

# MEXICO

étude comparative

**fer**

**pneu**

*SOFRETU*

12, RUE JULES CESAR 75012 PARIS



SOFRETU - RATP

INT/MEX 132 MR 02

METRO DE MEXICO

**ETUDE COMPARATIVE DES SYSTEMES**

**DE ROULEMENT SUR FER ET SUR PNEUMATIQUES**

---

- Décembre 1981 -

## SOMMAIRE

	<u>Pages</u>
<u>INTRODUCTION</u>	2
<u>1 - Comparaison des caractéristiques intrinsèques des matériels fer et pneu</u>	5
1.1. - Performances traction et freinage	5
1.2. - Nuisances : bruits et vibrations	7
1.3. - Domaines d'application	11
<u>2 - Critères d'exploitation</u>	14
2.1. - Intervalle minimal	14
2.2. - Interstation moyenne	16
<u>3 - Eléments de coût</u>	18
3.1. - Ratios d'investissement	18
3.2. - Ratios d'exploitation	19
<u>4 - Considérations sur les extensions du réseau</u>	21
<u>ANNEXES</u>	
<u>Annexe 1</u> - Notions sur les vitesses d'approche en station - Vitesses commerciales	24
<u>Annexe 2</u> - Coûts d'entretien du matériel roulant	
<u>Annexe 3</u> - Surface des ateliers	
<u>Annexe 4</u> - Investissement et entretien de la voie	

## ETUDE COMPARATIVE DES SYSTEMES DE ROULEMENT SUR FER ET SUR PNEUMATIQUES

### INTRODUCTION -

L'apparition de la technique du roulement sur pneumatiques, mise au point par la RATP au début des années 50, a constitué un évènement important dans l'histoire des transports urbains de type métro. Alors que d'autres techniques nouvelles, également apparues à cette époque, ne parvenaient pas à dépasser le stade de l'étude ou du prototype, le métro sur pneumatiques s'est imposé sur plusieurs réseaux tels que Paris, Santiago du Chili, Marseille, Lyon, Lille et surtout Mexico qui, par le nombre de voyageurs qu'il transporte, constitue un des métros les plus performants du monde. Environ 3 000 voitures de métro utilisant la technique du roulement sur pneumatiques circulent actuellement dans le monde.

Le métro sur pneumatiques s'est ainsi affirmé comme un système valable, pouvant apporter, dans certains cas, une meilleure réponse qu'un métro classique aux problèmes spécifiques qui peuvent se poser lors de la conception d'un réseau. Le but de la présente note est de dégager les caractéristiques de la technique du roulement sur pneumatiques en comparaison avec la technique classique du roulement sur fer et de préciser dans quels cas elle peut constituer une solution préférable compte tenu de ses caractéristiques particulières.

Nous examinerons successivement dans la présente note :

- . les caractéristiques spécifiques du matériel sur pneumatiques sous l'angle des performances liées à l'adhérence et de la réduction des nuisances (bruit et vibrations) ;
- . les éléments d'une comparaison plus globale, situant le matériel roulant dans l'ensemble du système métro et montrant les avantages que peut présenter le pneumatique, en particulier dans le cas d'un réseau performant, avec forte charge et intervalles réduits, comme l'est celui de Mexico.

.../

On connaît les avantages du matériel sur pneumatiques sur le plan de l'adhérence. Les accélérations au démarrage peuvent atteindre des valeurs élevées, au limite du confort des voyageurs, tout en conservant une formation mixte motrice + remorque. Le système sur fer doit lui avoir recours à l'adhérence totale, c'est-à-dire faire appel à des trains composés uniquement de motrices, ce qui est de nature à augmenter les coûts d'investissements lors de la construction du réseau. Au freinage, les bonnes qualités d'adhérence du pneumatique, permettent d'obtenir une amélioration spectaculaire des décélérations garanties en toutes circonstances.

Ces différents aspects sont développés plus loin, en particulier sous l'angle des avantages qui en découlent sur le plan de l'implantation de la signalisation et de l'intervalle minimal possible entre trains.

Dans le domaine du bruit et des vibrations, qui devient une préoccupation de plus en plus grande pour les responsables de l'urbanisme et de l'organisation des transports dans les grandes villes, l'intérêt du matériel sur pneumatiques est particulièrement sensible. Si l'on peut, en effet, réduire le niveau de bruit à l'intérieur des voitures d'un matériel sur fer grâce à des précautions spéciales dans la construction des caisses, l'avantage reste tout de même au matériel sur pneumatiques, lorsque l'on considère le bruit global " d'exploitation", qui intègre les différents éléments intervenant sur ce point. En ce qui concerne les vibrations, l'intérêt du matériel sur pneumatiques est encore plus évident. Les réseaux qui sont équipés de matériel sur fer, savent bien combien sont mal ressenties par les habitants des immeubles riverains du métro les vibrations incessantes qui sont communiquées par le roulement. Par contre, dans le cas du matériel sur pneumatiques aucune vibration n'est transmise aux installations proches du tunnel. On ne peut atteindre un niveau acceptable de nuisances avec le matériel fer qu'en faisant appel à des techniques sophistiquées et coûteuses de pose de voie.

Nous examinerons en détail dans la deuxième partie de la note les deux types de roulement, en considérant le matériel roulant comme un élément intégré dans l'ensemble du système métro. Il est bien évident, que certains avantages du métro sur pneumatiques, peuvent ne pas présenter d'intérêt particulier sur tel ou tel réseau.

.../

Par exemple, le problème des vibrations peut ne pas présenter d'acuité particulière, si la ligne est implantée loin des immeubles. De même, la recherche de hautes performances peut être sans intérêt si le réseau est construit dans une ville moyenne sans charges excessives de voyageurs.

Nous verrons par contre, que la comparaison doit être conduite avec le plus grand soin, lorsque le réseau de métro considéré est celui d'une grande métropole où l'on doit rechercher une amélioration des conditions de transport par la réduction des intervalles et une optimisation des coûts d'investissement.

On constate alors que le matériel sur pneumatiques présente un avantage certain lorsque les intervalles approchent des 90 secondes. L'analyse multi-critères, à laquelle il peut être alors procédé, montre que pour le matériel sur pneumatiques :

- . les coûts d'investissement peuvent être sensiblement minorés, grâce à la diminution du nombre des trains liée à l'augmentation de la vitesse commerciale. Cette économie s'ajoute à celle que l'on réalise en utilisant des remorques associées à des motrices, au lieu de faire appel à un matériel tout moteur comme c'est le cas pour le roulement sur fer ;
- . à niveau d'investissement donné, ce qui est le cas pour un réseau en activité, on peut obtenir une rentabilité optimale de ces investissements en ayant recours à des intervalles entre trains les plus réduits possible.

Le matériel sur pneumatiques trouve ainsi sa pleine justification dans le cas d'un réseau à hautes performances, comme l'est celui de Mexico.

°  
° °

Les différents éléments de la comparaison fer-pneu dont nous venons de dégager en introduction quelques aspects essentiels, sont développés en détail dans la suite de la note. Nous avons placé en annexe, les différentes notes et études particulières qui pourront éclairer ou justifier certains aspects techniques de la comparaison.

.../

# 1 - COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DES MATERIELS FER ET PNEU

## 1.1. PERFORMANCES TRACTION ET FREINAGE

### 1.1.1. - Performances en traction - Accélération maximale

L'accélération maximale correspond à la phase de démarrage pendant laquelle l'effort moteur est maintenu constant.

Les valeurs les plus courantes pour un matériel metro sont les suivantes :

- matériel pneu : 1,1 à 1,3 m/s<sup>2</sup>
- matériel fer : 0,8 à 1,3 m/s<sup>2</sup>

L'accélération maximale dépend du taux de motorisation et du coefficient d'adhérence.

Pour le matériel fer, le coefficient d'adhérence que l'on peut retenir dans le cas du métro se situe entre 0,13 et 0,19 (1). Il dépend de nombreux paramètres dont nous ne citerons que les principaux :

- type d'équipement (JH, hacheur), (2)
- conditions climatiques (pluie ....).

Pour le matériel "pneumatique", le coefficient d'adhérence retenu est de 0,3. Il dépend essentiellement de deux paramètres :

- confort des voyageurs,
- conditions climatiques (pluie ...) (3)

.../

- 
- (1) - Des coefficients d'adhérence plus élevés peuvent être pris en compte dans le cas des chemins de fer en utilisant des systèmes sophistiqués d'anti-patinage, le sablage ....
- (2) - L'équipement JH (rhéostat) fait, à chaque cran, varier sensiblement l'effort moteur. Les à coups d'effort qui en résultent sont nuisibles à une bonne adhérence. En revanche, l'effort est constant avec un hacheur, ce qui permet d'adopter un coefficient d'adhérence plus élevé.
- (3) - Le rainurage des pistes et l'utilisation de pneumatiques à sculptures permettent de conserver les mêmes performances que par temps sec.



