

DES STRUCTURES INTERNES CONTINUES POUR LES TUNNELS DE SOCATOP

CONTINUOUS INTERNAL STRUCTURES FOR SOCATOP TUNNELS

Sylvie BOUVET - Matthieu POCHAT - Denis RIGAULT

ARCADIS ESG

1. INTRODUCTION

Le bouclage de l'autoroute A86 à l'Ouest de Paris, qui permettra l'achèvement de la deuxième rocade d'Ile de France après le boulevard périphérique et avant la Francilienne, nécessite la réalisation de deux tunnels routiers :

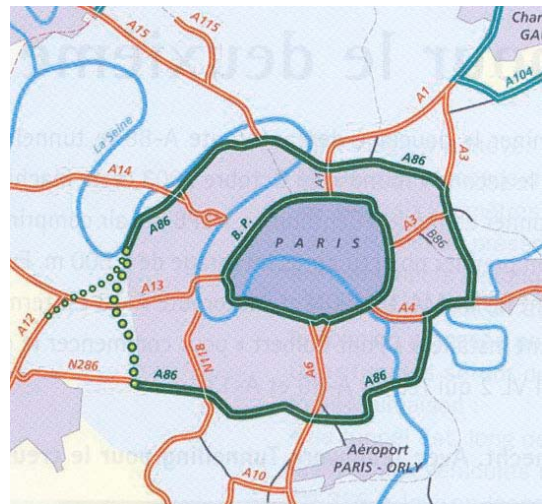
- Un tunnel réservé aux véhicules légers, dit "tunnel Est", de 10 km de longueur, qui reliera Rueil-Malmaison à Jouy en Josas via l'A13. Ce tunnel est décomposé en deux portions, l'une baptisée "VL1" de 4.5 km de long, entre Rueil-Malmaison et l'A13, et l'autre baptisée "VL2" de 5.5 km de long entre Jouy en Josas et l'A13
- Un tunnel tout trafic dit "tunnel Ouest" de 7.5 km de longueur qui reliera Rueil-Malmaison à l'A12 et qui sera accessible aux poids lourds.

Les structures internes du tunnel Est sont continues sur l'ensemble du tracé soit sur plusieurs kilomètres ce qui n'avait encore jamais été réalisé en France.

Cette particularité a donc donné lieu à des études poussées qui ont permis de s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble de ces structures.

1. INTRODUCTION

Socatop Tunnels will complete on the west side the new "ring" around Paris region, called A86 :



- The "East tunnel", 10 km long, is devoted to light traffic only. It connects Rueil Malmaison to Jouy en Josas, with an intermediate interchange with A13 motorway. The northern segment, 4.5 km long, is called VL1 and the southern segment, 5.5 km long, VL2.
- The "West tunnel" receives all traffic and connects Rueil Malmaison to A12.

2. LE TUNNEL EST ET SES STRUCTURES INTERNES

2.1. Présentation générale du projet

L'histoire du bouclage de l'A86 est longue et mouvementée.

Elle commence au début des années 1970 avec les premières ébauches de tracés en surface, qui font l'objet d'une levée de boucliers des habitants des zones résidentielles traversées, et sont abandonnées.

Une dizaine d'années plus tard, naît une solution en tranchée couverte, elle aussi abandonnée, pour des raisons environnementales cette fois.

C'est en 1988 que la solution entièrement souterraine proposée par COFIROUTE est finalement retenue. C'est en fait la seule approche qui permette de satisfaire à la fois les exigences environnementales du site et les exigences des riverains des zones traversées. Les premières études de faisabilité sont ainsi lancées en 1990.

L'année 1994 voit le lancement de l'enquête d'utilité publique et l'attribution de la concession des futurs tunnels à COFIROUTE. Enfin, en Décembre 1995, la DUP est approuvée.

En Novembre 1996, les premiers travaux démarrent sur le site de Rueil-Malmaison. Cependant ils sont vite suspendus car le Conseil d'Etat annule la concession et demande de procéder à un appel d'offre européen, comme l'exigent les règles communautaires.

La concession est finalement réattribuée à COFIROUTE en Septembre 1999 et le début de l'année 2000 voit le redémarrage des travaux du tunnel Est sur le site de Rueil-Malmaison.

C'est en Novembre 2000 que le creusement du tunnel Est commence enfin à Rueil-Malmaison. La première partie, dite VL1, s'achève en Octobre 2003 lorsque le tunnelier débouche au niveau de l'A13. Le tunnelier est alors démonté puis remonté à l'autre bout du tunnel, côté Jouy en Josas, et le creusement de la partie VL2 du tunnel redémarre en Juin 2005.

Aujourd'hui, le creusement de la partie VL1 du tunnel Est est terminé et les structures internes sont en cours de réalisation. Quant à la partie VL2, son creusement est donc en cours et la réalisation des structures internes a déjà débuté à l'arrière du train suiveur du tunnelier afin de tenir les délais d'ouverture de ce tronçon qui devrait avoir lieu en Décembre 2009, soit près de 40 ans après les premières suggestions de tracé de bouclage de l'A86 !

This paper describes the East tunnel internal R.C. structures, which, for the first time in such a project in France, are continuous over the total length of each segment, i.e. 4.5 and 5.5 km.

This continuity raised specific issues which had to be thoroughly addressed, and are described here.

2. EAST TUNNEL INTERNAL STRUCTURES

2.1. General presentation

For many reasons, closing A86 motorway was a lengthy and difficult task.

A first scheme was considered in 1970, as a conventional motorway at ground level, which met strong opposition from local people, who in this residential area are quite influent.

Ten years later a cut and cover concept was proposed, and soon after abandoned for environmental reasons.

Then, in 1988, a fully underground project was proposed by COFIROUTE, a private Toll Road Company, and finally adopted. It appeared indeed as the only way to meet environmental criteria and public acceptance.

The "DUP" (official agreement with the project which gives it priority and allows land acquisition) and the concession contract to COFIROUTE were issued in 1995.

