. Les nombreuses investigations géologiques et géotechniques effectuées entre 1987 et 1994 ont révélé la présence de deux formations de terrain (figure 12):

- une formation de base constituée d'argiles bleues pliocéniques avec des niveaux sablonneux d'une épaisseur allant du centimètre au décimètre
- une formation plus superficielle constituée de terrains sableux-limoneux qui ont, localement, des valeurs de consistance extrêmement basses.

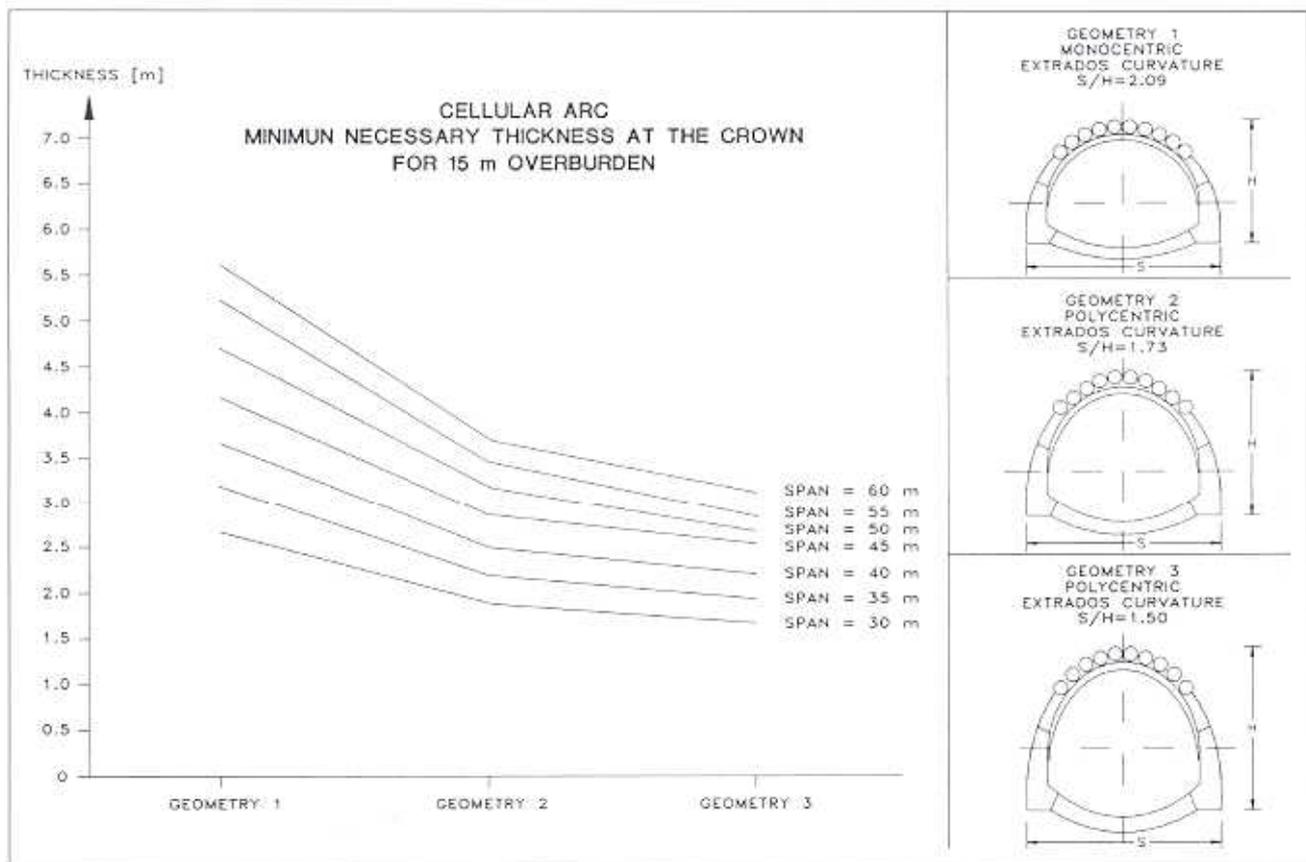


Figure 11: Exemple des études faites sur la potentialité du système par arc cellulaire

