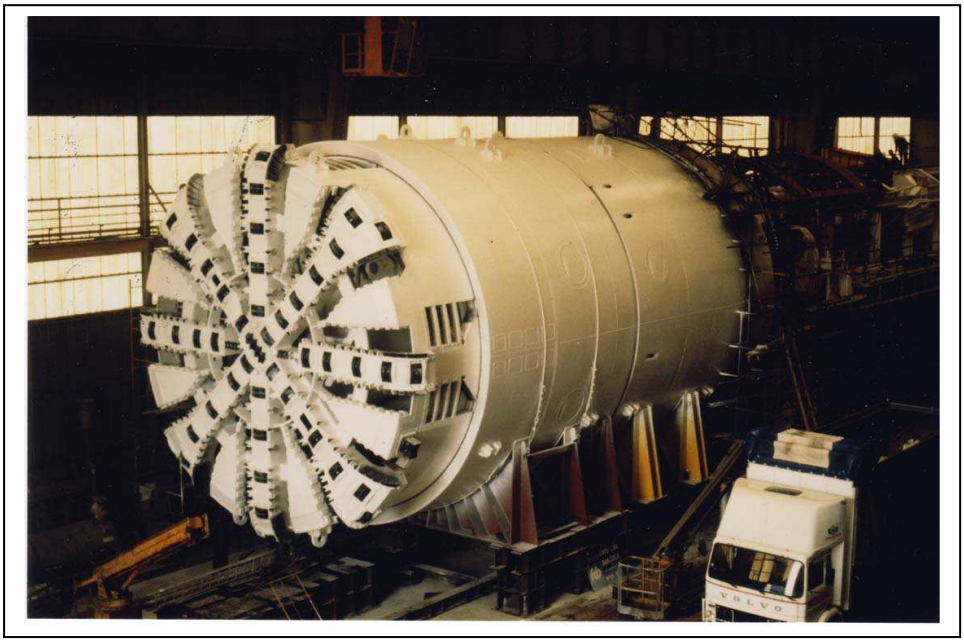
De la conception aux premiers tours de roue

Cinq tunneliers ont travaillé simultanément dans les six galeries du tunnel sou la Manche côté français.

Côté mer, une machine ROBBINS (T1) a creusé le tunnel de service, deux machines KAWAZAKI-ROBBINS (T2 et T3) ont foré les tunnels ferroviaires. Ces trois tunneliers ont en commun.

- de résister aux fortes pressions hydrostatiques (11 bars),
- de pouvoir travailler aussi bien en mode ouvert (dans les terrains secs) qu'en mode fermé (en zone aquifère) sans traitement préalable du terrain devant la machine,
- d'assurer à la fois le creusement et les soutènement par la pose d'un revêtement étanche.

Côté terre, deux tunneliers Mitsubishi, de conception plus simple, ont creusé l'un (le T4) la galerie de service, l'autre (appelé successivement T5 et T6), le tunnel ferroviaire sud, du puits vers la tranchée de Beussingue puis, après retournement, le tunnel ferroviaires nord, de Beussingue vers le puits. Ces deux machines n'ont travaillé qu'en mode fermé.



LES TUNNELIERS

Cinq - Prototypes

DESTINES au creusement des tunnels à partir d'une seule attaque sur une longueur qui a

Atteint 20 kilomètres, dans des conditions géologues difficiles, les tunneliers ont été conçus comme des prototypes.

Les tunneliers sous mer

Dans les tunneliers sous mer, le bouclier est constitué de deux tronçons articulés entre eux.

• **Le bouclier avant** abrite la tête de coupe. Orientable, il est équipé de vérins de poussée vers l'avant et vers l'arrière. Sur les T2 et T3 chaque vérin peut développer une poussée de 440 tonnes. La poussée totale des vérins au nombre de 24 sur le bouclier peut donc atteindre au besoin 11 500 tonnes.

La tête de coupe, télescopique, peut travailler à l'abri du bouclier (en mode fermé) ou à l'avant de celui-ci (en mode ouvert). C'est elle qui assure le creusement par rotation de la roue de coupe. Ouverte, cette roue est constituée de six bras (dans le tunnel de service) ou de huit bras (dans les tunnels ferroviaires) garnis de molettes sur l'axe et de pics sur les bords. Les pics sont placés en retrait et ont pour rôle essentiel d'assurer l'excavation en cas de défaillance des molettes.

• **Le bouclier arrière** est relié au bouclier avant par des vérins d'articulation. II est équipé de patins d'accrochage latéraux (ou grippeurs) qui prennent appui sur le terrain. L'ensemble du bouclier est protégé par une jupe, forte tôle d'acier de 12 centimètres d'épaisseur qui assure l'étanchéité de l'habitacle. A l'arrière, elle couvre aussi l'érecteur qui met en place les voussoirs et les deux derniers anneaux.

Entre le revêtement et la jupe, l'étanchéité est assurée par quatre rangées de brosses métalliques frottant sur l'extrados des voussoirs. Un «mastic à forte teneur en graisse est injecté dans l'espace annulaire limité par ces brosses.

Lors de la progression du tunnelier, le vide annulaire de 18 centimètres (correspondant à l'épaisseur de la jupe) entre le revêtement et le terrain,est rempli de mortier de bourrage injecté directement par trois tubes situés dans l'épaisseur de la jupe et débouchant à l'arrière de celle ci. Un mélange très résistant et à prise rapide a été spécialement mis au point pour ce mortier.

Les tunneliers sous terre

Ne travaillant qu'en mode fermé, les tunneliers sous terre sont de conception plus simple. Leur bouclier est constitué d'une seule pièce qui porte la roue de coupe. Ils sont conçus pour excaver jusqu'à une pression de 3 bars selon le procédé de pression de terre ou selon celui du marinage hydraulique. Ils avancent au moyen de vérins de poussée qui prennent appui sur le revêtement. Les voussoirs sont posés à l'aide d'un érecteur à deux bras diamétralement opposés. Trois rangées de brosses assurent l'étanchéité arrière entre la jupe et le revêtement.

L'extraction des déblais

Point éminemment délicat des tunneliers : le dispositif d'extraction des déblais. La craie ne doit pas seulement être amenée de la tête de coupe vers les berlines stationnées sous le train suiveur, elle doit aussi passer en une dizaine de mètres de la pression du front (3 bars côté terre, 11 bars côté mer) à la pression atmosphérique... sous peine de jaillir comme la mitraille. Quatre installations différentes ont fonctionné sur les tunneliers «français.

Sur le T1, une vis sans fin alimente deux pompes de décharge à piston qui, suivant le principe du sas, isolent le front de l'arrière indépendamment de la nature des terrains rencontrés et de la pression hydrostatique. Ce système a bien fonctionné dans l'ensemble, bien qu'il ne contribue pas à la formation d'un bouchon étanche et stable par confinement des matériaux dans la chambre d'attaque.

Sur les T2 et T3, deux vis en série sont séparées par un compartiment de matériaux comprimés. Le réglage de la vitesse relative des deux vis permet une extraction continue du matériau. Ce système permet un bon contrôle de la pression au front. Par contre, le confinement des matériaux dans les vis est d'un fonctionnement délicat et l'effort axial important a pu entraîner, sur le T2, une usure rapide des vis.

Dans le T4, c'est aussi une double vis qui envoie les déblais sur un convoyeur. La seconde vis tourne en sens inverse de son enveloppe et crée de ce fait un bouchon de matériaux qui maintient l'étanchéité du système.

Le T5/T6 comporte une vis simple. Le confinement des matériaux est obtenu par le seul réglage de l'ouverture de la trappe d'alimentation du convoyeur à bande.

En cas de pépin

Des orifices dans la paroi avant du bouclier et dans la jupe permettent de forer et d'injecter le terrain pour créer un bouchon autour du bouclier.

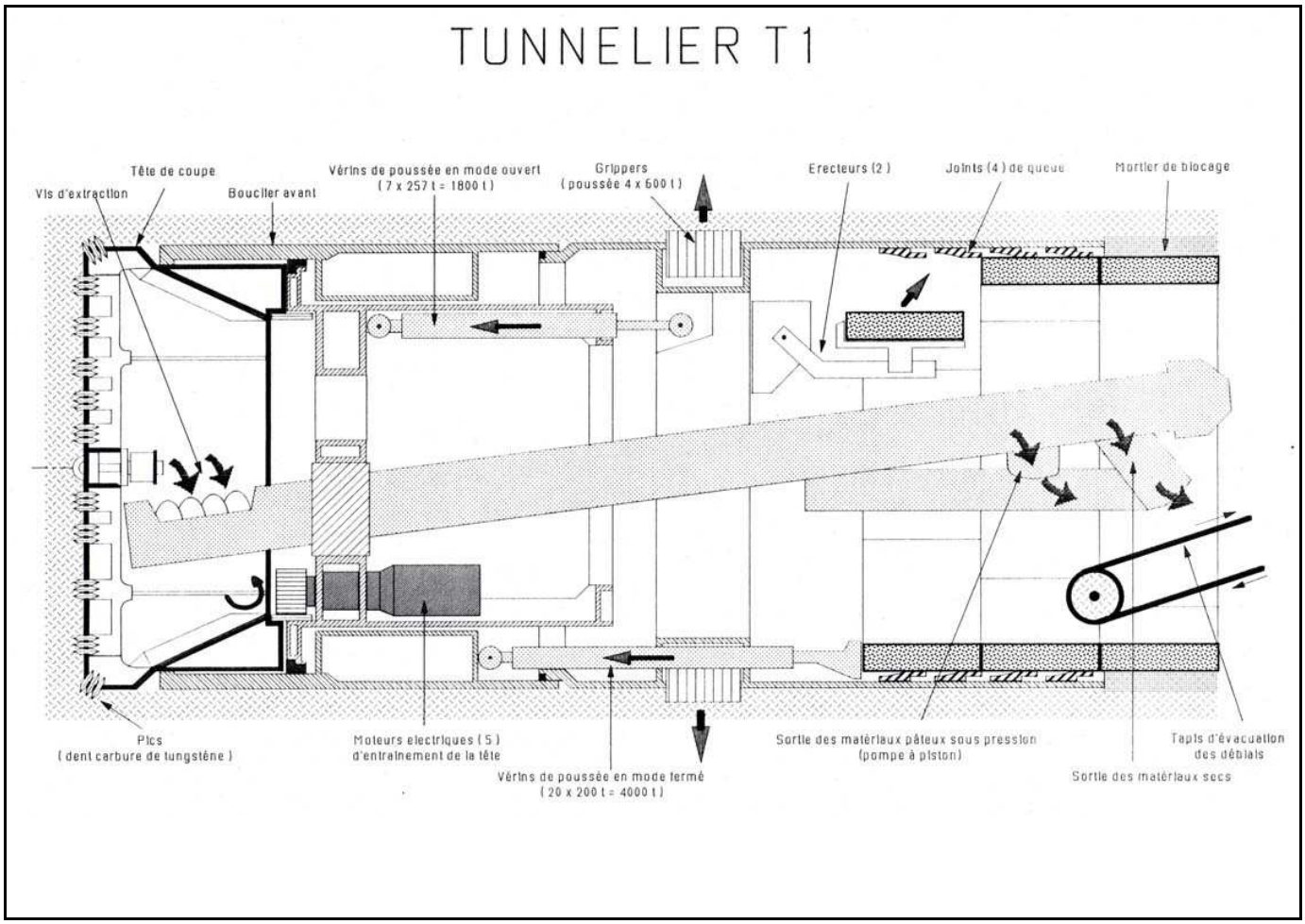
II est alors possible d'intervenir à sec et à pression atmosphérique dans la chambre d'attaque, par exemple pour changer les outils de la tête de coupe.

La chance a voulu que les interventions à la tête aient toujours pu être effectuées dans des zones plus ou moins sèches, donc sans (longue) opération préalable d'injection.

A deux exceptions près, quand, dans les tunnels sous terre (forés dans des terrains très perméables), il a fallu faire progresser péniblement le T4 et le T5 jusqu'à un bouchon injecté au préalable depuis la surface (au cas où...) avant de pouvoir effectuer les réparations nécessaires à la tête de coupe.

De même, les réparations mécaniques engageant l'étanchéité du bouclier ne peuvent se faire qu'en zone sèche ou dans un bouchon injecté. Etudiées par les constructeurs, elles font l'objet de procédures spécifiques.

Quatre types de difficultés pouvaient subvenir: sur le joint de queue arrière du bouclier (quatre interventions ont été nécessaires sur le T1 et une sur le T4) ; sur le joint d'étanchéité avant de la tête télescopique (trois réparations sur le T1);



sur la vis d'extraction des déblais (un cas, sur le T1 encore) ; sur le roulement de la tête : aucune intervention n'a été nécessaire pendant toute la durée du chantier.

