

Etudes complémentaires suite au débat public

# Rapports

nice gènes toulon lyon marseille barcelone paris aix-en-provence turin londres bordeaux bruxelles



lille nice madrid montpellier cannes strasbourg amsterdam frejus toulon st-rafael Antibes marseille monaco



Juillet 2008

Expertise sur la conception et l'estimation  
des tunnels de la LGV PACA  
dans le cadre de la STI  
« Sécurité dans les tunnels ferroviaires »





Mission LGV PACA



# LGV PACA

## Etudes complémentaires suite au Débat Public

### Mission d'expertise sur la conception des tunnels dans le cadre de la STI « Sécurité dans les tunnels ferroviaires »



#### Mémoire de synthèse

| Dif. | Rev. | Date       | Auteur               | Vérificateur         | Approbateur | Modification  |
|------|------|------------|----------------------|----------------------|-------------|---|
|      | B    | 11/07/2008 | L. Bérend            | J. Bernard           | J. Bernard  | Prise en compte des observations de RFF du 09/07/2008 |
| 1    | A    | 13/06/2006 | M. Lévy<br>L. Bérend | L. Bérend<br>M. Lévy | J. Bernard  | Première émission                                     |

## SOMMAIRE

|     |   |   |     |   |    |
|-----|---|---|-----|---|----|
| 1.  | INTRODUCTION .....  | 3 | 5.  | MODALITES D'ESTIMATION DU COÛT DES TUNNELS DE LA LGV PACA.....  | 9  |
| 2.  | INFLUENCE DE LA STI SUR DES PROJETS DE TUNNELS DIMENSIONNES SELON L'ITI 98-300 .....                              | 3 | 5.1 | GENERALITES.....  | 9  |
| 2.1 | PREAMBULE.....  | 3 | 5.2 | ESTIMATION DES MONTANTS BRUTS DE TRAVAUX D'UN MONOTUBE .....  | 9  |
| 2.2 | REGLES STI INFLUANT SUR LES COUTS DU GENIE CIVIL DES TUNNELS .....  | 3 | 5.3 | ESTIMATION DES MONTANTS BRUTS DE TRAVAUX D'UN BI-TUBE .....   | 12 |
| 2.3 | REGLES STI AYANT UNE INFLUENCE SUR LE COUT DES EQUIPEMENTS NON FERROVIAIRES                                       | 4 | 5.4 | ESTIMATION DES GARES SOUTERRAINES .....   | 13 |
| 3.  | PRINCIPES DE CONCEPTION DU GÉNIE CIVIL DES TUNNELS DE LA LGV PACA LORSQU'ON APPLIQUE LA STI ET L'ITI 98-300 ..... | 5 | 5.5 | TUNNELS DE MARSEILLE (ST-CHARLES ET BLANCARDE).....   | 14 |
| 3.1 | LONGUEUR INFERIEURE A 400 M .....   | 5 | 5.6 | ESTIMATION DU TUNNEL PRINCIPAL DE LA SECTION ELEMENTAIRE VARIANTE « ESTEREL-GARE NOUVELLE SOUTERRAINE EN LIGNE EN CORRESPONDANCE AVEC LA GARE DE CANNES CENTRE ACTUELLE » ..... | 15 |
| 3.2 | LONGUEUR COMPRISE ENTRE 400 M ET 800 M .....  | 5 | 6.  | ESTIMATIONS DES DIFFÉRENTS TUNNELS .....  | 16 |
| 3.3 | LONGUEUR COMPRISE ENTRE 800 M ET 1 000 M.....   | 5 | 6.1 | RESULTATS DETAILLES PAR SCENARIOS .....   | 16 |
| 3.4 | LONGUEUR COMPRISE ENTRE 1 KM ET 10 KM EN MONOTUBE.....  | 5 | 6.2 | GRAPHIQUES SITUANT LE COUT PROBABLE DANS LA FOURCHETTE [GEOLOGIE NORMALE – GEOLOGIE MAUVAISE] .....   | 18 |
| 3.5 | LONGUEUR COMPRISE ENTRE 1 ET 10 KM EN BI-TUBE.....  | 5 | 7.  | NOTES PARTICULIERES .....   | 19 |
| 3.6 | LONGUEUR DE 10 A 20 KM .....  | 5 | 7.1 | SYNTHESE DES RATIOS UTILISES POUR LES ESTIMATIONS .....   | 19 |
| 3.7 | LONGUEUR SUPERIEURE A 20 KM.....  | 5 | 7.2 | COUT D'UNE GALERIE D'EVACUATION ET DE SES ACCES DE LONGUEUR INFERIEURE A 500 M .....  | 20 |
| 3.8 | OUVRAGES D'EVACUATION ET D'ACCES DES SECOURS DANS LE CAS D'UN MONOTUBE....  | 6 | 7.3 | COUT D'UNE GALERIE D'EVACUATION DE LONGUEUR SUPERIEURE A 500 M AVEC SES ACCES .....   | 21 |
| 4.  | APPLICATION DES PRINCIPES DE CONCEPTION DU GÉNIE CIVIL AUX TUNNELS RENCONTRES SUR LA LGV PACA .....               | 7 | 7.4 | PUITS VERTICAL DE SECOURS ET D'EVACUATION .....   | 21 |
| 4.1 | LONGUEUR INFERIEURE A 1 000 M.....  | 7 | 7.5 | PUITS VERTICAL DE SECOURS ET D'EVACUATION DE PLUS DE 30 M DE HAUTEUR .....  | 22 |
| 4.2 | LONGUEUR DE 1 000 M A 2 000 M .....   | 7 | 7.6 | PRINCIPES DE VENTILATION.....   | 23 |
| 4.3 | LONGUEUR DE 2 KM A 5 KM.....  | 7 |     |   |    |
| 4.4 | LONGUEUR DE 5 KM A 20 KM.....   | 8 |     |   |    |
| 4.5 | LONGUEUR DE PLUS DE 20 KM .....   | 8 |     |   |    |

## 1. INTRODUCTION

Dans le cadre des études complémentaires de la LGV PACA qui font suite au Débat Public, la Direction Régionale Provence-Alpes-Côte-d'Azur de RFF a confié à Setec TPI une mission d'expertise portant sur la conception des tunnels de cette LGV dans le cadre de la prise en compte de la Spécification Technique d'Interopérabilité (STI) « Sécurité dans les tunnels ferroviaires ».

Les objectifs impartis à cette mission sont les suivants :

- présentation de l'évolution réglementaire entre l'ITI 98-300 et la STI et de l'influence de la STI sur des projets de tunnels dimensionnés selon l'ITI 98-300,
- justification des principes de conception du génie civil des tunnels de la LGV PACA lorsqu'on applique l'ITI 98-300 et la STI. Cette étude porte notamment sur la conception et le dimensionnement des différentes solutions envisageables pour les ouvrages d'évacuation et d'accès des secours dans le cas d'un tunnel monotube,
- application des principes de conception de génie civil aux tunnels envisagés dans l'ensemble des itinéraires en cours d'étude par RFF,
- estimation, pour les tunnels déjà cités, du coût de construction de ces tunnels en distinguant les ouvrages de génie civil (avec, pour les ouvrages souterrains, des hypothèses de terrain «normal», «difficile» ou considéré comme probable sur la base d'études antérieures) et les équipements de sécurité.

## 2. INFLUENCE DE LA STI SUR DES PROJETS DE TUNNELS DIMENSIONNES SELON L'ITI 98-300

### 2.1 PREAMBULE

Pour mémoire :

- le texte régissant la conception des tunnels jusqu'à ce jour et depuis le 8 juillet 1998 (date de la parution de l'instruction) était l'Instruction Technique Interministérielle n°98-300, dénommé ci-après « ITI » ;
- la Spécification Technique d'Interopérabilité « Sécurité dans les tunnels ferroviaires » du système ferroviaire transeuropéen conventionnel et à grande vitesse sera de plus applicable à partir du 1er juillet 2008 suite à la décision de la Commission du 20 décembre 2007.

Lorsque tous les textes d'application seront parus, la STI devra être appliquée à tous les tunnels neufs. L'ITI 98-300 ne sera pas pour autant annulée et devra être appliquée lorsque ses dispositions sont plus sévères que celles de la STI.

Nous résumons ci-après les règles de la Spécification Technique d'Interopérabilité « Sécurité dans les tunnels ferroviaires » qui ont une influence significative sur le coût des tunnels accueillant les trains de voyageurs seulement, dans le domaine du génie civil et des équipements non ferroviaires. Les règles correspondantes de l'ITI (ou l'absence d'exigence) sont rappelées pour mémoire.

A noter que, dans notre cas, ce sont les articles relatifs aux lignes à voyageurs (et non urbaines ou mixtes) qui s'appliquent.

### 2.2 REGLES STI INFLUANT SUR LES COÛTS DU GENIE CIVIL DES TUNNELS

#### 2.2.1 Règle 1.1.2 - Longueur des tunnels

La STI s'applique aux tunnels de longueur comprise entre 1 km et 20 km. Les tunnels de plus de 20 km nécessitent une étude particulière (l'ITI s'applique entre 0,4 km et 10 km ; si  $l > 10$  km, étude particulière).

#### 2.2.2 Règle 1.1.2 - Longueur considérée pour 2 tunnels consécutifs

Selon la STI, ils sont considérés comme 2 tunnels si les deux conditions suivantes sont satisfaites :

- les 2 tunnels sont séparés par une section à l'air libre de plus de 0,5 km,
- un dispositif d'accès et de sortie vers un lieu sûr (safe area) dans la section à l'air libre est prévu.

Si l'une, au moins, de ces 2 conditions n'est pas satisfaite, les deux tunnels sont considérés comme un seul tunnel (l'ITI ne dit rien sur ce sujet).

#### 2.2.3 Règle 1.1.4 - Gares souterraines

Si les gares souterraines satisfont « aux règles pertinentes » de la présente STI et si elles sont conformes aux règles de sécurité contre l'incendie du niveau national, elles peuvent être considérées comme zones sûres (safe area) tel que spécifié au point 4.2.2.6.1 de la STI.

**2.2.4 Règle 2.2.1**

Lorsque cela est possible, le train quitte le tunnel (en cas d'incendie). Dans le cas où le train est arrêté (en tunnel), les voyageurs sont évacués sous la direction du personnel de bord ou s'échappent du train et rejoignent une zone sûre (safe area). Ceci n'est pas requis par l'ITI.

**2.2.5 Règle 4.2.2.6.1 - Définition fonctionnelle de la zone sûre (safe area)**

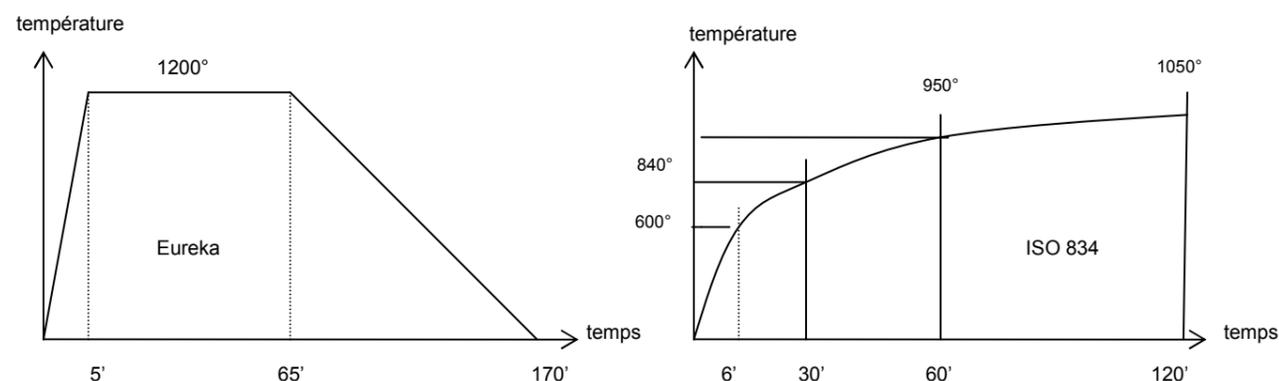
C'est un espace placé à l'intérieur ou à l'extérieur du tunnel, répondant à tous les critères suivants :

- il permet la survie,
- les personnes peuvent y accéder avec ou sans assistance,
- les personnes peuvent s'échapper par elles-mêmes, si les circonstances le permettent, ou attendre l'intervention des services de sauvetage respectant les procédures décrites dans le plan d'urgence,
- les communications sont possibles, soit par téléphone, soit par des connexions fixes, avec le centre de contrôle du gestionnaire de l'infrastructure.

**2.2.6 Règle 4.2.2.3**

En cas d'incendie déclaré, l'intégrité de la structure est préservée pendant une période suffisamment longue pour permettre l'autosauvetage et l'évacuation des voyageurs et du personnel de bord ainsi que l'intervention des services de sauvetage, sans qu'ils soient exposés au risque d'un effondrement de la structure.

Pour les calculs de résistance de la structure « en béton uniquement », la « courbe température-temps » spécifiée par Eureka est utilisée.



L'ITI recommande, dans le cas présent de trafic voyageurs et de tunnel foré à revêtement porteur, la courbe ISO 834 pendant 2 heures (moins sévère qu'Eureka, notamment du fait de l'écaillage du béton qui diminue son épaisseur).

**2.2.7 Règle 4.2.2.6.3 - Cas du monotube avec issues de secours latérales et verticales vers la surface**

Elles sont prévues tous les 1000 mètres.  
L'ITI ne prescrit rien sur ce sujet.