Works started in 1996, but were interrupted soon after in order to comply with a request from "Conseil d'Etat" (Upper state court) to proceed with a competitive procedure prior to allow a concession contract, in order to apply E.U. rules.

Finally, COFIROUTE was awarded again its concession contract in September 1999, and works resumed in 2000.

The northern segment (VL1) boring started in November 2000 from the North (Rueil Malmaison) and was achieved in October 2003. The boring machine was then dismantled and carried to the south extremity of the south segment (VL2), where boring started again in June 2005, and proceeds now rather efficiently.

While VL1 internal structures are presently under construction, work on VL2 internal structure has already started in order to meet December 2009 deadline for opening to traffic, approximately 40 years after early planning on this projects.

Une longue histoire pour un projet innovant de grande envergure comme nous allons le voir à présent, car les tunnels de SOCATOP ont fait l'objet d'une conception et d'une réalisation originales.

2.2. Le tunnel Est

2.2.1 Le tunnelier

Le tunnel Est traverse des horizons géologiques très différents, entre 20 et 90 m de profondeur.

C'est pourquoi le tunnelier, spécialement conçu pour ce tunnel, est de type mixte c'est-à-dire qu'il est capable de travailler selon plusieurs modes de creusement en fonction du terrain traversé – spécificité unique au moment de sa réalisation. Ces modes de creusement sont récapitulés ci-dessous :

- Un mode pression de boue utilisé lors de la traversée des sables de Fontainebleau.
- Un mode ouvert utilisé lors de la traversée des couches de craie, de calcaire grossier ou de marnes et caillasses.
- Un mode pression d'air (mode semi-fermé) utilisé pour la traversée des couches d'argile plastique et de marnes et caillasses.
- Un mode pression de terre (mode fermé) utilisé lors de la traversée des sables d'Auteuil et de Beauchamp.

Le tunnelier a une longueur de 200m et un diamètre d'excavation de 11m56 pour un diamètre extérieur du tunnel de 11m24. Il est capable suivant son mode de fonctionnement de progresser à une vitesse moyenne de 12 à 14 m par jour.

2.2.2. Le revêtement du tunnel

Le tunnelier pose à l'avancement, à l'arrière de la tête de coupe, de 6 à 7 anneaux par jour.

Ces anneaux ont 2 m de largeur en moyenne et 42 cm d'épaisseur. Ils sont composés chacun de 8 voussoirs, préfabriqués en usine et acheminés jusqu'au tunnelier par un train d'approvisionnement, qui circule directement sur le revêtement du tunnel. Ils sont ensuite pris en charge au niveau du tunnelier par un bras érecteur qui les positionne. L'assemblage se fait par boulonnage.

La position des voussoirs est variable suivant les anneaux et il existe une vingtaine d'anneaux théoriques distincts sur l'ensemble du tracé du tunnel.



2.2. The East Tunnel

2.2.1. Boring machine

This tunnel crosses a variety of soil layers, from 20 metres depth down to 90 metres.

In order to cope with this situation, the boring machine may operate in several configurations :

- *Under slurry pressure when crossing Fontainebleau sand layers,*
- *Opened when crossing chalk, limestone, marl and gravel layers,*
- *Half opened, under air pressure, into clay, marl, and gravel layers,*
- *Closed, under earth pressure, into Auteuil and Beauchamp sand layers.*

This boring machine is 200 m long with a cutting diameter of 11.56 m, which allows an 11.24 m external tunnel diameter. It may excavate 12 to 14 m a day.

2.2.2. Tunnel lining

This lining is made of reinforced concrete precast segments, placed progressively by the boring machine, right behind its cutting head.

Each lining ring comprises 8 segments, 6 typical, 2 counter key and one key segments.



2.2.3. Les niches du tunnel

A intervalles réguliers le long du tunnel, le revêtement courant doit être découpé et en partie reconstitué afin de créer les niches de sécurité ainsi que les puits d'accès.



Il existe plusieurs types de niches :

- Les niches de désenfumage (Niches ND)

Elles sont situées tous les 400 mètres. C'est par ces niches que l'air est extrait de l'espace trafic inférieur et envoyé dans la gaine d'extraction située sous la dalle de roulement inférieure pour être évacué vers les unités de ventilation du tunnel.

- Les niches de sécurité avec escaliers de transfert (Niches NS-ET)

Elles sont situées tous les 200 mètres et elles sont constituées de refuges de sécurité placés au niveau de la dalle basse et de la dalle médiane, avec un escalier de transfert qui permet de passer de l'espace trafic inférieur à l'espace trafic supérieur, ou inversement, en cas de feu dans l'un des deux espaces.

- Les puits de secours (PS)

Ils sont situés tous les kilomètres et sont conçus selon le même principe que les niches NS-ET avec une ouverture légèrement plus faible (3.92 m) et des escaliers permettant à la fois le transfert entre les deux espaces de circulation et l'accès en surface. En cas de feu dans le tunnel, les usagers rejoignent ces puits d'évacuation après avoir cheminé dans l'espace trafic non affecté par l'incendie.

- Les unités de ventilation (UV)

L'ensemble des unités de ventilation du tunnel assure l'approvisionnement en air frais du tunnel ainsi que l'évacuation de l'air vicié via les gaines de ventilation supérieures et inférieures.

Counter key and key segments allow to orient the alignment in accordance with the project and to correct the geometry whenever it's necessary. Twenty different configurations are used. Segments are 2 m long and 42 cm thick. They are bolted together.

