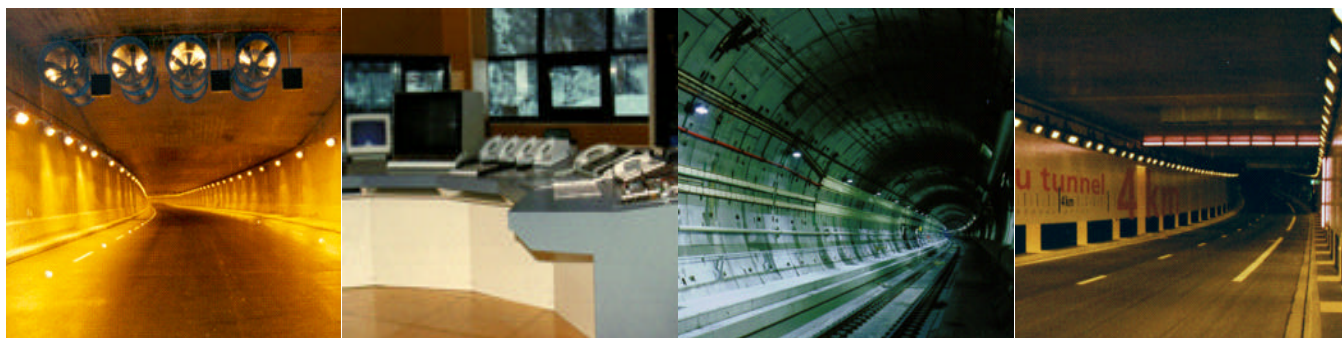


setec tpi



**CRITERES DE CONCEPTION ET DE
DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DE
TUNNELS DE LIGNES A GRANDE
VITESSE**

Etude réalisée pour le compte de :

Réseau Ferré de France

C	17/12/2004	Abo/Cre/Bso/Fdu	JMV/FDu	CBa	Troisième émission
B	29.11.2004	Abo/Cre/Bso/Fdu	JMV/FDu	CBa	Deuxième émission
A	15.11.2004	Abo/Cre/Bso/Fdu	JMV/FDu	CBa	Première émission
Rév	Date	Auteur	Vérificateur	Approbateur	Modifications
Ce document est la propriété de SETEC TPI. Ni copie, ni diffusion sans autorisation					

Sommaire

<u>PRÉAMBULE</u>	5
-------------------------	----------

<u>TEXTES DE RÉFÉRENCE</u>	6
-----------------------------------	----------

<u>CHAPITRE 1 - CONFORMITÉ DES TUNNELS DE LA LGV PACA PAR RAPPORT À L'ITI 98-300 -</u>	7
---	----------

<u>1.</u>	<u>L'Instruction Technique Interministérielle n°98-300</u>	8
<u>1.1.</u>	<u>Présentation</u>	8
<u>1.2.</u>	<u>Objectifs</u>	8
<u>1.3.</u>	<u>Champ d'application</u>	8
<u>1.4.</u>	<u>Synthèse</u>	9
<u>2.</u>	<u>Données d'entrée</u>	11
<u>2.1.</u>	<u>Hypothèses de trafic</u>	11
<u>2.2.</u>	<u>Classes des tunnels</u>	11
<u>2.3.</u>	<u>Définitions de l'ITI 98-300</u>	11
	<u>2.3.1. Ligne urbaine</u>	11
	<u>2.3.2. Ligne voyageur</u>	11
	<u>2.3.3. Ligne mixte</u>	11
	<u>2.3.4. Matériel roulant (extrait de l'ITI 98-300)</u>	12
<u>3.</u>	<u>Application de l'ITI 98-300</u>	13
<u>3.1.</u>	<u>Dispositions communes à tous les tunnels</u>	13
	<u>3.1.1. Génie civil</u>	13
	<u>3.1.2. Equipements généraux de sécurité</u>	14
	<u>3.1.3. Equipements de sécurité ferroviaire</u>	15
<u>3.2.</u>	<u>Dispositions particulières</u>	15
	<u>3.2.1. Tunnels : 800 < L < 5000 mètres</u>	15
	<u>3.2.2. Tunnels : 5 km < L < 10 km</u>	17
	<u>3.2.3. Tunnels : L > 10 km</u>	17
<u>4.</u>	<u>Equipements des tunnels de la LGV PACA au regard des dispositions de l'ITI 98-300</u>	20
<u>4.1.</u>	<u>Tunnels : L < 400 mètres</u>	20
<u>4.2.</u>	<u>Tunnels : 400 < L < 800 mètres</u>	20
<u>4.3.</u>	<u>Tunnels : 800 m < L < 5 km</u>	20
	<u>4.3.1. Dispositions communes</u>	20
	<u>4.3.2. Dispositions particulières</u>	20
<u>4.4.</u>	<u>Tunnels : 5 km < L < 10 km</u>	20



4.4.1.	<i>Dispositions communes</i>	20
4.4.2.	<i>Dispositions particulières</i>	20
4.4.3.	<i>Points particuliers</i>	20
4.5.	Tunnels : L > 10 km	21
5.	Conséquences d'un ouvrage Monotube / Bitube	22
5.1.	Enjeux des tunnels bitubes	22
5.1.1.	<i>Du point de vue de la sécurité des usagers</i>	22
5.1.2.	<i>Du point de vue de la sécurité du personnel</i>	22
5.1.3.	<i>Paramètres influents</i>	22
5.2.	<i>Impacts ouvrage monotube / bitube par rapport à l'ITI 98-300</i>	23
5.3.	Conclusion partielle	23

CHAPITRE 2 - ESTIMATION DU COÛT DES EQUIPEMENTS - 24

6.	Généralités	25
6.1.	Objet du chapitre	25
7.	Méthode d'approche de l'estimation	25
7.1.	Classement des tunnels	25
7.2.	Méthode d'approche de l'estimation	25
7.3.	Définition des installations à mettre en œuvre	26
8.	Estimations	26

CHAPITRE 3 - SECTION GÉOMÉTRIQUE MINIMALE HORS CRITÈRES AÉRODYNAMIQUES ET GABARITS FERROVIAIRES- 28

9.	Objet du chapitre	29
10.	Section type géométrique	29
10.1.	Gabarits ferroviaires	29
10.2.	Entraxe des voies	29
10.3.	Gabarit des trottoirs	30
10.4.	Exploitation des schémas de gabarits types	30

CHAPITRE 4 - DIMENSIONNEMENT DES TUNNELS DE LA LGV PACA EN FONCTION DES CRITÈRES TYMPANIQUES - 32

11.	Description des phénomènes	33
12.	Critères tympaniques	34
13.	Méthodologie de l'étude	34
14.	Hypothèses retenues	35
14.1.	Principes généraux	35
14.2.	Caractéristiques des trains	35
14.2.1.	<i>Étanchéité des wagons</i>	35
14.2.2.	<i>Longueur du convoi</i>	35
14.2.3.	<i>Section transversale des trains</i>	35

14.2.4.	<u>Vitesses</u>	35
15.	<u>Résultats</u>	36
15.1.	<u>Trains non étanches</u>	36
15.1.1.	<u>Circulation bidirectionnelle</u>	36
15.1.2.	<u>Circulation monodirectionnelle</u>	36
15.2.	<u>Trains étanches</u>	36
16.	<u>Ordres de grandeur</u>	39
16.1.	<u>Lignes voyageurs</u>	39
16.2.	<u>Lignes mixtes</u>	39
<u>CONCLUSION GÉNÉRALE</u>		40
17.	<u>Tables des tableaux</u>	42
18.	<u>Tables des figures</u>	42
<u>GLOSSAIRE</u>		43

PREAMBULE

Réseau Ferré de France (RFF), Direction du Développement, explore les principaux enjeux du projet de ligne à grande vitesse et à grande capacité vers Toulon et la Côte d'Azur, la LGV Provence Alpes Côte d'Azur (PACA). Cette LGV comporte dans ses différentes hypothèses d'itinéraire de nombreux ouvrages souterrains (au moins 40km en longueurs cumulées) en raison du relief mais aussi de la densité d'urbanisation de la région. En conséquence, l'impact financier dû à ces tunnels représente une part non négligeable du coût total du projet. Aussi, dans le cadre des études d'opportunité préalables au débat public de la LGV PACA, RFF a demandé à SETEC TPI d'évaluer, à dire d'expert, les règles de dimensionnement des tunnels dans l'optique d'en apprécier les coûts.

Il faut noter que pour satisfaire à l'économie du projet d'infrastructure, tout en privilégiant la grande vitesse et la capacité de la ligne, les tunnels envisagés sont monotubes, à l'instar des caractéristiques retenues pour la LGV Méditerranée. Il s'agit donc plus précisément pour SETEC TPI d'explicitier les critères de dimensionnement de sections de tunnels monotubes à 2 voies pour la circulation de trains à grande vitesse en fonction des paramètres déterminants suivants :

- Vitesse de ligne : 270 km/h, **300 km/h¹**, 320 km/h et 350 km/h
- Fonctionnalité multiple : **ligne réservée aux voyageurs¹**, ligne mixte voyageurs/fret (et accessoirement autoroute ferroviaire)
- Confort tympanique

A ce titre, ce rapport distingue dans la construction de ses chapitres les principales contraintes de dimensionnement des sections de tunnels, à savoir :

- Les équipements réglementaires de sécurité (ITI 98-300)
- Les contraintes aérodynamiques issues du critère de confort tympanique, liées entre autres au niveau d'étanchéité du matériel roulant

A ce jour, les phénomènes aérodynamiques sont les critères les plus dimensionnant pour la section des ouvrages souterrains et donc les plus pénalisant pour l'économie du projet d'autant plus qu'il comporte une grande succession de tunnels.

Ainsi, dans une première partie, il sera déterminé, au regard du texte réglementaire de référence qu'est « *l'Instruction Technique Interministérielle 98-300 du 8 Juillet 1998 (ITI 98-300) relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires* », les équipements réglementaires devant être présents dans les tunnels en fonctions de 2 paramètres fondamentaux : la longueur de l'ouvrage et la fonctionnalité de la ligne

Cette analyse réglementaire est réalisée dans le souci de l'évaluation du coût des équipements ferroviaire et non ferroviaire d'un tunnel dans la partie suivante.

