

# les rapports

n° 005505-01

janvier 2008

## Projet de tram-train sur l'île de la Réunion

### Section La Possession - Saint-Denis

*Tracé intermédiaire*





**Conseil général des ponts et chaussées**

Rapport n° 005505-01

**PROJET de TRAM-TRAIN SUR L'ÎLE de la RÉUNION**  
**Section La Possession - Saint-Denis**

Tracé intermédiaire

**RAPPORT**

établi par

**Christian BINET-TARBÉ de VAUXCLAIRS**

Ingénieur général des ponts et chaussées

et

**Jean-Louis PICQUAND**

Ingénieur des ponts et chaussées

Janvier 2008





MINISTÈRE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT  
ET DE L'AMENAGEMENT DURABLES

*Conseil général des ponts et chaussées*  
*Le Vice-Président*

Paris, le 23 janvier 2008

## Note

à

Monsieur Noël de SAINT PULGENT  
Président de la Mission d'Appui aux  
partenariats Public-Privé

**Objet :** Rapport n°005505-01 - Projet de tram-train sur l'île de la Réunion

Par note en date du 25 septembre 2007, vous avez demandé que le Conseil général des ponts et chaussées réalise une mission d'expertise pour l'évaluation préalable du projet de tram-train entre Saint-Denis et Le Port dans l'île de la Réunion.

Je vous prie de bien vouloir trouver ci-joint le rapport établi par Monsieur Christian BINET-TARBÉ de VAUXCLAIRS et Monsieur Jean-Louis PICQUAND.

Au terme de l'étude qui s'est limitée à évaluer les conséquences des modifications du tracé intervenues à la suite de la première enquête publique entre les stations de la Possession et de Saint-Denis-CHD, les auteurs du rapport concluent que le nouveau tracé n'engendre pas d'aléas substantiellement plus importants que le tracé initial que ce soit en phase de construction ou d'exploitation. Les risques pouvant survenir en phase de creusement des tunnels leur semblent notamment évaluables et maîtrisables à des coûts raisonnables.

Ils attirent néanmoins l'attention sur certains points sensibles du projet :

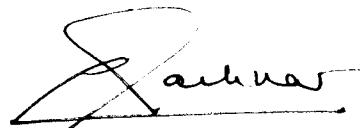
- les mesures de sécurité en tunnel à faire valider au plus tôt afin de stabiliser la conception du génie civil,
- le coût de construction des tunnels qui leur semble légèrement sous-évalué,



- la conception des têtes de tunnel à faire préciser par les candidats avec un niveau de détail suffisant,
- la nécessité de mener une étude de sensibilité au vent des rames en circulation, notamment dans la traversée des ravines.

Enfin, les auteurs du rapport recommandent d'abandonner la solution de base qui prévoit un creusement avec 6 tunneliers, pour une solution plus économique et moins aléatoire avec 2 ou 3 tunneliers, même si le délai de réalisation peut théoriquement s'en ressentir de quelques mois.

Je vous informe, que sauf objection de votre part, ce rapport sera rendu communicable et publié sur le site internet du ministère, dans un délai de deux mois à compter de la présente diffusion.



**Claude MARTINAND**



Diffusion du rapport n°005505-01

**Ministère de l'économie, des finances et de l'emploi**

- |   |      |
|---|------|
| - le président de la Mission d'appui à la réalisation des contrats de partenariat | 2 ex |
| - Laurent WINTER  | 1 ex |

**Ministère de l'environnement, du développement durable et de l'aménagement durables**

- |  |      |
|--|------|
| - le ministre d'Etat, ministre de l'environnement, du développement durable et de l'aménagement durables | 1 ex |
| - le directeur du Cabinet  | 2 ex |
| - le secrétaire d'Etat chargé des transports   | 1 ex |
| - le directeur du Cabinet  | 2 ex |

**CGPC**

- |   |      |
|---|------|
| - le vice-président du CGPC   | 1 ex |
| - la présidente et les présidents de section  | 7 ex |
| - les secrétaires des 3ème et 4ème sections   | 2 ex |
| - le coordonnateur du collège « transports terrestres »                                 | 1 ex |
| - les coordonnateurs du collège « projets d'infrastructure et constructions publiques » | 2 ex |
| - Christian BINET-TARBE de VAUXCLAIRS, 3ème section                                     | 1 ex |
| - Jean-Louis PICQUAND, 4ème section   | 1 ex |
| - Jean-Louis DURVILLE, 3ème section   | 1 ex |
| - archivage   | 3 ex |

**CETU**

- |   |      |
|---|------|
| - le directeur du Centre d'études des tunnels | 1 ex |
| - Alain-Alexandre ROBERT                      | 1 ex |

**STRMTG**

- |   |      |
|---|------|
| - le directeur du Service technique des remontées mécaniques et des transports guidés | 1 ex |
|---|------|



## Résumé

Après avoir précisé les conditions de la mission, le rapport rappelle les éléments essentiels du projet de tram train de l'île de la Réunion et plus particulièrement les modifications apportées à la suite de la première enquête d'utilité publique, la section modifiée faisant l'objet d'une description détaillée en comparaison du projet initial.

Les conséquences de ces modifications sont ensuite analysées par les membres de la mission sous leurs divers aspects :

- la sécurité des voyageurs à la traversée des tunnels fait l'objet d'un examen approfondi, tant du point de vue des textes réglementaires à appliquer, que des dispositions à prendre, les rapporteurs formulant à cet égard des recommandations,
- les risques relatifs à la construction des ouvrages et en particulier des tunnels font l'objet d'une appréciation tant sous l'aspect des coûts que celui des délais et d'une comparaison avec les aléas de la solution initiale par les hauts, les membres de la mission formulant des recommandations relatives au nombre de tunneliers à utiliser (3 au maximum), et au soin à apporter à la sécurisation des têtes de tunnels,
- les conséquences sur l'exploitation et la maintenance de la ligne sont également examinées, les membres de la mission formulant une recommandation relative à l'exploitation de la ligne par grand vent.

Les membres de la mission concluent en indiquant que les modifications apportées ne leur paraissent pas de nature à modifier les conditions techniques et économiques du projet et ils suggèrent, en fin de rapport, des pistes d'améliorations susceptibles d'en favoriser la réalisation.

# Sommaire

1 Rappel de la mission.....	5
2 Description du projet.....	5
2.1 Le projet de tram-train de l'île de la Réunion.....	5
2.2 Les modifications apportées à la suite de la première enquête d'utilité publique.....	7
2.3 Description détaillée de la section concernée par les modifications.....	7
3 Les conséquences des modifications.....	9
3.1 Les problèmes de sécurité en tunnel.....	9
3.1.2 La sécurité dans les tunnels.....	10
3.2 Les risques relatifs à la construction des ouvrages.....	13
3.3 Conséquences sur l'exploitation de la ligne.....	18
3.4 Conséquences sur la maintenance de la ligne.....	20
3.5 Conclusions sur la faisabilité technique et économique du projet modifié.....	23
4 Les pistes d'amélioration.....	24
5 Conclusions.....	25

## ANNEXES :

### Plans :

• Tracé général du projet.....	29
• Plan de la première phase.....	30
• Franchissement du massif de la Montagne.....	31
• Comparaison des tracés.....	32
Lettre du président de la MAPP.....	33
Lettre de mission.....	37
Rapport du CETU.....	39

## **1 Rappel de la mission**

Le présent rapport répond à une demande de Monsieur Noël de SAINT-PULGENT président de la Mission d'appui à la réalisation des contrats de partenariat (MAPP) adressée le 25 septembre 2007 au Vice-Président du Conseil général des ponts et chaussées.

Par ce courrier, il est demandé au CGPC de donner un avis sur les conséquences des modifications du projet de tram-train conduit par le Conseil Régional de la Réunion, consécutives aux conclusions de l'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique intervenue au cours du premier trimestre de l'année 2007.

Les modifications portent uniquement sur la section comprise entre les stations de La Possession-Centre et de La Montagne, d'une longueur de 12 km ; elles consistent à remplacer un tracé dit « haut » en grande partie situé sur les plateaux, par un tracé en souterrain dit « intermédiaire » empruntant deux tunnels de grande longueur, dont l'un est en forte rampe (5%) avec une rayon en plan de 500 m.

La MAPP sollicite l'avis du CGPC sur la fiabilité des paramètres techniques pris en compte dans les études et sur les aléas du projet au regard :

- des risques techniques susceptibles d'affecter le bon déroulement du projet,
- des délais de réalisation,
- des modalités d'exploitation,
- des coûts de construction et d'exploitation.

Compte tenu de l'ampleur du projet et de la diversité des éléments qui ont un impact sur les points énoncés, il n'était pas possible aux membres de la mission de donner un point de vue pertinent sur l'ensemble du projet dans un délai aussi restreint. En conséquence, et conformément aux termes de la demande de la MAPP, ils ont limité leur analyse aux seules modifications introduites par la variante de tracé, tout en l'étendant à l'ensemble de la section du projet comprise entre les stations La Possession-Centre et Saint-Denis-CHD, du fait que cet ensemble comprend un tunnel de grande longueur similaire aux deux autres, et constitue un tout homogène ayant donné lieu à un dossier spécifique de niveau avant-projet.

Les questions propres aux tunnels ayant une importance particulière, les membres de la mission ont jugé nécessaire de faire appel à l'expertise du CETU, en la personne de Monsieur Alain ROBERT pour la conception et la réalisation de ces ouvrages, et celle du STRMTG, pour les dispositions en matière de sécurité.

Compte tenu de la richesse de l'avis fourni par le CETU, il a été jugé intéressant de le joindre in extenso en annexe au présent rapport. S'agissant des mesures de sécurité, il doit être considéré que les conclusions du présent rapport n'engagent que leurs auteurs, sachant que le STRMTG formulera son avis ultérieurement dans le cadre de l'instruction des dossiers de sécurité que le maître d'ouvrage devra produire.

## **2 Description du projet**

### **2.1 Le projet de tram-train de l'île de la Réunion**

Le projet décidé par le Conseil Régional va dans un premier temps de Saint-Paul à La Mare, station

terminale située à l'est de l'aéroport de Gillot, dénommé aussi Roland Garros. Le tracé actuel qui se déroule sur une longueur d'environ 40 km traverse les agglomérations de St-Paul, Le Port, La Possession, dessert le plateau de la Montagne, traverse la ville de St-Denis, dessert l'aérogare et se termine à la zone d'activités de La Mare. Il comporte 26 stations, dont une station supplémentaire à plateau Couilloux dans la nouvelle variante.

Comme son nom l'indique, les rames circuleront en partie en site propre avec des sections où la vitesse pourra atteindre 100 km/h, et en partie au milieu de la voirie urbaine, notamment dans St-Denis, où elles devront partager l'espace avec les piétons ainsi que dans certaines rues avec les véhicules de desserte des propriétés riveraines.

La fréquence des rames correspondra à un intervalle de 10 minutes en heure de pointe et de 5 minutes dans Saint-Denis. Le nombre de voyageurs espérés à la mise en service est de 52.000 par jour, soit un nombre de voyages annuels égal à 15 millions.

Le projet est conçu pour permettre à terme le transport de fret. Les produits concernés pourraient être le charbon, la canne à sucre, les matières pulvérulentes, les conteneurs.

Les objectifs du Conseil Régional sont de mettre en service le tram-train au début de l'année 2013.

Le projet devrait être prolongé dans une seconde étape jusqu'à St-Pierre vers le sud, et jusqu'à Ste-Suzanne dans l'Est. A long terme il pourrait être étendu jusqu'à St-Joseph d'une part et jusqu'à St-Benoît d'autre part.

Certains compléments au tracé actuel sont aussi envisagés, d'une part un shunt entre St-Paul et la Possession pour faire gagner un temps de parcours de 10 à 15 mn en évitant Le Port, et d'autre part dans St-Denis même, le long du boulevard Sud, afin de permettre des trajets express évitant la traversée du centre ville et permettant aussi le transport de fret à travers l'agglomération. Le coût de ces shunts n'est pas fourni.

Les premières extensions pourraient consister à prolonger la ligne vers le sud jusqu'à La Saline en empruntant le tracé de l'actuelle RN1 au Cap La Houssaye, et à réaliser une section indépendante entre St-Louis et St-Pierre.

S'agissant de la première phase du projet, objet du contrat de partenariat public privé, donc entre St-Paul et La Mare, le coût de construction est évalué à 1.315 M€, en valeur janvier 2006.

Ce coût se décompose ainsi :

- |                    |          |
|--------------------|----------|
| • Etudes           | 105 M€   |
| • Foncier          | 40 M€    |
| • Travaux          | 1.060 M€ |
| • Matériel roulant | 110 M€   |

Les dépenses d'exploitation sont évaluées à 13M€ par an.

Le plan de financement retenu dans le protocole conclu entre l'Etat et le Conseil Régional le 19 janvier 2007 était le suivant :

- |  |        |
|--|--------|
| • Subvention de l'Etat (sous forme de subvention directe et d'avantages fiscaux) | 435 M€ |
| • FEDER  | 100 M€ |
| • Contribution de la Région (apport direct et montant PPP)                       | 780 M€ |

Le planning de réalisation est le suivant :

- Sélection des candidatures : novembre 2007
- Enquête publique complémentaire : décembre 2007
- DUP : mars 2008
- Démarrage du dialogue compétitif : mars 2008
- Désignation du lauréat : fin 2008
- Lancement des travaux : 1er semestre 2009
- Mise en service : 2013

## **2.2 Les modifications apportées à la suite de la première enquête d'utilité publique**

La première enquête d'utilité publique (mars 2007) a été conclue par un avis favorable de la commission d'enquête mais assortie de la réserve suivante :

*« Pour le franchissement des massifs de la Montagne entre la station de la Montagne et la Possession, l'option Hca retenue pour l'enquête doit être abandonnée au profit d'un tracé haut dit « intermédiaire »*

Les modifications apportées au projet ont donc pour objectif de prendre en compte les conclusions de l'enquête : elles ne concernent que la section comprise entre les deux stations sus-nommées, et n'influent pas sur la partie de tracé comprise entre les stations de la Montagne et de St-Denis-CHD réalisée pour l'essentiel en tunnel de 3,8 km de longueur.

Le principe de la variante consiste à remplacer le tracé aérien par un tracé constitué de deux souterrains successifs séparés par un franchissement aérien à faible altitude de la ravine de la Grande Chaloupe. Alors que le premier souterrain reste à une altitude faible pour déboucher à ce niveau dans la Grande Chaloupe, le second est en forte rampe (5%) et suit un tracé courbe pour répondre à deux objectifs : rallonger le tracé de manière à pouvoir obtenir l'altitude requise à la station de la Montagne et échapper à une traversée aérienne de la Ravine à Jacques. Le tracé qui en résulte allonge donc le parcours de 1.370 m par rapport au tracé initial.

Ainsi, en simplifiant, on peut d'ores et déjà considérer que les principaux aléas techniques au stade de la réalisation ont été transférés de la construction de deux viaducs exceptionnels nécessaires au franchissement des rives de la Grande Chaloupe et de la ravine à Jacques vers la construction de deux tunnels supplémentaires de grande longueur.

## **2.3 Description détaillée de la section concernée par les modifications**

Plutôt que de décrire la partie du projet modifiée entre les stations La Possession centre et La Montagne, les membres de la mission ont préféré s'intéresser à l'ensemble de la section concernée par les tunnels allant de la station La Possession-centre à la première station de St-Denis située au débouché du pont sur la rivière St-Denis, dénommée St-Denis-CHD. Cette section constitue en effet un ensemble fonctionnel et de caractéristiques homogènes qui fait l'objet d'un dossier spécifique d'avant-projet (pièce 1.1).

