

Une méthode de construction innovante pour élargir les tunnels routiers, autoroutiers et ferroviaires sans interrompre la circulation: son application au tunnel de Nazzano sur l'autoroute A1 Milan–Naples

Pietro Lunardi, Milan

1. Remarques préliminaires

Face aux exigences de circulation sans cesse accrues, le besoin se pose de plus en plus d'élargir les routes, les autoroutes et les voies de chemin de fer afin d'accroître leur capacité. Il est facile de répondre à ces besoins si les artères courent sur toute la longueur en surface mais les choses se compliquent considérablement lorsqu'elles traversent des tunnels; dans ce cas il est indispensable de recourir à des variantes onéreuses du tracé pour réaliser des nouveaux tubes à ajouter à celles déjà existantes.

Par ailleurs, élargir un tunnel en exploitation n'est possible que si l'on est en mesure de:

- garantir la sécurité nécessaire des usagers tout en limitant leur malaise au-dessous d'un seuil acceptable;
- résoudre les problèmes techniques et opérationnels liés à l'avancement de l'élargissement dans un terrain déjà troublé par une fouille précédente;
- réaliser une structure résistante au fur et à mesure que l'on démolit la précédente, affrontant avec attention toutes les situations de contrainte et de déformation – même imprévues – qui se présenteraient au cours de l'exécution des travaux de façon à garantir la sécurité de l'exploitation et de toutes les activités humaines qui se dérouleraient éventuellement en surface.

Nous venons tout récemment de proposer une méthodologie de construction qui sera, pour la première fois au monde, capable de répondre à toutes les exigences précitées et qui permettra donc d'élargir les tunnels routiers, autoroutiers et ferroviaires existants sans devoir interrompre la circulation au cours des travaux. Cette technologie sera expérimentée sous peu dans l'élargissement du tunnel «Nazzano» de l'autoroute A1 Milan–Naples, dont les deux voies de marche actuelle dans les deux directions devra être amenée à trois voies plus la voie de secours.

2. Caractéristiques indispensables afin qu'une technique pour élargir les tunnels routiers, autoroutiers et ferroviaires puisse être appliquée sans interrompre la circulation

Une technique pour élargir un tunnel en exploitation sans interrompre la circulation, doit, pour être réellement applicable résoudre d'une manière satisfaisante deux catégories de problèmes au moins:

- le problème de permettre le déroulement des travaux nécessaires à l'excavation, la réalisation du revêtement du tunnel élargi ainsi que la démolition du tunnel existant tout en assurant la sécurité nécessaire aux usagers dont les malaises seront le plus réduits possible;
- le problème de son adaptabilité à tout type de terrain et de situation de contrainte et de déformation qui se présenteraient, tout en minimisant les effets sur les préexistants au contour et en assurant une sécurité opérationnelle constante.

Il est bien évident que ces problèmes exigent, pour être résolus, la mise au point d'une approche de construction particulière qui permette de procéder, sans dangers pour la circulation, à l'exécution de tous les types de pré-consolidation du terrain qui s'avèreraient nécessaires sur le front de taille et sur le contour de l'excavation future ainsi qu'à la mise en œuvre et à l'activation du revêtement définitif, à courte distance du front d'élargissement du revêtement définitif.

Ce n'est qu'en opérant de cette manière qu'il est effectivement possible de:

- contrôler les effets de la présence probable, autour de la cavité existante, d'une bande de terrain qui a déjà subi des phénomènes de plastification et qui ne devra plus être perturbée;
- réaliser l'élargissement de la section transversale du tunnel sans provoquer l'amorce de phénomènes nuisibles de déformation dans le terrain qui se traduiraient par des poussées importantes sur le revête-

ment du tunnel final élargi et par des tassements différentiels en surface, dangereux pour les structures éventuellement existantes;

- assurer le respect des temps prévus par le projet indépendamment du type de terrain et de situation de contrainte et de déformation à affronter, non sans contenir et planifier avec certitude les coûts et les délais de réalisation afin de réduire le plus possible les déviations des voies de circulation et par voie de conséquence les inconvénients pour les utilisateurs.

3. Conception d'une technique pour élargir les tunnels routiers, autoroutiers et ferroviaires sans interrompre la circulation

La conviction qu'il fût possible de mettre au point une méthodologie de construction répondant à ce but, en d'autres termes capable de répondre aux exigences précitées, sans compromettre la circulation autoroutière normale, avait commencé à faire son petit bout de chemin dans notre esprit à l'époque des travaux de construction du tunnel de la station «Baldo degli Ubaldi» du métro de Rome dont la réalisation avait exigé – vu ses dimensions considérables (21,5 m de lumière et 16 m de hauteur), le type de terrain (argiles pliocéniques sous la nappe) et les contraintes importantes au niveau des tassements superficiels admis dans le contexte urbain – la mise au point d'une méthode de construction innovante. Grâce à l'adoption de cette méthode, le tunnel de la station se réalisait à travers quatre phases principales de construction (fig. 1):

- 1a Excavation, à partir de deux puits d'accès, des galeries latérales de 5 m de largeur sur 9 m de hauteur, emplacement futur des piédroits du tunnel de station, après renforcement du noyau par des éléments structurels en fibre de verre et revêtement de la cavité par du béton projeté renforcé de fibres et armé de cintres métalliques dotés de madrier.
- 1b Coulée des piédroits en béton armé.
- 2 Excavation de la calotte du tunnel de station (21,5 m de lumière, 8,5 m de hauteur, pour une section de 125 m²), après renforcement du noyau avec des éléments structurels en fibre de verre et une protection par une voûte résistante obtenue grâce à la méthode du prédécoupage mécanique, suivie d'un revêtement immédiat de la calotte par une «voûte active» de voussoirs préfabriqués.

- 3 Excavation de rabaissement du tunnel de station (90 m² de section) et coulée immédiate du radier par échantillons après la réalisation de la calotte.
- 4 Achèvement des infrastructures de la station.

Ce système tout récent de construction présente essentiellement deux nouveautés:

- d'une part, la pratique du prérenforcement du noyau d'avancement par des éléments structurels en fibre de verre et de la technologie du prédécoupage mécanique (appliquée pour la toute première fois au monde sur une lumière de 21,5 m) combinées au principe de la «voûte active»;
- de l'autre, l'industrialisation extrême des travaux obtenue à travers une mécanisation poussée.