Ensuite, la définition des gabarits géométriques minimums permettra de considérer, hors critères aérodynamiques, l'influence des gabarits sur la section et leur implication dans son calcul.

Enfin, la section transversale minimale des tunnels projetés de la LGV PACA sera déterminée sur la base du critère de confort tympanique, en fonction du type de train et de sa vitesse de franchissement. L'étanchéité des rames sera prise en compte.

En conclusion, il sera dégagé de cette étude les grands critères de dimensionnement d'un ouvrage souterrain et des pistes de réflexion d'optimisation de sa section.

¹ Hypothèse de base retenue pour la ligne LGV PACA



TEXTES DE REFERENCE

Références réglementaires :

[1] : Instruction Technique Interministérielle du 08 Juillet 1998 relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires

Références techniques de l'étude

[2] : « Aérodynamique dans les tunnels du TGV Méditerranée », Daniel ANDRE, Revue Générale des Chemins de Fer – Février 2002 p.97-101

[3] : « Aspects aérodynamiques de la circulation à grande vitesse en tunnel », Daniel LANCIEN, Paul CAILLE, Emmanuel PARENT DE CURZON, Michel JUTARD, Revue Générale des Chemins de Fer – Juillet Août 1987 p.5-21

[4] : « Etudes des problèmes de sécurité et de confort tympaniques liés aux variations de pression dans le tunnel Lyon-Turin 1^{ère} partie », R. GREGOIRE, rapport Alpetunnel établi pour le compte de la SNCF, 11 Novembre 1997

[5] : « Etudes préalables au débat public sur la LGV PACA – Evaluation du coût des tunnels – 1^{ère} partie : Note générale » - SETEC International.

[6] : Code de l'Union Internationale des Chemins de Fer n° 779-11 « Détermination de l'aire de la section transversale des tunnels ferroviaires à partir d'une approche aérodynamique ». A noter que ce document ne traite que le cas de trains non étanches à l'air.

[7] : « Variation de pression en tunnels - Détermination des aires de section transversale des tunnels ferroviaires pour les trains étanchéifiés sur la base de considérations aérodynamiques », Institut Européen de Recherche Ferroviaire, référence ERRI C 218/RP2 de Juillet 1998.

[8] : « Etudes des effets aérodynamiques liés au passage, avec ou sans croisement, de trains dans un tunnel », thèse de l'INSA de Lyon, rédigée par Thierry Saintagne en 1993.

CHAPITRE 1

- CONFORMITE DES TUNNELS DE LA LGV PACA PAR RAPPORT A L'ITI 98-300 -



1. L'INSTRUCTION TECHNIQUE INTERMINISTERIELLE N°98-300

1.1. Présentation

L'Instruction Technique Interministérielle 98-300 du 8 Juillet 1998 (ITI 98-300) relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires » se présente sous la forme d'une série d'obligations que doivent remplir les tunnels rentrant dans son champ d'application. Ces obligations touchent l'ensemble de l'infrastructure ferroviaire d'un tunnel : génie civil, matériel roulant, équipements de sécurité,... L'instruction fixe des critères que doit satisfaire le tunnel en terme de dimensionnement et de capacité des installations (résistance et lutte contre l'incendie, capacité de ventilation, d'accessibilité, d'alimentation en énergie électrique, hydraulique...).

1.2. Objectifs

Le but de cette instruction est de définir des dispositions constructives et d'exploitation sur :

- L'infrastructure
- Le matériel roulant
- Les équipements de sécurité

Cela dans le but de limiter la probabilité d'occurrence d'un incident en détectant les situations anormales et en assurant les communications avec l'extérieur (équipements de surveillance, de détection, de signalisation, radio sol - train...). Cette instruction émet également des dispositions relatives à la résistance et à la lutte contre l'incendie ainsi que des mesures pour permettre la protection et l'évacuation des personnes (voyageurs, personnel) dans un niveau acceptable de sécurité.

De manière synthétique, ce texte vise particulièrement à :

- Prévenir les accidents
- Atténuer les conséquences des accidents
- Faciliter l'évacuation
- Faciliter l'intervention des secours

1.3. Champ d'application

Cette instruction technique s'applique uniquement aux tunnels appartenant au Réseau Ferré National dont les lignes sont dites conventionnelles, à grande vitesse ou Autoroute Ferroviaire, dans des conditions particulières explicitées ci-dessous. Au niveau de l'infrastructure, tout les types de construction sont pris en compte : tunnels creusés ou immergés, tranchées couvertes, couvertures acoustique, semi - couvertures (présentant une surface d'ouverture continue vers l'extérieur inférieure au cinquième de la surface du radier).

Les champs d'applications sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Champ d'application de l'ITI 98-300

Longueur	L<400m	400m<L<800m	400m<L<5km	400m<L<10km	L>10km
Nouveau tunnel sans Autoroute Ferroviaire	(0)	ITI 98-300 (1)	ITI 98-300	ITI 98-300	(X)
Nouveau tunnel avec Autoroute Ferroviaire	(0)	ITI 98-300 (1)	ITI 98-300	(X)	(X)
Fret uniquement	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)
Réhabilitation	(0) (2)	(2)	(2)	(2)	(2)

(0) : Les ouvrages de longueur inférieure à 400m ne relèvent pas de l'ITI 98-300, de même que les ouvrages dédiés exclusivement au fret.

(1) : « Seules les dispositions du chapitre II, des paragraphes 3.1.1 à 3.1.3, 3.2.1 à 3.2.3, 3.2.4.1, 3.2.6, 3.2.7 et 3.3.2, ainsi que celles du paragraphes 4.2 pour les tunnels sur lignes urbaines sont applicables. ». Il s'agit des dispositions communes à tous les tunnels, quelle que soit leur longueur.

(2) : « S'agissant des tunnels anciens faisant l'objet d'une réhabilitation, la faisabilité des dispositions de [l'] instruction technique sera examinée au cas par cas. »

(X) : Pour ces ouvrages, « le schéma général de sécurité et le niveau d'équipement de ces infrastructures sont traités par des commissions ad hoc², nationales ou internationales ».

1.4. Synthèse

Le tableau ci-dessous synthétise les équipements nécessaires en fonction du type de trafic et de la longueur de l'ouvrage conformément à l'ITI 98-300.

² En général, les commissions analysent la nécessité d'aller ou non au-delà des dispositions de l'ITI 98-300 qui servent de base initiale de référence.

Tableau 2 : Synthèse de l'ITI 98-300

Type de ligne	Lignes urbaines		Lignes à voyageurs		Lignes mixtes	
	800 m < L < 5 km	5 km < L < 10 km	800 m < L < 5 km	5 km < L < 10 km	800 m < L < 5 km	5 km < L < 10 km
Dispositions communes (1)	Oui					
Assainissement (4.1.1)	Non	Oui, si TMD	Non	Oui, si TMD	Non	Oui, si TMD
Dispositifs d'accès des secours (4.1.2)	Oui		Non			
Communication entre tubes (4.1.3)	Non		Oui			
Héliport (4.1.4)	Non		Oui zone défavorable			
Dispositif anti-recyclage des fumées (4.1.5)	Oui si bitube					
Ventilation / Désenfumage (4.2)	Oui		Non	Oui si TMD ou matériel standard	Non	Oui si TMD ou matériel standard
Activités voyageurs – marchandises (4.3.1)	Séparation				Limitation MD entiers et voyageurs (2)	Interdiction croisement MD et voyageurs (2)
Matériel moderne ou modernisé ou standard (4.3.2)	Tous matériel autorisés			Matériel std interdit si absence désenfumage	Tous matériel autorisés	Matériel std interdit si absence désenfumage
Engin motorisé pour acheminer les secours (4.3.3)	Non			Engin ferroviaire ou rail-route	Non	Engin ferroviaire ou rail-route
Refoulement / Rebroussement des trains suiveurs (4.3.4)	Non			Oui	Non	Oui
Détecteur de boîtes chaudes (4.3.5)	Non		Oui			

(1) : Réaction et résistance au feu (chapitre 2), accès routier et parking en tête de tunnel (3.1.1), mise en sécurité des agents de maintenance (3.1.3), alimentation électrique (3.2.1), éclairage (3.2.2), repérage des issues de secours et de leur éloignement (3.2.3), alimentation en eau incendie (3.2.4), communication pour les services de secours (3.2.5), relevage (3.2.6), anneaux de rappel (3.2.7), liaison sol-train 3.3.1), système de contrôle de vitesse (3.3.2), lorrys (3.3.3)

(2) : pour les tunnels monotube à double voie



2. DONNEES D'ENTREE

Afin d'étayer les différentes modalités d'application de l'ITI 98-300, les tunnels de la LGV PACA seront pris comme exemples.

2.1. Hypothèses de trafic

Nous allons considérer que la LGV PACA est dédiée au trafic des voyageurs et envisager les conséquences de la mixité.

2.2. Classes des tunnels

Les équipements obligatoires des tunnels varient entre autres en fonction de la longueur de l'ouvrage, selon le classement de l'ITI 98-300. Il se peut qu'une section de ligne comprenne plusieurs tunnels proches. Dans ce cas, l'analyse doit être menée en considérant individuellement chacun des ouvrages.

Tableau 3 : Classement des tunnels selon l'ITI 98-300

Champ d'application de l'ITI 98-300				Commission ad hoc
L<400m	400<L<800m	800m<L<5km	5km<L<10km	L>10km

2.3. Définitions de l'ITI 98-300

2.3.1. Ligne urbaine

Il s'agit de ligne implanté en milieu urbain et périurbain et dédiées au trafic voyageurs (et éventuellement de marchandises en dehors des plages horaires réservées aux voyageurs). Habituellement, ces lignes sont communément appelées lignes de banlieue, réseau express régional... et sur lesquelles le trafic et le nombre de voyageurs transportés sont notablement supérieurs aux lignes mixtes ou à voyageurs en raison des migrations journalières de population.

2.3.2. Ligne voyageur

Il s'agit de lignes, autres que les lignes urbaines parcourues par des trains à voyageurs modernes ou modernisés à grande vitesse, ou encore par des trains de fret spécialement conçus (TGV postal par exemple).