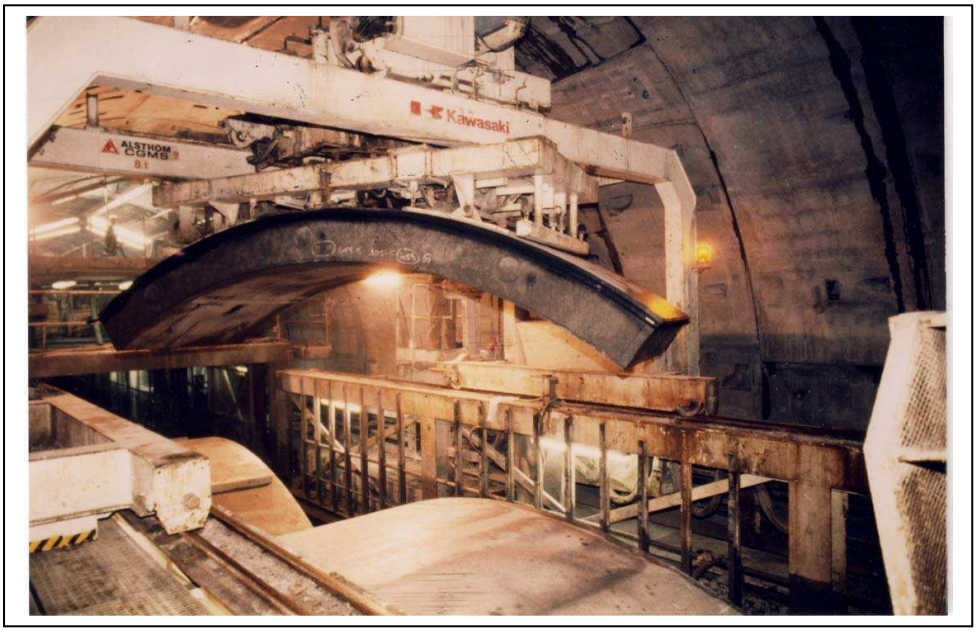
Commande à vue

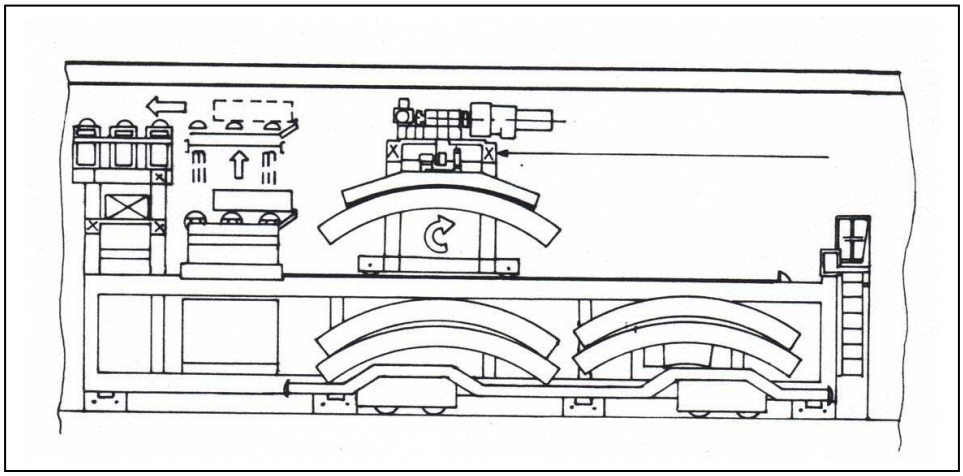
Les voussoirs sont amenés palettisés par anneaux complets sur le train d'approvisionnement ; ils sont hissés un à un sur le train suiveur et posés sur un convoyeur à rouleaux ou à chaîne situé en partie supérieure qui les amène à proximité de l'érecteur.

Equipé de puissantes ventouses, le bas de l'érecteur soulève le voussoir et le met en place dans l'espace libéré par les vérins arrière. Ceux-ci reviennent pousser le voussoir contre l'anneau précédent avant que l'érecteur se retire. Puis le voussoir est boulonné à ses voisins.

Les manoeuvres de l'érecteur sont commandées à vue par un opérateur qui dispose d'un clavier portable, un peu comparable à celui d'un accordéon.

Un voussoir standard pèse 3,6 t en tunnel de service, et l'anneau complet 18 tonnes. En tunnel ferroviaire, les poids sont respectivement de 8 tonnes et 40 tonnes. La pose d'un anneau se déroule (quand tout va bien) en 15 à 17 minutes pour les tunnels sous mer et en 24 à 28 minutes pour les tunnels sous terre.





Le train suiveur
Une usine ambulante

Solidaire du Bouclier et composé de treize à dix neuf remorques selon les tunneliers, le train suiveur assure deux fonctions essentielles : vers l'avant, le service du tunnelier; vers l'arrière, l'équipement du tunnel.

Dans les galeries sous mer, les tunneliers ont été appelés à travailler jusqu'à 20 kilomètres du puits... C'est dire si la composition et le fonctionnement du train suiveur ont fait l'objet d'une organisation attentive, chaque dysfonctionnement , chaque pièce manquante pouvant, le temps de la livraison et de la réparation, arrêter le tunnelier plusieurs heures.

Long de 305 mètres et composé de seize remorques et d'un aiguillage californien, le train suiveur des tunneliers T2 et T3, a été ainsi organisé :

• **La remorque 1** emporte la cabine de pilotage ; la gaine d'aspiration de l'air vicié (qui se prolonge jusqu'à la remorque 13) ; le départ du convoyeur principal des déblais ; le batardeau pour le recueil des eaux et les pompes d'exhaure permanente et de secours ; le magasin à voussoirs et l'alimentateur de l'érecteur ; le malaxeur et le distributeur du mortier de bourrage.

Sous cette remorque, une équipe effectue le montage des voies, par tronçons de neuf mètres, au fur et à mesure de l'avancement du tunnelier. Elle installe aussi le chemin de roulement du train suiveur.

A l'avant, la remorque s'appuie sur les voussoirs, par l'intermédiaire de patins marchants, chacun alternativement posé et relevé selon les phases de travail du bouclier. A l'arrière, les roues de la remorque avancent sur le chemin de roulement juste installé...

• **La remorque 2** regroupe les deux trémies d'attente des composants du mortier de bourrage et toutes les pompes qui alimentent les circuits de fondu et de mortier, de mastic du joint de queue, de graissage ainsi que celles qui actionnent l'érecteur.

• **La remorque 3** porte l'équipement électrique : transformateurs électriques du réseau normal (4 MVA) et du réseau de secours (2,4 MVA), armoires électriques.

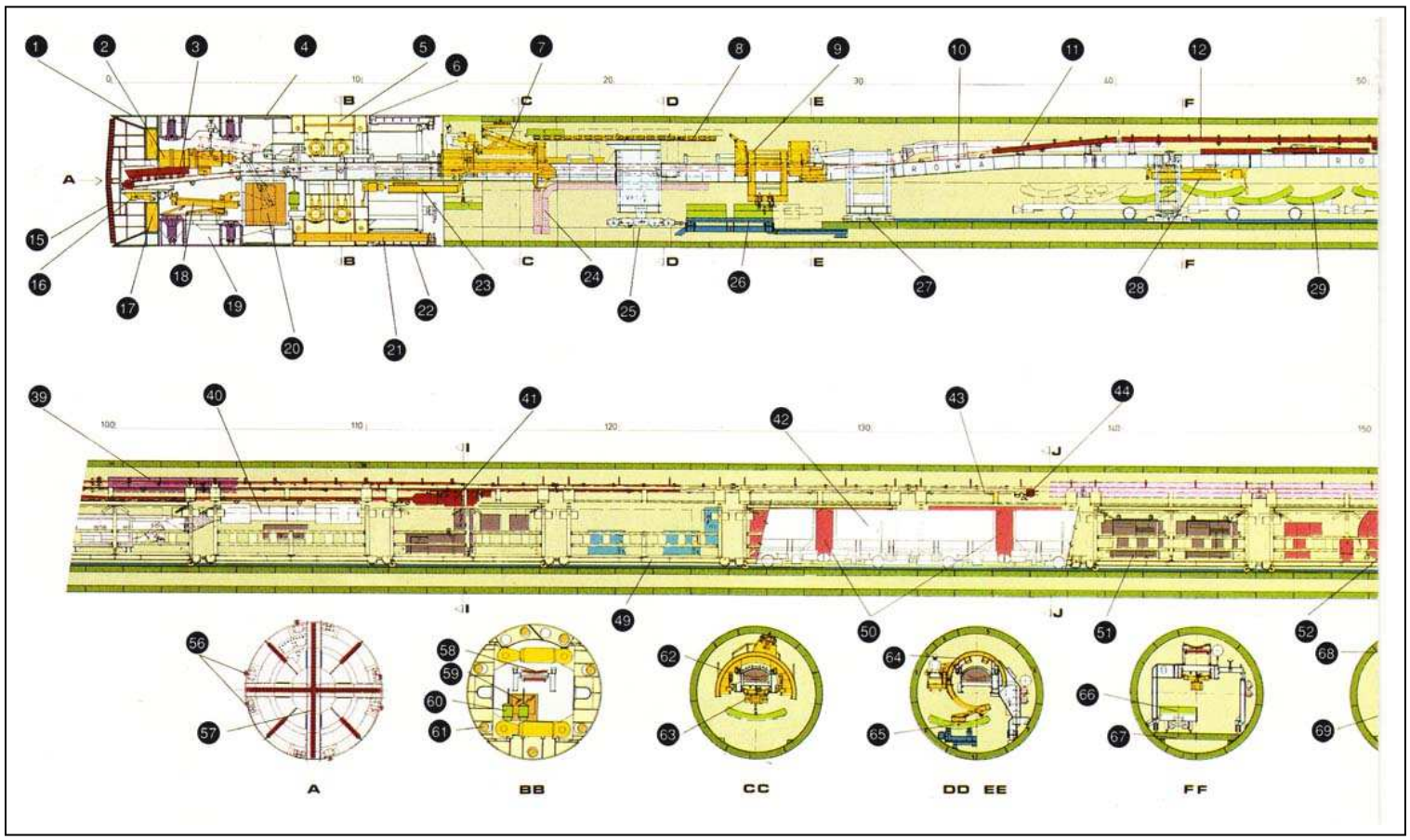
• **La remorque 4** est celle de l'hydraulique avec 20 pompes de 10 à 110 KW, les réservoirs d'huile et les échangeurs de chaleur eau huile (25000 litres d'huile emplissent circuits et réservoirs).

• **La remorque 5** rassemble les ateliers d'électricité et de mécanique, le magasin de pièces de rechange et le réfectoire.

• **La remorque 6** regroupe les installations des trois circuits d'eau : réservoirs et pompes des alimentations en eau industrielle et potable (avec un tube UV pour la stérilisation de cette dernière) ; échangeur de chaleur eau eau pour le refroidissement des moteurs de la tête de coupe.

A bord de la remorque 6 également : l'extrémité du convoyeur principal des déblais, avec son moto réducteur et son coupleur hydraulique.

• **La remorque 7** assure l'évacuation des déblais: le convoyeur aiguilleur et les convoyeurs navettes permettent le remplissage des berlines sur l'une ou l'autre des deux voies.



• **La remorque 8** contient les pompes d'exhaure normale avec bac de décantation et trémie de chargement des berlines; les pompes d'exhaure de secours ; un magasin de pièces et d'outillage ; deux compresseurs à air comprimé de 10 m^3/minute ; les sanitaires ; le ventilateur-dépoussiéreur aspirant l'air vicié à l'avant de la remorque 1.

• **La remorque 9** est celle des flexibles avec un atelier de sertissage et les enrouleurs de câbles électriques d'une contenance de 400 mètres.

• **Sur la remorque 10** se trouvent installés l'infirmerie ; un atelier de chaudronnerie ; la vis sans fin et la pompe pneumatique qui assurent le déchargement des wagons de mortier et de fondu ; les pompes qui envoient deux composants vers le stockage de la remorque 2 ; un ventilateur aspirant du circuit de l'air vicié ; le début du convoyeur à voussoirs.

• **Sur la remorque 11**, un portique de déchargement et une table élévatrice transfèrent les voussoirs du train d'approvisionnement vers le convoyeur qui les emmène jusqu'à la première remorque.