Cette section qui a une longueur totale de 15.470 m comprend successivement (dans le sens La Possession – Saint Denis) :

- le pont sur la ravine des Lataniers (630m)
- le tunnel dit Ouest (4.550 m)
- l'ouvrage de franchissement de la Grande Chaloupe (150m)
- le tunnel central (4.150m)
- la section à ciel ouvert comportant la station Ouest du plateau Couilloux (environ 600 m)
- l'ouvrage de franchissement de la ravine Jeanneton (265m)
- la section comportant la station Est du plateau Couilloux (environ 600 m)
- le remblai de franchissement de la Grande Ravine
- le tunnel Est (3.800m)
- l'ouvrage de franchissement de la rivière St-Denis, identique au projet initial (270m)

Comparativement, le projet initial de longueur égale à 14.100 m comprenait :

- la traversée de la ravine des Lataniers (1.600m) par deux ouvrages d'art de 700 et 400 m de longueur
- un tunnel de 900 m en courbe de rayon 400m
- La traversée du plateau de la Possession (3.750m) avec plusieurs ouvrages de franchissement des rivières Petit ruisseau (108m), Lafleur (350m), ravine à Malheur (340m), Petite Chaloupe (325m)
- La traversée des rivières de la Grande Chaloupe, Ravine à Jacques (2.140 m au total)
- La traversée du plateau Couilloux (1.820 m) avec des ouvrages de franchissement de la ravine Jeanneton et de la Grande Ravine
- Le tunnel Est identique à celui de la variante (3.800m)
- L'ouvrage de franchissement de la rivière St-Denis (270 m)

#### ***Caractéristiques comparées de la variante avec la solution initiale :***

Il convient de noter que la solution initiale nécessitait la construction d'ouvrages d'art exceptionnels pour le franchissement de la Grande Chaloupe (1.200 m ), et de la ravine à Jacques (790 m) sous forme de ponts à haubans de 300 m de portée avec des piles de très grande hauteur (200m), donc avec des caractéristiques approchant celles du viaduc de Millau.

Sans tenir compte de ces deux ouvrages exceptionnels, le linéaire d'ouvrages d'art de la variante est nettement plus faible que celui de la solution initiale. Les ouvrages de franchissement de la ravine Jeanneton et de la rivière St-Denis sont similaires. Quant à la ravine des Lataniers, la solution initiale était plus complexe (2 ouvrages de 700 m et 400 m courbes, au lieu d'un pont de 630 m en alignement). Aucun autre ouvrage important n'est à construire dans la solution variante.

La complexité de la solution variante est donc liée uniquement à la réalisation de trois tunnels de grande longueur (4,5 km - 4,1 km- 3,8 km) au lieu d'un seul (3,8 km).

On signalera en particulier le tunnel central en pente de 5% sur une longueur de 4 km avec un rayon minimum en plan de 500 m, caractéristiques spécifiques de la variante qui influent sur les conditions d'exploitation et les mesures de sécurité, d'autant que le projet est conçu dans l'hypothèse d'un transport éventuel de fret.

D'un point de vue fonctionnel, il faut remarquer aussi que la variante comprend une station supplémentaire permettant de mieux desservir l'urbanisation du plateau Couilloux. Il convient de noter à cet égard que le programme d'aménagement est encore peu précis, la fourchette du nombre d'habitants variant de 30 000 à 50 000 à terme sur une surface de 70 ha. Les études ne font que démarrer.

## 3 Les conséquences des modifications

### 3.1 Les problèmes de sécurité en tunnel

#### 3.1.1 Les textes réglementaires applicables

La sécurité des systèmes de transport est régie par 2 décrets

1/ le décret n° 2003 – 425 du 9 mai 2003 relatif à la sécurité des transports publics guidés

2/ le décret n° 2006 – 1279 du 19 octobre 2006 relatif à la sécurité des circulations ferroviaires et à l'interopérabilité du système ferroviaire.

Manifestement, le projet de tram-train ne faisant pas partie du réseau ferroviaire national, le second décret ne saurait s'appliquer à ce projet.

Quant au décret du 9 mai 2003,

- le titre II fait référence aux « *systèmes de transport publics guidés en Ile de France et dans les périmètres de transports urbains* » ce qui n'est pas le cas du projet de tram-train de la Réunion
- le titre III fait référence aux systèmes mixtes « *dont les véhicules circulent pour une partie de leur parcours sur le réseau ferré national et pour l'autre partie sur l'un des réseaux mentionnés au titre II* » et il ne peut s'appliquer au projet de tram-train de la Réunion, la partie interurbaine ne faisant pas partie du réseau ferré national.
- Le titre IV fait référence aux remontées mécaniques
- le titre V fait référence aux systèmes de transports guidés à vocation touristique ou historique
- cependant, il est précisé au titre VI, dispositions particulières applicables aux autres systèmes de transport public guidés, (article 64): « *les systèmes de transport public guidés qui ne sont pas visés aux titres II à V du présent décret, (...) sont soumis aux dispositions du titre II, sous réserve des modalités particulières d'application qui peuvent, en tant que de besoin, être édictées par un arrêté conjoint du ministre chargé des transports et du ministre chargé de la sécurité civile* »

Aussi, les membres de la mission considèrent que le projet de tram-train de la Réunion est soumis, pour ce qui concerne la sécurité, au décret n° 2003 – 425 du 9 mai 2003 relatif à la sécurité des transports publics guidés.

### **3.1.2 La sécurité dans les tunnels**

Les modifications du projet faisant suite à l'enquête d'utilité publique consistent essentiellement, dans le secteur de la Montagne, à rectifier le profil en long en remplaçant un tracé établi à l'air libre par un tracé établi en souterrain. Bien que le tracé initial comprît déjà un tunnel d'environ 3800 m, les problèmes relatifs à la sécurité du système de transport dans les tunnels prennent désormais une importance particulière.

#### **Les textes réglementaires**

Les études faites jusqu'à ce jour, font référence à la fois à l'Instruction Technique Interministérielle relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires du 8 juillet 1998 et à l'arrêté du 22 novembre 2005 relatif à la sécurité dans les tunnels des systèmes de transport public guidés urbains de personnes.

**D'un point de vue strictement juridique**, les membres de la mission font observer que l'arrêté susvisé stipule en son article 4 que « *les dispositions de l'instruction technique interministérielle n° 98-300 du 8 juillet 1998 relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires sont rendues inapplicables aux tunnels relevant du présent arrêté* ».

Or cet arrêté du 22 novembre 2005 précise, en son article 2, qu'il s'applique aux systèmes de transport guidés relevant du titre II ou du titre III du décret 2003-425 du 9 mai 2003 relatif à la sécurité des transports publics guidés.

Comme on l'a vu plus haut, le projet de tram-train de la réunion ne relève ni du titre II et ni du titre III du décret du 9 mai 2003, mais compte tenu de la rédaction du titre VI, c'est ce décret qui doit s'appliquer en la circonstance.

L'arrêté du 22 novembre ayant été pris en application du décret du 9 mai 2003, les membres de la mission considèrent que, d'un point de vue strictement juridique, ce sont les dispositions prévues à l'instruction technique annexée au dit arrêté qui doivent s'appliquer à la conception des ouvrages souterrains du projet de tram-train de la Réunion.

**Du point de vue de l'esprit des textes:** à l'évidence, les rédacteurs des textes réglementaires susvisés ont souhaité faire un net distinguo entre les transports guidés urbains (métros, tramways, autobus guidés, remontées mécaniques) qui relèvent du décret du 9 mai 2003 (donc de l'arrêté du 22 novembre 2005 pour ce qui concerne les tunnels) et les transports ferroviaires qui eux relèvent de l'instruction technique interministérielle du 8 juillet 1998. Ils en veulent pour preuve, le titre III du décret du 9 mai 2003 qui a été rédigé pour les systèmes de tram-train en distinguant les parties urbaines, lesquelles relèvent de l'arrêté, des parties situées sur le réseau ferré national, lesquelles relèvent de l'instruction interministérielle. Bien évidemment les rédacteurs ne pouvaient imaginer la possibilité d'un projet tel que celui de la Réunion où l'on se propose de réaliser une ligne de tram-train là où n'existe pas de ligne du réseau ferré national.

Aussi, les membres de la mission considèrent que, dans l'esprit des textes réglementaires, c'est l'instruction technique interministérielle du 8 juillet 1998 qui s'applique à la partie interurbaine du projet et pour l'application de cette instruction, et ils considèrent que les tunnels prévus au projet

relèvent soit des lignes à voyageurs soit éventuellement des lignes mixtes. En effet, au regard de la nature des territoires traversés et du volume des voyageurs transportés, cette section de ligne ne relève pas de la classification « lignes urbaines ».

***En définitive et en guise de conclusion à ce chapitre***, les membres de la mission considèrent que, conformément à l'article 64 du décret 9 mai 2003 rappelé ci-dessus, ***ce projet devrait respecter les dispositions relatives aux tram-trains*** (titre III du décret n°2003 – 425), et en ce qui concerne le domaine de la sécurité dans les tunnels et ils sont d'avis que le projet respecte l'instruction interministérielle du 8 juillet 1998 relative aux lignes ferroviaires.

Ils considèrent toutefois que la référence à l'arrêté du 22 novembre n'est pas sans intérêt, ne serait ce que pour guider les réflexions car, ***quelles que soient les dispositions réglementaires les membres de la mission estiment que le maître d'ouvrage n'échappera pas à l'élaboration d'une étude spécifique de danger relative à la circulation des trams trains dans les tunnels.***

### **Les dispositions retenues**

A cet égard, et bien qu'ils ne soient pas experts en la matière, les membres de la mission se permettront d'émettre des observations vis à vis des dispositions prévues pour assurer la sécurité dans les tunnels.

Celles-ci sont largement explicitées dans l'avant projet rédigé par le maître d'oeuvre (Coteba) et intitulé: pièce 3.1 Tunnels: principes communs. Le projet prévoit, entre autres choses, la réalisation de tunnels bi-tubes (un tube par sens de circulation) reliés entre eux par des rameaux de grande dimension (8m de large) permettant le passage des véhicules de secours d'un tube à l'autre et disposant de portes coupe-feu , ces rameaux constituant en cas d'incendie des sas protégés permettant aux usagers d'attendre en sécurité l'arrivée des secours. Vis à vis de ces dispositions les membres de la mission émettent les observations suivantes:

- Les rameaux ont été disposés tous les 800 m, probablement par référence aux prescriptions de l'arrêté du 22 novembre 2005 lesquels prévoient que « *la distance entre 2 accès de secours ne peut être supérieure à 800 m* ».

Outre le fait que ces rameaux ne respectent pas les prescriptions de l'arrêté susvisé relatives aux issues de secours, les membres de la mission estiment que cette disposition n'est probablement pas la plus pertinente.

- En effet, en cas d'incendie d'un train immobilisé dans le tunnel, et quelle que soit la célérité des équipes de secours, celles-ci ne pourront parvenir sur les lieux du sinistre avant 15 ou 20 minutes. Ainsi, en pareille circonstance, la priorité n'est pas tant de lutter contre l'incendie que de mettre à l'abri et d'évacuer les passagers du train sinistré dès les tout premiers instants. Avec les dispositions retenues dans l'avant projet, le scénario en cas d'incendie consisterait à inviter les passagers à rejoindre un rameau (distant de 0 à 800 m), à ouvrir les portes coupe feu du dit rameau, (ou une petite porte située dans la porte coupe-feu) à faire entrer les passagers dans le rameau, à refermer les portes en ayant la certitude que tous les passagers sont à l'intérieur et à les inviter ensuite à patienter jusqu'à l'arrivée des secours.

En rappelant qu'un tram-train peut transporter jusqu'à 250 passagers et donc une rame double 500 passagers, qu'il n'y a qu'un seul conducteur, que la surface au sol d'un rameau est de  $8 \times 20 = 160 \text{ m}^2$ , le scénario brièvement présenté ci-dessus n'apparaît pas crédible aux membres de la mission.

- Ceux-ci ont pu constater que l'avant projet avait été élaboré à l'effet de privilégier l'accès des

véhicules de secours. Or il est clair, qu'au vu du nombre de passagers à évacuer en cas d'incendie, les véhicules de secours ne sont pas adaptés et que seule une évacuation par tram peut être envisagée pour peu que le sinistre soit suffisamment éloigné des têtes. Ainsi la circulation conjointe, dans le tunnel d'un engin ferroviaire et de véhicules susceptibles de déboucher par les rameaux de communication inter tubes est elle même accidentogène.

### **Les recommandations des membres de la mission**

En préambule, les membres de la mission précisent qu'ils n'ont pas les moyens de procéder à une étude de sécurité et donc ils n'ont pas la prétention de proposer une solution qui serait a priori en capacité d'apporter une réponse pleinement satisfaisante aux problèmes de sécurité du système et de plus, dans le cadre de leur mission, ils ne sauraient se substituer au maître d'ouvrage.

Simplement, au vu des difficultés soulevées lors de leur analyse, ils proposent que le dossier de sécurité prenne en compte les pistes d'amélioration suivantes:

- En premier lieu ils rappellent que le domaine de la sécurité dans les transports publics fait l'objet d'une approche probabiliste ayant trait à la probabilité d'occurrence et la criticité des événements redoutés. Dans le cas d'espèce, les événements redoutés sont l'accident ferroviaire et l'incendie dans les tunnels, événements dont les conséquences peuvent être particulièrement dramatiques.
- Afin de réduire voire d'annuler la probabilité d'accident de tram, ils proposent que des mesures spécifiques d'exploitation soient prises et notamment ils proposent que les dispositifs de signalisation ne permettent pas à un tram-train d'entrer dans un tunnel avant que le précédent n'en soit sorti
- Cette disposition permet en outre à un tram-train de rebrousser chemin sans autre forme de procédures, cette aptitude pouvant s'avérer précieuse en cas de début d'incendie
- Cette disposition permet également de limiter les conséquences d'un incendie, un seul véhicule devant être secouru
- Afin de réduire la probabilité d'incendie, ils proposent des mesures particulières concernant le matériel roulant
- En cas d'incendie d'un train immobilisé dans le tunnel la priorité doit être donnée à l'évacuation des passagers (et non à l'extinction de l'incendie). Ce principe remet en cause la taille et l'espacement des rameaux de communication entre les tubes.

Enfin, les membres de la mission considèrent que compte tenu du contexte géologique, le risque d'éboulement rocheux aux têtes de tunnel ne doit pas être négligé. Pour s'en prémunir ils préconisent d'affiner les études afin de prévoir les dispositifs de protection adaptés, notamment la mise en place de « faux tunnels » de protection éventuellement complétée par des filets détecteurs de chute de blocs agissant sur la signalisation.

## **3.2 Les risques relatifs à la construction des ouvrages**

Conformément à la demande de la MAPP, les membres de la mission ont limité leur évaluation aux modifications inhérentes au changement de tracé entre les stations La Possession centre et La Montagne. Ils ont néanmoins étendu leur analyse à l'ensemble de la section traversant le massif de la Montagne jusqu'à la station de St-Denis-CHD en y incluant le tunnel Est et l'ouvrage de franchissement de la ravine St-Denis.

L'examen effectué par les membres de la mission n'a porté que sur le poste « ouvrages d'art » de la section considérée. En effet, sur un total de 589,8 M€ représentant le coût de la section (montant issu de la pièce 1.1 de l'avant-projet), la part du poste ouvrages d'art est de 554,115 M€ dont 481 M€ au seul titre des tunnels, et 73 M€ pour les ouvrages d'art non courants..

