16 Novembre 2001

TUNNEL CDG EXPRESS

Avis sur le génie civil du tunnel CDG Express

1. Avant-propos

Par courrier en date du 29 août 2001 la Direction des Transports Terrestres (Sous-Direction des transports collectifs) a sollicité le Centre d'Etudes des Tunnels pour une expertise des coûts de réalisation du tunnel CDG Express sur la base des connaissances géologiques actuelles des terrains traversés ainsi que des coûts constatés pour des ouvrages similaires.
Un dossier comportant les pièces essentielles de ce Projet de desserte ferroviaire dédiée entre Paris et l'aéroport Charles de Gaulle a été établi par le Groupement d'intérêt Economique CDG Express et remis au CETU le 24 septembre 2001 aux fins d'expertise technique.
Les pièces constituant ce dossier sont répertoriées en annexe 1.

2. Description sommaire du Projet de desserte ferroviaire

L'objectif de cette desserte dédiée est *d'offrir à la clientèle aérienne un acheminement rapide et fiable* avec *un niveau de service élevé et de créer un terminal aérien au Centre ville.*
Le cahier des charges qui stipule *une desserte ferroviaire directe avec un temps de parcours inférieur à 20 minutes* répond à cet objectif.

Le projet de desserte ferroviaire de 25 km de ligne nouvelle entre Paris Gare de l'EST et la gare de l'aéroport de Roissy Charles de Gaulle comporte, en solution de base, la réalisation d'un tunnel mono-tube bidirectionnel de 10 425 ml ainsi que des ouvrages d'insertions dans l'emprise de la gare actuelle de TGV.
L'adoption d'une vitesse de 160 km/h permet de retenir une section minimale de 47 m2 utiles définie suites aux études aérodynamiques effectuées lors des études préliminaires d'octobre 2000. Pour réaliser cette section un tunnelier de 10,10 m de diamètre est envisagé.

3. Génie civil du tunnel

L'ouvrage souterrain de 10 425 ml entre le puits de Noisy le sec au Sud et le puits du Tremblay au Nord comporte hors extrémités une rampe minimale de 2 °/oo avec une couverture moyenne de 20m.
Le tracé est sur la plus grande longueur en alignement droit.
Le point bas du projet est situé au droit du puits de chantier intermédiaire de La Poudrette (21,50 NGF).
Pour le dévers maximal de 150 mm(courbe de 623 m) la vitesse de référence passe de 160 km/h à 120 km/h.
Le diamètre utile pour la section d'air de 47 m2 est de 9,00 m (y compris marge de tolérance d'exécution au tunnelier de 10 cm).
Avec des voussoirs en béton armé de 45 cm d'épaisseur le diamètre extrados du revêtement est de 9,90 m soit un diamètre foré de 10,10 m intégrant une surexcavation périphérique de 10 cm.

Il s'agit de valeurs usuelles pour ce type d'ouvrage de 10 m de diamètre(Tunnels de Villejust, Manche, BPNL, A 86 Sydney) Des considérations portant sur une surépaisseur des revêtements en voussoirs béton armé vis-à-vis du comportement au feu ou d'une tolérance plus importante pour un meilleur respect du guidage du tunnelier n'auraient qu'une incidence limitée sur le diamètre du tunnelier (maxi 10 cm) et négligeable sur le coût de la réalisation du génie civil.

Il n'est pas prévu d'ouvrages de sécurité spécifiques hors ceux stipulés par l'ITI 98 300 du 8 juillet 1998 pour les tunnels des lignes voyageurs de 5 à 10 km de longueur à savoir un trottoir de 0,70 m libre de tout obstacle sur une hauteur de 2,00 m de chaque côté avec main courante en piédroits. A notre connaissance il n'est pas mentionné au titre des équipements complémentaires un puits de 1x2 m pour les voies situées entre 15 et 28 m de profondeur (article 4 1 2 2).

