

la traboule

*Histoire d'une «taupe»
qui creuse des tunnels
pour le métro de Lyon*

207

Michel DUJARDIN
SEMALY

Tout le monde en parle mais peu de gens ont vu la «taupe», alias le tunnelier-avec-bouclier-à-pression-de-boue-bentonitique, à l'œuvre.

En attendant elle creuse. Sur ordre de la SEMALY, la Société d'économie mixte du métropolitain de l'agglomération lyonnaise, maître d'ouvrage délégué du Syndicat des transports en commun de la région lyonnaise, avant que celui-ci ne devienne le SYTRAL, le syndicat mixte des transports pour le Rhône et l'agglomération lyonnaise aux responsabilités plus étendues...

Ajoutons, pour faire simple, que la SEMALY est aussi le maître d'œuvre général du réseau du métro de Lyon exploité par les TCL, l'entreprise de transport public de la ville.

Le tunnelier, lui, creuse en terrain difficile la ligne nouvelle du métro de Lyon. Cette ligne D passera sous le Rhône, la Saône et sous la ligne A. Tout un programme.

Le réseau du métro de Lyon, qui comporte actuellement 3 lignes pour un total de 16 km, va être complété par une ligne nouvelle, la ligne D. Véritable épine dorsale ouest-est de l'agglomération lyonnaise, elle permettra, à sa mise en service en 1990, un doublement du trafic métro actuel, grâce à ses 13 stations réparties sur 11,2 km.

Le tronçon Guillotière-Saint-Jean

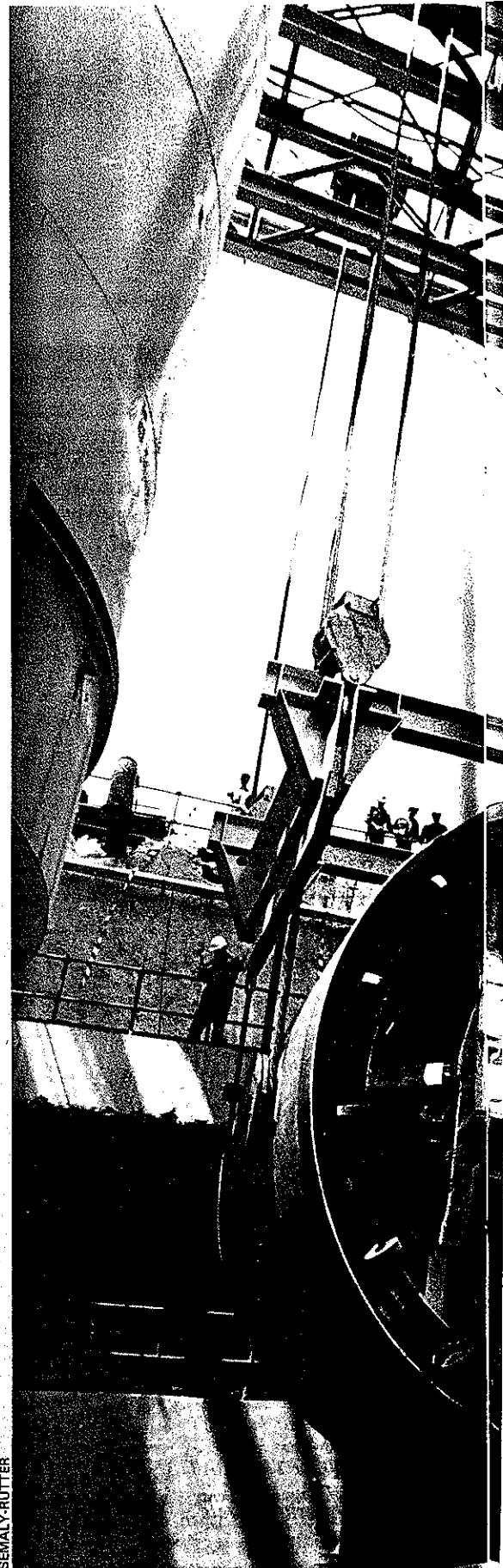
Les travaux de réalisation de cette ligne D ont un effet dynamique sur la recherche en génie civil. Ainsi, plusieurs techniques modernes sont expérimentées, la plus «révolutionnaire» étant sans conteste celle de la «TAUPE» (appellation courante) ou tunnelier avec bouclier à pression de boue bentonitique (nom scientifique).

Ces travaux au tunnelier ne concernent qu'une faible longueur de la ligne D, mais n'en constituent pas moins une partie des plus délicates par la variété des conditions naturelles rencontrées, tant géographiques, géologiques et hydrauliques qu'archéologiques.