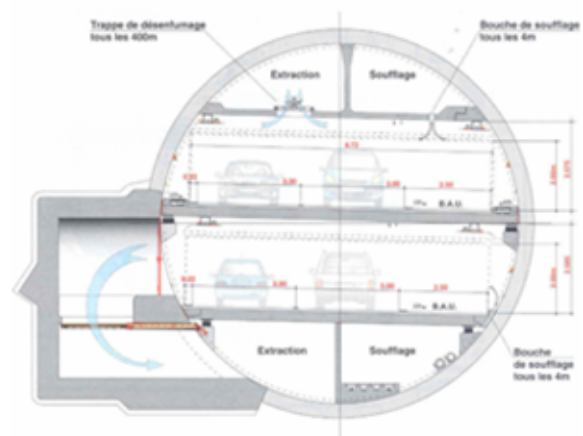
2.2.3. Tunnel recesses

The lining has to be partially removed and rebuilt wherever recesses and exits are located, when one of the following equipments is met :



- *Smoke extraction recesses (ND)*

They are located every 400 metres. They allow polluted air transfer from the lower traffic level to the exhaust chamber located underneath the lower slab.



- *Safety recesses with transfer stairs (NS-ET)*

They are located every 200 metres. They allow, in case of emergency, to escape from the upper or the lower traffic level and to reach the other level.

Ces unités de ventilation se trouvent principalement au niveau des extrémités des tronçons de tunnel.

Cependant, il existe sur le tronçon VL1 une unité de ventilation intermédiaire, dite UV du Butard, qui a été réalisée suivant le même principe que les puits. Les voussoirs ont donc été posés normalement lors du passage du tunnelier, et ont dû être découpés puis reconstitués après la réalisation de la niche, avec toutes les contraintes qu'une ouverture aussi grande implique : cette unité de ventilation du Butard mesure 7 m de large en partie haute et 9.40 m de large en partie basse.

2.3. Les structures internes

Le tunnel Est est composé de 4 ouvrages distincts qui permettent la séparation des différents espaces intérieurs du tunnel.

On trouve successivement en partant du bas vers le haut :

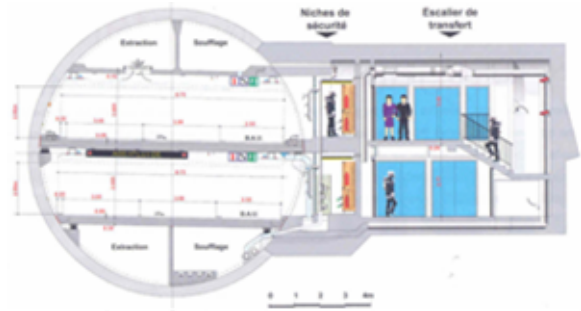
- Le radier et la cloison basse séparant les gaines de ventilation de l'espace trafic inférieur.
- La dalle basse permettant le trafic des véhicules légers dans le sens Rueil-Malmaison / Jouy en Josas.
- La dalle médiane permettant le trafic des véhicules légers dans le sens Jouy en Josas / Rueil-Malmaison.
- La dalle et la cloison hautes constituant les parois des gaines de ventilation de l'espace trafic supérieur.

2.3.1. Le radier et la cloison basse



Le radier est réalisé en béton B32. Il comprend 4 caniveaux qui permettent le cheminement le long du tunnel de l'ensemble des câbles d'alimentation électrique des équipements.

La cloison est réalisée en béton B32 autoplaçant. Cette cloison de 1.74 m de hauteur et de 15 cm d'épaisseur est encastrée à sa base dans le radier et libre en tête. Elle n'est pas reliée à la dalle basse et elle ne lui sert pas d'appui intermédiaire.



- Safety exit shafts (PS)

They are located every kilometre. They allow to evacuate people from either the upper or lower level up to ground level.

- Ventilation units (UV)

Those units bring fresh air into the tunnels and extract polluted air. Most of them are located at extremities. However, an intermediate one is located in the northern segment (VL1). It required a very large recess, 7.40 m to 9.40 m wide.



2.3. Internal structures

The tunnel is divided into four main volumes by the following structural elements :

La cloison basse sépare les gaines de soufflage et d'extraction qui permettent la ventilation de l'espace trafic inférieur. L'étanchéité de la structure est assurée par un joint situé en tête de voile entre la cloison et la dalle basse joint qui doit être capable d'encaisser à la fois les tassements sous les passages des véhicules mais aussi les décompressions en cas de feu dans l'espace trafic inférieur.

2.3.2. La dalle basse

La dalle basse est une des deux dalles de roulement du tunnel. Elle supporte le trafic des véhicules circulant dans le sens Rueil-Malmaison / Jouy en Josas.

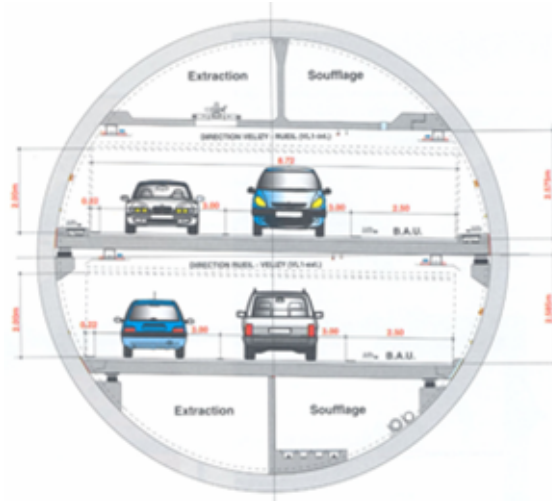
Cette dalle est principalement constituée d'éléments préfabriqués en béton B50 clavés entre eux. Elle fait 30 cm d'épaisseur, 8.80 m de large et 7.65 m de portée. Elle repose par l'intermédiaire de deux files d'appuis néoprènes disposés tous les 2.67 m en section courante sur deux longrines filantes en B50 coulées en place et directement encastrées dans les voussoirs du tunnel.



Cette dalle est posée à l'avancement juste derrière le tunnelier afin de permettre la circulation dans le tunnel.

Une fois posées, les dalles sont rendues continues par des clavages transversaux et longitudinaux coulés en place. En phase travaux, les tronçons ainsi créés ne doivent pas excéder 200 m environ afin de limiter les déformations des appuis néoprènes sous l'effet du retrait, des variations thermiques, de l'ovalisation du tunnel ... En fin de travaux, tous ces tronçons de 200 ml sont clavés et la dalle basse est ainsi rendue continue d'un bout à l'autre du tunnel et ancrée aux UV à chaque extrémité.