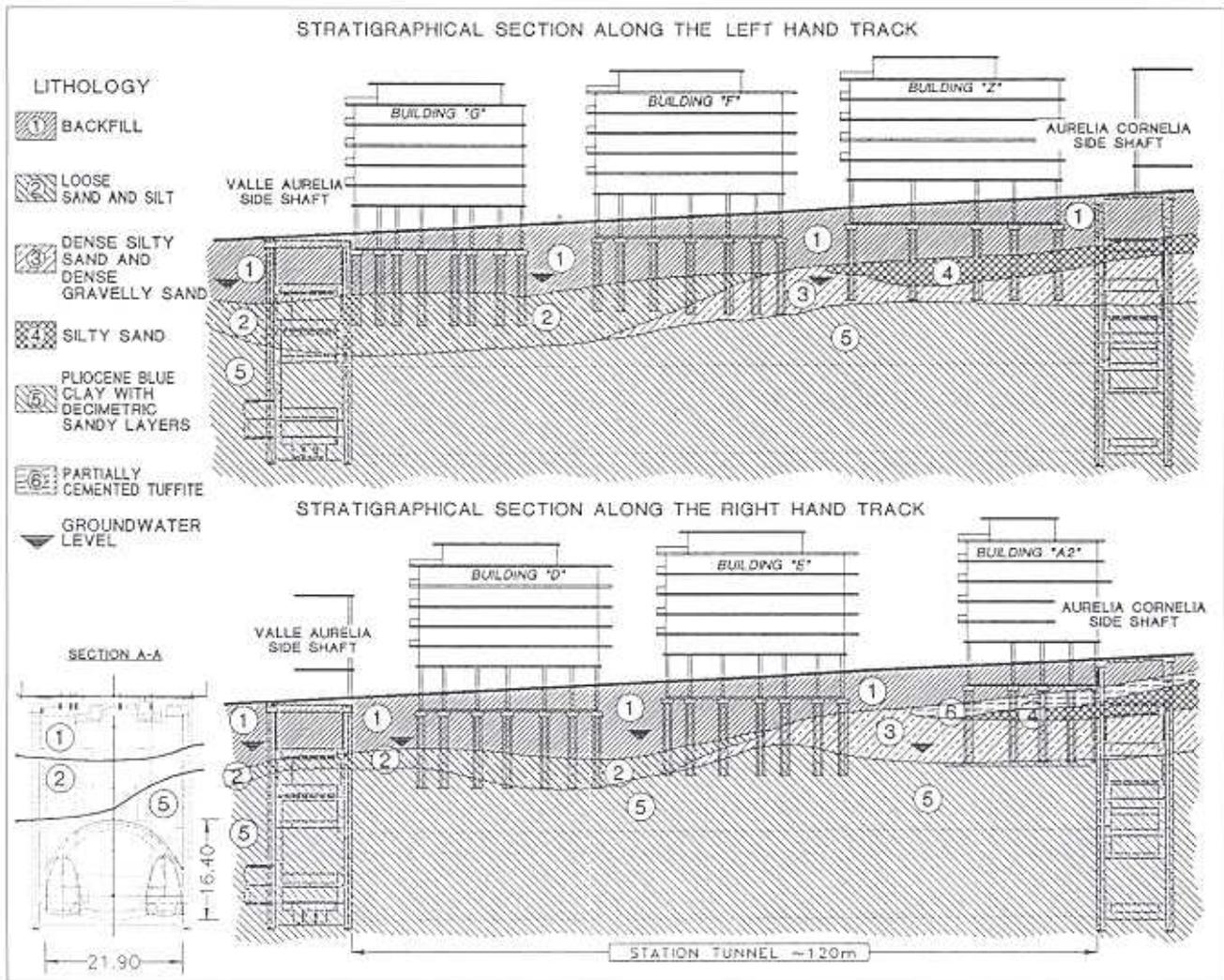


Figure 12: Station Baldo degli Ubaldi: situation géologique-géotechnique

Le tunnel de la station est plongé dans l'argile pliocénique, formée de limons argileux surconsolidés, au-dessous de la nappe. Ses dimensions, le contexte – une grande densité urbaine et une forte présence de fondations d'édifices à peu de mètres seulement de l'extrados du tunnel – et la nature complexe des terrains à excaver rendaient sa réalisation particulièrement délicate.

3.1 Choix de la méthode de construction

Dans ce cas tout comme dans le précédent, la proximité de nombreux édifices résidentiels a exigé impérativement de contenir les phénomènes de déformation bien en dessous de l'ordre de grandeur qui caractérise généralement les tunnels creusés dans des terrains cohérents. En l'absence de mesures appropriées, l'état de contrainte provoqué par les opérations d'excavation aurait donné lieu, sur le front de taille, à des phénomènes d'extrusion significatifs et par voie de conséquence à des tassements superficiels importants fort dangereux pour les édifices se trouvant au-dessus.

ficiels importants fort dangereux pour les édifices se trouvant au-dessus.

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 spritz-béton n'aurait pas permis de faire face à cette situation pas même en «partialisant» les excavations entre tunnels de piédroit, calotte, étranglement et radier. Il a donc fallu étudier des interventions de préconfinement de la cavité qui puissent agir en amont du front de taille, qui puissent maintenir le noyau d'avancement élastique et, par voie de conséquence, qui puissent assurer un contrôle adéquat des phénomènes de déformation de la cavité au cours des différentes phases de construction du tunnel de la station.

Pour la réalisation des tunnels de piédroit, nous avons opté pour un système d'avancement consistant à consolider le noyau à l'aide d'éléments structurels en fibre de verre (afin de limiter les mouvements extrusifs qui se seraient traduits immédiatement par des tassements superficiels), opération suivie par l'excavation

à pleine section et son revêtement avec du béton projeté renforcé de fibres, avec des cintres à madrier pour le radier et des avant-piedroits en béton armé. Pour réaliser l'excavation de la calotte du tunnel, nous avons donc projeté un nouveau système de construction conjuguant le prérenforcement du noyau d'avancement avec des éléments structuraux en fibre de verre ainsi que la technologie du prédecoupage mécanique appliquée pour la première fois au monde sur une lumière de 21,5 m, au principe de la «voûte active». De cette façon, il a été possible de contrôler le plus complètement possible les phénomènes de déformation du tunnel, condition indispensable pour pouvoir respecter les contraintes sur les subsidences superficielles dues à la présence d'édifices habités.

De fait:

- le prérenforcement du noyau d'avancement par des éléments structuraux en fibre de verre réduit les phénomènes d'extrusion au front de taille et par voie de conséquence entrave l'amorce de phénomènes de préconvergence et de convergence de la cavité qui sont la cause première des tassements de surface
- le prédecoupage mécanique réalise l'effet de préconfinement de la cavité indispensable pour annuler, à court terme, les phénomènes de déformation

qui se produisent normalement en amont du front de taille et qui peuvent rendre précaire la sécurité du chantier au niveau du tunnel et en surface

- la «voûte active» constituée par une coque de revêtement définitif de voussoirs préfabriqués mis en place à la distance maximum de 2,70 m du front de taille, rendus actifs en agissant sur des vérins introduits dans le voussoir de clef de voûte, produit l'action immédiate de confinement nécessaire à obtenir le contrôle des phénomènes de déformation, à long terme, dans le terrain au contour de la cavité.

La figure 13 résume les phases principales du développement de la construction du tunnel de station. Une fois effectuée l'excavation de deux puits d'accès (emplacement futur des locaux de service) de 200 m² de section à ses deux extrémités, pour construire le tunnel de station, il a été procédé comme suit:

- 1a) excavation de deux tunnels latéraux de 5 m de large sur 9 m de hauteur, futur emplacement des piédroits du tunnel de station, après renforcement du noyau à l'aide d'éléments structuraux en fibre de verre et un revêtement de la cavité avec du béton projeté renforcé de fibres, armé de cintres métalliques dotés de madrier
- 1b) coulée des piédroits en béton armé
- 2) excavation de la calotte du tunnel de station