**2.2.8 Règle 4.2.2.6.4 - Cas du bitube avec galeries de communication vers l'autre tube du tunnel**

Elles sont espacées au maximum de 500 m.  
L'ITI prévoit 800 m.

**2.2.9 Règle 4.2.2.6.5 : solutions techniques de substitution**

« Des solutions techniques de substitution prévoyant un refuge avec un niveau de sécurité minimale équivalent sont admises. Une étude technique est entreprise afin de justifier la solution de substitution qui doit être soumise pour approbation par l'autorité nationale compétente. »

En pratique, les solutions alternatives existantes sont principalement de deux types :

- les monotubes avec galerie de sécurité parallèle au tunnel sur toute la longueur,
- les monotubes cloisonnés.

**2.2.10 Règle 4.2.2.11**

Les services de sauvetage doivent pouvoir pénétrer dans le tunnel, en cas d'incident, en passant par les têtes de tunnel et/ou des issues de secours appropriées (rappelons que des issues de secours sont prévues tous les 1 000 m).

L'ITI ne prévoit que l'entrée des services de sauvetage par les têtes.

**2.2.11 Règle 4.2.2.12 - Aires de secours à l'extérieur des tunnels**

La STI demande des aires de secours d'au moins 500 m<sup>2</sup>. Les routes d'accès existantes peuvent être considérées comme des aires de secours.

L'ITI demande des parkings de « dimensions suffisantes ».

**2.3 REGLES STI AYANT UNE INFLUENCE SUR LE COUT DES EQUIPEMENTS NON FERROVIAIRES****2.3.1 Règles 4.2.2.5 - Détection incendie**

La STI exige que les locaux techniques soient équipés de détecteurs qui, en cas d'incendie, déclenchent une alerte chez le gestionnaire de l'infrastructure.

L'ITI n'a pas d'exigence sur ce point.

**2.3.2 Règle 4.2.2.8 - Eclairage de secours sur les voies d'évacuation**

L'autonomie de l'éclairage de secours doit être garantie pour les situations d'urgence, pendant 90 minutes selon la STI et 60 minutes selon l'ITI.

**2.3.3 Règle 4.2.2.10 - Communication en situation d'urgence**

La communication train-PC doit être maintenue en tunnel, selon STI aussi bien que selon l'ITI. La STI impose la technologie GSM-R.

### 3. PRINCIPES DE CONCEPTION DU GÉNIE CIVIL DES TUNNELS DE LA LGV PACA LORSQU'ON APPLIQUE LA STI ET L'ITI 98-300

#### 3.1 LONGUEUR INFÉRIEURE A 400 M

Ni la STI, ni l'ITI ne s'appliquent. Le monotube sans disposition de sécurité autre que les trottoirs (ou le radier) d'évacuation est possible. Si les conditions de sol et de topographie devaient orienter vers un bi-tube, rien ne s'y opposerait ; mais les cas où cela arrive sont tellement exceptionnels (front de taille de grande section difficile à stabiliser) que nous ne l'avons pas considéré dans le présent projet, sauf lorsqu'un autre tunnel, conçu en bitube (du fait de sa longueur, par exemple), est trop proche du tunnel pour laisser la longueur nécessaire à l'air libre pour rapprocher les voies (cette longueur est très variable car dépendante des possibilités offertes par la coordination avec le profil en long des voies : elle peut varier dans la fourchette [ 0,5 km – 1,5 km], voire plus).

#### 3.2 LONGUEUR COMPRISE ENTRE 400 M ET 800 M

L'ITI s'applique mais pas la STI. Il y a lieu de prévoir :

- la résistance au feu ISO 2 heures du revêtement,
- le cheminement d'évacuation (trottoir ou radier) en tunnel,
- l'accès routier et parking en tête du tunnel.

#### 3.3 LONGUEUR COMPRISE ENTRE 800 M ET 1 000 M

La STI ne s'applique pas encore.

L'ITI ne demande rien de plus qu'au paragraphe précédent. Cependant si le tunnel est un bi-tube (ce qui n'est pas du tout obligatoire), il faut prévoir un rameau de liaison entre les 2 tubes.

#### 3.4 LONGUEUR COMPRISE ENTRE 1 KM ET 10 KM EN MONOTUBE

La STI et l'ITI s'appliquent. Les structures en béton doivent résister au feu Eureka (STI).

La STI impose une galerie ou un puits vertical d'évacuation tous les 1 000 m. Cette galerie ou ce puits sont également utilisés comme accès par les services de secours.

#### 3.5 LONGUEUR COMPRISE ENTRE 1 ET 10 KM EN BI-TUBE

La STI et l'ITI s'appliquent. Les têtes doivent être accessibles aux secours.

Les rameaux intertubes doivent être espacés de 500 m au plus.

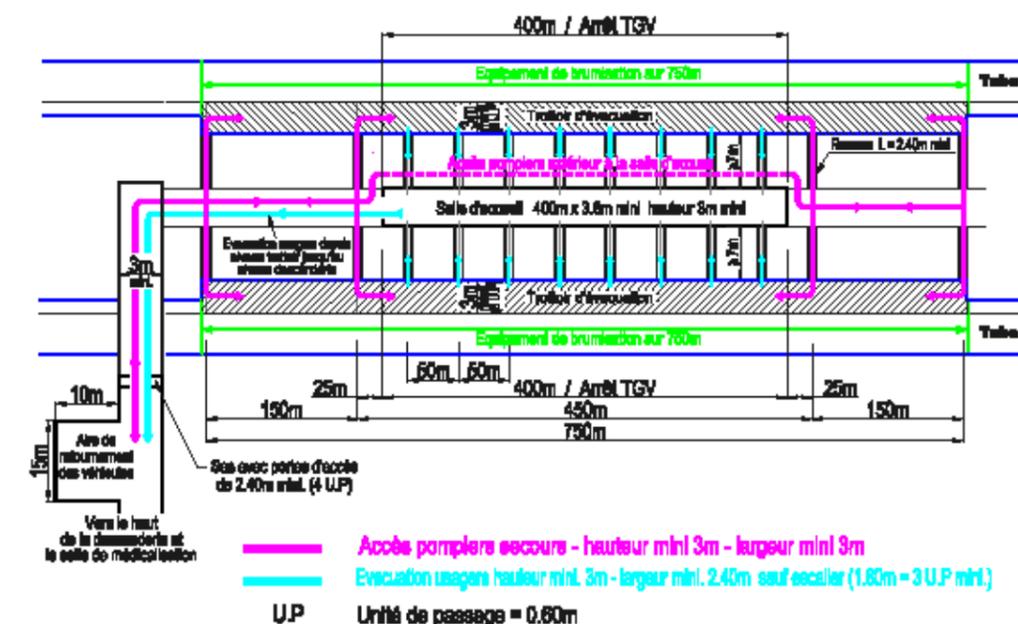
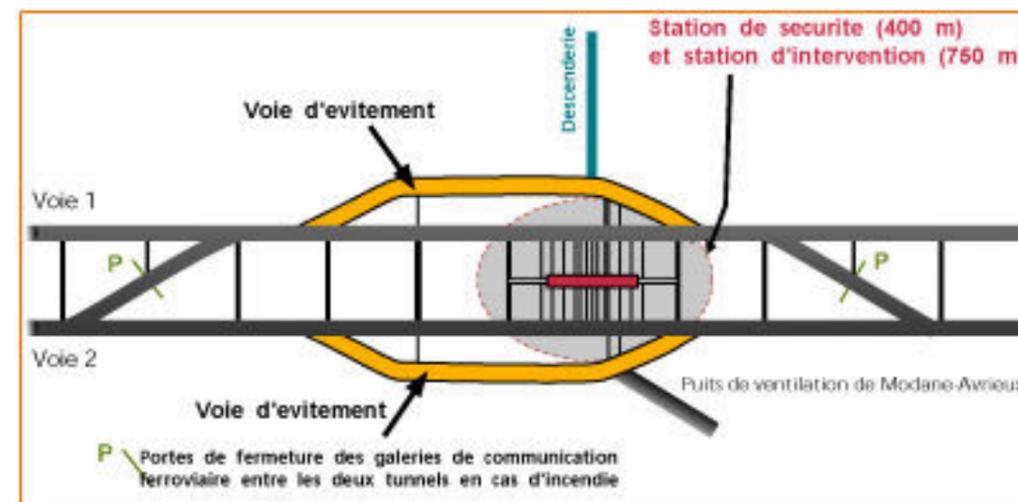
#### 3.6 LONGUEUR DE 10 A 20 KM

Seule la STI s'applique. Les 3 grands types de solution proposés dans la STI sont a priori possibles. Les estimations montrent néanmoins que le tunnel le plus intéressant économiquement est généralement en bi-tube (cf. § 4.4 du rapport).

#### 3.7 LONGUEUR SUPÉRIEURE A 20 KM

Ni l'ITI, ni la STI ne s'appliquent.

L'exemple du projet LTF est donné ci-dessous à titre d'information : en plus du tunnel bi-tube, il est prévu une station d'évacuation et d'intervention inspirée de celle de Modane dont le schéma est joint avec une « safe aera » souterraine, avec une possibilité de dévier le train sur une voie où l'on peut attaquer l'incendie, etc.



Il est cependant à noter qu'il existe deux différences majeures entre le tunnel principal du Lyon-Turin et l'unique tunnel de la LGV PACA de plus de 20 km, situé sur le prolongement vers l'Italie : la mixité des trafics d'une part, et l'absence de gare intermédiaire d'autre part. On peut penser en première approche que les gares, telles que prévues dans les études (4 voies) pourront répondre aux principales exigences de sécurité pour l'évacuation et l'intervention des secours, sous réserves d'adaptations spécifiques.

### 3.8 OUVRAGES D'EVACUATION ET D'ACCES DES SECOURS DANS LE CAS D'UN MONOTUBE

La STI n'étant pas très précise mais demandant que l'organisation des secours soit coordonnée sur le plan national en concertation avec les services de secours, la consultation d'experts connaissant parfaitement le sujet, (M. Vergnault, Colonel des pompiers de Paris en retraite) nous conduit à considérer les modalités suivantes.

#### 3.8.1 Galerie d'évacuation et d'accès des secours

##### 3.8.1.1. Galerie de longueur inférieure à 500 m

- Principe de base : les voyageurs sortent à pied ; les secours interviennent également à pied.
- Le gabarit de circulation à prévoir est donc celui d'usagers évacués à pied et de pompiers se rendant par ces galeries à pied au tunnel avec leur équipement individuel.

Largeur : 1,5 m, hauteur : 2,25 m.

Nota : la largeur minimale imposée a cependant de grandes chances d'être dépassée dans la réalité pour des questions de critères dimensionnants en construction, les questions de ventilation en phase chantier rendant le creusement de galeries de moins de 11 m<sup>2</sup> de section excavée très délicat. Comme le montre le schéma de l'annexe 7.2, une telle section conduit plutôt à une largeur de passage de l'ordre de 2,90 m.

Ce dépassement de la largeur minimale imposée par la STI conduit par ailleurs à un dimensionnement plus conforme aux besoins d'évacuation, le cas échéant en flux croisé avec l'arrivée des secours.

- Pente : les pompiers équipés peuvent raisonnablement se déplacer à pied sur des pentes ne dépassant pas 10 %. Cependant les pentes prescrites pour les personnes à mobilité réduite à évacuer, sont plus faibles (5 %).

Comme il serait parfois très pénalisant de limiter la pente des galeries d'évacuation à 5 %, nous prenons en compte, dans la présente étude une solution que nous avons étudiée pour prendre des mesures conservatoires au tunnel de Chavanne (LGV Rhin - Rhône). Elle consiste à créer une zone sûre, au départ de la galerie, destinée à accueillir uniquement les PMR (dont le nombre est estimé pour les besoins du dimensionnement à 5 % ou 10 % des voyageurs d'un TGV Duplex UM). Cette zone a une surface de 5 x 20 = 100 m<sup>2</sup><sup>1</sup>; elle est réalisée avec le coffrage et le matériel des locaux techniques dont la nécessité apparaît, lorsque la longueur du tunnel dépasse 1000 m.

Les PMR pourront ainsi attendre en sécurité qu'on les aide à monter la pente de 10 % de la galerie sur une longueur de moins de 500 m.

- Parking de secours : à l'extérieur de la galerie un parking de 500 m<sup>2</sup> est prévu pour que les services de secours puissent stationner leurs véhicules et leur matériel. Ce parking accessible par des véhicules venus par la route, doit se trouver à moins de 500 m de l'intersection de la galerie avec le tunnel (distance considérée comme le maximum parcourable à pied par les pompiers équipés).
- Safe area : une safe area de 1 000 à 1 200 m<sup>2</sup> est aménagée à l'extérieur de la galerie pour permettre aux 1 000 à 1 200 passagers d'un TGV d'attendre qu'on vienne les chercher. Lorsque la

galerie débouche sur une rue ou une route, la STI accepte que la safe area puisse inclure une partie des routes et rues facilement accessibles depuis la sortie de la galerie.