Effectivement, pour fondre ces technologies, toutes plus ou moins récentes, en un système de construction unique, hautement performant, une machine spéciale a été mise au point et réalisée, en collaboration avec STAC S.p.A. de Mozzate (CO). Elle a consisté (fig. 2) en un grand portail métallique répondant géométriquement au profil de calotte du tunnel de station, appuyé, à l'intérieur des tunnels de piédroit, au moyen de stabilisateurs placés sur des longerons de manière à permettre la translation longitudinale. L'équipement nécessaire à l'exécution des coques de prédécoupage mécanique ainsi que celui qui servait au déplacement et au montage des coques préfabriquées du revêtement définitif étaient montés sur le portail.

Grâce à l'emploi de cette machine et des équipements accessoires, il nous a été possible de constater, au cours des opérations de construction de la voûte, que le volume constituant la partie centrale du futur tunnel de station, pour une section transversale comparable à celle d'un tunnel autoroutier ou ferroviaire normal, n'était absolument pas intéressé par les opérations de construction (fig. 3), qui auraient pu se dérouler d'une manière tout à fait analogue à l'extrados d'un tunnel déjà existant afin de l'élargir sans qu'il soit nécessaire d'interrompre la circulation à la condition bien entendu de prendre les mesures de sécurité appropriées pour la sauvegarde des usagers. Il s'agissait en définitive d'étendre à la pleine section le système utilisé sur une demi-section à Baldo degli Ubaldi.

C'est ainsi que naissait l'idée d'une technique qui à l'aide de machines et d'équipements s'inspirant de ceux utilisés pour la station Baldo degli Ubaldi, nous aurait permis de réaliser l'élargissement d'un tunnel existant sans être obligés d'interrompre son exploitation (fig. 4).