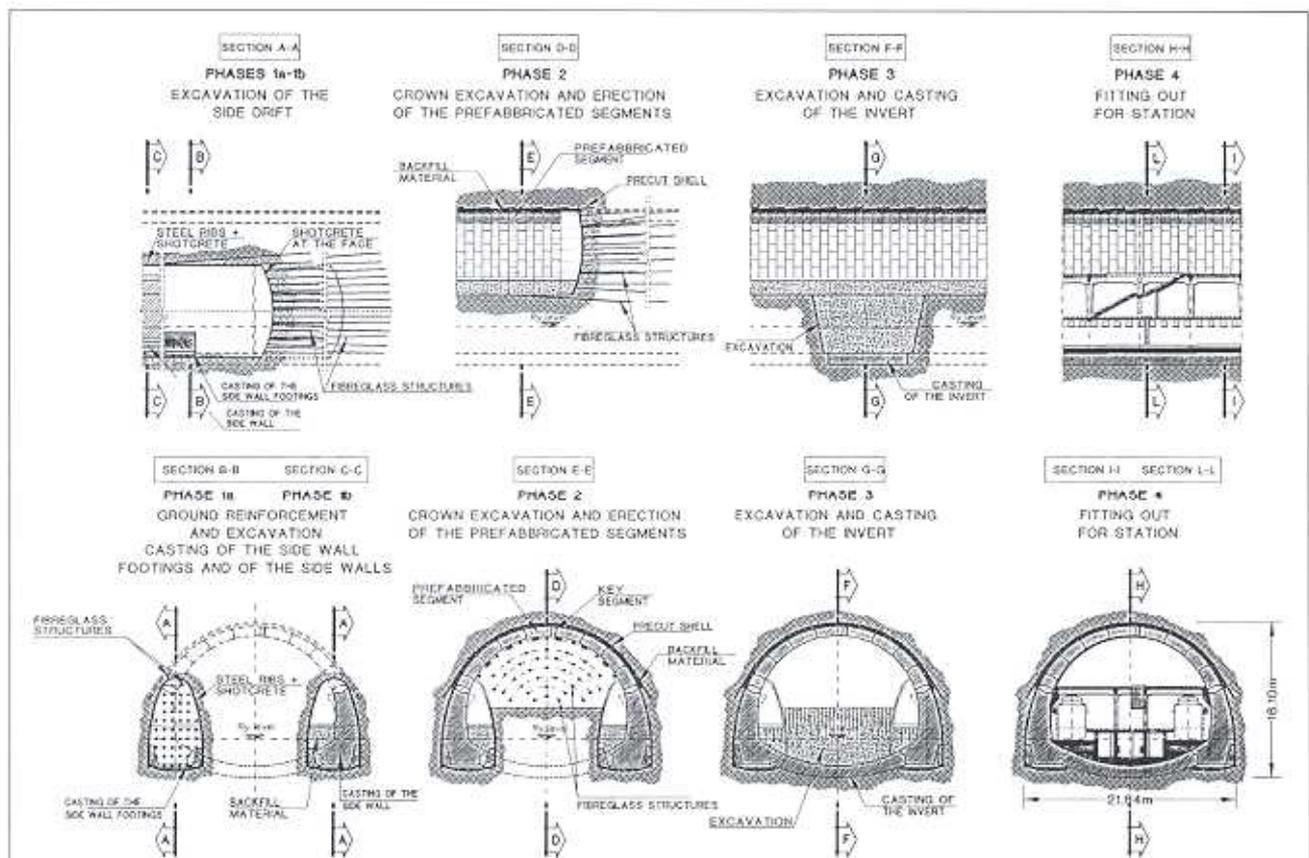


Figure 13: Station Baldo degli Ubaldi: phases de la construction du tunnel de station

(21,5 m de lumière, 8,5 m de hauteur, pour une section de 125 m²), après renforcement du noyau à l'aide d'éléments structuraux en fibre de verre et exécution de la coque de prédécoupage mécanique, puis, revêtement immédiat de la calotte avec la «voûte active» de voussoirs préfabriqués

- 3) excavation de rabaissement du tunnel de station (90 m² de section) et coulée immédiate du radier par échantillons (7 m maximum) après la réalisation de la calotte
- 4) conclusion des infrastructures de station et réalisation du niveau du quai, des mezzanines et des escaliers d'accès aux descentes.

Le système d'excavation et le dimensionnement des interventions de stabilisation ont été vérifiés – pour les différentes phases de travail – à travers de très nombreux calculs numériques faits par ordinateur sur des modèles aux éléments finis en champ non linéaire, même tridimensionnels. Ces calculs ont permis, entre autres choses, de vérifier la capacité du système à garantir la sécurité des édifices limitrophes à la surface du chantier.

3.2 La phase opérationnelle

Du point de vue opérationnel, après avoir achevé les tunnels latéraux et coulé les piédroits en béton armé du tunnel de station, pour la construction du grand

tunnel à voûte unique il a été procédé à deux étapes d'avancement: une excavation de calotte suivie d'une excavation de rabaissement avec une coulée du radier par échantillons.

En partant du puits Valle Aurelia et avançant vers le puits Aurelia Cornelia, nous avons procédé avant tout (figure 14) à une intervention de durcissement du noyau de terrain au front de taille par introduction dans ce dernier de 47 éléments structuraux en fibre de verre de 25 m de long (superposition minimum entre les éléments: 6,10 m). Après cela, nous avons effectué, tous les 2,70 m, une coque de prédécoupage mécanique de 3,50 m de long et 20 cm d'épaisseur pour un développement de 28 m sur 21,5 environ de portée nette.

Pour obtenir une coque particulièrement homogène et résistante, la technique de prédécoupage a été modifiée de manière à pouvoir utiliser du béton pompé à la place du béton projeté. Pour éviter, au cours de la phase de remplissage, que le béton ne déborde hors du découpage, nous avons positionné le long de son bord, à l'arrière de la lame, des coffrages pneumatiques tubulaires spéciaux à diamètre compatible avec la hauteur du découpage à coffrer. L'exécution de chaque coque était suivie de l'excavation (pour une profondeur de 0,90 m) et de l'assemblage immédiat du revêtement définitif à une distance maximum de 2,70 m du front de taille.