2.3.3. Ligne mixte

Il s'agit de lignes supportant un trafic mixte composé de trains de voyageurs et de trains de fret pouvant comprendre des matières dangereuses.

2.3.4. *Matériel roulant (extrait de l'ITI 98-300)*

« On entend par matériel "moderne", les trains de voyageurs :

- *respectant les normes NF F 16-101, NF F 16-102 et NF F 16-103 notamment en matière de classement au feu et à la fumée des différents matériaux constitutifs des voitures et des appareils électriques, et d'équipement en extincteurs portatifs*
- *dotés d'une motricité multiple et, pour les matériels autres que ceux assurant des services sur ligne urbaine, d'un système permettant :*
 - *le signalement en cabine de conduite, ou au poste de contrôle s'il s'agit d'un système automatique, de tout échauffement anormal dans un engin moteur*
 - *le déclenchement de l'arrêt automatique de l'équipement en cause, les autres éléments moteurs restant en service afin de permettre au train de poursuivre son trajet jusqu'à l'air libre ou une gare ou station si la détection se déclenche en tunnel*
- *équipés d'un système d'alarme voyageurs ne provoquant pas automatiquement un freinage d'arrêt irréversible, mais au contraire permettant au conducteur, ou au personnel du centre de contrôle s'il s'agit d'un système automatique, de poursuivre ou de reprendre rapidement la marche, si rien ne s'y oppose par ailleurs, jusqu'à l'air libre ou une gare ou station si l'alarme est déclenchée en tunnel*
- *munis d'un système de sonorisation permettant au personnel d'exploitation de diffuser des messages aux passagers.*

On entend par matériel "modernisé" du matériel initialement conçu sans satisfaire à toutes ces exigences, qui, à l'occasion d'une rénovation profonde, est mis à niveau sur tous ces points à l'exception, éventuellement, du respect de la norme NF F 16-101 pour les câbles et de la norme NF F 16-102 pour les équipements électriques.

Les matériels roulants voyageurs ne répondant à aucune des deux définitions précédentes sont désignés par le terme de « matériel standard ».

A ce titre, les TGV sont considérés comme des trains « modernes ».

3. APPLICATION DE L'ITI 98-300

3.1. Dispositions communes à tous les tunnels

Nous ne traiterons ici que les équipements ayant une incidence significative sur l'évaluation du coût des ouvrages ou ayant un impact sur leur section. Nous considérons également que **tous les tunnels sont monotubes, bidirectionnels avec une couverture minimale de 25 m**. Nous supposons également que **les matériels roulants seront de type « moderne » (TGV, TER) ou « modernisé » (Fret, Autoroute Ferroviaire)**. Nous reprenons dans la suite du chapitre, la structure et le contenu de l'ITI 98-300, appliquée à la ligne, de manière synthétique.

Enfin, nous supposons que la ligne sera équipée de détecteurs de boîtes chaudes, répartis en nombre suffisant et de manière optimale sur la ligne.

3.1.1. Génie civil

- Accès routier et parking en tête de tunnel :
 - Des pistes autorisant le croisement des véhicules de secours et si nécessaire le franchissement des voies ferrées permettent l'accès des véhicules de secours à chaque tête de tunnel
 - Des parkings de dimensions suffisantes pour permettre le stationnement et le retournement des véhicules de secours sont aménagés à proximité de chaque tête de tunnel
 - Une aire pour poser un hélicoptère est nécessaire pour les tunnels situés en rase campagne, car les zones sont défavorables du point de vue de l'accessibilité.
- Cheminement :
 - Doit être prévu pour l'évacuation des personnes en tout point du tunnel (par un trottoir ou le radier)
 - Si le trottoir est retenu, sa largeur est au moins de 0,70 m libre de tout obstacle sur une hauteur de 2 m. Il doit être installé de chaque côté du tunnel (ouvrages à deux voies). Une main courante est fixée en piédroit
 - Si la solution du radier est retenue, la largeur du cheminement ne peut être inférieure à celle préconisée pour les trottoirs
 - Si nécessaire, un trottoir intermédiaire d'une largeur minimale de 0,50 m, libre de tout obstacle sur une hauteur de 2 m, permet aux voyageurs de rejoindre le cheminement sur le radier
 - Les valeurs d'embranchement des voitures vers le trottoir ou, le cas échéant, du trottoir intermédiaire vers le radier, ne peuvent excéder 0,40 m dans le plan vertical.
- Mise en sécurité des agents de maintenance :
 - S'il est prévu que certaines opérations de maintenance puissent avoir lieu pendant le passage des trains, des équipements tels des niches de sécurité, une main courante... sont intégrés au projet.

3.1.2. *Equipements généraux de sécurité*

- Alimentation électrique :
 - Doit être présente, secourue et disponible même en cas d'incendie et assurer l'alimentation des équipements de sécurité (prises, éclairage...)

- Eclairage :
 - Permet en mode nominal l'évacuation des voyageurs et le cheminement des secours. L'espacement de l'éclairage ne peut excéder 50 m et est disposé en quinconce (pour les tunnels bivoies)
 - En cas de panne, l'éclairage aura une autonomie minimale d'une heure et ne peut être interrompu sur une longueur supérieure à 100m, même en cas d'incendie

- Repérage des issues et de leur éloignement :
 - Non significatif dans l'évaluation des coûts (se reporter à l'ITI pour détails)

- Alimentation en eau d'incendie (répondant aux normes en vigueur) :
 - Tunnels en rase campagne
 - Le tunnel doit être équipé d'une installation en charge protégée contre le gel et disposant en permanence d'une réserve d'eau de 120 m³
 - Des prises d'incendie de 2 X 40 mm et 1 X 65 mm sont installées tous les 250 m au maximum et aux têtes de tunnel; leur débit est de 60 m³/h sous une pression de 6 bars; deux points d'eau peuvent être utilisés simultanément
 - Tunnel en milieu urbain ou périurbain
 - Peut être assuré par colonne sèche ou par colonne en eau morte protégée contre le gel (se reporter à l'ITI pour détails)

- Communications pour les services de secours (intérieur et extérieur du tunnel) :
 - Non significatif dans l'évaluation des coûts (se reporter à l'ITI pour détails)

- Anneaux de relevage du matériel roulant (tous les 30m) :
 - Non significatif dans l'évaluation des coûts (se reporter à l'ITI pour détails)

- Anneaux de rappel (pour la ligne de vie)
 - Non significatif dans l'évaluation des coûts (se reporter à l'ITI pour détails)

3.1.3. Equipements de sécurité ferroviaire

- Liaison sol-train
 - Examiné par ailleurs dans le projet
- Système de contrôle de vitesse
 - Coûts dépendant de la technologie utilisée (KVB, BAL, TVM 430, ERTMS niv 2...)
 - Les équipements de lignes n'engagent a priori que faiblement la section du tunnel
 - Examiné par ailleurs dans le projet
- Lorrys
 - Des lorrys freinés à l'usage des services de secours sont mis en place à raison de deux par extrémité de tunnel. Si le tunnel est en milieu urbain ou périurbain, ils sont mis à disposition par l'exploitant en nombre suffisant.
 - Non significatif dans l'évaluation des coûts (se reporter à l'ITI pour détails)

3.2. Dispositions particulières

Nous allons dans cette partie visualiser les répercussions des hypothèses de base sur les équipements particuliers devant être présents. Ces dispositions particulières s'appliquent aux tunnels, sous certaines conditions résumées ci-après, en plus des dispositions communes. Nous allons considérer différents cas suivant :

- la longueur du tunnel
- la situation : en rase campagne ou en milieu urbain / périurbain
- le type de trafic (Voyageur, Mixte, Autoroute Ferroviaire, Transport de Marchandises Dangereuses)

Les tunnels acceptant les convois d'Autoroute Ferroviaire rentrent dans le champ d'application de l'ITI dans la mesure où leur longueur est inférieure à 5 km. Les dispositions pour ce mode de transport sont les mêmes que celles applicables pour le Transport de Marchandises Dangereuses. En effet, ces convois sont à fort potentiel calorifique (feu d'une puissance d'environ 200 MW pour certains camions, soit plusieurs milliers MW par trains), d'autant plus que les TMD les plus dangereux sont souvent interdits dans les tunnels routiers et donc transitent par ce mode de transport. Nous rappelons que seuls des ouvrages monotubes sont envisagés dans cette partie de l'étude. De plus, s'agissant des lignes à voyageurs situées en zone urbaine, elles sont considérées comme des lignes à voyageurs (donc non urbaine), à condition que celle-ci n'accepte que des trains à voyageurs modernes ou modernisés.

3.2.1. Tunnels : $800 < L < 5000$ mètres

Sont résumés dans le tableau 4 situé à la page suivante, les dispositions obligatoires pour chaque type de ligne pouvant être envisagé pour cette gamme de longueur.

Tableau 4 : Application de l'ITI 98-300 aux tunnels 800m<L<5km de la LGV PACA

Type de ligne	Ligne urbaine		Ligne voyageur	Ligne mixte / TMD / AF
	800 m < L < 5 km Couverture < 28 m	800 m < L < 5 km Couverture > 28 m	800 m < L < 5 km	800 m < L < 5 km
Dispositions communes (1)	Oui			
Assainissement (4.1.1)	Non			
Dispositifs d'accès des secours (4.1.2)	Reliés au tunnel par un sas mis localement en surpression avec portes CF ½ heure disposant d'un volume tampon avec l'ascenseur/escalier d'une surface au sol d'environ 25m² Ont une largeur min de 2 UP et une hauteur min de 2.20 m Distance entre 2 accès < 800m		Non	
Equipements complémentaires des accès des secours	Eclairage Moyens de liaisons avec l'exploitant et les services de secours (au minimum un poste dédié au commandement des opérations et un autre dédié à l'alimentation en eau d'extinction Une colonne sèche Une commande locale de mise en surpression du sas		Sans objet	
	Puit aux dimensions mini de 1X2 m avec poulie de descente de matériel (force=50kg min)	Ascenseur permettant le transport d'un brancard		
Héliport (4.1.4)	Non		Oui zone défavorable	
Ventilation / Désenfumage (4.2)	Vitesse de balayage > 1.5m/s assurée par groupes de 2 moteurs réversibles disposant de 2 sources d'alimentation différentes, dispositif de résistance au feu d'au moins 200°C pendant 2h		Non	
Limitation / Séparation de activités voyageurs – fret (4.3.1)	Circulation dans les mêmes plages horaires interdite (véhicules de chantier sans TMD tolérés)			Mesures visant à limiter le croisement des trains de voyageurs et de trains entiers de MD
Matériel moderne ou modernisé ou standard (4.3.2)	Tous matériel autorisés			
Engin motorisé pour acheminer les secours (4.3.3)	Non			
Refoulement / Rebroussement des trains suiveurs (4.3.4)	Non			
Détecteur de boîtes chaudes (4.3.5)	Non		Oui	



3.2.2. Tunnels : 5 km < L < 10 km

Les dispositions applicables à ces ouvrages sont résumées dans le tableau 5 situé à la page suivante.