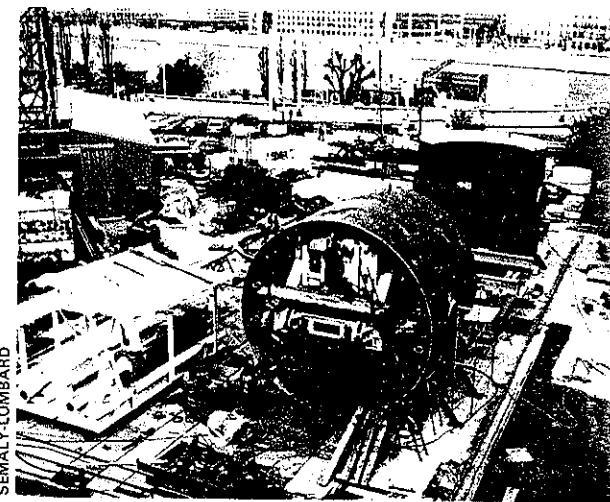
- **Géographiques**, car il s'agit de passer sous les fleuves Rhône et Saône, sous la ligne A du métro, et d'arriver devant la gare des funiculaires Saint-Just et Fourvière.
- **Géologiques et hydrauliques**, puisque les terrains alluvionnaires sont très perméables et pratiquement sans cohésion, avec présence de galets de grande dimension (blocs granitiques).
- **Archéologiques**, puisque le tracé se développe dans l'ancienne ville romaine et que toute intervention à ciel ouvert doit être précédée de fouilles archéologiques.

SEMALY-RUTTER

*La partie avant
du bouclier
au cours de son installation
dans le puits Cavenne
(puits de départ
du tunnelier).*



de l'an 2000



Le montage de la taupe.

La descente d'une partie du bouclier dans le puits Cavenne. On distingue les 15 vérins de 1,20 m de course utile, pour une poussée de 3 000 tonnes. Ainsi que l'entrée du sas à personnel (partie supérieure de l'engin).

Les résultats du concours international lancé par la SEMALY pour la réalisation de ce tronçon particulier entre les stations Guillotière et Saint-Jean, ont déterminé l'utilisation de ce nouveau procédé de forage, moins pénalisant pour l'environnement, et moins coûteux que des techniques traditionnelles (caissons immergés en fond de lit des fleuves ou déplacements de réseaux de services publics par exemple...).

Toutes les entreprises consultées ont donc présenté des solutions au tunnelier.

Qu'est-ce qu'un tunnelier ?

L'association cohérente de l'ensemble des matériaux nécessaires au creusement d'un tunnel constitue logiquement un tunnelier. Lorsque les terrains traversés baignent dans la nappe phréatique, et sont donc gorgés d'eau, il s'agit d'installer en tête de l'engin foreur un «bouclier», c'est-à-dire un dispositif de protection du personnel contre ce milieu semi-aquatique.

A Lyon, compte tenu des caractéristiques géotechniques du site*, la SEMALY a pris pour

* L'emploi de tunneliers en roches dures — type granitiques — et complètement hors d'eau est relativement fréquent, à l'étranger, comme en France, ou même à Lyon. Ainsi le tunnel entre les stations Hôtel de Ville et Croix-Paquet de la ligne C a été réalisé à l'aide de ce type d'engin. Mais la nature géologique du terrain est de structure complètement différente.

option d'utiliser pour la première fois en France — et même pour la première fois au monde — dans des terrains aussi grossiers avec une charge d'eau importante, un tunnelier avec un bouclier à pression de boue. Celui-ci, souvent comparé à une taupe par analogie à son travail en «aveugle», mesure 100 mètres de longueur, 6,50 m de diamètre et rassemble les fonctions suivantes :

- Attaque du front de taille (partie de terrain qui est à tailler par l'engin) par des pics disposés en toile sur un plateau porte-outils entraîné en rotation (1 à 2 tours/mn). Ces pics, d'une quinzaine de centimètres, peuvent être changés par l'arrière de la roue.
 - Evacuation des déblais par pompage hydraulique, c'est le marinage.
 - Pose du revêtement du tunnel en «béton extrudé» qui est un composé de ciment et de fibres d'acier en queue de bouclier.

La stabilisation des terrains traversés, y compris le front de taille, est assurée par le bouclier. Ce dernier est équipé d'une cloison étanche, la chambre d'abattage, en avant de laquelle se trouve une boue sous pression : la bentonite.

Histoire de boue et de bouclier

La bentonite est une argile naturelle. Elle doit son nom à l'endroit où l'on a découvert ses premiers gisements : Fort Benton au Wyoming (USA). Sa propriété «thixotropique», qui lui permet de se figer lorsqu'elle est au repos et de reprendre son état liquide lorsqu'on l'agit, lui vaut d'être retenue déjà depuis plusieurs années au cours des travaux de parois moulées.

Cette boue est installée sous pression dans la chambre d'abattage. Elle permet ainsi durant le creusement :

- de compenser et d'équilibrer la pression des terres au front de taille pour éviter l'éboulement de celui-ci ;
 - de contrebalancer la pression de l'eau de la nappe phréatique.