### **3.2.1 Ouvrages de franchissement des ravines**

#### ***Franchissement de la ravine des Latanières***

Cet ouvrage d'un seul tenant a une longueur de 630 m. D'un point de vue technique sa réalisation ne devrait pas comporter d'aléas importants. Contrairement au tracé initial, l'ouvrage est en alignement droit. Il s'agit d'un ouvrage de conception classique pour lequel les seuls aléas peuvent provenir des fondations. Comparativement aux 2 ouvrages du tracé initial, il est plus simple à réaliser.

#### ***Franchissement de la ravine de la Grande Chaloupe***

La caractéristique de cet ouvrage de 100 m de longueur réside dans sa grande largeur (35 m) nécessaire à l'implantation d'une station et de deux voies d'évitement. Sur le plan structurel, il ne pose aucune difficulté particulière. Seuls les appuis et leurs fondations méritent une attention particulière : le niveau de fondation est aujourd'hui présenté comme superficiel. Même si cette option n'est pas contestable a priori, il conviendra de protéger les fondations contre les risques d'affouillements et de charriage de la rivière. Une étude hydraulique spécifique sera à produire.

#### ***Franchissement de la ravine Jeanneton***

Cet ouvrage d'une longueur de 240 m est similaire, voire identique à l'ouvrage prévu dans la solution initiale. Il est en légère courbe de rayon 800 m. Les seules difficultés sont celles qui peuvent se présenter pour les fondations prévues aujourd'hui comme superficielles.

#### ***Franchissement de la Grande Ravine***

Ce franchissement est prévu en remblai de grande hauteur (45 m au maximum). Ce choix semble avoir été fait, comparativement à une solution de pont, du fait de l'exiguïté du site, de la nécessité de créer une plate forme élargie pour le passage de la voie routière et pour l'attaque de la tête du tunnel Est. Les membres de la mission attirent l'attention sur la nécessité d'assurer une stabilité correcte des talus et plus particulièrement des têtes de buses au regard des phénomènes d'érosion hydraulique, et de dimensionner correctement la section hydraulique d'écoulement . Les butées de pied de talus en gabions leur semblent peu propices à une durabilité suffisante. Il suggèrent donc que le projet soit revu au regard de ces questions.

#### ***Franchissement de la rivière Saint-Denis***

Cet ouvrage n'a pas été modifié dans la variante. La proximité du pont routier Vin-Sanh permet d'avoir une conception qui s'en inspire. La construction du tablier ne devrait pas poser de difficultés

particulières, hormis le besoin de l'élargir au voisinage de la culée rive gauche. Comme le souligne à juste titre le mémoire de la pièce 2.1 du dossier d'avant-projet, les fondations devront être étudiées avec soin ; la construction de l'une des piles du pont routier (rive droite) a donné lieu, en effet, à des déboires en cours de chantier (basculement de la pile par suite d'une hétérogénéité du sol mal appréhendée par les sondages).

En conclusion de ce chapitre sur les ouvrages de franchissement des brèches, les seuls aléas significatifs sont relatifs aux fondations. L'expérience des ouvrages de la route des Tamarins a montré que la réalisation de fondations sur des alluvions grossières nécessitait des adaptations en cours de chantier compte tenu de l'hétérogénéité des sols pas toujours facile à appréhender par des reconnaissances préalables. Les questions liées aux écoulements hydrauliques doivent aussi être étudiées attentivement.

Les membres de la mission soulignent toutefois que les précautions à prendre pour la réalisation des fondations des ouvrages ne sont pas différentes de celles qu'il aurait fallu prendre pour les nombreux ouvrages du projet initial.

Quant aux coûts de réalisation, il sont probablement légèrement sous-estimés par le fait que les fondations ont été prévues systématiquement en semelles superficielles sans intégrer des travaux de renforcement du sol ou de protection contre les crues des ravines. Les estimations du coût des viaducs semblent correctes, mais il serait prudent de prévoir une marge pour faire face aux aléas géotechniques. . Cependant, le coût de l'ouvrage de franchissement de la ravine Jeanneton semble bas (3.100 €/m<sup>2</sup>) comparativement à celui des Lataniers : il est plus court et devra être réalisé dans des conditions plus difficiles que celui des Lataniers. Il serait donc plus prudent de retenir aussi une estimation de 3.600 €/m<sup>2</sup>.

### 3.2.2 Tunnels

Il s'agit des ouvrages du projet qui présentent le plus d'aléas. Il seront examinés successivement selon les points de vue suivants : aléas techniques de creusement, aléas sur les délais, aléas sur les coûts.

#### a) Aléas techniques de creusement

Ces aléas sont liés à l'impossibilité d'avoir une connaissance précise des caractéristiques des sols et des aquifères traversés. Les quelques sondages profonds réalisés ne sont représentatifs que d'une très faible partie du tracé et l'hétérogénéité inhérente au caractère volcanique du massif est une donnée inéluctable à laquelle devra faire face le chantier, quels que soient les moyens mis en oeuvre pour augmenter la densité des reconnaissances préalables.

Dans ces conditions, la méthode retenue par l'entreprise pour réaliser le creusement devra inclure des réponses techniques en parade aux changements de faciès du front de taille qui seront inéluctables. Le tunnel traversera à un moment ou à un autre des formations de roches altérées ou fracturées, de même qu'il est à craindre des venues d'eau, notamment à l'interface des unités géologiques inférieures et supérieures que l'on sait devoir traverser. Des passages à front de taille mixte – partie basalte compact, partie scories friables – seront rencontrés.

Ce panorama qui pourrait apparaître comme présentant des risques importants est cependant à relativiser par le fait que les pressions induites par la profondeur sont peu importantes, que les caractéristiques mécaniques des scories ou roches altérées sont suffisantes pour assurer une certaine tenue du front de taille, et que les venues d'eau qui se produiront pendant le creusement ne devraient pas être considérables en dehors des épisodes météorologiques très pluvieux et qu'elles devraient

donc être maîtrisées sans trop de difficultés, contrairement à ce qui s'est produit lors du creusement de la galerie de transfert des eaux au travers du massif de Salazie. Les caractéristiques mécaniques des roches ou sols permettent d'envisager un creusement assez aisé au tunnelier, à condition de pouvoir adapter les outils de coupe à la variété des faciès.

Cette appréciation est confortée par l'exemple fourni par le tunnel existant du CFR où l'on peut constater la bonne tenue des roches en l'absence de revêtement.

L'aléa pendant la phase d'excavation est donc plutôt à évaluer en terme de fréquence de rencontre de tel ou tel faciès défavorable, que dans la survenue d'une difficulté majeure imprévue.

A cet égard le dossier d'avant-projet a été construit avec une hypothèse assez favorable pour les pourcentages de longueur de chacun des profils de soutènement en méthode conventionnelle (P1 à P4), puisque le pourcentage de roche dure a été estimé à 55%.

Ainsi, la méthode de creusement par tunnelier est une alternative tout à fait crédible ; le choix de l'une ou l'autre méthode d'excavation (avec tunnelier ou conventionnelle) à faire par les entreprises relèvera donc plutôt de considérations relatives aux conditions de montage des tunneliers sur le site, aux délais et aux coûts, qu'à des considérations de faisabilité technique.

### **b) Délais**

*Cas d'une excavation avec tunneliers :*

Trois scénarios ont été imaginés, selon le nombre de tunneliers mis en oeuvre 2, 3 ou 6.

Le scénario à 6 tunneliers est celui qui a été retenu dans l'avant-projet en raison de son délai théorique le plus réduit. Le planning prévoit un délai de 52 mois entre l'ordre de service et la livraison pour mise en place des équipements ferroviaires.

Selon le CETU le délai théorique, en dehors de tout aléa, pourrait être inférieur de 5 mois.

Toutefois les membres de la mission considèrent, comme le CETU et les autres experts consultés, que ce scénario n'est pas réaliste : outre le coût important de fabrication des tunneliers (dont la valeur leur semble sous-estimée), ils doutent de la capacité des industriels à les fabriquer simultanément ainsi que celle des entreprises à mener 6 chantiers en parallèle. La faible longueur d'excavation par tunnelier ne permettra pas de tirer pleinement profit des avantages issus de la vitesse d'excavation en régime de croisière. Le creusement en parallèle des deux tubes ne permettra pas non plus de profiter, pour les travaux du second tube, de la connaissance du terrain issue du premier creusement. Dans ce scénario tous les risques sont donc pris simultanément, et le délai de réalisation prévisionnel risque fort de ne pouvoir être tenu.

En ce qui concerne les deux autres scénarios (2 ou 3 tunneliers), le délai de conception, de fabrication et d'approvisionnement retenu dans le planning, soit 17 mois, est assez large et devrait pouvoir être tenu, voire réduit à 14 mois, selon le CETU.

S'agissant des cadences de creusement, le CETU, considère que les hypothèses retenues sont pessimistes. Des cadences moyennes de 15 à 18 m /jour sont couramment observées. La vitesse d'excavation moyenne pourrait atteindre 400 m/mois (sur la base d'un travail en trois postes, 6 jours par semaine), alors que le planning a été construit avec une hypothèse prudente de 300 m/mois. Ceci conduit à dire qu'il ne serait pas déraisonnable d'espérer un délai de réalisation de l'ordre de 53 mois au lieu de 63 mois, sauf imprévu majeur. Bien entendu ce planning dépendra aussi de la plus ou moins grande facilité à démonter et réinstaller les tunneliers entre chaque tube, selon des conditions variables suivant la tête de tunnel concernée. A cet égard, les entreprises devraient être invitées à comparer les avantages et inconvénients de chacune des solutions alternatives consistant, d'une part à utiliser les deux tunneliers en parallèle pour faire successivement les tunnels Ouest et

Centre (solution prise en compte dans l'avant-projet), et d'autre part à utiliser le même tunnelier pour creuser successivement chaque tube d'un même tunnel.

*Cas de la méthode conventionnelle :*

La cadence de creusement envisagée est d'environ 4,8 m par jour en moyenne avec trois postes de travail et dans le cas d'une attaque montante, soit un avancement de 125 m moyen par mois. L'évaluation faite par le CETU en fonction des pourcentages de profils de soutènement retenus dans l'estimation donne une valeur légèrement plus faible conduisant à un délai de 19 mois au lieu de 17 pour le cas du tunnel Est. Toutefois, le planning qui en résulte est jugé trop optimiste en ce qui concerne l'enchaînement des tâches pour le creusement, la mise en place du revêtement et des autres ouvrages de génie civil (radiers, trottoirs, ...). Le diamètre assez faible des tubes et les contraintes liées aux tirs d'explosifs et à la ventilation induiront des sujétions importantes qui font douter de la faisabilité de réaliser les rameaux en temps masqué, comme le planning l'envisage.

Ainsi, le délai global de réalisation des tunnels par cette méthode (45 mois pour le tunnel Est, et 51 mois pour le tunnel Ouest) paraît trop optimiste et devrait être augmenté sensiblement, le CETU estimant à 53 mois le délai de réalisation du tunnel Est, ce qui conduit à considérer à peu près comme équivalents les délais de réalisation du tunnel Est selon l'une ou l'autre méthode d'excavation.

*Conclusion sur le délai global :*

En conclusion de cette analyse, il ressort un délai de réalisation global d'environ 53 mois avec l'usage de 2 tunneliers pour les tunnels Ouest et Centre, et un délai équivalent pour la réalisation du tunnel Est, indépendamment de la technique de creusement.

Le scénario de base d'un creusement avec 6 tunneliers, ferait gagner 6 mois au mieux sur le délai global. Le CETU et les membres de la mission considèrent néanmoins que ce scénario n'est pas réaliste pour les raisons déjà évoquées. Les membres de la mission font aussi observer que le planning avec 6 tunneliers ne tient pas compte des difficultés spécifiques au tunnel Est : utilisation nécessaire du pont sur la rivière St-Denis pour l'installation du tunnelier sauf à réaliser une chambre importante dans la tête de tunnel, et difficulté de démontage et transport à la tête de la Grande Ravine.

*c) Coûts*

Le coût de réalisation des trois tunnels est estimé à 481 M€ pour une longueur totale de 12,5 km, soit un coût unitaire de 38.500 € par m, estimation faite dans l'hypothèse d'un creusement avec six tunneliers.

Ce montant comprend 248,5 M€ pour le génie civil proprement des tubes (postes 5 et 6), 73,5 M€ pour la fourniture et l'installation des tunneliers, 58,4 M€ pour les équipements, le reste pour les travaux extérieurs y compris études et installations de chantier.

Les éléments constitutifs de cette estimation qui pèsent le plus lourd sont d'une part le coût de construction et d'aménée sur site des tunneliers (73,5 M€), d'autre part le coût d'excavation dont le montant dépend directement des cadences d'avancement et qui est évalué à 88,66 M€ (poste 5.1), enfin le coût des revêtements (poste 5.2 : 127 M€).

Sur chacun de ces postes les remarques suivantes seront faites :

*Tunneliers :*

Le poste de dépenses relatif aux tunneliers est évalué à 6 x 12,250 M€ l'unité. Cette valeur paraît sous-estimée, le CETU proposant de retenir une valeur aux alentours de 18 M€ l'unité.

Le poste relatif à *l'excavation proprement dite* (5.1) est évaluée à 88,6 M€ (partie courante). Ce coût a été évalué en référence à des prix constatés en métropole et ne tient pas compte des effets de l'insularité et de l'éloignement du site. Il serait donc prudent de lui affecter un coefficient majorateur de 1,2 ou 1,3, ratio couramment constaté sur les ouvrages récemment réalisés sur la route des Tamarins, ce qui conduit à une majoration de 20 à 25 M€.

*Revêtements :*

Les autres postes ne donnent pas lieu à observation, dans la mesure où les prix unitaires ont été pris par référence à des prix réunionnais.

Par comparaison, l'estimation faite dans l'hypothèse d'un creusement conventionnel conduirait, d'après le dossier d'avant-projet, à un coût de 140 M€ pour un tunnel de 3,8 km comparé à la valeur de 147 M€ retenue pour un creusement avec deux tunneliers. Cette estimation, d'après le CETU, semble acceptable, une fois corrigés les écarts en plus ou en moins provenant d'une marge d'incertitude relativement confortable sur les quantités et d'une sous-estimation des coûts unitaires d'excavation au mètre linéaire.

En conclusion, l'estimation du coût de construction des tunnels peut être jugée réaliste, même si elle paraît sous-évaluée d'environ 55 à 60 M€.

Néanmoins les membres de la mission suggèrent de mener un calcul de sensibilité aux aléas géologiques pouvant conduire à des pourcentages différents de roches saines et de roches plus ou moins scoriacées ou altérées, et d'en intégrer les résultats dans l'analyse du partage des risques entre le maître d'ouvrage et le titulaire du contrat.

**d) Réalisation des têtes de tunnel**

La conception des têtes de tunnels se limite actuellement à une épure des terrassements et à la définition de l'enveloppe des parties extérieures du génie civil.

Les membres de la mission considèrent que la conception en est à un stade très préliminaire, et qu'elle comporte encore de nombreuses incertitudes.

Une étude détaillée est à entreprendre au plus tôt, afin de préciser le positionnement longitudinal des têtes, et d'optimiser le volume de terrassement qui paraît aujourd'hui très important, de dimensionner les ouvrages de protection contre les risques d'éboulements rocheux (tant pour la sécurisation du chantier et que pour celle de l'exploitation), et de préciser les travaux nécessaires aux installations de chantier.

Il est certain que la méthode retenue pour le creusement aura un impact sur la conception des têtes, et que ce projet sera à faire par les candidats eux-mêmes au moment de la négociation.

Certaines têtes poseront des problèmes particuliers, notamment la tête ouest du tunnel central pour des raisons de sécurisation contre les chutes de rochers, la tête située dans la Grande Ravine pour des raisons d'accessibilité et d'occupation de l'espace disponible, la tête St-Denis du fait de l'exiguïté des lieux, de la forte pente du terrain et de la proximité du pont sur la rivière St-Denis.