• **Sur la remorque 12** cohabitent deux ateliers de maçons et d'électriciens. Les maçons contrôlent la qualité de l'étanchéité du revêtement et complètent le bourrage par une injection secondaire de mortier. Ils réparent également les voussoirs endommagés lors du transport ou de la pose. Les électriciens montent les rails halfen et y accrochent les chemins de câbles électriques.

• **La remorque 13** sert au déchargement des convois d'approvisionnement une trappe y est ménagée à travers laquelle un portique hisse les diverses livraisons (sauf les voussoirs déchargés à la remorque 11).
Les enrouleurs des conduites souples d'exhaure sont aussi placés sur cette remorque, de même que l'arrivée d'air frais, avec la cassette de déroulement, du ventube d'une contenance de 100 mètres.

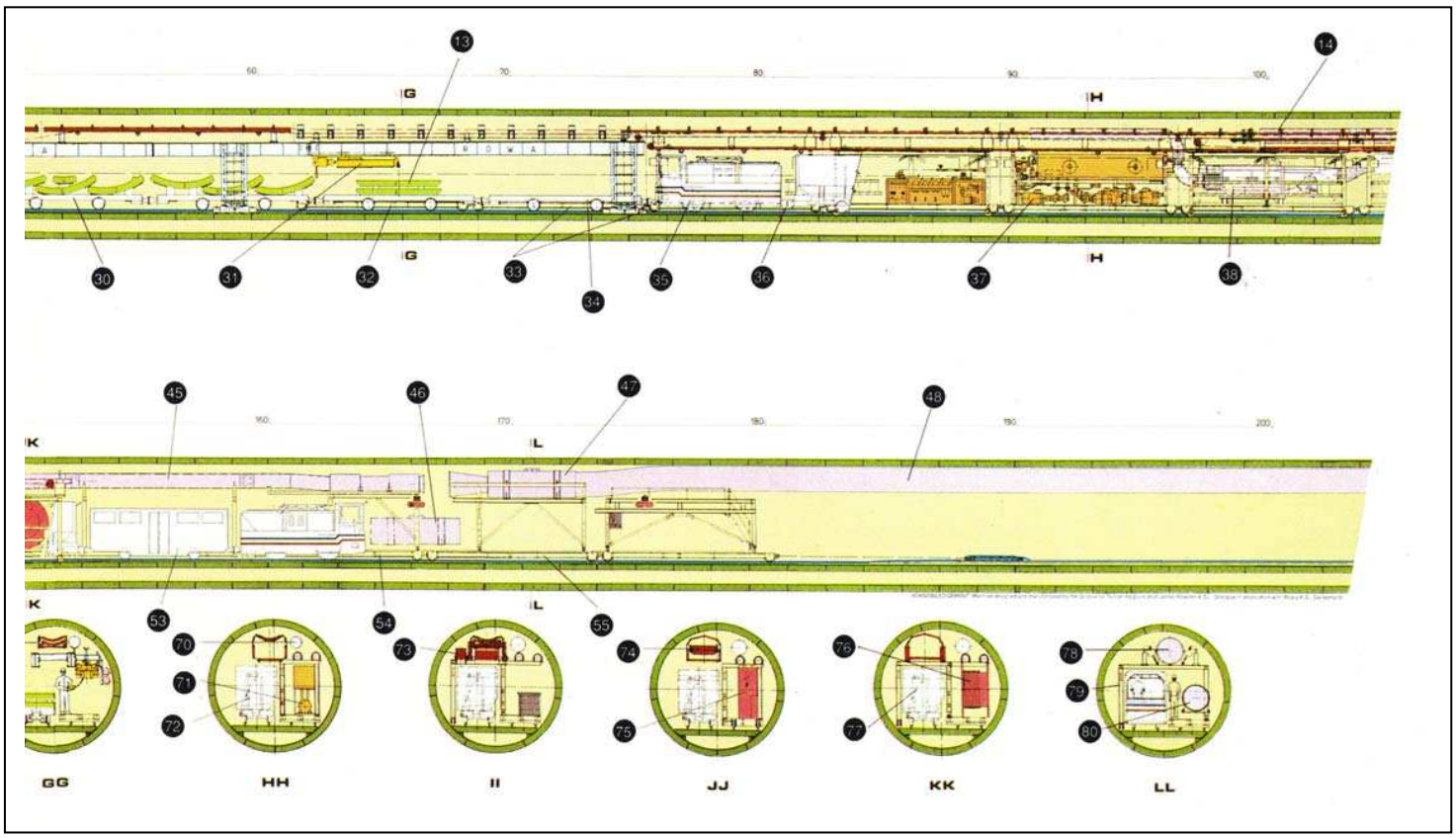
• **La remorque 14** est la base de l'équipe qui assure la pose des tuyauteries d'air comprimé, d'eau industrielle et des deux circuits d'exhaure. Une autre équipe y déroule aussi les câbles électriques (20 KV téléphone, radio, etc.).

• **Remorque 15**: suite de l'atelier d'électricité.

• **Depuis la seizième remorque** sont assurés le montage des supports des caténaires, le démontage du chemin de roulement du train suiveur et son recyclage vers la première remorque.

En queue de cette dernière remorque: la cabine de l'opérateur qui contrôle le roulage sous les portiques du train suiveur et sur les derniers kilomètres du tunnel.

• **Un aiguillage mobile** ou «californien» est accroché à la dernière remorque. Il permet aux trains d'approvisionnement ou de déblais de passer de l'une à l'autre des deux voies du tunnel.



Sous la protection de Sainte Barbe

Les tunneliers ont tous reçu un prénom féminin (La tradition maritime sans doute). Ces énormes machines ont été baptisées sous l'oeil bienveillant de la Sainte Barbe installés dans une niche au fond du puits.

- Mme Matheron, l'épouse du Directeur de la Construction France a donné son prénom **"Brigitte"** au T1.

- **"Europa"** est celui du T2 baptisé par Adrien de Trégomain.

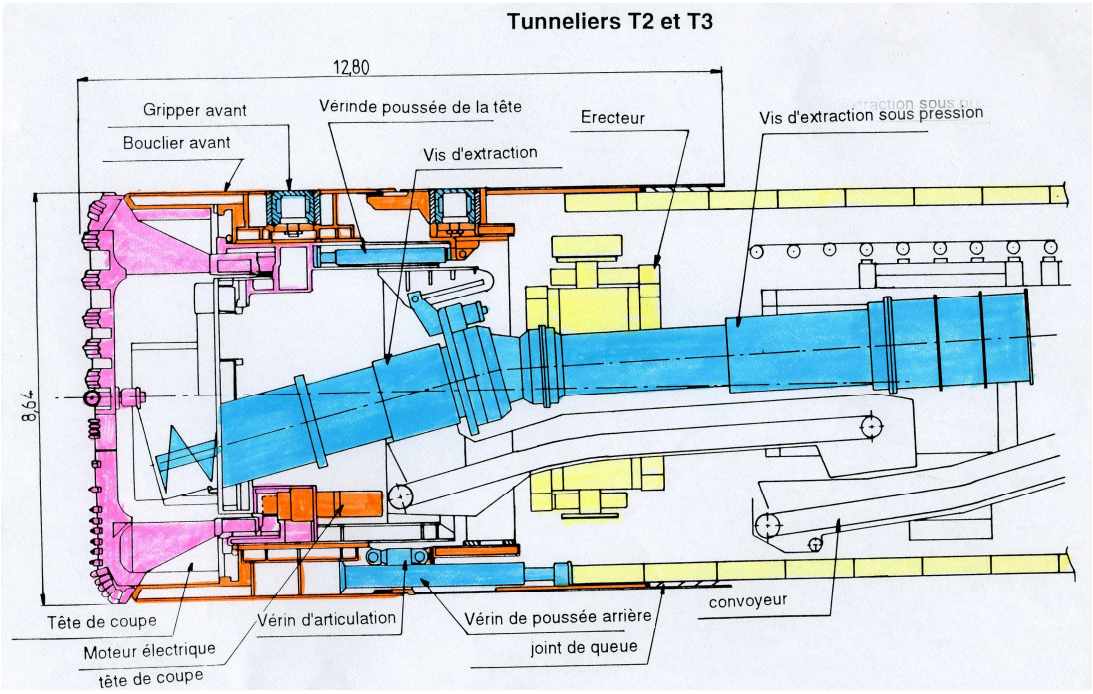
- Le T3 a reçu le prénom très répandu de **"Catherine"** de sa marraine Catherine Evrard.

- **Virginie** Huez, gagnante d'un concours lancé parmi les enfants du personnel TML a baptisé le T4.

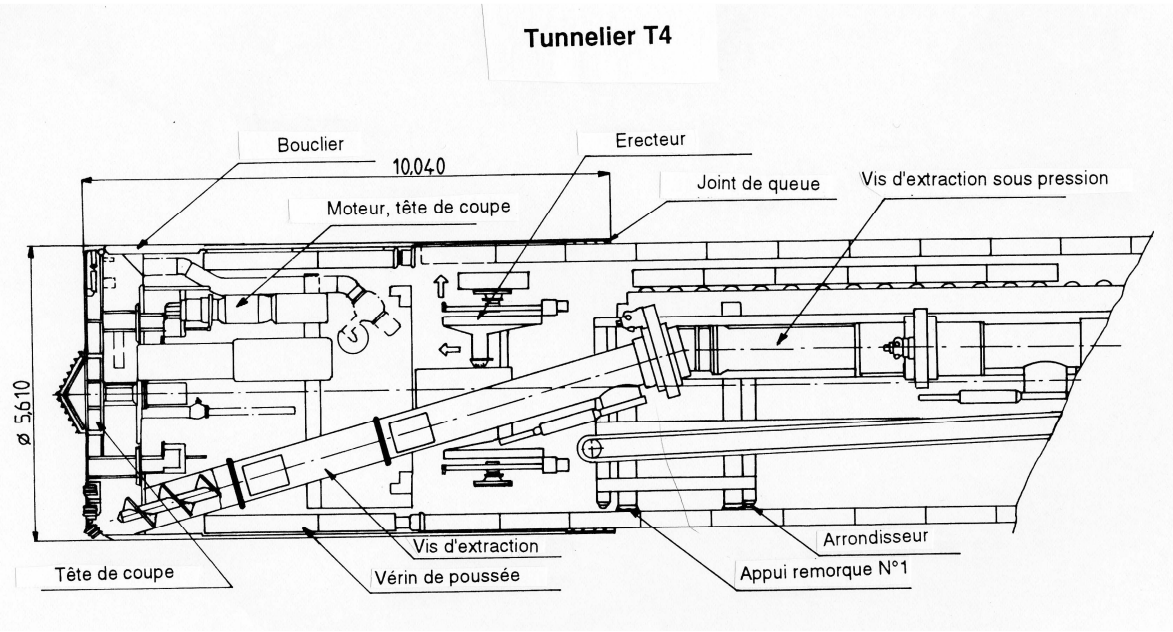
- **Pascaline et Séverine** Joly, filles jumelles d'un autre salarié de TML, ont chacune leur tour donné leur prénom au T5 et au T6 l'unique tunnelier qui a creusé successivement les deux galeries ferroviaires côté terre.