Pour maintenir une pression constante de bentonite dans la chambre, une réserve d'air comprimé fait office de ressort de stabilisation.

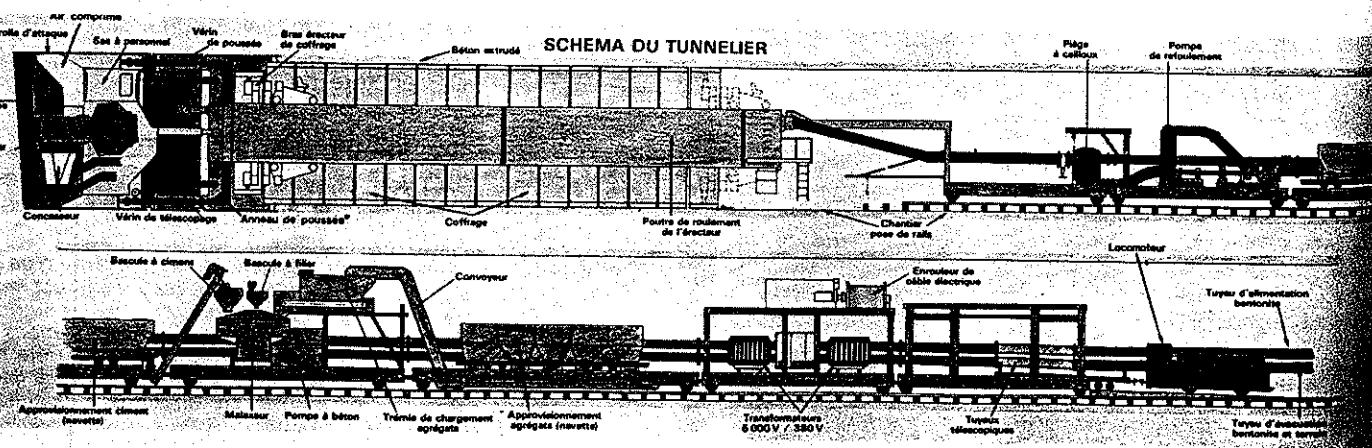
Le bouclier est une grande virole métallique divisée en trois tronçons : le premier tronçon est le plus exposé à l'usure du terrain. Son extrémité

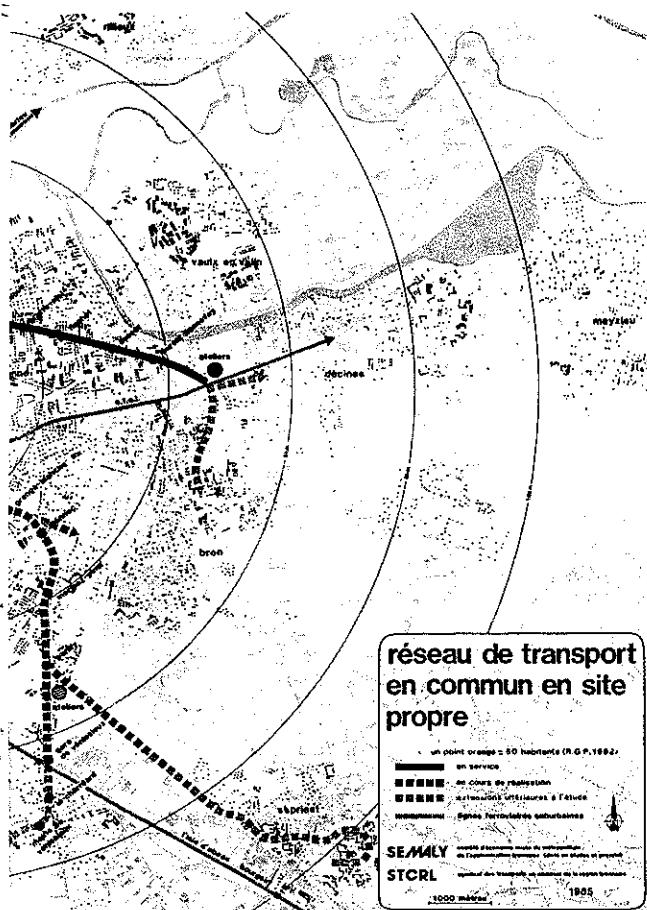
renforcée fait office de trousse coupante. La cloison qu'il comporte est fortement raidie pour reprendre jusqu'à 3,5 bars de pression dans la chambre d'abattage. Divers équipements sont fixés dessus (plateau de coupe, moteurs, sas à personnel, concasseur...).

Il est couplé au deuxième tronçon par une rotule hydraulique permettant de diriger le cheminement du tunnelier. La progression de cet ensemble se fait au moyen de quinze vérins de 1,20 m de course utile, développant une poussée totale de 3 000 tonnes.

