

**PROPOSITION POUR L'HARMONISATION  
DES TARIFICATIONS D'INFRASTRUCTURES  
AÉRIENNES, FERROVIAIRES ET ROUTIÈRES**

---

**E. QUINET  
Mai 1993**

# SOMMAIRE

Présentation générale et synthèse	1
Les trafics et les élasticités	8
Fonction de coût des infrastructures aériennes	25
Ce que paient actuellement les modes de transport	31
Ce que rapporterait une tarification au coût marginal social	34
Les coûts sociaux d'environnement	42
Coûts de congestion aériens et ferrés	51
Les incertitudes du coût moyen	66
Les dépenses de sécurité-sûreté pour le fer et l'aérien	68
Les principes de tarification envisageables	73
Modélisation de la tarification aérienne	76
Liste des études à poursuivre	82
<b>Annexe 1</b>	
Modèles d'effets externes de congestion des modes de transport collectif	83
<b>Annexe 2</b>	
Calcul numérique des termes correcteurs d'optimisation	89
<b>Annexe 3</b>	
Variantes concernant la sécurité et l'effet de serre	95
<b>Annexe 4</b>	
Evaluation sommaire des coûts sociaux liés aux retards des trains	97

# PRÉSENTATION GÉNÉRALE ET SYNTHÈSE

---

## 1. PRÉSENTATION

Il existe en gros deux modalités de fixation des prix pour des entités animées par l'intérêt public (ceci sous réserve d'une analyse plus nuancée amorcée dans la fiche "les différents principes de tarification des infrastructures") : le coût marginal social (c.m.s.) et l'équilibre budgétaire.

L'équilibre budgétaire est à juste titre recommandé dans de nombreuses situations :

- Il est simple et le résultat est moins sujet à manipulation que le c.m.s.
- Dans les activités à rendement constant, il aboutit, comme le coût marginal social, à un optimum économique. Lorsque le rendement n'est pas constant mais proche de cette situation, la perte économique est faible.
- Enfin l'organisme qui y est soumis se voit doté d'une contrainte de gestion qui l'incite à la productivité, notamment dans les situations de compétition et de concurrence.

Ces arguments perdent de leur force en ce qui concerne les infrastructures de transport, en raison de quelques caractéristiques de leur gestion :

- L'existence fréquente de rendements fortement croissants ou fortement décroissants, par exemple dans les situations de sous-utilisation ou de congestion.
- La longue durée de vie et l'indivisibilité des investissements, ainsi que leurs poids dans les coûts.
- L'absence de marché, sauf par l'intermédiaire des modes substitués ; mais la concurrence est limitée.
- Souvent la gestion n'est pas soumise à un organisme décentralisé, mais reste dans les mains de l'administration (routes, voies navigables) ; lorsqu'elle est décentralisée, l'administration garde une main sur cette gestion.

De ce fait :

- le coût moyen n'est pas parfaitement défini, comme le développe la fiche "les incertitudes du coût moyen", en raison notamment de l'arbitraire dans la rémunération du capital ;
- certains tarifs sont fixés pour des raisons politiques ou budgétaires et semblent intangibles ;

- le coût moyen est parfois fort loin du coût marginal, donc éloigné de l'optimum ;
- enfin la contrainte de gestion que constitue l'équilibre budgétaire n'existe pas pour la route ou la voie navigable.

Ces considérations conduisent à se tourner vers l'autre principe de tarification, le c.m.s., et à l'adapter aux contraintes du secteur.

Ayant à l'esprit ces considérations, la situation des différents modes se caractérise de la façon suivante :

- La route est tarifée à travers une série de moyens indirects tels que la taxation des carburants, la taxe sur l'essence, les péages, les vignettes, fixés pour des raisons de politiques budgétaires ou d'acceptabilité beaucoup plus que de politique des transports. La suite du rapport prendra cette taxation comme une donnée.
- Les infrastructures aériennes sont tarifées à travers une série d'accords internationaux fondés sur le principe de l'équilibre budgétaire. Il faut considérer ce principe comme acquis, quitte à s'efforcer de rationaliser la structure des tarifs à l'intérieur de ce cadre.
- Les transports ferroviaires sont en concurrence avec ces deux modes en même temps. Il n'y a pas de raison de contraindre les infrastructures de ce mode à un équilibre budgétaire qui ne se justifie pas par la participation à un marché où de nombreuses entreprises seraient gérées à l'équilibre budgétaire, qui serait entaché d'aléas de détermination, et loin de l'optimum. Il convient d'appliquer la tarification optimale pour la collectivité, le coût marginal social harmonisé (cf. note "Évaluation des contributions aux charges d'infrastructure de la SNCF assurant l'égalité des conditions de concurrence entre le rail et la route" de 1989).

On a intérêt à déterminer ce coût marginal social harmonisé (c.m.s.h.) en segments de marchés les plus homogènes possibles.

L'analyse des conditions de substitution entre modes (chapitre "trafics et élasticités") montre qu'il est possible et intéressant de distinguer les segments suivants :

- marchandises (que malheureusement l'insuffisance des statistiques ne permet pas de scinder) ;
- voyageurs à moins de 80 km ;
- voyageurs à plus de 80 km, eux-mêmes scindés en :
  - services lents ;
  - services rapides.

Pour les voyageurs à plus de 80 km, on distinguera dans les autres modes :

- le réseau routier rapide (autoroutes et assimilé) ;
- le réseau routier lent (routes ordinaires) ;
- l'avion.

L'analyse montre que, à plus de 80 km, ces segments sont en concurrence : il n'est pas possible de distinguer un domaine où les infrastructures ferrées et aériennes seraient seules en concurrence, et un autre où ce serait seulement le fer et la route. Pour les transports de voyageurs à moins de 80 km, la concurrence est entre le fer et la route, ainsi que pour les marchandises.

Pour calculer le c.m.s.h. il faut déterminer le coût d'usage et les coûts externes.

Le coût d'usage ferroviaire est déterminé par les comptes de la SNCF. Le coût d'usage routier l'a été par le groupe Brossier. Enfin le coût d'usage aérien est analysé dans le chapitre "fonction de coût des infrastructures aériennes" ; les coûts externes comprennent les coûts de congestion, les coûts de sûreté et les coûts d'environnement. Les coûts de congestion et de sûreté ont été calculés pour la route par le groupe Brossier. Pour le fer et l'air, ils sont évalués dans les chapitres "coûts de sûreté" et "coûts de congestion".

Les coûts d'environnement n'ont pas été calculés par le groupe Brossier en raison de leur faiblesse relative et de l'incertitude qu'ils comportent. Mais dans une perspective intermodale, en raison de la sensibilité à cet aspect, et de la différence des modes à leur égard, on ne peut pas les négliger. Le chapitre "les coûts sociaux d'environnement" en fournit une évaluation pour les 3 modes. Ensuite le chapitre "ce que paie actuellement et ce que rapporterait une tarification au c.m.s." définit les bases permettant de calculer "les termes correcteurs pour l'harmonisation des c.m.s."