Ceci a consisté à mettre en place 12 voussoirs pré-

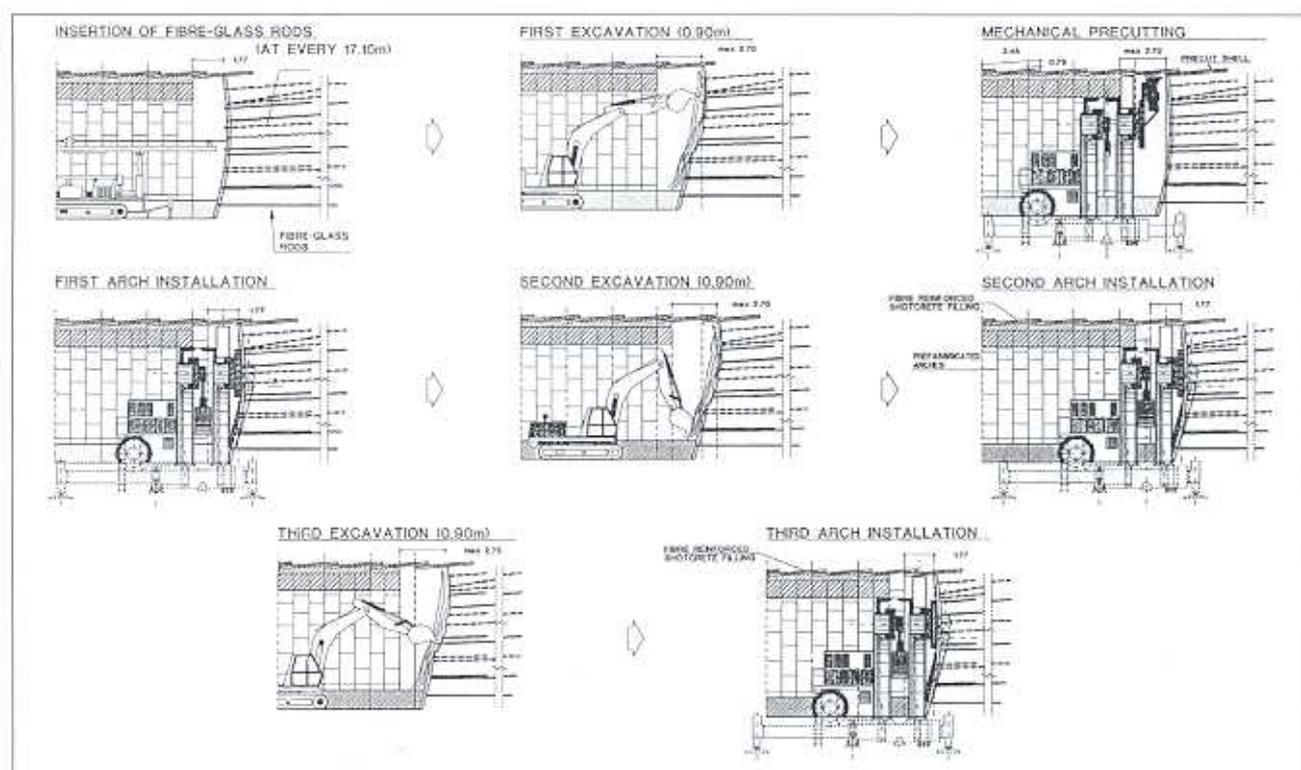


Figure 14: Station Baldo degli Ubaldi: phases de la construction du tunnel de calotte par prédécoupage mécanique et «Voûte Active»

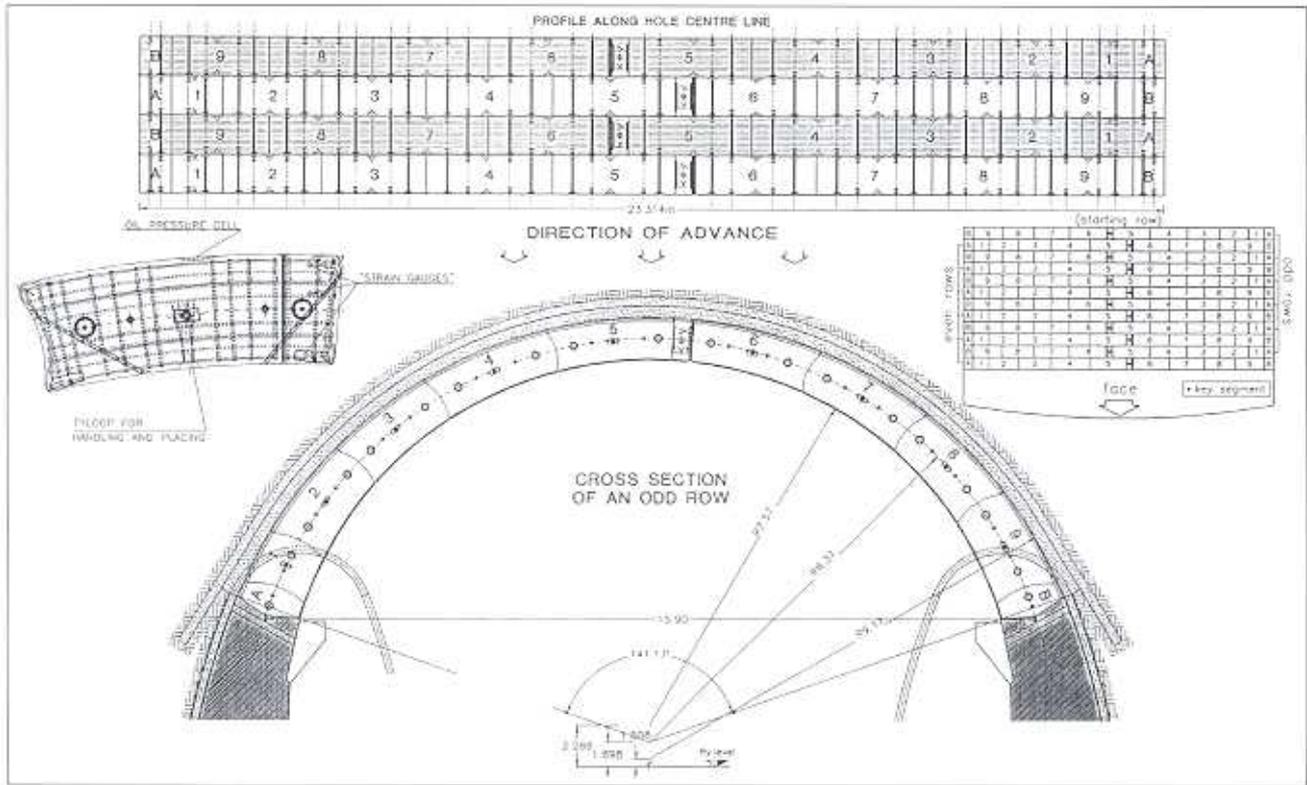


Figure 15: Station Baldo degli Ubaldi: schéma du revêtement de voussoirs préfabriqués à «Voûte Active».

fabriqués – poids moyen de 6,5 tonnes chacun: 2 voussoirs d'appui sur les piédroits, 9 voussoirs standard et un voussoir de clef de voûte (figure 15). Une fois l'arc de revêtement achevé, alors qu'il est encore appuyé à la machine, l'espace qui restait entre lui et la coque de prédécoupage était rempli de congl-

mérat de béton additivé et projeté. A ce stade, agissant sur deux vérins type Freyssinet de 360 t (course maximum de 3,5 cm) logés à l'intérieur de la coque de voûte, nous mettons une première fois en pré-compression (40 tonnes) l'arc tout entier de revêtement ce qui le rendait immédiatement actif et auto-

portant de manière à annuler toute apparition de phénomènes de déformation ou rattraper carrément les déformations élastiques déjà subies par la coque de prédécoupage.