### 1.1.2. - Performances en freinage

Les performances en freinage sont analysées en fonction des différentes décélérations dont il est tenu compte pour l'élaboration d'un projet. Ces décélérations sont de trois ordres :

#### - décélération maximale instantanée

C'est la décélération maximale que l'on obtient à partir des sollicitations d'adhérence maximales. Cette valeur est dite instantanée, dans le sens où elle n'est pas maintenue durant tout le freinage à cause, par exemple, du coefficient de frottement des sabots variable avec l'énergie absorbée et la vitesse, et du temps de réponse des organes de freinage.

Les valeurs retenues sont les suivantes :

- . matériel pneu :  $1,8 \text{ à } 2 \text{ m/s}^2$ ,
- . matériel fer :  $1,2 \text{ m/s}^2$  (1)

#### - décélération de service

C'est la décélération moyenne obtenue entre l'ordre de freinage et l'arrêt du train. Elle est inférieure aux possibilités extrêmes du frein pour tenir compte, d'une part, du temps de réponse des équipements et, d'autre part, de la possibilité d'une dégradation des qualités de freinage (avaries du frein n'interdisant pas la poursuite de l'exploitation).

Les valeurs retenues sont les suivantes :

- . matériel pneu :  $1,1 \text{ à } 1,2 \text{ m/s}^2$
- . matériel fer :  $0,8 \text{ m/s}^2 \text{ à } 0,9 \text{ m/s}^2$

#### - décélération garantie

C'est la décélération moyenne obtenue dans les plus mauvaises conditions (pluie, avarie ...) d'adhérence, servant de définition à l'implantation de la signalisation. Il s'agit d'une valeur statique eu égard à l'aspect probabiliste de la sécurité du frein pneumatique.

.../

(1) - Cette valeur peut être majorée dans le cas d'utilisation particulière : patins électromagnétiques par exemple.

Les valeurs retenues sont les suivantes :

- matériel pneu :  $1,5 \text{ m/s}^2$  en souterrain  
 $1,2 \text{ m/s}^2$  en aérien sur pistes lisses  
 $1,5 \text{ m/s}^2$  en aérien sur pistes striées
- matériel fer :  $0,6 \text{ m/s}^2$   
 $0,8 \text{ à } 0,9 \text{ m/s}^2$  avec patins magnétiques

Ces valeurs ne sont valables qu'en palier. Ceci implique que les distances de sécurité respectives soient dans le rapport

$\frac{0,6}{1,2}$  soit  $\frac{1}{2}$  en faveur du matériel sur pneumatiques.

Dans le cas où le réseau présenterait des pentes de  $40^\circ/00$ , ces distances varieraient dans le rapport :

$$\frac{0,6}{1,2} - \frac{0,4}{0,4} = 0,25 \rightarrow 1/4 \text{ pour les plus mauvaises}$$

conditions du matériel sur pneumatiques.

## 1.2. NUISANCES : BRUITS ET VIBRATIONS

### 1.2.1. - Introduction

La notion de bruit a pour une bonne part, un caractère subjectif. Il ne faut cependant pas en oublier l'aspect physiologique. Ainsi, lorsqu'un individu est soumis à une source de 75 dB, la surface de la pupille de l'oeil augmente de 10 %. Pour un même sujet soumis à une source de 90 dB, la surface de la pupille de l'oeil augmente de 35 %. (1)

D'une façon générale, le bruit émis par les moyens de transport est considéré comme la gêne principale pour le voyageur. Aussi, de nombreux moyens sont-ils mis en oeuvre pour réduire les nuisances créées par les moyens de transport souterrains de type métro.

.../

---

(1) - ce qui traduit un effet de fatigue.

Pour ces derniers, la principale source de nuisance se situe au niveau du roulement.

Dans le cas d'un métro, elle revêt deux aspects :

- . le bruit,
- . les vibrations.

Ce dernier point est important pour un mode de transport évoluant en zone urbaine dense, pour laquelle l'interférence entre tunnel et habitat, représente un problème délicat et risque d'engendrer de nombreuses plaintes de riverains.

### 1.2.2. - Bruit

Nous distinguons pour les deux matériels les types de bruit suivants :

- le bruit "normalisé",
- le bruit "d'exploitation"

Le premier aspect, dit "normalisé", résulte de mesures réalisées conformément aux normes I.S.O. et U.I.T.P. :

- le niveau de bruit est mesuré, en champ libre à 7,50 m de la voie et 1,60 m au-dessus du niveau du rail,
- la mesure est établie pour un train en course sur l'erre à 60 km/h

Les niveaux de bruit moyens relevés sont :

- 78 dBA pour le matériel pneu,
- 79 dBA pour le matériel fer moderne.

On voit que la différence est peu significative (à la limite de précision des mesures). On notera cependant que pour un matériel fer de conception contemporaine à celle du matériel sur pneumatiques, les niveaux de bruit sont de 82 dBA, soit environ deux fois plus bruyants.

.../

Dans les mêmes conditions de marche, les niveaux de bruit à l'intérieur des voitures sont :

- . 65 dBA pour le matériel sur pneu,
- . 65 à 72 dBA pour le matériel fer

Les valeurs soulignées sont celles obtenues pour des matériels de conception de caisse similaire.

Les 65 dBA sont obtenus avec un matériel fer moderne ayant pu bénéficier des dernières techniques en matières d'isolation phonique.

Le second aspect du bruit dit "d'exploitation", résulte d'études statistiques tenant compte des aléas de la voie et du matériel roulant. En effet, certains points de la voie sont plus bruyants, soit parce qu'ils présentent des lacunes naturelles (joints de rails, appareils de voie ...) soit à cause d'usures accidentelles (usure ondulatoire, plats aux roues ....)

Dans ces conditions, les niveaux de bruit intérieur sont :

- . 75 dBA pour le matériel sur pneu,
- . 80 à 90 dBA pour le matériel fer, en fonction de la qualité de l'isolation phonique.

### 1.2.3. - Vibrations

A ce titre, le matériel roulant sur pneumatiques présente un avantage incontestable par rapport au matériel roulant sur roues fer. En effet, aucune mesure n'a pu mettre en évidence des vibrations transmises par le matériel roulant sur pneumatiques.

Pour le matériel roulant sur roues fer, le niveau de vibrations transmises aux habitations riveraines est de 35 à 55 dBA dans la gamme de fréquences comprises entre 20 et 200 Hz.

L'amélioration de pose de voie (utilisation de polymères) entraîne une diminution de 6 à 8 dBA.

La pose de voie sur béton avec interposition d'un double étage d'élasticité, entraîne une diminution d'environ 15 dBA. Toutefois, dans ce dernier cas, il est intéressant de noter que ce type de pose de voie, s'il est avantageux pour les riverains, entraîne une augmentation sensible du bruit - de 3 à 8 dBA - à l'intérieur des voitures. Le surcroît d'investissement correspondant par rapport à une voie fer sur ballast est important.

.../

CARACTERISTIQUES DES MATERIELS DE RESEAU  
DE METRO ROULANT SUR FER OU SUR PNEU

			pneu	fer
<u>ADHERENCE</u>		Accélération maximale	1,1 à 1,3 m/s <sup>2</sup>	0,8 à 1,2 m/s <sup>2</sup>
		Décélération service	1,1 à 1,2 m/s <sup>2</sup>	0,8 m/s <sup>2</sup>
		Décélération maximale instantanée	1,8 à 2 m/s <sup>2</sup>	1,2 m/s <sup>2</sup>
		Décélération Garantie	1,2 m/s <sup>2</sup> 1,5 m/s <sup>2</sup> (1)	0,6 m/s <sup>2</sup> 0,8 à 0,9 m/s <sup>2</sup> (2)
	(1) - Pistes striées en aérien (2) - avec patins magnétiques			
BRUIT	Course sur l'erre	Extérieur Intérieur	78 dBA <u>69 dBA</u>	79 dBA <u>65 à 72 dBA</u>
	Bruits aléatoires	Appareil de voie	roue de sécurité frotteurs neg.	+ 5 à + 10 dBA
		Usure ondulatoire	-	+ 10 dBA
		Plat aux roues	-	+ 10 dBA
		Crissement en courbe	Frotteurs négatifs	+ 10 à + 30 dBA
	Bruit intérieur d'exploitation		75 dBA	80 à 90 dBA
VIBRATIONS	Extérieur au tunnel Habitations riveraines		non mesurable	35 à 55 dBA (20 à 200 Hz)
	Amélioration pose de voie		-	- 6 à - 8 dBA
	Pose béton		-	- 15 dBA + 3 à + 8 dBA dans les voitures

### 1.3. DOMAINES D'APPLICATION

Les domaines d'application de chaque type de matériel sont illustrés graphiquement, page 13, en fonction des différents critères intrinsèques à chaque type de matériel.