## **2 : SYNTHÈSE DES RÉSULTATS**

1) Par rapport au coût marginal d'usage, calculé selon les principes du rapport de 1989, les présents calculs montrent que la tarification des infrastructures ferroviaires doit être modifiée dans les conditions suivantes :

En Milliards de F 90 pour l'année 1990	Augmentation due à l'inclusion des c. ext.				Terme correcteur d'harmonisation (1)	Total
	Sûreté	Environnement	Congestion	Total		
Fret	0	0,37	0,1	+ 0,47	- 1,1	- 0,63
<i>Rapides Express</i> dont :	0,07 (2)	0,43 (2)	0,36	+ 0,86	+ 3,0	+ 3,86
- moins de 80 km	0,01	0,08	0,12	+ 0,21	+ 0,10	+ 0,31
- services lents à plus de 80 km	0,04	0,22	0,12	+ 0,38	2,6	+ 2,98
- services rapides à plus de 80 km	0,02	0,13	0,12	+ 0,27	0,3	+ 0,57
Total	0,07	0,80	0,46	1,33	+ 1,9	+ 3,23

La contribution d'infrastructure, qui au titre de l'harmonisation en 1989 aurait dû être réduite de 2,5 Milliards de F par rapport au coût marginal d'usage (note "Évaluation des contributions aux charges d'infrastructure de la SNCF assurant l'égalité des conditions de concurrence entre le rail et la route"), devrait l'être de 3,2 Milliards de F au vu des présents résultats.

2) On peut esquisser l'évolution de cette réduction au cours du temps. Ainsi à tarification des autres modes inchangée et sous réserve que la congestion et les effets externes restent au même degré en F 90, le terme d'harmonisation devrait augmenter pour les R.E. à plus de 80 km et passer de 2,9 à 6,6 M de F vers 2010 (voir Annexe 2).

3) Ces résultats fournissent une règle pour la tarification des services d'infrastructure ferroviaire dans le cadre de la directive communautaire, ainsi que pour la comptabilité d'un service d'infrastructures et les règles d'attribution des sillons.

4) La procédure proposée dans la note "Coûts de congestion ferroviaires et aériens" en matière d'attribution des sillons et d'imputation des charges d'encombrement de ces sillons pour la SNCF (3) constitue non seulement une règle de tarification mais aussi une règle de définition des activités rentables, et donc un outil pour la définition de la stratégie

1 Calculé dans l'annexe 2.

2 Décomposés entre les services au prorata des voyageurs-kilomètres, soit en milliards de Voy-km :

Moins de 80 km : 8,8

Plus de 80 km

- services lents : 24,7

- services rapides : 14,6

Total 48,1

(Les trafics banlieue et SRV sont en dehors du champ de cette étude).

3 Qui n'est d'ailleurs qu'un prolongement de la méthode que la SNCF met actuellement au point.

de la SNCF, susceptible par exemple de faire apparaître le coût des contraintes de service public (banlieue, SRV), et de justifier des changements dans l'équilibre des activités.

5) Ces calculs peuvent aussi fournir les bases des principes, à préciser et à approfondir, pour la gestion des différentes entités issues d'une éventuelle séparation comptable (à la suisse) ou organisationnelle (à la suédoise) des chemins de fer :

- Les unités d'exploitation doivent équilibrer leur budget sans subvention. Elles paient l'usage de l'infrastructure à l'unité chargée de la gestion des infrastructures.
- L'unité chargée de la gestion des infrastructures établit ses tarifs de sillons horaires selon les principes du c.m.s.h. et reçoit de l'Etat des contributions pour couvrir les coûts non recouverts par cette tarification. Elle est étroitement liée à l'Etat, à la fois pour son équilibre financier et pour sa politique d'extension ou de récession du réseau.
- Le c.m.s.h. est calculé conformément aux principes définis dans la suite du rapport.

6) Il faut bien voir le sens et le jeu de ce terme correcteur (somme des coûts externes et du terme d'harmonisation). Bien que globalisé avec la contribution aux charges fixes dans le contrat de Plan 1991-1994, il est d'une nature différente.

La contribution vise à compenser les charges fixes ; elle est donc globale par nature. Le terme correcteur correspond en revanche à une modification du prix unitaire d'usage de l'infrastructure. Son mécanisme de fonctionnement devrait être le suivant :

- Par segment de marché, l'Etat fixe une contribution kilométrique <sup>(4)</sup>, qui ne change que si les conditions relatives aux coûts externes d'environnement ferroviaires ou si la tarification des modes concurrents change.
- L'entreprise ou le service chargé de la gestion des infrastructures fait payer aux exploitants, ses clients, un tarif égal au coût marginal d'usage, diminué de la contribution kilométrique précédente.
- Ce service gestionnaire reçoit en même temps de l'Etat une somme d'argent égale à la contribution kilométrique multipliée par la quantité de trafic vendue.
- Par ailleurs, l'Etat verse globalement une somme annuelle égale aux dépenses fixes.
- Ce mécanisme montre bien que l'équilibre financier du gestionnaire d'infrastructure est assuré, et qu'en cas de variation de la taxation des modes concurrents le prix payé par les utilisateurs de l'infrastructure ferroviaire change du fait du changement de contribution kilométrique ; mais l'équilibre financier du gestionnaire reste

---

<sup>4</sup> Cette contribution kilométrique se déduit immédiatement des contributions globales précédentes par division par les trafics concernés.

assuré, le changement de la contribution totale versé par l'Etat étant égal et opposé au changement de profit du gestionnaire.

7) Ce mécanisme suppose que les services fonctionnent à rendement constant (coût marginal = coût moyen) et que l'équilibre entre l'appareil technique et la demande soient réalisés en permanence. En fait, il y a une grande inertie à la baisse, même pour les dépenses dites variables, ce qui peut entraîner des déficits longs à résorber. En première analyse, les moyens de faire face à cette situation sont :

- une subvention d'équilibre pour passer la période difficile ;
- une surtarification en période normale pour provisionner en vue de difficultés conjoncturelles (primes de risque) ;
- l'accroissement de la flexibilité interne de l'entreprise.

8) Différentes considérations peuvent conduire à adopter des montants différents de ceux résultant du calcul, pour les mêmes raisons que celles exposées dans le rapport de 1989 essentiellement : incitation à la productivité, prise en compte d'une infériorité d'information de la part de la tutelle sur les données de l'entreprise, et coût des fonds publics. La tarification pourrait ainsi être augmentée de façon à réduire la contribution de l'Etat, la différence, selon le principe Ramsey-Boiteux, porterait surtout sur les trafics les moins soumis à la concurrence.