	T1	T2 et T3	T4	T5 / T6
Dans le (ou les) tunnel (s)	service mer	ferroviaires mer	service terre	ferroviaires terre
Fabricant	Robbins	Robbins Kawasaki	Mitsubishi	Mitsubishi
Diamètre du bouclier (en mètres)	5,72	8,72	5,59	8,62
Diamètre de creusement (en mètres)	5,77	8,78	5,61	8,64
Longueur du bouclier (en mètres)	11	13,75	10,60	12
Longueur du train de foration, du front à l'aiguillage californien inclus (en mètres)	268	305	244	251
Poids du bouclier (en tonnes)	470	1 250	350	600
Poids du train suiveur (en tonnes)	600	800	400	400
Poussée maxi sur la tête de coupe (en tonnes)	1 800	2000		
Poussée maxi sur le bouclier (en tonnes)	4 000	11 500	4 000	9 000
Effort de grippage (en tonnes)	1 800	5 400		
Vitesse de rotation de la tête (en tours par minutes)	2,5 à 5	1,5 à 3	0,9 à 1,8	1 à 2
Couple maximum (en tonnes par mètre)	360	1 300	400	1 300
Puissance de la tête (en kilo-volts ampères)	925	2160	720	1440
Puissance installée (en kilo-volts ampères)	2 700	4 000	2 500	3 800
Pose des voussoirs par	2 érecteurs	2 érecteurs	1 double	1 double
Cycle de pose d'un anneau (en minutes)	15	15	24	28
Vitesse d'avancement maxi (en centimètres par minute)	12	12	12	15

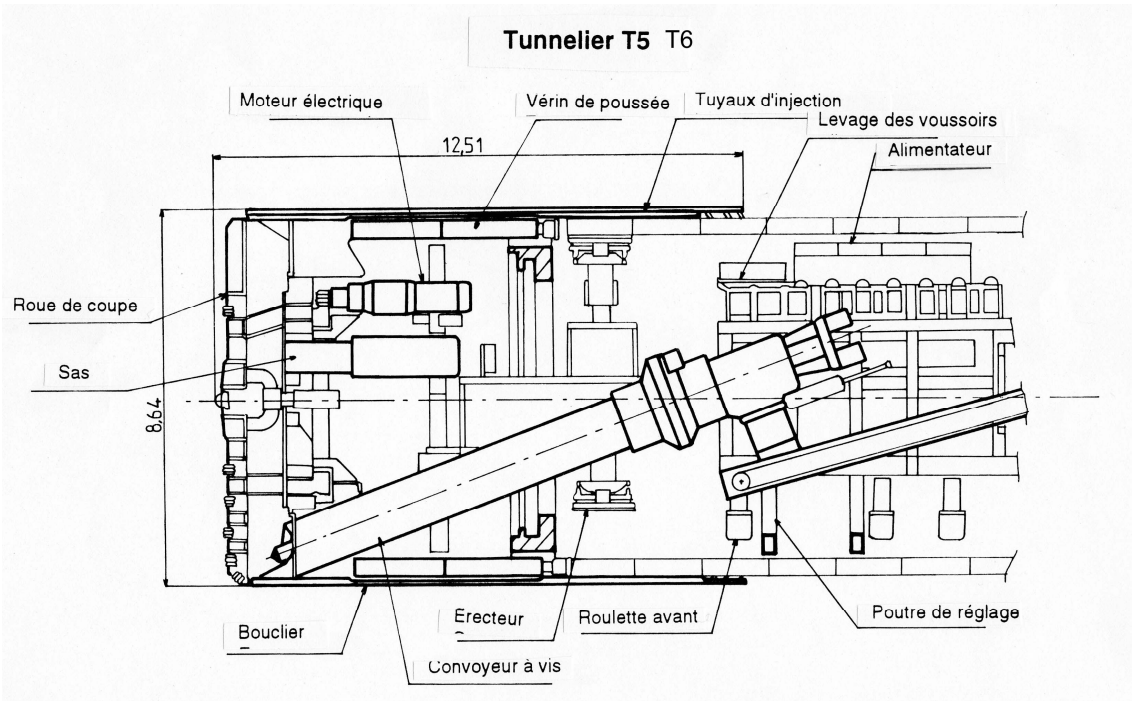
Tunneliers T2 et T3



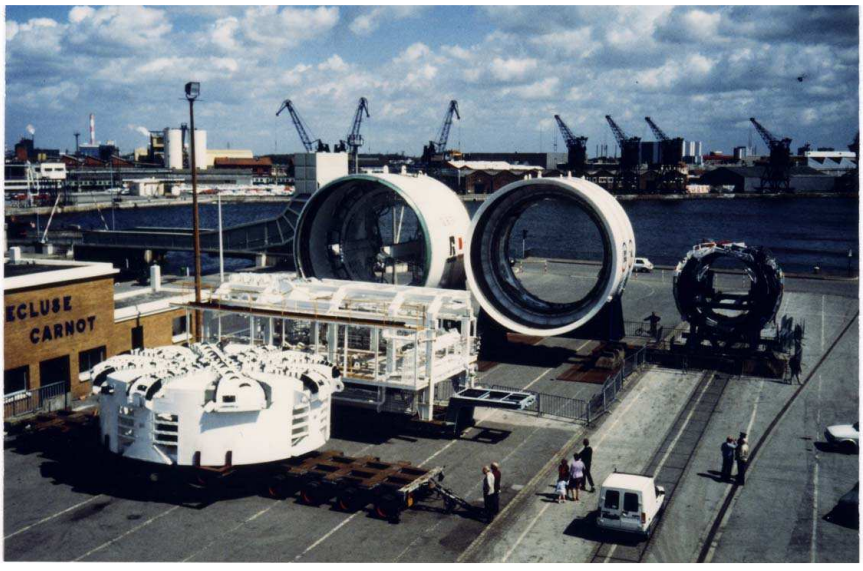
Tunnelier T4



Tunnelier T5 T6



Montage des tunneliers dans le puits



Par éléments de 400 tonnes

Arrivés dans les ports de Calais (pour le T1 venant de Seattle, sur la côte ouest des Etats-Unis) ou de Dunkerque (pour les quatre autres importés du Japon), les tunneliers ont été acheminés par convois exceptionnels jusqu'au puits de Sangatte. Les machines étaient livrées par ensembles pesant jusqu'à 400 tonnes Le plateau remorque portant ces ensembles était monté sur un chassis muni de 64 essieux (256 roues) et était tiré et poussé par un tracteur de 400 cv à chaque extrémité.

Au fur et à mesure de leur arrivée sur le site les éléments sont déchargés à l'aide de pont roulant de 430 tonnes prévu à cet effet et mis en stock entre les poutres du pont en surface avant d'être descendus au fond du puits suivant l'ordre de montage.

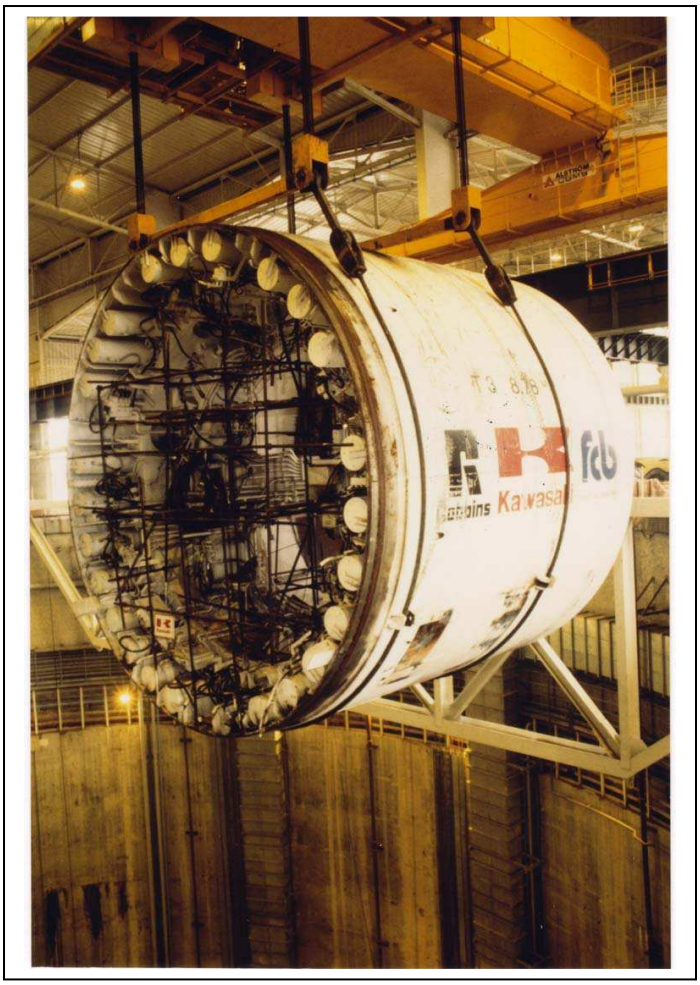
- Les boucliers des T1 et T4 pesant 400 tonnes ont été livrés en une seule pièce. Suspendus au pont de 430 t, les pièces sont descendues avec précaution à la vitesse de 10 cm par minute. Chaque descente a duré près de huit heures. Puis les énormes cylindres, poussés en fond de gare, sont venus s'encastrer dans l'amorce des tunnels. L'arrière du bouclier portant l'érecteur et les neuf premières remorques du train suiveur, d'un poids inférieur à 100 tonnes, ont été montés à la suite. Cet ensemble comprenant les organes essentiels a permis le démarrage du creusement après quatre semaines de montage à feu continu.

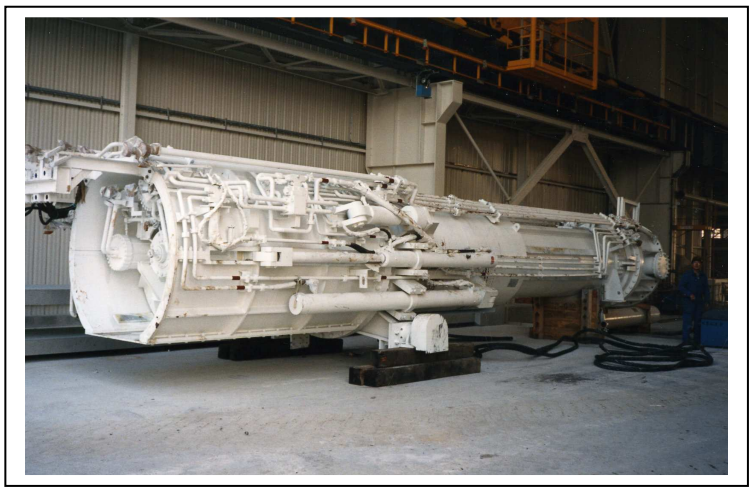
- Les tunneliers T2, T3 et T5 venant du Japon ont été pré assemblés à l'usine Fives-Cail-Babcok de Dunkerque où étaient également construits les remorques des trains suiveurs.

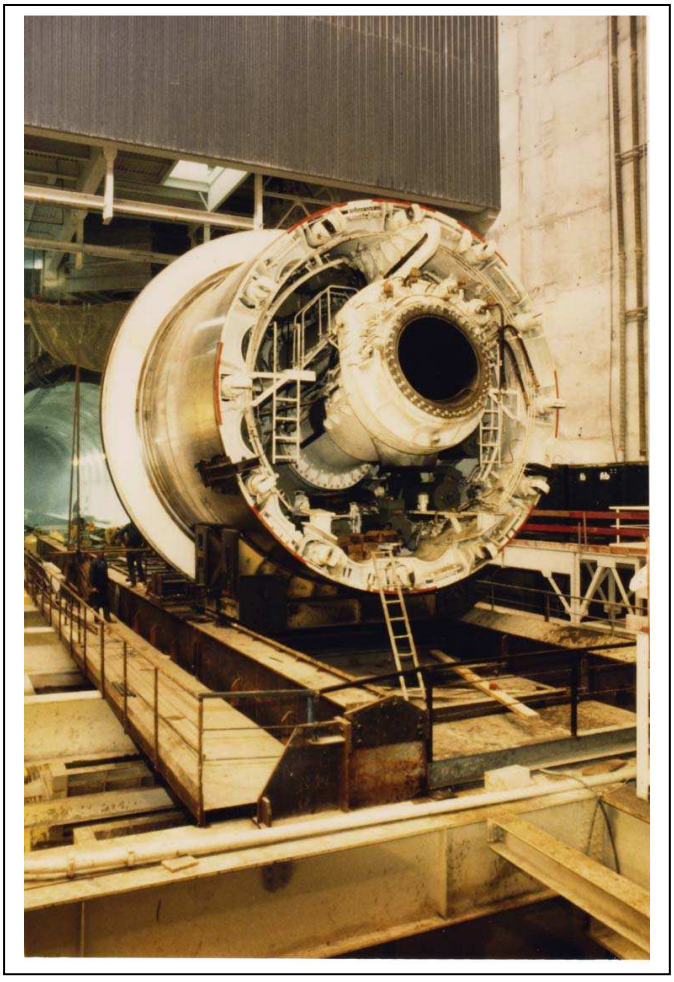
Beaucoup plus lourds et volumineux, les boucliers des tunneliers ferroviaires ont été manipulés en «pièces détachées dans l'ordre suivant

