



JOURNÉES D'ÉTUDE

LA VILLE SOUTERRAINE 2

Deuxième manifestation internationale sur les
**Stratégies récentes de développement
des travaux souterrains urbains**

I

MERCREDI 19 ET JEUDI 20 MARS 1997

10, rue du Débarcadère - PARIS 17^e
Salle Pradeau - 1^{er} sous-sol

sous la présidence de

Bernard TARBÈS

*Syndicat National du Béton Armé,
des Techniques Industrialisées et de l'Entreprise Générale*

P. Lunardi

**Aspects infrastructuraux urbains et extra-urbains de la liaison Grande Vitesse
Bologne - Florence**

1. REMARQUES PRÉLIMINAIRES

La dimension d'une ville est contrôlée par la vitesse des transports et, contrairement à nos convictions passées, elle n'est pas une conséquence de l'industrialisation. Considérant que le déplacement moyen journalier de l'homme moderne est d'une demi-heure environ, plus le transport sera rapide et plus la dimension de la ville augmentera. Il est intéressant d'observer que même pour les villes de l'Antiquité, Persépolis, Bagdad, Rome ou Marrakech, le diamètre des murailles qui les entouraient n'a jamais dépassé les 5 km, autrement dit la dimension du module personnel de territoire parcourable en une demi heure. Le déplacement entre son domicile et une distance donnée est donc une tendance qui s'est conservée dans le temps. Venise est encore une ville piétonnière par exemple et le diamètre maximum de la partie reliée par les ponts est de 5 km. A l'heure actuelle, l'utilisation diffuse de l'automobile et le développement des lignes de métro ont amené à 40 km le diamètre du module territorial(fig.0). Mais du fait que nous disposons de trains capables de marcher à 300 km/h, le module de déplacement individuel pourrait augmenter davantage encore.

Les lignes ferroviaires grande vitesse entre villes situées à distances réduites (< 100 km) vu les temps de parcours brefs peuvent donc être considérées comme les métros d'une seule ville virtuelle englobant les deux villes réunies. Le résultat surprenant sera une modification radicale du tissu urbain et une réorganisation de la dynamique des villes dont la durée pourrait exiger une bonne dizaine d'années.

Dans cette optique, la liaison ferroviaire grande vitesse Bologne-Florence peut être considérée à tous les effets comme une infrastructure urbaine voire même comme une ligne métropolitaine puisqu'elle court pour 90% du parcours sous un tunnel.

L'ouvrage exigera un effort technique considérable du fait qu'il se développe dans un contexte géologique (la chaîne des Apennins) qui présente une complexité extrême. Dans notre article, après un encadrement historique des faits qui ont marqué la liaison trans-apennine, nous décrivons les principaux problèmes de conception et de construction liés à la réalisation des tunnels de la nouvelle ligne.

Nous allons voir notamment que le choix de la "technologie conceptuelle" s'est orienté sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols (ADECO-RS), la seule capable à notre avis de fournir une réponse à toutes les situations géologiques-géomécaniques possibles (tout comme l'exige le contexte géologique résolument complexe et hétérogène des Apennins), la seule à même de programmer les temps et les coûts d'exécution, à la lumière notamment des orientations législatives italiennes récentes en matière d'ouvrages publics.

2. HISTOIRE SUCCINCTE DE LA LIAISON FERROVIAIRE BOLOGNE-FLORENCE

Les événements historiques qui accompagnent la liaison ferroviaire entre Bologne et Florence à travers l'Apennin Tosco-Emilien vont de pair avec l'affirmation des chemins de fer en tant que système par excellence pour le transport sur terre de marchandises et de personnes dans le cadre du contexte socio-politique qui voit, vers la moitié du XVIIIe siècle, croître de plus en plus les exigences d'avoir des relations commerciales entre la région du Pô et la région centrale de l'Italie.

Les événements qui aboutissent à l'unité italienne favorisent un essor formidable de la conception et la réalisation d'une liaison qui constituera à tous les effets, la dorsale infrastructurelle principale du nouvel Etat italien dont le barycentre politico-administratif se déplace rapidement du Turin à Florence et de Florence à Rome.

Les *vicissitudes* de la liaison reflètent incontestablement l'effort technique dû notamment à un moment historique particulier. Cela aboutit à des projets et à des réalisations qui témoignent de la clairvoyance et le *l'expertise* très poussée des techniciens engagés dans les travaux. Sans parler des investissements considérables qui ont été faits.

La première liaison Bologne-Florence, dont les travaux sont entrepris en 1856, entre en service le mois de novembre 1864. Le tracé développé sur le projet de l'ingénieur Protche, de Bologne, suit en partie celui de la ligne déjà existante de "Porrettana" le long de la vallée de Reno. Il franchit l'Apennin à Prachia, à 616 m. au-dessus du niveau de la mer et aboutit à Florence à travers Pistoia. Mais dès avant la fin de la construction de la ligne, il apparut clairement que du fait de ses caractéristiques de construction (pentes élevées) elle n'aurait pas été en mesure d'assurer le trafic intense entre la vallée du Pô et la capitale. Il se rendit nécessaire d'avoir une communication plus directe, à potentiel plus grand entre Bologne et Florence. Le problème, affronté par des projeteurs d'élite donna lieu à toute une série de propositions qui prévoyaient différentes

alternatives planoaltimétriques chacune desquelles se caractérisait par les valeurs d'altitude du passage et du développement du tunnel principal. L'exigence de limiter le développement de ce tunnel poussait les projeteurs à conserver une altitude de passage autour de 500 m au-dessus du niveau de la mer ce qui aurait donné des pentes inférieures de peu à celles de la ligne existante et des améliorations insuffisantes de la potentialité.

En 1882, Protche est chargé par les collectivités locales intéressées à la liaison d'en référer sur le projet rédigé par l'ingénieur Zannoni en 1871 et de proposer le cas échéant des améliorations. Les indications du projeteur allèrent dans le sens d'une ligne qui suivait les vallées du Setta et du Bisenzio, pour se relier à la ligne existante à la hauteur de Sasso Marconi et Prato. Le franchissement de l'Apennin aurait été réalisé grâce à un grand tunnel de 18.032 m avec un passage à 328 m au-dessus du niveau de la mer ce qui permettait d'avoir des pentes maximum de 12 pour mille.

En 1902, c'est l'institution du Conseil Supérieur des Travaux Publics, une commission spéciale chargée d'examiner les différentes études présentées jusqu'alors. C'est le projet Protche qui est choisi dans la mesure où c'est lui qui répondait le mieux aux exigences de la ligne de par ses caractéristiques de pente et la plus grande stabilité des terrains traversés.

La commission ministérielle, présidée par le sénateur G. Colombo, ingénieur, ne se limita pas à étudier le projet Protche, elle approfondit également quelques solutions de détail et finit par signaler la meilleure. En 1908, sur la base du rapport de la Commission Colombo, le gouvernement ordonnait, par la loi n. 444/1908, l'exécution d'études définitives sur ce projet et autorisait une dépense de 150 millions de liras pour la construction de la "Direttissima" Bologne-Florence. En réalité, les travaux de construction proprement dite ne commencèrent qu'en 1913, assez lentement et d'une manière discontinue à cause du conflit mondial. La "Direttissima" était inaugurée en 1934. La dépense globale s'élevait à 1.122.000.000 de liras dont 460 exclusivement pour le tunnel de l'Apennin (graphique de la dépense concernant la "Direttissima" (fig.1)).

Un demi-siècle après l'entrée en service de la "Direttissima" Bologne-Florence, de nouveaux besoins de potentiel se font sentir et notamment l'exigence d'adapter le système ferroviaire national au modèle européen en l'intégrant d'un réseau continental à grande vitesse. Ceci aboutit au développement du projet "Train à Grande Vitesse". Ce projet redessine le système ferroviaire italien sur la base d'un quadruplement des lignes avec de nouveaux axes grande vitesse se développant le long de la directrice du Pô en direction Est-Ouest et péninsulaire en direction Nord-Sud. En ce qui concerne tout particulièrement cette dernière directrice, le tronçon Bologne-Florence constitue la partie la plus délicate du projet et de la construction.

Sans nullement anticiper, dans cette courte reconstruction historique, les détails du Projet TGV (TAV : Treno Alta Velocità) qui seront abordés plus loin, nous tenons à rappeler que la constitution de TAV S.p.A. - à laquelle les Chemins de Fer italiens donnèrent en concession la conception, la construction et la gestion des nouvelles lignes pendant une période de 50 ans - remonte à 1991.

TAV a donc sélectionné un groupe d'entreprises qui se sont engagées, en qualité de General Contractor, à la conception et à la construction des lignes. En ce qui concerne notamment le tronçon Bologne-Florence, le General Contractor choisi a été le groupe Fiat qui a confié à son tour la construction à la société Cavet et à Fiat Engineering. Pour la conception des ouvrages c'est Rocksoil S.p.A. qui a été choisie.

Entre temps, après que TAV ait confié à Fiat le projet de principe du tracé, ce qui avait lieu au début de 1992, c'est l'étude de l'impact sur l'environnement et la conception exécutive des ouvrages qui commencent. Ces études ont abouti à la mise en place d'un tracé situé plus à l'est par rapport au tracé existant avec un développement global de 78 km dont 72 en tunnel et 6 en plein air, l'altitude de franchissement étant de 413 m au-dessus du niveau de la mer.