L'absence de ventilation pour désenfumage ainsi que de dispositifs d'accès de secours tous les 800 m tels que prévus pour les lignes urbaines est traité au chapitre 10 : "Sécurité de la desserte en souterrain".

4. Géologie du tunnel

Le tunnel est implanté sur sa plus grande longueur dans les sables de Beauchamp ; il recoupe dans sa partie inférieure les marnes et caillasses et dans la partie supérieure le calcaire de Saint-Ouen qui assure une dalle qui devrait limiter le déconfinement lié au creusement du tunnel et réduire ainsi les tassements en surface.
Ce calcaire est baigné par une nappe qui conduit à des charges hydrauliques maximales de 20 m d'eau.
L'ensemble de ces terrains de la région parisienne sont bien connus des projeteurs et des entreprises de travaux souterrain autant par leurs caractéristiques que par leur comportement lors de l'excavation.
Les galeries d'assainissement du SIAP et du Val de Marne, le tunnel de Villejust, le tunnel de la ligne 14 Meteor, le lot 35 B d'EOLE, RER ligne D ainsi que les travaux en cours du tunnel de l'A 86 entre Rueil et Versailles ont ou vont traverser ces terrains dans des diamètres pour certains similaires.

Les risques géologiques sont ceux liés à la dissolution du gypse avec remontée de fontis en surface, à la présence de niveaux gréseux et bien entendu à la présence de l'eau dans les sables fins de Beauchamp.
Une campagne de reconnaissance géologique et géotechnique complémentaire par sondage, puits et éventuellement galerie de reconnaissance est prévue par le GIE; elle **devra être menée à terme avant le démarrage des travaux.**
La nature des terrains ainsi que l'environnement du projet conduit à retenir **un creusement mécanisé au tunnelier à pression de confinement.**

5. Méthode de creusement

La méthode retenue par le GIE est celle du creusement mécanisé au tunnelier à confinement avec mise en place au fur et à mesure de l'avancement d'un anneau de revêtement constitué de voussoirs préfabriqués en béton armé.
Cette méthode est celle préconisée par le GT 4 de l'AFTES dans ses dernières recommandations (choix des techniques d'excavation mécanisée TOS n°157 - janv-fev 2000) en regard de la nature des terrains, des paramètres hydrogéologiques et environnement du projet (sensibilité aux tassements et anomalies).
De manière à limiter les risques il conviendra de compléter les études géologiques et de prévoir une méthode de reconnaissance continue des terrains à l'avancement du tunnelier ; les recherches entreprises sur ce thème dans le cadre du projet national EUPALINOS 2000 laissent espérer que d'ici le démarrage des travaux des techniques élaborées et performantes seront à disposition.
Le choix du mode de confinement (pression de terre ou pression de boue) résultera des études ultérieures de l'APD et incombera à l'Entreprise à qui seront confiés les travaux au tunnelier.
Dans le cas d'utilisation de la pression de boue, la centrale de préparation et de traitement des boues sera le point vital des travaux. En particulier, la présence de particules fines dans les sables en quantité plus importante qu'envisagée pourrait conduire à une réduction notable des cadences d'avancement, voire à l'augmentation des coûts par un suréquipement en filtre-presses de la centrale dans cette éventualité.
Les emprises de chantier disponibles autour des puits de travaux devraient permettre de réaliser le creusement sans contraintes particulières hormis celle d'une réglementation plus sévère sur la mise en dépôt de déblais. La solution d'un transport par voie fluviale s'avère primordiale à ce stade des études et doit être poursuivie autant pour les déblais que l'approvisionnement en voussoirs préfabriqués ; les sites ne permettant l'installation d'une usine de préfabrication. Un transport additionnel par camion à la fois pour les voussoirs et les déblais depuis le puits Noisy s'avère indispensable.

Le remplissage immédiat du vide annulaire entre l'extrados du revêtement de voussoirs et la jupe du tunnelier participe, comme le confinement du front de taille, à la limitation des tassements en surface.