Procédant de la sorte, nous avons réussi à assurer la réalisation et l'activation du revêtement définitif du tunnel à une très petite distance du front, à réduire considérablement le risque de tassements superficiels et à obtenir enfin une production moyenne de 0,7 – 0,9 m/jour de calotte finie.

Après avoir achevé la calotte du tunnel, nous sommes passés à l'exécution, par échantillons, de l'excavation de rabaissement et à la coulée du radier (figure 16). Enfin, nous avons achevé la



Figure 16: Vue de la station Baldo degli Ubaldi pendant la construction du radier

précompression des arcs de revêtement jusqu'à parvenir aux 360 tonnes nécessaires à obtenir le centrage définitif des contraintes qui s'y sont instaurées. L'imperméabilité de la voûte ainsi réalisée, qui reste face à vue, est assurée par des garnitures en néoprène de dimension appropriée tout autant que par des injections de mélanges imperméabilisants effectuées à travers des tubes placés à l'intérieur des voussoirs.

La réalisation des ouvrages civils de la station Baldo degli Ubaldi a exigé près de 1 an et demi pour une production moyenne globale de 59 m³/jour.

3.3 Système de monitoring

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 superficielle. Par voie de conséquence, nous avons soumis à un monitoring continu et attentif:

- les mouvements des édifices dans la zone concernée par les travaux
- les tassements du terrain de fondation des édifices
- la variation du niveau des nappes superficielles et profondes

- l'extrusion du noyau sur le front de taille et la convergence sur le contour des tunnels
- l'évolution des contraintes et des déformations à l'intérieur du revêtement des voussoirs préfabriqués.

3.3.1 Le monitoring durant l'excavation des puits d'accès et des tunnels de piedroit

Durant cette phase, le but principal du monitoring a été de contrôler l'ampleur et l'effet des phénomènes de subsidence du terrain sur les édifices.

Si nous faisons exclusion de l'effet local d'un phénomène accentué de consolidation des terrains limoneux-sablonneux du lit paléolithique, adjacent à l'édifice G, due aux variations d'équilibre hydrogéologique provoquées par les travaux d'excavation du puits, phénomène rapidement contenu grâce à une intervention de confinement du terrain de fondation concerné, les valeurs des tassements mesurés en surface au cours de la réalisation des deux tunnels de piedroit n'ont jamais dépassé 8 – 10 mm sur les deux tuyaux (figure 17). En ce qui concerne en revanche l'extrusion du front de taille, elle s'est révélée limitée dans les passages les plus délicats. En moyenne, elle n'a jamais dépassé 1 centimètre face aux 2 centimètres considérés admis-

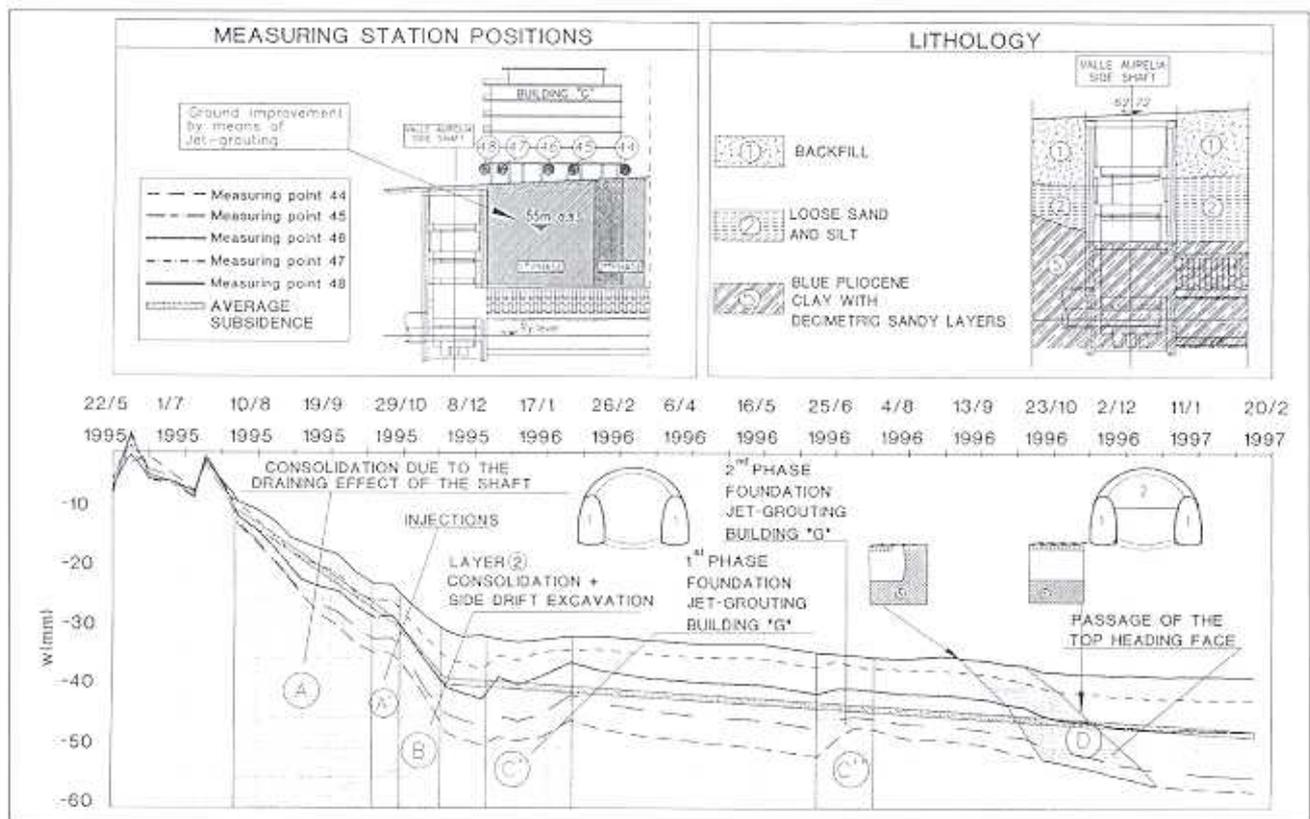


Figure 17: Station Baldo degli Ubaldi: monitoring des tassements en surface à côté du bâtiment «G»