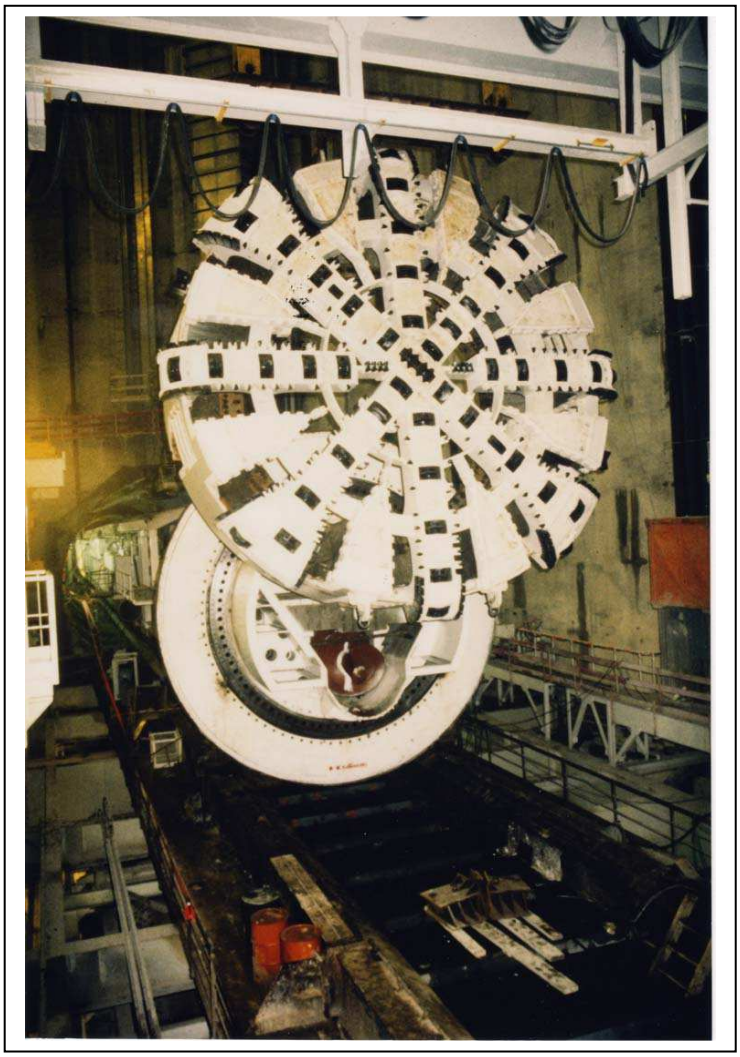
- Descente de la partie coulissante du bouclier avant, sans roue de coupe ni couronne extérieure (370 tonnes).
- Descente de la roue de coupe (112 tonnes) en position horizontale ;redressement et montage sur le bouclier avant. - Montage de la couronne extérieure (263 tonnes).
- Montage du bouclier arrière portant les érecteurs (385 tonnes) et de la deuxième vis d'évacuation des déblais (42 tonnes).

Cet ensemble, plus quelques équipements complémentaires, d'un poids total de l 190 tonnes, a été poussé en fond de gare dans l'amorce du tunnel. L'assemblage du train suiveur s'est déroulé comme pour les tunneliers de service. II a fallu huit semaines à feu continu pour mener à bien le montage jusqu'au stade opérationnel permettant le démarrage du creusement.









Comment travailler au sec

LES reconnaissances effectuées tout au long du déroulement des travaux ont permis de déterminer les limites des différentes couches géologiques et leurs caracté-ristiques tectoniques et hydrologiques afin de mettre en oeuvre les opérations de traitement de terrain et travailler dans des conditions acceptables.

Les travaux d'injection

Dès le début du chantier, un service interne de traitement de terrain a été crée par TML sous le nom de FORINJECT. Ce service a été renforcé par un groupement d'Assistance Technique composé de quatre spécialistes en travaux d'injection.
SOLETANCHE, BACHY, SOTRAISOL et FTM sous le pilotage de SOLETANCHE.

Les travaux d'injection ont eu surtout pour objet d'étancher le terrain plutôt que d'en assurer la stabilité.
Dix sortes de traitements ont été entrepris qu'on peut décrire sommairement par ordre chronologique

- **Traversée de l'écran étanche.**

Depuis chacun des six tunnels au fond des gares, injection d'une section de 35 mètres de longueur à partir de l'écran étanche ceinturant le puits afin de permettre le démarrage des tunneliers et la mise en place des premiers anneaux à l'abri des venues d'eau.

- **Isolement de la chambre de coupe des tunneliers.**

Ces travaux d'injection entrepris depuis la surface ont eu pour but de créer une zone peu perméable dans laquelle vient s'encastrer la tête du tunnelier afin de pouvoir y effectuer les travaux de maintenance. Ces disposition ont été prises pour le T1 dans les 300 premiers mètres et le T4 lors de la modification des outils de coupe sur les têtes.

- **Etanchement du terrain sur le trajet du T6.**

L'avancement du T6 étant réalisé en attaque descendante, un traitement préventif a été réalisé sur un longueur de 700 mètres dans les craies grises et blanches fortement aquifères repérées lors du creusement des T4 et T5.

- **Traitement des rameaux.**

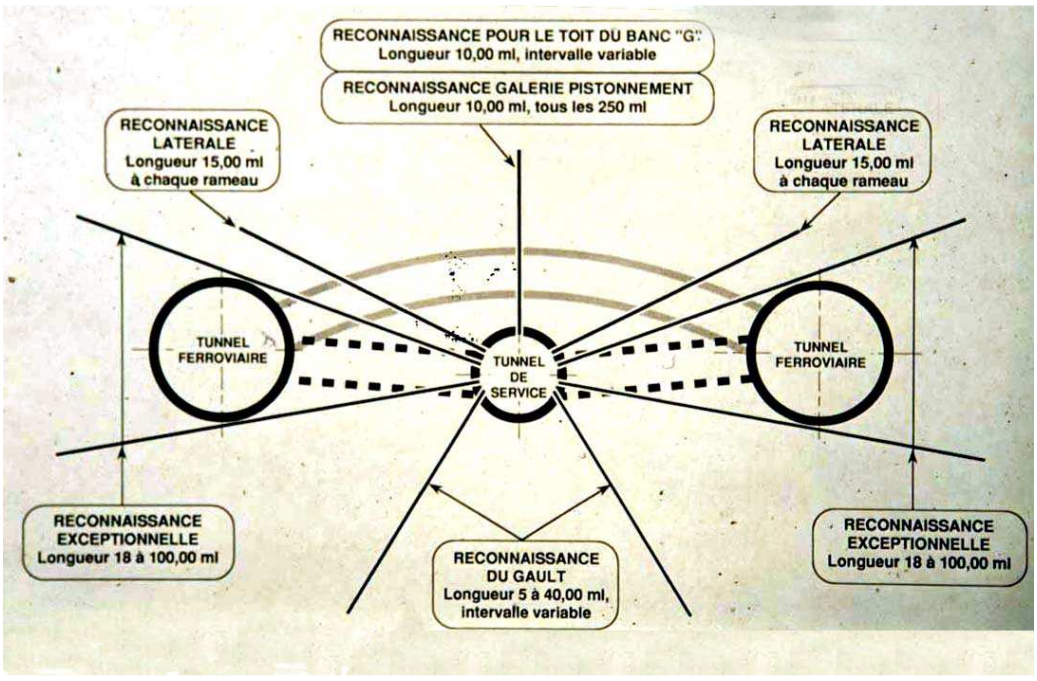
A partir du tunnel de service et après reconnaissance systématique du terrain au droit de chaque rameaux. On a procédé à un traitement du terrain lorsque sa tenue mécanique et sa perméabilité le nécessitaient. Ce programme a été le fil directeur du chantier de traitement de sols.

- **Etanchement des zones de failles.**

Les reconnaissances en mer et les études géotechniques ont déterminé l'existence de 5 failles fortement aquifères où les pressions hydrostatiques atteignaient jusqu'à 10 bars. Ces failles ainsi que quelque autres non repérées par les sondages ont été rencontrées lors de l'avancement du T1 et traitées dans le double but d'étancher le massif autour du tunnel de service et surtout de consolider et d'étancher la zone traversée par les tunnels ferroviaires.

- **Traitement de la station de pom-page W3.**

Le terrain autour de cette station dans la zone de faille n°5 a été entièrement traité et consolidé afin de permettre la réalisation de l'ouvrage par les méthodes de creusement et de revêtement traditionnel dans des conditions acceptables de travail.



- **Traitement du croisement ferroviaire**

Bien que située en zone non faillée, un traitement complet des terrains a été mené autour du croisement ferroviaire. L'injection a été réalisé en parapluie au dessus de l'ouvrage à partir du tunnel de service.

Au fur et à mesure du bétonnage des galeries de la coque, une injection de clavage envoûte a été effectués dans les cinq galeries constituant la partie supérieur du croisement ferroviaire.

- **Autres travaux d'Injection.**

Après percement des tunnels, injection complémentaire pour parfaire l'étanchéité des voussoirs dans les zones présentant des suintements.

Forage et injection tableau récapitulatif	Silacsol injecte (m3)	Bentonit ciment (m3)	Forage (m)	Zone traitée (m)
Traversée de l'écran étanche du puits et chambres étanches pour intervention aux tunneliers	1060	2000	32000	300
Reconnaissance "galerie des anciens" 12 forages	-	3	513	100
Rameaux des ouvrages spéciaux coté mer 136 ouvrages traites	477	1609	16046	1333
Rameaux des ouvrages spéciaux coté terre 20 ouvrages traités	975	650	11500	200
Zones de failles (5 failles traitées)	533	4006	12182	3080
Traitement préventif du T6 par le T4	101	802	7660	685
Station de pompage SW3 au PK 8.6	-	862	1390	200
Croisement ferroviaire au PK 12.5	187	1371	4823	200
2 cross-passage au PK 13.4	-	28	138	35
Injection de collage au T1	-	911	2557	15600
Injection de collage au T2	-	5920	1500	20009
Injection de collage au T3	-	2100	700	18860
Injection de collage au T4	-	1072	1160	2266
TOTAUX	**3336**	**21334**	**92169**	**62868**

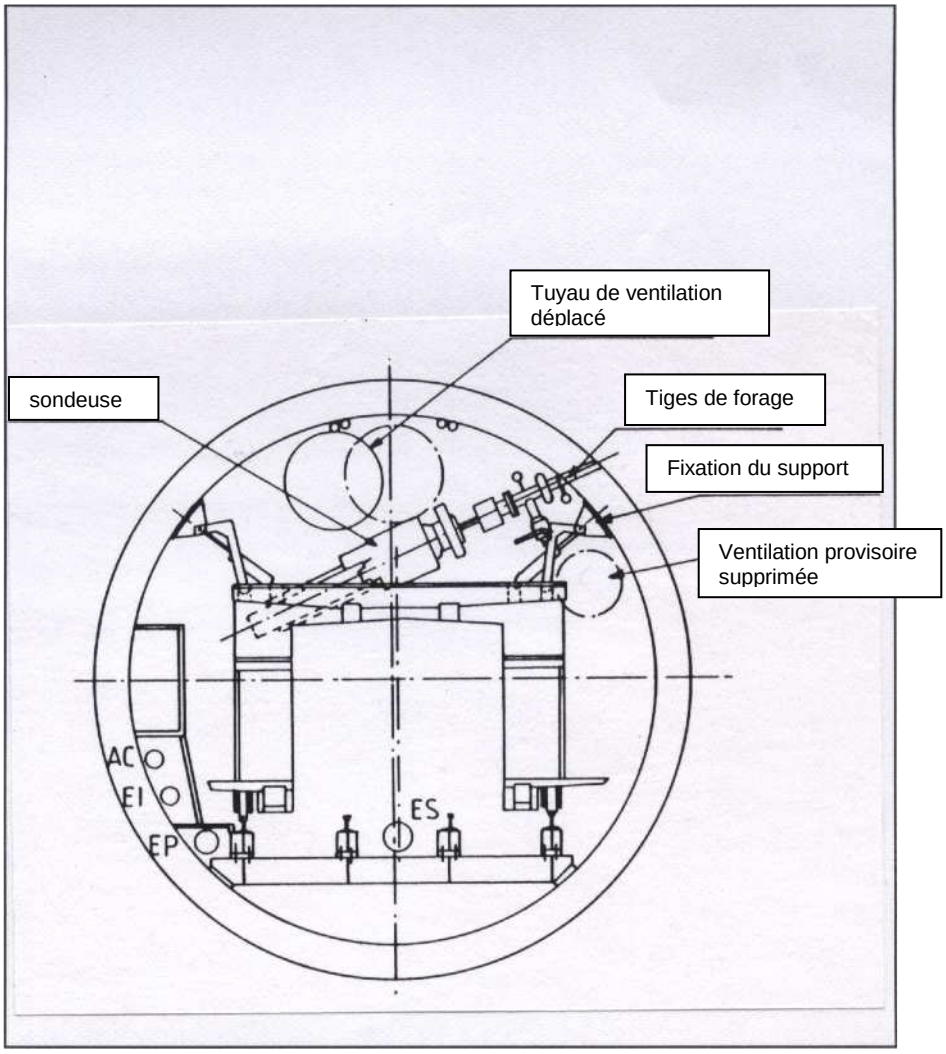
Méthodes et matériels

Utilisation d'un ensemble de cinq portiques roulant sur les rails extérieurs du tunnel de service enjambant la voie centrale. Cet ensemble a travaillé à un kilomètre en arrière du tunnelier et comprenait

- Deux foreuses DIAMEC hydraulique
- Deux ensembles de presses d'injection
- Un groupe transformateurs et armoires électriques.