Pour conclure cette rapide exposition historique, nous vous présentons le graphique (fig.2) qui reproduit l'évolution du tracé de la "Porrettana" de 1864 par rapport à la ligne actuelle Grande Vitesse. Il résume, sans doute mieux que toute autre description, les progrès technologiques accomplis et la qualité de l'infrastructure de l'ouvrage. Il y a lieu de remarquer que l'évolution entre la "Porrettana" et la "Direttissima" a consisté en une optimisation de la géométrisation du tracé qui a comporté une diminution de la pente maximum, une augmentation des rayons de courbure et enfin, une diminution du parcours qui ont permis une vitesse plus grande. Dans la ligne Grande Vitesse en revanche, les paramètres géométriques du tracé sont analogues à ceux de la "Direttissima". Ce qui change est la mentalité de la conception qui nous pousse à tenir dûment compte des facteurs environnementaux et de recourir à l'option souterraine le plus possible grâce au développement des technologies de construction.

3. LE PROJET DES OUVRAGES SOUTERRAINS

3.1 Le projet - Généralités

Le projet prévoit la réalisation de dix tunnels naturels pour un développement global de quelque 72 km. De plus, 15 "fenêtres" sont prévues sur une longueur globale de 12 km.

Les "fenêtres" servent d'attaques intermédiaires pour les tunnels les plus longs (de 10 à 14 km) afin de réduire les temps d'exécution et de plus elle serviront de voie de fuite dans les situations de secours. Afin de garantir la réalisation de l'ouvrage dans les 78 mois prévus par le contrat, 40 attaques simultanées sont nécessaires ce qui exige une mobilisation de moyens et d'hommes qui ferait de ce chantier l'un des plus importants actuellement en cours. La longueur réduite des tronçons en plein air - en moyenne 100 m réalisés pour la plupart en viaduc - fait que cet ouvrage peut en définitive être considéré comme un tunnel unique de 72 km. C'est de fait l'encadrement qui a été donné à l'ouvrage par les projeteurs et telle sera la sensation du voyageur qui parcourra à 300 km/h la ligne Bologne- Florence.

Le long du tracé, la situation géologique se présente extrêmement variée. Nous traversons des terrains incohérents, des roches dures et des argiles (des argiles écailleuses), des roches tendres et du flysch. Pour faire face à une situation aussi hétérogène, nous avons prévu d'appliquer les technologies les plus modernes en ce qui concerne notamment les systèmes de consolidation et de renforcement des terrains ainsi que les "préconsolidations" (clous en résine de verre, jet-grouting, pré-tunnel, prédécoupage, etc.) différenciées selon le type de terrain afin d'avoir une excavation toujours stable dans la phase d'avancement. Ceci permet d'adopter une seule modalité d'excavation et de construction du tunnel.

La méthodologie d'excavation est celle de la "pleine section" qui offre des avantages considérables au niveau de l'industrialisation des travaux. De la sorte, la fermeture de l'anneau structurel avec le radier déjà derrière le front de taille apporte des avantages considérables pour ce qui est de la stabilité à court et à long terme. Les dimensions importantes des tunnels ferroviaires (130 m² environ de section d'excavation) exigent le recours à des machines de dimensions considérables, dotées d'une extrême polyvalence au cours de toutes les phases du travail, de manière à satisfaire toutes les exigences du projet et de la construction qui se présenteraient au cours des travaux. A cet égard, une TBM (Tunnel Boring Machine) est à l'étude. Ses dimensions dépassent toutes celles réalisées jusqu'ici.

Toutes les technologies innovantes citées plus haut ont été introduites après une conception attentive et ciblée qui se réfère à une nouvelle approche conceptuelle basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols (ADECO-RS).

Cette approche, à laquelle se sont référés dès le début les projeteurs Fiat Engineering et Rocksoil, déjà adoptée dans une large mesure par le manuel de conception Italferr, définit un développement logique de toutes les phases conceptuelles et oblige à étudier

le tunnel comme un problème à trois dimensions et non simplement comme un problème plan (ce qui a toujours été fait dans le passé). La particularité des ouvrages souterrains réside justement dans le fait que pour être réalisé, cet ouvrage exige l'élimination du terrain et la mise en oeuvre d'interventions structurelles de revêtement. Le comportement à long terme du tunnel dépend de la réaction du terrain à l'action combinée de l'excavation et du revêtement. De telle manière que le projeteur, qu'il s'agisse de la phase d'étude du comportement du terrain à l'excavation en l'absence d'interventions ou de la phase suivante de choix et de dimensionnement des instruments de stabilisation, doit tenir compte d'un problème à trois dimensions dont l'élément d'étude central est le noyau sur le front de taille des excavations.

Nous présentons ci-après un bref aperçu de l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols (ADECO-RS) qui constitue la codification de la "technologie de projet" illustrée plus haut.

3.2 L'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols (ADECO-RS)

L'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols (ADECO-RS) représente une nouvelle procédure de conception et de construction dont la qualité s'est définitivement révélée dans les excavations de tunnels dans des conditions de tension et de déformation particulièrement difficiles où l'application d'autres méthodes telles que le NATM n'avait produit que des résultats décevants. Du fait qu'elle part de la simple observation que le problème statique d'un tunnel en phase de taille est absolument tridimensionnel et ne peut se réduire à un simple schéma plan, l'analyse des déformations contrôlées aboutit en fait sur la base des résultats de plus de 25 ans de recherches aux conclusions suivantes :

1. la stabilité d'un tunnel dépend de la formation d'un "effet de voûte" dans le terrain autour de l'excavation
2. la formation de l' "effet de voûte" est signalée par le type et par l'importance de la réponse en déformation
3. la réponse en déformation s'identifie dans l'extrusion du noyau qui donne lieu à la préconvergence et à la convergence de la cavité
4. la réponse en déformation est conditionnée par la rigidité du noyau
5. la stabilisation d'un tunnel se poursuit à travers des actions de préconfinement de la cavité ainsi qu'à travers un simple confinement

Les caractéristiques particulières de l'approche conceptuelle ADECO-RS sont les suivantes :

- La référence à un nouveau type d'encadrement des ouvrages souterrains qui repose sur un seul paramètre commun à toutes les excavations tel que le comportement de tension et de déformation du système front de taille-noyau d'avancement (fig. 3) et qui est à même - grâce à l'introduction du concept de préconfinement de la cavité et des "systèmes de conservation" - d'offrir une réponse à toutes les situations géologico-géomécaniques possibles
- la distinction nette entre la phase de la conception et celle de la construction d'un ouvrage souterrain est fondamentale pour programmer les temps et les coûts d'exécution dans la mesure où elle mène à une mise en place correcte du manuel de conception, du cahier des charges de la construction et du manuel de contrôle de la qualité. La phase de la conception comprend notamment (fig. 4)

- une phase de reconnaissance au cours de laquelle en fonction des terrains concernés par le tunnel, le projeteur procède à la caractérisation du milieu en termes de mécanique des roches et des sols, indispensable pour faire l'analyse des équilibres naturels préexistants et pour pouvoir opérer correctement lors de la phase de diagnostic qui suit

- une phase de diagnostic au cours de laquelle, sur la base des éléments recueillis lors de la phase précédente, le concepteur est appelé à faire - théoriquement - des prévisions fiables concernant la réponse en déformation du milieu à l'action de l'excavation. Elles sont à entendre en termes de genèse, localisation, évolution et entité des phénomènes probables qui, en l'absence d'interventions de stabilisation, s'amorceraient sur le front de taille et par voie de conséquence dans la bande de terrain autour de la cavité. L'analyse combinée de la réponse en déformation du système front de taille-noyau d'avancement et de la cavité nous permet de déduire quel sera le comportement du futur tunnel pour parvenir enfin à le subdiviser en tronçons à comportement en déformation homogène dans le cadre de trois catégories de comportement fondamentales (catégorie A front stable, catégorie B front stable à court terme, catégorie C front instable).

- une phase de thérapie au cours de laquelle, à la suite des prévisions faites dans la phase de diagnostic, le projeteur choisit le type d'action à exercer (préconfinement ou simple confinement) et les interventions nécessaires dans le cadre des trois catégories de comportement A, B et C, afin d'obtenir la stabilisation complète du tunnel et la perfection en termes de systèmes, de cadences et de phases d'excavation. Nous définissons dès lors la composition des sections type longitudinales et transversales, nous les dimensionnons et nous vérifions leur efficacité à l'aide d'instruments de calcul numérique.

La partie construction comprend :

- une phase opérationnelle au cours de laquelle nous réalisons l'avancement dans le tunnel en mettant en oeuvre, selon les prévisions de la conception, les instruments de stabilisation, en les adaptant en termes de confinement et de préconfinement à la réponse réelle en déformation du massif et en les contrôlant selon des plans préétablis de contrôle de la qualité

- une phase de vérification au cours de laquelle la lecture et l'interprétation des phénomènes en déformation (qui sont la réponse du milieu à l'action d'avancement) au cours de la construction de l'ouvrage, nous permet de vérifier la justesse des prévisions faites dans la phase de diagnostic et de thérapie afin de perfectionner la mise au point du projet à travers l'équilibre des instruments de stabilisation entre le front et la cavité. La phase de vérification ne s'achève pas une fois le tunnel terminé. Elle se poursuit pendant toute la vie du tunnel afin de contrôler constamment sa sécurité d'exploitation.

A travers cette position conceptuelle et opérationnelle, l'approche basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols exploite les évidences d'une étude approfondie de la dynamique évolutive de l'excavation et offre aux projeteurs une sorte de guide pour encadrer l'ouvrage souterrain dans les trois catégories de comportement fondamentales et pour parvenir à sa subdivision en tronçons à comportement en déformation homogène. A la suite, à chacun de ces tronçons sont associées des sections type qui prévoient des systèmes d'attaque et des interventions de stabilisation même dans des phases ultérieures dont nous définissons les coûts et les temps d'exécution pour les ouvrages souterrains.