9) Dans le cadre de l'équilibre budgétaire qui leur est imposé, il serait souhaitable que les infrastructures aériennes voient la structure de leur tarification améliorée sur le plan économique, pour être plus incitative à une meilleure répartition du trafic. La note "Modélisation de la tarification aérienne" fournit quelques pistes dans cette direction.

10) Le marché routier est très imparfait, une meilleure adéquation des tarifs aux coûts est souhaitable, comme le montrent les écarts entre c.m.s. et coûts réels pour les différents réseaux en matière de voyageurs (notamment autoroutes et routes ordinaires) et pour les différents types de camions.

11) L'étude est entachée de nombreuses incertitudes ; des compléments et approfondissements nombreux sont nécessaires. Ils sont listés dans le chapitre "Proposition d'études ultérieures". On attirera spécialement ici l'attention sur l'extension de l'étude au champ urbain.

12) A la demande de la SNCF, deux calculs de variante ont été effectués (voir Annexe III), prenant en compte des valeurs unitaires différentes de la sécurité (coût tutélaire du mort de 4,5 MF au lieu de 1,86) et l'effet de serre.

13) Des études complémentaires seraient nécessaires pour la mise au point fine des principes développés plus haut en tenant compte des problèmes d'évolution dans le temps, de déséquilibres transitoires et des aspects d'incitation (cf. rapport CAILLAUD-QUINET, "Les relations Etat-SNCF") et pour mieux prendre en compte la segmentation des marchés et les problèmes urbains et péri-urbains.

Les résultats sont les suivants en GF :

	Changement des valeurs unitaires de la sécurité	Prise en compte de l'effet de serre	
	Variation du terme correcteur d'harmonisation	Augmentation du coût marginal social	Augmentation du terme correcteur d'harmonisation
Fret	- 1,1	0,32	- 1,4
Rapides-express	- 1,15	2,2	- 2,3
dont :			
- moins de 80 km	- 0,05	0,5	- 0,1
- services lents à plus de 80 km	- 1,0	1,1	- 2,0
- services rapides à plus de 80 km	- 0,1	0,6	- 0,2
Total	- 2,25	2,5	- 3,7

# LES TRAFICS ET LES ÉLASTICITÉS

---

On examinera d'abord les élasticités des trafics aux prix, puis on évaluera les trafics des différents marchés.

## 1. ELASTICITÉS DES TRAFICS AUX PRIX

Pour les voyageurs le modèle MATISSE a été calé sur les voyages interrégionaux français et européens. Il a fourni au cours de ses précédentes utilisations des résultats vraisemblables et corroborés par l'expérience là où elle existe. Enfin les réponses variées qu'il fournit en termes d'élasticités simples ou croisées, selon les modes, selon la période, selon les motifs, ou selon la catégorie de distance, ont le mérite de présenter une grande cohérence interne.

Ce modèle constitue donc la base des valeurs retenues. On présentera d'abord les conditions de calcul des élasticités et les élasticités trouvées, puis on comparera ces résultats à ceux qui existent avec la littérature. Enfin un dernier paragraphe indiquera les élasticités pour le transport de marchandises.

### 1.1. Les calculs effectués par MATISSE et les résultats

Les calculs d'élasticité effectués par MATISSE ont porté sur les trafics à plus de 80 km, qui ont été décomposés par motifs et par classe de distance, ainsi que selon le trafic, domestique ou intermodal. Différents "modes" ont été distingués :

- réseau routier lent (il s'agit alors du trafic en voyageurs-km effectué sur route ordinaire) ;
- réseau routier rapide (trafic en voyageurs-km effectué sur autoroutes et routes assimilées) ;
- services ferroviaires (relation ville à ville) "lents" pour lesquels deux seuils de vitesse ont été pris : 150 km/h et 200 km/h ;
- services ferroviaires "rapides" ;
- transport aérien.

Les élasticités aux prix suivants ont été calculées :

- prix du carburant ;
- prix du péage autoroutier ;
- prix de l'ensemble des services ferroviaires ;
- prix des services ferroviaires lents ;
- prix des services ferroviaires rapides ;
- prix de l'avion.

Enfin des élasticités de report temporel ont également été calculées :

- effets (sur les trafics en et hors pointe) d'une augmentation de 10% du prix du train aux heures de pointe (6 h 00 - 9 h 00 et 18 h 00 - 21 h 00) ;
- effet d'une augmentation du prix de l'avion de 10% aux mêmes heures.

Toutes les élasticités ont été calculées à la fois pour 1988 et pour 2010, sur la base d'une offre correspondant aux projets actuellement envisagés pour cette année là (en gros, la réalisation du schéma directeur des trains à grande vitesse européens, et une adaptation des fréquences aériennes à la demande).

Les résultats obtenus ne diffèrent pas sensiblement selon le motif, ni non plus selon qu'on analyse séparément le trafic domestique ou le trafic intermodal, ou qu'on analyse les voyageurs ou les voyageurs-kilomètres. Ils diffèrent en revanche selon la distance, et légèrement selon l'année.

On présentera ci-dessous les résultats tous motifs et toutes zones géographiques confondues pour 1988 et pour 2010, ainsi que les résultats 1988, pour deux tranches de distance origine-destination.