##### 3.8.1.2. Galerie de longueur supérieure à 500 m

- Principe : les personnes ne sortent à l'extérieur qu'avec l'aide et sous le contrôle des services de secours qui accèdent en véhicules (la longueur est trop importante, le risque de panique et la complexité de gestion des flux croisés [passagers sortants / secours entrants] trop forte).
- Gabarit : le gabarit doit permettre à des camions de pompiers de 3,5 m de hauteur d'accéder jusqu'au point de retournement qu'on imagine situé à moins de 300 m de tunnel. Le gabarit de circulation à sens unique est de 3,5 m en largeur et 3,80 m en hauteur. Tous les 300 m, un élargissement à 6 m sur une longueur de 25 m est prévu pour permettre le croisement de véhicules circulant en sens opposés.
- Pente : 10 % au maximum.
- Safe area : une safe area de 1 000 m<sup>2</sup> est prévue dans la galerie, à proximité du tunnel pour permettre à l'ensemble des voyageurs d'attendre en sécurité, qu'on vienne les chercher en véhicule.

Dans l'étude actuelle, nous avons supposé que la galerie d'accès et d'évacuation était de section constante sur toute sa longueur.

En plaçant la galerie de retournement à 300 m du tunnel, on peut donc utiliser les 300 premiers mètres de galerie d'évacuation situés entre le tunnel et la galerie de retournement, avec une largeur de 3,5 m pour constituer la safe area.

- Parking de secours : dans la mesure où les pompiers peuvent être transportés en véhicule jusqu'à 300 m du tunnel, on peut admettre que le parking de secours de 500 m<sup>2</sup> soit à l'extérieur de la galerie.

#### 3.8.2 Puits vertical d'évacuation et d'accès des secours

Lorsque le tunnel est à faible profondeur, on peut également utiliser un puits vertical pour évacuer les usagers et faire accéder les secours.

##### 3.8.2.1. Puits de hauteur inférieure à 30 m<sup>2</sup>

On peut évacuer ou accéder à pied par des escaliers de 1,5 m de largeur avec des paliers horizontaux tous les 1,3 à 1,5 m en hauteur.

Entre le tunnel et le pied du puits, on est obligé de prévoir une salle d'environ 100 m<sup>2</sup> recevant une ventilation d'air frais en surpression, où les PMR (personnes à mobilité réduite) peuvent attendre que l'on vienne les chercher pour les aider à monter les escaliers ou les porter.

<sup>2</sup> Ce seuil des 30 m est inspiré de celui qui définit les Immeubles de Grande Hauteur (28 m entre niveau des paliers pour être précis). Il conditionne en effet la nécessité ou non de certains équipements destinés aux pompiers. Ce seuil se retrouve également dans les équipements d'aménagements souterrains profonds tels que le forum des Halles à Paris.

<sup>1</sup> La ratio d'environ 1m<sup>2</sup> / personne est cohérent avec ce que l'on retient dans des cas similaires (refuges de tunnels routiers par exemple).

Dans le puits on doit prévoir un espace vertical de 1 x 2 m de section, surmonté d'une poulie par lequel les pompiers peuvent descendre à l'aide de cordes du matériel de poids inférieur à 50 kg.

#### 3.8.2.2. Puits de hauteur supérieure à 30 m

Les puits de hauteur supérieure à 30 m sont rarement utilisés, car, d'une part, il faut prévoir un ascenseur pour les PMR et les secours et, d'autre part, on ne peut pas évacuer en ascenseur, les 1 000 voyageurs usagers d'un TGV, sauf à prévoir des installations considérables qui ne fonctionnent que les fois (très rares) où on évacuera un TGV à cet endroit.

Cependant, dans quelques cas exceptionnels, lorsqu'on est en ville et que la hauteur du puits ne dépasse pas 50 à 55 m, on peut envisager un puits avec un ascenseur pour PMR, dont l'entretien sera d'un prix abordable, dans la mesure où les équipes qui en sont chargées, auront d'autres ascenseurs à entretenir dans le voisinage.

Les escaliers et la salle d'attente des PMR seront semblables à ceux des puits de 30 m. Le vide vertical à laisser pour installer un ascenseur aura une section horizontale de 3 m x 3,5 m environ.

## 4. APPLICATION DES PRINCIPES DE CONCEPTION DU GÉNIE CIVIL AUX TUNNELS RENCONTRES SUR LA LGV PACA

### 4.1 LONGUEUR INFÉRIEURE A 1 000 M

Monotube simple sauf si des circonstances exceptionnelles conduisent à une autre solution.

### 4.2 LONGUEUR DE 1 000 M A 2 000 M

Le monotube avec accès latéraux ou verticaux est possible. Deux sortes de cas se présentent.

#### 4.2.1 Cas favorable

L'on peut, à partir d'un point situé à moins de 1 000 m des têtes, réaliser une galerie d'évacuation de longueur inférieure à 500 m (si possible) aboutissant à une zone permettant d'implanter un parking de secours de 500 m<sup>2</sup> et une safe area de 1 000 m<sup>2</sup>, le tout relié, par une piste de 3,5 m de chaussée, à une route existante pas trop éloignée ; dans ce cas, 1 galerie d'évacuation est suffisante et permet de réaliser une solution moins chère que les autres.

#### 4.2.2 Cas normal

La galerie d'évacuation parallèle au tunnel débouchant à la tête est la plus intéressante : soit une galerie pour les tunnels de 1 000 m à 1 500 m, soit 2 galeries débouchant aux 2 têtes, pour les tunnels de 1 500 m à 2 000 m.

La STI est appliquée à minima : pour un tunnel de 1100 m de long on prévoit une galerie de 100 m. Cette solution présente les avantages suivants :

- la réalisation du chantier ayant conduit à réaliser des pistes d'accès et des aires de chantier, à chaque tête, les dépenses à faire pour disposer d'une route d'accès et des aires de surface de 500 m<sup>2</sup> et 1000 m<sup>2</sup> en bout de galerie sont limitées,
- les galeries feront moins de 500 m de longueur et auront donc le gabarit minimum,
- du point de vue du chantier, ces galeries peuvent servir de galeries de reconnaissance du tunnel principal et permettre de faire des économies sur le coût de ce dernier.

### 4.3 LONGUEUR DE 2 KM A 5 KM

Pour cette longueur, on compare les solutions suivantes :

- monotube avec accès latéraux, tous les 1 000 m par galeries non parallèles au tunnel, éventuellement complétées ou partiellement remplacées par des galeries parallèles au tunnel de longueur inférieure à 500 m et débouchant aux têtes,
- bi-tube avec rameaux de communication tous les 500 m,
- monotube avec galerie de sécurité parallèle au tunnel sur toute la longueur,
- monotube cloisonné.

et l'on retient la solution la moins chère.

Concernant le monotube avec galerie de sécurité parallèle au tunnel sur toute sa longueur, la nécessité de pouvoir faire circuler dans cette galerie des véhicules, notamment pour les services de secours, conduit à :

- des dimensions transversales importantes,
- l'installation d'équipements de sécurité et d'exploitation à l'intérieur de la galerie de mêmes natures que pour les tunnels routiers, notamment en matière de ventilation.

Il en résulte qu'une telle solution conduit à un linéaire de galerie généralement nettement supérieur au cumul des longueurs des galeries pour des sorties latérales, et de ce fait n'est pas compétitive.

Concernant le monotube cloisonné, deux solutions peuvent être envisagées :

- cloison avec sas de passage d'un compartiment à l'autre,
- cloison avec simple porte dans la cloison ; les fumées du compartiment en feu ne pénètrent pas dans le compartiment sain qui est mis en surpression en faisant débiter les ventilateurs des extrémités vers le centre du compartiment sain.

La cloison avec simple porte est évidemment moins chère car la section totale du tunnel qui en résulte est plus petite que dans le cas de la cloison avec sas qui oblige à écarter les 2 voies ferrées l'une de l'autre.

Lorsqu'on compare les coûts de la solution bi-tube à la solution monotube cloisonnée telle que définie ci-dessus, on aboutit aux constatations suivantes :

- les quantités de déblais, de soutènement et de béton de revêtement, sont sensiblement équivalentes ,
- la cloison consomme beaucoup de béton et d'armatures et demande des précautions coûteuses pour assurer sa résistance au feu Eureka,
- le front du tunnel monotube est haut et large et les dépenses pour assurer sa stabilité, sont importantes dès l'instant que le terrain n'est pas de qualité parfaite.

En résumé, le bi-tube est moins cher et comporte moins d'aléas de construction que le monotube cloisonné, sauf dans deux cas :

- lorsque le rocher est d'excellente qualité tout le long du tunnel : les inconvénients de la grande section, au moment du creusement disparaissent,
- lorsque le sol est d'une qualité exécrable ; ainsi, pour le tunnel du Groene Hart, le monotube cloisonné a permis d'éviter la construction de rameaux inter-tubes qu'on ne pouvait réaliser qu'en congelant préalablement le sol pour lui donner consistance et imperméabilité.

En conclusion, ce sont, à ce stade d'étude, les deux premières solutions citées (monotubes avec sorties à l'air libre ou bitube) qui sont réellement en concurrence entre 2 et 5 km.

#### 4.4 LONGUEUR DE 5 KM A 20 KM

Dans le projet examiné, à une ou deux exceptions près, on ne rencontre pratiquement pas de cas où, pour des tunnels de cette longueur, le monotube avec les galeries d'accès soit compétitif par rapport aux deux autres solutions en balance :

- monotube avec galerie de sécurité parallèle au tunnel sur toute sa longueur et connectée à ce dernier, par des rameaux répartis tous les 1000 m (interprétation à minima de la STI) ou tous les 500 m (plus conforme à l'esprit de la STI). La galerie de sécurité doit pouvoir être parcourue par

des camions de pompiers ce qui conduit, pour ces longueurs, à un véritable tunnel routier obéissant aux règles correspondantes ;

- bi-tube dont les conditions de sécurité qu'il offre sont très supérieures à la solution précédente ; notamment il évite le problème du monotube lorsque le train en feu est du côté du trottoir qui n'est pas celui d'où part la galerie d'évacuation (comment traverser la voie compte tenu de la présence du train ? Il faudrait sauter du côté de la voie et grimper sur le trottoir, ou sortir côté trottoir, aller jusqu'au bout du train, traverser les voies, grimper sur le trottoir opposé, et rejoindre la galerie la plus proche ? La solution de passages inférieurs sous le tunnel permettant de passer d'un trottoir à l'autre sans traverser les voies, théoriquement possible, serait très coûteuse) ;

En conclusion, les estimations aboutissent à privilégier le bi-tube. De plus, pour ces longueurs, la meilleure solution de réalisation est, souvent, le forage au tunnelier, pour lequel le diamètre d'un tube de bi-tube est plus favorable que celui d'un monotube.

#### 4.5 LONGUEUR DE PLUS DE 20 KM

Un seul tunnel, dans le projet, a une longueur supérieure à 20 km (variante avec tunnel sous Cannes). Il est examiné de façon spécifique.

## 5. MODALITES D'ESTIMATION DU COÛT DES TUNNELS DE LA LGV PACA

Le détail des ratios retenus est repris au chapitre 7.1, et le sous-détail de leurs calculs aux chapitres suivants.

### 5.1 GENERALITES

- estimation aux conditions économiques de janvier 2005
- estimation du coût des travaux (génie civil et équipements de sécurité) résultant de l'application des ITI et STI
- trois estimations pour couvrir le champ des possibles :
  - une fourchette de coût par scénario correspondant à des géologies « normale » et « mauvaise ».
  - **à la demande du maître d'ouvrage, l'estimation d'un coût des tunnels selon une géologie « probable », fondée sur les ratios de génie civil linéaire déterminés dans les études antérieures,**

En effet, à ce stade des études, les données géotechniques disponibles ne présentent pas la même fiabilité que lors des études détaillées ultérieures, et a fortiori lorsque des sondages ont pu être faits. D'autres paramètres comme l'hydrogéologie, qui peuvent modifier profondément les techniques de fonçage et donc leur coût, sont, eux, très mal connus (ils peuvent d'ailleurs, selon le contexte géologique, le rester quasiment jusqu'en phase chantier).

Cependant, à défaut d'informations plus précises, la première réflexion menée sur le sujet par Setec International dans le cadre des études préalables au Débat Public, mise à jour dans le cadre de ces études complémentaires en phase 1 pour ce qui concerne les tunnels des scénarios Métropoles du Sud, peut être considérée comme une approche satisfaisante de la « géologie probable ».

**Pour tous les autres travaux que le génie civil de section courante dont le coût varie en fonction de la géologie (cf. chapitres 5.2.2 à 5.2.8 et 5.3.2 à 5.3.4 ci-dessous), les coûts de l'estimation « géologie probable » sont calculés à partir des ratios du génie civil de section courante par extrapolation linéaire sur la base des deux situations « géologie « normale » et « géologie « mauvaise ».**

- Pour tous les coûts unitaires, intégration d'un coefficient de frais généraux de 8 % aux estimations du génie civil pour couvrir :
  - les installations de chantier
  - les études d'exécution
  - le contrôle externe études et travaux
- les montants qui figurent aux § 5.2 et § 5.3 de cette note sont les montants bruts des travaux et équipements (y compris coefficient de frais généraux de 8%)
- estimation des équipements ferroviaires sur la base des ratios fixés par RFF
- application au montant brut des travaux et équipements d'une SAV (somme à valoir) de 10 % et d'un taux de frais de MOE / MOA de 12 %.
- application au montant brut des travaux et équipements d'une provision pour risques de :
  - 10 % pour le génie civil de section courante dans le cas de la géologie « probable »
  - 5 % dans tous les autres cas sauf les équipements ferroviaires.