Il est à noter que les tunnels de plus de 5km de long acceptant les convois d'autoroute ferroviaire ne rentrent plus dans le cadre d'application de l'ITI 98-300. Ainsi, « *le schéma général de sécurité et le niveau d'équipement de ces infrastructures sont traités par des commissions ad hoc³, nationales ou internationales* » (ITI 98-300).

3.2.3. Tunnels : L > 10 km

« *Les ouvrages exceptionnels de plus de 10 km de longueur [...] ne rentrent pas dans le champ d'application de [l'ITI 98-300]. Le schéma général de sécurité et le niveau d'équipement de ces infrastructures sont traités par des commissions ad hoc⁵, nationales ou internationales* » (ITI 98-300).

^{3 et 5} En général, les commissions analysent la nécessité d'aller ou non au-delà des dispositions de l'ITI 98-300 qui servent de base initiale de référence.

Tableau 5 : Application de l'ITI 98-300 aux tunnels 5km<L<10km de la LGV PACA

Type de ligne	Ligne urbaine		Ligne voyageur	Ligne mixte / TMD
	5 km < L < 10 km Couverture < 28 m	5 km < L < 10 km Couverture > 28 m	5 km < L < 10 km	5 km < L < 10 km
Dispositions communes (1)	Oui			
Assainissement (4.1.1)	Non		Doit être apte à absorber un débit d'au moins 100 l/s et recueillir au minimum un volume de 80 m3 Les caniveaux (1 par voie) se déversent tous les 50 m au maximum dans un collecteur enterré Au droit de chaque raccordement un siphon est aménagé afin d'arrêter les flammes avant que le liquide atteigne la fosse de rétention Si ce système sert également de recueillement des eaux de ruissellement, la capacité de la fosse permet en toute circonstance le stockage de 80 m3 de matières dangereuses	
Dispositifs d'accès des secours (4.1.2)	Reliés au tunnel par un sas mis localement en surpression avec portes CF ½ heure disposant d'un volume tampon avec l'ascenseur/escalier d'une surface d'environ 25m², ils ont une largeur min de 2 UP et une hauteur min de 2.20 m Distance entre 2 accès < 800m		Non	
Equipements complémentaires des accès des secours	Eclairage Moyens de liaisons avec l'exploitant et les services de secours (au minimum un poste dédié au commandement des opérations et un dédié à l'alimentation en eau d'extinction Une colonne sèche Une commande locale de mise en surpression du sas		Sans objet	
	Puit aux dimensions minimale de 1X2 m avec poulie de descente de matériel (force=50kg min)	Ascenseur permettant le transport d'un brancard		
Héliport (4.1.4)	Non		Oui si zone défavorable	
Ventilation / Désenfumage (4.2)	Vitesse de balayage > 1.5m/s assurée par groupes de 2 moteurs réversibles disposant de 2 sources d'alimentation différentes, dispositif de résistance au feu d'au moins 200°C pendant 2h		Non	Vitesse de balayage > 1.5m/s assurée par groupes de 2 moteurs réversibles disposant de 2 sources d'alimentation différentes, dispositif de résistance au feu d'au moins 200°C pendant 2h



Type de ligne	Ligne urbaine		Ligne voyageur	Ligne mixte / TMD
	<i>5 km < L < 10 km</i> <i>Couverture < 28 m</i>	<i>5 km < L < 10 km</i> <i>Couverture > 28 m</i>	<i>5 km < L < 10 km</i>	<i>5 km < L < 10 km</i>
Limitation / Séparation de activités voyageurs – fret (4.3.1)	Circulation dans les mêmes plages horaires interdite (véhicules de chantier sans TMD tolérés)			Mesures visant à limiter le croisement des trains de voyageurs et de trains entiers de marchandises dangereuses
Matériel moderne, modernisé, standard (4.3.2)	Tous matériel autorisés			Matériel standard interdit si pas de système de ventilation
Engin motorisé pour acheminer les secours (4.3.3)	Non			Engin de manœuvre ou maintenance proche des têtes permettant d'acheminer les secours (pas nécessaire si l'exploitant met à disposition des engins rails-route)
Refoulement / Rebroussement des trains suiveurs (4.3.4)	Non		Signalisation réversible et sectionnement de l'alimentation de la caténaire de longueur équivalente à l'espacement entre 2 trains	
Détecteur de boîtes chaudes (4.3.5)	Non		Oui : permet l'arrêt du train avant son entrée en tunnel	



4. EQUIPEMENTS DES TUNNELS DE LA LGV PACA AU REGARD DES DISPOSITIONS DE L'ITI 98-300

4.1. Tunnels : $L < 400$ mètres

Cette catégorie de tunnel n'entre pas directement dans le champ d'application de l'ITI 98-300, mais dans un souci d'homogénéité d'équipement et de sécurité sur l'ensemble de la ligne, il est recommandé d'y intégrer les mêmes équipements que pour les ouvrages dont la longueur est comprise entre $400m < L < 800m$.

4.2. Tunnels : $400 < L < 800$ mètres

Il ne s'applique à ce type d'ouvrages que les dispositions communes citées dans le chapitre 5.1 *Disposition communes* ci-avant.

4.3. Tunnels : $800 \text{ m} < L < 5 \text{ km}$

4.3.1. Dispositions communes

Les dispositions communes s'appliquent pour ce type de tunnel, quelque soit le type de la ligne.

4.3.2. Dispositions particulières

Les dispositions particulières s'appliquant à ces ouvrages sont résumées dans le tableau 4. Si les hypothèses du type de ligne varient, il convient de se référer à la colonne adéquate.

4.4. Tunnels : $5 \text{ km} < L < 10 \text{ km}$

4.4.1. Dispositions communes

Les dispositions communes s'appliquent pour ce type de tunnel, quelque soit le type de la ligne.

4.4.2. Dispositions particulières

Les dispositions particulières applicables à ces ouvrages sont résumées dans le tableau 5. Si les hypothèses du type de ligne varient, il convient de se référer à la colonne adéquate.

4.4.3. Points particuliers

Il est à noter que les tunnels de plus de 5km de long acceptant les convois d'autoroute ferroviaire ne rentrent plus dans le cadre d'application de l'ITI 98-300. Ainsi, « *le schéma général de sécurité et le niveau d'équipement de ces infrastructures sont traités par des commissions ad hoc⁴, nationales ou internationales* » (ITI 98-300).

⁴ En général, les commissions analysent la nécessité d'aller ou non au-delà des dispositions de l'ITI 98-300 qui servent de base initiale de référence

4.5. Tunnels : L > 10 km

Les tunnels de plus de 10 km ne rentrent pas dans le champ d'application de l'ITI 98-300. L'ITI 98-300 précise cependant :

« Les ouvrages exceptionnels de plus de 10 km de longueur [...] ne rentrent pas dans le champ d'application de [l'ITI 98-300]. Le schéma général de sécurité et le niveau d'équipement de ces infrastructures sont traités par des commissions ad hoc⁵, nationales ou internationales » (ITI 98-300).

Nous pouvons tout de même préconiser au minimum les dispositions prises pour les ouvrages dont la longueur est comprise entre 5 km et 10 km.

⁵ En général, les commissions analysent la nécessité d'aller ou non au-delà des dispositions de l'ITI 98-300 qui servent de base initiale de référence.



5. CONSEQUENCES D'UN OUVRAGE MONOTUBE / BITUBE

Il a par ailleurs été demandé d'examiner les implications de la réalisation d'ouvrages bitubes.

5.1. Enjeux des tunnels bitubes

5.1.1. *Du point de vue de la sécurité des usagers*

Les ouvrages bitubes permettent d'éviter les accidents dus aux croisements de trains ainsi que les sur-accidents comme par exemple les collisions frontales consécutives à un déraillement d'un train sur la voie adjacente.

Ces tunnels permettent également d'améliorer significativement les conditions d'évacuation des usagers et du personnel (particulièrement en cas d'incendie) en se servant du deuxième tube comme abri et cheminement, via les rameaux de communication inter-tubes (ce qui diminue par ailleurs les distances d'évacuation). Le deuxième tube peut en outre faire office d'accès pour les services de secours (facilité d'accès proche du lieu de l'incident).

5.1.2. *Du point de vue de la sécurité du personnel*

Les opérations de maintenance de l'infrastructure et des équipements du tunnel peuvent être facilitées en neutralisant temporairement un des deux tubes (configuration monotube voie unique).

5.1.3. *Paramètres influents*

Le choix d'un tunnel bitube est conditionné par différents critères qu'il convient de prendre en compte :

- La mixité du trafic. Dans le cas d'un trafic mixte comprenant des marchandises dangereuses, seul un ouvrage bitube permet de répondre aux exigences de l'ITI 98-300. Une séparation physique des trains voyageurs et fret, a pour effet de diminuer la probabilité d'occurrence d'événements catastrophiques comme par exemple un train voyageur soumis aux effets d'un incendie d'un train transportant des TMD.
- L'implantation des têtes : nécessite plus d'espace
- L'aérodynamisme : la section transversale des tubes est réduite par rapport à un ouvrage monotube, ce qui a pour résultat un remplissage plus rapide du tunnel par la fumée en cas d'incendie. Par ailleurs, cela augmente le besoin en énergie de traction, car la résistance à l'avancement du train est plus importante.
- Le prix : plus élevé en règle générale, car le volume excavé est plus important et l'ouvrage plus complexe (rameaux de communication, ventilation – désenfumage – mise en surpression des rameaux, locaux techniques et abris...)
- L'hydrogéologie du site : faisabilité technique du forage de deux tubes généralement proches

S'il est prévu des communication paires / impaires de voies dans l'ouvrage, les effets positifs du bitube peuvent être en partie perdus. En effet, les fumées peuvent alors se propager dans l'autre tube et la défaillance d'appareil de voie ou une mauvaise gestion des itinéraires sécants peuvent conduire à une collision frontale. Afin de s'affranchir partiellement de ces problèmes, des procédures d'exploitation et d'évacuation strictes et réalistes sont à mettre en place.