	Prix du carburant	Péage	Prix train	Prix train lent < 150 km/h	Prix train rapide > 150 km/h	Prix train lent < 200 km/h	Prix train rapide > 200 km/h	Prix avion	
Véh-km réseau lent	- 0,86	0,40	0,19	0,19	0,013			0,03	Trafic total Année 1988
Véh-km réseau rapide	- 0,84	- 0,42	0,20	0,20	0,018			0,07	
Véh-km sur l'ensemble du réseau routier	- 0,85	0,31	0,20	0,20	0,017			0,06	
Train < 150km/h	0,55	0,23	- 1,20	- 1,10	0,04			0,32	
Train > 150 km/h	0,22	0,12	- 0,87	+ 0,02	- 1,00			0,29	
Train total	0,46	0,21	- 1,00	- 1,00	- 0,26			0,31	
Train < 200 km/h									
Train > 200 km/h									
Avion	0,12	0,05	0,30	0,30	0,32			- 1,40	
Véh-km réseau lent	- 0,79	0,15	0,18	0,15	0,08	0,15	0,03	0,035	
Véh-km réseau rapide	- 0,79	- 0,40	0,20	0,12	0,12	0,12	0,08	0,047	
Véh-km sur l'ensemble du réseau routier	- 0,79	0,35	0,20	0,13	0,12	0,13	0,08	0,046	
Train < 150km/h	0,44	0,21	- 0,89	- 0,81	0,13			0,45	
Train > 150 km/h	0,17	0,08	- 0,71	0,02	- 0,75			0,20	
Train total	0,22	0,11	- 0,75	- 0,34	- 0,57	0,34	- 0,40	0,25	
Train < 200 km/h	0,31		- 0,79			0,81	0,03	0,31	
Train > 200 km/h	0,15		- 0,72			0,02	- 0,73	0,20	
Avion	0,05	0,02	+ 0,28	0,12	0,20	0,12	0,15	- 1,37	
Véh-km réseau lent	- 1,1	0,1	0,10			0,1	0,00	0,00	Trafic total pour les trajets entre 200 et 250 km Année 2010 Trafic domestique
Véh-km réseau rapide	- 1,2	- 0,65	0,11			0,1	0,03	0,00	
Véh-km sur l'ensemble du réseau routier	- 1,2	- 0,60	0,11			0,1	0,03	0,00	
Train < 150km/h									
Train > 150 km/h									
Train total	0,2	0,67	- 1,3			- 1,0	- 0,30	0,00	
Train < 200 km/h	1,7		- 1,4			- 1,5	0,00	0,00	
Train > 200 km/h	0,37	0,04	- 1,0			0,00	- 1,0	0,00	
Avion	0,1	- 0,01	0,4			0,45	0,00	- 1,0	
Véh-km réseau lent	- 0,7	0,40	0,10			0,00	0,09	0,02	
Véh-km réseau rapide	- 0,6	- 0,33	0,30			0,1	0,2	0,04	
Véh-km sur l'ensemble du réseau routier	- 0,6	- 0,30	0,30			0,1	0,2	0,04	
Train < 150km/h									
Train > 150 km/h									
Train total	0,15	0,087	- 0,8			- 0,10	0,2	0,12	
Train < 200 km/h	0,08	0,05	- 0,8			0,05	- 0,86	0,31	
Train > 200 km/h	0,10	0,05	- 0,8			- 0,11	- 0,7	0,28	
Avion	0,1	0,01	0,5			0,05	0,48	- 1,3	

Enfin les élasticités aux tarifs de pointe sont les suivantes (trafic total en voyageurs-km) :

Mode	Prix		Prix pointe train		Prix pointe avion	
	1988	2010	1988	2010	1988	2010
Trafic route	0,05	0,04	0,00	0,00		
Trafic autoroute	0,07	0,07	0,01	0,01		
Ensemble du réseau routier	0,07	0,07	0,01	0,01		
Trafic train hors pointe	0,17	0,013	0,06	0,03		
Trafic train en pointe	- 2,1	- 1,2	0,12	0,18		
Trafic train total	0,4	0,32	0,08	0,08		
Trafic avion hors pointe	0,07	0,09	0,28	0,37		
Trafic avion en pointe	0,15	0,22	- 1,7	- 1,8		
Trafic avion total	0,09	0,13	- 0,3	- 0,32		

## 1.2. Evaluation des résultats

Notons que les élasticités de MATISSE concernent le moyen terme, à 5 ou 10 ans, tenant compte d'une adaptation des implantations et de l'apparition complète du trafic induit. Les élasticités de court terme, à échéance de un an environ, seraient plus faibles ; par rapport aux chiffres précédents, elles seraient selon O. MORELLET, divisées par environ 2 pour les trafics routiers, les plus sujets à induction, par 1,5 pour les trafics ferrés, et par 1,2 pour le trafic aérien.

Par ailleurs les élasticités au trafic du carburant supposent des changements de mobilité et non de consommation de carburant par kilomètre (changement du style de conduite, de la voiture). Dans la réalité les effets du prix de carburant sur le trafic automobile seraient plus réduits <sup>(5)</sup>. Sous ces réserves et considérations, on peut comparer les chiffres précédents à ceux donnés par d'autres sources :

<sup>5</sup> Cette spécificité n'a pas d'importance car les élasticités correspondantes n'interviennent pas dans les calculs finaux.

— Dans les études plus anciennes, datant de 1988, la SNCF évalue ainsi les élasticités :

• du trafic fer 1 <sup>ère</sup> classe au prix du train	- 0,38
de l'avion	0,76
• du trafic fer 2 <sup>ème</sup> classe au prix du train	- 0,38
de l'avion	0,30
du carburant	0,22

Les valeurs données au MATISSE, là où elles diffèrent, sont plus vraisemblables, et corroborées par les analyses étrangères (cf. OUM et GOODWIN cités plus bas).

— En 1985, AURIGNAC et BAUDOIN (Rail International juin 1983) estimaient ainsi les élasticités :

• du trafic fer 1 <sup>ère</sup> classe au prix du train	- 0,57
de l'avion	0,97
• du trafic fer 2 <sup>ème</sup> classe au prix du train	- 0,74
de l'avion	0,24
• du trafic avion au prix du train	0,31
de l'avion	- 0,61

— La D.G.A.C. estime (par exemple dans la note STA/SDEEP du 30/01/1992) les élasticités suivantes du trafic aérien :

• au niveau mondial :	au prix de l'avion :	- 0,30
		à
		- 0,70
	au revenu :	+ 2,0
• pour la France :	au prix de l'avion :	- 1,2

— GOODWIN ("a review of new demand elasticities with special reference to short and long run effects of price changes" journal of transport economics and policy May 92) fournit quelques élasticités :

• de la consommation d'essence au prix du carburant :	
à court terme	- 0,27 à - 0,28
à long terme	- 0,71 à 0,84
• trafic automobile au prix de l'essence :	
à court terme	- 0,16
à long terme	- 0,33 à - 0,29
• du trafic bus au tarif bus :	
à court terme	- 0,21 à - 0,37
à long terme	- 0,55 à - 0,65

- du trafic métro au tarif métro :
  - à court terme - 0,4
  - à long terme - 0,6
- du trafic rail au tarif rail : les élasticités citées sont nombreuses et diverses, se répartissant autour d'une valeur moyenne de - 0,79 (écart type de 0,32). Elles diffèrent selon le marché. Les élasticités pour les trafics quotidiens (banlieue et régionaux) semblent relativement élevées en Angleterre (de - 1,0 à - 1,5)
- de la demande en Transport public urbain et suburbain par rapport au prix du pétrole : 0,34 en moyenne (variant de 0,08 à 0,8). Ces valeurs sont compatibles avec celles de MATISSE.

— OUM, WATERS II ET YONG ("concepts of price elasticities of transport demand and recent empirical estimates", journal of T.E. and P. May 92) passent en revue les élasticités aux prix du transport interurbain ; les résultats sont dispersés :

	Motif personnel	Motif professionnel
Trafic avion/prix de l'avion	- 1,5 à 1,9	- 0,65 à 1,1
Trafic fer/prix au fer	- 0,7 à - 1,4	- 0,6 à - 1,0
Trafic auto (tous usages et motifs) au prix de l'automobile	de - 0,2 à - 0,3	

Ces valeurs sont compatibles avec celles de MATISSE.