## 5.2 ESTIMATION DES MONTANTS BRUTS DE TRAVAUX D'UN MONOTUBE

### 5.2.1 Génie civil de section courante de tunnel

- 3 sections de tunnel sont considérées, en relation avec la section d'air, à savoir :
  - Sair = 85 m<sup>2</sup> pour des circulations à V270-V300
  - Sair = 71 m<sup>2</sup> pour des circulations à V270
  - Sair = 63 m<sup>2</sup> pour des circulations à V200 / V230
- la longueur du tunnel est prise égale à celle figurant sur les PL de la LGV fournis par RFF, où il apparaît que les extrémités sont calées aux PK au droit desquels la couverture de terrain, telle qu'elle résulte de la carte IGN au 1/25000, est égale à un demi-diamètre d'excavation, ce qui implique la nécessité de rajouter des faux-tunnels comme indiqué au § 5.2.2 ci-après

#### Ratios unitaires pour géologie « probable »

Pour mémoire, on rappelle ici les caractéristiques et les coûts des profils types de soutènement et des ratios unitaires de section courante proposés par Setec International, et appliqués aux différents tunnels considérés sur la base des cartes BRGM au 1/50 000 de la Région.

7 profils de soutènement type ont été considérés dans les études Setec International : en allant de la meilleure qualité de terrain à la plus mauvaise, ils sont désignés comme suit : P1 (rocher de résistance élevée) à P6 (sols plastiques) et P6', correspondant au P6 renforcé par des traitements de terrain. Pour mémoire, le tableau ci-après rappelle les caractéristiques issues des études précédentes par Setec International.

| Contexte géomécanique  | Class. AFTEs | Profil de soutènement type   |
|--|--------------|--|
| Rocher franc de résistance élevée faiblement fracturé (ex calcaires massifs)   | R2b          | P1 : boulonnage du ciel (10HA D25/m) + 8cm béton projeté   |
| Roche compacte de résistance moyenne (ex grès)   | R3a          | P2 : boulonnage moyen (13HA D25/m) + 12cm béton projeté  |
| Roche liée de résistance moyenne à faible (ex calcaires peu résistants, marnes)  | R3b          | P3: boulonnage dense (15HA D25/m) + 15cm béton projeté   |
| Roche facturée ou schisteuse de faible résistance (ex calcaires tendres ou très fracturés, grès argileux)  | R4           | P4: cintres HEB 140, esp. = 1,0m ; béton projeté 5cm + 20cm béton de blocage   |
| Roche tectonisée ou de très faible résistance (ex. marnes bariolées à gypse, marnes sableuses ou argileuses) ; sols sablo graveleux                | R5a          | P5: cintres HEB 200, esp. = 1,0m ; béton projeté 5cm + 20cm béton de blocage   |
|  | R5b          | P6: voûte parapluie (tubes D100mm, esp=0.50m) + cintres HEB 200, esp. = 1,0m ; béton projeté 5cm + 20cm béton de blocage |
| Sols plastiques ex : marnes altérées, argiles, sables argileux) sous consolidés ou sans cohésion (limon vasards et sables lâches, terrains broyés) | R6a          |  |
|  | R6b          | P6' : idem P6+injection du terrain   |

Les ratios unitaires correspondant, y compris frais généraux (8 %) mais hors SAV et PRI, sont les suivants :

| Profil type | Cout € HT/ml pour monotube de section d'air de 85 m <sup>2</sup> valeur 01/01/2005 |
|-------------|--|
| P1          | 22 100   |
| P2          | 23 000   |
| P3          | 24 800   |
| P4          | 33 900   |
| P5          | 36 700   |
| P6          | 46 800   |
| P6'         | 58 200   |

Les ratios pour les sections d'air réduites prévues pour les vitesses V270 (71 m<sup>2</sup>) et V230 / V200 (63 m<sup>2</sup>) sont obtenues par multiplication des précédents ratios par les coefficients suivants :

| Vitesse réduite | Section d'air     | Ratio / 85 m <sup>2</sup> |
|-----------------|-------------------|---------------------------|
| V270            | 71 m <sup>2</sup> | 92%                       |
| V200 / V230     | 63 m <sup>2</sup> | 87%                       |

Compte tenu des incertitudes géologiques à ce stade, une Provision pour Risques de 10 % est appliquée aux travaux de génie civil linéaire (taux cohérent avec celui de 20 % proposé, dans l'étude Setec International préalable au Débat Public qui couvrait SAV et PRI).

#### Ratios unitaires pour géologie « normale » et « mauvaise »

- ces ratios couvrent :
  - excavation + soutènement + étanchéité + revêtement, en considérant 2 catégories de terrain (terrain normal et mauvais terrain)
  - génie civil pour équipements de sécurité (caniveau pour conduite incendie, multitubulaire) et pour locaux techniques intérieurs (5 m x 7 m, tous les 1 000 m)
- on considère
  - comme terrain normal celui pour lequel le soutènement est réalisé au moyen de boulonnage et d'une coque en béton projeté,
  - comme mauvais terrain celui pour lequel le creusement nécessite un soutènement du front (béton projeté et éventuellement boulons en fibre de verre) et un soutènement par cintres lourds,

- tableau des montants au ml :

| Section d'air                       | 85 m <sup>2</sup> |            | 71 m <sup>2</sup> |            | 63 m <sup>2</sup> |          |
|-------------------------------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|----------|
|                                     | Normal            | Mauvais    | Normal            | Mauvais    | Normal            | Mauvais  |
| <b>Montant brut GC hors SAV PRI</b> | 28,8 k€/ml        | 58,0 k€/ml | 26,5 k€/ml        | 53,2 k€/ml | 25 k€/ml          | 50 k€/ml |

La provision pour risque retenue est ici de 5%.

#### **5.2.2 Ouvrages de tête du tunnel**

##### 5.2.2.1 Génie Civil

- faux-tunnel long de 50 m pour assurer un dégagement des trémies aérauliques et une couverture égale à un diamètre d'excavation au droit du tympan,
- terrassement (déblai puis remblai) et soutènement de la tranchée du faux-tunnel,
- soutènement du tympan,
- voûte parapluie mise en place à partir du tympan sur une longueur de 15 m,
- locaux techniques à la tête de tunnel,
- plate-forme de 1500 m<sup>2</sup> (soit 500 m<sup>2</sup> de parking pour les services de secours et 1000 m<sup>2</sup> de surface d'accueil pour les voyageurs),
- **montant brut des ouvrages décrits ci-avant : 4,5 M€, par tête.**

**5.2.2.2. Equipements de tête**

- pour une tête de tunnel réservoir incendie + conduite extérieure entre réservoir et tunnel + alimentation du réservoir : **montant brut de 0,6 M€.**

**5.2.3 Equipements de sécurité du tunnel**

- conduite incendie du tunnel et hydrants tous les 250 m,
- éclairage du tunnel et prises de courant pour les services de secours,
- alimentation électrique du tunnel
- retransmission des radio-communications des services de secours à l'intérieur du tunnel,
- ventilation des locaux techniques intérieurs au tunnel,
- métallerie des locaux techniques intérieurs au tunnel,
- gestion technique centralisée des équipements de sécurité,
- **montant brut des équipements : 2,0 k€/ml**

**5.2.4 Equipements ferroviaires du tunnel**

Coûts fixés par RFF (en conformité avec les estimations des autres sections de LGV) :

|                     | M€ / km     |
|---------------------|-------------|
| Voie                | 2,24        |
| Signalisation       | 0,50        |
| Energie de Traction | 0,75        |
| Télécommunications  | 0,20        |
| <b>TOTAL</b>        | <b>3,69</b> |

**5.2.5 Galerie de secours de longueur inférieure à 500 m**

- zone sûre pour PMR (ou personnes peu vaillantes) : largeur de 5 m et longueur de 20 m ,
  - 0,45 M€ en terrain normal,
  - 0,65 M€ en mauvais terrain,
- galerie pour gabarit de 1,50 m x 2,25 m :
  - galerie revêtue de section excavée de 11 m<sup>2</sup>,
    - \* 8,2 k€/ml en terrain normal,
    - \* 11,5 k€/ml en mauvais terrain,
  - équipements de sécurité (éclairage, ventilation) de 1,0 k€/ml,
- ouvrages de tête :
  - génie civil : 150 k€,
  - 2 parkings revêtus : 150 k€,
  - équipements de sécurité (ventilation, métallerie) : 400 k€,

- piste de 7 m de largeur de plate-forme : 1 000 €/ml (hors ouvrages hydrauliques).

**5.2.6 Galerie de secours de longueur supérieure à 500 m**

- galerie pour gabarit de 3,50 m x 3,80 m :
  - galerie revêtue de section excavée de 34 m<sup>2</sup>
    - \* 21,0 k€/ml en terrain normal,
    - \* 31,2 k€/ml en mauvais terrain,
  - équipements de sécurité (éclairages, ventilation) de 1,5 k€/ml,
- ouvrages de tête :
  - génie civil : 250 k€,
  - 2 parkings revêtus : 150 k€,
  - équipements de sécurité (ventilation, métallerie) : 600 k€,
- piste de 7 m de largeur de plate-forme : 1 000 €/ml (hors ouvrages hydrauliques).

**5.2.7 Puits de 15 m à 30 m de hauteur**

- génie civil zone PMR :
  - 0,69 M€ en terrain normal,
  - 1,03 M€ en mauvais terrain,
- génie civil puits :
  - 31,7 k€/ml en terrain normal,
  - 51,7 k€/ml en mauvais terrain,

- ouvrages de tête, parkings, piste : idem galerie
- équipements de sécurité : idem galerie.

**5.2.8 Puits de 30 m à 50 m de hauteur**

- génie civil zone PMR : idem puits de 15 m à 30 de hauteur
- génie civil puits :
  - 55 k€/ml en terrain normal,
  - 88 k€/ml en mauvais terrain,
- génie civil ouvrages de tête et local technique : 0,6 M€,
- parking, piste : idem galerie et puits de hauteur inférieure à 30 m,
- ascenseur : 0,35 M€,
- autres équipements : idem galerie et puits de hauteur inférieure à 30 m.

### 5.3 ESTIMATION DES MONTANTS BRUTS DE TRAVAUX D'UN BI-TUBE

#### 5.3.1 Génie civil de section courante du tunnel

Une seule section de tunnel est considérée, à savoir 50-51 m<sup>2</sup>, comme celle du tunnel du Perthus sur la LGV Perpignan-Figueras,

Comme pour les tunnels monotube, les estimations pour une « géologie probable » sont fondées, à défaut d'éléments plus précis sur la géologie, sur l'approche Setec International, et il est proposé une fourchette [« géologie normale » - « géologie mauvaise »] pour information.

#### Ratios unitaires pour géologie « probable »

Ce sont ceux qui sont indiqués au chapitre 5.2.1 pour une section d'air de 85 m<sup>2</sup>, auxquels on applique un coefficient pour passage de monotube à bitube variant linéairement avec la complexité du terrain.

Les deux points de calage de ce coefficient sont les suivants :

| <b>Ratios unitaires de génie civil linéaire pour<br/>monotube 85 m<sup>2</sup> de section d'air<br/>(coûts hors SAV et PRI)</b> | <b>Ratio bitube /<br/>monotube</b> |
|---|------------------------------------|
| 25 M€ / km (« géologie normale »)   | 36%                                |
| 50 M€ / km (« géologie mauvaise »)  | 25%                                |

Cela s'explique par le fait que, plus la géologie est délicate, plus les grands fronts de taille sont difficiles à maintenir et donc plus les bitubes, relativement aux monotubes, sont « économiquement » pertinents car de plus petites dimensions.

La provision pour risque est, comme pour les monotubes, de 10 %.

**Ratio unitaires pour géologie « normale » et « mauvaise »**

- même distinction de terrain normal et de mauvais terrain que pour le monotube,
- les rameaux de communication entre tubes ont une section excavée de 12 m<sup>2</sup> et une longueur de 20 m (entraxe des tubes de 30 m) à laquelle on rajoute une longueur de 6 m pour les locaux techniques associés,
- tableau des montants au ml :

| Section d'air               | 50 m <sup>2</sup> - 51 m <sup>2</sup> |            |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|
|                             | Normal                                | Mauvais    |
| Nature de terrain           | Normal                                | Mauvais    |
| Montant brut hors SAV + PRI | 39,1 k€/ml                            | 72,6 k€/ml |

**5.3.2 Ouvrages de tête du tunnel**

- même description des travaux que pour le monotube,
- augmentation du montant brut des travaux lié à la présence de 2 faux-tunnels (certes de 45 m de long au lieu de 50 m) par tête et à l'élargissement de la tranchée d'accès et donc du tympan à soutenir : augmentation de 1,4 M€, soit 5,9 M€ par tête.

**5.3.3 Equipements de sécurité du tunnel**

- même description des travaux que pour le monotube mais il faut rajouter la ventilation et la métallerie des rameaux de communication montant brut de 3,2 k€/ml de tunnel bi-tube.