L'introduction de l'approche basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols dans les manuels et dans les cahiers des charges présente dès lors comme conséquence immédiate et prévisible deux aspects principaux :

- a) la valorisation de la phase conceptuelle dans la mesure où le projeteur est à même de fournir les solutions techniques appropriées encore avant que les travaux ne lui aient été confiés;
- b) une programmation économique des ouvrages souterrains qui résulte bien plus proche de la réalité et dont les pourcentages d'erreur sont très modestes.

Pour la première fois, il devient donc possible d'avoir une programmation fiable des temps et des coûts d'exécution.

Ce que nous affirmons se voit démontré par des expériences récentes positives à savoir la réalisation de tunnels projetés et construits selon les règles de l'ADECO-RS où l'emploi des technologies modernes de mécanisation de l'avancement a permis d'obtenir, même dans des terrains présentant des conditions de tension et de déformation difficiles, des vitesses d'avancement excellentes et plus encore, une très nette linéarité de la production (fig. 5) qui est la preuve la meilleure du bien fondé de la thèse. Aujourd'hui, même les tunnels peuvent être conçus comme de véritables ouvrages d'ingénierie.

3.3 Application de l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols (ADECO-RS) aux ouvrages de la ligne GV Bologne-Florence.

La procédure décrite plus haut a été appliquée à la conception exécutive des tunnels de la ligne GV Bologne-Florence. Les paragraphes qui suivent présentent une description détaillée de la conception articulée dans les phases prévues par la procédure.

Phase de reconnaissance. Caractérisation géologico-géotechnique du tracé

Le développement du Projet Exécutif des tunnels du tracé GV BO-FI a révélé une complexité poussée de la nature géologico-géomécanique des terrains traversés. Les campagnes géognostiques d'intégration pour les variantes du tracé et pour l'optimisation du P.E. ont permis une reconstruction géologico-géomécanique plus ponctuelle et plus détaillée des terrains concernés par l'excavation des tunnels (fig. 11).

La présence d'un tableau géologique plutôt articulé et variable nous a encouragé à nous servir de l'acquisition des données de la campagne géognostique en cours, pour reconstruire :

- un modèle stratigraphique-sédimentologique des principales formations sédimentaires (synclinal bolonais, molasse de Loiano, F.ne di Bismantova, F.ne di Monghidoro, marneux-arénacé, M. Senario)
- un modèle tectonico-structurel du secteur toscan et tout particulièrement de la zone du col de la Raticola et du M. Senario (Sillario)
- un modèle stratimétrique des principales formations flyschoides auquel se référer dans la phase de paramétrisation des massifs rocheux
- un modèle hydrogéologique de tout le tracé afin de comprendre l'importance de l'interférence de l'ouvrage souterrain avec les équilibres hydriques souterrains dans la phase de la construction aussi bien qu'à long terme.

Dans le cadre de ces points et dans le souci d'avoir une caractérisation géomécanique plus complète nous avons retenu utile de mettre davantage l'accent sur les opérations d'échantillonnage et d'expérimentation - *in situ* et en laboratoire - des terrains moins résistants présents dans les successions sédimentaires et des terrains moins perméables, afin d'arriver à une paramétrisation qui soit le plus réaliste possible.

Les études et les recherches en question nous ont permis d'optimiser les procédures conceptuelles et de réduire l'aléatoire traditionnellement lié aux travaux souterrains.

Au terme de ces études, nous avons, pour chaque formation ou groupe de formations ayant des caractéristiques géologico-géomécaniques similaires, attribué les principaux paramètres géomécaniques en termes de résistance et de déformabilité, paramètres dont il serait tenu compte par la suite dans les analyses numériques sur le comportement du massif face à l'excavation, en l'absence d'interventions (phase de diagnostic) et après l'application des instruments de stabilisation établis pour garantir les conditions de stabilité du tunnel à court et à long terme (phase de thérapie).

Phase de diagnostic : prévision du comportement des massifs rocheux et des terrains face à l'excavation

Dans cette phase, le problème s'est posé de disposer de critères homogènes et univoques afin de schématiser le tracé (qui se caractérise très certainement par divers problèmes de type géomécanique, hydrogéologique, tensionnel etc.) dans des tronçons à comportement homogène.

A l'exception des tronçons d'entrée et des tronçons à bas recouvrement, nous avons recouru à la méthode des "lignes caractéristiques" pour définir, en fonction des caractéristiques géomécaniques des massifs et des états tensionnels en jeu (recouvrements), le type de comportement du front et de la cavité. Conformément aux indications du manuel de conception d'Italferr, nous avons donc procédé à définir le long de tout le tracé, les tronçons où :

- le noyau au front et la cavité résultent stables. Sur la base du calcul avec les lignes caractéristiques, tant le noyau de terrain au front que le massif autour de la cavité résultent contraints en champ élastique
- le noyau au front est stable à court terme, la cavité est instable. La figure 6 montre bien que dans le cas B, tant le noyau que la cavité sont contraints en champ élastoplastique

- le noyau au front et la cavité sont instables. C'est le cas où la ligne du noyau ne rencontre pas celle de la cavité au front ou alors elle la rencontre avec des déformations incompatibles avec les caractéristiques résiduelles du terrain concerné.

Il résulte de cette analyse que 27% du tracé se développe dans des massifs qui restent, au moment de l'excavation, contraints en champ élastique, 53% du tracé sera vraisemblablement intéressé par des phénomènes de déformation qui évolueront en champ élastoplastique et exigeront des interventions immédiates de confinement sur le contour de la cavité. Enfin, 20% du tracé se caractérisera par des phénomènes d'instabilité manifestes dès le front de taille, qui devront être résolus en amont du front même pour amener artificiellement la situation vers la stabilité

Phase de thérapie : définition des interventions de stabilisation; compilation des sections type et distribution de ces sections le long du tracé

Sur la base des analyses effectuées dans la phase de diagnostic précédente, les interventions les plus appropriées ont été retenues pour résoudre les principaux problèmes statiques et de construction pour chaque tronçon défini "à comportement géomécanique homogène", en tenant notamment compte des caractéristiques hydrogéologiques, minéralogiques et donc rhéologiques.

La figure 7 présente les principales sections type regroupées en fonction des catégories de comportement par rapport au front de taille.

Une ou plusieurs sections type ont donc été définies pour chaque tronçon homogène, appropriées aux conditions prévisibles du massif.

En plus des sections principales, (autrement dit prédominantes), nous avons choisi des sections subordonnées à appliquer au niveau des situations statistiquement probables mais dont l'emplacement ne résulte pas prévisible sur la base des données à notre disposition.

Les sections prédominantes et les sections subordonnées sont définies d'une manière univoque dans la mesure où pour chacune d'elles, nous décrivons la typologie détaillée, l'intensité, les phases et les cadences de mise en oeuvre des interventions et de plus, nous définissons très clairement les conditions géologico-géomécaniques où la section doit être appliquée.

A titre d'exemple, la Fig. 8 présente la synthèse de toutes les évaluations liées à l'application d'une section type C dans les terrains entre semi-cohérents et incohérents. D'une manière générale nous tenons à souligner que pour chaque formation, seules certaines interventions retenues appropriées aux caractéristiques du massif rocheux ou du terrain sont admises. Nous soulignons également le besoin de définir la position - par rapport au front de taille - à laquelle doivent se placer les différentes interventions structurelles (préconfinement, prérevêtement, radier, etc.) qui vont composer la section finale du tunnel (fig. 9). Nous voyons également comment évaluer l'effet de la consolidation sur le plan de Mohr. Nous montrons enfin qu'à travers les lignes caractéristiques de la cavité et du noyau, il est possible de calculer les pressions de stabilisation de la cavité nécessaires à garantir la stabilité à long terme de l'ouvrage.

Phase de vérification : projet de monitoring pendant les travaux et dans la phase d'exploitation

Feront l'objet de monitoring au cours des travaux :

- les fronts de taille des tunnels à travers des relevés géomécaniques systématiques des massifs présents sur le front de taille. Les relevés, effectués selon les standards de l'ISRM seront utiles pour avoir une première référence concernant les caractéristiques du massif à confronter avec celles prévues au niveau du projet
- le comportement de déformation du front. En fonction des différentes catégories de comportement nous prévoyons des mesures d'extrusion du front superficielles et profondes. Les mesures superficielles seront effectuées avec des systèmes optiques de précision à travers l'application de 6 ÷ 9 mires topographiques sur le paramètre du front de taille, qui seront lues au cours des arrêts des opérations d'avancement par exemple en concomitance avec l'exécution du radier ou du préconfinement du front. Les mesures profondes seront quant à elles effectuées avec des extrusomètres introduits longitudinalement à l'axe du tunnel pour 2 Ø au moins et des lectures front arrêté aussi bien qu'en phase d'avancement.
- le comportement en déformation de la cavité à travers des mesures de convergence. Les stations de convergence sont prévues tous les 30 mètres dans les tronçons à comportement type C, tous les 50 mètres dans les tronçons à comportement type B et tous les 100 mètres dans les tronçons à comportement type A
- le comportement tensionnel de l'ensemble massif-revêtement à travers des cellules de pression à placer au contact terrain revêtement et à l'intérieur du revêtement même,

celui de la première phase aussi bien que le définitif. Toutes les cellules de pression seront dotées de systèmes d'acquisition automatiques qui seront gardés en phase d'exploitation.

Dans la phase de l'exploitation, tous les instruments déjà utilisés au cours des travaux seront reliés à des systèmes d'acquisition automatique. Leur emplacement est reproduit sur la figure 10.

A tout moment de la vie de l'ouvrage, le système d'acquisition pourra être interrogé pour recevoir les données recueillies et vérifier le comportement réel de l'ouvrage en le confrontant avec ce qui a été prévu au niveau du projet.