En terrain rocheux cet effort de poussée est transmis par des patins latéraux avec force sur les parois de l'excavation. En revanche, en terrain meuble et aquifère, l'effort ne peut être mobilisé que par transfert sur le revêtement du tunnel que l'on construit à l'arrière du tunnelier. Le troisième tronçon est assemblé par télescopage et actionné par des vérins de traction.

Le schéma du tunnelier.





Le plan du réseau de transport en commun en site propre de Lyon.

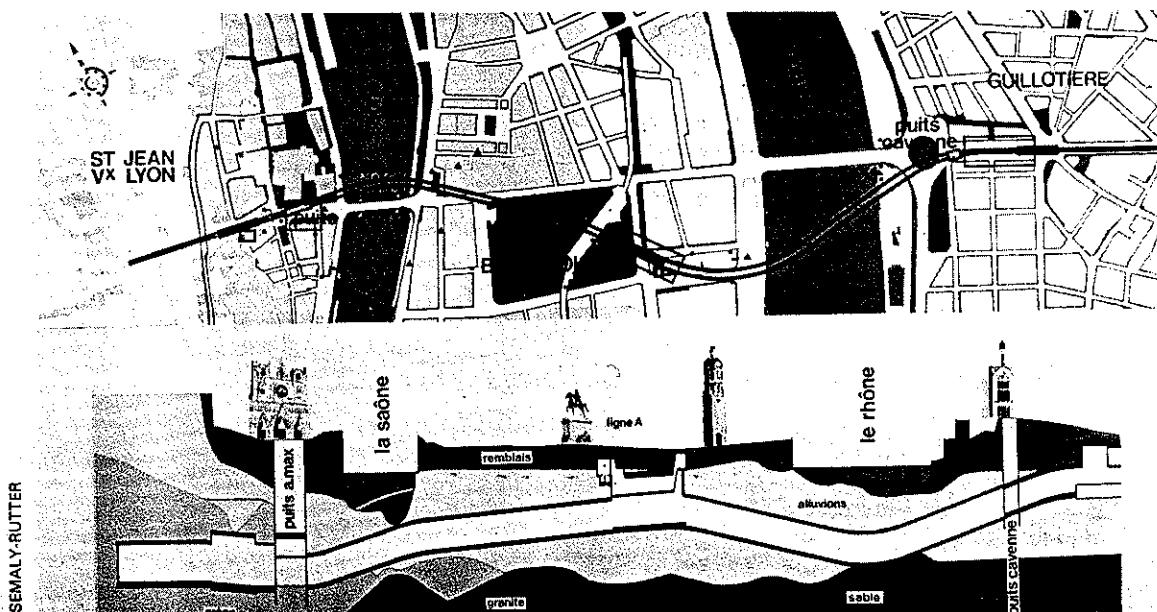
sont compatibles avec la montée en résistance du béton.

Le marinage par pompage hydraulique doit s'accommoder de toutes les conditions de terrains rencontrés, afin de ne pas freiner l'avancement du tunnelier. A l'abattage, les matériaux arrachés au front de taille tombent par gravité dans la boue de bentonite et sont entraînés vers l'extérieur par charriage dans les canalisations de marinage.

Pour les éléments non compatibles avec les canalisations, le plateau porte-outils est équipé de godets de reprise pour déverser les gros galets dans un concasseur afin de les briser en éléments inférieurs à 120 mm. Toutefois, certains blocs de très gros diamètre (supérieur à 400 mm) peuvent être admis dans ce concasseur.

Il est alors nécessaire de vider la chambre d'attaque de la bentonite qu'elle contient et d'y substituer de l'air comprimé pour pouvoir permettre au personnel d'aller les fracturer.

Le tronçon Guillotière St-Jean-Vieux-Lyon de la ligne D concerné par les travaux au tunnelier.



Bétonnage et marinage

Le revêtement du tunnel n'est pas constitué par l'assemblage de voussoirs préfabriqués (méthode classique) mais par le coulage de béton en place, à l'intérieur de coffrages intégrés au tunnelier. Tous les 1,20 m d'avancement, le dernier anneau de coffrage est transféré en tête de façon à permettre le bétonnage tout en télescopant le troisième tronçon de jupe.

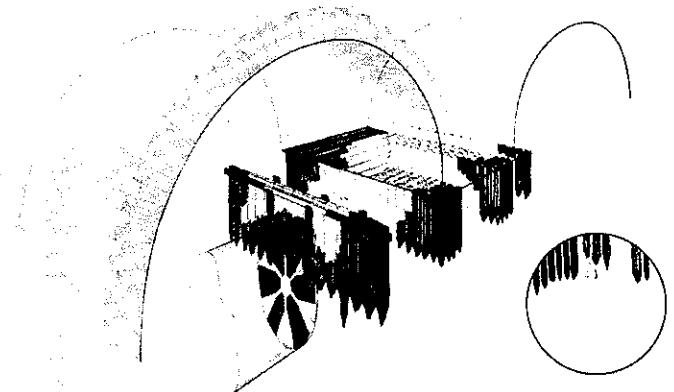
Le revêtement coulé en place est constitué de béton renforcé de fibres métalliques à raison de 45 kg/m³ de béton. Le nombre d'anneaux de coffrage et la vitesse d'avancement du tunnelier

La réalisation de l'ouvrage

Le chantier comprend l'exécution de deux tunnels, l'un après l'autre, (emploi d'un seul tunnelier), de 1 230 mètres de longueur, distants de 13 mètres d'entr'axe. La réalisation est assurée par une entreprise allemande (Hochtief) et trois entreprises françaises : Campenon Bernard, Colas et Dragages travaux publics (mandataire du groupement).