Au niveau des niches, des dispositions particulières sont prises vis-à-vis de la pose des dalles préfabriquées afin de permettre leur creusement.



- Floor slab and lower partition wall between air intake and air exhaust,
- Lower slab carrying northbound traffic from Rueil Malmaison to Jouy en Josas,
- Intermediate slab carrying southbound traffic from Jouy en Josas to Rueil Malmaison,
- Upper slab and partition wall between air intake and air exhaust.

2.3.1. Floor slab and lower partition wall

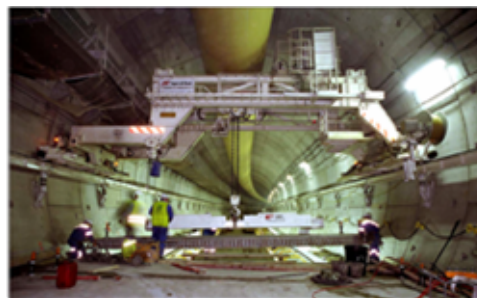
The floor slab receives 4 gutters which carry power lines to all tunnel equipments.

The partition wall, 15 cm thick, is made of "autoplaçant" concrete C32. Since it cannot be connected to the upper slab in order not to carry loads and to accommodate differential movements, an air tight joint closes this upper gap.

This joint is designed to allow vertical movements due to long term deformations, traffic loads deflections, and fire deformations.

2.3.2. Lower slab

This slab carries the southbound traffic. It is built in precast elements made of C50 concrete. It is 8.80 m wide and rests upon two rows of rubber bearings at a distance of 7.65 m. Along each row, bearings are located every 2.67 m, and are supported by a corbel fully connected to the tunnel lining.



Deux solutions sont utilisées :

- l'utilisation de dalles préfabriquées tronquées posées sur leurs appuis définitifs du côté opposé à la niche et sur des portiques en HEB du côté de la niche à réaliser.
- l'arrêt de la pose des dalles préfabriquées au droit de la niche à réaliser et la mise en place de platelages métalliques provisoires sur toute la largeur de la dalle basse afin de permettre la circulation dans le tunnel et la réalisation des niches.

Les parties de la dalle basse non réalisées par des éléments préfabriqués sont alors, après achèvement de la construction des niches, coulées en place.

2.3.3. La dalle médiane

La dalle médiane est la deuxième dalle de roulement du tunnel. Elle supporte le trafic des véhicules circulant dans le sens Jouy en Josas / Rueil-Malmaison.

Cette dalle est réalisée en béton B50 et, contrairement à la dalle basse, elle est entièrement coulée en place. Elle fait 30 cm d'épaisseur, 10.36 m de large et 9.96 m de portée environ. Elle repose par l'intermédiaire de deux files d'appuis néoprènes disposés tous les 4 m en section courante sur deux corbeaux filants en B50 directement encastrés dans les voussoirs.

Cette dalle est la dernière structure du tunnel à être réalisée parce que, une fois coulée, elle empêche la circulation des camions dans le tunnel. En effet, elle ne laisse libre qu'un gabarit routier de 2.50 m environ avant pose des enrobées et des équipements du tunnel et elle ne permet donc une fois réalisée que le passage des véhicules légers ou de véhicules spéciaux de faible hauteur.

Comme pour la dalle basse, les tronçons de dalle médiane ainsi coulés en place ne doivent pas excéder 200 m environ afin de limiter en phase travaux les déformations des appuis néoprènes sous l'effet du retrait, des variations thermiques, de l'ovalisation du tunnel ... Par conséquent, ont été créés au niveau des niches de sécurité des clavages transversaux qui ne seront réalisés que lors d'une opération de clavage général de la dalle lors de l'ancrage de cette dernière dans les deux UV d'extrémité du tunnel.

La dalle médiane constitue un des éléments essentiels du tunnel car elle est la structure séparatrice des deux espaces trafic du tunnel et, de ce fait, c'est elle qui doit assurer en tout premier lieu la sécurité des personnes en cas de feu dans le tunnel.



Once placed, precast elements are connected by cast in situ joints every 2.67 metres, and completed by cast in situ edges in order to match perfectly the tunnel lining.

In order to allow early deformations, mainly creep, prior to final closure, a joint is left free every 200 m during construction. Once completed, the total length is made continuous and connected at its extremities to the ventilation units.

At the recesses, special arrangements have been used during construction, either partial precast slabs with temporary supports or temporary steel slabs. In both cases the remaining parts are cast in situ after completion of the adjacent structure.

2.3.3. The intermediate slab

This slab carries northbound traffic.

It is 30 cm thick, 10.30 meters wide, and is entirely cast in situ. It is also supported by two rows of rubber bearings, spaced at four meters longitudinally. These bearings rest upon two corbels fully connected to the tunnel lining.

In order to allow trucks and special equipments traffic on the lower slab during construction, this slab is cast at the latest. The final clearance of both traffic levels is indeed of 2.5 metres and allows light traffic only.



As it is the case with the lower slab, transverse joints are left every 200 metres during construction in order to allow early deformations, mainly shrinkage.

En effet, comme nous l'avons vu dans la présentation des niches du tunnel, les niches de sécurité situées tous les 200 m environ ne permettent pas l'évacuation des gens directement vers la surface, rôle joué par les puits situés tous les kilomètres. En revanche, elles permettent le transfert d'un espace trafic à l'autre et la mise en sécurité dans l'espace non atteint par le sinistre. La dalle médiane joue donc un rôle clé dans la sécurité du tunnel et doit être à la fois parfaitement étanche aux gaz et stable au feu 2 heures en cas de sinistre dans l'un des deux espaces trafic.