Figure 1

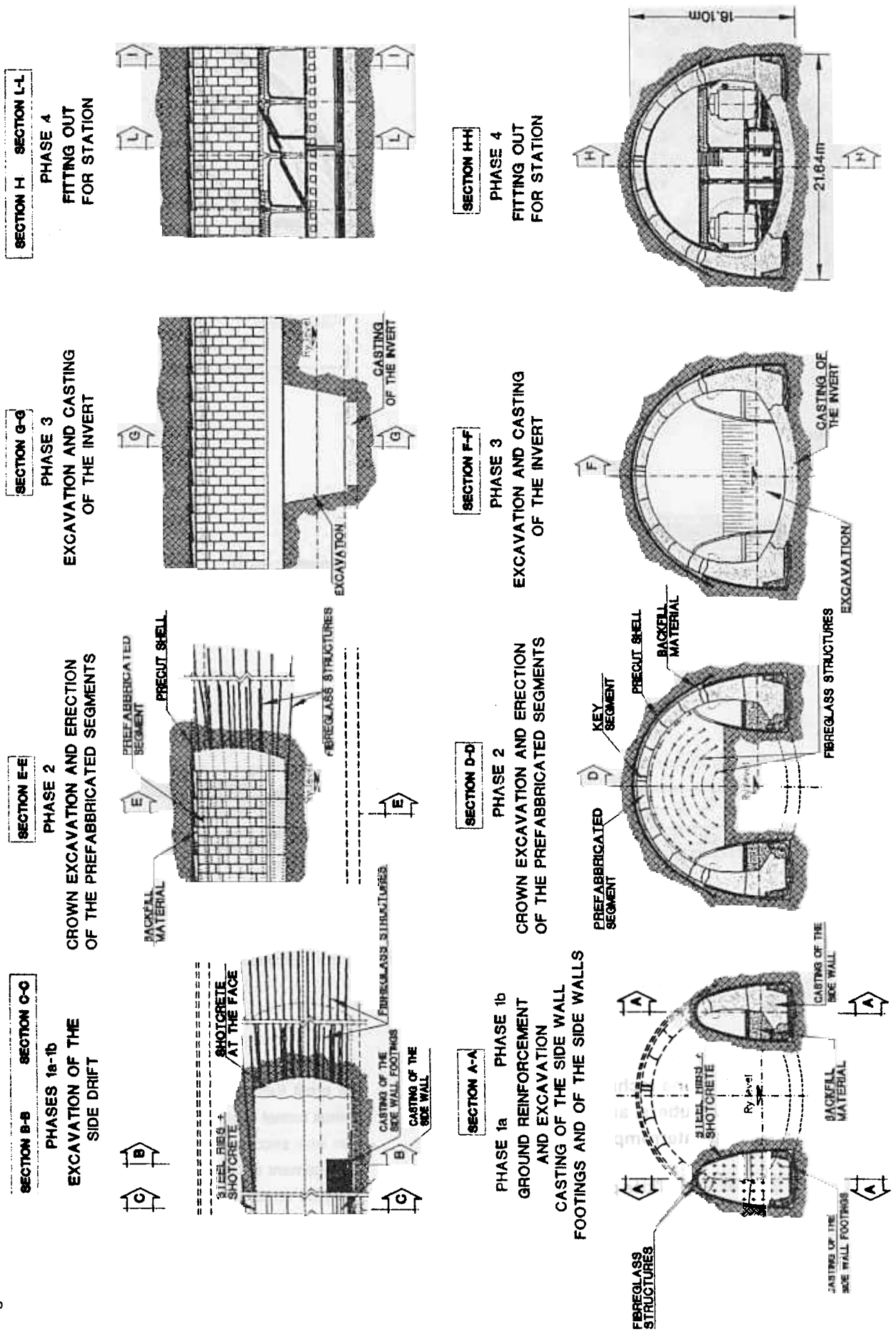


Figure 2

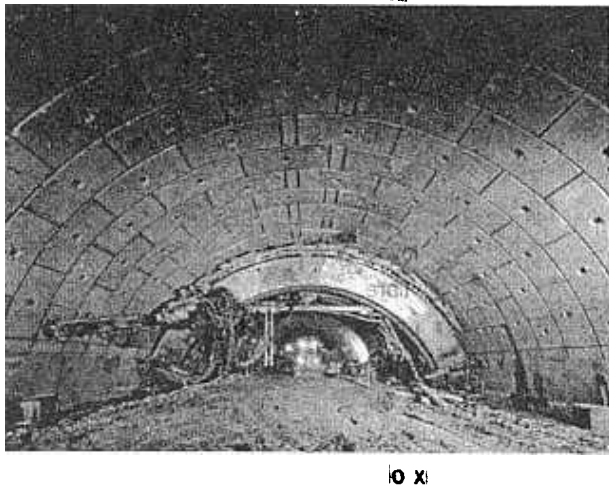


Figure 3

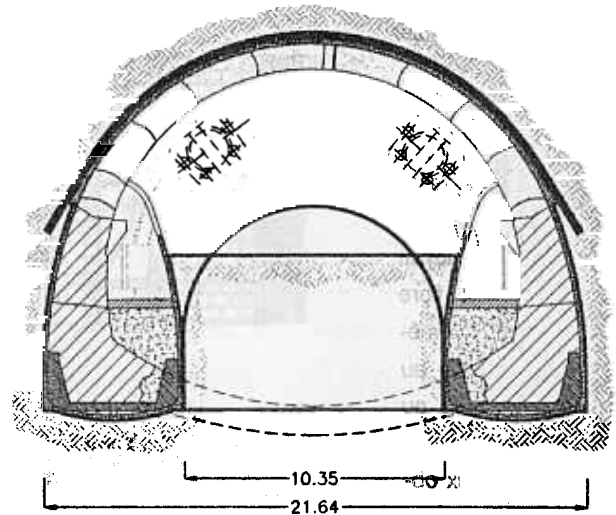
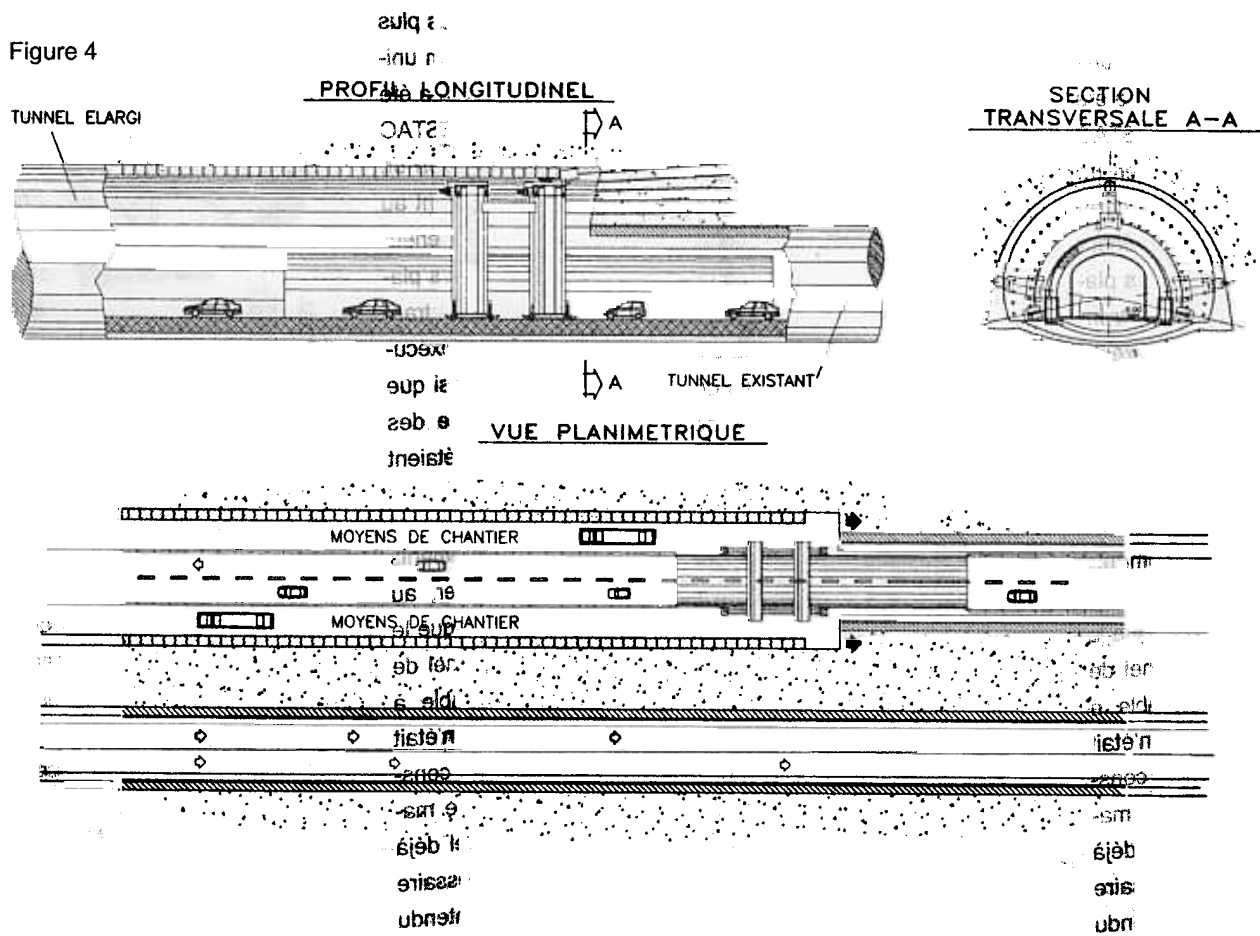


Figure 4



4. Illustration d'une technique pour élargir les tunnels routiers, autoroutiers et ferroviaires sans interrompre la circulation

Dans les grandes lignes, l'idée prévoyait (fig. 5 et 6):

- en une première phase: éventuellement, des interventions de renforcement du front d'élargissement et/ou de préconfinement de la cavité, suivies de l'excavation par échantillons du terrain compris entre

le profil théorique du futur tunnel élargi et celui du vieux tunnel existant;

- en une seconde phase: la réalisation immédiate du revêtement définitif adossé au front d'excavation, par la mise en œuvre d'un ou de plusieurs arcs de voussoirs préfabriqués, selon le principe de la «voûte active»;
- en une troisième phase: la réalisation de la structure de fondation (radier), si nécessaire.

Au cours des deux premières phases, qui auraient dû se dérouler cycliquement, à une cadence très régulière, à l'intérieur du profil du vieux tunnel, une «coque d'acier de protection de la circulation» aurait été mise en place, au-dessus de laquelle auraient opéré toutes les machines installées pour l'exécution des interventions prévues. L'interstice entre cette protection métallique et le revêtement du tunnel existant aurait dû être rempli de matériaux insonorisants et anti-choc. La coque d'acier, d'une longueur égale à quatre fois au moins le diamètre du tunnel à élargir, aurait occupé des espaces relativement modestes à l'intérieur de ce dernier permettant de réaliser les interventions sans interrompre la circulation sur les voies de marche existantes. Lorsque, à la suite de l'avancement, la distance entre le front d'élargissement et l'extrémité avant de la coque se serait approchée de la valeur jugée comme valeur minimum pour la sécurité, la coque aurait été déplacée vers l'avant et ces différentes phases renouvelées cycliquement jusqu'à compléter l'élargissement du tunnel tout entier.