**5.3.4 Equipements ferroviaires du tunnel**

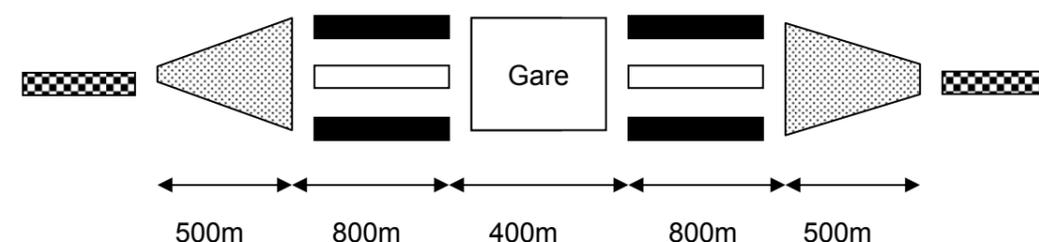
Coûts fixés par RFF : ce sont les coûts pour un monotube multipliés par un facteur 1,4.

|                     | M€ / km     |
|---------------------|-------------|
| Voie                | 3,14        |
| Signalisation       | 0,70        |
| Energie de Traction | 1,05        |
| Télécommunications  | 0,28        |
| <b>TOTAL</b>        | <b>5,17</b> |

**5.4 ESTIMATION DES GARES SOUTERRAINES**

Périmètre de l'étude : l'estimation prend en compte le coût des ouvrages souterrains linéaires dédiés à la circulation ferroviaire (situés au niveau des voies de circulation). Elle ne prend pas en compte les ouvrages d'accès depuis la surface et autres volumes nécessaires à l'accueil des voyageurs.

Nous retiendrons schématiquement les dispositions suivantes, qui se développent sur environ 3 000 m :



- sur environ 2 x 500 m, aux extrémités, des entonnements permettant le débranchement, à partir du tunnel principal, des voies déviées à quai,
- on considèrera que ces ouvrages d'entonnement ont un coût linéaire quatre fois supérieur à celui retenu sur le reste du tunnel principal (doublement des quantités de déblais et doublement de leur coût en raison de la complexité),
- sur 2 x 800 m environ, de part et d'autre de la gare, trois tunnels parallèles constitués d'un tunnel central à deux voies et de deux tunnels latéraux à une voie,
- sur 400 m environ, dans la zone de gare : une gare centrale (d'environ 350 m<sup>2</sup> de section excavée) et deux tunnels latéraux permettant d'accueillir une voie et un quai (soit une section excavée d'environ 100 m<sup>2</sup>),

On considèrera pour la gare centrale un coût linéaire de 10.5 fois celui d'un monotube (3.5 fois plus de déblais dont le coût est environ le triple de celui d'un monotube de 85 m<sup>2</sup> de section d'air) et pour les deux tubes latéraux, celui d'un monotube de 85 m<sup>2</sup> de section d'air.

Il est souligné que le coût de ces ouvrages est très difficile à évaluer à ce stade de l'étude et ne pourra être connu de manière moins approximative qu'après une étude approfondie de ces derniers tant sur le plan de la géométrie des ouvrages que de leur environnement (géologie, environnement urbain...)

Le coût global s'établit, suivant ces principes, comme suit :

| Tunnel principal                           | Monotube                                  | Bitube                                 | Monotube                                   | Bitube                                  |
|--|---|--|--|---|
| Terrain                                    | Normal                                    |  | Mauvais                                    |   |
| Entonnements (2 x 500 m)                   | 2 x 500 m x 25 k€/ml x 4 = 100 000 k€     | 2 x 500 m x 39.1k€/ml x 4 = 156 400 k€ | 2 x 500 m x 50 k€/ml x 4 = 200 000 k€      | 2 x 500 m x 72.6 k€/ml x 4 = 290 400 k€ |
| Monotube & bitube (2 x 800 m)              | 2 x 800m x (25+39.1) k€/ml = 102 560 k€   |  | 2 x 800 m x (50 + 72.6) k€/ml = 196 160 k€ |   |
| Gare centrale (400m)                       | 400 m x 28.8 k€/ml x 3.5 x 3 = 120 960 k€ |  | 400 m x 58 k€/ml x 3.5 x 3 = 243 600 k€    |   |
| Bitubes latéraux (400m)                    | 2 x 400m x 28.8 k€/ml = 23 040 k€         |  | 2 x 400 m x 58 k€/ml = 46 400 k€           |   |
| TOTAL (1)                                  | 346.56 M€                                 | 402.96 M€                              | 686.16 M€                                  | 776.56 M€                               |
| A déduire (2)<br>(coût tunnel sans gare)   | 3 000 m x 25 k€/ml = 75 000 k€            | 3 000 m x 39.1k€/ml = 117 300 k€       | 3 000 m x 50 k€/ml = 150 000 k€            | 3 000 m x 72.6 k€/ml = 217 800 k€       |
| <b>PLUS VALUE TOTALE<br/>(3) = (1)-(2)</b> | <b>272 M€</b>                             | <b>286 M€</b>                          | <b>536 M€</b>                              | <b>559 M€</b>                           |

## 5.5 TUNNELS DE MARSEILLE (ST-CHARLES ET BLANCARDE)

### 5.5.1 Spécificités de ces tunnels

Les tunnels de St-Charles et de la Blancarde ont des longueurs respectivement de 10,7 km et 6,8 km.

Ils ont des spécificités qui doivent être prises en compte avant de leur appliquer la méthode générale d'estimation simplifiée :

- de part et d'autre de la gare dont la longueur est de l'ordre de 400 m, il y a une longueur de transition de 1 300 m où le tunnel est constitué par un monotube à 2 voies et par deux tubes à une voie (sur environ 800 m de long) et par le raccordement (culottes) entre cette zone et la section courante (sur environ 500 m de longueur),
- en profil en long, la présence du Stampien à faible profondeur, incite à disposer le niveau des voies de telle façon que dans les zones à forte densité de construction, les tunnels aient leur clé à au moins 10 m sous le niveau supérieur du Stampien,
- par ailleurs, dans les solutions monotubes, le contexte urbain autorise à prévoir des puits d'évacuation dont la profondeur atteigne 50 m à 55 m.

### 5.5.2 Adaptation de la méthode d'estimation

Les modalités de prise en compte des gares souterraines sont celles définies au § 5.4 ci-avant.

L'estimation des tunnels est faite comme suit :

- à chaque extrémité, sur une longueur de l'ordre de 1 km permettant de descendre dans le Stampien pour atteindre une couverture de l'ordre de 10 m, le tunnel est considéré être en terrain « mauvais »,
- entre ces deux extrémités, le tunnel devrait être, sauf très localement, situé dans du terrain pouvant être considéré comme « normal »,
- cependant, une majoration de 20 % est appliquée au coût du génie civil linéaire compte-tenu du contexte urbain et notamment pour tenir compte des précautions à prendre pour limiter les dommages aux bâtiments.

## 5.6 ESTIMATION DU TUNNEL PRINCIPAL DE LA SECTION ELEMENTAIRE VARIANTE « ESTEREL-GARE NOUVELLE SOUTERRAINE EN LIGNE EN CORRESPONDANCE AVEC LA GARE DE CANNES CENTRE ACTUELLE »

La longueur du tunnel est d'environ 26 km, avec d'Est en Ouest :

- un premier tronçon (9 km environ) où le tunnel est sous forte couverture, et en descente progressive sous le niveau de la nappe de la Siagne ;
- un second tronçon (7 km environ), dans le secteur central de Cannes, comprenant deux traversées de zones de mauvais terrains situés sous la nappe, et dans une zone avec de nombreuses constructions en surface. Même si l'on rencontre du rocher, il est, selon toute vraisemblance, creusé par des sillons transversaux. D'après les premières informations obtenues, il semble que beaucoup de bâtiments soient fondés sur des pieux de longueur d'au moins 15 à 20 m ;
- un troisième tronçon (10 km environ) de couverture importante.

### 5.6.1 Solution technique

Pour les raisons exposées au paragraphe précédent (contraintes des fondations profondes en zone centrale), il est probable, à ce stade des études, que le profil en long devrait se situer à 40 ou 50 m sous le niveau du TN de la ville de Cannes.

Le tunnel serait un bi-tube ; les longueurs de tunnels situés sous la Siagne et sous la ville de Cannes seraient réalisées au tunnelier à pression de boue pour limiter et contrôler les tassements sous les bâtiments (couverture d'au moins 10 m entre les pointes de pieux de fondation des bâtiments et la clé du tunnel). Il est recommandé de ne pas réaliser plus de 4 ou 5 km de tunnel, à partir de la station de traitement des boues, lorsque l'on utilise un tunnelier à pression de boue.

On peut donc imaginer de réaliser un puits de démarrage et d'installation du tunnelier à pression de boue, à l'extrémité Ouest de ce tronçon central (diamètre de 18 m, profondeur 40 à 50 m) avec sa galerie de recul pour installation de 60 à 80 m, de faire progresser le tunnelier jusqu'au puits relais de 10 m de diamètre et de 50 à 60 m de profondeur installé avec une nouvelle station de boue à 4,5 km plus à l'Est environ.

Le tunnelier progressera alors jusqu'à son puits de sortie, à l'extrémité Est du tronçon central, à 2,5 km environ du puits relais (18 m de diamètre, 80 m de profondeur).

Le premier et le dernier tronçon du tunnel seraient réalisés avec des tunneliers classiques.

Si les problèmes pour implanter des puits sont impossibles à résoudre, on peut aussi songer à utiliser des tunneliers du type de celui de SOCATOP qui peuvent se mettre en configuration pression de terre (pour lequel le transport des déblais peut se faire par convoyeur à bande ou par train) ou en configuration pression de boue (pour lequel le transport des déblais se fait par entraînement dans la boue de bentonite dans des conduites). On peut, dans ce cas, réduire ou supprimer le dernier puits, mais le planning s'allonge, du fait du plus grand linéaire à accomplir avec ce tunnelier.

### 5.6.2 Estimation des coûts (hors gare souterraine)

Nous nous inspirons des coûts constatés au métro de Toulouse où des tunneliers à pression de boue (certes de plus petits diamètres) ont été utilisés :

- 3 puits = 50 M€,
- 5 km à 90 k€/ml,
- 18 km à 60 k€/ml,

ce qui conduit (hors gare souterraine et ses connections avec la gare existante) à :

|            |                             |                    |
|------------|-----------------------------|--------------------|
| GC Tunnel  | 8 km x 90 M€ / km           | 720 M€             |
|            | 18 km x 60 M€ / km          | 1 080 M€           |
| 3 puits    | 50 M€                       | 50 M€              |
| Têtes      | 2 x 5.9                     | 12 M€              |
| Equipement | 0.6 x 2 + 26 km x 3.2 M€/km | 84 M€              |
|            | TOTAL HORS SAV              | 1 946 M€           |
|            | SAV + PAI 15 %              | 294 M€             |
|            | TOTAL TRAVAUX               | 2 240 M€           |
|            | MOA + MOE 12 %              | 269 M€             |
|            | <b>TOTAL</b>                | <b>2 509 M€ HT</b> |

## 6. ESTIMATIONS DES DIFFÉRENTS TUNNELS

### 6.1 RESULTATS DETAILLES PAR SCENARIOS

Le tableau estimatif suivant donne pour les différents tunnels regroupés par section élémentaire leur estimation établie en géologie « probable » ainsi que la fourchette « géologie normale » - « géologie mauvaise », selon les principes énoncés au § 5 du rapport.

Il distingue les coûts de génie civil et d'équipements, les ouvrages de sécurité, les sommes à valoir, les frais de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage, les provisions pour risques.