A partir de ces éléments représentés sommairement, il est possible, d'un coup d'oeil, de comparer les deux types de matériel :

#### - Vitesse maximale -

Dans le domaine du métro, les vitesses maximales sont généralement comprises entre 50 et 90 km/h, en fonction du réseau sur lequel évolue le matériel roulant.

A ce titre, les deux types de matériels sont équivalents jusqu'à 80 km/h. Aucune contrainte technique ou technologique ne permet de différencier les deux types de matériel.

En revanche, au-delà de 80 km/h le matériel sur pneumatiques perd de son intérêt à cause des risques d'échauffement des pneumatiques. Pour pouvoir atteindre 90 km/h, il est nécessaire de réduire la charge par essieu, par une disposition spéciale des sièges dans les voitures, lors de la construction. Dans ces conditions, le nombre de passagers est sensiblement diminué. Néanmoins, ces vitesses élevées sont rarement atteintes et justifiées pour un réseau de métro dont la longueur des interstations dépasse rarement 1 500 m.

En conclusion les deux matériels sont équivalents dans le domaine d'application du métro.

#### - Charge par roue -

Dans le domaine du métro, les charges par roue atteignent 5 400 kg environ, en pleine charge pour un matériel à gabarit moyen (2,50 m x 16/17m).

Actuellement, les pneumatiques en service permettent de supporter ces charges. Les pneumatiques à nappe croisée peuvent soutenir une charge maximale de 5 500 kg et les pneumatiques à carcasse radiale, une charge maximale de 6 000 kg. Ces charges correspondent effectivement au cas d'un métro à gabarit moyen. En revanche, cette limitation interdit l'accès au grand gabarit du matériel roulant sur pneumatiques.

.../

- Pente - rampes -

Dans le domaine d'un réseau de métro, il est souvent avantageux lors de la construction d'un tunnel, de suivre la surface du sol au plus près. En fonction de la géographie de la ville, les rampes atteintes peuvent alors être importantes.

Dans ce domaine, le matériel sur pneumatiques présente un avantage incontestable de par ses qualités d'adhérence.

En règle générale, les deux types de matériels sont considérés comme équivalents pour des rampes n'excédant pas  $40^{\circ}/00$ . A noter toutefois comme nous l'avons vu au paragraphe 1.1.2. que les distances de sécurité sont, dans le rapport 1/2 (1), favorable au matériel sur pneus en palier, et que ce rapport devient 1/4 (1) dans le cas d'une pente à  $40^{\circ}/00$ .

Au-delà de  $40^{\circ}/00$ , le matériel sur fer doit être équipé des systèmes de freinage supplémentaires (patins magnétiques) et la valeur de  $55^{\circ}/00$  comme une limite maximale.

En revanche, le matériel roulant sur pneumatiques permet le franchissement de rampes de  $80^{\circ}/00$  sans dispositifs complémentaires de freinage.

- Bruit et vibrations -

Les principaux aspects de ce problème sont exposés au chapitre 1.2. Le graphique illustre l'avantage du matériel sur pneumatiques dans ce domaine.

..../

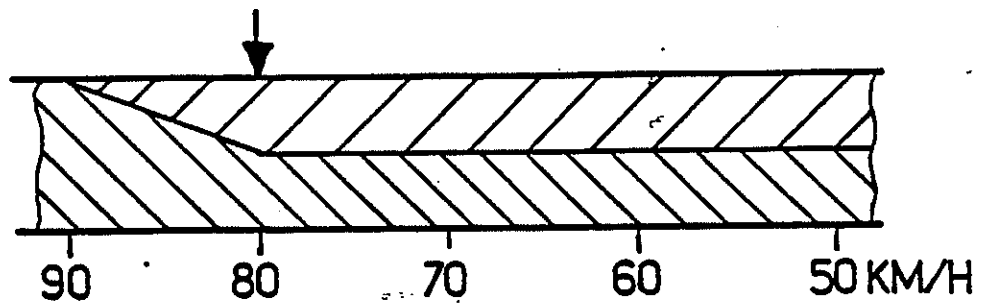
---

(1) voir le chapitre 1.1.2.

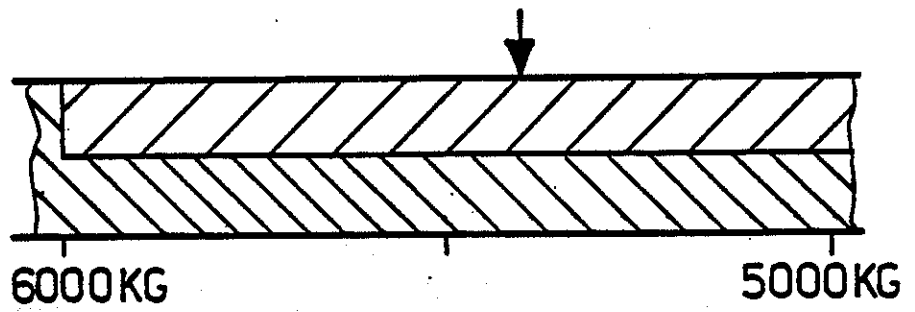
# DOMAINES D'APPLICATION

FER  PNEU 

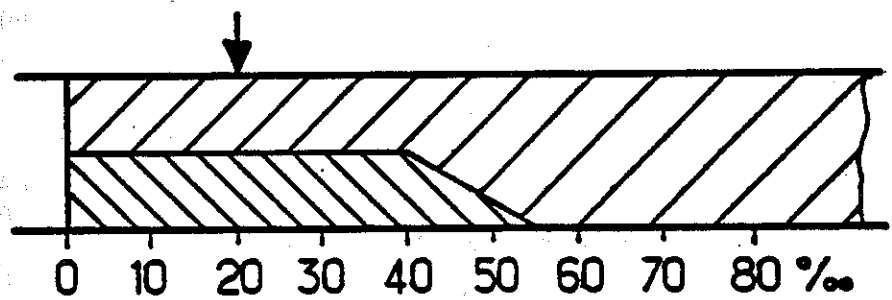
VITESSE  
MAXIMALE



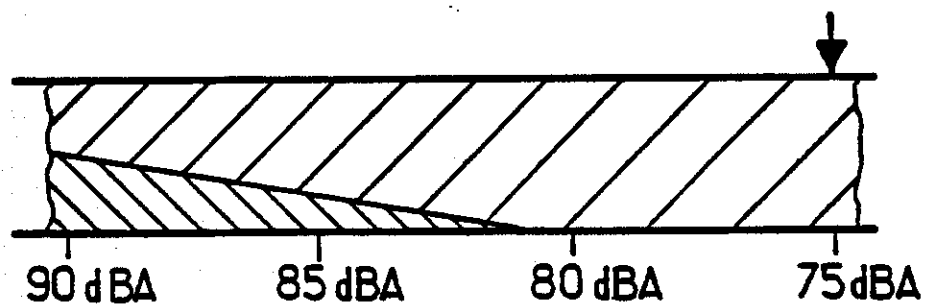
CHARGE  
PAR ROUE



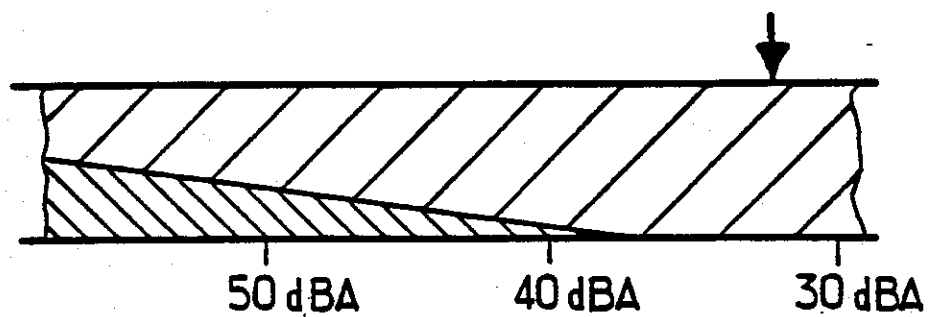
RAMPES



BRUIT EN  
EXPLOITATION



VIBRATIONS





## 2 - CRITERES D'EXPLOITATION

Ces critères font intervenir l'ensemble des caractéristiques intrinsèques de chaque type de matériel, lorsque l'on considère le matériel roulant comme un élément de système complexe qui constitue le réseau de métro.