Les paragraphes qui suivent décriront à fond, du point de vue opérationnel, le déroulement de chaque phase exécutive caractéristique de la technique proposée.

4.1 Déroulement de la première phase exécutive

La première phase des travaux prévoit pour commencer, nous l'avons déjà dit, les interventions de préconsolidation du terrain éventuellement nécessaire, puis, l'excavation par échantillons (dont la mesure dépend des caractéristiques des terrains concernés) du terrain compris entre le profil théorique du futur tunnel élargi et celui du vieux tunnel existant.

En fonction du contexte géologique-géotechnique dans lequel nous opérons, les interventions de préconsolidation pourront être des interventions de renforcement du front d'élargissement et/ou de préconfinement de la cavité, telles que: le jet-grouting horizontal, le prédécoupage mécanique ou le renforcement à l'aide de tubes en fibre de verre à manchettes injectés sur le contour de la future cavité d'élargissement. Ils pourront être réalisés en avancement ou radialement opérant de l'intérieur du tunnel existant, mais quoiqu'il en soit, toujours au-dessus de la «coque d'acier de protection de la circulation».

Après l'exécution éventuelle de préconsolidations, c'est le début de l'exécution de l'avancement de l'élargissement (voir fig. 5). Il y est procédé en excavant le terrain et en démolissant le revêtement du tunnel existant par échantillons d'une profondeur réduite (de 60 à 150 cm en fonction de la situation de contrainte-déformation du matériel dans lequel il est opéré et des dimensions des voussoirs préfabriqués projetés pour la réalisation du revêtement définitif). Si la situation de contrainte-déformation le permet, il est possible d'avancer même sur des profondeurs multiples de celle des voussoirs de revêtement utilisés.

Les machines à utiliser pour l'excavation opèrent complètement au-dessus de la «coque d'acier de protection de la circulation». Elles sont dotées de tous les équipements indispensables à l'exécution des interventions de préconsolidation nécessaires (foreuse, lame pour le prédécoupage mécanique, etc.), y compris une ou plusieurs fraises à attaque ponctuelle et, le cas échéant, de puissantes cisailles pour le découpage des cintres et des éléments métalliques constituant le revêtement du vieux tunnel à démolir. Les fraises peuvent – en tant qu'alternative – être remplacées par un marteau démolisseur.

4.2 Déroulement de la deuxième phase exécutive

La deuxième phase exécutive prévoit la mise en œuvre du revêtement définitif du tunnel élargi constitué d'arcs de voussoirs préfabriqués.

L'adoption de l'excavation par échantillons avec la réalisation immédiate du revêtement définitif de voussoirs préfabriqués de béton selon le principe de la «voûte active» est la clef de voûte qui rend possible d'éliminer à la naissance, même à très courte distance du front de taille, tout phénomène éventuel de déformation et permet donc de surmonter tous les problèmes liés à la réponse en déformation du massif, ce qui caractérise justement la technique proposée.

Le déroulement des travaux prévoit (fig. 6):

- A) le transport des voussoirs jusqu'au front à l'aide de tapis transporteurs spéciaux et de chariots élévateurs positionnés sur un des côtés du tunnel élargi;
- B) l'application de résines époxydiques à prise retardée, sur les deux extrémités transversales du voussoir à

mettre en place et sur l'extrémité longitudinale qui sera au contact de l'arc de revêtement déjà monté;

- C) le levage et le positionnement du voussoir à l'aide d'une machine pose-voussoirs, en plaçant tout d'abord ceux qui seront situés en bas, des deux côtés du tunnel, puis en montant les autres jusqu'à fermer la voûte avec le voussoir clef;
- D) la mise en place d'un remplissage de béton entre la voûte de voussoirs préfabriqués et le matériel qui se trouve derrière;
- E) la mise sous pression du vérin du voussoir de clef pour faire adhérer parfaitement les différents voussoirs et produire immédiatement la pression nécessaire

de confinement du massif sur le contour du tunnel élargi, selon les principes de la «voûte active».

4.3 Déroulement de la troisième phase exécutive

La structure de fondation, si elle s'avère nécessaire, est réalisée après déviation appropriée des flux de circulation, à travers la mise en place d'une simple liaison entre le revêtement du nouveau tunnel élargi et le radier du vieux ou encore à travers la coulée d'un radier entièrement neuf (fig. 7 et 8).

Figure 5 Excavation du terrain au front de taille

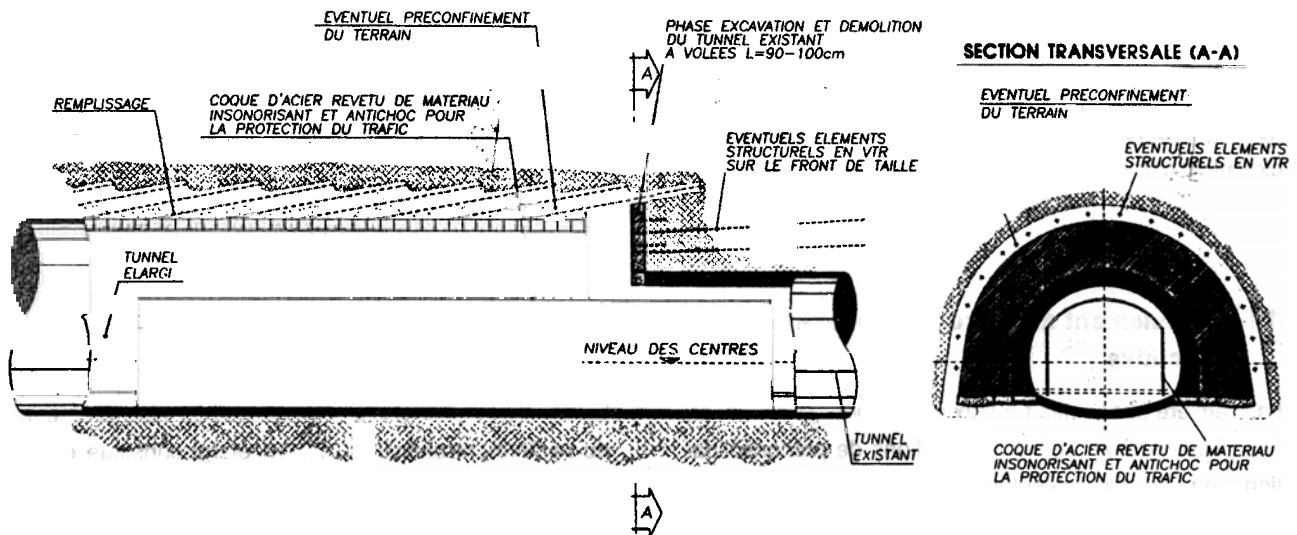


Figure 6 Phase de pose des voussoirs alternée à la phase d'excavation du front de taille