Les études et la fabrication du matériel spécifique à ces travaux se sont déroulées de 1982 à 1984. A l'issue du montage sur le site même du chantier, le 1er tour de roue du tunnelier a lieu

LE PONT DU ROSNE



Schématisation de la rencontre entre le tunnelier et les pieux de bois de l'ancien pont du «Rosne».

le 27 juillet 1984. Et depuis, 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, l'ouvrage du tube Nord prend forme. Après une période de rodage difficile à surmonter, la taupe réalise aujourd'hui les performances que l'on attendait d'elle (voire même les surpasse) : 7 mètres par jour d'avancement moyen.

Dès les premiers mètres, des pieux de bois d'un ancien pont du XII^e siècle provoquèrent des éboulements dans la chambre d'attaque. Ensuite, les premiers bétonnages n'étant pas très concluants, il fallut congeler le tunnel sur 10 mètres afin de renforcer le revêtement au moyen d'un blindage métallique (janvier 1985 : 43,17 mètres).

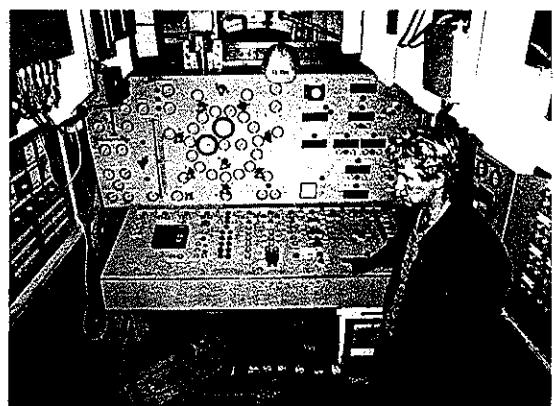
La rencontre de fosses comblées en 1953 par des produits de démolition provoquèrent quatre éboulements du front de taille, qui mettaient la chambre d'attaque en communication avec le Rhône.

Ces entonnoirs, appelés «fontis», apparus dans le lit du fleuve, furent colmatés, en jetant 10 000 sacs de sable et en déversant 1 000 m³ d'alluvions. Après injection du front de taille, la chambre d'attaque a été mise sous pression d'air comprimé, puis vidée manuellement. C'est ainsi que 1 200 gros blocs ont été évacués à travers le sas de décompression (juin 1985, 179,22 mètres).

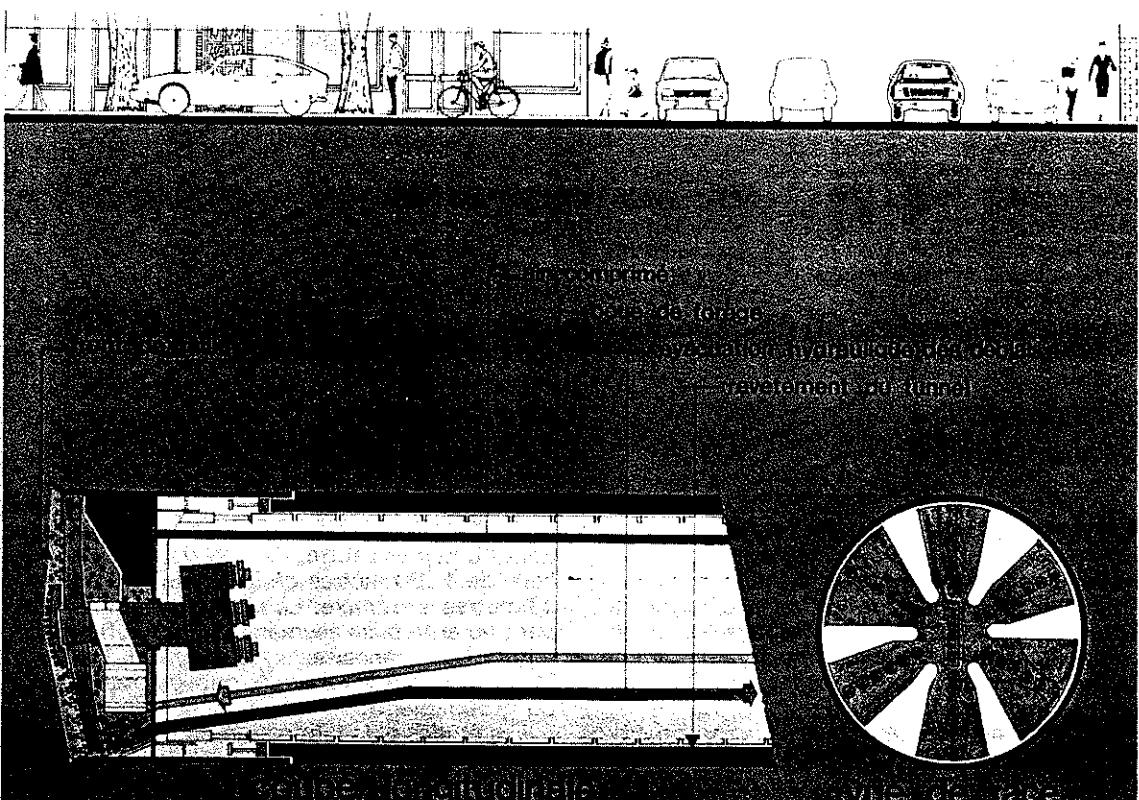
Le passage du point bas du Rhône s'effectue dans des conditions difficiles avec une faible couverture (c'est-à-dire, la bande de terrain comprise entre le lit du fleuve et le tunnelier) : rencontre de blocs granitiques et venues d'eau à l'arrière du bouclier.