— Enfin dans le rapport "Evaluation des contributions aux charges d'infrastructures de la SNCF assurant l'égalité des conditions de concurrence entre le rail et la route" (1989) les élasticités suivantes sont évaluées :

- du trafic fer (1<sup>ère</sup> classe) par rapport :
  - au prix du fer - 0,38
  - au prix de l'avion - 0,70
- du trafic avion par rapport :
  - au prix de l'avion - 0,65
  - au prix du fer 0,31
- du trafic fer (2<sup>ème</sup> classe) par rapport au prix du fer - 0,38
- du trafic route par rapport au prix du fer 0,02.

Ces élasticités diffèrent de celles issues de MATISSE en ce sens qu'elles prennent en compte tous les parcours interurbains (parcours routiers hors agglomérations de + de 5 000 habitants, services ferrés du réseau principal), alors que MATISSE n'intègre que les parcours à plus de 80 km.

Pour 1988 les trafics correspondants sont, en milliards de voyageurs-kilomètres :

	Trafic interurbain		Trafic à plus de 80 km	
Route	388,5	(86,0%)	108,4	(69,9%)
Chemin de fer	54,4	(12,0%)	37,1	(23,9%)
Avion	9,0	(2,0%)	9,5	(6,1%)
Total	451,9	(100%)	155	(100%)

Sources : - CCTN les transports en France en 1988  
- MATISSE

Avec un calcul sur les mêmes bases que MATISSE, l'élasticité du trafic route par rapport au prix du fer serait :

$$0,02 \times \frac{388,5}{108,4}$$

soit environ 0,08

Le tableau suivant compare les élasticités du rapport de 1989 avec celles de MATISSE — ou tout au moins les plus comparables d'entre elles :

	Rapport de 1989	MATISSE
A	Trafic train 1 <sup>ère</sup> classe par rapport au prix en fer	- 0,38
	Trafic train 2 <sup>ème</sup> classe par rapport au prix du fer	- 0,38
	Trafic du train par rapport au prix du train	- 1,1
B	Trafic avion par rapport au prix de l'avion	- 0,05
C	Trafic avion par rapport au prix du train	0,31
D	Trafic fer 1 <sup>ère</sup> classe par rapport au prix de l'avion	+ 0,70
	Trafic train par rapport au prix de l'avion	+ 0,31
E	Trafic route par rapport au prix du train	0,08
	Route par rapport au prix du train	0,19

Compte tenu du fait que les élasticités de MATISSE sont à long terme, donc plus élevées, et les autres à court terme, et compte tenu de la différence de définition, l'écart pour la rubrique E est normal :

- la concordance est bonne pour la rubrique C ;
- l'écart pour la rubrique D peut s'expliquer par la différence des champs couverts par les deux élasticités ;
- les écarts pour les rubriques A et B s'expliquent en partie par le fait que MATISSE fournit une élasticité de long terme mais restent néanmoins élevés.

En conclusion les valeurs trouvées par MATISSE, plus complètes et plus satisfaisantes seront retenues.

**Remarque :** On ne dispose que de très peu d'éléments permettant de comparer l'élasticité du trafic des modes publics à la fréquence. On donne ci-joint les courbes fournies par MATISSE et par le modèle SNCF pour la relation entre les régions parisienne et lyonnaise.

**Effet de la fréquence des T.G.V. sur les trafics train et avion  
(exemple de la relation région parisienne - région lyonnaise, en 1984)**

### 1.3. Elasticités aux prix marchandises

En matière de transports de marchandises, les élasticités prises en compte dans le rapport de 1989 étaient :

$$\left( \begin{array}{l} e_{MM} = - 0,43 \\ e_{MF} = 0,43 \\ e_{FF} = - 1 \\ e_{FM} = 1 \end{array} \right)$$

Ces valeurs concernaient la SNCF dans son ensemble pour le mode F, le trafic des camions de plus de 10 t de P.T.R.A. pour le mode M (mode routier).

Elles doivent être mises à jour afin de tenir compte des évolutions dans les parts de marchés et dans les conditions de la concurrence.

En 1990, en effet, les parts de marchés étaient les suivantes (chiffres tirés de la Commission des Comptes de Transport de la Nation en Milliards de T-k :

- transport ferroviaire :  $q_F = 49,5$  ;
- transport routier :  $q_M = 144,9$  pour la totalité du parc de camion. Il faut défalquer de ce chiffre l'activité des camions de moins de 5t de CU, qu'on peut estimer à 20 GT-km.

Il reste donc :  $q_M = 125$  GT-km.

Le chiffre d'affaire correspondant était  $R_F = 18,7$  GF pour la SNCF ; pour la route, on peut estimer le "chiffre d'affaire" équivalent (valeur reconstituée puisque le trafic pour compte propre n'est pas une activité marchande isolable) à  $R_M = 125 \times 0,64 = 80$  (0,64 : prix moyen de la tonne-km).

Que deviennent, avec ces nouvelles valeurs, les élasticités précédentes ?

On prendra toujours  $e_{FF} = - 1$ , valeur que font apparaître les études économétriques.

A partir de là, on a <sup>(6)</sup> :

$$e_{MF} = - e_{FF} \frac{q_F}{q_M}$$

$$e_{FM} = e_{MF} \frac{R_M}{R_F}$$

$$e_{MM} = - e_{FM} \frac{q_F}{q_M}$$

soit  $e_{MF} = 0,4$

$$e_{FM} = 1,69$$

$$e_{MM} = 0,67$$

<sup>6</sup> La première et la troisième égalités résultent de la dérivation de la relation  $q_M + q_F = \text{constante}$  ; la seconde est l'égalité classique des deux dérivées croisées des lois de demande.

Toutefois l'hypothèse  $q_M + q_F = \text{constante}$  revient à exprimer qu'il y a substitution entre le fer et l'ensemble du transport routier. Cette hypothèse, qui conduit à une valeur  $e_{FM}$  très élevée, est critiquable. En centrant l'analyse sur le marché plus restreint des transports à plus de 150 km, les chiffres et résultats précédents deviennent :

- trafic routier :

$$q'_M = 125 \times \frac{83}{114} = 125 \times 0,72 = 91 \text{ GT-km}$$

83 : volume du trafic routier à plus de 150 km dans l'enquête TRM

114 : volume total du trafic routier dans cette enquête

- chiffre d'affaire du trafic routier :

$$R'_M = 91 \times 0,50 = 45 \text{ GF}$$

91 : trafic routier à plus de 150 km en GT-km

0,50 : prix de la T-km (tiré du rapport CCTN).

Alors les élasticités deviennent :

$$\left( \begin{array}{l} e'_{FF} = - 1 \\ e'_{MF} = 0,54 \\ e'_{FM} = 1,3 \\ e'_{MM} = 0,70 \end{array} \right)$$

Mais bien sûr, elles s'appliquent à un trafic routier plus restreint, correspondant à un volume total  $q'_M = 91 \text{ GT-km}$ , au lieu de 125 GT-km.