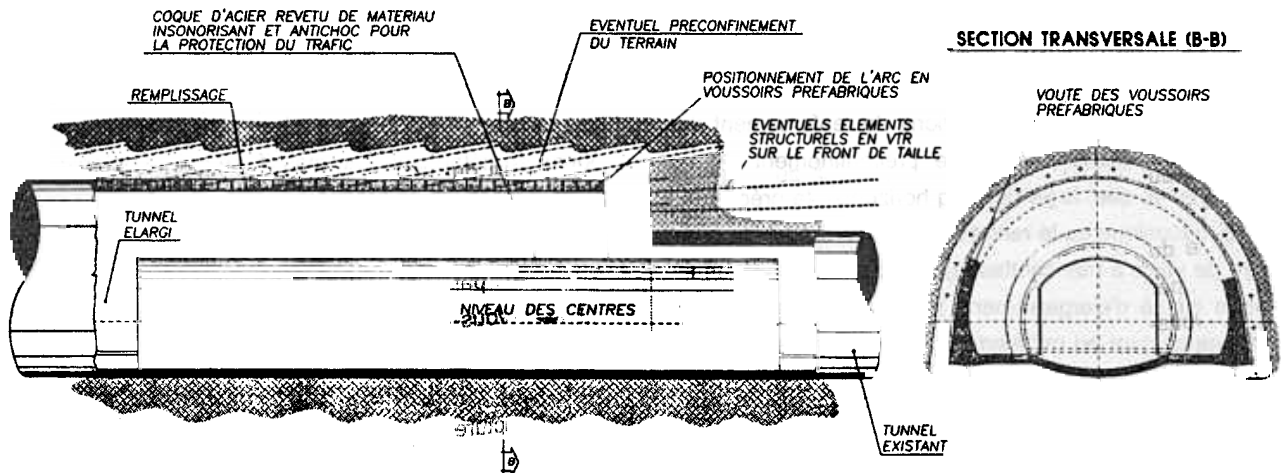


Figure 7 Solution avec élément structural de jonction entre le tunnel élargi et le radier du tunnel existant

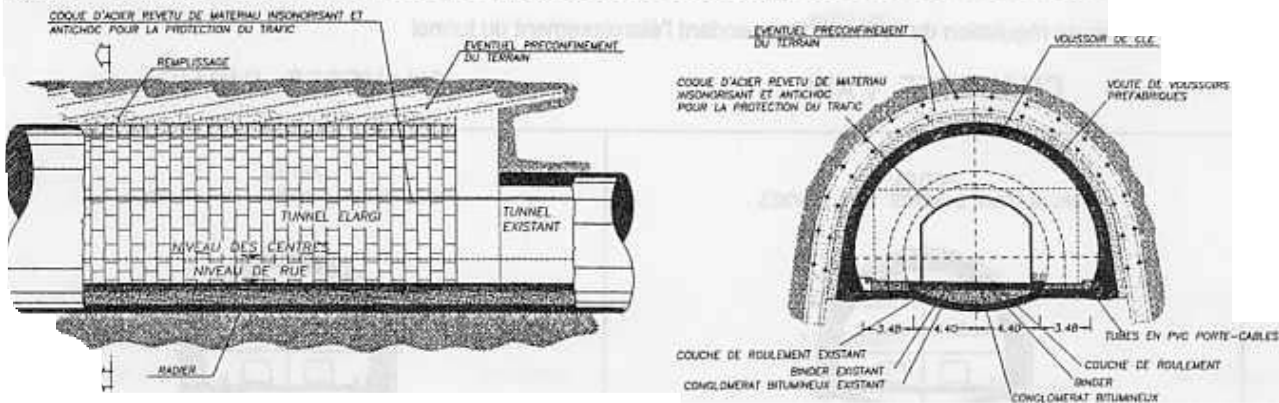
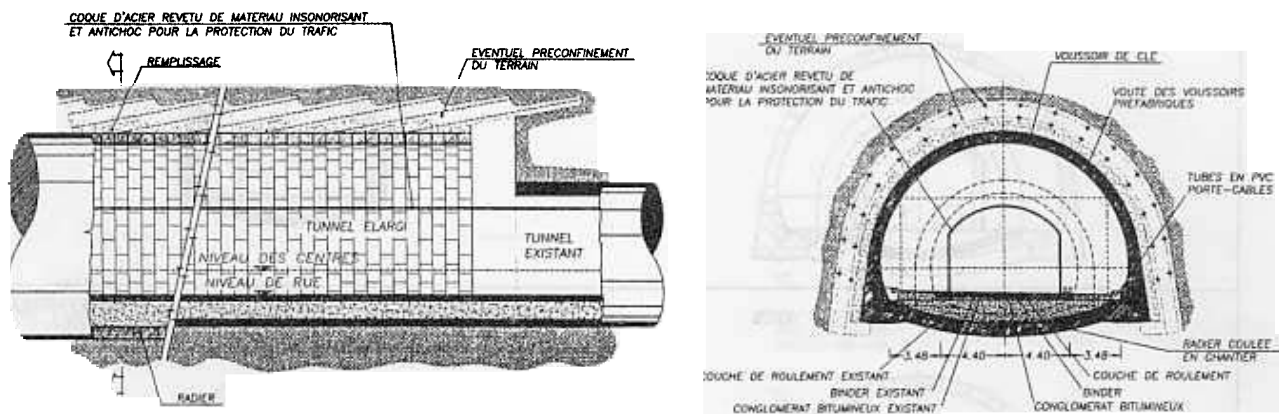


Figure 8 Solution avec radier



5. Solution de certains problèmes particuliers pour le maintien de la circulation au cours des travaux

En ce qui concerne la possibilité de maintenir la circulation dans le tunnel au cours des travaux, tandis que les deux premières phases exécutives ne posent pas de problèmes particuliers puisqu'elles se déroulent entièrement au-dessus de la «coque d'acier de protection de la circulation», pour ce qui est de la troisième phase, il faut faire une distinction entre les deux cas suivants.

5.1 Tunnels ferroviaires

Une fois le tunnel élargi, il est nécessaire en tout état de cause d'arrêter la circulation des trains pour adapter la disposition des rails en fonction de la nouvelle situation. La structure de liaison entre le revêtement définitif du tunnel élargi et le radier du tunnel préexistant – ou, comme alternative – (au cas où la situation statique l'exigerait), la coulée du radier, pourront être réalisés entre temps.