LGV PACA - Etudes complémentaires suite au Débat Public

MISSION D'EXPERTISE SUR LES TUNNELS - MEMOIRE

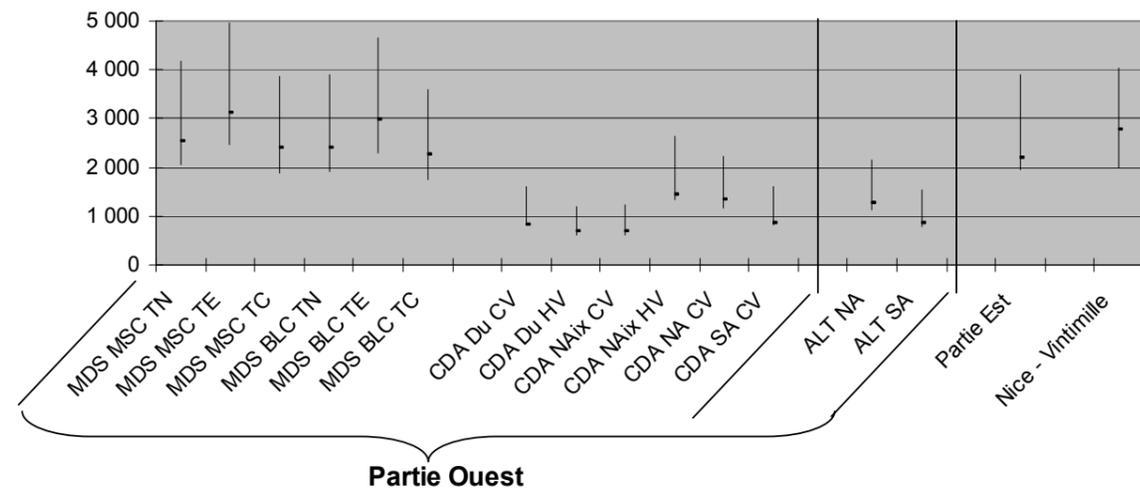
|  | PARTIE OUEST  |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               |                                |                                  |  |                                      |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 | PARTIE EST      |                |                |                 |                 |                 |                                    |                 |  |  |
|--|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|-----------------|--|--|
|  | CA 10 - CA 70 | CA 70 - CA 80 | CA 80 - CA 90 | CA 90 - CA 100 | CA 70 - CA 100 | CA 20 - CA 50 | CA 50 - CA 80 | CA 50 - CA 70 | CA 30 - CA 60 | CA 60 - CA 80 | CA 40 - CA 60 | MDS 10 - MDS 55 par MSC bitube | MDS 10 - MDS 55 par MSC monotube | MDS 10 - MDS 55 par Blancarde monotube | MDS 10 - MDS 55 par Blancarde bitube | MDS 55 - MDS 60 | MDS 60 - MDS 75 | MDS 75 - CA 85 via Toulon Nord | MDS 75 - CA 85 via Toulon Centre | CA 85 - CA 90 | MDS 75 - MDS 115 par Toulon Est | MDS 115 - CA 85 par Toulon Est | CA 30 - ALT 50 | ALT 50 - ALT 60 | ALT 60 - ALT 85 | ALT 85 - CA 90 | CA 40 - ALT 55 | ALT 55 - ALT 60 | CA 100 - EV 110 | EV 110 - EV 115 | EV 120 - EV 130 avec gare à Monaco | EV 110 - EV 125 |  |  |
| <b>Montant total ouvrages souterrains</b>    | 512           |               | 321           | 695            |                |               | 356           | 755           | 994           |               | 530           | 1 431                          | 1 184                            | 1 054                                  | 1 241                                |                 | 347             | 629                            | 500                              | 47            | 1 145                           | 60                             | 396            | 322             |                 | 240            | 297            |                 | 1 931           | 245             | 2 757                              | 1 531           |  |  |
| <b>Détail du coût tunnels</b>                | 512           |               | 321           | 695            |                |               | 356           | 755           | 994           |               | 530           | 906                            | 676                              | 512                                    | 684                                  |                 | 347             | 629                            | 500                              | 47            | 1 145                           | 60                             | 396            | 322             |                 | 240            | 297            |                 | 1 492           | 245             | 2 206                              | 1 531           |  |  |
| <b>Dont</b>                                  |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               |                                |                                  |  |                                      |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 |                 |                 |                                    |                 |  |  |
| <b>Tunnels principaux</b>                    | 381           |               | 232           | 497            |                |               | 252           | 558           | 735           |               | 362           | 677                            | 463                              | 355                                    | 511                                  |                 | 256             | 462                            | 355                              | 35            | 850                             | 45                             | 288            | 241             |                 | 176            | 199            |                 | 1 113           | 183             | 1 646                              | 1 144           |  |  |
| Génie Civil linéaire                         | 281           |               | 157           | 350            |                |               | 170           | 441           | 589           |               | 259           | 560                            | 377                              | 287                                    | 420                                  |                 | 185             | 335                            | 266                              | 21            | 663                             | 31                             | 224            | 182             |                 | 117            | 140            |                 | 853             | 112             | 1 369                              | 915             |  |  |
| Génie Civil fixe                             | 32            |               | 48            | 86             |                |               | 48            | 23            | 35            |               | 48            | 25                             | 23                               | 23                                     | 25                                   |                 | 38              | 63                             | 48                               | 10            | 76                              | 10                             | 22             | 25              |                 | 38             | 29             |                 | 92              | 48              | 64                                 | 87              |  |  |
| Equipements de sécurité non ferroviaires     | 26            |               | 10            | 21             |                |               | 12            | 35            | 42            |               | 19            | 35                             | 22                               | 16                                     | 25                                   |                 | 11              | 24                             | 14                               | 2             | 42                              | 2                              | 16             | 13              |                 | 7              | 11             |                 | 64              | 8               | 82                                 | 54              |  |  |
| Equipements ferroviaires                     | 42            |               | 18            | 39             |                |               | 22            | 58            | 69            |               | 36            | 56                             | 41                               | 29                                     | 40                                   |                 | 21              | 40                             | 26                               | 3             | 69                              | 3                              | 26             | 21              |                 | 13             | 20             |                 | 104             | 14              | 132                                | 88              |  |  |
| <b>Sorties de secours équipées</b>           | 3             |               | 9             | 26             |                |               | 16            | 8             | 8             |               | 37            |                                | 43                               | 28                                     |                                      |                 | 5               | 10                             | 20                               | 0             | 7                               |                                | 8              |                 |                 | 5              | 26             |                 | 5               | 2               |                                    |                 |  |  |
| <b>SAV</b>                                   | 38            |               | 24            | 52             |                |               | 27            | 57            | 74            |               | 40            | 68                             | 51                               | 38                                     | 51                                   |                 | 26              | 47                             | 37                               | 4             | 86                              | 5                              | 30             | 24              |                 | 18             | 22             |                 | 112             | 18              | 165                                | 114             |  |  |
| <b>MOE / MO</b>                              | 51            |               | 32            | 69             |                |               | 35            | 75            | 98            |               | 53            | 89                             | 67                               | 51                                     | 67                                   |                 | 34              | 62                             | 49                               | 5             | 113                             | 6                              | 39             | 32              |                 | 24             | 30             |                 | 148             | 24              | 217                                | 151             |  |  |
| <b>PRI</b>                                   | 38            |               | 23            | 51             |                |               | 26            | 58            | 78            |               | 38            | 73                             | 52                               | 39                                     | 55                                   |                 | 26              | 47                             | 38                               | 3             | 89                              | 5                              | 30             | 25              |                 | 18             | 21             |                 | 115             | 17              | 178                                | 121             |  |  |
| <b>Distinction tunnels monotube / bitube</b> |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               |                                |                                  |  |                                      |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 |                 |                 |                                    |                 |  |  |
| <b>Tunnels monotube</b>                      |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               |                                |                                  |  |                                      |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 |                 |                 |                                    |                 |  |  |
| Coût   | 97            |               | 139           | 695            |                |               | 356           | 123           | 114           |               | 530           |                                | 618                              | 453                                    |                                      | 347             | 306             | 500                            | 137                              | 274           | 60                              | 114                            |                |                 |                 | 240            | 297            |                 | 129             | 245             |                                    |                 |  |  |
| Longueur                                     | 1 700         |               | 4 755         | 10 670         |                |               | 5 931         | 2 203         | 1 758         |               | 9 711         |                                | 10 435                           | 7 250                                  |                                      | 5 580           | 4 890           | 7 050                          | 2 157                            | 3 751         | 820                             | 1 758                          |                |                 |                 | 3 543          | 5 292          |                 | 1 869           | 3 830           |                                    |                 |  |  |
| <b>Tunnels bitube</b>                        |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               |                                |                                  |  |                                      |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 |                 |                 |                                    |                 |  |  |
| Coût   | 415           |               |               |                |                |               | 632           | 880           |               |               | 908           | 58                             | 58                               | 685                                    |                                      |                 | 323             |                                |                                  | 872           |                                 | 282                            | 322            |                 |                 |                |                |                 | 1 363           |                 | 2 206                              | 2 622           |  |  |
| Longueur                                     | 7 000         |               |               |                |                |               | 9 700         | 12 100        |               |               | 10 935        | 500                            | 500                              | 7 750                                  |                                      |                 | 4 290           |                                |                                  | 10 660        |                                 | 3 800                          | 4 144          |                 |                 |                |                | 18 130          |                 | 25 475          | 17 017                             |                 |  |  |
| <b>Longueur totale</b>                       | 8 700         |               | 4 755         | 10 670         |                |               | 5 931         | 11 903        | 13 858        |               | 9 711         | 10 935                         | 10 935                           | 7 750                                  | 7 750                                |                 | 5 580           | 9 180                          | 7 050                            | 2 157         | 14 411                          | 820                            | 5 558          | 4 144           |                 | 3 543          | 5 292          | 19 999          | 3 830           | 25 475          | 17 017                             |                 |  |  |
| <b>Coût gare souterraines</b>                |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               | 525                            | 508                              | 543                                    | 557                                  |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 |                 | 439             |                                    | 552             |  |  |
| <b>Ouvrages d'embranchement</b>              |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               | 389                            | 376                              | 401                                    | 412                                  |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 | 326             |                 | 409                                |                 |  |  |
| Génie Civil linéaire                         |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               | 373                            | 365                              | 390                                    | 397                                  |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 | 310             |                 | 393                                |                 |  |  |
| Equipements ferroviaires                     |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               | 15                             | 11                               | 11                                     | 15                                   |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 | 15              |                 | 15                                 |                 |  |  |
| <b>SAV</b>                                   |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               | 39                             | 38                               | 40                                     | 41                                   |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 | 33              |                 | 41                                 |                 |  |  |
| <b>MOE / MO</b>                              |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               | 51                             | 50                               | 53                                     | 54                                   |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 | 43              |                 | 54                                 |                 |  |  |
| <b>PRI</b>                                   |               |               |               |                |                |               |               |               |               |               |               | 46                             | 45                               | 48                                     | 49                                   |                 |                 |                                |                                  |               |                                 |                                |                |                 |                 |                |                |                 | 38              |                 | 48                                 |                 |  |  |

6.2 GRAPHIQUES SITUANT LE COUT PROBABLE DANS LA FOURCHETTE [GEOLOGIE NORMALE – GEOLOGIE MAUVAISE]

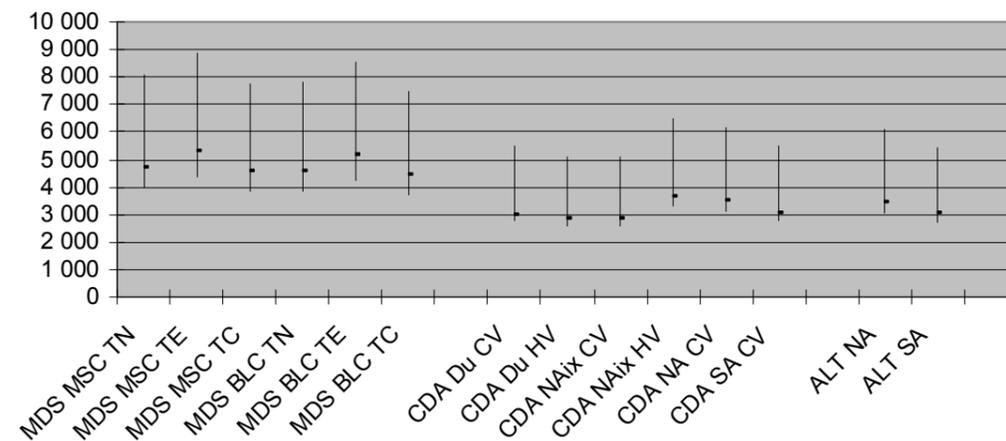
|  | Coût des ouvrages souterrains                  | Fourchette des estimations haute et basse |                     |                                   |     |
|--|--|---|---------------------|-----------------------------------|-----|
|  |  | Géologie "normale"                        | Géologie "mauvaise" | Situation probable / fourchette * |     |
| MDS                                    | Marseille St Charles - Nord Toulon             | 4 710                                     | 4 000               | 8 080                             | 17% |
|  | Marseille St Charles - Toulon Est              | 5 280                                     | 4 400               | 8 850                             | 20% |
|  | Marseille St Charles - Toulon Centre           | 4 580                                     | 3 830               | 7 770                             | 19% |
|  | Marseille La Blancarde - Nord Toulon           | 4 570                                     | 3 850               | 7 790                             | 18% |
|  | Marseille La Blancarde - Toulon Est            | 5 150                                     | 4 250               | 8 550                             | 21% |
| Marseille La Blancarde - Toulon Centre | 4 440  | 3 680                                     | 7 470               | 20%                               |     |
| CA                                     | Durance - Centre Var                           | 3 010                                     | 2 770               | 5 500                             | 9%  |
|  | Durance - Haut Var                             | 2 870                                     | 2 550               | 5 090                             | 13% |
|  | Nord Aix - Centre Var                          | 2 850                                     | 2 570               | 5 110                             | 11% |
|  | Nord Aix - Haut Var                            | 3 630                                     | 3 280               | 6 520                             | 11% |
|  | Nord Arbois - Centre Var                       | 3 490                                     | 3 090               | 6 130                             | 13% |
|  | Sud Arbois - Centre Var                        | 3 030                                     | 2 760               | 5 510                             | 10% |
| ALT                                    | Nord Arbois - Gardanne -Brignoles - Centre Var | 3 460                                     | 3 070               | 6 060                             | 13% |
|  | Sud Arbois - Gardanne -Brignoles - Centre Var  | 3 040                                     | 2 740               | 5 440                             | 11% |
| Prolongement Nice-St-Roch -Vintimille  |  | 2 760                                     | 2 000               | 4 050                             | 37% |

\* : rapport ["probable" - "normale"] / ["mauvaise" - "probable"]

Montant retenu (géologie probable)  
par rapport aux géologies "normales" et "mauvaises"  
Partie Ouest (jusqu'à Est Var)  
+ partie Est (Est Var - PK 211)  
+ prolongement Nice-Vintimille



Montant retenu (géologie probable)  
par rapport aux géologies "normales" et "mauvaises"  
scénarios jusqu'au PK 211