5.2. Impacts ouvrage monotube / bitube par rapport à l'ITI 98-300

Nous allons maintenant voir les dispositions de l'ITI 98-300 qui s'appliquent en supplément pour les ouvrages bitubes par rapport aux ouvrages monotubes, quelle que soit la longueur considérée.

- Génie civil :

Accès routier et parking en tunnel (3.1.1) : les accès prévus aux têtes du tunnel doivent permettre de passer d'un tube à l'autre à l'extérieur de l'ouvrage

- Dispositif anti-recyclage des fumées (4.1.5) :

Un dispositif doit empêcher que la fumée s'échappant d'un tube ne pénètre dans l'autre (mur de séparation ou décalage des têtes par exemples)

- Evacuation des voyageurs (4.1.3) : (pour des ouvrages non situés sur des lignes urbaines)

Il faut créer, tous les 800m au maximum, des rameaux de communication entre tubes d'une largeur minimale de 4 UP et d'une hauteur minimale de 2.2m. Chaque extrémité de rameau est équipée d'une porte CF 2h de largeur 2UP, fermée en temps normal. L'ensemble du dispositif de inter-tubes doit avoir un degré CF de 2h.

Si une galerie de sécurité est prévue, des rameaux de communication sont réalisés dans les mêmes conditions entre les tunnels ferroviaires et entre la galerie de sécurité.

Enfin, des dispositifs appropriés empêchent l'intrusion de fumées venant du tunnel incidenté vers les rameaux et le cas échéant, vers le tunnel de sécurité.

5.3. Conclusion partielle

Les ouvrages bitubes présentent un avantage significatif en terme de sécurité. Cependant, les coûts liés à leur construction, leur exploitation, leur maintenance sont significativement supérieurs à ceux des ouvrages monotubes.

En effet, nous pouvons approximativement dire que :

- Les travaux de génie civil (2 tunnels de moindres sections mais reliés tous les 800m par des galeries de ramification) seraient majorés d'au moins 40%
- Le dimensionnement des équipements augmente : système de ventilation – désenfumage, Gestion Technique Centralisée, éclairage, réseau incendie, système de drainage des voies...
- Les équipements de lignes sont plus nombreux : possibilité d'aiguillages, signalisation supplémentaire, dispositifs de communication avec l'extérieur plus nombreux...

Nous pouvons donc conclure que ce choix doit faire l'objet d'une étude approfondie des paramètres liés à la sécurité, au trafic envisagé (type et densité) et aux coûts de tels ouvrages, et ce, au cas par cas.

CHAPITRE 2

- ESTIMATION DU COUT DES EQUIPEMENTS -



6. GENERALITES

6.1. Objet du chapitre

Dans la première partie, nous avons défini les équipements d'exploitation et de sécurité nécessaires en fonction de la nature des ouvrages et du trafic.

La présente partie de l'analyse a pour objet de donner, à titre d'expert, un ordre de grandeur du coût des équipements à mettre en œuvre dans chaque catégorie de tunnel.

Il convient de noter que ces estimations n'ont pas la prétention de fournir des coûts d'installation avec précision comme cela pourrait être fait dans le cadre d'une étude d'avant projet pour laquelle un descriptif minimum des équipements aurait pu être réalisé.

En effet des différences non négligeables dans la nature de équipements peuvent apparaître dans certains cas particulier d'ouvrages.

Les valeurs indiquées ci-après sont donc uniquement des valeurs d'ordre basées sur des équipements mis en œuvre dans le cadre d'ouvrages similaires et qui sont à considérer comme telles afin de permettre une comparaison entre les coûts potentiels des ouvrages.

7. METHODE D'APPROCHE DE L'ESTIMATION

7.1. Classement des tunnels

Pour réaliser l'estimation des différents ouvrages nous considérerons la classification définie par l'ITI 98-300, à savoir :

- Tunnels de longueur inférieure à 400m
- Tunnels dont la longueur est comprise entre 400 et 800m
- Tunnels dont la longueur est comprise entre 800m et 5km
- Tunnels dont la longueur est comprise entre 5km et 10km
- Tunnels dont la longueur est supérieure à 10km.

7.2. Méthode d'approche de l'estimation

L'estimation sera, comme précisée ci-dessus, effectuée par catégorie de tunnel, mais elle tiendra compte dans son approche des coût fixes quelle que soit la longueur de l'ouvrage dans sa catégorie et des coûts directement liés à la longueur de l'ouvrage.

En outre l'estimation tiendra également compte de l'existence d'un tube ou de deux tubes.

7.3. Définition des installations à mettre en œuvre

Nous définissons les équipements de sécurité et d'exploitation d'équipements non ferroviaires à mettre en œuvre dans les ouvrages.

En ce qui concerne les équipements non ferroviaires les installations suivantes seront prises en compte :

- Alimentation et distribution électrique de puissance
- Alimentation des systèmes de prises électriques en tunnel
- Eclairage en tunnel
- Equipements de communication
- Equipements de lutte contre l'incendie (réseau de distribution d'eau ou colonnes sèches)
- Equipements de ventilation
- Equipement de supervision et de contrôle commande (GTC)
- Equipements de métallerie (main courante, portes coupe feu, équipements de relevage)

8. ESTIMATIONS

Le tableau ci après reprend les estimations des équipements non ferroviaires, pour chaque catégorie d'ouvrage pour les parts fixes et les parts au km d'ouvrage.

Les estimations sont mentionnées en k€/km.

Tableau 6 : Estimation du coût des équipements non ferroviaires

EQUIPEMENTS	Tunnels <400m		Tunnels 400m<L<800m		Tunnels 800m<L<5km		Tunnels 5km<L<10km		Tunnels > 10km	
	Part fixe en k€	Coût en k€/km	Part fixe en k€	Coût en k€/km	Part fixe en k€	Coût en k€/km	Part fixe en k€	Coût en k€/km	Part fixe en k€	Coût en k€/km
Alimentation électrique de puissance	100	90	100	90	200	225	300+100 (si ventilation)	225	500	225
Alimentation des prises électriques en tunnel		130		130		130		130		130
Eclairage en tunnel		1150		1150		1150		1150		1150
Equipements de communication	35	1100	35	1100	50	1100	80	1100	80	1100
Réseau de lutte contre l'incendie	110	900	110	900	220	1000	250	1000	300	1000
Equipements de ventilation	Sans Objet	Sans Objet	Sans Objet	Sans Objet		400(si bitube)	5000 (si mixte/TMD/AF)	400(si bitube)	5000	400(si bitube)
Equipements de GTC		1000		1000		1000		1000		1000
Equipements de métallerie		500 (si bitube) 200 (si monotube)		500 (si bitube) 200 (si monotube)		500 (si bitube) 200 (si monotube)		500 (si bitube) 200 (si monotube)		500 (si bitube) 200 (si monotube)
RECAPITULATION										
Part fixe	245		245		470		630		5880	
Part fixe si ventilation							5730			
Coût/km si monotube		4570		4570		4805		4805		4805
Coût/km si bitube		4870		4870		5505		5505		5505



CHAPITRE 3

- SECTION GEOMETRIQUE MINIMALE HORS CRITERES AERODYNAMIQUES ET GABARITS FERROVIAIRES-

9. OBJET DU CHAPITRE

Le présent chapitre a pour objet de montrer les liens entre la section géométrique minimale hors critères aérodynamiques et l'étude des gabarits géométriques.

10. SECTION TYPE GEOMETRIQUE

L'optimisation de la section géométrique minimale des ouvrages nécessite la prise en compte de nombreux paramètres de diverses natures (gabarits, trottoirs, réseaux et équipements, mode et tolérances de construction, ...), ainsi que des aspects aérodynamiques (résistance à l'avancement et vitesse des trains, confort tympanique) qui ont un impact sur la section d'air à réserver dans le tunnel.

Le paramètre aérodynamique n'est pas pris en compte à ce stade de l'analyse.

10.1. Gabarits ferroviaires

Les matériels dont la circulation est envisagée, dans la présente étude, sont des TGV, du fret et de l'Autoroute Ferroviaire.

Pour le TGV et le fret, le gabarit limite d'obstacles (C1) en tunnel est défini dans la notice SNCF n°EF 1 C 3 n°7 « Lignes à grande vitesse – Gabarits ».

Pour l'Autoroute Ferroviaire (AF), le gabarit limite d'obstacles en tunnel est défini dans la note SNCF VPN1 du 29/12/1995 en prenant en compte l'option II (PL de 4,20m de hauteur maximale et de 2,60m de large sur wagons de 1,00m de hauteur de plancher).

A ces gabarits, il faut ajouter l'emprise minimale en hauteur de la caténaire qui est de 0,72m pour les trains roulants jusqu'à 160km/h (AF) et de 1,12m pour les TGV d'après la notice SNCF n°EF 1 C 3 n°7.

Les principales caractéristiques de ces gabarits limite d'obstacle sont récapitulées dans le tableau et le schéma suivants :

Tableau 7 : Principales caractéristiques des gabarits limites d'obstacle

Type de matériel	Hauteur du plan de contact avec la caténaire au dessus du plan de roulement	Largeur de plateforme
TGV (300m/h) Gabarit C1	5,10m	1,75m à 0,40m 1,95m de 1,00m à 3,55m 1,85m à 4,80m
Autoroute Ferroviaire (160km/h)	5,45m	1,70m de 0,40m à 0,95m 1,95m de 0,95m à 5,45m

10.2. Entraxe des voies

Dans le cas d'ouvrage à deux voies, l'entraxe entre chaque voies est de 4,20m minimum

10.3. Gabarit des trottoirs

Les trottoirs latéraux devront respecter un emmarchement inférieur à 0,40m dans le plan vertical et avoir une largeur de 0,70m libre de tout obstacle sur une hauteur de 2,00m.