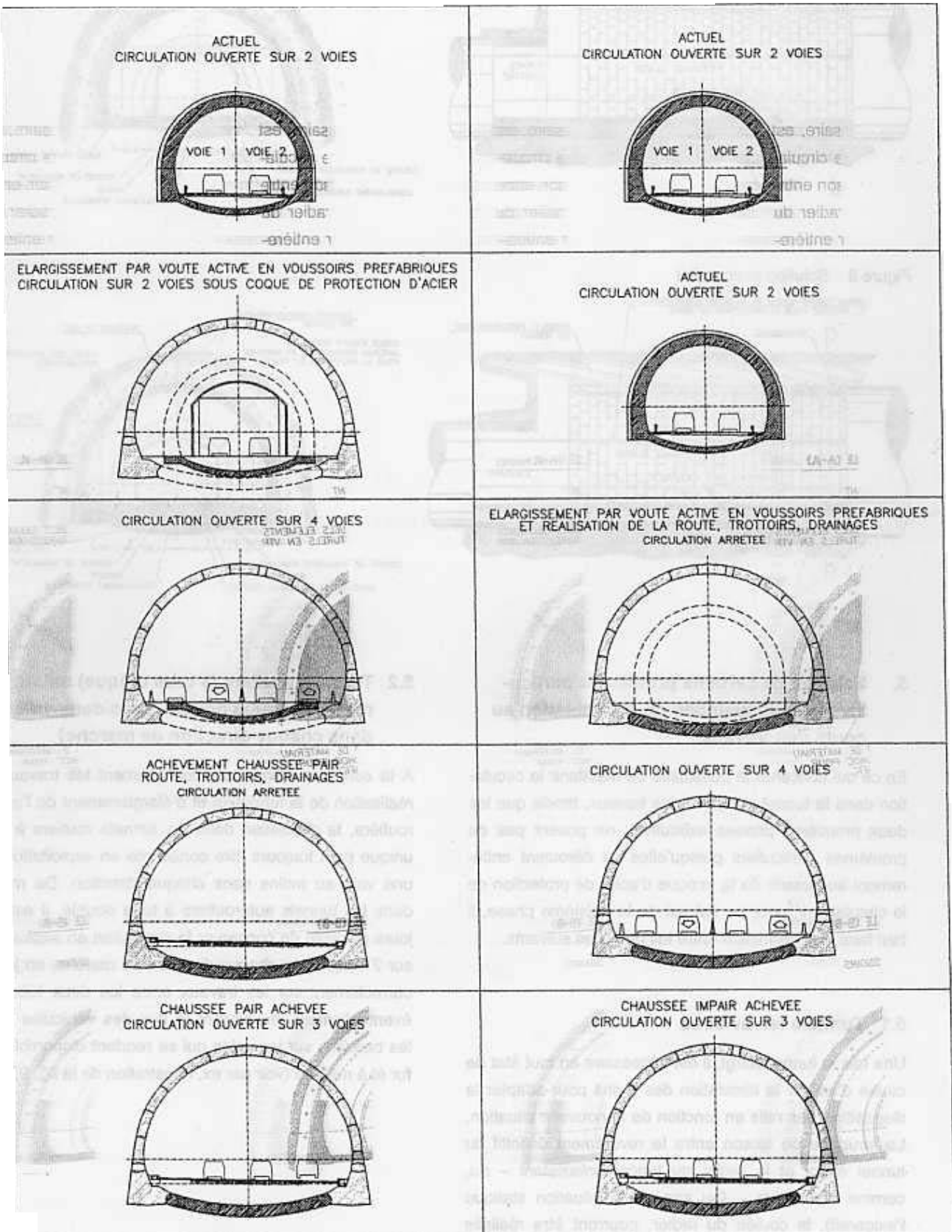
5.2 Tunnels routiers (à tube unique) ou autoroutiers (à tube double, avec deux voies dans chaque direction de marche)

A la condition d'organiser correctement les travaux de réalisation de la fondation et d'élargissement de l'assise routière, la circulation dans les tunnels routiers à tube unique peut toujours être conservée en exploitation sur une voie au moins dans chaque direction. De même, dans les tunnels autoroutiers à tube double, il est toujours possible de conserver la circulation en exploitation sur 2 voies dans chaque direction de marche, en jouant correctement sur les travaux entre les deux tubes et, éventuellement, en déviant le flux des véhicules selon les besoins, sur les voies qui se rendent disponibles au fur et à mesure (voir par ex. l'illustration de la fig. 9).

Figure 9 Plan de régulation de la circulation pendant l'élargissement du tunnel

CHAUSSEE PAIR

CHAUSSEE IMPAIR



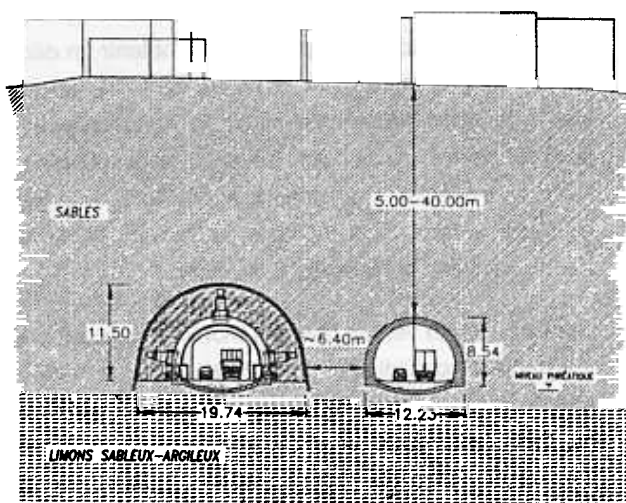
6. L'application du système pour l'élargissement du tunnel «Nazzano»

La nouvelle technologie sera appliquée pour la première fois au monde, sur un plan expérimental, dans l'élargissement du tunnel «Nazzano», situé le long de l'autoroute A1 Rome-Naples entre Orte et Fiano Romano, entre les points métriques 522.000 km et 523.200 km (fig. 10). Le tunnel se développe entièrement en rectiligne, à une altitude altimétrique du plan routier d'environ 166 m au-dessus du niveau de la mer sur une longueur de quelque 337 mètres, sous des couvertures maximum de 45 m. Du point de vue géologique, son tracé implique des terrains de nature sablonneuse et limoneuse-argileuse, de la série plio-pléistocène sur lesquels est située l'agglomération de la Commune de Nazzano (fig. 11).