7. NOTES PARTICULIERES

7.1 SYNTHESE DES RATIOS UTILISES POUR LES ESTIMATIONS

Ratio de coût du GC linéaire moyens par section élémentaire  
 (c.e. 01-05, monotube 85 m² de section d'air, coûts  
 y.c. frais généraux mais hors SAV, hors MOE / MO et hors PRI) :

| Section élémentaire                      | Coût en M€ / km c.e. 01-05 |
|--|----------------------------|
| CA 10 - CA 70                            |                            |
| CA 70 - CA 80                            | 24,8                       |
| CA 80 - CA 90                            | 33,0                       |
| CA 90 - CA 100                           | 31,4                       |
| CA 70 - CA 100                           | 33,1                       |
| CA 20 - CA 50                            |                            |
| CA 50 - CA 80                            | 28,7                       |
| CA 50 - CA 70                            | 28,7                       |
| CA 30 - CA 60                            | 32,7                       |
| CA 60 - CA 80                            |                            |
| CA 40 - CA 60                            | 26,9                       |
| MDS 10 - MDS 55 par MSC                  | 38,6                       |
| MDS 10 - MDS 55 par Blancarde            | 41,3                       |
| MDS 55 - MDS 60                          | 36,1                       |
| MDS 60 - MDS 75                          | 36,1                       |
| MDS 75 - CA 85 via Toulon Nord           | 31,4                       |
| MDS 75 - CA 85 via Toulon Centre         | 37,8                       |
| CA 85 - CA 90                            | 26,4                       |
| MDS 75 - MDS 115 par Toulon Est          | 37,1                       |
| MDS 115 - CA 85 par Toulon Est           | 37,8                       |
| CA 30 - ALT 50                           | 32,7                       |
| ALT 50 - ALT 60                          | 32,7                       |
| ALT 60 - ALT 85                          |                            |
| ALT 85 - CA 90                           | 35,7                       |
| CA 40 - ALT 55                           | 26,9                       |
| ALT 55 - ALT 60                          |                            |
| CA 100 - EV 110                          | 31,4                       |
| EV 110 - EV 115                          | 31,4                       |
| EV 115 - EV 120                          |                            |
| EV 120 - EV 125                          | 40,9                       |
| EV 125 - EV 130                          | 40,9                       |
| EV 125 - EV 130 - Variante               | 40,9                       |
| EV 110 - EV 125                          | 36,8                       |
| Centre Var - Nord Toulon                 | 34,6                       |
| EV 120 - EV125 + EV 125 - EV130          | 40,9                       |
| EV 120 - EV125 + EV 125 - EV130 Variante | 40,9                       |
| EV 110-125 +EV 125 - EV130               | 40,9                       |

Coefficients de réduction pour des tunnels monotube  
 de section d'air réduites par rapport à 85 m² :

|       |                            |     |
|-------|----------------------------|-----|
| 71 m² | Coefficient réducteur de : | 92% |
| 63 m² |                            | 87% |

Coefficients Bitube / monotube : variation du ratio linéaire  
 entre les deux cas de géologie "normale" et "mauvaise" définies comme suit :

|                 |     |
|-----------------|-----|
| geol "normale"  | 36% |
| geol "mauvaise" | 25% |

Taux de SAV, PRI et MOE / MO :

|               |     |   |
|---------------|-----|---|
| Taux SAV      | 10% |   |
| Taux PRI      | 10% | sur le GC linéaire                                |
|               | 5%  | sur les autres postes (sauf les équipements fer.) |
| Taux MOE / MO | 12% |   |

Les autres prix unitaires de Génie Civil sont fixés à partir des ratios suivant, par extrapolation linéaire entre les cas de "Bon terrain" et de "mauvais terrain" sur la base des hypothèses suivantes pour les ratios de GC linéaire / km (c.e. 01-05, monotube 85 m² de section d'air, coûts y.c. frais généraux mais hors SAV, hors MOE / MO et hors PRI) :

- ratios indiqués supra pour le cas probable
- 28 8 euros / km en "Bon terrain"
- 58 M euros / km en "Mauvais terrain"

|                        | Tunnel     | Têtes du tunnel + parking | Zone de connection au tunnel (PMR) | Ouvrages de débranchement au niveau des gares souterraines |
|------------------------|------------|---------------------------|------------------------------------|--|
| <b>Bon terrain</b>     |            |                           |                                    |  |
| monotube               |            | 4,5 M€                    |                                    | 272 M€   |
| galerie d'accès l<500m | 8,2 k€/ml  | 0,3 M€                    | 0,45 M€                            |  |
| galerie d'accès l>500m | 21,0 k€/ml | 0,3 M€                    |                                    |  |
| puits                  | 55,0 k€/ml | 0,5 M€                    | 0,56 M€                            |  |
| bitube                 |            | 5,9 M€                    |                                    | 286 M€   |
| <b>Mauvais terrain</b> |            |                           |                                    |  |
| monotube               |            | 4,5 M€                    |                                    | 536 M€   |
| galerie d'accès l<500m | 11,5 k€/ml | 0,3 M€                    | 0,65 M€                            |  |
| galerie d'accès l>500m | 31,2 k€/ml | 0,3 M€                    |                                    |  |
| puits                  | 88,0 k€/ml | 0,5 M€                    | 0,90 M€                            |  |
| bitube                 |            | 5,9 M€                    |                                    | 559 M€   |

Equipements et ouvrages singuliers :

|                    |           |
|--------------------|-----------|
| réservoir incendie | 0,60 M€   |
| piste d'accès      | 1,0 k€/ml |

équipements de sécurité non ferroviaires

|                         | Equipements de sécurité fixes | Equipements de sécurité linéaires |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| monotube                |                               | 2,0 k€/ml                         |
| bitubes                 |                               | 3,2 k€/ml                         |
| galeries d'accès l<500m | 0,4 M€                        | 1,0 k€/ml                         |
| galeries d'accès l>500m | 0,6 M€                        | 1,0 k€/ml                         |
| Puits avec ascenseur    | 0,95 M€                       |                                   |

Equipements ferroviaires :

| Tunnels monotube    | M€ / km     |
|---------------------|-------------|
| Voie                | 2,24        |
| Signalisation       | 0,50        |
| Energie de Traction | 0,75        |
| Télécommunications  | 0,20        |
| <b>TOTAL</b>        | <b>3,69</b> |

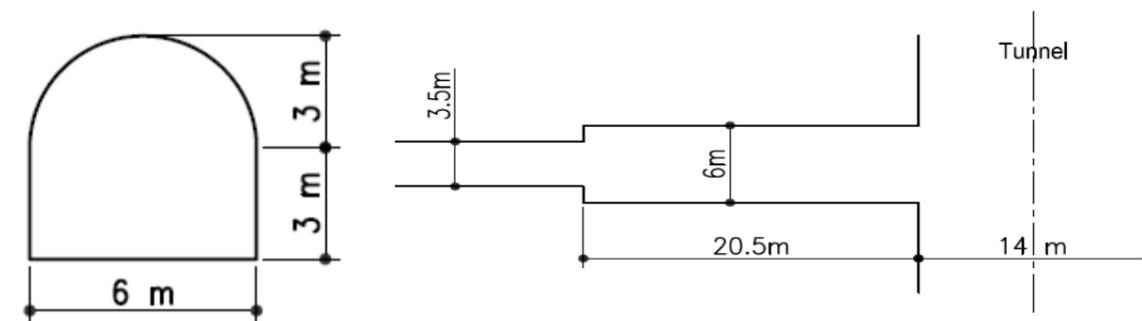
Tunnels bitube : application d'un facteur 1,4 sur les ratios précédents

**7.2 COUT D'UNE GALERIE D'EVACUATION ET DE SES ACCES DE LONGUEUR INFERIEURE A 500 M**

**7.2.1 Caractéristiques géométriques et coûts unitaires**

L'estimation est faite avec les hypothèses suivantes :

- Espace de repos des PMR, au départ de la galerie



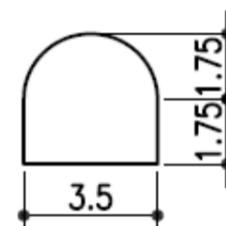
Profil d'excavation  
Section excavée 32 m<sup>2</sup>

Vue en plan (excavation)  
Volume excavé : 653 m<sup>3</sup>

Périmètre de l'excavation (hors radier) : 15,5 m

- Coût : excavation :  $656 \text{ m}^3 \times 500 \text{ €/m}^3 = 328 \text{ K€}$  terrain normal  
 $800 \text{ €/m}^3 = 525 \text{ K€}$  mauvais
- béton :  $15,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \times 20,5 \text{ m} \times 400 \text{ €/m}^3 = 64 \text{ K€}$   
voûte périm. Epaisseur long
- béton radier :  $6 \text{ m} \times 20,5 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \times 250 \text{ €/m}^3 = 12 \text{ K€}$
- Total GC espace repos PMR  $328 + 64 + 12 = 404 \text{ K€}$  bon terrain  
 $525 + 64 + 12 = 600 \text{ K€}$  mauvais terrain

- Galerie en section courante



Section excavée : 11 m<sup>2</sup>  
Périmètre (hors radier) : 9 m<sup>2</sup>

Profil d'excavation

- Coût au ml :
  - excavation :  $1 \text{ m} \times 11 \text{ m}^2 \times 900 \text{ €/m}^3 = 9,9 \text{ K€/ml}$  mauvais terrain  
 $1 \text{ m} \times 11 \text{ m}^2 \times 600 \text{ €/m}^3 = 6,6 \text{ K€/ml}$  bon terrain
  - béton (hors radier) :  $1 \text{ m} \times 9 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \times 400 = 1,44 \text{ K€/ml}$
  - béton radier :  $3,5 \text{ m} \times 0,4 \text{ m} \times 250 = 0,35 \text{ K€/ml}$

Total GC galerie par ml :  $6,6 + 1,44 + 0,35 = 8,4 \text{ K€/ml}$  bon  
 $9,9 + 1,44 + 0,35 = 11,7 \text{ K€/ml}$  mauvais

**7.2.2 Exemple de coût d'une galerie de 500 m (hors tête)**

|                           | Terrain normal  | Mauvais         |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Espace repos PMR          | 404 K€          | 600 K€          |
| Galerie 500 x 8,4<br>11,7 | 4 200 K€        | 5 900 K€        |
| <b>Total GC</b>           | <b>4 600 k€</b> | <b>6 500 K€</b> |

**7.2.3 Piste d'accès et aires de tête**

- safe area + parking de secours revêtu  
 $(500 \text{ m} + 1000 \text{ m}^2) \times 100 \text{ €/m}^2 = 150 \text{ K€}$
- piste d'accès carrossable : 1 K€/ml

Exemple d'une piste de 500 m :

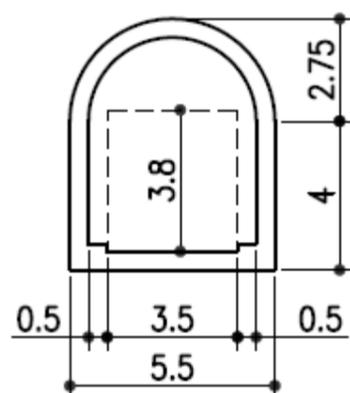
aires : 150 K€  
piste 500 X 1 K€ : 500 K€  
Total 650 K€

**7.2.4 Exemple d'une galerie de 500 m avec piste d'accès de 500 m**

|                                | Terrain normal               | Mauvais                      |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Galerie                        | 4 600 K€                     | 6 500 K€                     |
| Ouvrage de tête et local tech. | 150 K€                       | 150 K€                       |
| Aires et piste                 | 650 K€                       | 650 K€                       |
| <b>Total GC</b>                | <b>5 400 k€<br/>= 5,4 M€</b> | <b>7 300 K€<br/>= 7,3 M€</b> |

**7.3.2 Exemple de coût de galerie de 600 m de longueur (dont 10 m de galerie de retournement) et de son accès de 500 m**

|                                     | Terrain normal                 | Mauvais                        |
|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Galerie 600 m x 20,9 K€/m<br>x 31,1 | 12 540 K€                      | 18 660 K€                      |
| Ouvrage de tête et local tech.      | 200 K€                         | 200 K€                         |
| Aires et piste                      | 650 K€                         | 650 K€                         |
| <b>Total GC</b>                     | <b>13 390 k€<br/>= 13,4 M€</b> | <b>19 510 K€<br/>= 19,5 M€</b> |

**7.3 COUT D'UNE GALERIE D'EVACUATION DE LONGUEUR SUPERIEURE A 500 M AVEC SES ACCES****Caractéristiques géométriques**

Section excavée :  
 $4 \times 5,5 + \frac{1}{2} \pi \times 2,75^2 = 34 \text{ m}^2$

Périmètre hors radier  
 $8 + \pi \times 2,75 = 16,6 \text{ m}$

**7.3.1 Coût galerie au ml**

- Excavation :  $34 \text{ m}^3 \times 500 \text{ €/m}^3 = 17 \text{ K€/ml}$  bon terrain  
 $\times 800 \text{ €/m}^3 = 27,2 \text{ K€/ml}$  mauvais terrain
- Béton voûte :  $16,6 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \times 400 \text{ €/m}^3 = 3,32 \text{ K€/ml}$   
épaisseur
- Radier :  $5,5 \text{ m} \times 0,4 \times 250 \text{ €/m}^3 = 0,55 \text{ K€/ml}$
- Total  $17 + 3,32 + 0,55 = 20,9 \text{ K€/ml}$  bon terrain  
 $27,2 + 3,32 + 0,55 = 31,1 \text{ K€/ml}$  mauvais terrain

**7.4 PUIS VERTICAL DE SECOURS ET D'EVACUATION**

Lorsque le terrain naturel, au voisinage du tunnel, se trouve à une hauteur de moins de 30 m au dessus de la voie ferrée, il est possible d'utiliser un puits vertical et des escaliers pour évacuer les passagers ou permettre aux services de secours d'accéder au tunnel.