A ce titre, on peut distinguer les deux critères techniques suivants qui sont liés à la contexture du réseau :

- l'intervalle minimal,
- l'interstation moyenne.

Nous considérerons enfin un troisième critère, celui des investissements globaux pour un réseau performant à intervalles de 90 secondes.

### 2.1. INTERVALLE MINIMAL

L'intervalle minimal dépend essentiellement du débit de la ligne concernée. Dans le cas de Mexico, un intervalle de 90 s. entre trains de 9 voitures permet un débit d'environ 50 000 passagers/heure/sens.

Les caractéristiques intrinsèques du matériel roulant liées à la notion d'intervalle sont :

- les performances en freinage de service,
- les performances en freinage garanti,
- les performances en traction,
- la longueur du train.

A ces critères, il y a lieu d'ajouter le temps de stationnement qui est essentiellement fonction de l'importance de la station concernée (station courante, station de correspondance, station terminus).

.../

Pour assurer un intervalle réduit, il faut limiter au minimum les trois phases suivantes :

- . la phase d'approche en station,
- . la phase de stationnement,
- . la phase de dégagement de la station.

La comparaison du comportement des deux types de matériels est donc à réaliser pour chacune de ces phases : (voir annexe "Notion de vitesse d'approche en station")

#### - Dégagement de la station

Cette phase est liée aux performances du train en traction. Pour la comparaison nous avons considéré que ces performances étaient identiques entre les deux types de matériels.

Ceci implique une motorisation complète du matériel à roulement sur fer ( 2 M + 7 N), alors que la motorisation du matériel à roulement sur pneumatiques ne sera que de 2/3 ( 2 M + 3 R + 4 N).

#### - Stationnement

Cette phase est liée au diagramme des voitures. Pour la comparaison, les deux diagrammes seront considérés comme identiques. En revanche, il a été tenu compte de la charge du réseau de Mexico, qui conduit à des temps de stationnement voisins de 30 secondes.

#### - Approche en station

Cette phase est plus délicate pour le matériel à roulement fer. En effet, elle est directement liée aux performances en freinage - freinage de service et freinage de sécurité garanti - qui déterminent les distances d'arrêt et le temps d'approche en station.

Dans des conditions de trafic intense - intervalle réduit et temps de stationnement important (20 à 30 s) - la vitesse d'approche en station est limitée pour le matériel à roulement fer par rapport au matériel à roulement sur pneumatiques.

Exemple : Pour un stationnement de 30 s et un intervalle de 90 s :

- . Vitesse d'approche du " fer " : 43,30 km/h
- . Vitesse d'approche du " pneu " : supérieure à 80 km/h

.../

Il s'en suit une perte de temps de parcours du matériel à roulement fer par rapport au matériel à roulement sur pneumatiques :

Exemple : Pour une réserve de temps de 4 s/km, le temps de parcours est :

Sur 500 m	{	- 59,6 secondes pour un matériel " fer "
		- 50,9 secondes pour un matériel " pneu "
Sur 1 000 m	{	- 90,8 secondes pour un matériel " fer "
		- 77,4 secondes pour un matériel " pneu "

De ces considérations résultent deux notions fondamentales :

- la vitesse commerciale ( $V_c$ ) du matériel roulant sur pneumatiques sera plus élevée ;
- le nombre de trains du matériel roulant sur fer sera de 10 à 13,5 % supérieur au nombre de trains à roulement sur pneumatiques pour assurer le même trafic (50 000 passagers/heure/sens) (1).

L'investissement en nombre de voitures sera donc plus élevé pour un matériel roulant fer. Il en sera de même pour les coûts d'exploitation, les équipes de conduite devant être proportionnellement plus importantes.

*Le matériel à roulement sur pneumatiques est donc plus avantageux pour les lignes à débit important.*

## 2.2. INTERSTATION MOYENNE

Le critère d'interstation moyenne est lié aux caractéristiques intrinsèques suivantes du matériel roulant :

- vitesse maximale,
- charge par roue.

Dans le cas du matériel à roulement sur pneumatiques, la vitesse de 80 km/heure est considérée comme une limite technologique lorsque la charge du matériel est élevée. En revanche, pour le matériel à roulement sur fer, cette vitesse ne représente aucune limite technologique.

.../

---

(1) à charge normale

A partir de 1 200 m d'interstation, le matériel "pneu" atteint sa vitesse limite : 80 km/h, le matériel "fer" pour sa part atteignant une vitesse de 76 km/h environ.

Pour des interstations plus longues, le matériel "pneu" est toujours limité, alors que le matériel "fer" pourrait atteindre des vitesses plus élevées.

Cependant, en tenant compte du critère précédent (intervalle minimal et vitesse d'approche), on s'aperçoit que le matériel "fer" ne pourra pas dépasser la vitesse maximale imposée pour des intervalles réduits et des temps de stationnement relativement longs.

En revanche, pour des intervalles égaux ou supérieurs à 120 s (2 mn) et des temps de stationnement réduits (15 s), le matériel fer n'est plus limité par la vitesse d'approche.

A partir d'une interstation moyenne de 1 400 m, deux effets vont donc se conjuguer et réduire sensiblement l'avantage du matériel sur pneumatiques :

- . l'approche de la vitesse technologique maximale,
- . le rattrapage possible du temps perdu par le matériel fer, si les intervalles sont égaux ou supérieurs à 120 s.

Dans le cas d'une ligne à charge moyenne - à interstations longues - supérieures à 1 400 m - le matériel roulant sur fer devient avantageux par rapport au matériel roulant sur pneumatiques.

Par contre, dans le cas d'interstations moyennes (de 800 à 1 200 m), que l'on trouve le plus couramment sur les réseaux de métro l'avantage reste au matériel sur pneumatiques.

### 3 - ELEMENTS DE COUT

Les éléments de coût intervenant sur un réseau performant sont présentés en deux parties sous forme de ratios, la base 100 étant référencée par rapport au matériel roulant sur pneumatiques.

La première partie concerne les coûts de construction, la seconde, les coûts d'entretien.

#### 3.1. RATIOS D'INVESTISSEMENT

Les ratios d'investissement concernent les points suivants :

- . génie civil,
- . voie,
- . matériel roulant,
- . énergie,
- . automatismes.

Le tableau suivant résume les ratios d'investissement :

	Matériel fer	Matériel pneu
Génie civil	100	100
Voie (1)	65,9 à 80,60	100
Matériel roulant (2)	(109,85) 120,84 à 148,30	100
Energie	100	100
Automatismes	100	100

.../

- (1) - Le ratio a été établi pour une voie pneu sur ballast par rapport à une voie fer sur pose béton d'une part et, d'autre part, pour une voie pneu sur pose béton par rapport à une voie fer sur pose béton.
- (2) - Le ratio entre parenthèse est donné pour un train. Les deux autres ratios prennent en compte le nombre de trains supplémentaires de matériel fer, nécessaire à assurer le même débit (50 000 passagers/heure/sens).

### 3.2. RATIOS D'EXPLOITATION

Les ratios d'exploitation concernent essentiellement les points suivants :

- . personnel d'exploitation,
- . entretien du MR,
- . entretien de la voie,
- . consommation d'énergie

Le tableau suivant résume les ratios d'exploitation :

	Matériel fer	Matériel pneu
Personnel d'exploitation (1)	110 à 113,5	100
Entretien du MR	110,3	100
Entretien de la voie (2)	227,3 à 416,7	100
Consommation d'énergie (3)	84 à 99	100

- (1) - Dépend directement du nombre de trains en service suivant la longueur moyenne des interstations
- (2) - Dépend du type de pose de voie (ballast ou béton)
- (3) - Dépend du nombre de trains en service suivant la longueur moyenne des interstations.

En résumé, en pondérant chaque poste du bilan en fonction de son importance, l'avantage du matériel pneumatiques est d'environ 5 % par rapport au matériel sur fer sur le seul plan des investissements. En ce qui concerne les dépenses d'exploitation, l'avantage va également au matériel sur pneumatiques. Il est toutefois difficile de quantifier ce poste qui dépend très largement des conditions économiques locales (coût de l'énergie, dépenses de personnel).