6. Cadences de creusement au tunnelier

6.1. Cadences unitaires (par tunnelier)

A ce stade des études les seules prévisions pertinentes de cadences de creusement au tunnelier sont celles résultant des retours d'expérience de travaux similaires au tunnelier (diamètre et terrains) dans la région parisienne.

VILLEJUST (1986-88) 2 tubes Ø 9,25 m de 4800 m dans les sables de Fontainebleau
2 tunneliers à pression de boue (33 mois)
1er tube, maxi 475 m/mois, moyenne 147 à 169 m/mois
2ème tube, maxi 586 m/mois, moyenne 355 m/mois.

ORLYVAL lot 2 (1989-1990) 1 monotube Ø 7,64 m de 1160 ml dans les marnes (gypse)
1 tunnelier à pression d'air (12 mois)
maxi 170 m/mois, moyenne 93 m/mois.

RER ligne D lot D2 (1993-1994) 2 tubes Ø 7,08 m de1600 ml dans le calcaire grossier
1 tunnelier à front ouvert (22 mois)
maxi 355 m/mois, moyenne 152 à 200 m/mois.

METEOR ligne 14 (1993-1995) 1 tube Ø 8,60 m de 4500 ml dans les sables, calcaires, marnes et caillasses
1 tunnelier à pression de boue (24 mois)
maxi 385 m/mois, moyenne 220 m/mois.

EOLE lot 35B (1993-1996) 2 tubes Ø 7,40 m de 1670 ml
1 tunnelier à pression de boue (25 mois)
maxi 222 m/mois, moyenne 160 m/mois (hors fontis) à 135 m : mois.

Liaison CACHAN-CHARENTON (1996-1997) 1 tube Ø 7,08 m de 2615 ml
Dans le calcaire grossier, fausses glaises et argiles plastiques
1 tunnelier mixte : ouvert/pression de terre (15 mois)
maxi 294 m/mois, moyenne 175 m/mois.

TUNNEL VL A 86 ouest (2000-2004) 1 tube Ø 11,56 m de 10115 ml dans les sables de Fontainebleau, argiles et marnes , calcaires, marno-calcaires et craie
1 tunnelier mixte pression de boue/pression de terre (48 mois prévus)
en cours (1300 m forés), moyenne 200 m/mois sur 1000 m de sables.

Ces retours d'expériences de la région parisienne peuvent être enrichis par ceux de réalisations de tunnels de diamètre équivalent réalisés par des tunneliers à pression de boue dans des terrains et environnement similaires mais sur des longueurs moindres.

Tramway de Strasbourg en Ø8,30m sur 1200ml dans les sables et graviers
maxi 150 m/mois, moyenne 122 m/mois.

Métro de Lille ligne 2 B en Ø 7,70 m sur 1368 ml dans les argiles et craie
maxi 260 m/mois, moyenne 125 m/mois.

Tunnel El Azhar au Caire en Ø 9,45 m sur 5400 m dans les sables limoneux
maxi 439 m/mois, moyenne 269 m/mois

Métro de Sydney en Ø 10,80 m sur 5500 ml dans les alluvions(sables, argiles, grès)
maxi 255 m/mois, moyenne 124 m /mois

Au stade actuel des études, les cadences de creusement retenues par le GIE pour ce tunnel de 10 km, soit 300 m/mois en vitesse de croisière, semblent optimistes.
Avec une cadence au démarrage de 160 m/mois sur 1000 m et une marge pour aléas de 2 à 3 mois la cadence moyenne de 210 à 220 m/mois doit être réduite de 5 à 10 %, **soit 200 m/mois et donc un délai supplémentaire de 4 mois.**

6.2. Cadences à plusieurs tunneliers
En vue d'une mise en service de la desserte ferroviaire en 2008, le GIE a étudié trois scénarios d'utilisation de tunneliers :
-scénario 1 avec 2 tunneliers depuis le puits Poudrette : 48 mois
-scénario 2 avec 3 tunneliers (2 depuis Poudrette et un depuis Tremblay) : 36 mois
-scénario 3 avec 2 tunneliers depuis Poudrette et le transfert de l'un d'entre eux à Tremblay : 45 mois.