En fixant la barre du domaine de concurrence à 300 km, les résultats deviennent :

$$q''_M = 125 \times \frac{62}{114} = 125 \times 0,54 = 67,5 \text{ GT-km}$$

$$R''_M = 67,5 \times 0,50 = 33,75 \text{ GF}$$

Les élasticités deviennent :

$$\left( \begin{array}{l} e''_{FF} = - 1 \\ e''_{MF} = 1 \times \frac{49,5}{67,5} = 0,73 \\ e''_{FM} = 0,73 \times \frac{33,75}{18,7} = 1,3 \\ e''_{MM} = - 1,3 \times \frac{49,5}{67,5} = 0,95 \end{array} \right)$$

On verra dans l'Annexe 2 que le montant de la contribution n'est pas affecté par le choix de l'hypothèse.

## 2. LES TRAFICS

La connaissance des trafics est paradoxalement très mauvaise. Les chiffres suivants, résultant en général de la comparaison de plusieurs sources, seront retenus :

— SNCF.

En 1990, le trafic en milliards de voy-km, se décomposait en :

Trafic suburbain	14,15
dont :	
• Banlieue parisienne plus grande couronne	10,72
• Banlieue de province	3,43
dont grandes métropoles	2,15
S.R.V. intervilles et ruraux	1,45
Grandes lignes	48,16
dont :	
• R.E. classique	33,24
• T.G.V.	14,92
• Trafic à plus de 400 km (concurrencé par l'aérien)	28,0
Total	63,76

Le trafic marchandises s'élevait en milliards de T-km à 49,7 en 1990 (50,7 en 1988).

— Trafic aérien.

Il faut plusieurs statistiques pour l'appréhender :

Trafic des aéroports (7) en Millions de voyageurs, en milliers de tonnes et de mouvements en 1990

	Passagers totaux	Passagers locaux	Dont inter- nationaux	Mouvements		Fret
				commerciaux	non commerciaux	
Aéroports de Paris	46,9	46,3	29,0	424	18	872
Grands aéroports	22,2	21,4	7,5	429	386	133
Aéroports moyens	9,8	9,8	1,3	152	620	23
Aéroports intermédiaires	2,4	2,35	0,3	63	462	5
Petits aéroports	1,0	0,9	0,1	73	822	6

<sup>7</sup> Hors Outre-Mer.

— Nombre de vols I.F.R. traités par le contrôle de la Navigation aérienne française, en 1990 :

• Survol :	560 000
• Vols internationaux :	580 000
• Vols domestiques :	460 000
Total :	<u>1 600 000</u>

— Mouvement totaux contrôlés : 2 560 000.

— Trafic routier

On retiendra les chiffres calculés par le rapport sur l'imputation des charges d'infrastructures de transport de 1992 (appelé dans la suite rapport Brossier), et reproduits ci-dessous (la mention "milieu urbain" correspond aux agglomérations de plus de 5 000 h.)

8 Répartition de la circulation PL par réseaux

1960  
par poids sur les véhicules TRM (11 & 12)

Circulation en 1960 des PL de plus de 10t de PTCA

	1960
1 Les PL	
11 Parc TRM total (véh. fr. en France)	16,00
12 Véhicules TRM de plus de 15 ans d'âge	1,25
13 PL étrangers acheminant le commerce ext. français	1,35
14 Transit des PL étrangers	1,40
15 Véhicules des domaines & véh. spéciaux	1,25
21 Autocars	2,11
22 Trafic des autocars étrangers	0,65
<b>3 Total véhicules utilitaires</b>	<b>24,91</b>
4 Véhicules divers	
41 Engins agricoles	0,75
42 Véhicules militaires	0,50
<b>5 Total général</b>	<b>26,16</b>
sous-total 13 à 42	8,01
sous-total TRM (11 à 14)	22,92

réseau national	chomins département	voies locales	milieu urbain
11,95	6,33	0,17	0,69
85,4%	38,1%	1,2%	4,0%
1,35			
1,40			
0,50	0,19	0,00	0,50
0,83	0,44	0,09	0,74
0,65			
<b>16,70</b>	<b>5,98</b>	<b>0,22</b>	<b>1,93</b>
0,15	0,30	0,30	0
0,25	0,20	0,05	0
<b>17,10</b>	<b>6,48</b>	<b>0,67</b>	<b>1,93</b>
5,13	1,13	0,50	1,24
14,71	5,33	0,17	0,69

(suite)

Répartition sur le réseau national de la circulation des PL de plus de 10t de PTCA

mds de véh.km

	Réseau national	autoroutes concédées	autoroutes non concédées	dom. auto. urbaine	routes nationales	milieu urbain v.p. ext. p.c.
1 Les PL						
11 Parc TRM total (véh. fr. en France)	11,95	4,20	1,09	1,00	6,07	1,72
12 Véhicules TRM de plus de 15 ans d'âge						
13 PL étrangers acheminant le commerce ext. français	1,35	0,74	0,14	0,00	0,47	0,02
14 Transit des PL étrangers	1,40	1,12	0,26	0,17		0,17
15 Véhicules des domaines & véh. spéciaux	0,50				0,50	0,50
21 Autocars	0,83	0,35	0,13	0,08	0,35	0,82
22 Trafic des autocars étrangers	0,65	0,39	0,13	0,08	0,13	0,03
<b>3 Total véhicules utilitaires</b>	<b>16,70</b>			<b>1,45</b>		<b>3,33</b>
4 Véhicules divers						
41 Engins agricoles	0,15				0,15	
42 Véhicules militaires	0,25				0,25	
<b>6 Total général</b>	<b>17,10</b>	<b>6,83</b>	<b>2,27</b>	<b>1,45</b>	<b>7,93</b>	<b>3,33</b>
sous-total 13 à 42	100,0%	62,7%	16,3%		61,5%	
sous-total TRM (11 à 14)	5,13	2,00	0,68		1,65	
	14,71	4,83	2,10		6,28	

7 Répartition de la circulation des véhicules légers par réseaux (\*)

1990	Circ. totale par véhicules	Routes			milieu urbain
		Autoroutes	nationales	département. & locaux	
Véhicules y compris étrangers	340,9	47,71	57,80	130,90	104,59
voitures franç.	316,6				
voitures étrangères	17,9				
motocyclistes	6,5				
VUL moins de 5 t de PTAC	67,5				
Circulation VU de 5 t à 10 t	1,26				
VUL ≤ 3,5 t	66,2	9,27	11,23	25,47	20,31
PL de 3,5 t à 10 t	2,51	0,39	0,38	1,25	0,5
Véh. > 10 t (français étrangers)	28,16	9,17	7,93	7,13	1,93
Circulation totale	435	66,53	77,33	164,7	127,34
totalisation pour vérification		66,53	77,33	164,70	127,34