En conclusion, les membres de la mission considèrent qu'il est difficile de donner un avis sur cet ensemble d'ouvrages, et notamment sur l'estimation de leur coût, d'autant que les références en la matière ne sont pas faciles à trouver. Seule une étude détaillée permettra de lever les incertitudes sur ce poste de dépenses qui est évalué aujourd'hui à 28,8 M€ (postes 2 et 4 de l'estimation des tunnels) et inclus dans les 481 M€ des tunnels. Les membres de la mission recommandent donc de prendre une marge de sécurité importante sur ce poste.

#### **e) Conclusion générale sur la construction des tunnels**

L'avant-projet a été conçu avec l'hypothèse de l'emploi de six tunneliers. Les membres de la mission pensent que ce nombre est excessif et qu'il serait plus réaliste d'envisager l'utilisation de 3 tunneliers maximum, voire 2 si le tunnel Est est réalisé en méthode conventionnelle (voir observations faites ci-avant).

Dans une telle hypothèse, le coût d'excavation s'en trouverait diminué du fait de la réduction des coûts de construction des tunneliers, soit une économie d'environ  $3 \times 18 \text{ M€} = 54 \text{ M€}$  à mettre en regard d'une augmentation du délai d'environ 6 mois, comme indiqué précédemment.

Une telle réduction compenserait la sous-estimation du même ordre de grandeur qui a été mise en évidence dans l'évaluation du coût de la solution de base.

En conclusion, les membres de la mission recommandent que l'appel d'offres du contrat de PPP contienne l'exigence de produire une étude comparative de plusieurs scénarios d'emploi de tunneliers au regard du délai global de réalisation et du coût de construction.

#### **3.2.3 Comparaison des aléas avec ceux de la solution initiale dite par les hauts**

Les différences principales entre la solution initiale et la variante soumise à l'évaluation consistent, pour l'essentiel, à mettre en regard la réalisation de deux tunnels supplémentaires (ouest et centre) à la construction de deux ouvrages d'art exceptionnels prévus dans la solution initiale pour franchir la ravine de la Grande Chaloupe et celle de la ravine à Jacques.

Si les tunnels présentent un certain nombre de risques que les membres de la mission ont cherché à appréhender, il convient aussi de souligner que les très grands ouvrages envisagés au départ n'étaient pas exempts de tout aléa, en raison de leurs caractéristiques dimensionnelles exceptionnelles se rapprochant de celles du viaduc de Millau. De tels ouvrages auraient posé des problèmes spécifiques de tenue au vent pendant les épisodes cycloniques, que ce soit lors de leur construction ou en période d'exploitation. La forme retenue pour les piles avec fruit aurait posé des difficultés particulières de réalisation, et le chantier aurait été plus dommageable pour l'environnement.

Ainsi les membres de la mission considèrent que les aléas pouvant affecter la réalisation de la solution variante ne sont pas fondamentalement plus importants que ceux liés à la réalisation des ouvrages d'art exceptionnels. A titre de comparaison le coût de ces ouvrages avait été évalué à 261,6 M€, montant à mettre en regard du coût des deux tunnels Ouest et Centre soit 330 M€, sans qu'il soit possible de préciser l'incertitude sur le coût des viaducs, faute d'éléments de référence suffisants.

### **3.3 Conséquences sur l'exploitation de la ligne**

Les modifications du profil en long de la ligne consécutive à l'enquête d'utilité publique, principalement le remplacement d'un tracé à l'air libre comportant de nombreux ouvrages dont certains à caractère exceptionnel, par un tracé essentiellement établi en souterrain, ne sont pas sans conséquences sur les conditions d'exploitation de la ligne future. Conformément aux demandes exprimées dans la lettre de mission, les membres de la mission ont examiné l'impact de ces modifications sur les coûts, la fiabilité de l'exploitation de la ligne et la circulation des trains de fret.

### **3.3.1 Impact sur les coûts d'exploitation**

Les membres de la mission ont identifié les conséquences suivantes relatives aux coûts d'exploitation:

#### 1/ l'allongement du tracé.

Le tracé entre les stations de la Possession et CHD d'une longueur initiale de 14 100 m est d'une longueur de 15 470 m dans le nouveau tracé. Cet allongement de parcours de 1 370 m va générer des coûts d'exploitation supplémentaires. Ceux-ci doivent toutefois être relativisés en regard de la longueur totale de la ligne qui est de 41,1km soit un allongement de 3,3%. De plus en terme de « trains x kilomètres », ce qui est une bonne mesure des coûts d'exploitation, et compte tenu d'une fréquence double sur le parcours de CHD à CERF (8 km) l'augmentation n'est que de 2,8%. On notera que cette augmentation permet la desserte d'une nouvelle station et en conséquence, les membres de la mission estiment qu'elle ne remet pas en cause l'économie globale du projet.

#### 2/ L'allongement de la longueur des tunnels.

En premier lieu les membres de la mission se sont interrogés, sur l'impact de cet allongement sur le personnel d'exploitation en charge de la surveillance de la circulation des trains dans les tunnels. Or il s'avère qu'avec une fréquence d'un train toutes les 10 minutes, et en regard d'une section de 15,470 km (dont 12,6 km de tunnels), il n'y a au maximum que 2 trains par sens sur la section surveillée, ce qui paraît tout à fait compatible avec la présence d'un seul opérateur. Ainsi l'allongement des ouvrages souterrains de 3,8 à 12,6 km, ne conduit elle pas à la mise en place d'opérateurs supplémentaires.

En second lieu, les membres de la mission ont pris en compte les coûts supplémentaires générés par les consommations énergétiques des équipements de sécurité installés dans les tunnels (éclairage, ventilation). Compte tenu du fait que la ventilation n'est utile qu'en cas d'incendie, les membres de la mission considèrent que l'accroissement de l'énergie consommée par les éclairages supplémentaires est totalement marginale par rapport à l'énergie consommée pour le fonctionnement des trains, et que ce point ne saurait constituer un obstacle à la réalisation du projet.

### **3.3.2 Impact sur la fiabilité de l'exploitation**

Dans le projet initial, établi en grande partie à ciel ouvert, la topographie particulière du site et principalement la présence des ravines nécessitait le recours à de nombreux ouvrages d'art, certains de très grande portée et à caractère exceptionnel. Cette topographie est génératrice de risques naturels tels les glissements de terrains en bordure de ravine, favorisés par la disposition de couches géologiques en alternance de bancs durs mais fracturés et de bancs tendres de scories. Ces événements sont amplifiés par les fortes pluies et les cyclones. Le tracé en souterrain permet de s'affranchir de ces risques, hormis aux têtes des tunnels qui devront ainsi faire l'objet d'un soin tout particulier.

*Aussi les membres de la mission considèrent-ils que les conditions d'exploitation relatives au nouveau projet sont plus favorables que celles du projet initial.*

### **3.3.3 l'impact sur le transport du fret**

Les membres de la mission se sont également préoccupés des conséquences de la modification du tracé vis à vis du transport du fret. Celles-ci peuvent avoir 2 origines :

- la circulation des trains de fret dans les tunnels et notamment des trains de charbon, vis à vis des risques d'incendie

Les membres de la mission estiment qu'en respectant leur recommandation ayant pour objet de ne laisser entrer qu'un seul train dans un tunnel, la sécurité en cas d'incendie ne concerne que le seul conducteur du train de fret et leur paraît ainsi beaucoup plus facile à assurer que pour un train transportant des voyageurs

- la circulation des trains de fret dans la longue rampe de 5% du tunnel central  
En réalité, du fait des caractéristiques de la ligne, les véhicules transportant du fret n'auront rien à voir avec les trains de fret traditionnels (une ou plusieurs locomotives tirant des wagons), mais des engins automoteurs du même type que les rames voyageurs, les compartiments destinés aux voyageurs étant remplacés par des plateaux sur lesquels reposeront des containers. Ainsi la motorisation des essieux sera répartie de façon identique à celle des rames voyageurs, la puissance étant adaptée proportionnellement à la masse totale en charge, permettant ainsi aux rames fret de circuler quasiment dans les mêmes conditions, en rampe comme en pente, que les rames voyageurs, pour autant que la puissance des sous stations d'alimentation en énergie de traction soit adaptée à la puissance appelée par les trains en ligne.

*Aussi les membres de la mission considèrent ils que la modification du tracé de la ligne n'a pas d'impact sensible sur les conditions de circulation des trains de fret.*

### **3.3.4 Recommandations concernant la circulation par grand vent**

Les membres de la mission insistent tout particulièrement sur la nécessité de procéder à une étude spécifique concernant la stabilité des véhicules par vent fort. En effet, si la circulation des trains devra être interrompue au moment des cyclones, il conviendra de préciser quelle est la vitesse maximale admissible des vents permettant la circulation des trains en toute sécurité, par exemple avant ou après un cyclone ou lors des tempêtes tropicales. Cette étude pourra conduire à la mise en place de mesures d'exploitation déclenchées par les alertes météo, voire de mesures anémométriques spécifiques au tram-train, voire la mise en place d'écrans brise-vents aux points les plus exposés. A cet égard, les franchissements de la ravine de la Grande Chaloupe et de la Grande Ravine, par des ouvrages situés entre 2 tunnels (pont ou remblai), devront faire l'objet d'un soin tout particulier.

Bien évidemment, ces mesures auraient été d'une ampleur sans commune mesure en cas d'adoption du projet initial.

*En conclusion de ce chapitre, les membres de la mission considèrent que les modifications apportées au projet ne sont pas de nature à remettre en cause la fiabilité et les coûts de l'exploitation future de la ligne*

## **3.4 Conséquences sur la maintenance de la ligne**

Les modifications du tracé en plan et du profil en long consécutives à l'enquête d'utilité publique, conduisent à substituer à un tracé établi à ciel ouvert et comprenant de nombreux ouvrages d'art dont certains à caractère exceptionnel, par un tracé établi essentiellement en souterrain, ce qui conduit à modifier profondément les conditions, donc les coûts de la maintenance de l'infrastructure ferroviaire ainsi réalisée.

Comme pour toute infrastructure, la maintenance d'une ligne ferroviaire comprend une fonction de surveillance destinée à garantir la sécurité des circulations et prévenir les dégradations ainsi que les travaux de maintenance proprement dits, parmi lesquels on distingue généralement les travaux

d'entretien courant, les travaux de grosses réparations et les opérations de régénération ou de renouvellement<sup>1</sup>. Enfin, pour la facilité de l'analyse, les membres de la mission ont distingué les équipements ferroviaires, (voie, caténaires, signalisation), les équipements des tunnels (éclairage, ventilation) et les ouvrages de génie civil (ouvrages d'art, tunnels, ouvrages en terre).

### **3.4.1 La surveillance des installations**

#### ***La surveillance des équipements ferroviaires***

Le tracé futur du projet établi essentiellement en souterrain, protège les équipements ferroviaires des agressions extérieures et de ce fait il n'y a pas lieu de procéder dans les sections souterraines à des opérations de surveillances spéciales consécutives aux intempéries (contrairement aux sections situées à ciel ouvert). On peut ajouter que les tournées en tunnel nécessitent des précautions particulières pour assurer la sécurité des agents<sup>2</sup>, mais de ce point de vue, la circulation des agents sur les grands ouvrages nécessite également des mesures particulières de sécurité. En définitive, les membres de la mission considèrent que les modifications apportées au projet sont plutôt favorables à l'organisation de la surveillance des équipements ferroviaires

#### ***La surveillance des équipements des tunnels***

Ces considérations sont spécifiques aux ouvrages souterrains.

En ce qui concerne l'éclairage, la surveillance consiste à s'assurer que ce dernier fonctionne. Cette opération peut être réalisée par l'intermédiaire de signalement de la part des mécaniciens ou par les agents assurant la surveillance des installations ferroviaires.

En ce qui concerne la ventilation, celle-ci n'est utilisée qu'en cas de danger et elle doit faire l'objet d'essais périodiques programmés qui peuvent être conduits par les agents d'exploitation et de maintenance

Aussi les membres de la mission considèrent-ils que la surveillance des installations des équipements des tunnels ne génère pas une augmentation significative des opérations de surveillance des installations.

#### ***La surveillance des ouvrages de génie civil***

D'une manière générale il s'avère que la surveillance des ouvrages de génie civil est plus lourde pour une ligne établie en souterrain que pour une ligne établie à ciel ouvert. En effet, la ligne établie en souterrain constitue un ouvrage continu, lequel nécessite, par application des règlement ministériels, a minima une visite annuelle et une visite détaillée tous les 5 ans. Toutefois, dans le cas particulier de la ligne de tram – train de la Réunion, les membres de la mission sont convaincus que la surveillance de l'infrastructure du projet établi à ciel ouvert aurait été d'une organisation plus délicate, donc d'un coût plus élevé que celle du projet établi en souterrain et désormais retenu, ceci pour les raisons suivantes :

- la visite des souterrains ne requiert pas de matériel particulier: un simple véhicule avec une nacelle et un éclairage est suffisant pour procéder à ces inspections
- a contrario, la visite des grands ouvrages nécessite des matériels particuliers pour le tablier, les appareils d'appui, les piles et les haubans. Le personnel qui les assure doit également posséder des qualités « d'acrobates ». Enfin la surveillance des fondations soumises aux coulées de boue en fond de ravine peut générer des dépenses conséquentes
- la surveillance des ouvrages géotechniques et plus particulièrement des déblais taillés dans des horizons géologiques constitués d'une alternance de bancs durs mais fracturés et de

<sup>1</sup> Compte tenu de la durée de vie prévisible des différents constituants et des taux d'actualisation généralement adoptés, les opérations de renouvellement ou régénération n'ont pas été prises en compte par les membres de la mission

<sup>2</sup> Tournées effectuées en dehors des périodes d'exploitation ou ralentissements imposés aux circulations

bancs tendres de scories ne doit pas être négligée, les risques d'éboulement étant amplifiés par les conditions météorologiques (cyclones et fortes pluies). Elle nécessite des agents formés disposant des moyens matériels nécessaires aux travaux acrobatiques. Cette surveillance conduit à la mise en place de dispositifs de protection (filets) qui eux-mêmes génèrent des opérations de maintenance.

*En définitive, les membres de la mission considèrent que l'organisation, donc le coût, des opérations de surveillance des infrastructures, est plus favorable dans l'hypothèse, désormais retenue, de la ligne établie en souterrain*

### **3.4.2 Les travaux de maintenance**

#### ***L'entretien des équipements ferroviaires***

Les travaux nécessaires à la maintenance des équipements ferroviaires (voie, caténaires, signalisation) consistent à remédier aux effets du passage des circulations et des agressions externes. A cet égard, la situation de la ligne en souterrain limite considérablement l'effet des agents extérieurs (notamment la pluie, le vent, les variations de température) et la maintenance de la ligne s'en trouvera ainsi allégée.

#### ***L'entretien des équipements des tunnels***

Les équipements de ventilation ne seront utilisés qu'en cas de danger et de ce fait, ils ne nécessiteront qu'un entretien extrêmement réduit dont le coût peut être négligé.

L'éclairage et les dispositifs de secours comprenant des batteries dont les travaux d'entretien consisteront essentiellement à remplacer les lampes hors d'usage et les batteries arrivées en limite d'utilisation. En valeur absolue ces opérations ne sont pas d'un coût négligeable, même si les batteries, en réalité très peu sollicitées auront une longue durée de vie. Les membres de la mission estiment cependant que le coût de ces opérations restera marginal par rapport à l'ensemble des coûts d'entretien de la ligne et qu'en tout état de cause ils resteront largement inférieurs aux économies relatives à l'entretien des équipements ferroviaires résultant de l'implantation de la ligne en souterrain.