Selon le scénario la longueur creusée par chaque tunnelier va de 1300 m (scénario 3) à 7000 m (scénario 1).

Les délais d'études, de fabrication et de livraison de tunnelier sur le site sont correctement estimés à 12 mois et le délai de montage à 3 mois par tunnelier.
Dans le scénario 1, c'est par le puits de Poudrette que transitera l'ensemble des déblais et approvisionnements de 7000 m de tunnel. Si l'entreprise chargée des travaux fait le choix de tunneliers à pression de terre le diamètre du puits, prévu pour un tunnelier à pression de boue, risque d'être insuffisant et devra être augmenté afin de ne pas faire baisser les cadences.

7. Points durs et ouvrages particuliers

7.1. Puits de Poudrette (voir ci-dessus)

7.2. A l'extrémité Sud du projet de tunnel côté NOISY, le passage de l'A 3 et du faisceau de voies SNCF est prévu sous très faible couverture.

Même si la note de synthèse établie par la SNCF en septembre 2001 considère que des méthodes particulières de construction ne semblent pas nécessaires, il convient de prendre quelques garanties en délais d'études et de construction et en coûts.
On peut comparer cette situation à celle du redémarrage du tunnelier de l'A 86 à Pont Colbert où la RN 286 est franchie avec moins d'un diamètre de couverture ; dans ce cas des confortements et des substitutions sont nécessaires et un programme d'investigations et de contrôles très complet sera mis en place.

7.3. Une autre difficulté est celle de l'insertion dans la gare TGV de Roissy, en ce qui concerne les structures en tranchée couverte et les confortements nécessaires, mais aussi

en raison du phasage des travaux avec maintien du niveau d'exploitation actuel et futur de la gare TGV.

8. Planning général

A notre avis le scénario 3 n'a qu'un intérêt limité pour le projet en termes de planning d'exécution ; par rapport au scénario 1, le transfert d'un tunnelier à Tremblay permet de gagner trois mois, mais au prix d'installations à Tremblay.
Ce scénario pourrait cependant être choisi comme variante d'exécution par l'entreprise.

En conclusion et conformément aux remarques du chap.6, il convient de prévoir **un délai supplémentaire d'exécution du tunnel de 4 mois.**
Le délai ne prend en compte ni les procédures administratives, ni les études préalables ni l'équipement de la desserte.

9. Coûts (H.T. Juin 2000)

L'expertise sur les coûts de la réalisation de la desserte ferroviaire souterraine a été entreprise selon la démarche du dossier Pilote Coûts du CETU (version provisoire septembre 2000) applicable aux études de faisabilité des ouvrages souterrains routiers.
En matière de coûts de génie civil une section courante de tunnel est composée traditionnellement de trois postes principaux : creusement, soutènement et revêtement.
Dans un creusement au tunnelier avec mise en place du revêtement définitif en voussoirs de béton armé à l'avancement les trois postes sont cumulés en un seul coût au ml.
Le coût au ml est alors fonction de la vitesse moyenne d'avancement du tunnel et de la longueur sur laquelle le coût de fourniture du tunnelier et de ses annexes (train suiveur, station de traitement de boue, etc.) est amorti en totalité ou en partie.
Dans le cas présent avec une longueur d'utilisation de 3500 à 7000 ml le coût d'achat est totalement amorti.(150 MF par tunnelier à partir de deux, station de traitement de 20 MF dans le scénario 1 ou de 2x15 MF dans le scénario 2).
Le coût du génie civil du tunnel creusé hors voie ferroviaire et équipements de sécurité s'établit ainsi à :
195 kF/ml dans le scénario 1 (2 tunneliers),
190 kF/ml dans le scénario 2 (3 tunneliers).

Les bases de l'estimation du GIE prennent moins en considération l'économie apportée par la rapidité d'exécution et conduisent à un classement de coût des solutions différent.