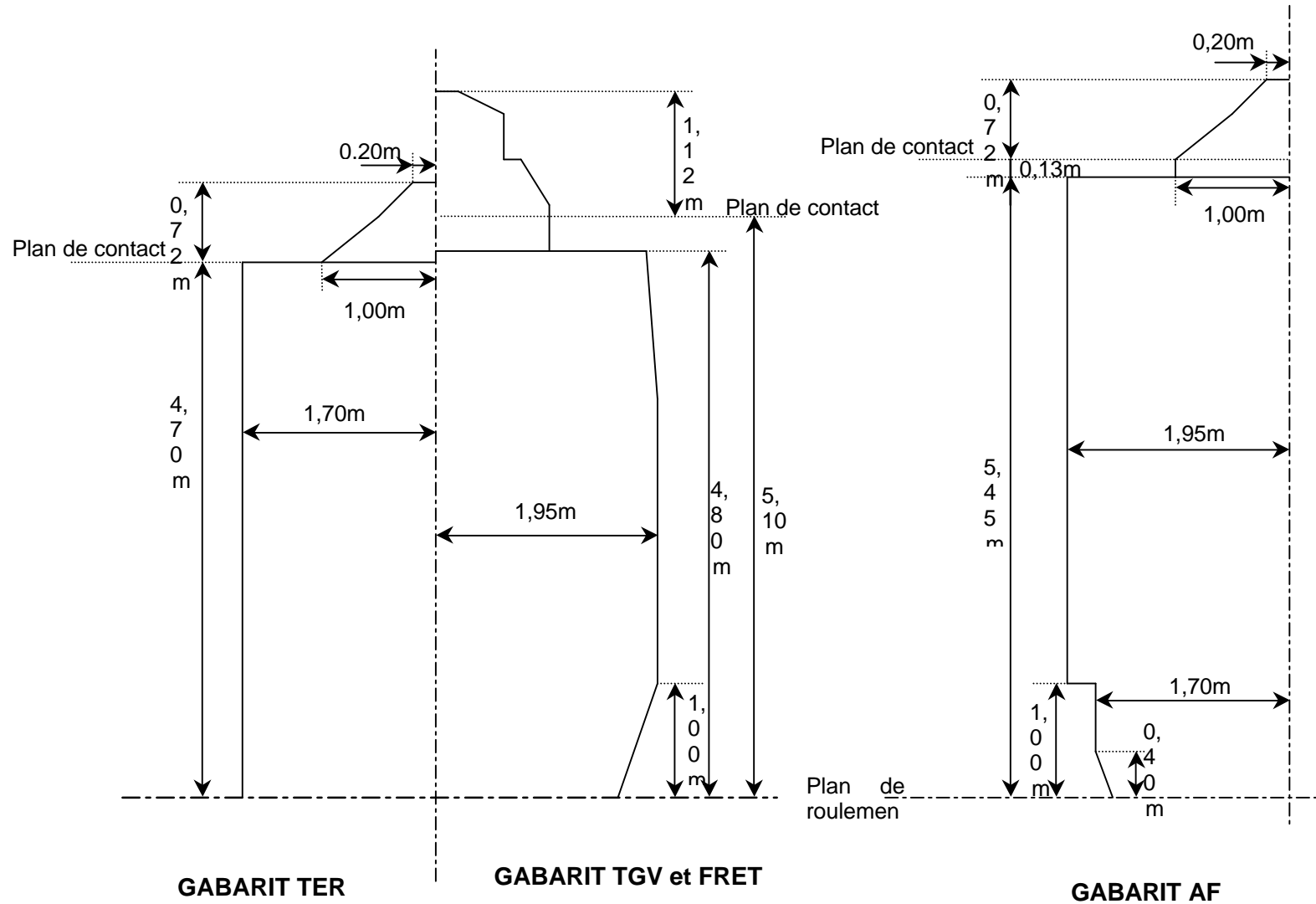
10.4. Exploitation des schémas de gabarits types

Les gabarits géométriques interviennent dans le dimensionnement de la section minimale du tunnel. En effet, ils déterminent l'intervalle entre piédroits nécessaire et la hauteur de voûte nécessaire au passage du train. Les autres paramètres dimensionnant viennent en addition (équipements, trottoirs...).

Pour dimensionner un ouvrage acceptant différents types de trafic, il faut prendre en compte le gabarit qui, géométriquement, majore les autres. Ainsi, par exemple, nous pouvons nous rendre compte à la vue des différents gabarits, que le plus contraignant au niveau du dimensionnement de la section est le gabarit de l'autoroute ferroviaire. Alors, si ce type de transport est envisagé, le gabarit à prendre en compte est celui de l'AF.

Les gabarits de la figure 1 sont donnés à titre informatif, pour mettre en évidence leurs différences respectives et pour qu'elles soient prises en compte **avec d'autres critères** lors du dimensionnement d'un tunnel.

Figure 1 : Schéma de gabarits types

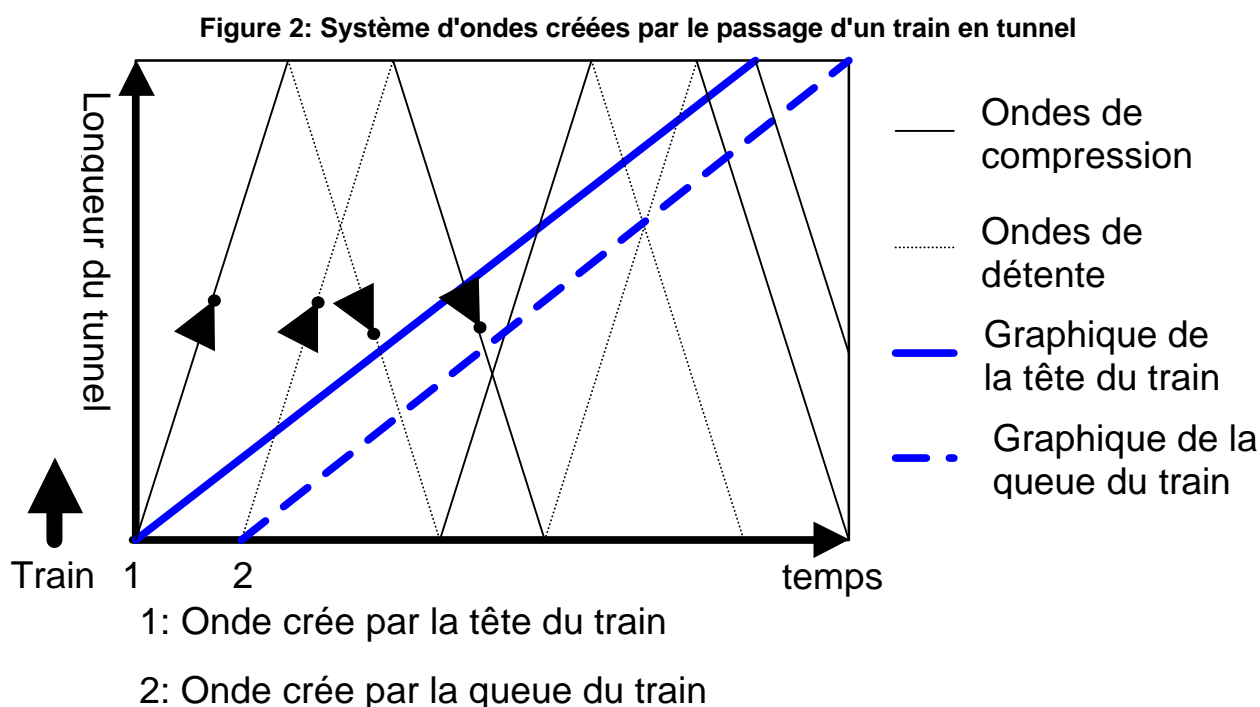


CHAPITRE 4

- DIMENSIONNEMENT DES TUNNELS DE LA LGV PACA EN FONCTION DES CRITERES TYMPANIQUES -

11. DESCRIPTION DES PHENOMENES

Lors du passage d'un train dans un tunnel, les variations de pression engendrées par les phénomènes aérodynamiques sont ressenties par les passagers du train au niveau de leurs tympans. Cela est dû à une différence de pression entre l'oreille interne et l'espace voyageur du train. Lorsque la durée de la variation de pression est trop faible pour permettre un équilibre des pressions, cela provoque une gêne analogue à celle ressentie lors d'un changement brusque d'altitude. Il s'agit d'un phénomène physiologique qui tient de l'impossibilité de chaque individu d'équilibrer naturellement les différences de pression de part et d'autres des tympans. Ce phénomène est ressenti principalement lors des phases de recompressions qui se reproduisent plusieurs fois durant la traversée. Pour illustrer ce phénomène, il est cité un extrait de la référence [2], « Aérodynamique dans les tunnels du TGV Méditerranée », Daniel ANDRE, Revue Générale des Chemins de Fer – Février 2002 p.97-101 » :



« Le passage brutal du milieu extérieur au milieu intérieur confiné génère une onde de compression et une onde de détente qui parcourent le tunnel à la vitesse du son. Par un jeu de réflexion à chacune des têtes, ces ondes restent prisonnières du tunnel et oscillent d'une extrémité à l'autre de l'ouvrage en s'atténuant peu à peu. Elles interfèrent entre elles à plusieurs reprises en combinant leurs effets. Ces conjonctions d'ondes provoquent d'importantes variations de pressions qui peuvent se produire au droit de la rame. En cas de croisement de trains en tunnels, le système d'ondes est doublé. De multiples combinaisons deviennent possibles selon l'écart de temps existant entre les entrées des trains dans l'ouvrage. »

La conséquence de ce phénomène sur la conception des tunnel consiste à déterminer la section transversale minimale à donner au tube pour que les variations de pression restent dans des limites fixées par les critères de sécurité ou de santé tympanique et les critères de confort tympanique.

12. CRITERES TYMPANIQUES

Les critères applicables, en France, sont définis dans le Référentiel Génie Civil de RFF, dans le §2.3.2 « Ouvrages enterrés » du tome IV « Ouvrages d'art ».