#### ***L'entretien des ouvrages de génie civil***

Il convient de comparer l'entretien de l'infrastructure de la ligne établie principalement en souterrain à celui du projet initial établi à ciel ouvert et comprenant de nombreux ouvrages.

De nos jours, la construction de tunnels neufs, que ce soit par des méthodes traditionnelles ou par l'utilisation de tunneliers, du fait du recours au béton projeté et aux injections d'extrados, conduit à associer très intimement le revêtement au terrain encaissant. De ce fait, et hormis les cas d'une géologie évolutive<sup>3</sup> ou de défaillance de l'étanchéité du revêtement, les tunnels modernes ne nécessitent quasiment aucun entretien de structure au cours des premières décennies. En l'occurrence le contexte se présente favorablement vis-à-vis de ces deux risques. On peut seulement citer la remise en état des dispositifs de drainage et d'évacuation des eaux mais à cet égard, l'entretien des mêmes dispositifs est beaucoup plus important pour les ouvrages en terre et les ouvrages d'art exposés aux intempéries.

Il convient de mentionner les têtes de tunnels comme signalé plus haut (chap. 3.1 sécurité en tunnel – recommandations), lesquelles pourront nécessiter la pose de dispositifs de protection et/ou d'alerte dont la maintenance devra être assurée.

---

<sup>3</sup> Telle que terrains gonflants, instabilité d'ensemble

*En conclusion les membres de la mission estiment que le coût des travaux de maintenance de la ligne ne subiront pas d'augmentation du fait de la modification de profil décidée à la suite de l'enquête d'utilité publique*

### **3.5 Conclusions sur la faisabilité technique et économique du projet modifié**

Les analyses faites par les membres de la mission et rapportées ci-avant conduisent à produire des conclusions plutôt rassurantes sur les conséquences des modifications apportées au projet à l'issue de l'enquête d'utilité publique.

S'agissant des conséquences sur l'exploitation et la maintenance, ces modifications amènent à examiner avec une plus grande acuité les problèmes soulevés par la sécurité des voyageurs et des personnels lors de la traversée des tunnels, même si ces questions étaient déjà formulées dans le projet initial en raison de l'existence du tunnel Est; les membres de la mission estiment que ces problèmes devraient pouvoir être surmontés par respect de l'instruction interministérielle 98-300 relative au transport ferroviaire et par une étude de danger spécifique au projet.

S'agissant des conséquences sur la construction, les aléas proviendront pour l'essentiel au cours du creusement des tunnels et pourront être la source de dérives vis à vis des coûts et des délais de réalisation, dérives qui ne devraient pas être excessives. En effet, même si dans l'état actuel du projet, la connaissance de la géologie et de l'hydrogéologie des terrains traversés est grossière, pour autant, la nature des faciès des terrains rencontrés est connue et devrait pouvoir être maîtrisée sans difficultés majeures, seules les positions précises et la fréquence de ces faciès, ainsi que l'existence de nappes perchées constituant des inconnues. Ceci permet donc de conclure à la faisabilité de la réalisation des tunnels que ce soit par des méthodes traditionnelles, ou par l'utilisation de tunneliers, ceci à des coûts qui devraient pouvoir être contenus dans une fourchette raisonnable que les candidats doivent pouvoir apprécier. Un soin tout particulier devra néanmoins être apporté à l'étude de la réalisation des têtes, qui pour l'instant en sont à un stade de conception très sommaire ; mais les investigations en cours devraient donner aux candidats tous les éléments utiles pour proposer une conception plus détaillée avec une marge d'incertitude des coûts acceptable.

Les membres de la mission font aussi observer que le projet initial n'aurait pas été sans aléas, notamment en ce qui concerne la construction des deux grands viaducs exceptionnels sur la Ravine de la Grande Chaloupe et sur la Ravine à Jacques, en raison de leurs caractéristiques dimensionnelles hors normes se rapprochant de celles du viaduc de Millau.

Aussi, les membres de la mission estiment que le financement du projet par le recours à un partenariat public-privé est possible pour autant que les risques identifiés aient fait l'objet d'une analyse préalable et d'un partage contractuel sur la base d'une étude détaillée à produire par les candidats. A cet égard, les moyens de faire face aux aléas prévisibles et la part de risques prise en compte par les concurrents devraient être un des éléments du dialogue compétitif destinés à désigner le lauréat.

*En conclusion, tout en faisant observer que le projet initial n'était pas exempt d'aléas, les membres de la mission considèrent que les modifications apportées lors de l'enquête publique, ne sont pas de nature à modifier les conditions techniques et financières du projet.*

## 4 Les pistes d'amélioration

Les analyses conduites par les membres de la mission et détaillées dans le chapitre précédent, ont montré que les difficultés essentielles relatives à la variante désormais retenue pour la réalisation du projet de tram-train de la Réunion, avaient trait aux risques liés à la construction des tunnels, risques portant à la fois sur les délais de réalisation et sur les coûts de construction.

Même si ces risques paraissent pouvoir être maîtrisés et contractuellement partagés entre le maître d'ouvrage et le constructeur, les membres de la mission se sont interrogés sur les évolutions du projet qui permettraient de les réduire en valeur absolue tout en conservant des fonctionnalités acceptables vis à vis des objectifs visés, la meilleure solution à cet égard consistant à réduire la longueur des tunnels à creuser. Aussi, et bien qu'il n'aient pu disposer, ni du temps, ni des moyens d'investigations nécessaires, ils formuleront 2 types de propositions qui, de leur point de vue, mériteraient d'être approfondies à l'occasion du dialogue compétitif mené par le maître d'ouvrage avec les candidats.

### *1/ L'augmentation de la pente maximale admissible*

Les membres de la mission ont pu observer que le tracé du tunnel central en quasi « fer à cheval » n'était motivé que par la nécessité d'offrir un linéaire suffisant permettant de rattraper une différence d'altitude de plus de 200 m moyennant la pente admissible maximale de 5%. Or ce niveau de pente admissible reste inférieur à la limite technique du ferroviaire (en simple adhérence) et l'augmentation de ce niveau de pente, par exemple à 6%, permettrait de réduire de 20% la longueur du tunnel central. Ils ajoutent que cette augmentation de pente ne devrait pas avoir d'effets notables sur la circulation des trains de fret compte tenu de la conception des rames de fret semblables à celle des rames voyageurs.

Toutefois, les membres de la mission sont conscients des inconvénients résultant d'une telle décision, à savoir essentiellement une augmentation de la motorisation du matériel roulant, donc une augmentation de son coût d'acquisition, de son coût de fonctionnement (énergie et entretien), une réduction de la vitesse de circulation en montée comme en descente (pour des motifs de sécurité). Par ailleurs il conviendrait d'éviter une émergence du tunnel dans la ravine à Jacques tout en préservant une hauteur de couverture suffisante.

Ils estiment cependant que le maître d'ouvrage ne devrait pas fermer la porte à des propositions concernant la pente maximale admissible lors du dialogue compétitif avec les candidats.

### *2/ L'exploitation des tunnels en voie unique*

Le chemin de fer est un mode de transport qui permet une exploitation relativement efficace en voie unique et au vu du linéaire de tunnels à construire, les membres de la mission considèrent que le maître d'ouvrage ne devrait pas exclure un tel scénario, ne serait ce que lors d'une première phase d'exploitation.

Ils estiment, en première analyse, qu'une exploitation en voie unique des 3 tunnels situés entre Saint-Denis et La Possession<sup>4</sup>, devrait permettre, avec une certaine « robustesse de la grille

<sup>4</sup> Avec des voies d'évitement entre chaque tunnel

horaire<sup>5</sup> », une fréquence d'un train toutes les 20mn.

Ils sont bien conscients des problèmes de sécurité des personnes vis à vis du risque d'incendie posés par l'exploitation de tunnels monotubes à voie unique, mais ils considèrent qu'avec les mesures explicitées plus haut (cf. § 3.1) concernant l'exploitation (un seul véhicule par tunnel) et le matériel roulant, le caractère « GAME<sup>6</sup> » du système devrait pouvoir être démontré.

Ils sont également conscients des inconvénients liés à la réalisation des têtes de tunnels des deuxièmes tubes à proximité des ouvrages exploités et des sujétions qui peuvent en résulter vis à vis de l'exploitation.

Toutefois, même si la fréquence des trains est réduite de moitié, la capacité offerte peut être préservée par utilisation de rames en unité double dès la mise en service. Ainsi, les membres de la mission estiment qu'une telle disposition devrait pouvoir trouver sa place lors du dialogue avec les candidats. Bien évidemment, dans une telle hypothèse, les solutions proposées devraient être appuyées sur des études fines d'exploitation justifiant leur pertinence.

## 5 Conclusions

Comme signalé au début de ce rapport, l'évaluation faite par les membres de la mission d'expertise a été limitée aux conséquences des modifications du tracé dans le massif de la Montagne, sur la faisabilité du projet, la nature et l'importance des risques en phase de construction et d'exploitation.

Les membres de la mission estiment que le nouveau tracé ne comporte pas d'aléas substantiellement plus importants que le tracé initial par les hauts.

S'agissant des risques techniques en cours de construction, les aléas géologiques en phase de creusement des tunnels leur paraissent maîtrisables dans des conditions raisonnables ; ils recommandent néanmoins de tester la sensibilité de leur impact sur le délai de réalisation et le coût de construction, de manière à pouvoir définir un partage des risques entre les deux partenaires, public et privé.

Les membres de la mission estiment aussi que la réalisation de trois tunnels de grande longueur au lieu d'un seul tunnel et de deux grands ouvrages exceptionnels, n'aura pas d'impact important sur les conditions d'exploitation et de maintenance.

Ils attirent néanmoins l'attention sur les points suivants :

- Les mesures nécessaires à la sécurité dans les tunnels doivent faire l'objet d'un dossier de sécurité et d'un avis des services compétents à solliciter au plus tôt, afin de stabiliser la conception du génie civil,
- Le coût de construction des tunnels semble légèrement sous-évalué, notamment le prix de fourniture des tunneliers, et du fait que certains prix ne tiennent pas compte du contexte insulaire,

<sup>5</sup> C'est à dire la non propagation des retards par effet « boule de neige »

<sup>6</sup> Globalement Au Moins Équivalent

- Des incertitudes existent encore sur la conception des têtes de tunnels et leur sécurisation, que les candidats devraient être invités à lever pour en préciser le coût,
- Une étude de sensibilité des rames en circulation vis-à-vis du vent semble nécessaire dans la traversée des ravines afin de fixer les conditions d'exploitation par grand vent.

Par ailleurs, les membres de la mission estiment que la solution de base qui prévoit un creusement mécanisé avec 6 tunneliers, n'est pas optimum en terme économique, ni très réaliste au regard de la capacité de production de l'industrie, qu'elle comporte plus d'aléas, et qu'il serait judicieux d'en rester à une solution à 2 ou 3 tunneliers malgré un allongement théorique des délais d'environ 6 mois.

Les membres de la mission suggèrent enfin :

- de laisser aux candidats la possibilité d'optimiser le tracé du tunnel central et d'adapter sa pente aux capacités du matériel roulant,
- d'étudier un scénario consistant à mettre en service en première phase un seul tube par tunnel exploité en voie unique afin de différer une partie de l'investissement, tout en ayant conscience des sujétions que cela peut entraîner sur la réalisation des seconds tubes, lesquelles devront faire l'objet, dans cette hypothèse, d'un examen précis.