Mais en ce point, la très forte perméabilité du sol interdit toute intervention dans la chambre d'attaque, car l'air comprimé s'échappe par les vides importants du terrain. Les blocs sont donc évacués manuellement par des plongeurs équipés de scaphandres autonomes intervenant dans la boue bentonitique sous pression. Des modifications du matériel de bétonnage sont apportées au mois d'août 1985, et le 24 octobre 1985 la rive droite est atteinte (octobre 1985 : 413,50 m).

Le pupitre de commande du tunnelier, situé entre la chambre d'abattage et la poutre de coffrage.

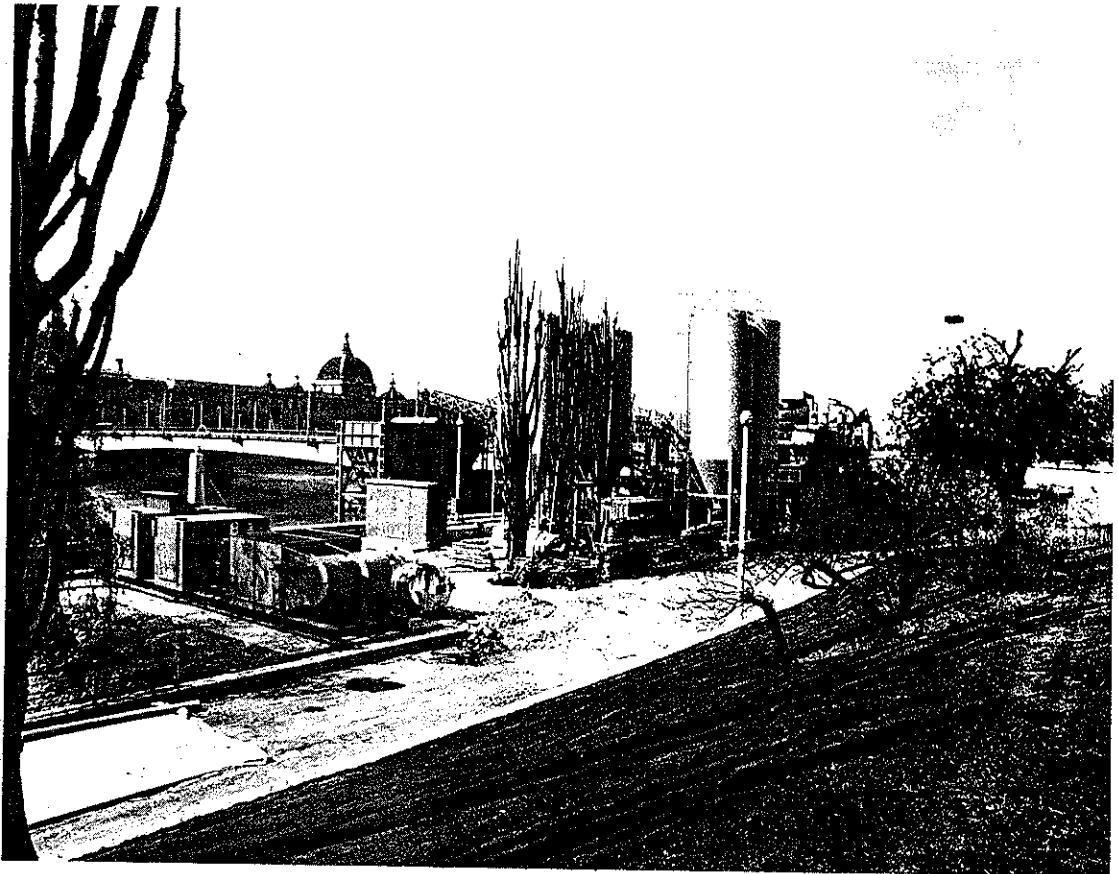


SEMALY-LOMBARD



SEMALY-RUTTER

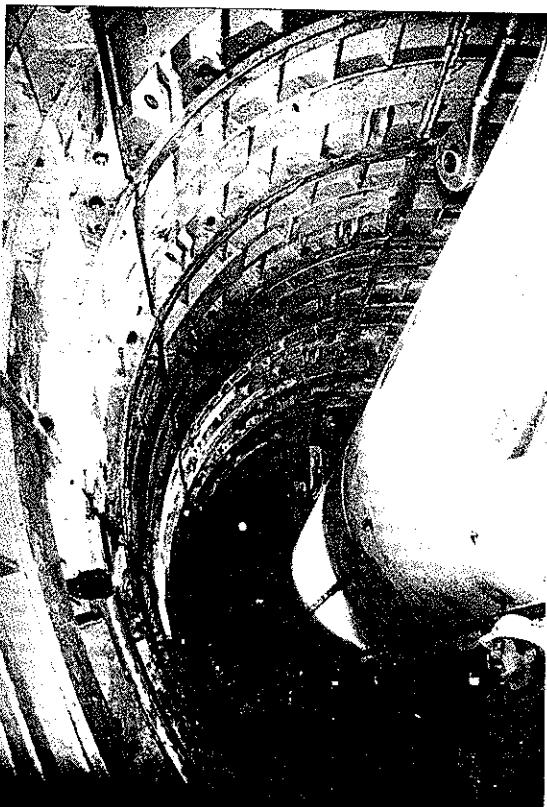
Le schéma du circuit de la bentonite.



SEMALY-RUTTER

Située sur les quais du Rhône, la centrale de production de la bentonite (débit 1100 m³/h) et de recyclage de cette dernière (où elle est cribleée, essorée et filtrée avant de retourner dans le circuit d'alimentation de la chambre d'abattage).