Une dernière précision enfin. Le projet contient le champ de variation des déformations sur le contour de la cavité (extrusions et convergences) attendues pour chaque tronçon à la suite de l'application des sections type prévues. Au cours des travaux, ce sont les résultats du monitoring qui guideront le projeteur, la Direction des Travaux et la Haute Surveillance sur l'utilité d'aller de l'avant avec la section prévue ou de modifier éventuellement certaines quantités de travaux (selon les critères indiqués dans le projet) adoptant une section type différente mais toujours prévue par le projet dans le tronçon examiné ou encore de passer à la conception d'une nouvelle section type pour faire face à des situations particulières non définies au niveau de la recherche et non prévues par le projet.

Cette approche permet de maîtriser la nature aléatoire liée aux ouvrages souterrains avec un contrat rigoureusement forfaitaire, cas du contrat passé entre CAVET et TAV.

4. CONCLUSIONS

Dans l'espace inévitablement trop court de cet exposé, nous avons voulu tracer un tableau le plus complet possible des événements historiques, des problèmes contractuels et conceptuels d'une infrastructure que nous considérons, pour les raisons maintes fois évoquées, emblématique d'une tendance au renouveau du mode d'entendre les grands projets d'ingénierie civile en Italie.

Pour conclure, qu'il nous soit permis de parler de ce qui est à notre avis l'élément technique qui caractérise le mieux le processus conceptuel utilisé pour les ouvrages souterrains qui représentent, nous l'avons vu, l'aspect le plus important de la nouvelle liaison ferroviaire Bologne-Florence.

L'adoption de l'approche conceptuelle basée sur l'analyse des déformations contrôlées dans les roches et dans les sols - ADECO-RS - qui a remplacé les méthodes d'observation habituelles nous a permis d'entamer les travaux sur la base d'un projet complet et détaillé ainsi que la signature d'un contrat de type forfaitaire avec des délais et des coûts bien définis. Dans le contexte géologique complexe et hétérogène des Apennins, particulièrement difficile à caractériser préalablement, même à travers des recherches très approfondies, la réalisation de cet objectif aurait été sans cela difficilement imaginable.

Conscients qu'une amélioration constante des méthodologies de conception peut et doit en tout état de cause se poursuivre, nous estimons que l'expérience en cours représente une occasion unique pour nous perfectionner davantage encore.

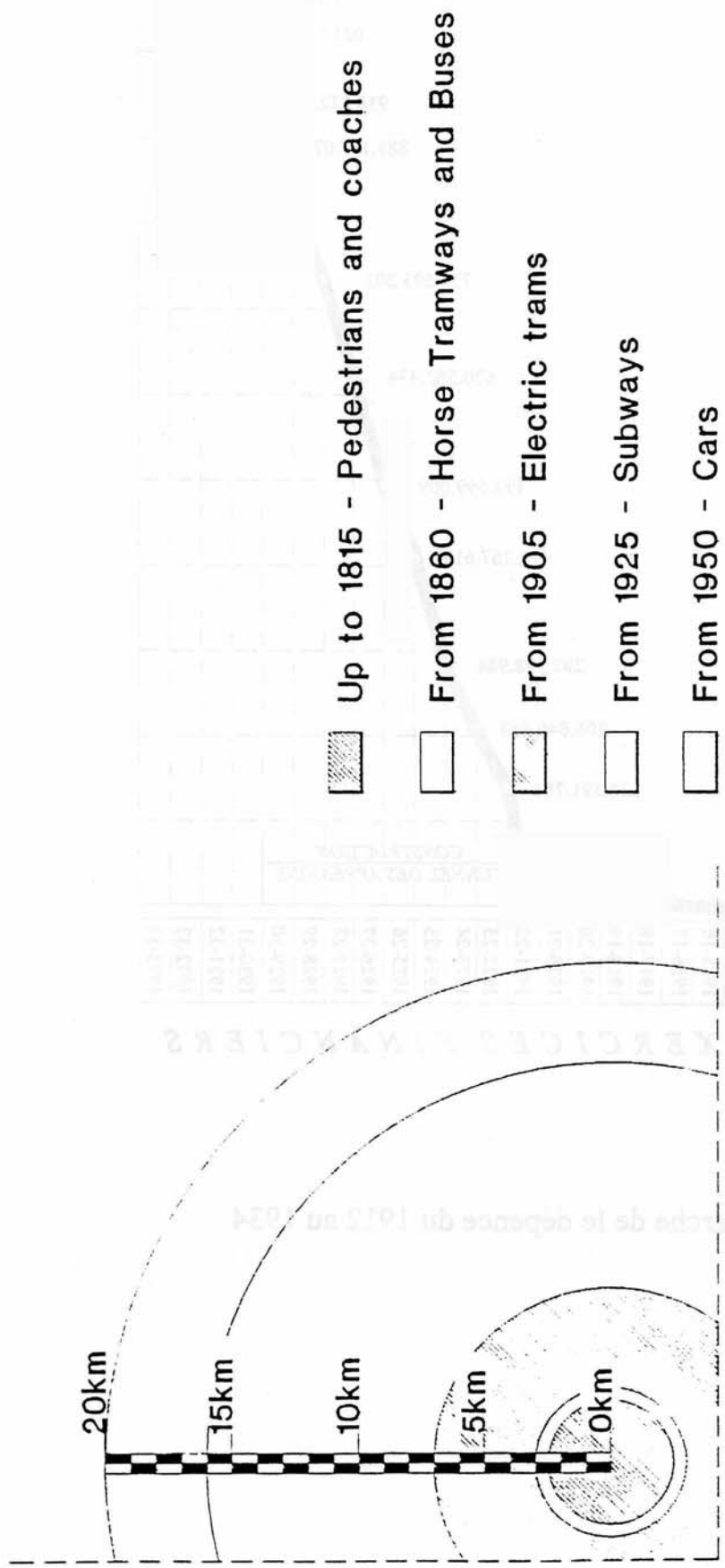
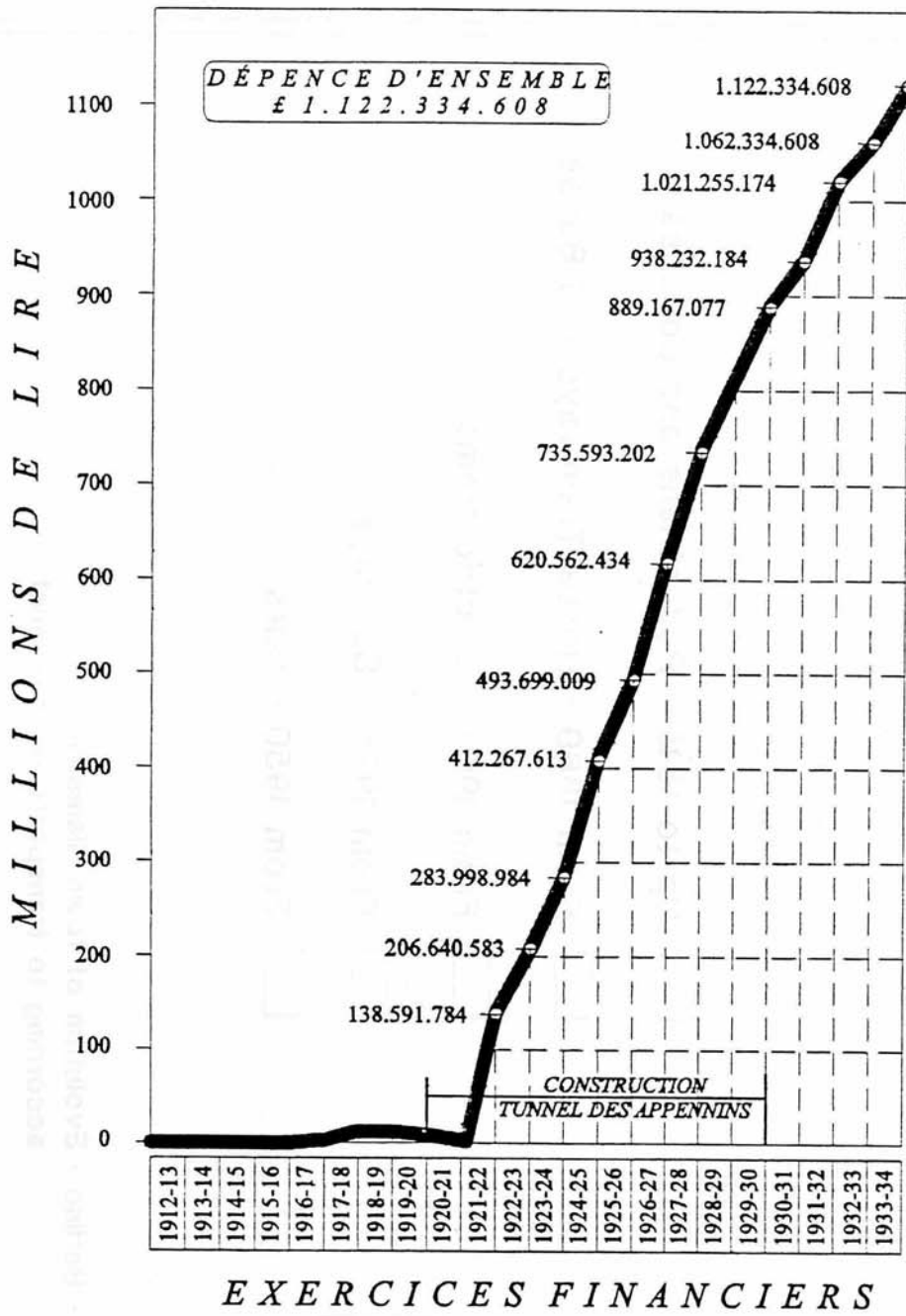