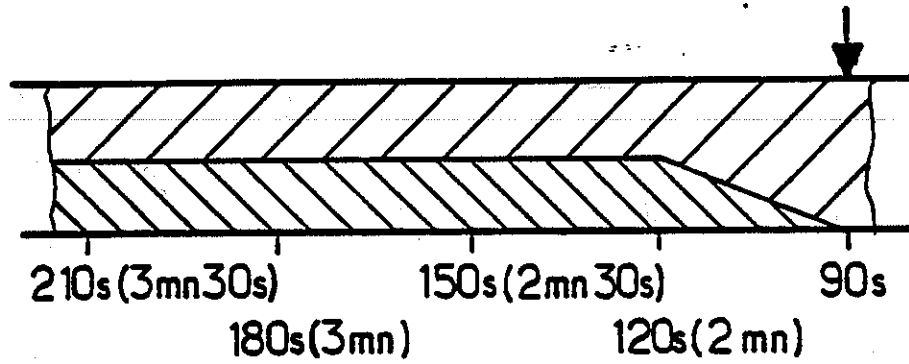
.../

# CRITERES D'EXPLOITATION

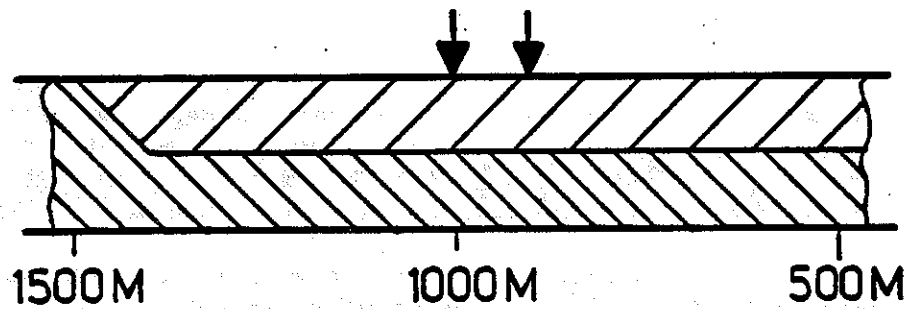
FER 

PNEU 

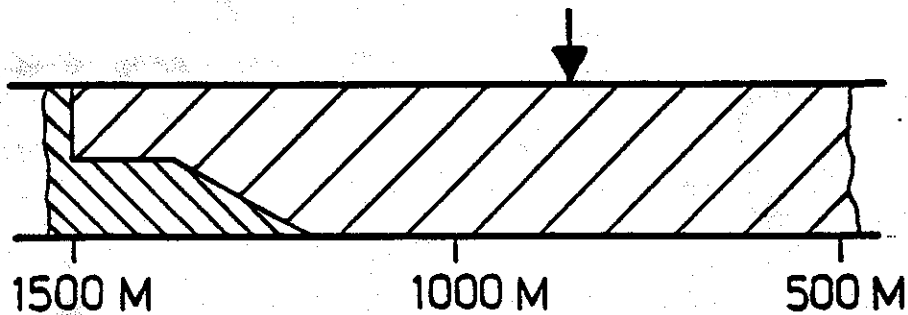
INTERVALLE MINIMAL



INTERSTATION MOYENNE



INVESTISSEMENT  
MATERIEL ROULANT POUR 90 s



#### 4 - CONSIDERATIONS SUR LES EXTENSIONS DU RESEAU

Le choix du type de matériel roulant à retenir pour le développement ultérieur du réseau de métro de Mexico - matériel actuel sur pneu ou nouveau matériel à roulement fer - peut encore être éclairé après les considérations techniques et économiques précédentes, par l'analyse des schémas directeurs d'extension du réseau de métro ainsi que celui du " sistema de transporte suburbano ".

°  
° °

A l'horizon 2000, il est prévu que le métro se développera sur une longueur de 380 km en demeurant à l'intérieur du périmètre du District fédéral et qu'il favorisera ainsi une nouvelle structuration de l'espace urbain par densification le long des axes qu'il emprunte.

A cette même date, le réseau du "sistema de transporte suburbano", en chemin de fer pour une longueur de 210 km, sera implanté au Nord et à l'Est du District fédéral essentiellement pour relier entre eux les principaux pôles urbains qui doivent s'agrandir dans ces zones périphériques (Chalco, Texcoco, Ecatepec, Cautitlan, Huehuetoca ...).

Ce second réseau jouxte en fait le réseau de métro dans les extrémités Nord et Est de ce dernier. Toutefois, les points prévus pour les échanges de voyageurs entre ces deux réseaux sont peu nombreux, de sorte que les trafics prévisibles aux heures de point sont parfois très importants (65 000 personnes/h à La Villa, 45 000 à Perifico, 35 000 à Azcapotzalco et Tacuba).

°  
° °

.../



Cette conception de deux réseaux de transport collectif à zones géographiques d'influences distinctes conduit :

- . à diminuer l'accessibilité au centre de Mexico des secteurs périphériques Nord et Est de l'agglomération, en imposant systématiquement une rupture de charge en limite du District fédéral.
- . corrélativement, à congestionner les extrémités Nord et Est de certaines lignes de métro, qui, de ce fait, ne pourront plus assurer leur rôle normal de desserte interne du District fédéral par manque de capacité de transport résiduelle ; dans ces conditions, le choix du matériel sur pneu qui autorise des intervalles minimum entre trains plus faibles que les matériels à roulement fer, deviendrait impératif, mais il deviendrait aussi sans doute nécessaire de renforcer les services offerts par les lignes d'autobus et de trolleybus pour pallier cette carence en capacité de transport.

A cet égard, il est intéressant de rapprocher quelques données statistiques sur les agglomérations de Paris et de Mexico.

Aujourd'hui les volumes quotidiens de déplacements motorisés sont comparables (18 millions). Par ailleurs, on remarque que si les superficies de Paris intra-muros et de la partie du District fédéral située à l'intérieur du Circuito Interior sont identiques, pour des populations respectives de 2,3 et 3 millions d'habitants, les flux de déplacements sont d'ores et déjà plus importants à Mexico (9 millions de déplacements internes ou bien dont l'origine ou la destination sont à l'intérieur du Circuito Interior contre 6,7 pour Paris intra-muros).

Ainsi, si l'on superpose le plan du réseau de métro de Paris sur le plan homologue du réseau de métro prévu à l'horizon 2000 pour desservir l'intérieur du Circuito Interior, on note une densité de lignes beaucoup plus faible à Mexico, alors que déjà aujourd'hui la demande de transport y est sensiblement supérieure et ne pourra que croître dans l'avenir.

Cette comparaison renforce donc l'idée d'un manque potentiel à terme de capacité en transport collectif dans le centre de l'agglomération de Mexico.

.../

En conclusion, il semble intéressant de poursuivre le développement du réseau de métro en continuant à utiliser un matériel roulant sur pneumatiques, car il permet une capacité de transport plus importante. Toutefois, ce réseau ne doit pas s'étendre démesurément et conduire ainsi à des lignes trop longues : le métro ne jouerait plus alors son rôle fondamental de desserte interne et locale de la zone centrale de l'agglomération de Mexico, ce que permettent des interstations d'une longueur moyenne comprise entre 800 et 1 300 m.

Le rôle de desserte régionale, à plus longue distance avec des interstations plus longues, comprises entre 2 et 4 km par exemple, et une vitesse commerciale plus élevée, doit par conséquent être assuré par le chemin de fer suburbain, dont au moins une ligne d'orientation Est - Nord-Ouest devrait transiter par le centre de Mexico pour à la fois :

- augmenter la capacité de transport dans le centre, insuffisante à terme si elle n'est assurée que par le métro ;
- améliorer les temps d'accès des zones d'urbanisation périphériques à ce centre.

## **A N N E X E 1**

### **NOTION SUR LES VITESSES D'APPROCHE EN STATION**

#### **VITESSES COMMERCIALES**

Dans notre étude, nous avons supposé que tous les points durs de la ligne, concernant la réalisation d'intervalles théoriques réduits, étaient résolus, à l'exception des stations. Nous ne prendrons donc pas en compte les terminus, ni l'implantation de la signalisation en voie courante, sauf en ce qui concerne l'approche et le dégagement de la station.

La cinématique des trains au niveau de la station se décompose en trois parties :

- .. l'approche de la station,
- . l'échange des voyageurs en station,
- . le dégagement de la station.

Pour pouvoir réaliser un intervalle théorique  $I$ , il faut que la somme des temps correspondant aux trois phases soit égale à  $I$ , soit :

$$I = T_A + T_S + T_D$$

Le temps de dégagement  $T_D$  correspond aux performances intrinsèques du matériel roulant : c'est le temps nécessaire pour que le train parte du point de signalisation correspondant à la station.