Les anneaux de coffrage : ils sont au nombre de 15, et chacun d'entre eux pèse 12 tonnes.



SEMALY-LOMBARD

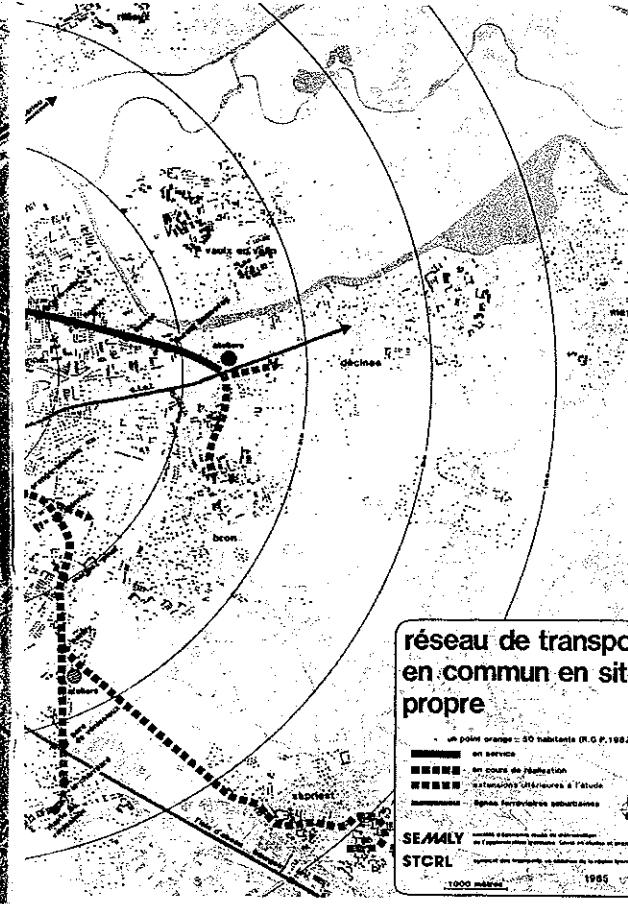
Lors du passage du massif injecté de la station Bellecour, on décèle une déformation de 12 cm de la jupe du bouclier, vraisemblablement provoquée par les rencontres successives d'amas de blocs sous le Rhône. C'est pourquoi, en décembre 1985, le bouclier est immobilisé pendant trois semaines pour renforcer la roue de coupe avec des outils au manganèse (décembre 1985 : 648,42 m).

La reprise de l'avancement en janvier 1986 permet l'achèvement de la traversée de la place Bellecour et 285 mètres sont réalisés dans le mois. Pour mémoire, 14 mois avaient été nécessaires pour creuser les 290 premiers mètres linéaires (janvier 1986 : 962,91 m).