Répartition de la circulation selon les réseaux

Circulation totale	15,3%	17,7%	27,5%	29,2%	100,0%
circ. véh légers < 3,5 t	407,15	56,60	69,02	150,32	124,91
	14,0%	17,0%	24,8%	26,7%	100,0%
circ poids lourds > 3,5 t	33,3%	29,0%	22,8%	6,5%	100,0%
circ véh lourds > 10 t	25,0%	27,5%	27,5%	7,4%	100,0%

Pert des poids lourds dans la circulation selon les réseaux en 1990

% poids lourds > 3,5 t	6,6%	14,4%	10,7%	5,1%	1,9%
% véh lourds > 10 t	7,3%	17,8%	10,9%	2,5%	1,4%

1985					
% véh lourds > 10 t en 1985 anc. base 85 TAC	5,7%	12,9%	10,2%	4,3%	1,6%
circ véh lourds > 10 t en 1985 nouv. base T5c	20,55	6,45	7,07	6,42	1,61
circ. totale en 1985 nouv. base T4	355,0	45,1	65,2	145,4	99,3
% véh lourds > 10 t en 1985 nouv. base T4	5,8%	12,1%	9,0%	2,2%	1,0%

(\*) Méthode de répartition de la circulation des véhicules légers par réseaux

La circulation des PL de 3,5 t à 10 t et des plus de 10 t a été répartie par réseaux précédemment.

Il en résulte une répartition par poids sur chaque réseau de la circulation des véhicules légers.

La même répartition est alors considérée comme celle des voitures d'une part, des VUL d'autre part.

Détail du tableau 7 ci-dessus, et complément pour la circulation en milieu urbain

1990	Circ. totale par véhicules	Autoroutes			voies locales	milieu urbain y c. aut. urb.
		concedées	non conced.	département.		
Véhicules y compris étrangers	340,9	29,50	18,21	118,59	12,32	119,8
voitures franç.						
voitures étrangères						
motocyclistes						
VUL moins de 5 t de PTAC						
Circulation VU de 5 t à 10 t						
VUL ≤ 3,5 t	66,2	6,73	3,54	23,03	2,39	23,3
PL de 3,5 t à 10 t	2,51	0,23	0,15	1,13	0,12	0,6
Véh. > 10 t (français étrangers)	28,16	6,67	3,50	6,46	0,67	4,8
Circulation totale	435	41,1	25,4	149,2	15,5	148,5
totalisation pour vérification		41,1	25,4	149,2	15,5	148,5

Les chiffres précédents portent sur des trafics exprimés en milliards de véh-km. Pour les voitures, pour passer aux voyageurs, il faut tenir compte du taux d'occupation des véhicules :

- en interurbain : 1,85
- en zone urbaine : 1,35

En Milliards de	AR	RN	CD	Milieu urbain	Total
Véhicules-km	47,7	57,8	133,9	104,6	340,9
Voyageurs-km	88,2	106,9	247,7	141,0	583,8

Enfin, pour les voyageurs, le modèle MATISSE utilise des données concernant les déplacements ayant leur origine et destination en France :

<b>Route</b>	<b>1988</b>	<b>2010</b>
Millions de véhicules	161	194,6
dont : réseau lent	41,7	16,9
réseau rapide	120,0	177,7
Milliards de véh-km	47	55,7
dont : réseau lent	10,9	4,9
réseau rapide	36,1	50,8
Milliards de voy-km	87,4	104,6
dont : réseau lent		
réseau rapide		
Millions de voyageurs	305,6	386,2
dont : réseau lent		
réseau rapide		
<b>Fer</b>		
Millions de voyageurs	72,4	154,6
dont : réseau lent	45,9	12,5
réseau rapide	27,6	142,1
Milliards de voyageurs-km	32,6	75,5
dont : réseau lent	20,5	6,1
réseau rapide	12,1	69,0
<b>Avion</b>		
Millions de voyageurs	16,0	25,8
Milliards de voyageurs-km	8,3	13,1

Ces chiffres ne couvrent que les déplacements ayant à la fois leur origine et leur destination en France. Pour les rapprocher des chiffres de trafic France entière précédents, et ainsi saisir l'ensemble des déplacements à plus de 80 km, il faut y intégrer la partie effectuée sur le territoire français des déplacements internationaux à plus de 80 km, chiffres évalués par l'équipe MATISSE pour 1988.

Pour la route ils correspondent à environ 17 Milliards de véh-km, pour le fer à environ 6 Milliards de véh-km. Ces renseignements permettent de dresser le tableau suivant, donnant pour 1990 la répartition des véh-km ou voyageurs-km de chaque mode, ainsi que la répartition des réseaux "lents" et "rapides" selon les types d'infrastructure.

	Trajets domestiques	Trajets internationaux	Trajets totaux 88	Trajets totaux 90
<b>Route en Milliards de Véh-km</b>				
Total	47	17	64	67,3
Réseau lent	(10,9)	(3,9)	(14,8) RO 27	(RO : 28,4) (rés. lent : 15,5)
Réseau rapide	(36,1)	(13,1)	(49,2) AR 37	(AR : 38,9) (rés. rapide : 51,8)
<b>Fer en Milliards de Voy-km</b>				
Total	32,6	+ 6	38,6	39,3
Réseau lent	20,5	3,8	24,3 (RE : 28,1)	24,7 (RE : 24,4)
Réseau rapide	12,1	3,8	14,3 (TGV : 10,5)	14,6 (TGV : 14,9)

Pour établir la 2<sup>ème</sup> moitié du tableau, on a supposé que le réseau rapide routier empruntait environ 3/4 d'autoroute, et que la croissance 88/90 se faisait conformément à la croissance générale des trafics telle qu'elle ressort des rapports de la CCTN :

- 1,05 pour la route ;
- 1,02 pour le rail grandes lignes.

On arrive finalement au tableau suivant, qui décompose les réseaux selon leur nature (lent ou rapide) et selon leur caractéristique technique.

Routes	Réseau lent	Réseau rapide	Total
<b>Trajets à plus de 80 km en véh-km (10<sup>9</sup>)</b>			
Route ordinaire	15,5	12,9	28,4
Autoroute	0	38,9	38,9
<b>Total</b>	<b>15,5</b>	<b>51,8</b>	<b>67,3</b>

La clé ayant permis de dresser ce tableau est que le réseau lent ne comporte pas d'autoroute.

<b>Fer</b>	<b>Service à moins de</b>	<b>Service à plus de</b>	<b>Total</b>
<b>Trajets à plus de</b>	<b>150 km/h</b>	<b>150 km/h</b>	
<b>80 km en 10<sup>9</sup></b>			
<b>voyageurs-km</b>			
<b>R.E. classique</b>	24,1	0,3	24,4
<b>TGV</b>	0,6	14,3	14,9
<b>Total</b>	24,7	14,6	39,3

Le réseau rapide couvre non seulement les TGV, mais quelques RE classiques dont la part va en diminuant.