Deux aiguillages californiens encadraient l'ensemble. Un train d'injection formé de 5 à 10 wagons permettait la fabrication et le transfert du coulis vers les portiques. Cet ensemble a permis le traitement des rameaux et des failles. La méthode utilisée est illustrée par le croquis ci-contre. Les injections de colmatage et de collage ont été effectuées avec un coulis de bentonite-ciment à différents dosages en fonction de la nature des travaux. Le C/E a varié de 0,3 à 2 et le temps de prise de 4 à5 heures.

Lorsque le terrain nécessitait une pénétration plus profonde et plus complète, on a utilisé un coulis spécial appelé "Silacsol", composé de trois réactif dont la liqueur de Silice associée à un durcisseur et un accélérateur. Son temps de prise est de 1 heure. Ce coulis a été utilisé pour le traite--ment de la zone aquifère traversée parle T6 et de la faille n°5 de la station W3

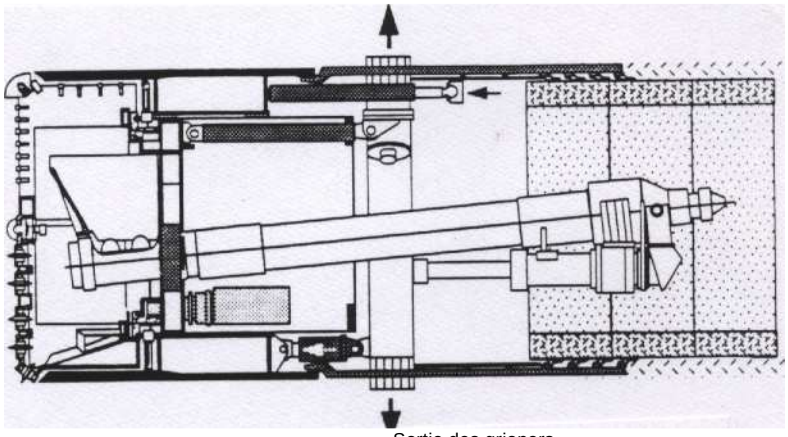


Creusement

● **Quand le tunnelier travaille en mode ouvert**, les grippeurs accrochés dans la roche maintiennent le bouclier arrière en place. Les vérins avant prenne appui sur lui et poussent la tête télescopique hors du bouclier (jusqu'à 1.40 m pour le T1 et 1.60 m pour les T2 et T3). Les voussoirs sont poussés simultanément.
A la fin du cycle, les grippeurs rentrent et libèrent le bouclier arrière. Les vérins de poussée arrière prennent appui sur le dernier anneau mis en place et le bouclier avance. Le tunnelier progresse ainsi comme une chenille.

Le tunnelier creuse la craie sous l'effet simultané de la rotation de la roue de coupe et de sa poussée sur le front de taille. La rotation est entraînée par des moteurs électriques qui actionnent une couronne solidaire de la roue, la poussée est assurée par les vérins.

Les vérins prennent appui, soit sur le terrain par grippage de la jupe arrière, soit sur le revêtement. Les vérins arrière assurent toujours une poussée minimum sur le revêtement pour maintenir comprimés les joints d'étanchéité entre les anneaux.



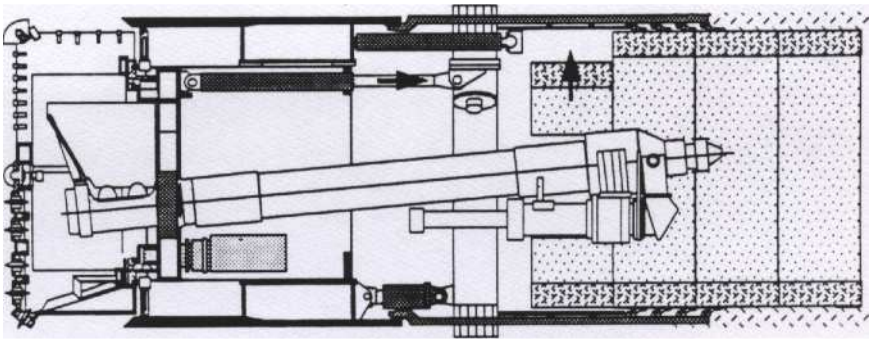
MODE OUVERT PHASE 1
Réglages de l'articulation
- Rétraction des vérins de poussée arrière

MODE OUVERT - PHASE 2

Début de la foration

Avancée de la tâte télescopique SOL
Pose simultanée des voussoirs

sous la poussée des vérins
avants



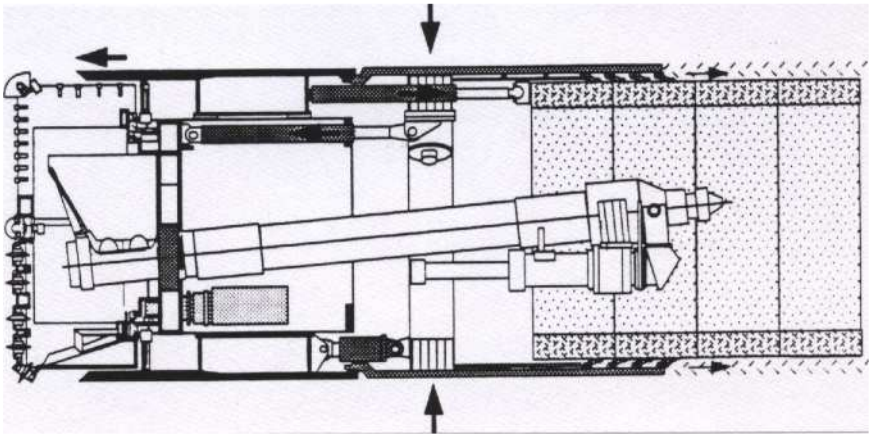
MODE OUVERT - PHASE 3

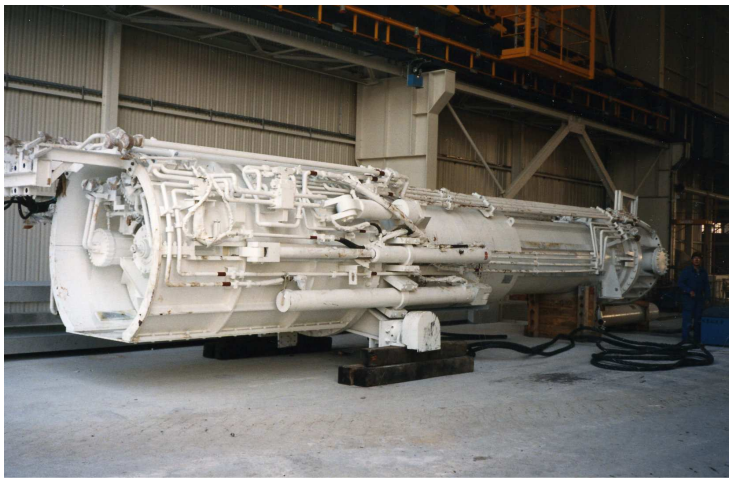
Rétraction des grippers

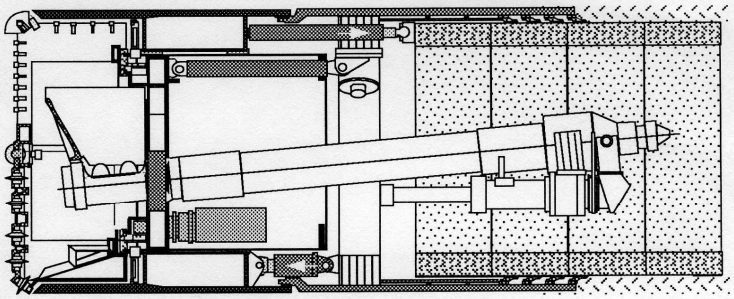
Mise en appuis des vérins arrières si
Rétraction des vérins avants, avance
Simultanément: injection du mortier

sur les voussoirs

du bouclier qui recoiffe la tète de coupe
Je bourrage

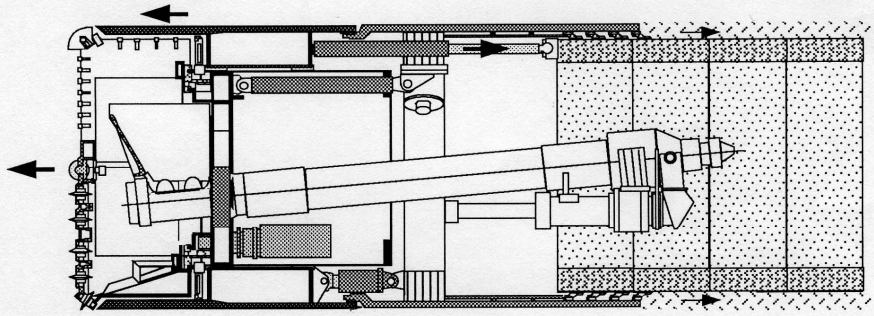






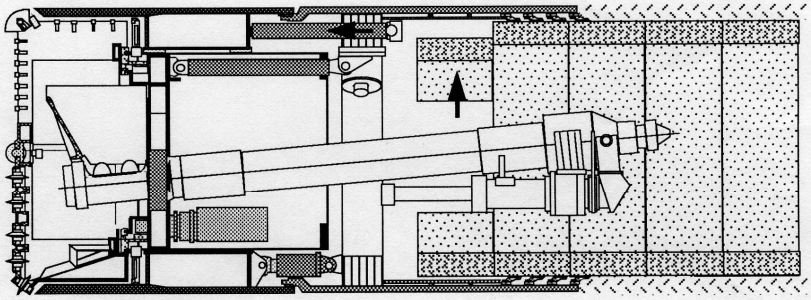
MODE FERME - PHASE 1

Retraction des vérins de poussée avant et des grippers (Passage du mode ouvert au mode fermé)
Réglages de l'articulation
Mise en appui des vérins de poussée arrière



MODE FERME - PHASE 2

Début de la foration
Avancée de la tête télescopique et du bouclier sous la poussée des vérins avants
Simultanément: injection du mortier de bourrage



MODE FERME - PHASE 3

Retraction des vérins de poussée arrière
Pose des voussoirs

◄

● **En mode fermé**, la tâte de coupe teste rentrée. Lots du creusement, l'ensemble des boucliers avant et arrière progresse en prenant appui sur le revêtement, pat l'intermédiaire des vérins de poussée arrière. Quand le creusement est terminé, les vérins sont rétractés et libèrent, à l'arrière, l'espace pour poser les voussoirs.
Le travail en mode ouvert est théoriquement plus rapide, car le creusement du tunnel et la pose des voussoirs sont simultanés. Dans la pratique, la logistique a freiné et l'avantage de l'avancement en mode ouvert n'a pas été considérable. La capacité de traitement et d'évacuation des déblais dans le puits a en effet limité les cadences de travail.

Pilotage assisté par ordinateur

SUR la machine complexe qu'est un tunnelier, l'automatique et l'informatique jouent désormais parmi les premiers rôles. Il faut en effet plus de treize cents informations pour actionner les sept cents moteurs, contacteurs, vérins, pompes, vannes, électrovannes qui font vivre et vibrer la bête.

Relié à ses collègues du tunnelier et du train suiveur par la radio et l'interphone, le pilote est installé devant des dizaines de boutons et de cadrans lumineux. De son grand pupitre, il

- **Commande** la mise en route des pompes et des moteurs, choisit le mode de foration, lance la vis et les tapis, décide du sens de la rotation et de la vitesse de la tête de coupe, actionne chacun des vérins et des grippeurs, recycle la tête télescopique, etc.

- **Règle** l'angle de sa machine, à partir des informations données par le système de guidage ZED et les inclinomètres, et selon les directives de la fiche de pose.

- **Suit, sur quelque cinquante afficheurs numériques** et cent voyants, les indicateurs d'activité des principaux organes

- pour le disque de coupe : l'intensité des douze moteurs, la puissance instantanée et le couple, le débit d'injection d'eau, la pression de la paroi en cinq endroits différents ;
- pour les vérins de poussée avant et arrière : leur course, leur vitesse et la pression hydraulique ;
- pour les grippeurs : la pression hydraulique ;
- pour chacune des deux vis : la vitesse de rotation, le couple, la pression hydraulique et la pression de boue à l'entrée et à la sortie ;
- pour le joint de queue : la pression du mastic.