Fig.0 - Berlino - Evolution of town diameter according to transports development



Lé marche de le dépence du 1912 au 1934

Fig. 1

LIAISON TRANSAPENNINE BOLOGNE - FLORENCE

TRAVERSÉE FERROVIAIRE LIGNES "PORRETTANA" 1864, "DIRETTISSIMA" 1864, "PORRETTANA" 1864, "GRANDE VITESSE 1996

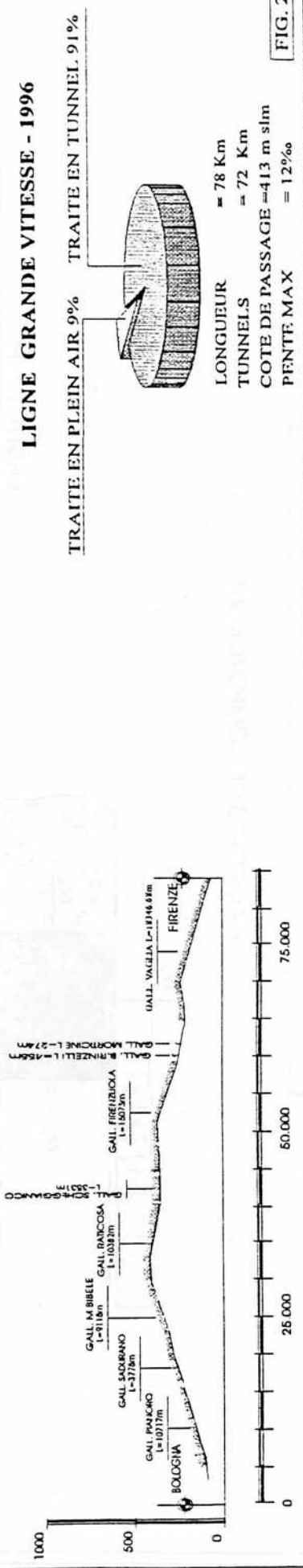
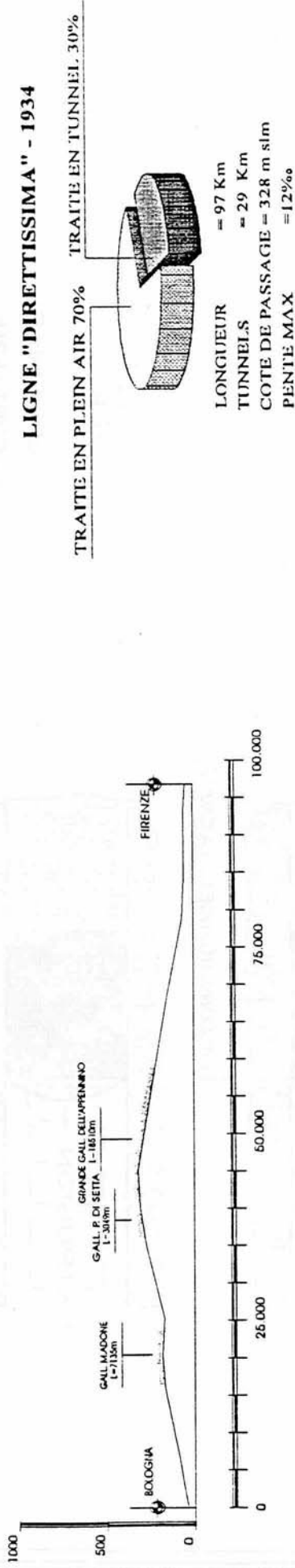
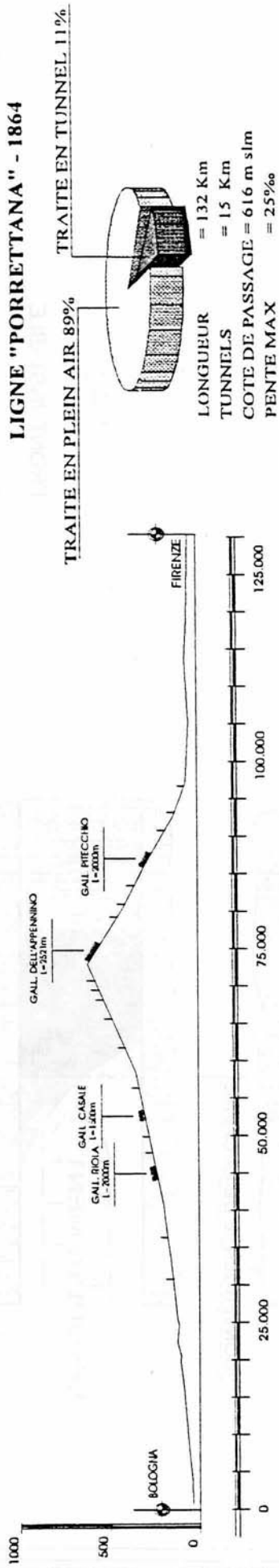


FIG. 2

CONCEPTION ET EXECUTION DES TUNNELS
SYSTEME ADECO-RS

CATEGORIES DE COMPORTEMENT

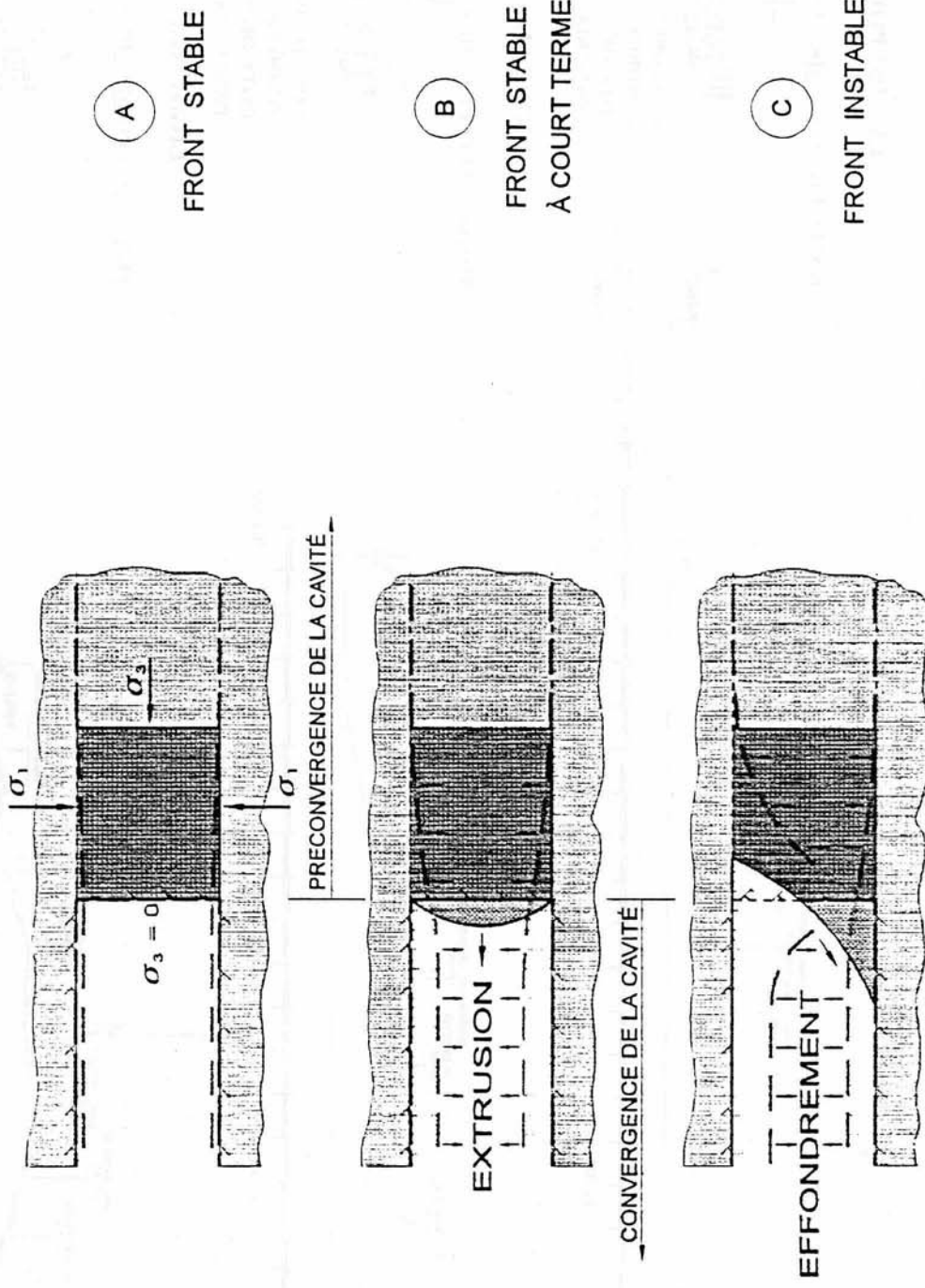
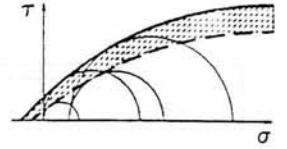


FIG. 3

CONCEPTION ET EXECUTION DES TUNNELS SYSTEME ADECO-RS

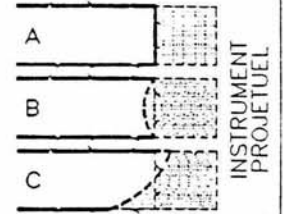
PHASE DE RECONNAISSANCE

CARACTÉRISATION DU MILIEU
en termes de mécanique des roches et des sols



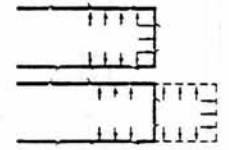
PHASE DE DIAGNOSTIC

DÉTERMINATION DES CATÉGORIES
DE COMPORTEMENT (A,B,C)
fondée sur la prévision de la stabilité du noyau
d'avancement par méthodes mathématiques
en absence d'interventions de stabilisation