Figure 10



Figure 11



Compte tenu du type de terrains à affronter, le projet prévoit de procéder à l'excavation de l'élargissement après exécution sur le contour d'une coque de béton projeté renforcé de fibres, obtenue par prédécoupage mécanique.

L'élargissement du tunnel se fera donc à travers les quatre phases principales suivantes (fig. 12 et 13):

1. Réalisation d'une coque de prédécoupage mécanique sur le contour de la future excavation (19,74 m de lumière) et, le cas échéant, des interventions de consolidation qui se rendraient nécessaires sur le front d'élargissement.
2. Réalisation immédiate, adossé au front de taille (4 à 5 m max.), du revêtement définitif, à l'aide de la pose d'un arc de voussoirs préfabriqués, selon le principe de la «voûte active».
3. Démolition par échantillons, sous la protection nécessaire de la consolidation précédemment effectuée, du vieux revêtement et excavation du terrain jusqu'à atteindre le profil théorique d'élargissement.
4. Réalisation de la structure de fondation (radier).

Tous les travaux des trois premières phases seront effectués en protégeant l'assise routière d'une «coque d'acier de protection de la circulation», automotrice, sous laquelle les véhicules peuvent continuer à rouler en toute sécurité. La coque projetée, de 60 m de long, s'étend au-delà du front d'avancement de l'élargissement sur 40 m environ. Elle est constituée d'une structure en acier composable d'éléments modulaires. Dotée de coulisseaux, d'ancrages, de motorisation, de panneaux insonorisants et anti-choc, elle est capable d'absorber la chute de blocs de matériel au cours de l'excavation du terrain et la démolition du tunnel existant, y compris d'éventuels relâchements de celui-ci. Toutes les machines mises en place pour l'exécution des interventions prévues se déplaceront et opéreront au-dessus de la coque. Lorsque par suite de l'avancement, la distance entre le front d'élargissement et l'extrémité de la coque s'approchera de la valeur jugée comme valeur minimum pour la sécurité de la circulation des véhicules, elle sera déplacée vers l'avant et les différentes phases seront répétées cycliquement jusqu'à compléter l'élargissement du tunnel tout entier.

Figure 12

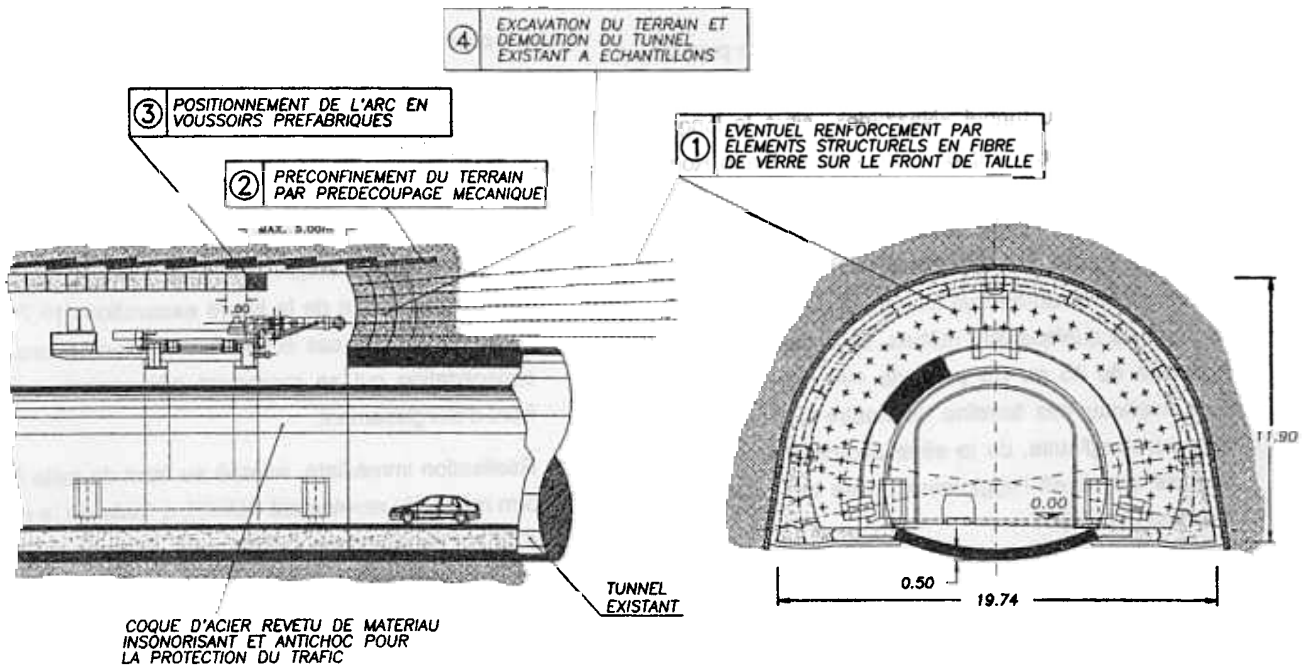
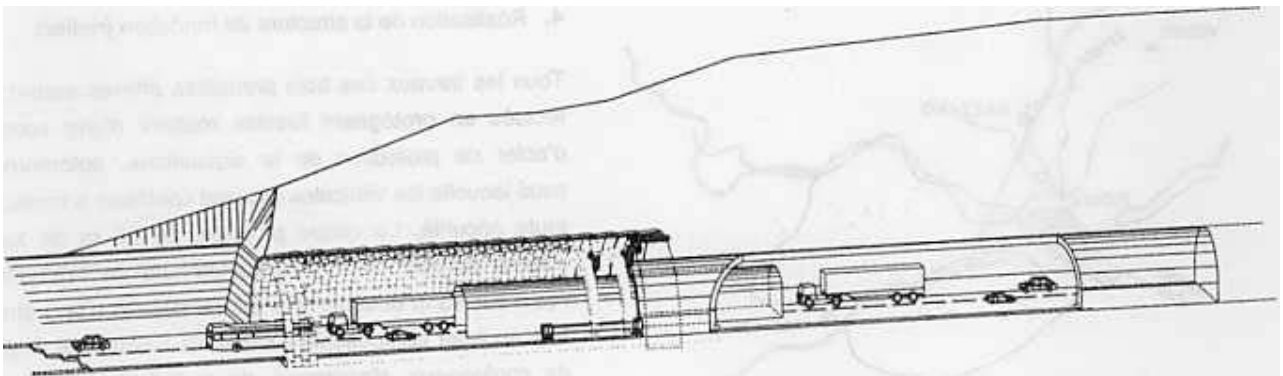


Figure 13 Vue tridimensionnelle



7. La machine et son outillage

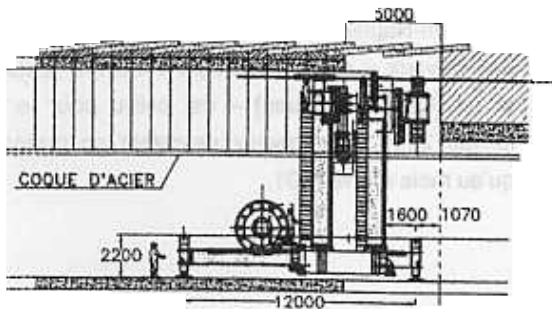
La conception du prototype de la machine et des outillages a exigé des efforts particuliers car il s'est agi en fait d'optimiser, dans un espace très limité et compris entre le tunnel fini et la coque, toute une série de fonctions opérationnelles telles que prédécoupage au front de taille, excavation, pose des voussoirs, coulées de remplissage diverses, démolition du tunnel existant.