2.3.4. La dalle haute et la cloison haute

Les structures supérieures du tunnel baptisées "dalle haute" et "cloison haute" constituent les gaines de ventilation de l'espace trafic supérieur du tunnel.

La dalle haute a 15 cm d'épaisseur, 7.70 m de large et 7.50 m de portée environ. Elle est directement encastrée dans le revêtement du tunnel côté gaine d'extraction et, côté gaine de soufflage, elle repose par l'intermédiaire d'un appui continu béton/béton sur un corbeau filant encastré dans les voussoirs. Elle est réalisée en béton B50.

La cloison haute sépare les deux gaines de soufflage / extraction. Elle a une épaisseur de 15 cm et une hauteur moyenne de 2 m environ. Elle est encastrée en tête dans le revêtement du tunnel et en pied dans la dalle haute. Elle est réalisée en béton B50 autoplaçant.

L'étanchéité de la structure est assurée par un joint situé entre la dalle et le corbeau qui doit être capable d'encaisser les écrasements ou les décompressions en cas de variation thermique et en cas de feu. L'ensemble de la structure doit être stable au feu deux heures et le fonctionnement de la gaine de soufflage doit pouvoir être assuré pendant au moins une heure.



Comme la dalle médiane et la dalle basse, les structures supérieures sont ancrées aux UV aux deux extrémités des tunnels. En revanche, contrairement à la dalle médiane, aucun clavage provisoire n'est laissé dans les structures supérieures. L'ensemble doit donc être capable de reprendre au niveau des ancrages dans le revêtement les efforts engendrés par les déformations gênés (variations thermiques et retrait).

Once the slab is completed, all joints are cast and extremities are fully connected to the ventilation units.

As it separates the two traffic spaces, this slab is a key element in view of safety with regard to fire in one of these spaces. Indeed safety strategy in this case is based upon the idea that once fire has appeared at one level, the other level must remain safe and allow people to walk to the next emergency exit and up to ground level. It must therefore be fully air tight to prevent smoke to flow from one level to the other, and must remain fully stable during two hours.

2.3.4. Upper slab and partition wall

These upper structures enclose the exhaust and intake ventilation shafts of the upper traffic level. They are both made of C50 concrete.

The upper slab is 7.70 m wide and 15 cm thick. It is fully fixed to the tunnel lining on the air exhaust side and rests upon a corbel on the air intake side.

The partition is 15 cm wide, with a 2 m height. Its upper end is fixed into the lining. Because of the lack of access for vibration, it is made of "self placing" concrete.

A compressible joint guarantees air tightness between the slab and its supporting corbel.

In case of fire air tightness must be maintained for one hour, and structural integrity for two hours.

Contrary to the upper and lower slabs, these structures are built without temporary joints. All loads due to linear deformations must be taken into account into the design of the connections with the lining and with the ventilation units at the extremities.



3. LES SPECIFICITES TECHNIQUES DES STRUCTURES INTERNES DU TUNNEL EST

3.1. Présentation générale des spécificités et du contexte

La spécificité majeure de ces structures est d'être continues, sans joint de dilatation sur l'ensemble du tracé et d'être ancrées à leurs deux extrémités aux unités de ventilation.

De plus, un grand nombre de paramètres fonctionnels tels que : les rayons de courbure du tunnel en plan et en élévation, le blocage longitudinal des dalles, le blocage transversal des dalles de circulation en courbe par des appuis guidés, les sollicitations thermiques affectant l'ensemble du tunnel ou bien une partie seulement, les gradients thermiques en cas de feu, le retrait gêné... interviennent dans le dimensionnement et le comportement de ces structures et font de ces éléments en béton armé des ouvrages particuliers au fonctionnement complexe.

3.2. Le traitement des liaisons entre les structures internes et le revêtement du tunnel

Comme nous l'avons vu, certains éléments des structures internes sont ancrés dans le revêtement du tunnel. Il s'agit des longrines d'appui de la dalle basse, des corbeaux d'appui de la dalle médiane, du corbeau côté gaine de soufflage de la dalle haute, de l'encastrement côté gaine d'extraction de la dalle haute et enfin de l'encastrement en tête de la cloison haute.

Une des contraintes majeures de la réalisation des liaisons entre ces structures internes et le revêtement du tunnel réside dans le fait qu'un anneau sur deux, ces dernières se trouvent quasiment au niveau d'un joint de voussoir ou bien d'un voussoir de clé, c'est-à-dire dans des zones très ferrillées où les scellements s'avèrent très compliqués, voire impossibles.

De plus, à ce problème se greffe celui des tolérances de réalisation du tunnel (roulis, désaffleurement des voussoirs, position verticale réelle du tunnel par rapport à la "ligne rouge" théorique...) qui fait que les zones d'implantation des scellements - appelées aussi fenêtres de tir - sont encore réduites.

C'est ainsi que les corbeaux de la dalle médiane ont finalement été justifiés avec des scellements un anneau sur deux du fait de l'espacement des appuis fixé à 4 m soit exactement un anneau sur deux.

3. SPECIFIC TECHNICAL ISSUES

3.1. General presentation

With its size and its two levels of traffic, this tunnel is not of a standard type. However, from a structural point of view, its specificity lies mainly with the full continuity of its internal structures.

Other aspects add to the design complexity : plan and profile curvatures, connections at both extremities, guided bearings in curves, thermal loads, fire loads and restrained shrinkage.

3.2. Connections between internal structures and lining

As mentioned earlier, internal structural elements are fully connected to the adjacent lining, i.e. the four corbels supporting the roadway slabs, the corbel supporting the upper slab, the upper slab itself and the upper partition wall.

These connections are made through embedded rebar, and therefore request to drill a significant number of holes into the precast lining element. Since the actual geometry of these elements deviates from its theoretical one, this operation requires a very careful preparation and execution.

In addition to this, it appears in many cases that the connection falls into a joint between two lining segments. As a consequence, for instance, corbels supporting the intermediate slab are connected to every other segment only.