Le texte de l'alinéa 2.3.2.3 « Caractéristiques géométriques » est rappelé ci-dessous :

« La section des ouvrages souterrains est déterminée, dans le respect des gabarits cinématiques et des règles de sécurité du personnel, à partir d'une étude aéraulique.

Le critère de sécurité tympanique fixe la limite de variation de pression extérieure à 10 000 Pa, sans considération de temps.

Le critère de confort tympanique considère :

- *Pour les rames étanches : une limite de variation de pression intérieure de 1 000 Pa pour une durée de 10 secondes et un gradient de pression limité à 500Pa/s,*
- *Pour les rames non étanches : la variation de pression est limité à 2 000 Pa pendant 4 secondes.*

Si nécessaire, les dispositions sont prises en tête des ouvrages pour éviter la production d'ondes sonores. »

13. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

L'objectif étant de définir des règles générales de conception et de dimensionnement des tunnels, **il ne sera pas effectué à ce stade de simulation numérique des phénomènes transitoires de pression créés par le passage d'un train en tunnel.**

En revanche, les références [6] et [7] proposent des séries de courbes qui permettent, pour quelques cas, de déterminer le rapport des sections $\frac{S_{train}}{S_{tunnel}}$ (rapport de blocage) maximal admissible en fonction :

- Du type de train,
- De la longueur du train,
- Du croisement ou non de deux trains identiques dans le tunnel,
- De la vitesse de circulation,
- De la longueur du tunnel,
- D'une limite de variation de pression (critère tympanique).

14. HYPOTHESES RETENUES

14.1. Principes généraux

Afin de tirer des conclusions générales sur le passage de trains à grande vitesse dans des tunnels de diverses longueurs (la LGV PACA présentera un panel important de longueurs de tunnel), et pour simplifier l'exposé, on s'attachera à déterminer les cas les plus critiques et de mettre en évidence les fluctuations en fonction des paramètres déterminants.

A ce stade de l'étude, les tunnels sont supposés ne comporter aucun aménagement complexe type jonction, puits d'aération, entonnement,

Le présent exposé étudie les tunnels monotubes à 2 voies et le cas de croisement des trains est systématiquement celui retenu.

14.2. Caractéristiques des trains

14.2.1. Etanchéité des wagons

Les trains étudiés sont répartis en deux grandes familles :

- Trains étanches ($Seq > 800 \text{cm}^2$)
- Trains non étanches ($Seq < 45 \text{cm}^2$).

Seq = surface équivalente de fuite

14.2.2. Longueur du convoi

Les longueurs du train suivantes seront étudiées car elles représentent les longueurs communément rencontrées sur le réseau :

- **400 m pour TGV bi-rame**
- 200 m pour TGV mono-rame (et trains conventionnels de voyageurs)
- 750 m pour autoroute ferroviaire [AF] (et trains conventionnels de fret).

14.2.3. Section transversale des trains

Les sections transversales des trains étudiées ont les aires suivantes :

- **TGV duplex : 10,91 m²**
- TGV : 9 m²
- Autoroute ferroviaire : 13 m²

14.2.4. Vitesses

Les vitesses considérées pour l'étude sont : 270 ; **300** ; 320 ; 350 km/h

15. RESULTATS

15.1. Trains non étanches

Les limites d'utilisation de trains non étanches sont précisées ci-après.

15.1.1. Circulation bidirectionnelle

La circulation bidirectionnelle est :

- possible dans tous les cas à 180 km/h
- possible dans quelques cas à 200 km/h (si $4500\text{m} < L_{\text{tun}} < 10\,000\text{m}$ pour les trains courts de voyageurs ou si $0\text{m} < L_{\text{tun}} < 2000\text{m}$ pour les trains longs de fret)
- impossible dans tous les cas au-delà de 220 km/h.

15.1.2. Circulation monodirectionnelle

La circulation monodirectionnelle est :

- possible dans tous les cas à 220 km/h
- possible à 275 km/h, sauf si $250\text{m} = L_{\text{tun}} = 1000\text{m}$ pour 1 rame et si $1000\text{m} = L_{\text{tun}} = 2100\text{m}$ pour 2 rames
- possible à 300 km/h, si $L_{\text{tun}} > 2100\text{m}$ pour 1 rame et si $L_{\text{tun}} > 4200\text{m}$ (ou $L_{\text{tun}} < L_{\text{train}}$) pour 2 rames

Alors, $S_{\text{tun}} \text{ mini} = 45\text{ m}^2$ pour les TGV simple étage et $S_{\text{tun}} \text{ mini} = 55\text{ m}^2$ pour les TGV duplex.

- impossible à 350 km/h, de satisfaire le critère de confort.

15.2. Trains étanches

La diminution des contraintes de variations de pression pourrait être obtenue dans le cadre d'une étude de détail par des aménagements aérauliques (entonnements, rameaux de pistonement,) en tunnel, sans toutefois résoudre le problème en toute généralité.

L'augmentation de l'étanchéité des trains est indubitablement la solution à retenir pour combiner la grande vitesse et l'économie des infrastructures, dans un contexte où les tunnels pèsent de manière très importante sur le coût du projet.

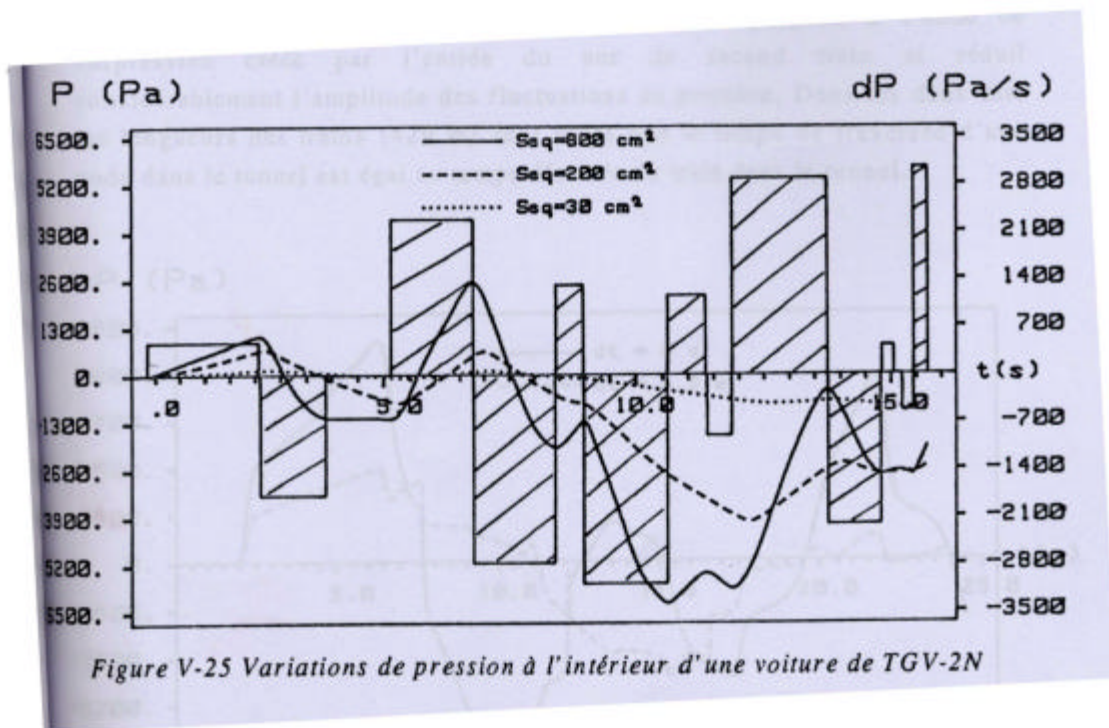
Les TGV actuels sont d'ores et déjà très performants en matière d'étanchéité à l'air, ce qui conduit à dimensionner les sections de tunnels des LGV, vis-à-vis du critère de santé tympanique, plutôt que vis-à-vis du critère de confort tympanique.

En revanche, les trains de fret sont généralement non étanches.

La figure 3 ci-après, extrait de la référence [8] , illustre les écarts de sensibilité aux variations de pression des voitures, en fonction de leur niveau d'étanchéité. Les hypothèses de la simulation sont :

- Croisement de deux TGV duplex de 400m de longueur circulant dans un tunnel de section d'air de 71m² et de longueur 1500m.
- Vitesse de 350 km/h.

Figure 3: Variations de pression à l'intérieur d'une voiture de TGV



Pour quelques cas, la référence [7] permet d'estimer le rapport de blocage $\frac{S_{train}}{S_{tunnel}}$ en fonction de la vitesse et des longueurs de trains et de tunnels. La figure 4 ci-après, en est extraite, et permet de se rendre compte de l'irrégularité des courbes de dimensionnement.