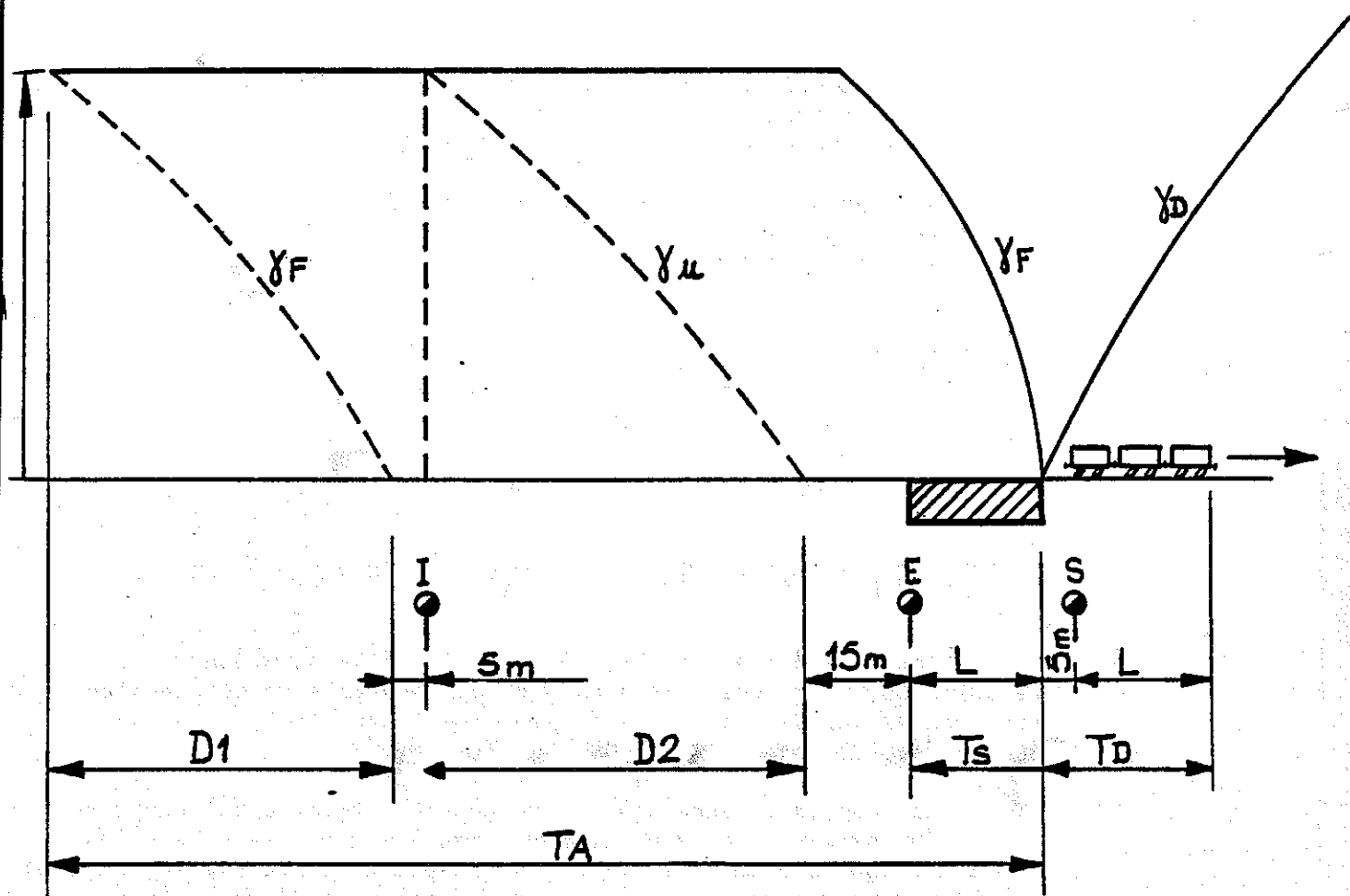
Le temps de stationnement  $T_S$  correspond au temps nécessaire à l'échange des voyageurs en station ; il est donc lié au trafic propre à la station. On voit donc qu'en fonction de l'intervalle théorique à réaliser et du temps de stationnement nécessaire à la station considérée, on obtient un temps d'approche  $T_A$  qui est déterminé par :

$$T_A = I - T_D - T_S$$

D'autre part, si l'on suppose une implantation de la signalisation donnée par la figure jointe, ce temps d'approche  $T_A$  est le temps nécessaire pour parcourir  $D_1 + D_2 + L + 20$  m, où en appelant  $\gamma_F$  la décélération de service,  $\gamma_u$  la décélération d'urgence garantie et  $V_A$  la vitesse d'approche :

.../

# HYPOTHESES DE CALCULS DE VITESSES D'APPROCHE EN STATION



$$- D_1 = \frac{V_A^2}{2 \gamma_F} \quad (D_1 \text{ correspond à la distance à laquelle le train circulant à } A, \text{ doit commencer à freiner pour s'arrêter avant le signal } I)$$

$$- D_2 = \frac{V_a^2}{2 \gamma_u} \quad (\text{distance nécessaire à garantir l'arrêt du train avant la station, le train } a \text{ au passage du signal } I \text{ au rouge, provoquant le freinage d'urgence du train})$$

-  $L = 150 \text{ m}$  (longueur supposée de la station)

-  $20 \text{ m}$  correspondant aux gardes prises dans notre hypothèse : arrêt normal du train à  $5 \text{ m}$  du signal (distance de visibilité), garde de  $15 \text{ m}$  entre deux trains en cas de franchissement intempestif d'un signal.

Pour obtenir un fonctionnement régulier de la ligne et respecter l'intervalle théorique fixé, le signal  $I$  doit passer au vert juste au moment où le train se présente au début de la zone définie ci-dessus.

On peut donc connaître pour chaque valeur du temps de stationnement le temps d'approche  $T_A$ , la vitesse d'approche  $V_A$  et la distance  $D_A$  correspondante par le calcul suivant :

$$T_A = I - T_D - T_S$$

$$T_A = \frac{V}{2 \gamma_u} + \frac{L + 20}{V} + \frac{V}{\gamma_F}$$

$$(\Rightarrow) V_A^2 (\gamma_F + \gamma_u) - 2 \gamma_u \gamma_F T_A V + 340 \gamma_u \gamma_F = 0$$

Cette équation doit être étudiée. Si elle ne présente pas de solution, c'est que l'intervalle théorique pris en compte n'est pas réalisable. Si elle présente deux solutions, la vitesse la plus élevée sera choisie.

Lorsque la vitesse d'approche possible trouvée est supérieure à  $80 \text{ km/h}$ , cela veut dire qu'il n'y a pas à limiter la vitesse du train à l'approche de la station pour respecter l'intervalle, si l'on considère une vitesse maximale propre au train de  $80 \text{ km/h}$ . Nous avons calculé les vitesse d'approche, pour des temps de stationnement compris entre  $10$  et  $30$  secondes, pour deux types de matériels :

.../

- . matériel fer, avec  $\gamma_F = - 0,8 \text{ m/s}^2$  et  $\gamma_u = - 0,6 \text{ m/s}^2$
- . matériel pneu, avec  $\gamma_F = \gamma_u = - 1,1 \text{ m/s}^2$

Les résultats obtenus pour le matériel pneu montrent qu'il n'y a jamais à limiter la vitesse de ce type de matériel à l'approche d'une station, pour un intervalle théorique de 90 s.

Les résultats obtenus pour le matériel fer montrent qu'il faut limiter la vitesse d'approche à partir d'un temps de stationnement supérieur à 15 secondes, pour un intervalle théorique de 90 s.

Les valeurs obtenues figurent sur le tableau ci-joint.

Connaissant les vitesses d'approche pour les différents temps de stationnement et un intervalle théorique de 90 s, nous avons réalisé des abaques simulant la marche des trains sur des interstations de 500 m, 600 m, 800 m, 1 000 m, 1 200 m et 1 500 m, pour chacun des types de matériel, en supposant des performances de démarrage identiques.

Les formations supposées étaient :

- . pour le matériel pneu : 2 M + 4 N + 3 R
- . pour le matériel fer : 2 M + 7 N

Nous en avons déduit :

- . la vitesse commerciale obtenue, avec une réserve de temps de 4 s/km ;
- . le nombre de trains par kilomètre et le ratio correspondant en prenant pour référence 1 le nombre de trains type pneu par kilomètre.

Les résultats correspondants sont joints ci-après.