A similar situation occurred at the connections of the upper slab and upper partition to the lining. However, since it was not possible in this case to skip a segment, a drilling configuration had to be prepared for each and every segment.

Because of this complexity and of the very large quantity of drillings, these operations were fully mechanized with the help of a special machine tool using numerical command and laser survey equipment.

Pour l'encastrement de la dalle haute et de la cloison haute, les études ont été plus complexes car la continuité de ces structures et les efforts repris aux encastresments ne permettaient pas de se limiter à des scellements un anneau sur deux.

Chaque configuration d'anneau a donc dû être étudiée et, suivant les structures, des familles de plan de tirs possibles ont été définies. Toutes ces familles ont été vérifiées une à une pour chacune des structures concernées.

Afin de réaliser l'ensemble des scellements tout au long du tracé des deux tunnels Est, les opérations ont été accomplies par un atelier automatisé qui procède tout d'abord au rabotage des voussoirs puis au perçage des trous par guidage laser suivant les plans de tirs définis pour chacun des types d'anneaux.

3.3. Le calcul des dalles continues

3.3.1. Les dalles de roulement

C'est principalement pour une question de confort de l'usager que les deux dalles de roulement sont réalisées sans un seul joint de chaussée sur les 10 km du tunnel. De plus, la continuité des structures permet de garantir plus facilement l'étanchéité entre les différents espaces du tunnel.

En ce qui concerne les deux dalles de roulement ancrées dans les unités de ventilation à leurs deux extrémités en phase de service, elles sont calculées pour reprendre les efforts associés aux variations linéaires gênées auxquels elles sont soumises (retrait, variations thermiques...). Toutefois, comme les dalles ne sont pas capables de reprendre l'ensemble de ces efforts, leur continuité n'est réalisée qu'à l'achèvement des travaux.

C'est pourquoi, tous les 200 ml environ, des clavages transversaux sont laissés et sont bétonnés lors d'une opération de "clavage général" final une fois tous les tronçons de 200 ml réalisés. Ceci permet de minimiser les efforts internes liés au retrait. Par exemple pour la dalle médiane, suivant les deux hypothèses extrêmes de réalisation du clavage final, 22 à 70 % du retrait sera déjà fait.

En phases travaux, tant que l'opération de clavage général définitif des différents tronçons de 200 ml n'est pas réalisée, ce sont donc les appuis néoprènes sur lesquels les dalles reposent qui reprennent les distorsions liées aux déformations libres des dalles.

Ces appuis sont donc dans un premier temps vérifiés avec l'ensemble des sollicitations auxquelles ils sont soumis en phase provisoire travaux avant clavage général.



3.3. Continuous slabs design

3.3.1. Roadway slabs

Riding comfort is the main goal behind the slabs structural continuity, but it brings also a significant reduction of maintenance. It is indeed usually at joints that most deficiencies occur under operation. Another advantage is full air tightness.

As indicated earlier, both slabs were designed to resist all loads associated to linear variations, mainly shrinkage and temperature variations. However, in order to let early shrinkage take place freely, full continuity is implemented at completion only, when all joints spaced at 200 metres and end connections are cast. In fact, depending upon various parameters, mainly speed of assembly, it was estimated that 22 to 70 % of shrinkage would have taken place prior to "locking" of joints.



Pendant cette phase, ce sont principalement les appuis d'extrémité de tronçon qui sont les plus sollicités et les plus distordus. Cette distorsion est parfois telle qu'elle ne permet pas à ces appuis de reprendre les sollicitations supplémentaires amenées après la réalisation du clavage général final. C'est pourquoi, avant d'assurer la continuité, on procède tout d'abord à une opération de recalage de tous les appareils d'appuis néoprènes dont les distorsions observées en phase travaux ne sont pas compatibles avec les efforts qu'ils sont susceptibles de reprendre ultérieurement.

Pour la dalle basse, seuls quelques appuis sont recalés. En effet, pour cette dalle de roulement les sollicitations en phase service sont beaucoup plus faibles qu'en phase travaux et la capacité des appuis néoprènes reste suffisante, même en conservant une prédéformation résiduelle. Ce n'est pas le cas pour la dalle médiane où tous les appuis doivent être recalés avant de procéder au clavage général final. En effet, ces appuis sont espacés de 4m alors que ceux de la dalle basse sont espacés en zone courante de 2.67m, de plus l'ovalisation résiduelle du tunnel est plus importante au niveau de la dalle médiane qui se situe pratiquement au niveau de la plus grande largeur du tunnel et enfin la dalle est bloquée transversalement dans les zones courbes par des appuis monodirectionnels.

Pour toutes ces raisons, la totalité de la capacité des appuis néoprènes est nécessaire après le clavage général final et donc l'ensemble des ces appuis doit être recalé.

3.3.2. Les structures supérieures

Les structures supérieures donnent lieu, pour les mêmes effets, à des problèmes différents car elles sont directement encastrées sur toute la longueur du tunnel dans le revêtement. Elles n'effectuent donc jamais leur retrait librement, contrairement aux dalles de roulement. Il résulte de la restriction permanente de cet ensemble une prédéformation qui produit une pré-fissuration systématique qui amoindrit le module de la dalle et de la cloison haute et ce même vis-à-vis des effets de compression associés à une élévation de température. En effet, avant de mobiliser pleinement le béton en compression, une dilatation doit refermer les fissures de retrait.

Afin de déterminer et de localiser les efforts associés aux variations linéaires gênées, des modèles tridimensionnels de l'ensemble tunnel / dalle haute & cloison haute / autres structures ancrées dans les anneaux du tunnel ont été étudiés :

- en phases travaux, un modèle à extrémités libres car, du fait de l'ordre de réalisation des travaux, les structures supérieures ne sont pas directement ancrées dans les unités de ventilation en extrémités des tronçons.

Careful attention was given to transverse deformations of rubber bearings, both during construction and operation. It appeared necessary to reset many of those, at the end of construction, in order to prevent excessive deformation under operation. It was the case for all the intermediate slab bearings, which are spaced at 4 m and are subject to larger deformations under operation. On the contrary, only a few bearings supporting the lower slab, which are spaced at 2.67 metres, had to be reset.