Figure 4: Vérification des limite « santé », circulation de deux trains, $L_{train}=400m$

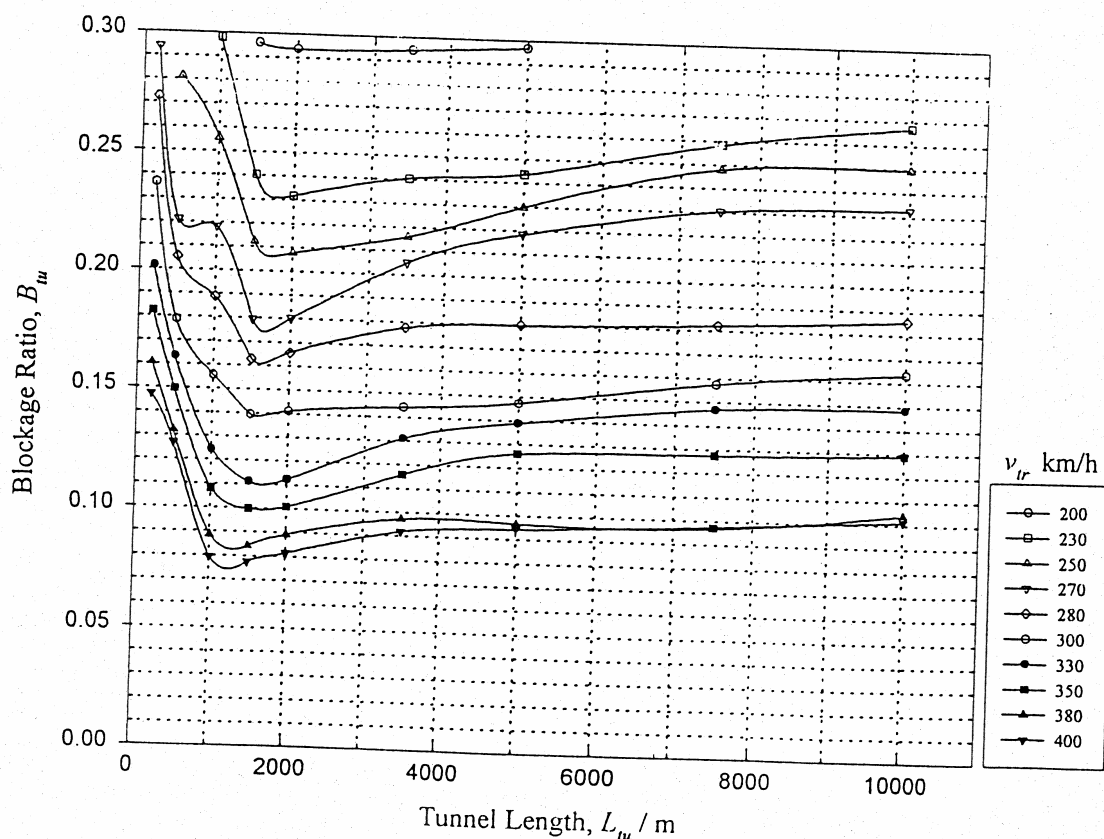


Figure A1.8 Checks on medical health limits, two train operation, $L_r = 400m$

En raison de la non linéarité et des irrégularités des courbes de variations de pression, il n'est pas possible de définir des règles mathématiques de dimensionnement systématiques des sections de tunnels sur des critères de pression tympanique. **Cependant, l'on peut estimer sommairement que la section d'air nécessaire évolue proportionnellement au carré de la vitesse des trains.**

Le tableau 8 ci-après synthétise les sections d'air obtenues par l'utilisation des courbes de la figure 4, en se limitant au rapport de blocage critique, et les sections de tunnels connus réalisées.

Tableau 8 : Récapitulatif de sections d'air définies par le rapport de blocage critique

Vitesse de ligne (km/h)	$\frac{S_{train}}{S_{tunnel}}$	S_{tunnel}	S_{tunnel}
		Pour TGV Duplex 400m Théorique (m ²)	Pour TGV Duplex 400m Réalisé (m ²)
230	0,205	53,2	63 (TGV Méditerranée)
270	0,175	62,4	71 (TGV Atlantique)
300	0,14	77,9	-
320	0,12	90,9	100 (TGV Méditerranée)
350	0,10	109,1	-

La section d'air théorique obtenue est libre de tout obstacle, ce qui conduit à la majorer d'environ 8 à 10m² dans la pratique.

16. ORDRES DE GRANDEUR

16.1. Lignes voyageurs

L'utilisation de trains étanches performants réduit l'importance du critère de confort tympanique au profit du critère de santé tympanique. Néanmoins, pour justifier une section d'air, il est nécessaire de recourir à des modèles de calculs sophistiqués au cas par cas. Cependant l'exploitation des références [6] et [7] et l'exploitation des études aérauliques effectuées sur les différents ouvrages souterrains des LGV Atlantique, Rhône-Alpes et surtout Méditerranée permettent de garantir la faisabilité et de préciser quelques ordres de grandeur pour les monotubes à deux voies dans le cas de rames voyageurs Duplex, à savoir :

Tableau 9 : Extrapolations des sections d'air et des coûts de génie civil par rapport aux études aérauliques de LGV réalisées

Vitesse de ligne (km/h)	Section d'air (m ²)	Source	Evolution du prix du génie civil / V=300km/h
230	63	TGV Méditerranée	-20%
270	71	TGV Atlantique	-10%
300	85	Extrapolation	
320	100	TGV Méditerranée	+16%
350	118	Extrapolation	+33%

16.2. Lignes mixtes

Si les AF circulaient à vitesse équivalente des TGV voyageurs, pour évaluer la section d'air d'un tunnel d'autoroute ferroviaire, en monotube bidirectionnel, il conviendrait de majorer celle d'un tunnel TGV voyageurs de 50%.

Généralement, la vitesse du convoi d'autoroute ferroviaire est très inférieure à celle d'un TGV voyageurs, et la section d'air déterminée par la prise en compte des critères tympaniques pour un trafic voyageurs convient (en première approche, une autoroute ferroviaire peut circuler à 230km/h dans section d'air dimensionnée pour une LGV voyageurs à 300km/h, à condition d'adapter la section de tunnel aux contraintes de gabarit géométrique). En revanche, le croisement des trains impose de séparer les trafics en tunnel, donc conduit à une solution bitube, laquelle est plus chère d'au moins 40%.

CONCLUSION GENERALE

L'analyse menée permet d'appréhender les critères de conception et de dimensionnement des sections de tunnels des lignes ferroviaires à grande vitesse, au regard des dispositions réglementaires, des gabarits ferroviaires et des phénomènes aérodynamiques.

A l'instar de la LGV Méditerranée, l'orientation choisie privilégie les tunnels monotubes bidirectionnels, plus économiques d'environ 40% par rapport aux tunnels bitubes. Cependant, il n'est pas possible de statuer sur l'option à retenir sans analyser en détail les caractéristiques de chaque ouvrage (vitesse, profil en long et en travers, longueur, niveau d'équipement, environnement hydrogéologique et humain) et du type de trafic le franchissant.

□ *Equipements et dispositions réglementaires*

Les équipements et dispositions réglementaires des tunnels selon l'ITI 98-300 peuvent induire une occupation supplémentaire de la section du tunnel (colonne sèche, ventilation longitudinale...) et en imposent de fait une augmentation de la section déterminée par les critères tympaniques qui est une section libre de tout obstacle. Certaines de ces dispositions peuvent influencer la géométrie de la section, comme la prise en compte du gabarit du trottoir qui nécessite un rayon de courbure particulier au niveau des piédroits : l'augmentation de section qui en résulte dépend principalement de la technique de forage utilisée (méthode traditionnelle ou au tunnelier).

□ *Mixité des trafics*

Envisager une mixité des trafics impose certaines contraintes, aussi bien sur l'exploitation que sur les équipements, à savoir :

- L'allongement des tunnels, du fait des contraintes plus forte sur les tracés,
- La nécessaire séparation des trafics, qui a pour conséquence l'imposition de section bitube plus onéreuse (+40%) que les sections monotube,

□ *Gabarits ferroviaires*

Il s'agit du critère de dimensionnement dont l'approche est la plus évidente, qui constitue une contrainte à prendre en compte, sans être dans le cas des LGV, le paramètre déterminant.

□ *Critères tympaniques*

L'analyse des critères tympaniques met en exergue la sensibilité de l'influence de la longueur de l'ouvrage, de la nature et la vitesse du matériel roulant dans le dimensionnement de la section d'un tunnel. La section libre minimale nécessaire est déterminée par les variations de pressions ressenties par les usagers, tant pour leur confort que pour leur santé. Les moyens technologiques (étanchéification des rames par exemple) et sophistication du génie civil (aménagements aérauliques) permettent d'en atténuer les effets sur le dimensionnement des sections de tunnels. Néanmoins, le respect du seul critère de santé en cas de défaut d'étanchéité du train, reste déterminant pour le dimensionnement de la section des tunnels de LGV.

□ *Dimensionnement suivant la vitesse de ligne*

La vitesse de ligne influe fortement sur le dimensionnement suivant le respect des contraintes tympaniques. **On peut estimer sommairement que la section d'air nécessaire évolue proportionnellement au carré de la vitesse des trains.** Les ordres de grandeur de dimension de section et de coûts relatifs au tunnels monotubes, LGV voyageurs, sont fournis dans le tableau ci-après (extrait du §16 ci-avant).

Tableau 10 : Extrapolations des sections d'air et des coûts de génie civil par rapport aux études aérauliques de LGV réalisées

Vitesse de ligne (km/h)	Section d'air (m²)	Source	Evolution du prix du génie civil / V=300km/h
230	63	<i>TGV Méditerranée</i>	-20%
270	71	<i>TGV Atlantique</i>	-10%
300	85	Extrapolation	
320	100	<i>TGV Méditerranée</i>	+16%
350	118	Extrapolation	+33%

17. TABLES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Champ d'application de l'ITI 98-300	9
Tableau 2 : Synthèse de l'ITI 98-300	10
Tableau 3 : Répartition des tunnels de la LGV / ITI 98-300.....	11
Tableau 4 : Application de l'ITI 98-300 aux tunnels 800m<L<5km de la LGV PACA	16
Tableau 5 : Application de l'ITI 98-300 aux tunnels 5km<L<10km de la LGV PACA	18
Tableau 6 : Estimation du coût des équipements non ferroviaires	27
Tableau 7 : Principales caractéristiques des gabarits limites d'obstacle.....	29
Tableau 8 : Récapitulatif de sections d'air définies par le rapport de blocage critique	38
Tableau 9 : Extrapolations des sections d'air et des coûts de génie civil par rapport aux études aérouliques de LGV réalisées.....	39

18. TABLES DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de gabarits types	31
Figure 2: Système d'ondes créées par le passage d'un train en tunnel.....	33
Figure 3: Variations de pression à l'intérieur d'une voiture de TGV.....	37
Figure 4: Vérification des limite « santé », circulation de deux trains, $L_{\text{train}}=400\text{m}$	38

GLOSSAIRE

AF	Autoroute Ferroviaire
BAL	Block Automatique Lumineux
CF	Coupe Feu
DBC	Détecteur de Boîtes Chaudes
KVB	Contrôle de Vitesse par Balises
ITI	Instruction Technique Interministérielle
LGV	Ligne à Grande Vitesse
MD	Marchandises Dangereuses
NF	Norme Française
PACA	Provence Alpes Côte d'Azur
RFF	Réseau Ferré de France
RFN	Réseau Ferré National
TMD	Transport de Marchandises Dangereuses
UP	Unité de Passage