## CALCUL DES VITESSES D'APPROCHE

1) MATERIEL FER

$$\gamma_u = -0,6 \text{ m/s}^2 \quad \gamma_F = -0,8 \text{ m/s}^2$$

Temps de stationnementIntervalle de 90 s

TS	m/s	Km/h	d	Ta
10	22,22	80		
11	22,22	80		
12	22,22	80		
13	22,22	80		
14	22,22	80		
15	22,37	80,5	587	26,2
16	21,79	78,5	566	26,0
17	21,21	76,4	545	25,7
18	20,62	74,2	524	25,4
19	20,02	72,1	504	25,2
20	19,41	69,9	484	24,9
21	18,79	67,7	464	24,7
22	18,16	65,4	445	24,5
23	17,51	63,1	425	24,4
24	16,85	60,7	407	24,2
25	16,17	58,2	388	24,0
26	15,46	55,6	369	23,9
27	14,71	52,9	350	23,8
28	13,91	50,0	331	23,8
29	13,04	46,9	312	23,9
30	12,04	43,3	291	24,2



2) MATERIEL PNEU

$$\gamma_u = -1,1 \text{ m/s}^2 \quad \gamma_F = -1,1 \text{ m/s}^2$$

Pour le temps maximal de stationnement que nous avons retenu :  
30 s, on obtient :

TS	m/s	km/h
30 s	23,42	84,3

La vitesse d'approche étant supérieure à la vitesse maximale (80 km/h) définie pour le matériel, il n'existe donc aucune limitation en vitesse d'approche pour la matériel roulant sur pneumatiques.

# PARCOURS EN INTERSTATION DE 1000 M

VITESSE

80

60

40

20

0

200

400

600

800

1000

DISTANCE

PNEU

FER

FER

PNEU

$T_k = 30\text{ s}$

$T_R = 4\text{ s}$

$T = 86,8\text{ s}$

$T = 73,5\text{ s}$

$V_c = 29,8\text{ km/h}$

$V_c = 33,5\text{ km/h}$

MATERIEL

FER

TEMPS DE STATIONNEMENT

10

15

20

25

30

80

70

60

50

40

30

20

10

105

100

95

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

90

85

80

75

70

65

60

55

50

45

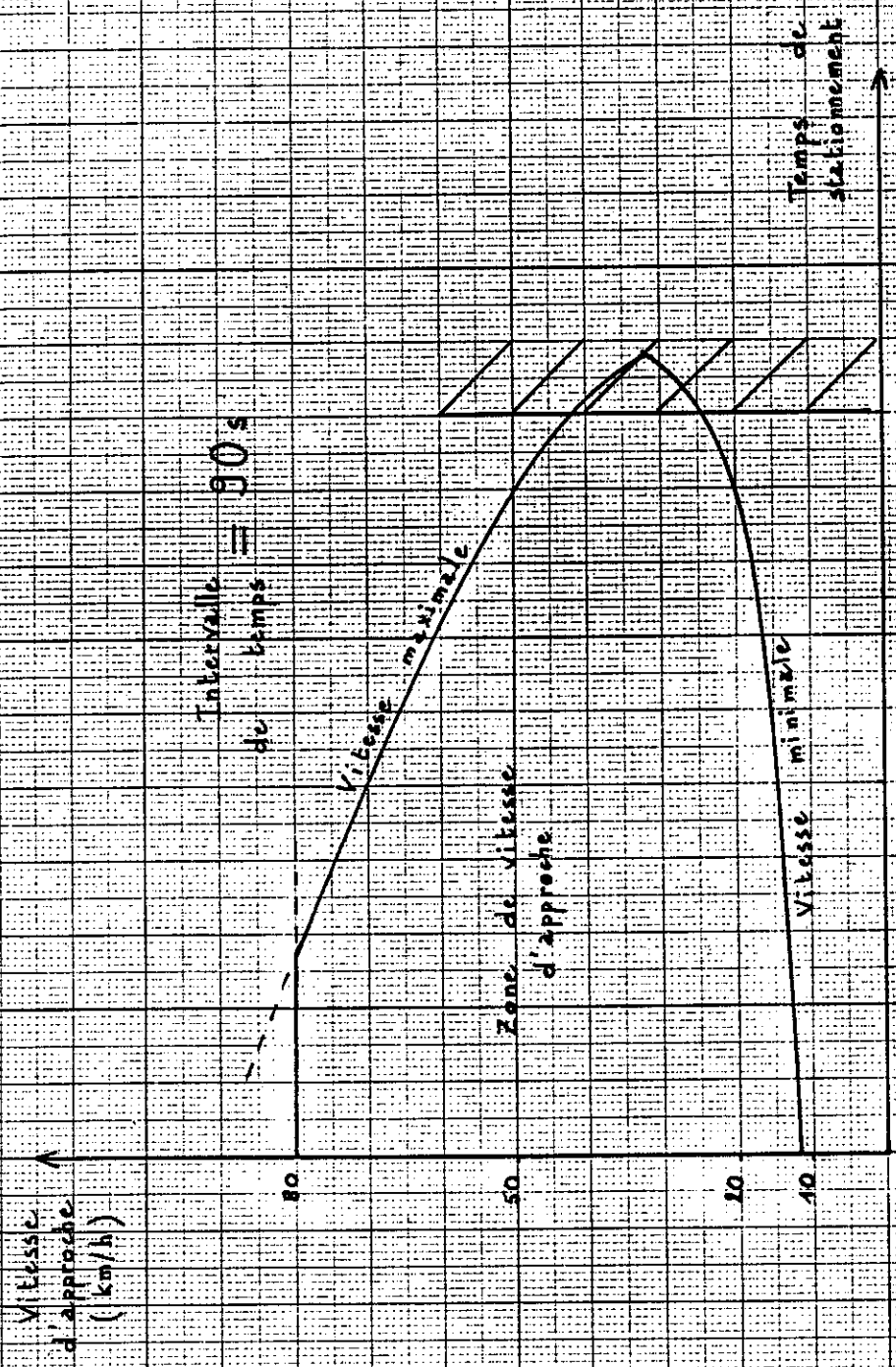
40

35

30

25

20



NOTION DE VITESSE D'APPROCHE

VITESSES COMMERCIALES  
EN FONCTION DU TEMPS DE STATIONNEMENT

Intervalle de 90 s - Réserve de temps 4s/km

(s)	500 m		600 m		800 m		1 000 m		1 200 m		1 500 m	
	FER km/h	PNEU km/h	FER km/h	PNEU km/h	FER km/h	PNEU km/h	FER km/h	PNEU km/h	FER km/h	PNEU km/h	FER km/h	PNEU km/h
10	28,1	29,6	31,1	32,6	35,7	37,5	39,5	41,2	42,7	44,4	46,6	48,2
11	27,6	29,1	30,6	32,1	35,3	37,0	39,1	40,7	42,3	43,9	46,2	47,7
12	27,2	28,6	30,2	31,6	34,8	36,5	38,7	40,3	41,9	43,5	45,8	47,3
13	26,8	28,2	29,8	31,2	34,4	36,0	38,3	39,8	41,5	43,0	45,4	46,9
14	26,4	27,7	29,4	30,7	34,0	35,6	37,9	39,4	41,1	42,6	45,0	46,5
15	26,0	27,3	29,0	30,3	33,6	35,2	37,5	39,0	40,7	42,2	44,7	46,1
16	25,7	26,9	28,6	29,9	33,2	34,7	37,1	38,5	40,3	41,8	44,3	45,7
17	25,3	26,5	28,2	29,5	32,8	34,3	36,7	38,1	39,9	41,4	43,6	45,3
18	25,0	26,1	27,9	29,1	32,5	33,9	36,3	37,7	39,6	41,0	43,1	45,0
19	24,6	25,8	27,5	28,7	32,1	33,5	36,0	37,3	39,2	40,6	42,5	44,6
20	24,3	25,4	27,2	28,3	31,8	33,1	35,6	37,0	38,3	40,2	42,1	44,2
21	24,0	25,0	26,9	27,9	31,4	32,8	35,3	36,6	37,7	39,9	41,6	43,9
22	23,7	24,7	26,5	27,6	31,1	32,4	34,2	36,2	37,0	39,5	40,9	43,5
23	23,3	24,4	26,2	27,2	30,7	32,0	33,6	35,9	36,5	39,1	40,3	43,2
24	23,0	24,0	25,8	26,9	30,4	31,7	33,0	35,5	36,0	38,8	39,8	42,8
25	22,8	23,7	25,6	26,6	29,1	31,3	32,5	35,2	35,5	38,4	39,3	42,5
26	22,5	23,4	25,3	26,2	28,5	31,0	31,9	34,8	34,9	38,1	38,8	42,2
27	22,2	23,1	25,0	25,9	27,9	30,7	31,5	34,5	34,4	37,8	38,3	41,8
28	22,0	22,8	23,5	25,6	27,3	30,3	30,9	34,2	33,9	37,4	37,8	41,5
29	21,7	22,5	22,9	25,3	26,8	30,0	30,4	33,8	33,4	37,1	37,3	41,2
30	20,0	22,2	22,3	25,0	26,2	29,7	29,8	33,5	32,8	36,8	36,7	40,9