-----

## **ANNEXES**



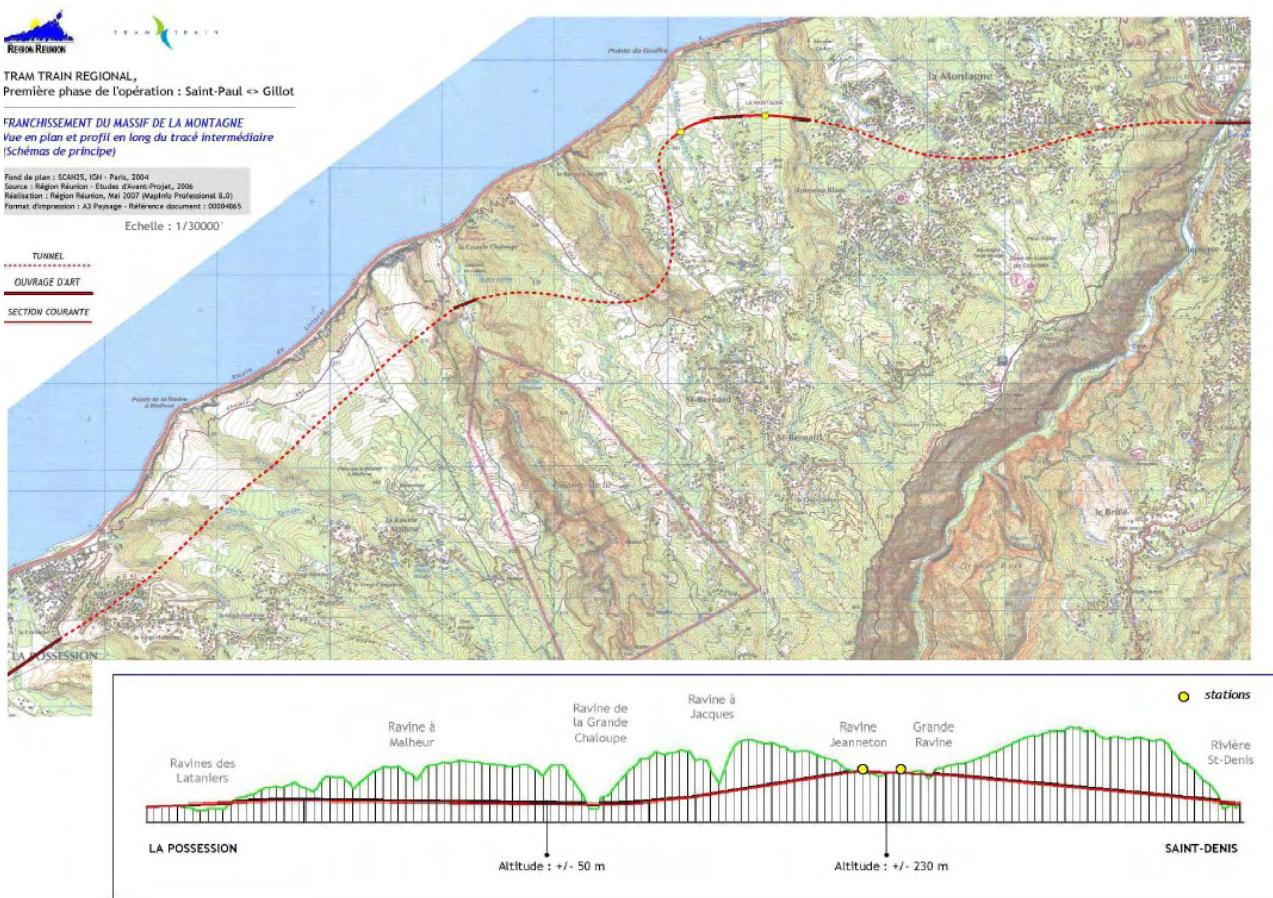
## TRACE GENERAL



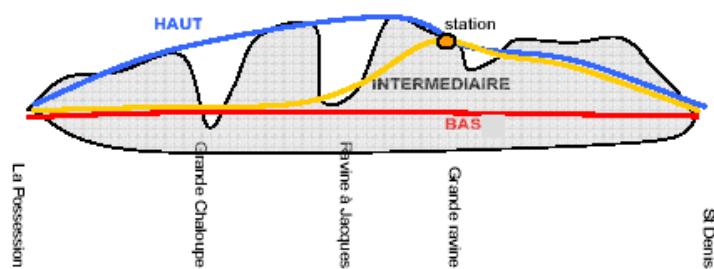
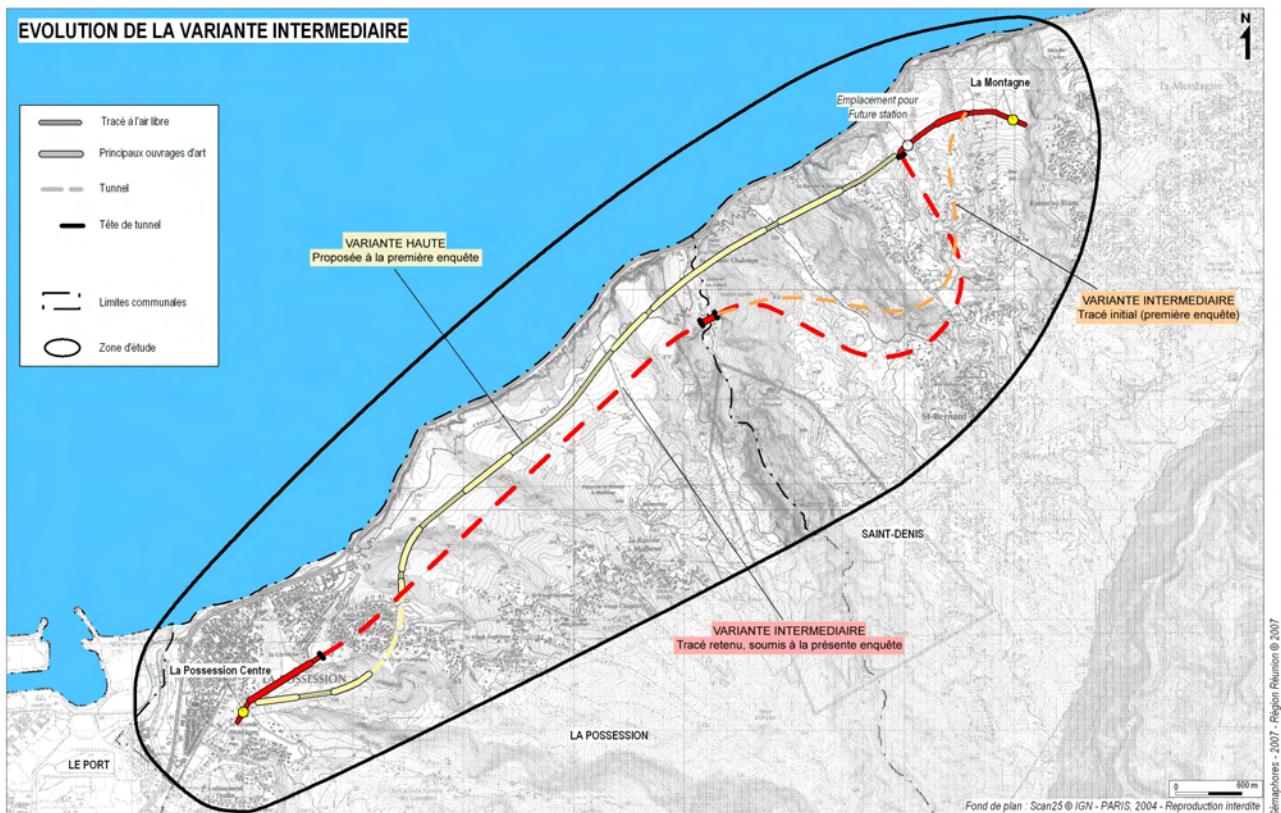
## PREMIERE PHASE



## FRANCHISSEMENT DU MASSIF DE LA MONTAGNE



## COMPARAISON DES VARIANTES



0 0 5 5 0 5 - 0 1



MINISTÈRE  
DE L'ÉCONOMIE, DES FINANCES  
ET DE L'EMPLOI

MINISTÈRE  
DU BUDGET, DES COMPTES PUBLICS  
ET DE LA FONCTION PUBLIQUE

**INSPECTION GÉNÉRALE DES FINANCES**

139, RUE DE BERCY  
Télédoc 335  
75572 PARIS CEDEX 12

Noël de SAINT PULGENT  
Inspecteur Général des Finances  
Président de la Mission d'Appui  
aux Partenariats Public-Privé

TÉLÉPHONE : 01.53.18.13.08  
TÉLÉCOPIE : 01.53.18.69.32  
Mél : [noel.de-saint-pulgent@igf.finances.gouv.fr](mailto:noel.de-saint-pulgent@igf.finances.gouv.fr)

Paris, le 25 septembre 2007

Monsieur le Vice-Président,

La Mission d'appui à la réalisation des contrats de partenariat (MAPPP) a été saisie pour avis par Monsieur Paul VERGES, Président du Conseil régional de la Réunion, de l'évaluation préalable du projet de tram-train entre Saint-Denis et Le Port, au titre de l'article 14 de l'ordonnance du 17 juin 2004 relative aux contrats de partenariat (article L 1414-2 du code général des collectivités territoriales).

J'ai d'ores et déjà émis un avis favorable sur l'éligibilité juridique de ce projet au contrat de partenariat, sur le fondement de la complexité. En revanche, j'ai été amené à différer mon avis sur l'analyse comparative, du fait de l'insuffisance de la première analyse qui m'a été communiquée et à demander un complément d'études sur cette question.

Un fait nouveau me conduit à solliciter l'appui technique du Conseil Général des Ponts-et-Chaussées sur ce projet. Le rapport d'enquête préalable à la déclaration d'utilité publique concluant à l'opportunité de modifier le tracé en plan et le profil en long de la voie ferrée sur une douzaine de kilomètres entre La Montagne et La Possession, a conduit le président de la Région Réunion à donner satisfaction aux opposants au tracé initial qui se sont manifestés lors de l'enquête, afin d'éviter un recours juridique contre une éventuelle décision de maintien de ce tracé.

.../..

Monsieur Claude MARTINAND  
Vice-président du Conseil Général des Ponts-et-Chaussées  
Tour Pascal B  
92055 LA DEFENSE Cedex

Cette décision a pour conséquence de remplacer un tracé direct comportant un ouvrage d'art exceptionnel au-dessus d'un ravin, dit « tracé haut », par un tracé en courbe, en tunnel sur 12 km environ, avec un rayon minimal de 500 m et une pente maximale de 6%, dit « tracé intermédiaire ». Au surplus, le tunnel devrait être creusé dans des sols hétérogènes constitués de roches volcaniques par endroits très dures et par endroits friables, voire pulvérulentes. Pour ce projet dont le coût initial d'investissement, matériel roulant inclus, a été estimé à environ 1315 M€ HT, le surcoût lié à l'adoption du nouveau tracé n'a pas fait l'objet à ce jour d'une estimation précise, mais pourrait s'élever à plusieurs centaines de millions d'euros.

Le directeur général adjoint des services du Conseil régional de la Réunion responsable du projet m'a assuré s'être entouré de conseils qualifiés en ingénierie ferroviaire et en géotechnique et avoir lancé une campagne de sondages géologiques complémentaires sur le nouveau tracé, qu'il mettra gratuitement à la disposition des candidats à la réalisation de ce projet. Il m'a par ailleurs assuré que la section en tunnel ferait l'objet d'un partage des risques spécifique, à définir, entre partenaires public (le Conseil régional de la Réunion) et privé, les risques de construction étant au moins en large partie assumés par le partenaire public, contrairement au reste du projet pour lequel ces risques sont entièrement transférés au partenaire privé.

Cependant, même si le rôle de la MAPPP, en dehors de la question de l'éligibilité juridique déjà traitée, se limite à valider un choix de contrat à l'issue d'une comparaison des différentes formules permettant la réalisation du projet, il est clair que cette analyse ne peut faire abstraction de la fiabilité des paramètres techniques qui sont pris en compte dans les études et de leur incidence sur les coûts, les délais et le partage des risques. C'est pourquoi il m'apparaît vivement souhaitable que pour porter une juste appréciation sur ces points, la Mission puisse s'appuyer sur l'expertise reconnue du Conseil Général des Ponts-et-Chaussées.

Il s'agit plus précisément de déterminer :

- une estimation du surcoût probable d'investissement (éventuellement encadré par une fourchette maximum – minimum) lié au changement de tracé ;
- une estimation du délai supplémentaire d'exécution ;
- une caractérisation des risques techniques de toute nature susceptibles d'affecter le bon déroulement du projet ;
- une appréciation sur la compatibilité des caractéristiques géométriques du nouveau tracé avec une exploitation ferroviaire dans des conditions normales, avec une vitesse commerciale de 80 km/h, et les éventuelles contraintes d'exploitation ;
- les conséquences du changement de tracé sur le budget prévisionnel de maintenance et d'entretien.

L'équipe de la MAPPP se tient bien évidemment à la disposition des experts que vous voudriez bien désigner.

J'adresse une copie du présent courrier à Monsieur le Président de la Région Réunion ainsi qu'à Monsieur le Préfet de la Région, pour leur bonne information.

Je vous prie d'agréer, Monsieur le Vice-Président, l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Noël de SAINT PULGENT

Noël de SAINT PULGENT





MINISTÈRE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT  
ET DE L'AMENAGEMENT DURABLES

**Conseil général  
des Ponts et Chaussées**

La Défense, le 12 OCT. 2007

*Le Vice-Président*

Nos réf. : 005505-01

**Note**

à

**Monsieur Christian BINET,**  
ingénieur général des ponts et chaussées

**Monsieur Jean-Louis PICQUAND,**  
ingénieur des ponts et chaussées

Par note du 25 septembre 2007, le Président de la mission d'appui aux partenariats public-privé de l'Inspection générale des finances a demandé au Conseil général des ponts et chaussées de diligenter, à la Réunion, une **mission d'expertise pour l'évaluation préalable du projet de tram-train entre Saint-Denis et Le Port.**

Je vous confie cette mission enregistrée sous le n° 005505-01 dans le système de gestion des affaires du CGPC.

Conformément à la procédure en vigueur, je vous demande d'adresser votre rapport de fin de mission au président de la 3<sup>ème</sup> section et de m'en faire parvenir simultanément un exemplaire, aux fins de transmission au Président de la mission d'appui aux partenariats public-privé de l'Inspection générale des finances.

Claude MARTINAND

**Copies :** M. le Président et M. le Secrétaire de la 3<sup>ème</sup> section  
M. le Président et Mme la Secrétaire de la 4<sup>ème</sup> section  
M. le Président et Mme la Secrétaire de la 5<sup>ème</sup> section

Tour Pascal B 92055 La Défense Cedex  
Tél. : 01 40 81 21 22 – Fax : 01 40 81 23 24 - Cgpc-sg@equipement.gouv.fr





MINISTÈRE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT  
ET DE L'AMENAGEMENT DURABLES

*Direction Générale des Routes*

Bron, le 09 janvier 2008

*Centre d'Etudes des Tunnels*

Référence :  
Affaire suivie par :  
Alain Robert – Chargé de mission  
tél. : 04 72 14 34 66, fax : 04 72 14 34 90  
courriel : alain-alex.robert@equipement.gouv.fr

**Le directeur du centre d'études des tunnels**

à

M. Christian BINET  
CGPC  
ARCHE SUD  
92055 LA DEFENSE Cedex

**Objet :** Ile de La Réunion – Projet de TRAM-TRAIN

**PJ :** Annexe 1

**Ile de La Réunion**  
**Projet de TRAM – TRAIN**

**Note d'observations sur le dossier d'APS**

A la demande de M. BINET, C.G.P.C., le CETU a procédé à une analyse du dossier d'Avant Projet Sommaire (APS) du projet de TRAM-TRAIN entre La Possession et Saint-Denis sur l'Île de La Réunion.

L'analyse ne concerne que les trois tunnels :

- « Tunnel Ouest » entre La Possession et la ravine de la Grande Chaloupe (4600 mètres),
- « Tunnel Central » entre la ravine de la Grande Chaloupe et le Plateau Couilloux (4100 mètres),
- « Tunnel Est » entre le Plateau Couilloux et Saint Denis (3800 mètres),

et ne porte que sur la faisabilité, les équipements, les plannings, les coûts et les risques.  
Les documents préférentiellement consultés ont été les suivants :

## I – Faisabilité

Nous distinguons, d'une part la section courante des tunnels, et d'autre part les sites de têtes et les accès qui présentent un caractère plus critique tant pour la réalisation des entrées en terre que pour les aspects liés à l'organisation de chantier.

### I – 1 – Section courante :

L'étude géologique, hydrogéologique et géotechnique effectuée décrit un contexte globalement propice à la réalisation de travaux souterrains. Ces conditions favorables résident principalement dans les éléments décrits ci-dessous :

- a) la majeure partie de la longueur des tunnels à creuser est implantée dans l' Unité Inférieure de la Phase II de l'activité volcanique du Piton des Neiges. Celle-ci est constituée d'un empilement régulier de séquences, chaque séquence correspondant à un événement éruptif et à la phase d'inactivité qui le sépare de l'événement éruptif suivant. La séquence type comporte une coulée de lave basaltique de 0,5 à 2 m d'épaisseur (jusqu'à 5 m localement), un niveau de scories de 0,3 à 2 mètres d'épaisseur (jusqu'à 5 m à proximité des points d'émission) et enfin d'un niveau de paléosol d'épaisseur décimétrique.

Les coulées sont constituées de basaltes gris à pâte microlithique ou aphyrique, fréquemment vacuolaires et présentent un faible pendage de 5 à 10° vers l'océan; les scories sont constituées d'éléments grossiers soudés ou noyés dans une matrice de cendres ; les paléosols sont constitués d'argiles rouges à orangées.

Cet empilement est recoupé par des dykes particulièrement nombreux entre Saint Denis et la ravine à Bailly ; par ailleurs les discontinuités correspondant principalement aux surfaces des coulées et aux fentes de retrait sont limitées. Les périodes d'accalmie entre deux événements éruptifs étant très courtes, l'érosion interne y est très limitée, d'où une épaisseur de paléosols faible et l'absence de paléo-vallée à l'intérieur même de l'unité.

Du point de vue hydrogéologique il apparaît que les tunnels sont implantés au dessus du niveau de la nappe de base et que l'unité inférieure ne comporte quasiment pas de nappe perchée temporaire eu égard à sa faible perméabilité. Les essais géotechniques réalisés sur les basaltes notamment indiquent des roches présentant une résistance à la compression simple et une dureté (CERCHAR) moyennes à élevées, une déformabilité faible et une abrasivité moyenne à très forte (selon la méthodologie d'essai).

Cette description de l'unité inférieure permet d'envisager très sereinement la construction de tunnels dans la mesure où la stabilité en grand est assurée par la structure rocheuse, où les risques liés à l'eau sont quasi inexistant sauf au droit de certains dykes, et où les caractéristiques des matériaux permettent une excavation tant de type mécanisée que conventionnelle.

Dans le cas d'une méthode mécanisée, il peut être retenu, au sens de l' AFTES, un « bouclier mécanisé ouvert à appui longitudinal », muni d'une tête d'abattage pleine section (roue de coupe équipée de molettes et de couteaux), et posant un revêtement de voussoirs préfabriqués. Dans le cas d'une méthode conventionnelle, l'abattage se ferait soit à l'explosif dans les laves, soit à la machine foreuse ponctuelle dans les scories et les paléosols, le soutènement étant assuré par des boulons dans les laves et par des boulons et du béton projeté ou des cintres dans les formations plus meubles.

La faisabilité était de toute façon avérée dans cette unité inférieure par l'existence et la pérennité des tunnels des CFR caractérisés par une section transversale rectangulaire (peu favorable), une surface de peu inférieure à celle du projet, et par l'absence de tout soutènement sur la majeure partie de la longueur creusée.