3.3.2. Upper structures

For these structures a different behaviour is expected, since longitudinal movements are restrained by lateral connections as soon as each element is cast. Therefore a different approach was adopted, taking into account cracking, which appeared to be unavoidable.

In order to evaluate and localise loads generated by linear variation, two models were used :

- *A model with free extremities, which represents the structure during construction,*
- *A model with fixed extremities, which represents the structure at the end of construction and under operation.*

For each model, various elastic moduli were considered, to differentiate cracked or uncracked sections. It was derived from the first model that tension loads appeared along the first 17.5 metres from the free extremity, and therefore these areas were reinforced accordingly.

- en phase travaux et en phase service, un modèle à extrémités ancrées après réalisation de la liaison avec les unités de ventilation.

Pour chacun de ces modèles, des modules différents ont été pris en compte pour les structures supérieures car ces dernières peuvent être fissurées ou non suivant qu'elles se trouvent en traction ou bien en compression.

L'analyse des résultats du premier modèle avec extrémités libres a montré que les contraintes de traction dans la dalle et dans la cloison liées au retrait et à un abaissement de température concomitant de 13°C se régularisent sur 17.5m environ et que des contraintes de cisaillement importantes se développent au niveau des ancrages sur ces mêmes 17.50m. Par conséquent, les ancrages des plots de 24ml des structures supérieures laissés libres provisoirement en phase travaux ont dû être renforcés.

L'analyse des résultats du second modèle avec extrémités ancrées a montré que les contraintes de traction dans la dalle sous le même cas de charge que précédemment se retrouvent uniquement au niveau de l'ancrage et que les contraintes de cisaillement à l'interface structures internes / revêtement du tunnel sont en fait très faibles.

Enfin, l'analyse des résultats du second modèle sous le cas d'une élévation de température résiduelle de + 5°C a montré là encore que les efforts de compression ainsi engendrés en zone courante se retrouvent en bout de dalle haute et de cloison haute.

3.4. La résistance au feu des structures

Les structures internes du tunnel Est de SOCATOP doivent être stables au feu deux heures.

La dalle basse n'est soumise qu'au cas du feu dans l'espace trafic inférieur. La dalle médiane qui est la structure centrale de ce tunnel est quant à elle soumise au cas du feu dans l'espace trafic inférieur mais aussi dans l'espace trafic supérieur. Quant aux structures supérieures, elles ne sont soumises qu'au cas du feu dans l'espace trafic supérieur.

Le tunnel n'étant accessible qu'aux véhicules légers, les structures ne sont vérifiées que sous le cas du feu défini par la courbe ISO 834. La répartition des températures dans les dalles de roulement a été évaluée selon les règles FB87 pour des dalles de 30 cm d'épaisseur. On considère que le foyer peut s'étendre sur toute la largeur du tunnel et sur une longueur de 12m, encadrée par des zones de transition de 10m chacune.

The second model showed that when the structures are fully continuous and connected at their extremities, tension or compression loads appear at the end connections only, and that shear stresses along the connections to the lining remain minor.

3.4. Fire resistance

Internal structures must resist fire and remain stable for two hours.

It is considered that fire may occur into one of the traffic levels, and therefore structures may be exposed accordingly. It is not considered that fire could occur at both levels simultaneously.

Since light traffic only is allowed, fire is characterized by ISO 834 curve. Temperature distribution into roadway slabs is in accordance with FB 87 french rules. It is applied over a 12 m length, with 10 meter transition zones.

3.4.1. La dalle basse

Pour les études de la dalle basse dont seule la face supérieure est sollicitée, il a été supposé que les couches de roulement n'étaient pas isolantes et que la loi d'évolution de température dans la dalle basse était l'inverse de la loi obtenue pour une dalle de 30 cm soumise à un feu ISO en sous-face.

Les modèles utilisés pour le calcul des efforts et du ferrailage ont été adaptés pour traiter ce cas de charge particulier. L'enjeu était de tenir compte de la dégradation des caractéristiques mécaniques du béton de la dalle, de manière à se rapprocher le plus possible des sollicitations qu'occasionnerait un incendie réel.

A proximité du foyer, la dalle s'échauffe considérablement et perd par conséquent en raideur. Plutôt que d'intervenir sur le module d'élasticité de la dalle, il a été choisi de dégrader l'inertie des sections en calculant une épaisseur réduite équivalente. La réalité du phénomène n'est pas différente puisque le béton directement exposé au feu s'écaille sur une certaine épaisseur et ne joue plus de rôle structurel.

Il convient de distinguer les nouvelles épaisseurs à introduire selon qu'il s'agisse du comportement local ou global de la dalle. Localement, elle travaille principalement en flexion entre ses deux files d'appuis, les efforts dépendent donc de l'inertie de la section. Globalement, c'est une bande de béton de plusieurs kilomètres qui est soumise à des tractions-compressions, les sollicitations évoluent donc en fonction de la hauteur brute de béton.

Les épaisseurs réduites équivalentes prises en compte dans ces modèles spécifiques sont donc différentes.

Une fois les inerties modifiées, il reste à soumettre la dalle au feu proprement dit. A partir de la répartition de température dans l'épaisseur de la dalle au temps t , on est capable d'en déduire les contraintes qui en découlent, puis de déterminer une élévation de température uniforme équivalente dans la dalle, associée à un gradient linéaire équivalent qui engendrent les mêmes contraintes. On remplace de cette façon un gradient non-linéaire par un couple de charges thermiques (échauffement, gradient linéaire) dont les effets sont facilement calculables.