NOMBRE DE TRAINS PAR KILOMETRE  
EN FONCTION DU TEMPS DE STATIONNEMENT

Intervalle de 90 s - Réserve de temps 4 s/km

TS (s)	500 m			600 m			800 m			1 000 m			1 200 m			1 500 m		
	FER	PNEU	Δ %	FER	PNEU	Δ %	FER	PNEU	Δ %	FER	PNEU	Δ %	FER	PNEU	Δ %	FER	PNEU	Δ %
10	1,42	1,35	5,25	1,29	1,23	4,83	1,12	1,07	4,94	1,01	0,97	4,23	0,94	0,90	3,90	0,86	0,83	3,39
11	1,45	1,38	5,17	1,31	1,25	4,75	1,13	1,08	4,88	1,02	0,98	4,19	0,95	0,91	3,86	0,87	0,84	3,36
12	1,47	1,40	5,09	1,32	1,26	4,69	1,15	1,10	4,82	1,03	0,99	4,14	0,96	0,92	3,82	0,87	0,85	3,33
13	1,49	1,42	5,01	1,34	1,28	4,62	1,16	1,11	4,76	1,05	1,00	4,09	0,96	0,93	3,78	0,88	0,85	3,30
14	1,51	1,44	4,93	1,36	1,30	4,55	1,18	1,12	4,70	1,06	1,02	4,05	0,97	0,94	3,75	0,89	0,86	3,27
15	1,54	1,46	4,86	1,38	1,32	4,49	1,19	1,14	4,64	1,07	1,03	4,00	0,98	0,95	3,71	0,90	0,87	3,25
16	1,56	1,49	4,78	1,40	1,34	4,43	1,20	1,15	4,58	1,08	1,04	3,96	0,99	0,96	3,68	0,90	0,87	3,22
17	1,58	1,51	4,71	1,42	1,36	4,37	1,22	1,17	4,53	1,09	1,05	3,92	1,00	0,97	3,64	0,92	0,88	3,86
18	1,60	1,53	4,64	1,44	1,38	4,31	1,23	1,18	4,48	1,10	1,06	3,88	1,01	0,98	3,61	0,93	0,89	4,25
19	1,62	1,55	4,58	1,45	1,39	4,25	1,25	1,19	4,42	1,11	1,07	3,84	1,02	0,99	3,57	0,94	0,90	4,87
20	1,65	1,58	4,51	1,47	1,41	4,19	1,26	1,21	4,37	1,12	1,08	3,80	1,05	0,99	5,12	0,95	0,90	5,00
21	1,67	1,60	4,45	1,49	1,43	4,14	1,27	1,22	4,32	1,13	1,09	3,76	1,06	1,00	5,72	0,96	0,91	5,52
22	1,69	1,62	4,39	1,51	1,45	4,09	1,29	1,23	4,27	1,17	1,10	6,04	1,08	1,01	6,58	0,98	0,92	6,45
23	1,71	1,64	4,33	1,53	1,47	4,04	1,30	1,25	4,23	1,19	1,12	6,87	1,10	1,02	7,25	0,99	0,93	7,03
24	1,74	1,66	4,27	1,55	1,49	3,99	1,32	1,26	4,18	1,21	1,13	7,59	1,11	1,03	7,81	1,00	0,93	7,53
25	1,76	1,69	4,22	1,56	1,51	3,94	1,38	1,28	7,83	1,23	1,14	8,20	1,13	1,04	8,36	1,02	0,94	8,10
26	1,78	1,71	4,16	1,58	1,52	3,89	1,41	1,29	8,93	1,25	1,15	9,09	1,15	1,05	9,08	1,03	0,95	8,67
27	1,80	1,73	4,11	1,60	1,54	3,84	1,44	1,30	10,12	1,27	1,16	9,58	1,16	1,06	9,70	1,04	0,96	9,22
28	1,82	1,75	4,06	1,70	1,56	9,13	1,47	1,32	11,17	1,29	1,17	10,53	1,18	1,07	10,31	1,06	0,96	9,84
29	1,85	1,78	4,01	1,75	1,58	10,79	1,49	1,33	12,20	1,32	1,18	11,37	1,20	1,08	11,00	1,07	0,97	10,45
30	1,99	1,80	10,75	1,79	1,60	12,28	1,53	1,35	13,52	1,34	1,19	12,48	1,22	1,09	12,18	1,09	0,98	11,36



$V_c$

40

30

20

10

0

500

1000

1500

INTERSTATION MOYENNE

VITESSE COMMERCIALE

TRAIN/km

2

10

1

F

P

F

P

$T_s = 30s, I = 90s$

$T_s = 10s, I = 90s$

INTERSTATION MOYENNE

NOMBRE DE TRAINS PAR KILOMETRE

ANNEXE 2  
-----

COUTS D'ENTRETIEN

DU MATERIEL ROULANT



## COUT D'ENTRETIEN

### 1. - REPARTITION DES COUTS D'ENTRETIEN

Les coûts des postes d'entretien du matériel roulant sur pneumatiques, se répartissent comme suit pour des formations de 9 voitures (M + R + N + N + R + N + N + R + M)

- a) Nettoyage : 21,5 %
- b) Entretien technique : 28 %
- c) GR + pneumatiques : 39,5 %
- d) Peinture : 10 %
- e) Plancher : 1 %

Seuls les points b) et c) sont concernés directement par le type de voiture (M, N ou R), les autres points restent indépendants.

Les coûts d'entretien technique et de GR des motrices M et N sont pratiquement identiques. Pour ces postes, le coût d'entretien d'une remorque, représente 58 % du coût d'entretien d'une motrice (M ou N).

Dans ces conditions, le coût des postes d'entretien d'une remorque, représente donc 72 % du coût des postes d'entretien d'une motrice M ou N.

### 2. - CAS D'UN MATERIEL FER A ADHERENCE TOTALE

Le coût d'entretien technique d'une motrice à roulement fer est supérieur de 11 % au coût d'entretien technique d'une motrice à roulement pneu. Ceci est essentiellement lié au coût de rectification du profil des roues et à l'entretien supplémentaire généré par les circuits d'anti-patinage et de pesée de la voiture.

En revanche, le coût des GR est moindre : 64 % du coût de GR d'une motrice à roulement sur pneumatique. Cette différence est liée au coût des pneumatiques, inclus dans le rubrique GR.

.../

En pondérant les résultats précédents (points b) et c) seuls) pour tenir compte de l'absence de remorques sur le MR fer, on obtient :

. coût d'entretien d'un train de 9 voitures fer : 98,07

Le coût d'entretien d'un train "fer" seul est donc moindre.

Cependant, il faut tenir compte du nombre de trains supplémentaires, nécessaires à assurer le même trafic.

On obtient finalement :

COUT DU MATERIEL A ROULEMENT FER :

Interstation : RATIO coût d'entretien (pneu base 100)

500 M	→	RF = 108,61
600 M	→	RF = 110,11
800 M	→	RF = 111,33
(1) 1 000 M	→	RF = 110,31
1 200 M	→	RF = 110,01
1 500 M	→	RF = 109,21

3. - CONCLUSION

Dans le cadre d'un réseau chargé, l'entretien d'un matériel à roulement sur fer est plus coûteux que celui d'un matériel à roulement sur pneumatiques.

(1) Exemple cité dans le texte

**A N N E X E 3**  
-----

**SURFACE DES ATELIERS**

ANNEXE 4

INVESTISSEMENT ET ENTRETIEN DE LA VOIE

## INVESTISSEMENT ET ENTRETIEN DE LA VOIE

### 1. - INVESTISSEMENT

Nous distinguerons quatre principaux types de pose de voie :

- a) voie fer sur ballast,
- b) voie fer sur béton,
- c) voie pneu sur ballast,
- d) voie pneu sur béton.

En prenant pour a) base 100, nous obtenons les ratios suivants :

- a - 100
- b - 145
- c - 180
- d - 220

On remarquera que la pose de voie "pneu" est plus élevée que la pose de voie "fer".

Si nous comparons deux solutions techniques b) et d) permettant d'obtenir de bons résultats quant aux transmissions de vibrations, nous obtenons :

Matériel fer

66

Matériel pneu

100

### 2. - ENTRETIEN

En prenant pour base 100, l'entretien de la voie telle que définie en a), nous obtenons les ratios suivants :

.../

a - 100

b - 75

c - 33

d - 18

Si nous comparons les solutions b et d, nous obtenons :

Matériel fer

Matériel pneu

416,7

100

L'entretien d'une voie "fer" est donc, dans ces conditions, plus de 4 fois supérieur à l'entretien d'une voie "pneu".