- b) Le projet ne concerne que très peu les Unités Intermédiaire et Supérieure de la Phase II de l'activité volcanique du Piton des Neiges. Il s'agit principalement des émergences à Grande Ravine (tête Ouest du Tunnel Est), à Plateau Couilloux (tête Est du Tunnel Central), à Grande Chaloupe (tête Ouest du Tunnel Central et tête Est du Tunnel Ouest) et du tiers Ouest du Tunnel Ouest qui se trouvent implantés à proximité du contact entre les deux unités Inférieure et Supérieure.

L' Unité Intermédiaire correspond à une longue période d'accalmie entre les phases d'activité volcanique responsables de la mise en place des unités inférieure et supérieure. Durant cette période, les phénomènes d'altération et d'érosion ont été très actifs et ont conduit à la formation de paléo-vallées et de paléosols latéritiques d'épaisseur métrique à pluri-métrique. Les paléo-vallées sont comblées par des niveaux détritiques (alluvions, éboulis, brèches pyroclastiques polygéniques) disposés en chenaux et par des coulées de lave peu épaisses (moins de 2 mètres). L' Unité Supérieure correspond à une nouvelle période d'activité volcanique intense mais discontinue avec de nombreuses périodes d'accalmie d'assez longue durée. Durant ces périodes d'accalmie, l'érosion et l'altération se manifestent à nouveau. Les laves se développent sur une paléo-morphologie très irrégulière marquée par la présence de profondes ravines. Il en découle des variations latérales de faciès importantes et parfois brutales. Le pendage des coulées est de 0 à 20° vers l'océan, localement il atteint 40° à proximité de la falaise littorale.

Du point de vue hydrogéologique, il convient de noter l'existence d'une nappe perchée pérenne dans la base de l'unité supérieure, due à la faible perméabilité de l'unité Inférieure qui fonctionne comme un mur imperméable. Dans cette unité supérieure existent également quelques nappes perchées temporaires. Les caractéristiques des laves et des scories ne sont pas significativement différentes de celles des terrains de l' Unité Inférieure.

Au bilan, les conditions de creusement résultant de cette description sont un peu moins favorables que celles régnant dans l'Unité Inférieure, parce que les matériaux sont plus hétérogènes avec des variations latérales de faciès importantes et parfois brutales, parce qu'il peut être rencontré des venues d'eau significatives, et parce que l'altération peut y être plus forte. Cependant ces difficultés ne sont pas de nature à remettre en cause la faisabilité et ce d'autant plus que les longueurs concernées ne représentent qu'une faible part du linéaire total.

- c) Les laves de la Phase IV de l'activité volcanique du Piton des Neiges, présentes aux extrémités NE (Saint Denis) et SO (La Possession) du projet ne devraient pas induire de difficultés autres que celles liées au terrassement des fronts d'attaque et des entrées en terre.
- d) Enfin le mémoire géologique décrit un certain nombre de fronts de taille susceptibles d'être rencontrés lors du creusement. Ces fronts sont très variables du point de vue de la lithologie et du comportement mécanique attendu. Il est cependant probable qu'une méthode mécanisée avec un tunnelier bien adapté (roue de coupe largement ouverte, outils comprenant des molettes roches dures et des couteaux ) sera beaucoup moins sensible à ces hétérogénéités que le serait une méthode conventionnelle (hors profils, instabilités localisées du front). En effet, la variabilité des fronts nécessiterait très probablement des adaptations au coup par coup du plan de tir, de la longueur de la volée et du soutènement à mettre en oeuvre ; ces efforts d'adaptation ayant une forte incidence sur les cadences et l'avancement du creusement.

En conclusion, l'étude géologique ne révèle aucune impossibilité vis à vis de la faisabilité des tunnels, leur réalisation en section courante devant même être relativement aisée, et ce d'autant plus que l'on aura recours à une méthode mécanisée.

## I – 2 –Au niveau des têtes de tunnels :

Nous considérons que la problématique de la faisabilité au droit des têtes de tunnels revêt un double aspect :

- d'une part il convient de s'assurer de la faisabilité des terrassements, confortements et soutènements nécessaires pour réaliser les entrées en terre de tunnels et assurer la stabilité tant extérieure (au droit du front d'attaque et des talus latéraux) qu'interne (à l'intérieur de l'excavation) ;

- d'autre part il convient de s'assurer que les emprises et les accès nécessaires à l'organisation et la logistique des chantiers seront disponibles et sécurisés pendant toute la durée du chantier.

En ce qui concerne le premier point, les études géologiques ont mis en évidence des conditions de réalisation parfois difficiles mais pour lesquelles il existe des solutions plus ou moins courantes en travaux souterrains. Les terrassements pourraient ainsi être optimisés (réduits) moyennant des entrées en terre plus précoce (sous une couverture de terrain plus faible), des fronts biais et la mise en sécurité des entrées sous des voûtes parapluies par exemple. Cette optimisation n'est cependant possible que si les emprises disponibles sont suffisantes vastes pour autoriser ces adaptations sans impliquer des terrassements importants au droit des tranchées d'accès. Les confortements et soutènements évoqués dans le dossier n'appellent pas de remarque. Les études de stabilité devront néanmoins prendre en compte le long terme et garantir la sécurité de l'exploitation vis à vis de la chute de blocs.

En ce qui concerne le second point, disponibilité et sécurisation des accès pendant toute la durée du chantier, il est évident que la problématique dépend de l'organisation prévue par le constructeur et que les problèmes seront très différents selon le site de tête considéré et les options constructives retenues. Si d'ores et déjà peuvent être évoqués certains risques liés à la période cyclonique comme la fermeture de la route du littoral ou un éboulement majeur qui couperait une piste d'accès par exemple, il conviendra d'approfondir avec les candidats leur propre analyse des risques vis à vis de ces aspects d'emprises et de logistique (un chantier de tunnelier privé de son approvisionnement en voussoirs peut perdre 15 à 20 mètres d'avancement par jour).

## II – Sécurité et Ventilation

### II – 1 – Sécurité

Le dossier présente un projet dont la conception prend en compte les deux réglementations relatives l'une au transport ferroviaire, l'autre au transport guidé ; les préconisations retenues vont donc pour de nombreux aspects bien au-delà des exigences de l' Instruction technique interministérielle (ITI) relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires.

Les dispositions prévoyant la construction d'un ouvrage bi-tube, la réalisation d'une plate forme roulable pour l'accès des véhicules de secours et le principe d'interdire toute circulation simultanée d'un train de voyageurs avec un train de fret garantissent un niveau de sécurité élevé.

Cependant quelques points nécessitent d'être soit précisés soit améliorés :

- Pour dimensionner l'alimentation en eau<sup>1</sup>, il a été décidé de considérer ces ouvrages comme des tunnels de *rase campagne* (et non pas *péri-urbains*<sup>2</sup>), alors que l'on considère par ailleurs<sup>3</sup> que cette ligne a un statut hybride entre un *transport public guidé urbain* et une *liaison ferroviaire*. Si l'on considère que ce tunnel est urbain ou au moins péri-urbain, alors le respect de la réglementation sur les transports guidés conduit à doubler les points d'alimentation en eau (tous les 100 mètres, au lieu de 200 mètres) et à introduire un cantonnement de 800 mètres.
- La partie « réseaux de communications services de secours » ne semble pas tenir compte du décret 2006-165 relatif aux communications radioélectriques des services de secours (notamment sur la question de la continuité des communications en tout point de l'infrastructure).
- Il est précisé qu'un exercice d'évacuation des voyageurs aura lieu une fois par an pour chaque tunnel<sup>4</sup>. Bien que la fréquence choisie semble être satisfaisante (cette fréquence est retenue dans la

1 p. 19 et 20 du document n°19514

2 Définition d'une ligne urbaine au sens de l' ITI : Implantée en milieu urbain ou péri-urbain et dédiées au transport des voyageurs (et éventuellement au transport de marchandises en dehors des plages horaires réservées aux voyageurs), il s'agit des lignes communément appelées lignes de banlieue, métro, réseau express régional... et sur lesquelles le trafic et le nombre de voyageurs transportés sont notamment supérieurs aux lignes mixtes ou à voyageurs en raison des migrations journalières de population.

3 p. 29 du document n°19514

4 p. 21 du document n°19514

réglementation applicable aux tunnels routiers), réaliser tous les ans le même exercice possède l'inconvénient de limiter la diversité des événements simulés.

## II – 2– Ventilation

Globalement l'étude présentée est, à ce stade préliminaire, correcte sur le plan de la ventilation et du désenfumage parce que proposant des dispositions allant plutôt dans le sens sécuritaire.

Le principe de ventilation de désenfumage longitudinale sur plusieurs kilomètres apparaît acceptable mais un certain nombre de points devront être complétés ou/et approfondis ultérieurement. Ainsi :

- la justification de la ventilation longitudinale appelle une argumentation associée au mode d'exploitation : nombre de voitures (et de passagers) dans le tunnel, possibilité de rebrousser chemin, etc...;
- le dossier (pièce 3.1) donnant des hypothèses de calcul et des données aérodynamiques et géométriques identiques pour les trams et pour les trains, il conviendra de préciser par la suite les différences à introduire si deux types de véhicules sont mis en exploitation ;
- l'ordre de grandeur des contre-pressions retenu pour le calcul apparaît correct en dépit de variations importantes entre les deux roses des vents ;
- le respect des conditions de non retour des fumées à 1,5 m/s dans le sens du trafic du tram est bien adapté mais le dossier ne traite pas du trafic fret ; la même valeur de 1,5 m/s pourrait suffire à satisfaire l' Instruction Technique ;
- les résultats des calculs de poussées nécessaires selon le type d'incendie de 30 MW ou de 130 MW ne figurent pas dans le dossier ;
- la non maîtrise des fumées dans le sens descendant pour le cas du fret exige un examen particulier ;
- le nombre et la répartition des accélérateurs sera à préciser ;
- l'insertion d'un accélérateur en partie basse et latéralement au tram apparaissant très contraignante, il conviendrait de s'assurer du retour d'expérience de ce type d'aménagement.

## II – 3– Estimation des Équipements

Le coût global de ces équipements (hors équipements ferroviaires), d'approximativement 4750 €/m, apparaît conforme aux ratios usuellement appliqués en tunnels routiers (10 à 15 %), bien qu'ils ne s'agissent pas exactement des mêmes équipements.

## III – Plannings – « Pièce 3.1, Tunnels : Principes communs, Partie IV»

Le dossier présente 4 plannings selon les quatre solutions suivantes :

- mise en oeuvre de six tunneliers, un par tube
- mise en oeuvre de 12 attaques ( 4 x 3 tunnels) en méthode conventionnelle
- mise en oeuvre de 3 tunneliers : deux creusant les tunnels Ouest et Central ( l'un les tubes sud, l'autre les tubes nord) et un troisième creusant les deux tubes du tunnel Est
- mise en oeuvre de 2 tunneliers creusant les tunnels Ouest et Central ( l'un les tubes sud, l'autre les tubes nord) et de 4 attaques en méthode conventionnelle pour les deux tubes du tunnel Est.

### III – 1 – Analyse des plannings correspondant aux trois solutions comportant 6, 3 ou 2 tunneliers

Les hypothèses retenues dans le dossier d'APS, apparaissent excessivement prudentes pour les méthodes au tunnelier. En effet :

- un délai de 17 mois apparaît très élevé pour la conception, la commande, la fabrication et la livraison d'un tunnelier de diamètre modéré (7 mètres environ) et de conception relativement simple (bouclier mécanisé ouvert à appui longitudinal). Rappelons à titre indicatif, que ce délai fut de 12 mois pour le tunnel du Mont Sion (concession A 41) au diamètre plus grand ;

- les cadences moyennes de creusement (intégrant la période de mise en cadence) sont de l'ordre de 11,50 à 12 m/jour (4 800 m en 16 mois et 4100 m en 13 mois), ce qui, au vu de la géologie attendue, se révèle très faible. La cadence en vitesse de croisière semble être prévue à 17 m/jour – cf. chapitre 3, pièces 3.2, 3.3 et 3.4 ce qui est sans doute là aussi un peu faible.

Une approche plus volontariste pourrait proposer les hypothèses suivantes :

- délai de commande/fabrication/livraison ramené à 14 mois (- 3 mois) ;
- vitesse moyenne de mise en cadence prise égale à 9,30 m/jour sur 4 mois
- cadence moyenne en vitesse de croisière de 14 m/jour sur le premier tunnel,
- vitesse moyenne de mise en cadence sur le deuxième tunnel (mise en oeuvre de 2 ou 3 tunneliers) de 13 m / jour sur 2 mois ;
- et enfin cadence moyenne en vitesse de croisière sur le deuxième tunnel de 17,50 m par jour.

Sur ces nouvelles bases, il est possible de recalculer les délais de réalisation – cf Annexe 1 – pour chacune des trois solutions avec tunneliers, sachant que pour 2 ou 3 tunneliers, le délai de réalisation est le même.

De plus nous avons examiné la variante consistant à réaliser chaque tunnel (les deux tubes) avec un seul et même tunnelier.

#### **a) Hypothèse « 6 Tunneliers » – cf Annexe 1, Tableau n° 1 –**

L'hypothèse des six tunneliers nous apparaît tout à fait irréaliste pour les raisons suivantes :

- la fabrication de six tunneliers de manière concomitante présente des risques vis à vis des délais ;
- l'amortissement des six tunneliers sur des distances aussi faibles est très difficile;
- des distances aussi courtes ne permettent pas d'atteindre une cadence optimale justifiant le choix d'une méthode mécanisée ;
- le fait de lancer les six tunneliers de manière quasi instantanée ne permet pas de profiter de l'expérience acquise ;
- le délai de transfert d'un tunnelier d'un tube à un autre reste très faible par rapport à la durée totale du chantier de construction.

Néanmoins nous avons estimé le délai maximal de réalisation (correspondant au Tunnel Ouest, le plus long). Ce délai serait de 47 mois au lieu de 52 annoncé dans l' APS, soit une réduction de 5 mois.

#### **b) Hypothèse « 3 Tunneliers » – cf Annexe 1, Tableau n° 2 –**

Le délai maximal est donné par le creusement des tunnels Ouest et Central. Ce délai est de 53 à 54 mois au lieu de 63 mois annoncé dans l' APS.

#### **c) Hypothèse « 3 Tunneliers, chacun creusant les deux tubes d'un même tunnel » – cf Annexe 1, Tableaux n° 3 et 4 –**

Sous réserve de vérifier les disponibilités d'emprises et d'accès pour les amenées et replis des tunneliers, pour les installations, pour l'évacuation des déblais et pour l'approvisionnement en voussoirs, cette solution présente deux intérêts majeurs :

- elle permet de réaliser en temps masqué les rameaux de communication entre tubes, soit un gain de six mois ;
- elle permet, lors du creusement du deuxième tube, de profiter pleinement de l'expérience du premier (l'expérience révèle des cadences d'avancement considérablement plus élevées pour les seconds tubes que pour les premiers).

Le délai maximal est toujours donné par le creusement des tunnels Ouest (le plus long : 4 600 m). Ce délai est de 53 mois montrant ainsi que, sur la base de ce rapide calcul, il n'y pas d'intérêt évident à retenir cette solution.

Remarquons aussi que le délai pour réaliser le Tunnel Est est de 52 mois alors que sa longueur n'est que de 3 800 mètres. Cet important délai résulte des contraintes de site (exiguïté et construction d'un viaduc) rendant plus difficiles le montage du tunnelier et le démarrage du creusement.

Il apparaît ainsi :

- que d'une part , les délais calculés par le CETU sont assez sensiblement plus réduits que ceux présentés dans l' APS;
- et que, d'autre part, en dehors de la solution consistant en la mise en oeuvre de 6 tunneliers, le délai de réalisation est d'environ 53 mois à 1 ou 2 mois près et cela quelle que soit la méthode d'exécution (voir ci-après) ;
- que la solution « 6 tunneliers » permettrait un délai plus court (47 mois) mais à un coût certainement beaucoup plus élevé et une fiabilité plus faible (risque organisationnel dans la fabrication, la livraison et la mobilisation des équipes de pilotage sur site).