- **Lit, sur un grand écran**, les informations données en temps réel par le superviseur qui suit l'excavation.

- **Visualise, sur quatre moniteurs**, les convois (grâce à deux caméras placées aux extrémités du train suiveur), la vis d'extraction et les tapis d'évacuation des déblais (sur lesquels sont braquées trois autres caméras). Il jauge ainsi "à vue" la qualité du marinage et la modifie en ajoutant de l'eau et en réglant la vitesse d'avancement (1).

Auscultation enregistrée tous les deux centimètres

Tous les mouvements de la machine sont répertoriés parle système de super--vision (IBM 7532) qui permet tout à la fois

- de suivre en temps réel, sur un écran, les principaux paramètres de l'excavation (force de poussée, vitesse du disque de coupe, des vis, pression de la graisse du joint de queue, des injections de mortier, etc.) ;

- de donner l'alerte en cas de défaut et, dans certains cas, d'arrêter la machine ;

- de stocker et de restituer toutes les données de la pose de chaque anneau

- de transmettre ce " rapport d'anneau " à la surface (par liaison Modem) ;

- de fournir un historique à long terme de l'avancée du tunnelier.

Cette chaîne d'acquisition de données répertorie plus de cent paramètres, qui sont stockés chaque fois que la machine a avancé de vingt millimètres !

La masse énorme des informations ainsi recueillies, importante pour le pilote, est plus précieuse encore, en surface, pour l'analyse du travail du tunnelier et l'amélioration des procédures. Elle permet également d'établir une maintenance préventive.

Trois automates à bord

Dûment informé par les voyants, les afficheurs, le superviseur et les opérateurs, le pilote est également assisté dans le maniement de la machine par un très puissant automate (Alspa C 350). Gérant deux mille entrées-sorties, cet appareil intervient lors de la mise en fonctionnement, dans la commande des mouvements et dans la gestion de la sécurité. Il aide en outre au diagnostic des défauts et des pannes, plus de deux cents messages pré-programmés pouvant apparaître en clair sur ses deux afficheurs alphanumériques.

C'est ce même appareil qui actionne l'érecteur. Les voussoirs sont aspirés, placés en haut, en bas, de côté, enfoncés, ajustés, calés... sur les ordres d'un opérateur qui travaille "à vue", dans la jupe même du tunnelier, en pianotant ses trente-huit volontés sur une télécommande aux allures de clavier d'accordéon.

Deux autres automates travaillent également sur le train suiveur : l'un (Siemens 115 U, trois cents entrées-sorties), au droit de la première remorque, pour gérer l'injection du mortier de bourrage ; l'autre (Télémécanique TSX47-20, deux cents entrées-sorties) sur la remorque 12, pour actionner la grue à voussoirs. Une quinzaine d'afficheurs numériques renseignent les opérateurs.

... et un automaticien

Autant de machines sophistiquées dont l'existence réclame la présence constante des automaticiens à bord des tunneliers (pour le T3, par exemple : deux techniciens pendant les dix mois de mise au point, puis un jusqu'à la jonction, et cela dans chaque équipe).

Chargé de repérer les défauts et les pannes, l'automaticien est devenu le deuxième homme, indispensable, de la cabine de pilotage. Disposant d'une console de programmation, il a pu modifier, au jour le jour, les automatismes.

C'est ainsi que les programmes ont été améliorés tout au long du creusement... Simplification ici, enrichissement là. " Jusqu'à la dernière semaine incluse ", précise même l'équipe du T3, qui s'est tout particulièrement investie dans ce domaine.

(1) Une autre caméra placée dans la tête de coupe n'a fonctionné que *quelques* mois sur le T2; sur le T3, elle n'a jamais donné une image. Trop *d'humidité...*

Le poste de conduite

Installé devant une multitude de cadrans, d'écrans et de boutons lumineux, le pilote du tunnelier commande l'avancement de la machine. Il lance notamment la rotation de la tête, la poussée ou la rétractation des vérins, l'injection du mastic dans les joints de queue, etc. Il surveille le bon fonctionnement du système d'extraction des déblais...

C'est lui qui coordonne le travail des équipes qui posent les voussoirs, injectent le mortier de bourrage, etc.

Il contrôle les paramètres essentiels à la foration et à la sécurité du tunnelier notamment la poussée et le couple de la tête de coupe, le guidage du tunnelier, la pression dans les circuits hydrauliques et de graissage, le fonctionnement de (installation d'injection du mortier de bourrage, la pression de mastic dans les joints d'étanchéité.

Le revêtement

Pour aller de Coquelles à Castle Hill, le tunnel plonge sous mer, remonte et redescend, vire à gauche et à droite. Bref il n'a rien d'un ouvrage rectiligne. Son revêtement a donc dû épouser les courbes du tracé. Comment ce parement de béton armé, épais de quarante centimètres, ondule-t-il ?

Imaginez un tube tronçonné en fines tranches, mais dont le trait de coupe n'est pas parfaitement perpendiculaire au tube et fait un léger angle, parfois à gauche, parfois à droite. Les tranches ainsi obtenues sont plus minces d'un côté que de l'autre. C'est le " pincement ".

Anneaux rouges, anneaux bleus

Imaginez de la même façon le revêtement du tunnel. Il est composé d'une succession d'anneaux " pincés " : leur longueur, de 1,60 mètre en tunnel ferroviaire, varie en fait de 25 mm d'un côté à l'autre (1,40 m, plus ou moins 14 mm en tunnel de service). Le parement est composé avec deux sortes d'anneaux, les " rouges "dont la longueur maximale est située à droite, les " bleus " dont la longueur maximale est à gauche.

Pour que le tunnel aille tout droit, il faut alterner anneaux rouges et anneaux bleus. Pour qu'il tourne à gauche, il faut juxtaposer des anneaux rouges. Pour qu'il tourne à droite, il suffit de placer côte à côte des anneaux bleus. De même, pour incliner le tube, il faut poursuivre en accolant des anneaux dont l'épaisseur maximale est en haut. Inversement pour faire remonter le tunnel, il suffit de juxtaposer des anneaux dont l'épaisseur maximale est en bas.

Toutes les positions intermédiaires permettent une infinité de combinaisons pour faire onduler le tube à volonté, en plan comme en hauteur. En théorie, seul l'angle de pincement limite la courbure à un rayon minima.

Douze positions pour se tortiller

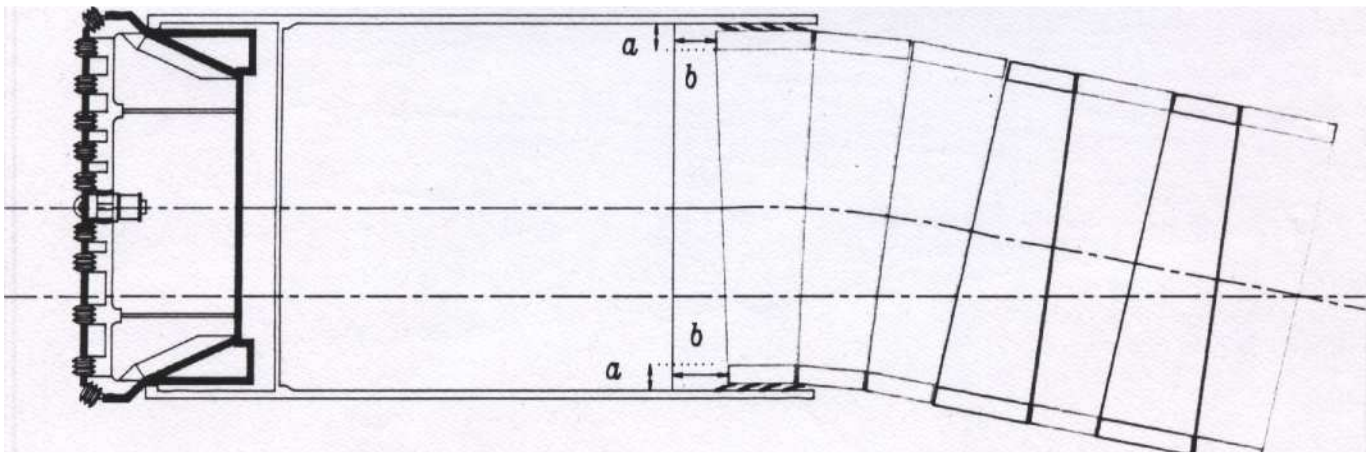
En réalité, les contraintes de construction liées notamment à l'étanchéité du tube ont limité la liberté de pose.

En effet, les anneaux sont boulonnés les uns aux autres, et l'angle de rotation entre deux anneaux consécutifs est conditionné par l'intervalle qui sépare leurs points de fixation.

D'autre part, de même que dans la construction d'un mur on ne superpose pas les briques en alignant les joints verticaux, on s'est interdit, dans la construction de ce tube, d'aligner les joints entre voussoirs.

Enfin, les responsables des tunnels ont préféré que la clé soit montée - comme une clé de voûte - dans la partie haute du revêtement (1). Ce qui ne permettait, en fait, que quatre positions de l'anneau dans le tunnel de service, six dans les tunnels ferroviaires. Au total, le puzzle a donc été composé ainsi :

• **Dans le tunnel de service**, l'axe de la clé est incliné, par rapport à l'axe du tube, à + 54 °, + 18°, -18° ou - 54 °, soit quatre positions possibles pour les anneaux rouges et autant pour les bleus. Ce calepinage implique un rayon de courbure minimum de 602 mètres en plan, 572 mètres en bosse et 926 mètres en creux.



Exécution du revêtement en courbe par positionnement des voussoirs montés en onglets

• **Dans les tunnels ferroviaires**, l'axe de la clé est incliné à + 60°, + 36°, + 12°, -12°, -36° ou - 60°. Le rayon de courbure minimum est de 562 mètres en plan, 722 mètres en bosse et 565 mètres en creux.

(1) Pour des raisons d'approvisionnement, et afin de respecter le pincement voulu, quelques anneaux ont cependant été posés clé en bas dans le T4 ... sans inconvénient.

Le choix des séries

Si le tunnelier suivait parfaitement le tracé préétabli, le calepinage des anneaux aurait pu être calculé a priori pour l'ensemble des tunnels. Mais, malgré la dextérité des pilotes à conduire ces énormes machines dans une tolérance de plus ou moins cinquante-cinq millimètres, on ne pouvait empêcher les ondulations inhérentes à la géologie et à la conduite.

De plus, le choix de tunneliers étanches, pouvant travailler en mode fermé en terrain aquifère, a conduit à ne laisser, entre l'extrados des anneaux et la jupe sous laquelle ils sont assemblés, qu'un espace de trois centimètres (comblé par des brosses métalliques injectées de graisse sous pression).

Ce jeu de très faible amplitude (à rapporter à la largeur de l'anneau : 1,40 m ou 1,60 m) imposait un guidage très précis des tunneliers, sous peine de " coincer " les anneaux dans la jupe, de les abîmer et de détériorer les brosses métalliques du joint. Il s'agissait donc de choisir la meilleure suite d'anneaux possible pour centrer le revêtement au mieux dans la machine. Pour cela, il fallait connaître la position du tunnelier par rapport à la route qu'on lui demandait de suivre, puis sa position par rapport au dernier anneau posé.

Enfin, il fallait aussi prendre en compte les anneaux en cours d'approvisionnement dans le tunnel et que l'on ne pouvait renvoyer ou stocker sur le côté...

Certificat de bonne conduite

Toutes ces contraintes étant combinées, la charge est revenue au topographe de définir la trajectoire de la machine pour les quinze anneaux suivants et de tester toutes les combinaisons d'anneaux possibles pour épouser ce tracé au mieux, avec le meilleur centrage dans la jupe.

Cette suite d'anneaux définie, un programme calculait les valeurs théoriques des mesures à relever entre l'anneau et la jupe. Le conducteur devait alors piloter sa machine suivant la fiche de pose établie par le topographe. Le dépassement de plus de vingt millimètres des valeurs à mesurer entre le revêtement et le tunnelier donnait lieu à l'édition d'une nouvelle fiche de pose pour que le pilote ramène progressivement sa machine vers le tracé théorique, sans risquer d'écraser les brosses assurant l'étanchéité.

Guidage au laser et à l'ordinateur

Anneau après anneau, la progression du tunnelier a donc été orientée grâce à un système de guidage donnant en temps réel au conducteur et au topographe la position de la machine par rapport au tracé projeté.