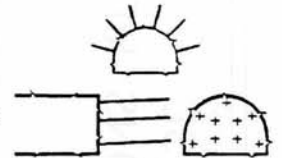


PHASE DE THERAPIE

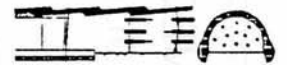
CHOIX DE L'ACTION DE CONFINEMENT OU DE
PRÉCONFINEMENT À EXERCER
dans le cadre des catégories de comportement (A,B,C)



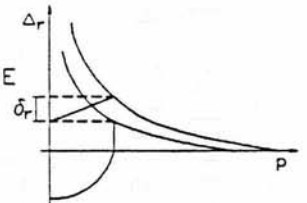
CHOIX DES INTERVENTIONS DE CONFINEMENT ET
PRÉCONFINEMENT
fondé sur les récents progrès en champ technologique



COMPOSITION DES SECTIONS TYPE
longitudinales et transversales

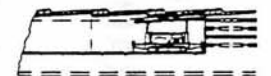


DIMENSIONNEMENT ET VERIFICATION DES SECTIONS TYPE
en termes de convergence-confinement,
extrusion-confinement et extrusion-préconfinement



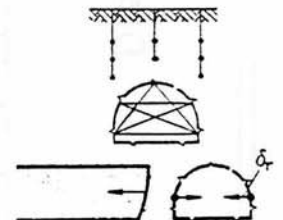
PHASE DE OPERATIONNELLE

MISE EN OUVRE DES INTERVENTIONS DE STABILISATION
en termes de confinement et preconfinement



PHASE DE VERIFICATION

CONTRÔLE DE LA EXACTITUDE DES EVALUATIONS FAITES
EN PHASE DE DIAGNOSTIC ET DE THERAPIE
par la lecture des phénomènes de déformation
comme réponse du milieu durant
l'avancement des excavations

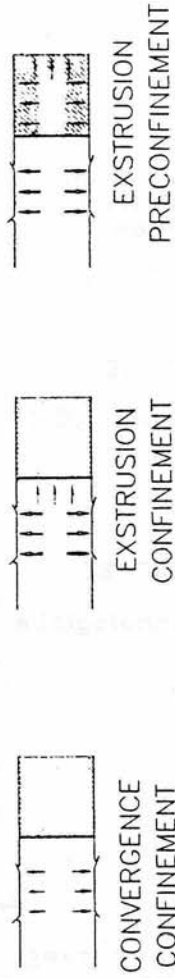
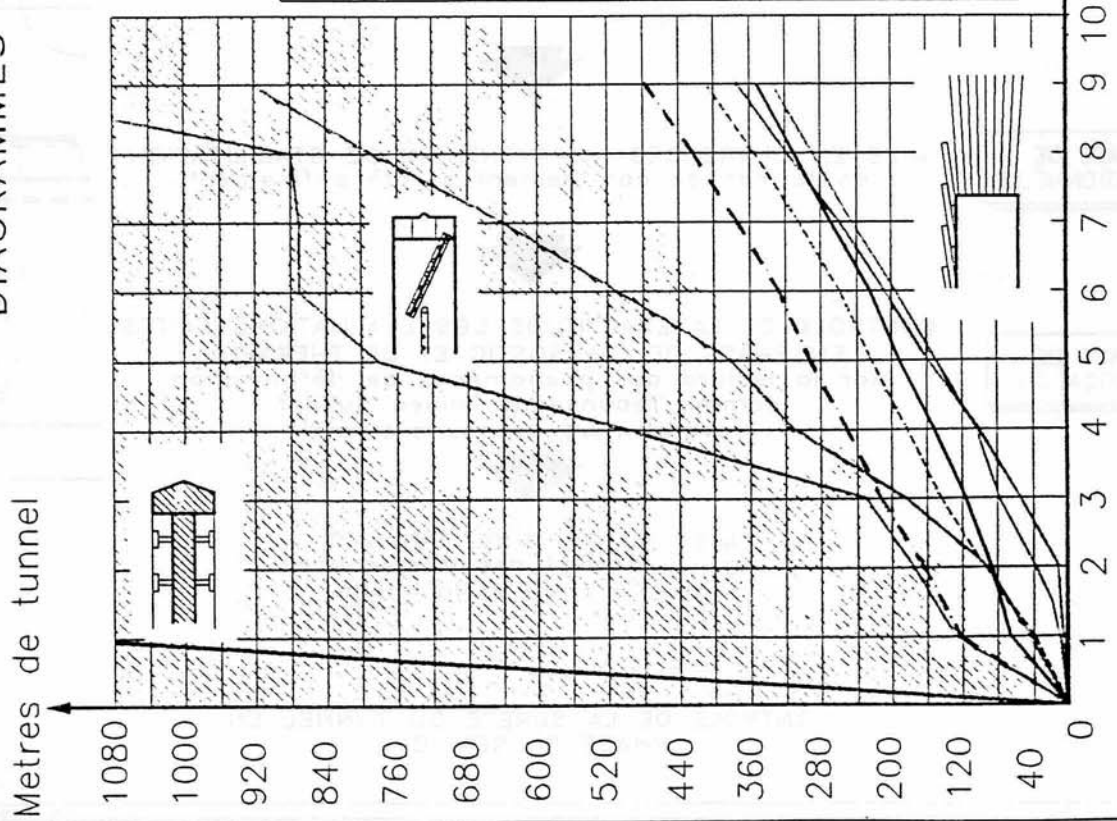


MISE AU POINT DU PROJET
par équilibrage des intervention
entre le front et la cavité

CONTRÔLE DE LA SÛRETÉ DU TUNNEL EN
PHASE DE SERVICE

FIG. 4

CREUSEMENT MECANISE DIAGRAMMES DES PRODUCTIONS MENSUELLES

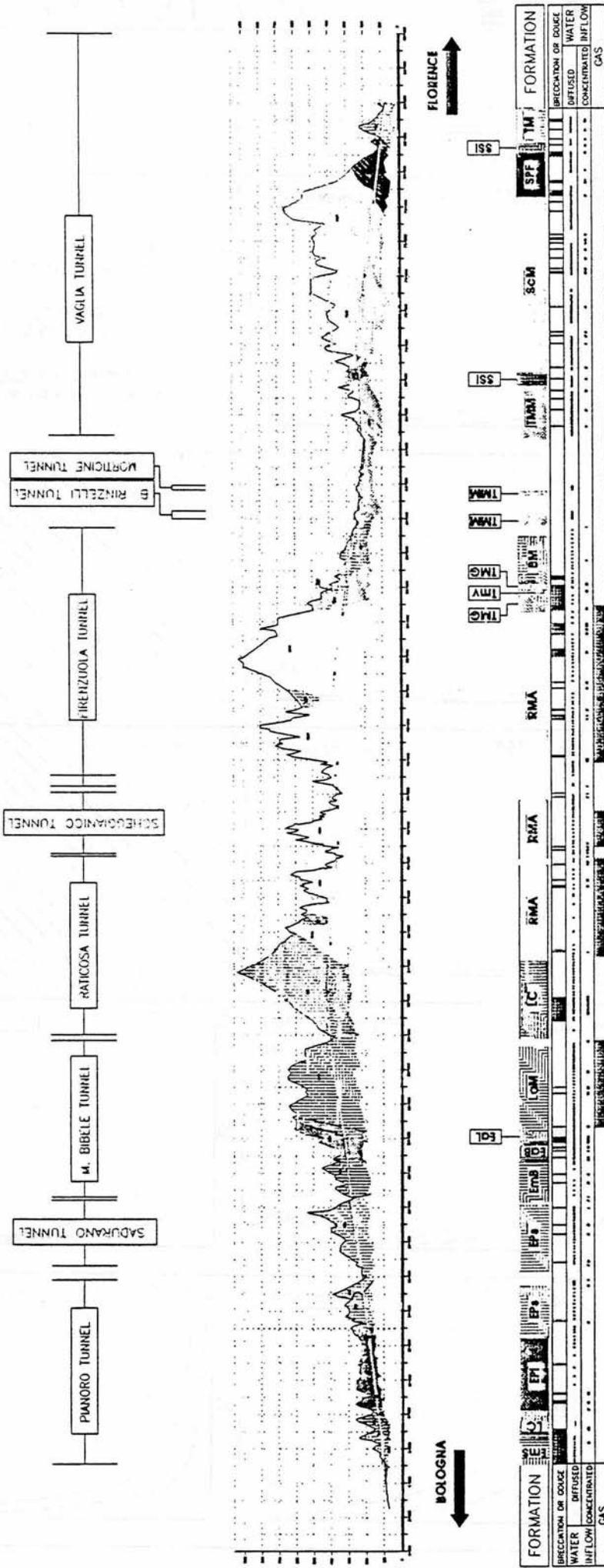


TRAVAIL	Ø [m]	TERRAIN	TECHN. DE CREUS.	PRODUCT. [m/j]	
				MOYENNE	MAX
— T. PRATO TIRES (F.S.)	3.5	PORPHIRE	TBM	35	80
— LIGNE FERROV. DU METRO DE MILAN (F.S.)	8	SABLE ET GRAVIER	BOUCLIER EPB	5.3	22
— METRO DE ROME	10.64	HETEROGENE DE LES SABLE À LE ARGILES	BOUCLIER HDS	4.0	5.5
— T. CAMPIOLO (F.S.)	12.20	EBOULIS DE PENTE	J.G.H.	1.7	2.5
— TUNNELS LIGNE FERROV. SIBARI COSENZA (F.S.)	10.50	ARGILE	PREDECOPPAGE MECANIQUE	2.3	3.2
— TUNNELS LIGNE FERROV. FLORENCE AREZZO	12.20	ARGILE	PREDECOPPAGE + VTR	2.0	3.2
— T. S. VITALE (F.S.)	12.50	ARGILE	VTR + VTR	1.6	2.4
— T. VASTO (F.S.)	12.20	SABLE LIMONEUSE LIMON ARGILEUX	JG + VTR	1.8	2.3