Le franchissement de la Saône s'est effectué, quant à lui, dans des conditions plus difficiles. Le problème majeur se trouvait au fond du lit de ce fleuve où les protections des remblaiements, mises en place un an auparavant, avaient été enlevées par une crue et par le passage des bateaux. Une action similaire à celle de juin 1985 pour le Rhône a dû être alors entreprise : pose de sacs de sable dans la Saône pour assurer une couverture suffisante au tunnelier (mars 1985 : 1194,50 m).

Avril à Saint-Jean

Au mois d'avril, la fin du tunnel (le premier tout au moins) est atteinte. Le tube Nord terminé, il s'agit de démonter le tunnelier, pour le ramener jusqu'au puits de départ, afin d'effectuer le tube Sud. Cette phase transitoire entre les deux tunnels devrait se dérouler sur 4 à 6 mois. Mais d'ores et déjà l'histoire peut retenir que le Rhône et la Saône ont été franchis en «souterrain» : la traboule de l'an 2000 est née.



Le plan du réseau de transport en commun en site propre de Lyon.

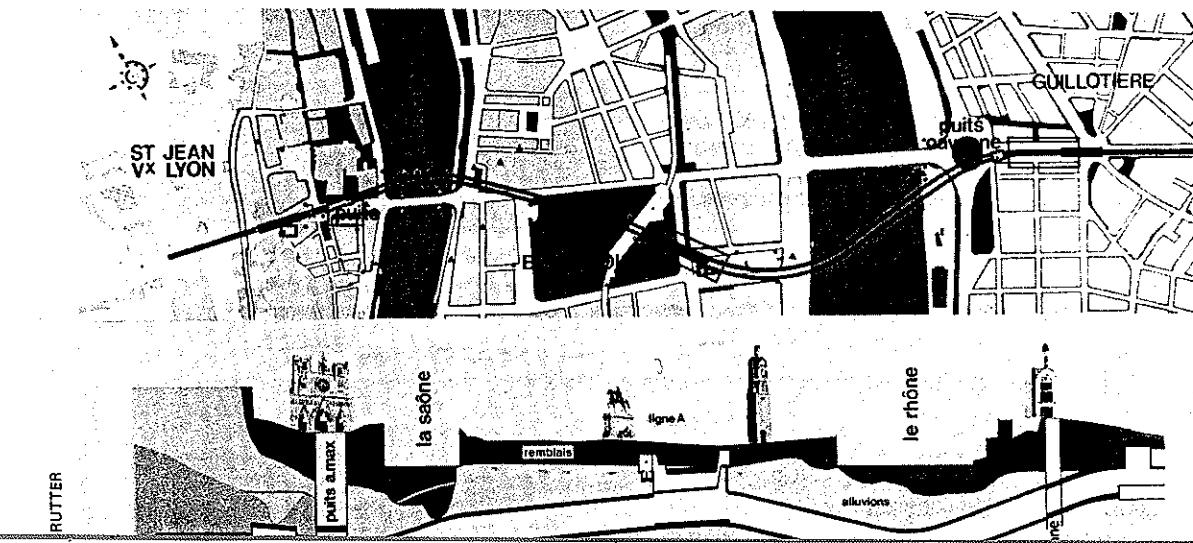
sont compatibles avec la montée en résistance du béton.

Le marinage par pompage hydraulique doit s'accommoder de toutes les conditions de terrains rencontrés, afin de ne pas freiner l'avancement du tunnelier. A l'abattage, les matériaux arrachés au front de taille tombent par gravité dans la boue de bentonite et sont entraînés vers l'extérieur par charriage dans les canalisations de marinage.

Pour les éléments non compatibles avec les canalisations, le plateau porte-outils est équipé de godets de reprise pour déverser les gros galets dans un concasseur afin de les briser en éléments inférieurs à 120 mm. Toutefois, certains blocs de très gros diamètre (supérieur à 400 mm) peuvent être admis dans ce concasseur.

Il est alors nécessaire de vider la chambre d'attaque de la bentonite qu'elle contient et d'y substituer de l'air comprimé pour pouvoir permettre au personnel d'aller les fracturer.

**Le tronçon Guillotière
St-Jean-Vieux-Lyon de la ligne D
concerné par les travaux au tunnelier.**



renforcée fait office de trousse coupante. La cloison qu'il comporte est fortement raidie pour reprendre jusqu'à 3,5 bars de pression dans la chambre d'abattage. Divers équipements sont fixés dessus (plateau de coupe, moteurs, sas à personnel, concasseur...).

Il est couplé au deuxième tronçon par une rotule hydraulique permettant de diriger le cheminement du tunnelier. La progression de cet ensemble se fait au moyen de quinze vérins de 1,20 m de course utile, développant une poussée totale de 3 000 tonnes.

En terrain rocheux cet effort de poussée est transmis par des patins latéraux avec force sur les parois de l'excavation. En revanche, en terrain meuble et aquifère, l'effort ne peut être mobilisé que par transfert sur le revêtement du