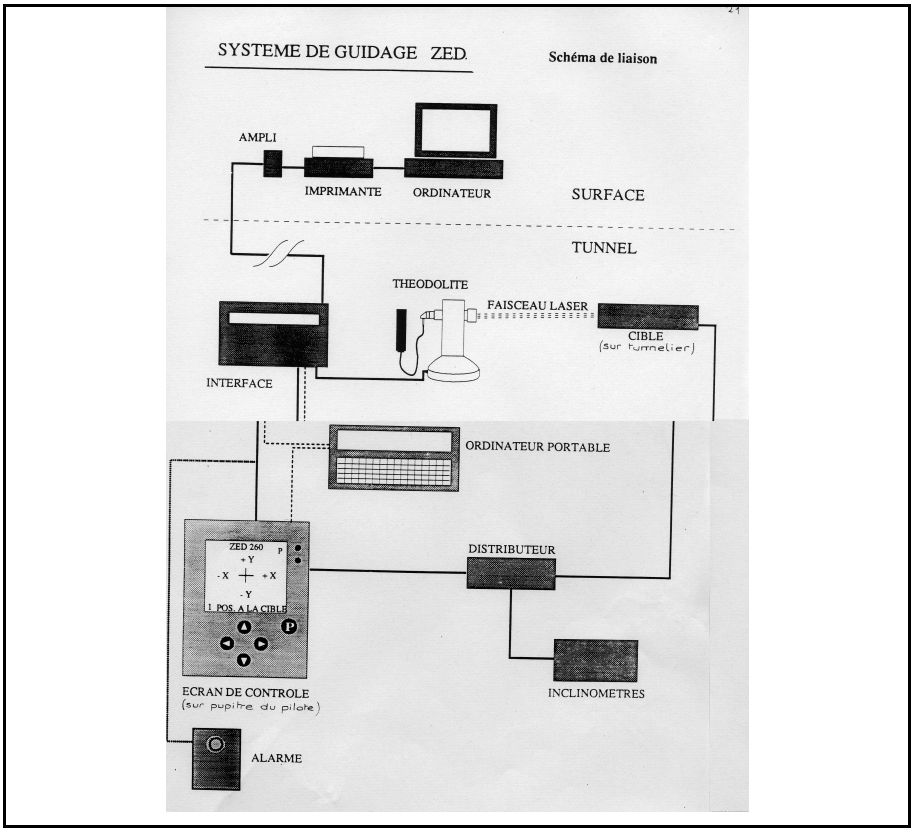
• **Côté mer**, c'est le système de guidage anglais Z.E.D qui a été utilisé. Il met en oeuvre une cible solidaire du tunnelier recevant le faisceau émis par une source laser posée en arrière, sur la dernière console topographique fixée au parement. L'orientation dans l'espace de ce faisceau est lue directement par le théodolite informatique qui envoie le rayon. Après avoir introduit au préalable le tracé théorique dans l'ordinateur du système, puis les paramètres géométriques définissant la position de la source laser ainsi que la pente et l'orientation de son faisceau, la cible réceptrice analyse l'impact du rayon sur deux mires parallèles espacées de trente centimètres.

Pour un avancement donné de la foration, le segment de droite ainsi défini est comparé avec le segment théorique correspondant. L'ordinateur peut ainsi calculer les écarts entre le tunnelier et le tracé théorique. Deux clinomètres complètent ce système pour indiquer le roulis et le tangage de la machine.

Les écarts en millimètres de la position du tunnelier au droit de la cible et sa tendance à l'avancement sont visualisés en permanence sur le pupitre du conducteur. Ces informations sont également imprimées en surface, dans le bureau du topographe, à chaque avancement d'un anneau.

Ainsi, à tout moment, il est possible de connaître la position des tunneliers français par rapport aux tunneliers britanniques puisqu'ils sont reliés géométriquement à la longue chaîne des repères topographiques du système RTM 87.

• **Côté terre**, la méthode utilisée pour guider les tunneliers entre le puits et le terminal était quelque peu différente : le système allemand T.U.M.A. met en oeuvre un tachéomètre électronique motorisé, donc sans opérateur. Cet instrument à tête chercheuse détecte la présence de deux réflecteurs solidaires du tunnelier et fait seul le levé de la machine en mesurant distances et angles à la demande. La position effective de la machine est comparée à la position qu'elle devrait avoir si elle était exactement sur le tracé théorique. Les écarts sont transmis sur écran dans la cabine du pilote.
Les tunneliers ont été conduits avec une précision moyenne de trois centimètres.



Pour caler le revêtement

L'avancement rapide des tunneliers à plusieurs kilomètres du puits a nécessité la mise au point d'un mortier de bourrage, pour remplir le vide annulaire entre le revêtement et le terrain. D'une qualité particulière, il devait être à la fois

- de prise rapide pour assurer un appui suffisant au passage de la première remorque du train suiveur (soit une résistance à la compression (Rc) à une heure de 1,5 bar) ;

- résistant à long terme (Rc à 90 jours :50 bars minimum; moyenne réalisée : 110 bars) ;

- stable pendant le transport et permettant un écart de seize heures entre la fabrication et l'injection.

Ce mortier est constitué de deux produits, stables séparément, composés selon la recette suivante (pour 1 000 litres)

- **Mortier de sable retardé**

Ciment CPA	82 kg
Cendres volantes humides (teneur en eau = 14 %) :	280 kg
Chaux :	45 kg
Sable 0/4 (poids sec) :	865 kg
Sable 0/1 (poids sec) :	455 kg
Retardateur (citrate trisodique)	2,05 kg
Superplastifiant	3 L
Eau	275 L

Total : 909 litres

- **Coulis de ciment fondu**

Ciment fondu Lafarge :	47 kg
Filler siliceux sec :	57 kg
Boue bentonitique (30 kg par m^3 d'eau) :	28 L
Retardateur (acide citrique) :	280g
Eau ajoutée :	27 L

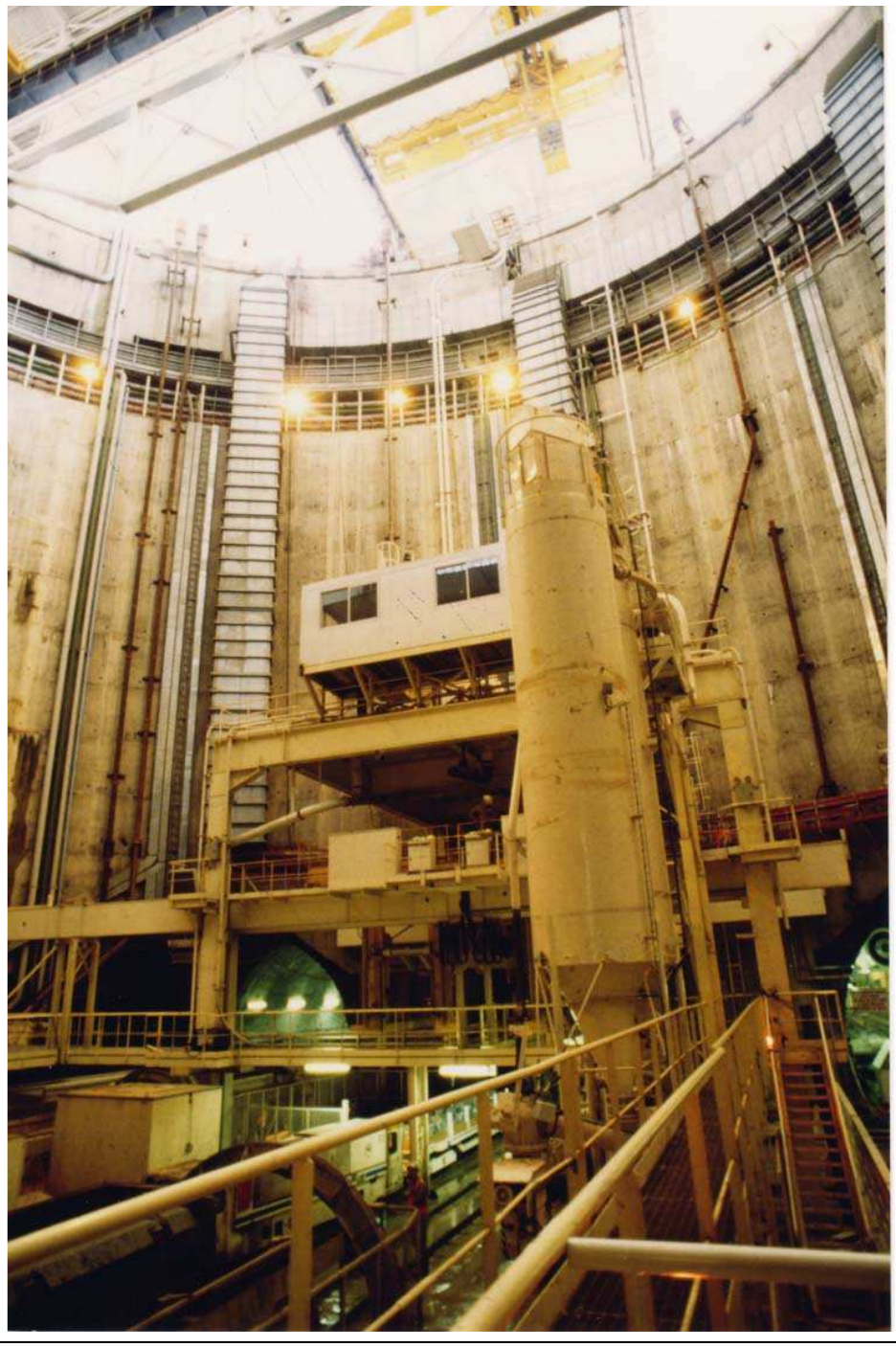
Total : 91 litres

Ces deux produits sont fabriqués sur le site de Sangatte et stockés dans deux silos d'attente situés dans le puit
s.

A chaque rotation des convois, un wagon contenant la quantité nécessaire à l'injection d'un anneau est approvisionné au fond du puits par pompage dans les silos. Pendant le transport, le composant de mortier de sable retardé est malaxé de façon continue. Les produits sont mélangés dans la première remorque juste avant l'injection.

Le mortier est introduit entre le revêtement et le terrain d'abord par le bas au niveau du radier, ensuite par les reins, enfin en partie supérieure, pour assurer un remplissage homogène .

A une distance moyenne de 200 mètres du front, on procède à un dernier collage. Par des trous régulièrement disposés, forés à la perceuse à travers les voussoirs et le mortier, on injecte un coulis fluide eau-ciment-bentonite à une pression légèrement supérieure à la pression hydrostatique. Cette colle se glisse dans les derniers interstices entre la couche de bourrage et le terrain et parfait l'étanchéité.



Pour la sécurité

• L'alimentation électrique du tunnelier est assurée par un câble moyenne tension de 20 KV tiré depuis le poste de distribution installé en surface. Une installation de sécurité permet d'alimenter l'éclairage, l'exhaure et la ventilation. Elle est assurée par un branchement sur l'extrémité de la boucle du réseau prioritaire secouru de l'exhaure et de la ventilation en tunnel.

• Les venues d'eau normales (fuites aux joints et eaux industrielles utilisées dans le tunnelier) sont pompées par une installation d'exhaure permanente capable d'évacuer 30 à 60 litres par seconde.

En cas de venue d'eau importante, une installation d'exhaure de secours permet d'évacuer un débit de 150 Vs dans les tunnels sous mer. Chacune de ces installations de pompage comporte une pompe de remplacement pour pallier une défaillance éventuelle et leur alimentation électrique est secourue.

• Contre les risques d'incendie, tous les équipements présentant un danger potentiel sont équipés soit d'un système d'extinction automatique par gaz halon, soit d'un extincteur à poudre ou à CO_2. De plus, les tunneliers sont pourvus d'équipements manuels de lutte contre l'incendie : lances à mousse ou à eau alimentées par le réseau d'eau industrielle et extincteurs portables.

• En cas de danger, des points d'alerte dans le tunnelier et le train suiveur permettent d'avertir le poste de pilotage ; celui-ci peut actionner une sirène d'alarme et avertir le personnel par haut-parleur.

En cas d'enfumage du tunnel, des appareils respiratoires individuels sont entreposés en différents points des tunneliers, ainsi qu'au droit des postes de travail en tunnel (travaux annexes, stations de relayage) et dans les trains.

Enfin, un convoi est présent en permanence à proximité du tunnelier pour permettre une évacuation rapide du personnel en cas de nécessité. Dans ce cas, le plan de secours interne prévoit que l'évacuation est organisée à partir du poste central de sécurité, sous la responsabilité du directeur des secours, en liaison avec le responsable du tunnelier concerné.