FIG. 5

BOLOGNA-FIRENZE HIGH SPEED RAILWAY

SURVEY PHASE



GEOLOGICAL KEY

- SUCCESSIONE TOSCANA AUTOCTONO**
- TMM - Macigno del Mugello
 - TM - Macigno
 - TMY - Marne varicolori
 - TMO - Formazione di Castel Guerino
- SUCCESSIONE SUBLIGURE ALLOCTONO**
- SPF - Pietra forte
 - SM - Formazione di Sillano
 - scM - Formazione di Monte Morello ("olberese")

- SUCCESSIONE LIGURE**
- LC - Complesso coaiolo
 - LOM - Formazione di Menghidoro
- SUCCESSIONE UMBRO-ROHAGNOLA**
- RMA - Formazione marnoso-arenacea
- BACINI ESTENSIVI**
- BM - Bacino del Mugello

- SUCCESSIONE EPILOGURE EMIANA**
- EMB - Formazione di Bismantova (faccie marnose)
 - Ecl - Formazione di Loiano
 - EcB - Formazione di Bismantova (faccie arenacee)
 - EPs - Pliocene intrappenninico superiore
 - EPi - Pliocene intrappenninico inferiore
 - EmS - Marne in facies di Schlier

PREVISION DE COMPORTAMENT DE LA CAVITE

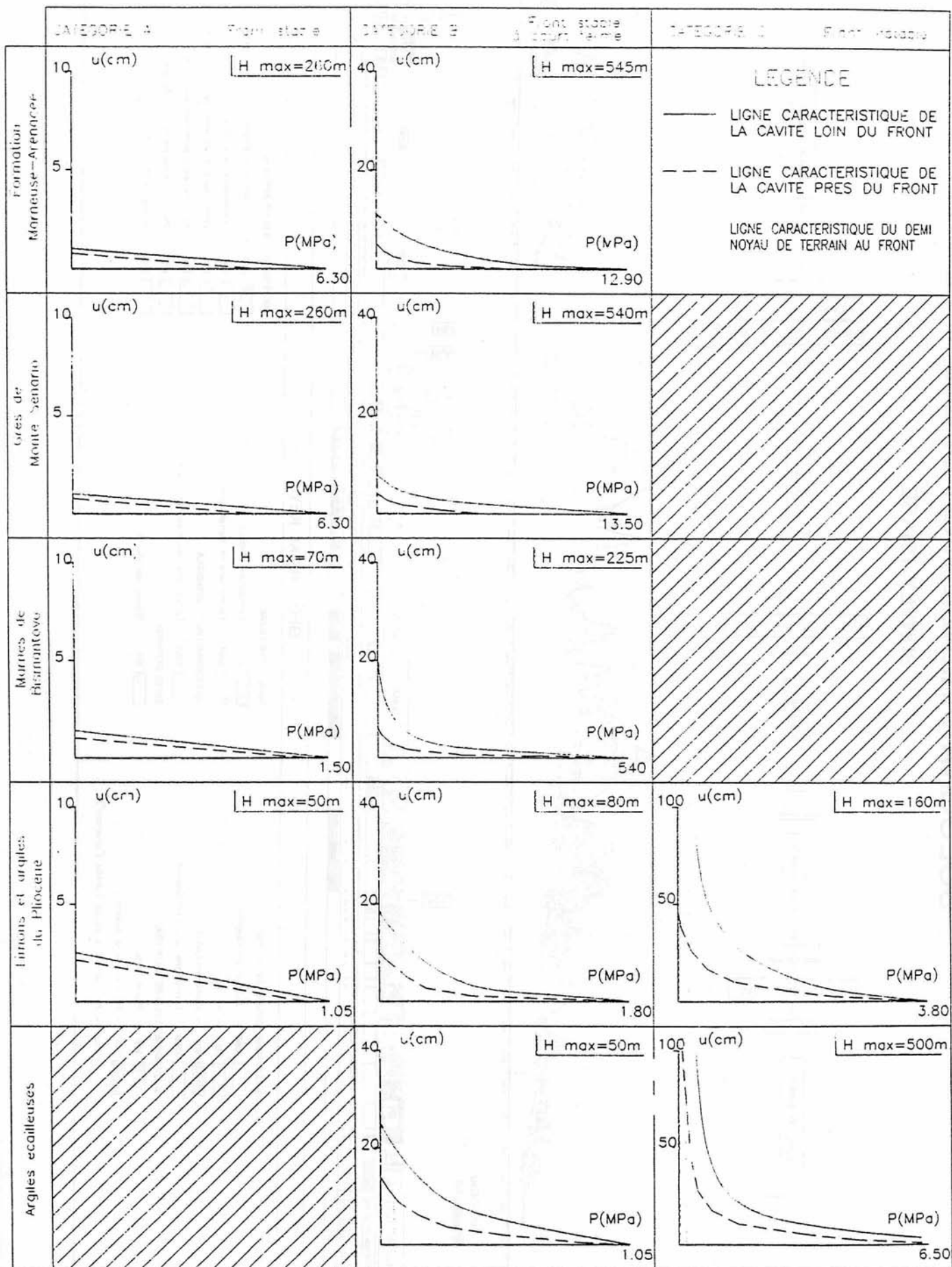


FIG. 7

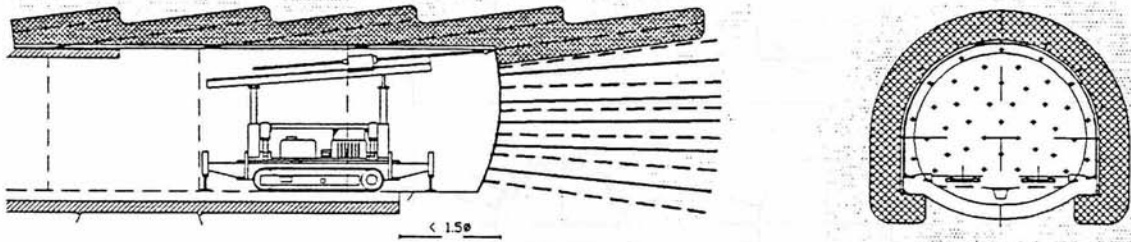
	PROFIL LONGITUDINAL	PHASE DE AVANCEMENT	DANS RIVETEMENT DEFINITIF
Ⓐ TYPE A6			
Ⓑ TYPE B0			
Ⓒ TYPE B1			
Ⓓ TYPE B2			
Ⓔ TYPE B3			
Ⓕ TYPE C1			
Ⓖ TYPE C2			
Ⓗ TYPE C3			
Ⓖ TYPE C5			

LEGEND INTERVENTIONS DU CONSOLIDATION	
	Profil du creusement
	Spritz-beton et Cintres
	Boulons
	Tubes en VTR
	+ Drainages
	Revêtement définitiv, Radier
	Pré-découpage
	Jet-grouting
	Consolidation au contour de la cavité

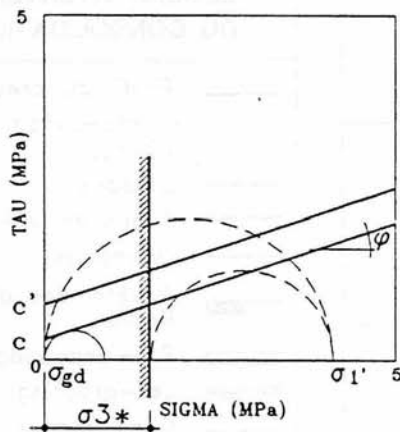
Fig. 8

PHASE DE THERAPIE

SECTION TYPE C AVEC PRECONSOLIDATION PERIMETRAL PAR INJECTIONS



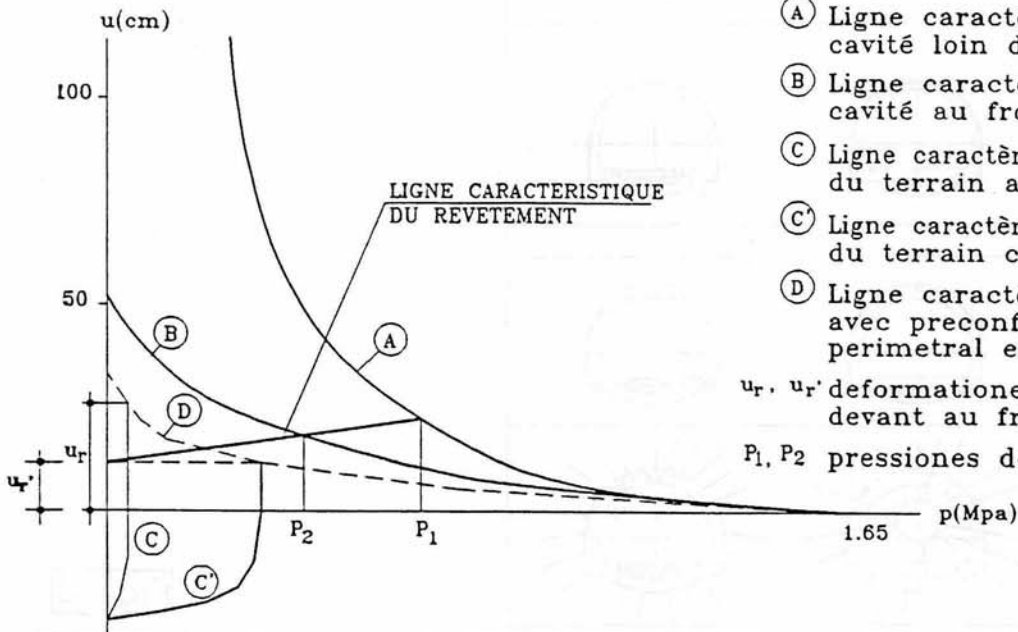
COURBE INTRINSEQUE DU MASSIF



— Courbe intrinsèque
du massif
- - - Ligne conservation

c Cohésion
 c' Cohésion développer du preconsolidation
 ϕ Angle de frottement
 σ_{gd} Résistance compression simple
 σ_1' Centrainté du massif
indoit du creusement
 σ_3^* Action de preconteniment produit
du preconsolidation