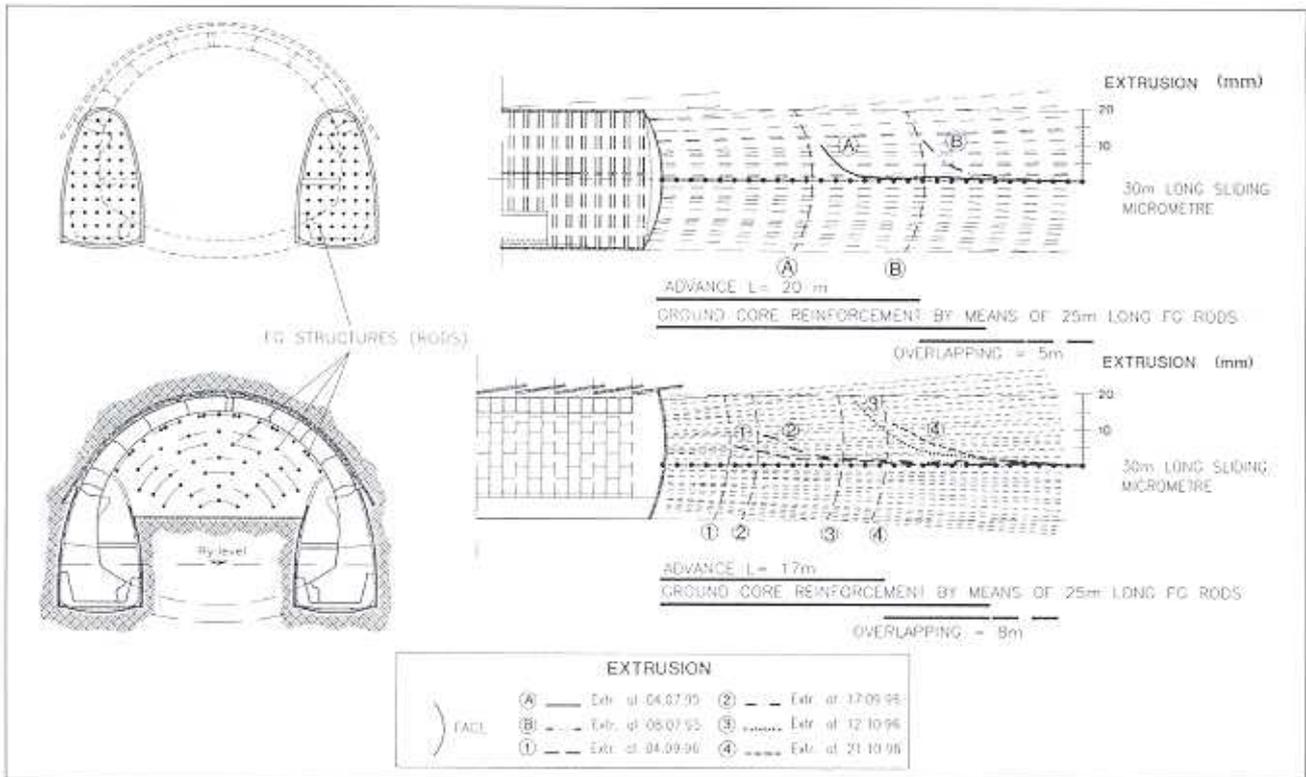


Figure 18: Station Baldo degli Ubaldi: monitoring of the extrusion phenomena during the excavation of tunnels.

sibles. A ces fins, l'effet de renforcement du noyau à l'aide d'éléments structuraux en fibre de verre a été fondamental. Ce qui nous est bien démontré par le fait que l'extrusion mesurée augmentait proportionnellement à la diminution – au fur et à mesure de l'avancement – de la longueur résiduelle des éléments en fibre de verre inclus dans le noyau (figure 18).

3.3.2 Le monitoring durant l'excavation de la calotte et du radier du tunnel de station

Le projet de monitoring du tunnel de station prévoyait l'exécution de:

- mesures d'extrusion topographiques (front arrêté) et à l'aide d'extrusomètres de 30 m de long installés sur le front de taille
- mesures de tassement incrémentielles et mesures d'inclinomètre pour évaluer les déplacements du terrain en profondeur
- mesures piézométriques pour contrôler les variations de niveau des nappes.

Nous avons procédé, parallèlement, au contrôle des subsidences et de l'intégrité des édifices se trouvant au-dessous.

Les résultats des mesures montrent que (figures 17, 18 et 19):

- les extrusions cumulatives se sont maintenues en moyenne sur des valeurs de 10 – 15 mm, en fonction de la longueur résiduelle du renforcement du noyau de terrain au front de taille, de la situation de la stratigraphie du terrain au-dessus et des caractéristiques géotechniques locales du matériel excavé

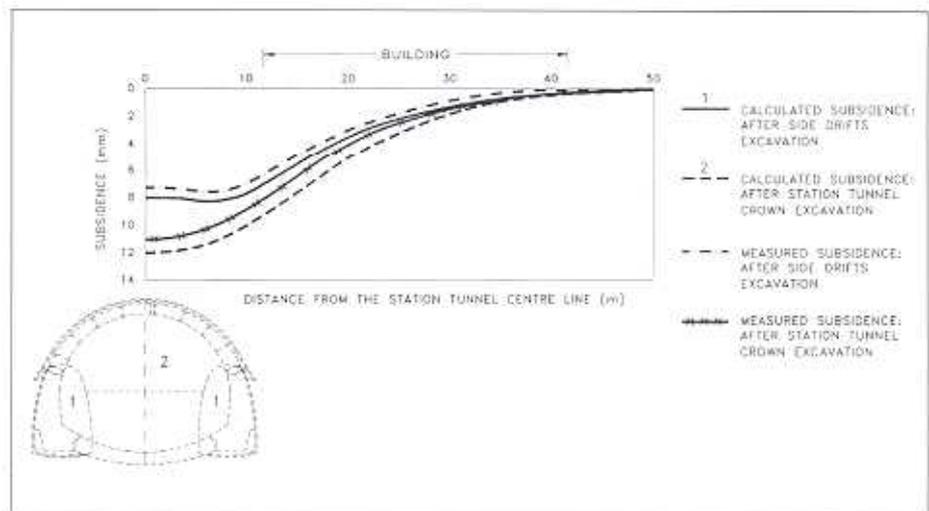


Figure 19: Station Baldo degli Ubaldi: surface settlements measured and calculated.