Le coût du génie civil des **solutions envisagées est d'environ 2 000 MF, à comparer à la fourchette de 1 750 à 1 950 MF établie par le GIE.**

L'aléa de + 20% estimé par le GIE est élevé. 15 % apparaît comme une limite supérieure. La campagne de reconnaissance géologique et géotechnique complémentaire devrait pouvoir confirmer cette valeur ou la diminuer.

10. Sécurité de la desserte en souterrain

L'IT 98 300 en date du 8 juillet 2000 précise dans son préambule que *des ouvrages exceptionnels de plus de 10 km de longueur ne rentrent pas dans son champ d'application.*
Le schéma général de sécurité et le niveau d'équipement de ces infrastructures sont traités par des commissions ad-hoc.

A ce stade des études préliminaires il convient s'agissant de la sécurité des personnes transportées et des risques encourus en cas d'incendie et difficultés d'évacuation d'envisager de réunir une commission spécifique de sécurité dans le cadre de la DUP et de prévoir dès à présent dans l'estimation une provision plus importante que 36 MF pour les équipements liés à la sécurité.

Le Chargé de mission,

André SCHWENZFEIER

TUNNEL CDG EXPRESS

Avis du CETU sur le génie civil du Tunnel CDG Express

Note synthétique de conclusions

Le présent avis a porté exclusivement sur le génie civil de l'ouvrage souterrain de 10 425 ml, partie intégrante du projet de liaison ferroviaire Express entre la gare de l'Est et l'aéroport Roissy-Charles de Gaulle.

Il conclut que l'ouvrage, à forer en quasi totalité dans les sables de Beauchamp, est réalisable au moyen de 2 voire 3 tunneliers à front confiné.

L'estimation du génie civil de ce tunnel foré est d'environ 2 000 MF (H.T. aux conditions économiques de juin 2000), à comparer à la fourchette de 1750 à 1950 MF du GIE.

Le délai d'exécution considéré par le GIE, de 36 à 48 mois suivant les solutions envisagées, doit à notre avis être augmenté de 4 mois. La prise en compte de ce délai supplémentaire d'exécution au tunnelier n'a qu'une incidence de 2 à 4 % sur les coûts de réalisation, incluse dans l'aléa de 15%.

Les travaux d'insertion dans la gare TGV de Roissy n'ont pas été analysés par le CETU. Il en a été de même pour les conséquences éventuelles de dispositions de sécurité qui s'appliqueraient à ce tunnel, de longueur supérieure à 10 km.

A.S 5/12/01

Le 1er février 2002

Tunnel CDG Express

Note complémentaire à l'avis du CETU du 16.11.01

Dans son avis du 16 novembre 2001, le CETU a proposé de retenir comme coût du génie civil du tunnel foré 2.000 MF HT aux conditions économiques de juin 2000.
A ce stade préliminaire d'études, ce montant se situe dans la valeur haute de la fourchette d'estimation. Les études ultérieures ne devraient pas amener à une majoration de cette valeur.

Par contre il est nécessaire de prévoir les aléas inhérents aux réalisations de travaux souterrains en site urbain, le montant réservé pour ces aléas venant en plus du montant retenu ci-avant. Ces aléas sont divers :

- risque que la couche des sables de Fontainebleau ne soit pas continue, ce qui entraînera des traitements ponctuels de terrains, décidés à partir de reconnaissances à l'avancement ;
- difficultés à l'arrivée sur l'aéroport de Roissy ;
- incidences de l'accroissement des exigences relatives à l'environnement ;
- incident géologique majeur amenant par exemple à un fontis.

A partir d'expériences récentes, le CETU à chiffré ces aléas à 15% du montant de l'estimation. Il maintient cette valeur ; cependant s'il obtient prochainement d'autres éléments précis fiables, il rédigera une note complémentaire sur le pourcentage à réserver aux aléas.

Les éléments donnés ci-dessus ne concernent que le génie civil du tunnel, dans le cadre de la conception actuelle du dimensionnement.