LIGNES CARACTERISTIQUES DU TUNNEL



- (A) Ligne caractéristique de la cavité loin du front
- (B) Ligne caractéristique de la cavité au front
- (C) Ligne caractéristique du demi noyau du terrain au front
- (C') Ligne caractéristique du demi noyau du terrain consolidé au front
- (D) Ligne caractéristique de la cavité avec preconfinement perimetral en avancement

u_r, u_r' deformations déjà avvenu devant au front

P_1, P_2 pressiones de stabilisation

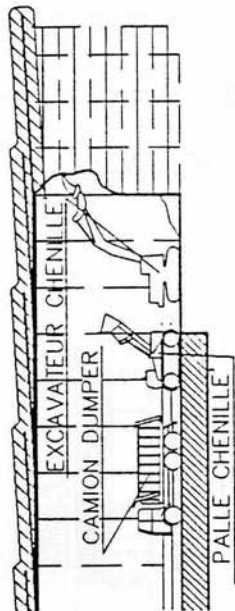
CONCEPTION ET EXECUTION DES TUNNELS
SYSTEME ADECO-RS

THERAPIE

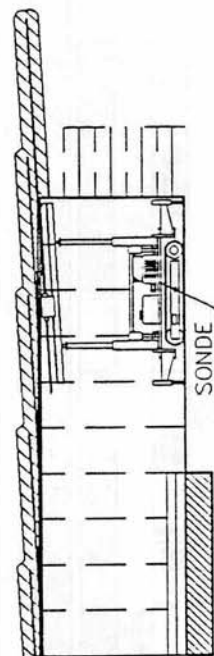
CREUSEMENT A PLEINE SECTION AVEC PRECONSOLIDATION PAR INJECTIONS EN AVANCEMENT

Phases executives

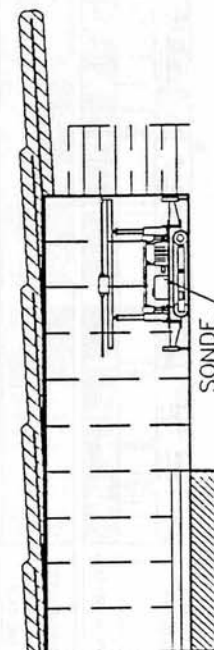
PHASE 3 - CREUSEMENT AU AVANCEMENT



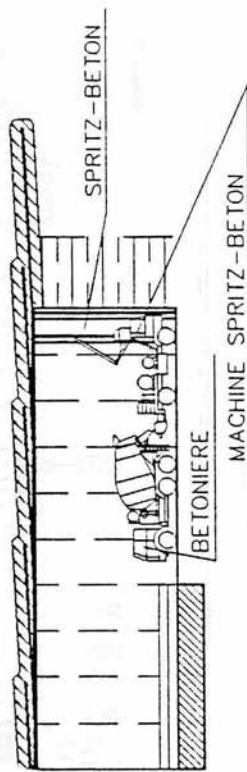
PHASE 2 - EXECUTION INJECTIONS



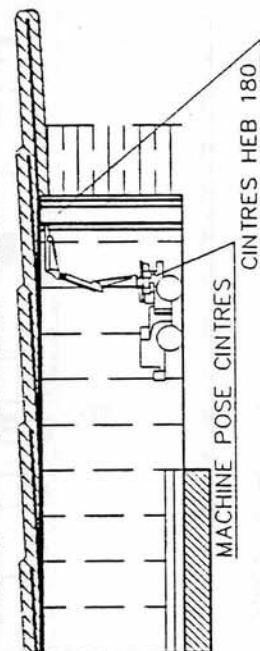
PHASE 1 - PRECONSOLIDATION DU NOYAU



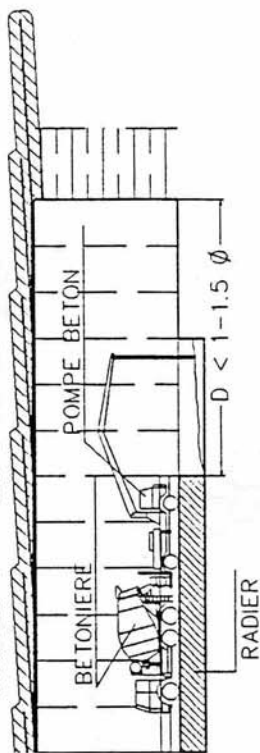
PHASE 5 - EXECUTION SPRITZ-BETON



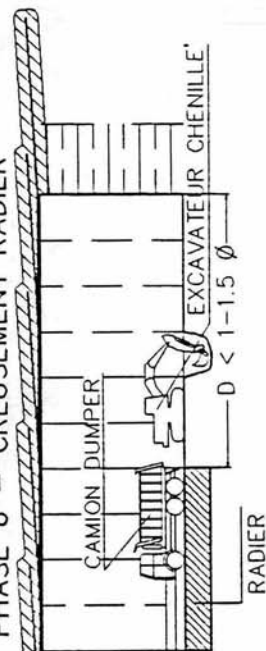
PHASE 4 - POSE DES CINTRES



PHASE 7 - BETONNAGE RADIER



PHASE 6 - CREUSEMENT RADIER



PHASE 8 - MISE EN OUVRE IMPERMEABILISATION EN PVC ET EXECUTION REVETEMENT FINAL

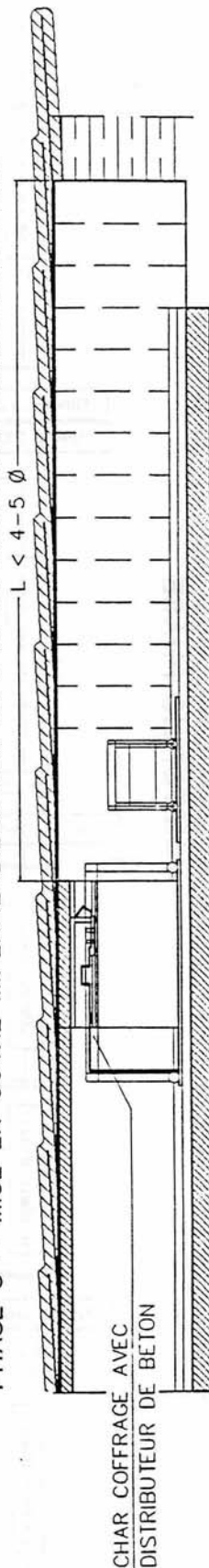
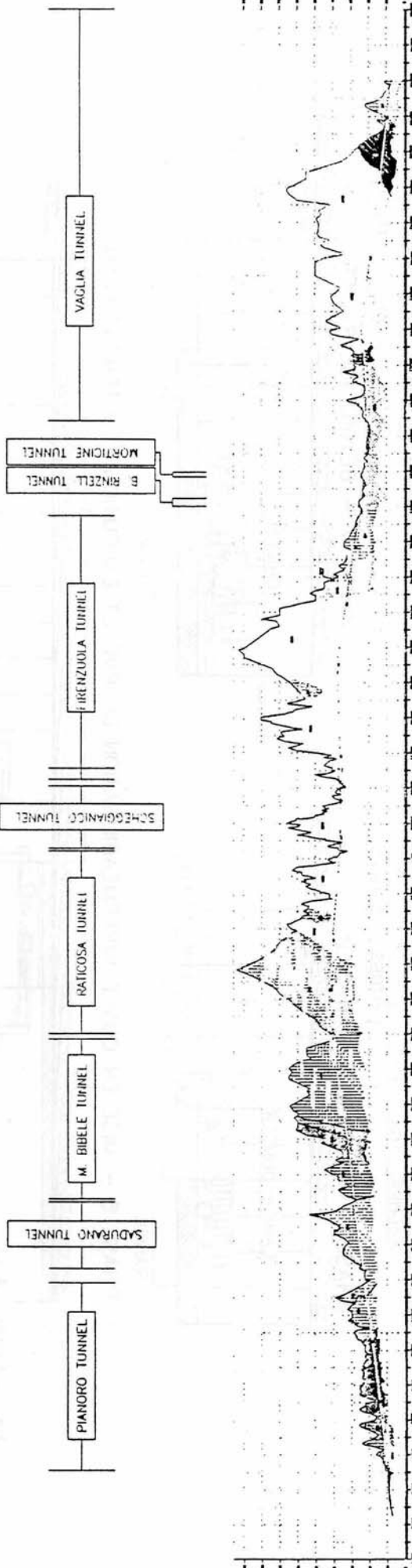


FIG.10

BOLOGNA-FIRENZE HIGH SPEED RAILWAY

MONITORING PHASE



FORMATION	DIRECTION OF COAGE		FORMATION	TYPICAL SECTION	CONVERGENCES	PLOTTINGS OF THE FACE	EXTRUSIONS PLOTTED BY SLIDING MICROMETRE	FINAL MONITORING STATIONS
	WATER INFLOW (CONCENTRATED)	WATER INFLOW (DIFFUSED)						
A	EP ₁	EP ₂	EP ₁	A			α	α
B	EP ₁	EP ₂	EP ₁	B			β	β
C	EP ₁	EP ₂	EP ₁	C			γ	γ
CONVERGENCES								
PLOTTINGS OF THE FACE								
EXTRUSIONS PLOTTED BY SLIDING MICROMETRE								
FINAL MONITORING STATIONS								
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> BOLOGNA ← → FLORENCE </div>								

Fig. 11