### **III – 2 – Analyse du planning correspondant à la méthode conventionnelle :**

Les hypothèses apparaissent en revanche optimistes pour une réalisation en méthode conventionnelle. Ainsi :

- la durée de creusement/soutènement est de 17 mois pour un tunnel de 3 800 mètres de longueur suivant deux attaques (par tube) dont une descendante, soit une cadence moyenne par attaque de 4,30 mètres par jour. Notre estimation établie sur la base de longueurs de pas d'avancement de respectivement 3,00 m, 2,50 m, 1,50 m et 1,00 m pour les profils P1 à P4, sur l'hypothèse de trois postes (1 j) pour réaliser deux pas d'avancement et de 78 postes par mois (26 j \* 3) et avec l'hypothèse d'une réduction de vitesse pour l'attaque descendante dans un rapport de 110/125, conduit à une cadence moyenne de 3,85 m/jour, soit un délai supplémentaire de 2 mois;
- le délai de creusement/soutènement n'individualise pas la réalisation des rameaux entre tubes, ceux-ci étant censés être réalisés en temps masqué. La faisabilité de cette réalisation en temps masqué ne nous semble pas avérée compte tenu de l'exiguïté de l'excavation en raison notamment du volume occupé par le(s) conduit(s) de ventilation, et des contraintes liées à l'explosif pour la conduite de plusieurs ateliers d'excavation à partir d'une seule et même galerie. Il serait sans doute prudent de prévoir un allongement du délai global pour la réalisation de ces rameaux ;
- l'enchaînement des opérations de banquettes, étanchéité, revêtement, radier et quais, séparées les unes des autres par un délai de 1 mois apparaît très complexe et risqué dans la mesure où sa réussite implique un très haut niveau de programmation, de respect de l'organisation générale et du planning, et où cette réussite est susceptible d'être remise en question par tout incident même léger venant perturber le bon déroulement. Par ailleurs la coexistence de ces 5 ateliers pendant plusieurs mois implique une logistique qui sera difficile à assurer dans une section aussi réduite. Pour ces raisons il nous semblerait prudent de majorer le délai global de quelques mois pour en garantir le respect;

Ces observations nous amènent à proposer une majoration sensible du délai d'exécution en méthode traditionnelle, de l'ordre de 6 à 9 mois, portant ainsi de délai global à 51 ou 54 mois.

L'annexe 1 – Tableau n° 5 – donne, pour le Tunnel Ouest une étude détaillée de ce délai d'exécution que nous estimons à 53 mois au lieu de 45 mois à l' APS

### **IV – Estimation – « Pièce 3.1, Tunnels : Principes communs, Partie V »**

Les estimations sont établies sur la base de l'estimation effectuée précédemment pour le seul tunnel Est. Cette estimation comporte deux volets correspondant l'un à une méthode mécanisée avec deux tunneliers, l'autre à une méthode conventionnelle moyennant quatre attaques.

#### **IV – 1 – Excavation mécanisée**

L'estimation présentée analysée sur la base de prix métropole appelle les commentaires suivants :

- l'estimation du coût d'un tunnelier 12 M€ pour la fourniture, l'aménée et le montage apparaît très faible ( - 40 à 50 %)
- l'estimation du coût du creusement au mètre apparaît faible (- 25%) notamment pour une cadence moyenne de 300 mètres/mois telle que celle retenue comme cadence moyenne pour les plannings,

- l'estimation du coût des voussoirs apparaît forte (+ 21 %) mais intègre sans doute l'effet de l'insularité,
- le coût au mètre globalisé comprenant le creusement, le tunnelier, les voussoirs, le mortier de remplissage et le béton de remplissage est équivalent à celui que nous obtenons sur la base des hypothèses suivantes : prix métropole, un seul tunnelier, une cadence de 350 mètres/mois et un travail de 6 j / 7,
- nous supposons que la provision pour aléas est comprise dans la fourchette d'incertitude entre – 12 % et + 25 %,

En conclusion nous estimons que l'estimation globale présentée est faible pour une cadence de 300 m/mois mais qu'elle est très proche de notre estimation basée sur des prix métropole et sur une cadence plus élevée de 400 mètres/mois qui nous semble beaucoup plus probable, mais ne prend que très faiblement en compte l'effet de l'insularité sur les prix unitaires.

Une dernière remarque sur la présentation des incertitudes, il n'est pas possible de justifier une incertitude de 20 % sur la quantité des voussoirs ni de 10 % sur le remplissage sous voie parce que ces quantités sont déterminées par la géométrie même du tunnelier et invariables par définition.

*Enfin, comme déjà signalé dans le paragraphe traitant des plannings, l'hypothèse des six tunneliers nous apparaît tout à fait irréaliste pour les raisons évoquées ci-avant. Cependant, à la demande de M. Dominique HURBIN, Région Réunion- Direction Tram Train, nous avons estimé le sur-coût engendré par la mise en oeuvre de six tunneliers par rapport à une solution à 2 ou 3 tunneliers. Cette analyse détermine, pour la solution à 6 tunneliers, un sur-coût de 51 M€ selon les hypothèses de l' APS (cadences et coût unitaire du tunnelier) et de 55 M€ selon les hypothèses CETU (cadences et coût unitaire du tunnelier) .*

## IV – 2 – Méthode conventionnelle

L'estimation présentée analysée sur la base de prix métropole appelle les commentaires suivants :

- l'estimation du coût de creusement-soutènement des 4 profils types P1 à P4 apparaissent très faibles à l'exception du profil P4 qui lui apparaît plutôt sur-estimé;
- l'estimation du revêtement est tout à fait cohérente avec celle que nous déterminons (toujours selon les prix métropole);
- nous supposons que la provision pour aléas est comprise dans la fourchette d'incertitude entre – 12 % et + 25 %.

L'estimation globale du creusement-soutènement-revêtement apparaît sous-estimée de l'ordre de 10 à 15 % par rapport à une estimation métropole et en conséquence le montant réel serait très voisin du terme supérieur de la fourchette d'incertitude et ce, rappelons-le, sans prise en compte des éventuelles particularités liées à l'insularité.

## V – Risques

### V– 1 - Aléas

Les aléas géologiques, hydrogéologiques et géotechniques apparaissent limités dans la mesure où :

- les unités géologiques sont assez bien connues « en grand » et qu'un accident géologique majeur est tout à fait improbable ;
- les incertitudes d'ordre géologique portent sur la localisation exacte des contacts, des variations de faciès, sur la localisation exacte et la densité d'occurrence des dykes et des failles mais, pour aucun de ces événements, il est redouté de conditions d'exécution exceptionnelles susceptibles d'obérer lourdement les travaux ;
- les incertitudes d'ordre hydrogéologique portent pour une part sur la localisation et l'intensité de venues d'eau à la faveur soit de nappes perchées, soit de rencontres de paléo-vallées aquifères et, pour une autre part, sur les arrivées d'eau liées à la rencontre de la nappe de l'Unité Supérieure, mais

- dans un cas comme dans l'autre, les difficultés qui en résulteront ne devraient jamais présenter de caractère critique comme ce fut le cas pour le transfert d'eau de Salazie ;
- les incertitudes d'ordre géotechnique concernent essentiellement le comportement mécanique des matériaux pulvérulents ou très faiblement consolidés présents dans les niveaux de scories et de paléosols, et plus particulièrement la stabilité tant du front que de la paroi de l'excavation. Le cas échéant, les dispositions constructives de soutènement devront être adaptées à ces conditions de stabilité, sachant que ce sera beaucoup plus facile pour le tunnelier (correction de la poussée et de la vitesse de rotation) que pour la méthode conventionnelle. Dans les deux cas ces dispositions s'inscrivent dans la pratique courante des travaux souterrains et n'impliquent pas de sur-coûts exorbitants.

En conclusion, les études géologiques n'ont pas mis en évidence de risque de rencontrer des événements susceptibles de nécessiter des adaptations et/ou des modifications de méthodes extrêmement lourdes et susceptibles de générer des sur-coûts dont les montants pourraient remettre en question l'équilibre financier de l'opération.

## V– 2 – Risques liés à l'organisation et la logistique

Les risques se situent plutôt au niveau de l'organisation et de la logistique, étant donné que les emprises nécessaires aux installations de chantier ainsi que les accès aux zones de travaux appartiennent pour partie à des zones très fortement exposées aux risques naturels étroitement associés aux conditions météorologiques.

Aussi conviendra-t-il lors du dialogue compétitif avec les candidats d'accorder une attention toute particulière aux dispositions envisagées vis à vis notamment des installations, des accès et de leur sécurisation. A priori ces aspects concernent plus particulièrement les têtes de tunnels implantées dans la Ravine Grande Chaloupe, sur le Plateau Couilloux et dans la Grande Ravine, mais les deux autres zones de tête (La Possession et Rivière Saint Denis) sont également exposées aux risques cycloniques et aux fermetures de la route du littoral.

Cette analyse des risques est bien évidemment très fortement dépendante des choix organisationnels effectués par les candidats et pourra être sensiblement différente selon le candidat.

*Le directeur,*

*signé*  
Michel Deffayet

Copie à : - M. ROBERT, chargé de mission  
 - Service d'ordre  
 - Secrétariat Chargé de Mission

**Note d'observations sur l'APS – Projet de Train Tram – La Réunion - ANNEXE 1 -**

Tableau n° 1

TRAM-TRAIN DELAIS	Base APS en mois	Cumulé APS	Base CETU en mois		Cumulé CETU
<b>HYPOTHESE 6 TUNNELIERS Tunnel OUEST</b>					
Le délai maximal est celui de la construction du tunnel Ouest le plus long : 4 600 mètres	En mois		En mois		En mois
<b>Conception, commande, fabrication, livraison, montage</b>	17		17	14	
Installation de chantier – La Possession	14		17	14	
Terrassement et soutènement Plate forme – La Possession	10		17	10	
Chambre d'attaque des tunneliers – La Possession	3		17	3	
<b>Mise en cadence Tunnelier Tunnel Ouest – Tube 1</b>	4	873,6	21	4	967,2
Mise en cadence Tunnelier Tunnel Ouest – Tube 2	4			4	
<b>Creusement Tunnel Ouest – Tube 1</b>	12	11,94	33	10	9,98
<b>Creusement Rameaux Tunnel Ouest</b>	6		39		6
<b>Quais et radiers</b>	7		46		7
<b>Equipements</b>	6		52		6
Faux tunnels et aménagement des têtes	6		52		6
					47

Tableau n° 2

TRAM-TRAIN DELAIS	Base APS en mois	Cumulé APS	Base CETU en mois		Cumulé CETU
<b>HYPOTHESE 3 TUNNELIERS (Dossier) Tunnel OUEST et Tunnel CENTRAL</b>					
<b>Conception, commande, fabrication, livraison, montage</b>	17		17	14	
Installation de chantier – La Possession	14		17	14	
Terrassement et soutènement Plate forme – La Possession	10		17	10	
Chambre d'attaque des tunneliers – La Possession	3		17	3	
<b>Mise en cadence Tunnelier Tunnel Ouest – Tube 1</b>	4	873,6	21	4	967,2
Mise en cadence Tunnelier Tunnel Ouest – Tube 2	4				
<b>Creusement Tunnel Ouest – Tube 1</b>	12	11,94	33	10	9,98
<b>Transfert Tunnelier – Tube 1</b>	1		34	1	
<b>Mise en cadence Tunnelier Tunnel Central – Tube 1</b>	2	504,4	36	2	676
<b>Creusement Tunnel Central – Tube 1</b>	11	10,98	47	7,5	7,53
<b>Creusement Rameaux Tunnel Ouest</b>	6				
<b>Creusement Rameaux Tunnel Central</b>	5		52	5	
<b>Quais et radiers</b>	6		58	5	
<b>Equipements</b>	5		63	5	
Faux tunnels et aménagement des têtes	6		63	6	
					53,5

Tableau n° 3

TRAM-TRAIN DELAIS	Base APS en mois	Cumulé APS	Base CETU en mois		Cumulé CETU
<b>HYPOTHESE 2 ou 3 TUNNELIERS, chacun creusant les deux tubes d'un seul tunnel : Tunnel OUEST</b>					
<b>Conception, commande, fabrication, livraison, montage</b>			14		14
Installation de chantier – La Possession			14		
Terrassement et soutènement Plate forme – La Possession			10		
Chambre d'attaque des tunneliers – La Possession			3		14,0
<b>Mise en cadence Tunnelier Tunnel Ouest – Tube 1</b>			4	967,2	18,0
<b>Creusement Tunnel Ouest – Tube 1</b>			10	9,98	28,0
<b>Transfert Tunnelier – Tube 1</b>			2		30,0
<b>Mise en cadence Tunnelier Tunnel Ouest – Tube 2</b>			2	676	32,0
<b>Creusement Tunnel Ouest – Tube 2</b>			7,9	7,94	39,9
<b>Creusement Rameaux Tunnel Ouest</b>			6	4 + 2	41,9
<b>Quais et radiers</b>			6		47,9
<b>Equipements</b>			5		52,9
Faux tunnels et aménagement des têtes			6		52,9

Tableau n° 4

TRAM-TRAIN DELAIS	Base APS en mois	Cumulé APS	Base CETU en mois		Cumulé CETU
<b>HYPOTHESE 3 TUNNELIERS, chacun creusant les deux tubes d'un seul tunnel : Tunnel EST</b>					
<b>Conception, commande, fabrication, livraison, montage</b>			14		14
Installation de chantier – SAINT DENIS			14		
Terrassement et soutènement Plate forme – SAINT DENIS			10		
Chambre d'attaque des tunneliers – SAINT DENIS			3		14,0
Creusement en méthode conventionnelle			2	200,2	16,0
<b>Mise en cadence Tunnelier Tunnel Est – Tube 1</b>			4	936	20,0
<b>Creusement Tunnel Est – Tube 1</b>			7	7,32	27,3
<b>Transfert Tunnelier – Tube 1</b>			3		30,3
<b>Mise en cadence Tunnelier Tunnel Est – Tube 2</b>			2	624	32,3
<b>Creusement Tunnel Est – Tube 2</b>			6,4	6,4	38,7
<b>Creusement Rameaux Tunnel Est</b>			6	4 + 2	40,7
<b>Quais et radiers</b>			6		46,7
<b>Equipements</b>			5		51,7
Faux tunnels et aménagement des têtes			5		51,7

Tableau n° 5

TRAM-TRAIN DELAIS	Base APS en mois		Cumulé APS	Base CETU en mois		Cumulé CETU
<b>HYPOTHESE Creusement du Tunnel Est en méthode conventionnelle</b>						
<b>Installation de chantier –Terrassement des têtes</b>	9		9	9		9
<b>Creusement en méthode conventionnelle</b>	17		26	19	19,0	28
<b>Creusement Rameaux Tunnel Est</b>	0		26	6		30
<b>Déséquipement</b>	1		27	1		31
<b>Banquettes</b>	10		37	10		41
<b>Etanchéité</b>	10		38	10		43
<b>Revêtement</b>	10		39	10		45
<b>Quais</b>	10		40	6		47
<b>Radier</b>	10		41			49
<b>Equipements</b>	4		45	4		53
Faux tunnels et aménagement des têtes	4		45	4		53



**conseil général  
des Ponts  
et Chaussées**

Secrétariat général  
Bureau  
Rapports  
et Documentation  
TOUR PASCAL B  
92055 LA DÉFENSE CEDEX  
Tél. : 01 40 81 68 12/ 45