- la surface de terrain concernée par des mouvements s'est étendue verticalement sur près de 3 – 4 m au-dessus de la calotte du tunnel de station, avec des mouvements maximum de 15 – 20 mm durant le passage du front de taille
- le bassin des tassements en surface est assez limité. Ceux-ci commencent à se produire environ 10 m avant l'arrivée du front de taille. Les mouvements au niveau des édifices se sont révélés uniformes et conformes aux prévisions, de l'ordre de 6 – 7 mm. Les valeurs supérieures à la moyenne, observées à les points métriques 25 – 40 m, sont à attribuer aux résidus du phénomène de consolidation des niveaux des récentes inondations. Il résulte de l'analyse des déformations mesurées dans le tunnel, que les tassements superficiels semblent liés aux extrusions. Effectivement, toutes les fois que celles-ci ont été plus importantes, les tassements l'ont été aussi
- les tassements mesurés ont correspondu de manière satisfaisante à ceux prévus par les calculs quand ils ne se sont pas maintenus carrément inférieurs

Parmi les buts du monitoring, signalons également les «essais» du système de construction adopté qui est totalement nouveau et à l'avant-garde dans le domaine des ouvrages souterrains.

A ces fins, nous avons effectué des mesures de convergence de la coque de prédécoupage et des mesures de déformation et de contrainte de la voûte de voussoirs préfabriqués, à travers la mise en place de (figure 20):

- stations primaires (placées à 5, 10 et 15 mètres de distance du puits Valle Aurelia) comprenant chacune:
 - extensomètres à corde vibrante par voussoir, montés sur neuf voussoirs standard pour connaître l'état de contrainte dans la structure et les modalités de transmission de la contrainte de compression
 - 3 cellules de pression à huile montées sur les voussoirs 2, 5 et 8 à l'extrados de la voûte, pour mesurer les pressions transmises entre le terrain et la structure
- stations secondaires (placées à 36, 60 et 90 mètres de distance du puits Valle Aurelia, chacune constituée de:
 - 3 extensomètres à corde vibrante montés sur les voussoirs 2, 5 et 8 de la voûte active
 - 3 cellules de pression à huile montées sur les voussoirs 2, 5 et 8
- de mires optiques disposées sur les voussoirs pour évaluer les variations de leur position à travers des mesures laser.

Les résultats fournis par tous ces instruments ont souligné:

- des valeurs maximum d'abaissement de la coque de prédécoupage de l'ordre de 1 – 1,5 mm,
- des mouvements de la voûte, à la phase de la première compression, presque exclusivement horizontaux et variant entre un minimum de quelques millimètres et un maximum de 20 mm. Au fur et à mesure que le front s'éloigne, le revêtement présente des tassements inférieurs à 5 mm (verticale-

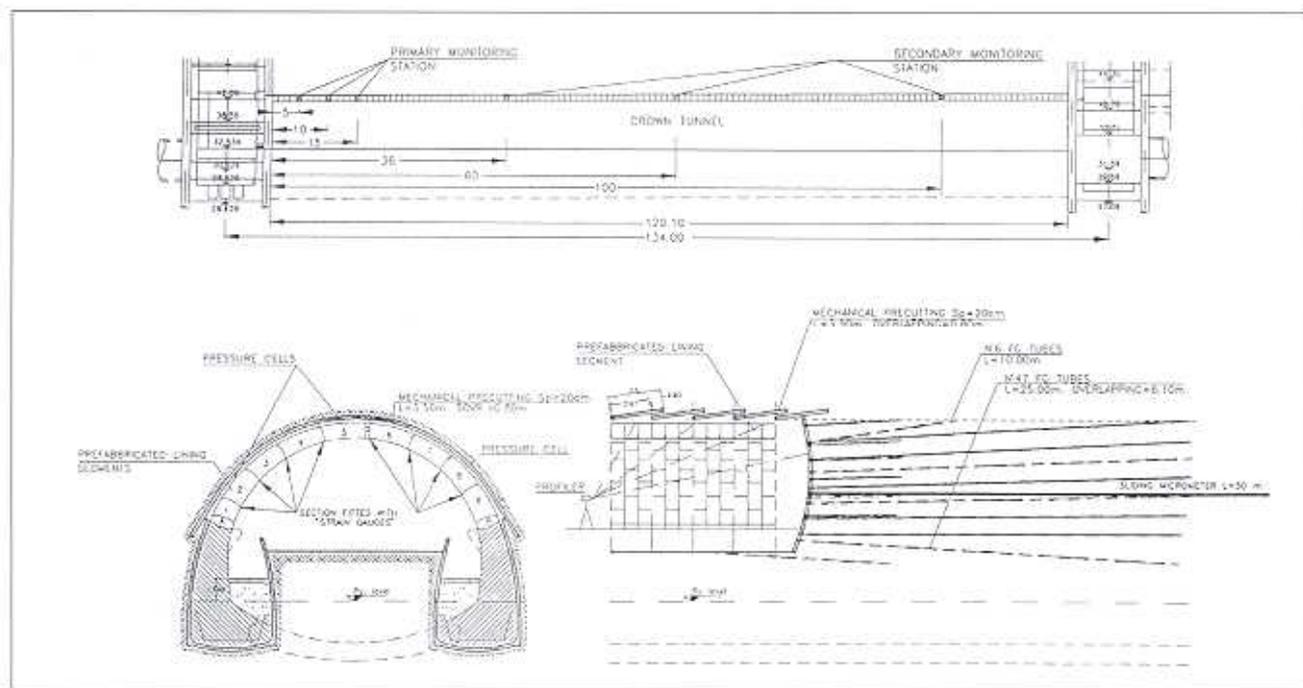


Figure 20: Station Baldo degli Ubaldi: position des stations de monitoring

ment et horizontalement vers le centre de la section d'excavation)

- des contraintes de traction à l'intérieur de la voûte de voussoirs préfabriqués nulles dès la première précompression et d'une valeur assez limitée, éventuellement au niveau du piédroit seulement.

En ce qui concerne la phase d'excavation du radier, nous avons mesuré les déplacements verticaux et horizontaux subis par les piédroits. Après l'excavation des premiers échantillons, de 7 et de 5 m de long respectivement, nous avons enregistré des valeurs de l'ordre de 1 millimètre, inférieures à celles prévues par le calcul.

Nous n'avons enregistré aucune variation significative dans les autres éléments monitorisés (tassements superficiels, niveau de la nappe, etc.).

4. Conclusions

Le présent mémoire décrit deux ouvrages souterrains importants qui ont en commun le contexte dans lequel ils ont été réalisés. Tous deux ont été construits en milieu urbain, en présence de situations géologico-géotechniques difficiles et dans des contraintes très limitatives.