Pour la dalle basse, s'il a ainsi été montré que la stabilité de la structure était assurée, les calculs ont aussi mis en évidence l'amplitude importante des déformations attendues : pour un feu dans l'espace trafic inférieur, la dalle a tendance à se soulever de 3 à 4 cm en milieu de travée. Aussi, afin de garantir l'étanchéité entre les gaines de soufflage et d'extraction et donc le bon fonctionnement du système de ventilation dans la zone sinistrée, le joint placé en tête de cloison a dû être dimensionné pour reprendre cette décompression éventuelle.

3.4.1. Lower roadway slab

High temperatures are applied to the upper face only, and the pavement bituminous layer is not taken into account. Although the ISO model is usually applied from underneath, it was considered appropriate to apply it from the top.

Models had to be adapted in order to take into account this specific loading.

In order to take into account local spalling of the upper concrete layers, and the reduction of the modulus of elasticity, reduced slab depth was applied. At the fire location. Where bending dominates, depth is reduced according to inertia, whereas where globally tension and compression dominate depth is reduced in accordance with elasticity modulus only.

For practical purposes temperature distribution across the slab is made equivalent to the addition of a global temperature variation and a linear gradient, which allows a rather simple analysis.

In this case of the lower slab, analysis showed that stability during two hours was obtained. However, significant deflections appear at mid-span, where a 3 to 4 cm uplift is found. The joint between the lower partition and the lower slab had to be designed accordingly.

3.4.2. La dalle médiane

La dalle médiane est la seule dalle soumise au feu à la fois dans l'espace trafic inférieur et dans l'espace trafic supérieur. Etant donnée l'importance de cette dalle dans la sécurité du tunnel, celle-ci a non seulement fait l'objet d'une étude identique à celle décrite précédemment pour la dalle basse mais elle a aussi fait l'objet d'essais au feu pour les corbeaux et pour la dalle elle-même au CSTB.

Ces essais ont montré que, malgré un écaillage important du béton en début d'incendie, il se stabilisait rapidement et que la structure était stable au feu deux heures.

Enfin, il a été vérifié que les dalles de roulement n'étaient pas sujettes à un flambement d'ensemble en cas d'incendie. On pouvait craindre en effet qu'une structure comme la dalle médiane ne soit rendue instable sous l'effet d'une forte dilatation thermique gênée en un point de son tracé, puisqu'il s'agit d'une structure continue ancrée à ses extrémités. Ce point a été étudié tout particulièrement à proximité de ces ancrages et aux endroits où le tracé en élévation du tunnel présente une rupture de pente.

3.4.3. Les structures supérieures

Les structures supérieures ne sont soumises qu'au feu dans l'espace trafic supérieur. Cependant, elles ont fait l'objet de nombreuses modélisations sous ANSYS pour ce cas du feu car il s'est avéré que la conception initialement prévue (une dalle en appui sur deux corbeaux filants aussi bien du côté de la gaine d'extraction que du côté de la gaine de soufflage et des suspentes assurant une rotule en tête de la cloison haute) ne permettait pas d'assurer le fonctionnement de la gaine d'extraction pendant 2 heures et que les contraintes atteintes dans les suspentes n'étaient pas admissibles. Par conséquent, la conception initiale des structures supérieures a dû être revue : la dalle a finalement été encastrée dans le revêtement du tunnel du côté de la gaine d'extraction et la cloison a elle aussi été encastrée dans le revêtement du tunnel.

En revanche, la dalle côté gaine de soufflage n'a pas été encastrée dans les voussoirs car les études ont montré que les efforts à reprendre en tête de cloison devenaient alors trop importants. Aussi, l'appui sur corbeau filant a-t-il été conservé à ce niveau. Cependant, dans ces conditions, le fonctionnement de la gaine de soufflage ne peut être maintenu que pendant une heure. Au-delà, on observe à l'encastrement entre la cloison et la dalle la formation d'une rotule plastique et l'apparition d'un soulèvement de la dalle au niveau de l'appui filant sur le corbeau. Au bout d'une heure nous avons donc une perte d'étanchéité entre l'espace trafic supérieur et la gaine de soufflage et le soufflage dans l'espace trafic ne peut donc plus être correctement assuré.

3.4.2. Intermediate slab

This slab may be subjected to fire high temperature either from the upper level or the lower.

Because this element is a key to the tunnel safety, it was not only subjected to a thorough analysis, but also to a testing programme.

Testing showed that although spalling was significant and occurred at early stages of temperature increase, it eventually stabilized itself, and structural adequacy was obtained for two hours.

Furthermore detailed computations showed that compression loads in the longitudinal direction could not result into generalized instability, even in portions where the longitudinal profile could increase this risk.

3.4.3. Upper structures

Those are subjected to fire from underneath only. However this situation appeared critical and led to a modification of the initial design where the upper slab was supported on corbels on both sides and the partition hinged to the lining. It appeared indeed that this did not allow a proper air tightness of the exhaust section for two hours. The design was therefore modified as follows : the upper slab was fully connected to the lining on the exhaust side, and the partition upper end as well. On the intake side, it appeared that a full connection would lead to unacceptable loads into the partition upper part. The support on a corbel was therefore maintained, but as a result air tightness of the air intake section is maintained one hour only, which is however considered acceptable.

C'est donc sur cette nouvelle base de conception que les études des structures supérieures ont été menées. Des études définitives de stabilité au feu 2 heures de la structure ont été menées par le CSTB avec le ferrailage réellement mis en place dans la dalle haute et la cloison haute et on conduit à des résultats satisfaisants.

4. CONCLUSION

L'ensemble des problèmes posés par la continuité des structures a pu être résolu moyennant parfois des études approfondies mais sans pour autant conduire à des dispositions contraires à l'économie du projet ni à la qualité et à la pérennité de l'ouvrage.

On peut donc penser que ces dispositions pourront être reprises pour des ouvrages futurs, compte tenu des avantages fonctionnels qu'elles apportent.

4. CONCLUSION

It appears that all design issues linked to the structural full continuity could be resolved through detailed analysis, without uneconomical, unpractical or unsustainable consequences. Considering all the advantages linked to such a continuity, it may be expected that it shall be adopted for similar forthcoming projects.