**7.4.1 Géométrie du puits**

Dans l'hypothèse d'un puits rectangulaire, la longueur intérieure doit permettre de disposer 8 marches de 30 cm de largeur et de 16 cm en hauteur, et 2 paliers. Bien que la largeur des escaliers soit de 1,5 m, il est prudent de disposer des paliers de 2 m de large pour permettre aux porteurs de brancards de manœuvrer facilement pour tourner à 90°.

La longueur intérieure du puits sera donc de  $7 \times 0,3 \text{ m} + 2 \times 2 \text{ m} = 6,1 \text{ m}$ . La largeur du puits est celle de 2 volées de 1,5 m de largeur + les garde-corps, plus un trou réglementaire de 1 m de large (par 2 m de long) pour permettre aux pompiers de descendre ou monter du matériel jusqu'à 50 kg, en utilisant une poulie présente sur place et des cordages qu'ils apportent.

La largeur intérieure du puits est donc au minimum  $2 \times (1,5 + 0,2) + 1 = 4,4 \text{ m}$  conduisant à une section de  $4,4 \times 6,1 \text{ m}$ .

Pour ne pas être trop étriqué et permettre de disposer quelques équipements, on retiendra une dimension intérieure de  $5 \times 7 \text{ m}$ .

**7.4.2 Soutènement**

Dans un terrain normal, le soutènement sera constitué par des cadres métalliques rectangulaires horizontaux avec un montant intermédiaire ou par deux cadres sans diagonales juxtaposés. Sur la paroi verticale, entre 2 cadres, on réalisera du béton projeté, précédé ou non de planchettes métalliques verticales.

Si l'on considère que le soutènement occupe une épaisseur de 30 cm et le revêtement définitif, éventuellement armé, une épaisseur de 35 cm, la section excavée sera de  $7 + 2(0,3 + 0,35) = 8,30 \text{ m}$  de longueur, par  $5 + 2(0,3 + 0,35) = 6,30 \text{ m}$  de largeur.

A noter que, dans les terrains comportant une nappe d'eau, la condition de non-flottabilité peut conduire à augmenter les quantités de béton, pour avoir un poids suffisant de structure.

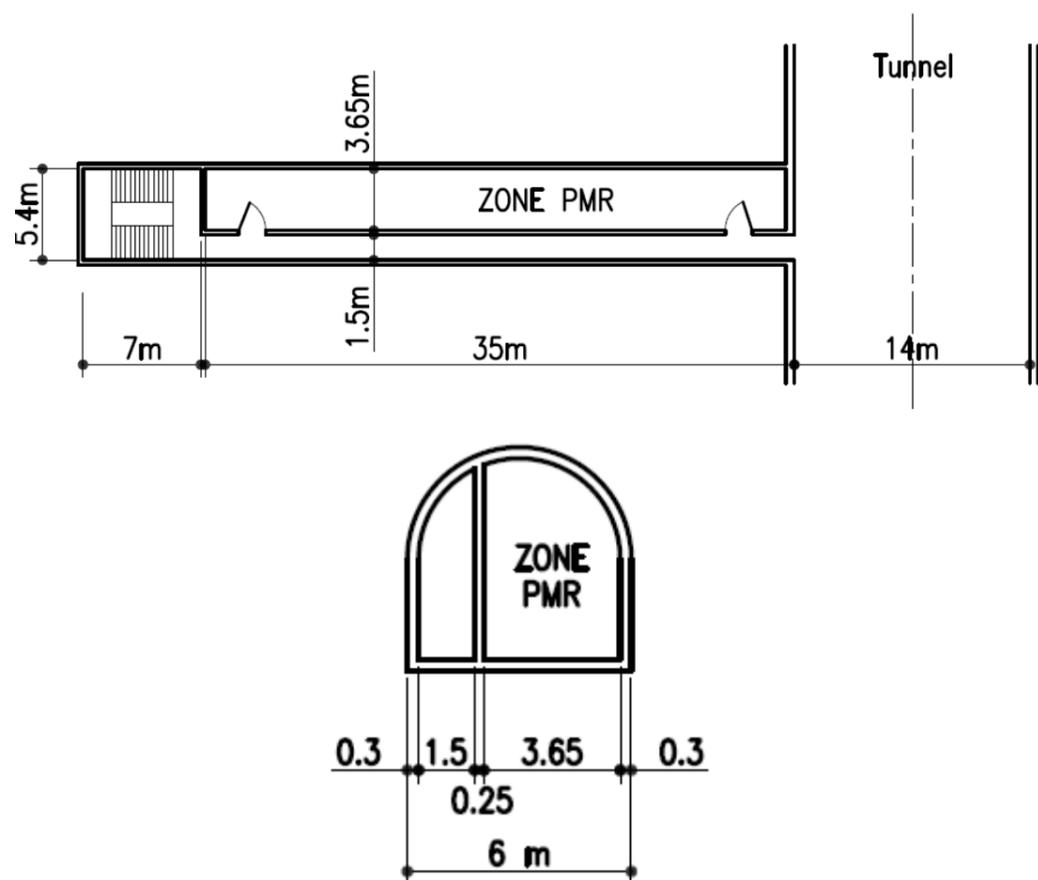
Dans les mauvais terrains, on aura intérêt à réaliser un puits circulaire à l'intérieur d'un anneau en parois moulées de 9,2 à 9,5 m de diamètre intérieur.

Dans les 2 cas, le creusement du puits est précédé d'injections pour étancher le terrain, sur l'ensemble des zones humides, en terrain normal et sous le fond du puits, dans le cas d'enceinte en parois moulées.

### 7.4.3 Zone des PMR

Une zone de 100 m<sup>2</sup> située entre le tunnel et la base du puits est encore plus indispensable que dans le cas des galeries, pour permettre aux personnes à mobilité réduite d'attendre, dans une zone en surpression d'air frais, qu'on vienne les chercher pour les aider ou les porter, jusqu'en haut des escaliers.

Dans le cas présent, il est souhaitable d'organiser cette zone comme un abri ventilé, dont la porte est fermée, disposée à côté du couloir où circulent les personnes valides. La ventilation sera amenée par un conduit spécial, passant dans un coin du puits, alimentée en AF par un ventilateur situé en haut du puits, qui prend l'air à l'extérieur.



### 7.4.4 Estimation des coûts de génie civil

- GC Zone PMR + couloir circulation :
  - excavation :  $35 \text{ m} \times 32 \text{ m}^2 \times 500 \text{ €} / \text{m}^3 = 0,56 \text{ M€}$  bon terrain
  - $800 \text{ €} / \text{m}^3 = 0,9 \text{ M€}$  mauvais terrain
  - béton : 0,13 M€
  
- Puits :
  - Excavation et soutènement en terrain normal  $8,3 \times 6,3 \times 300 \text{ €} / \text{m}^3 = 15\,700 \text{ €/ml}$
  - Béton-armatures  $20 \text{ m}^3 \times 800 \text{ €} / \text{m}^3 = 16\,000 \text{ €/ml}$
  - soit au total :  $15,7 + 16 = 31,7 \text{ k€/ml}$
  - Excavation et soutènement du puits en mauvais terrain : rajouter 20 k€/ml aux chiffres précédents
  
  - GC ouvrages de têtes et local technique : 0,25 M€
  - Parking de secours et safe area : 0,15 M€
  - Piste d'accès : 1 k€/ml

Exemple : puits de 30 m débouchant en ville (pas de parking, ni safe area extérieure, ni piste d'accès)

|                             | Bon terrain    | Mauvais terrain |
|-----------------------------|----------------|-----------------|
| Zone PMR et couloir         | 0,69 M€        | 1,03 M€         |
| GC puits : 30 m x 31,7 k€/m | 0,95 M€        |                 |
| 30 m x 51,7 k€/m            |                | 1,55 M€         |
| GC ouvrage de tête          | 0,25 M€        | 0,25 M€         |
| <b>Total brut (HT)</b>      | <b>1,89 M€</b> | <b>2,83 M€</b>  |

### 7.5 PUIS VERTICAL DE SECOURS ET D'EVACUATION DE PLUS DE 30 M DE HAUTEUR

Lorsque le débouché du puits se trouve en ville, on peut accepter d'évacuer les passagers par des puits dont la hauteur dépasse 30 m pour atteindre 50 à 55 m.

Pour ces hauteurs, un ascenseur est obligatoire pour évacuer les PMR et les brancards.

En ville, on peut en effet, imaginer que le maintien en fonctionnement d'un puits rarement utilisé est possible sans frais excessifs, car les équipes d'entretien ont, en général, d'autres ascenseurs à entretenir dans le même secteur.

Les usagers en bonne santé arrivent à monter les escaliers (hauteur équivalente à une quinzaine d'étages) pourvu qu'ils puissent se reposer sur les paliers régulièrement disposés.

### 7.5.1 Géométrie du puits

Par rapport au puits de 30 m, la section est un peu agrandie car il faut disposer un ascenseur dont la section intérieure soit d'au moins 2,7 x 2 m, soit un vide de 3,5 m x 3 m.

La section intérieure du puits sera d'au moins 7 x 8 m ; elle sera inscrite dans une section circulaire de 10,7 m de diamètre intérieur, car, pour ces profondeurs, il est prudent de concevoir une excavation et un revêtement à section circulaire.

La zone d'abri pour les PMR sera semblable à celle prévue pour les puits de 30 m au moins.

### 7.5.2 Estimation des coûts de génie civil

- zone PMR + couloir : idem puits de 30 m, soit 0,69 M € en bon terrain et 1,03 M € en mauvais terrain,
- puits : 55 K € / ml en bon terrain, 88 K € / ml en mauvais terrain,
- ascenseur : 0,35 M €,
- GC ouvrages de tête et local technique : 0,6 M €,
- autres équipements : idem puits de 30 m.

Exemple - puits de 50 m en ville :

|                          | Bon terrain   | Mauvais terrain |
|--------------------------|---------------|-----------------|
| Zone PMR et couloir      | 0,69 M€       | 1,03 M€         |
| GC puits : 50 m x 55 K € | 2,75 M€       |                 |
| 50 m x 88 K €            |               | 4,4 M€          |
| GC ouvrages de tête      | 0,6           | 0,6             |
| Ascenseur                | 0,35          | 0,35            |
| <b>Total</b>             | <b>4,4 M€</b> | <b>6,4 M€</b>   |

## 7.6 PRINCIPES DE VENTILATION

Pour les tunnels ferroviaires n'accueillant que des voyageurs en TGV, l'ITI et la STI ne prévoient pas de ventilation artificielle dans les tunnels, à l'exception des rameaux des bi-tubes, en cas d'incendie dans 1 des 2 tubes.

Dans le cas des tunnels monotubes, les galeries d'évacuation prévues tous les 1 000 m, par la STI, posent un problème particulier de ventilation qui n'est pas traité par la STI.

En effet, ces galeries d'évacuation sont généralement, ascendantes à 10 % pour avoir la longueur la plus courte possible. De plus, on peut supposer que l'air du tunnel où le train en feu est arrêté, est à une température supérieure à celle de l'extérieur.

Cette différence de température entre l'air du tunnel et l'air extérieur à la sortie de la galerie (située à plusieurs dizaines de mètres au dessus du tunnel) risque de provoquer, lorsque les portes sont ouvertes pour l'évacuation, un effet de tirage qui va amener les fumées de l'incendie dans la galerie où se trouvent les voyageurs en train de s'évacuer à pied.

Un calcul simpliste montre que même en soufflant un débit très important d'air frais dans la galerie, il est impossible de s'opposer au tirage du tunnel vers la galerie.

La seule solution viable et raisonnable est de prévoir une porte entre la galerie et le tunnel et une porte en tête de galerie. Dans ces conditions il suffit qu'une des deux portes soit fermée pour qu'on puisse éviter que les fumées n'envahissent la galerie.

Comme on sait bien qu'un simple sas local ne fonctionnerait pas lorsqu'on évacue 1000 personnes (les portes du sas ne peuvent pas être fermées), on imagine la solution suivante :

- un ventilateur proche de la tête de la galerie et de son local technique souffle de l'air frais pris à l'extérieur et peut soit l'envoyer en tête de galerie, soit jusqu'à proximité du tunnel, par une gaine de 60 cm environ de diamètre,
- au début de l'évacuation, la porte séparant la galerie du tunnel est ouverte, la porte de sortie de galerie est fermée ; le ventilateur envoie en tête de galerie 5 à 6 m<sup>3</sup>/s qui balayent la galerie et repoussent les fumées dans le tunnel. Lorsque tous les passagers ont quitté le tunnel, on ferme la porte entre galerie et tunnel ; on peut alors ouvrir la porte de tête de la galerie et faire sortir tout le monde de la galerie, sauf les PRM qui restent dans la partie basse de la galerie,
- la gaine Ø 0,6 m va permettre, à ce moment, avec le même ventilateur, d'apporter 5 voire 5,5 m<sup>3</sup>/s en bas de la galerie pour ventiler les PMR et balayer la galerie ; le débit est en effet limité par les pertes de charge dans la gaine.

Pour les galeries longues, on peut prévoir une porte supplémentaire à mi-longueur. Cela garantit plus sûrement qu'il y aura toujours une porte fermée, permettant au ventilateur de mettre le bas de la galerie en surpression par rapport au tunnel.