Les principales caractéristiques communes sont notamment:

- le grand diamètre de la section d'excavation
- la présence du niveau de nappe au-dessus du plan d'excavation
- le besoin d'avoir des tassements superficiels réduits
- le besoin de conserver en exercice la viabilité.

Il nous semble par ailleurs 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 technologie d'exécution

«sur mesure» résolument innovante telle que l'«arc cellulaire», et une technologie déjà connue telle que le prédécoupage mécanique combiné à la «Voûte Active» mais pour une portée largement supérieure aux applications normales. Technologies qui nous ont incontestablement permis de résoudre avec succès les multiples problèmes que nous avons dû affronter.

Enfin, il est important de souligner que l'adoption de systèmes de construction innovants nous a permis – face aux difficultés liées au type de terrains et au contexte sur le contour – de réaliser les ouvrages dans des délais de temps satisfaisants, à un coût non supérieur à celui des systèmes plus traditionnels (figure 21): quelque 516 euro/m³ pour la station Venezia et 568 euro/m³ pour la station Baldo degli Ubaldi.

Bibliographie

- [1] Lunardi, P.: «L'emploi de microtunnels pour la réalisation d'ouvrage souterrains de grande portée: l'Arc Cellulaire», Congrès International sur «Les tunnels et l'eau» – Madrid, 12–15 juin 1988.
- [2] Colombo, A., Lunardi, P. et al.: «L'emploi de l'Arc Cellulaire dans la réalisation de la Station Venezia du Passante Ferroviario Metropolitano de Milan», Congrès International sur «Les tunnels et l'eau» – Madrid, 12–15 juin 1988.
- [3] Colombo, A., Lunardi, P., Luongo, E. et al.: «L'Arc Cellulaire pour la Station Venezia du Passante Ferroviario Metropolitano de Milan», Colloque International «Tunnels et micro-tunnels en terrain meuble» – Paris, 7–10 février 1989.
- [4] Lunardi, P.: «Un nouveau système constructif pour la réalisation de tunnel de grande portée

dans terrains non cohérents: l'Arc Cellulaire», UNESCO, Colloque International «Les fondations des grands ouvrages» – Paris, 27–29 mars 1990.

- [5] Lunardi, P. et al.: «Soft ground tunnelling in the Milan Metro and Milan Railway Link. Case histories», Institution of Civil Engineers – Soft Ground Tunnelling Course – London, 10–12 juillet 1990.
- [6] Lunardi, P.: «The Cellular Arch Method: technical solution for the

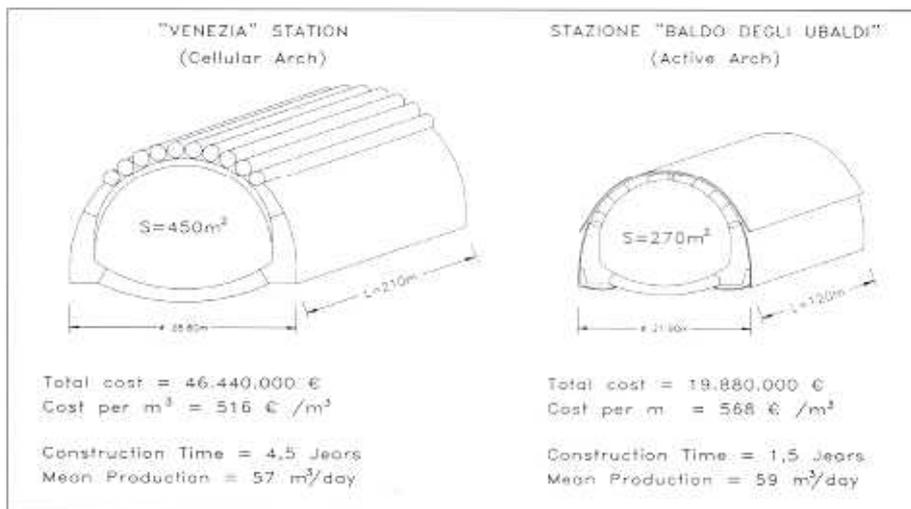


Figure 21: Stations Venezia et Baldo degli Ubaldi: coûts et temps de construction (structures intérieures et finitions exclues)

- construction of the Milan Railway's Venezia Station», *Tunnelling and Underground Space Technology* – septembre 1990.
- [7] Lunardi, P., Luongo, E., Micheluzzi, M. et al.: «Un metodo costruttivo conservativo e di pre-contenimento del cavo per grandi cavità in terreni difficili», *International Conference on «Soil and Rock Improvement in Underground Works»* – Milan, 18–20 mars 1991.
- [8] Lunardi, P.: «Cellular Arch technique for large span station cavern», *Tunnels & Tunnelling* – novembre 1991.
- [9] Lunardi, P., Focaracci, A.: «Tunnelling in soil: design, construction materials and monitoring», *Central Institute for Advanced Training of Construction Engineers (TSMIPKS) – Séminaire russe-italien* – Moscou, 11 mars 1993.
- [10] Lunardi, P., Colombo, A. et al.: «Performance observations during construction of the large span Milan metro (Venezia) station», *International Congress on «Option for tunnelling»* – Amsterdam, 19–22 avril 1993.
- [11] Lunardi, P.: «Evolution des technologies d'excavation en souterrain, dans des terrains meubles», *Colloque chez le «Comité Marocain des Grands Barrages»* – Rabat, 30 septembre 1993.
- [12] Colombo, A., Lunardi, P. et al.: «The Venezia Station of Milan Railway Link carried out by Cellular Arch Method: water proofing, fire proofing and safety, ventilation», *International Conference on «Underground openings for public use»* – Oslo, 14–17 juin 1994.
- [13] Lunardi, P.: «Construction technologies for wide span tunnels. A comparison of methods», *45th Geomechanics Colloquium. Salzburg*, 10–11 octobre 1996.
- [14] Lunardi, P., Focaracci, A., Merlo, S.: «Mechanical pre-cutting for the construction of the 21.5 m span arch of the Baldo degli Ubaldi Station», *Gallerie e grandi opere sotterranee*, no. 53, année 1997.
- [15] Lunardi, P.: «Design and construction of a station on the Rome metro», *Tunnels & Tunnelling International*, mars 1998.
- [16] Lunardi, P., Focaracci, A.: «Mechanical pre-cutting for the construction of the 21.5 m span arch of the Baldo degli Ubaldi Station on the Rome Underground», *International Congress on «Tunnels and Metropolises»* – São Paulo, 25–30 avril 1998.