Les problèmes ont été résolus grâce à des technologies innovantes qui ont permis de projeter une machine polyvalente et compacte, très fortement assistée par ordinateur, capable de fournir toutes les fonctions exigées, réduisant le plus possible les déplacements et donc les délais d'emploi.

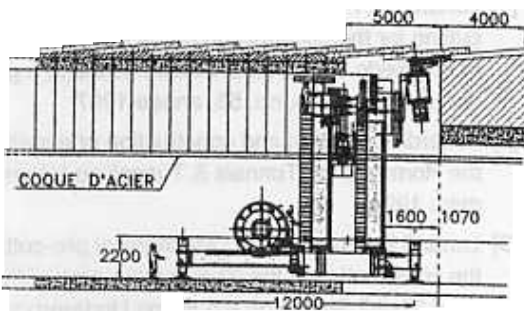
Elle comprend fondamentalement une robuste structure métallique à double arc (fig. 14), reliée à la base par des poutres télescopiques qui permettent d'obtenir un déplacement longitudinal rapide et précis vers l'avant aussi bien que vers l'arrière. Le centrage transversal et le positionnement correct en élévation sont obtenus à l'aide de systèmes à commande hydraulique. Un dispositif *laser* externe à la machine permet un alignement parfait entre elle et l'ouvrage à effectuer.

Sur l'arc orienté vers le front est monté un chariot, particulièrement sophistiqué, capable de porter la lame de prédécoupage et la fraise d'excavation et de démolition ou, dans l'alternative, un marteau démolisseur. Le mouvement circulaire du chariot sur l'arc obtenu par des motoréducteurs et des crémaillères ainsi que les dépla-

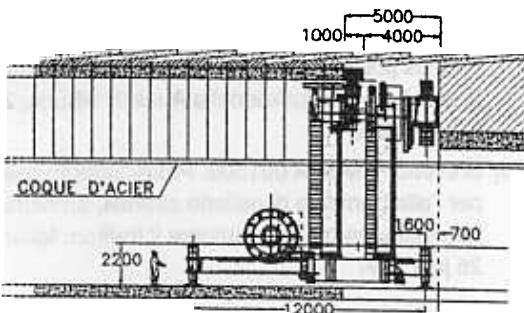
Figure 14



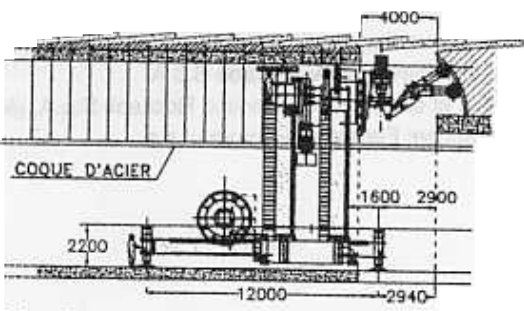
Perforation



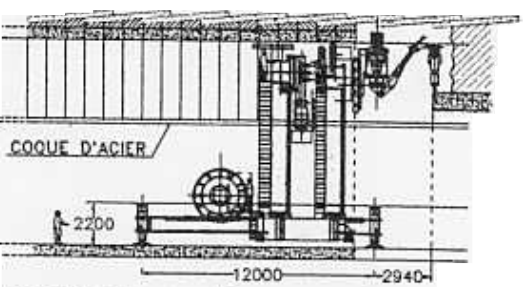
Prédécoupage



Positionnement des voussoirs



Démolition et excavation avec fraise



Démolition et excavation avec marteau

cements complexes des différents outils permettent d'effectuer les différentes opérations prévues par le projet.

Sur le même arc est placé, dans la position voulue, un double système capable de gérer les tuyauteries servant à l'exécution du remplissage du prédécoupage fait à la lame, ainsi qu'à celui prévu entre les voussoirs et l'excavation. Un dispositif spécial permet de réaliser également, à travers le même système, le spritz-béton de consolidation au front de taille.

Sur l'arc avant est positionnée également une grue télescopique ayant pour fonction de déplacer les différents composants dans la phase de travail et d'entretien mais avec également des fonctions de service en cas d'urgences au front de taille.

L'arc arrière est projeté et dimensionné pour la mise en place des voussoirs. Sur lui court un chariot doté d'«érecteur», capable d'«accrocher» les voussoirs et de les positionner à l'endroit voulu. Les déplacements de l'«érecteur» sont entièrement électro-hydrauliques, mus par un tableau de commande mobile doté d'écran et capable de fournir des informations sur les manœuvres à effectuer et, le cas échéant, les erreurs commises.

Avant la pose de la clef de l'arc et la réalisation de l'autosoutien, les voussoirs s'appuient sur des structures télescopiques spéciales ancrées sur l'arc et dotées de capteurs qui permettent de procéder à certaines manœuvres en toute sécurité.

La structure est équipée de passerelles de service différemment disposées pour permettre au personnel d'opérer dans des conditions de visibilité optimales.

Les différentes fonctions des outillages sont régulées par un PLC (*Programmable Logic Controller*), qui est à même de reconnaître les commandes reçues, d'activer les blocages de sécurité et de transmettre sur les écrans des différents tableaux de commande les informations nécessaires à une gestion correcte et sûre de l'outillage.

Données techniques de la machine en question:

Capacité de démolition du béton	
avec la fraise	20 à 25 m ³ /h
avec le marteau	5 à 8 m ³ /h
Pose des voussoirs: charge max.	7 t à 10,70 m
Puissance installée	214 kW
Installation: électro-hydraulique	
Déplacements à commande hydraulique gérée par	
<i>Programmable Logic Controller</i>	