Par ailleurs MATISSE fournit des valeurs du temps qui sont tout à fait compatibles avec celles qui sont mises en évidence usuellement, et qui présentent l'avantage d'être cohérentes entre elles <sup>(8)</sup> :

<b>En F 1988 Mode</b>	<b>VP</b>	<b>Train 2<sup>ème</sup> cl.</b>	<b>Train 1<sup>ère</sup> cl.</b>	<b>Avion</b>
<b>Motif</b>	49	42	93	18
<b>Personnel</b>	49	42	93	188
<b>Professionnel</b>	183	167	247	403
<b>Tous motifs</b>	63	56	158	276

Il s'agit là de la valeur du temps de trajet. Le décalage par rapport à l'heure désirée de départ a aussi une valeur, égale aux 3/4 des précédentes.

<sup>8</sup> Source : O. MORELLET, *Estimations des valeurs moyennes du temps tirées de MATISSE*, Octobre 1991.

## FONCTION DE COÛT DES INFRASTRUCTURES AÉRIENNES

---

Il n'y a pas beaucoup de renseignements sur les fonctions de coût des infrastructures aériennes, contrairement au cas du transport aérien proprement dit, surabondamment étudié. On présentera successivement l'état de la question pour les aéroports et pour la navigation aérienne.

### 1. LES AÉROPORTS

Il n'existe pas beaucoup de littérature sur ce sujet. KEELER ("Airport cost and congestion" The American Economist 1973) a trouvé des rendements d'échelle constants à partir d'une étude économétrique portant sur des données anciennes.

DOGANIS et THOMPSON ("The Economies of British airports" Polytechnic of central London) arrivent au même résultat, avec une fonction Cobb-Douglas.

Une étude économique citée par le STBA et effectuée sur les aéroports français de province fait apparaître la relation suivante :

$$\text{Coût/pax} = 207,6 - 11,95 \log_{10} t + 239 i - 0,42 E_m + 9,43^f r^2 = 0,65$$

(2,95)      (13,4)      (0,11)      (1,67)

où t = est le trafic ;

i = la part du trafic international ;

$E_m$  = l'emport moyen ;

f = le fret par mouvement.

On déduit de cette relation que le coût marginal  $C_m$  est :

$$C_m = \frac{\text{coût}}{\text{pax}} - \frac{11,95}{\log_e 10}$$

Le coût marginal serait inférieur au coût moyen, d'environ 5F., c'est-à-dire qu'il serait de 0,9 fois le coût moyen.

TOLOFARI, ASHFORD et CAVES ("The cost of air service fragmentation" Longhborough University 1990) ont effectué une étude très approfondie de la fonction de coût des aéroports britanniques, fondée sur l'estimation d'une fonction translog. Ils

étudient séparément les dépenses d'exploitation, conduisant aux coûts marginaux et moyens à court terme (hors dépenses en capital), et la fonction de coût total, correspondant à ces infrastructures adaptées (optimisées), et les coûts marginaux et moyens à long terme correspondants.

Il en ressort que :

- le coût marginal à court terme est nettement inférieur au coût moyen (dans la proportion de 1 à 2) ;
- les infrastructures aéroportuaires sont en général surdimensionnées <sup>(9)</sup> résultat difficilement évitable compte tenu des indivisibilités techniques que le calcul d'optimisation néglige ;
- si l'optimisation était réalisée, il en résulterait des rendements à échelle importants, de 1,4 environ.

Enfin la pratique aéroportuaire, notamment celle développée à l'Aéroport de Paris, conduit à certaines considérations allant également dans le sens d'économies d'échelle :

- La 40<sup>ème</sup> heure de pointe qui sert normalement au dimensionnement des aérogares est reliée au trafic annuel selon une loi linéaire comportant une ordonnée à l'origine :

40<sup>ème</sup> heure de pointe = 400 + 3,5 (trafic annuel en millions). De ce fait, l'importance du trafic est un facteur de productivité des aéroports, conduisant à des rendements d'échelle globaux.

- D'ailleurs, la régression entre le coût moyen par passager et le trafic fait apparaître une décroissance de ce coût moyen, au moins jusqu'à des volumes de trafic annuel de quelques millions de passagers par an. Au delà le coût d'un pax se stabilise autour de 49 F <sup>(10)</sup>.
- Il existe des effets de productivité concernant les aérogares : jusqu'à environ 20 millions de passagers ; à taux d'occupation équivalents les coûts totaux n'augmentent pas aussi vite que le trafic, et à taille d'aérogare donnée les coûts d'exploitation augmentent moins vite que le trafic.
- Il existe de forts effets de productivité concernant les pistes et voies de circulation avion, qui présentent des coûts fixes et des capacités importantes.

Ces résultats qualitatifs corroborent l'étude précédente pour aboutir à l'idée que les infrastructures aéroportuaires présentent des effets d'échelle. Des études spécifiques menées à partir des données françaises ne permettent pas de trancher ce point.

<sup>9</sup> C'est-à-dire que la capacité réelle est supérieure à celle qui serait optimale.

<sup>10</sup> Le coût plus élevé d'Aéroports de Paris (103 F par prix en moyenne) s'expliquerait par la différence des services aéronautiques rendus (les services d'assistance sont beaucoup plus développés : 18 F par prix contre 1 F en province), par le poids du trafic international, plus important et plus coûteux, par l'importance du fret, et par la différence des services commerciaux.

Des régressions ont été essayées pour relier les charges totales des aéroports aux différentes variétés de trafic :

- les prix domestiques ;
- les prix internationaux ;
- le fret ;
- l'emport moyen (nombre de prix par mouvement).

Les aéroports choisis sont les plus importants de France, au niveau de la vingtaine, incluant A.D.P.

Les variables à expliquer furent :

- les charges d'exploitation totales ;
- les charges d'exploitation hors charges de capital ;
- les charges d'exploitation hors assistance.

Plusieurs essais ont été faits soit avec des fonctions linéaires, soit avec des fonctions translog. Ce sont ces dernières qui fournissent les résultats les plus stables au changement d'échantillon et les plus vraisemblables.

Parmi les différentes variables étudiées, celles qui sont les plus significatives sont la combinaison :

- emport moyen ;
- rapport prix domestique / prix international ;
- nombre de mouvements ;

selon les régressions suivantes :

## Model fitting results for: LOG Chargexpl[INRL]

dependent variable	coefficient	std. error	t-value	sig.level
INSTANT	4.010722	0.532056	7.5332	0.0000
(LOG (Faxtot2/mvtoom2))^2[INRL]	0.104532	0.02203	4.7460	0.0002
LOG (Faxdomstat/Faxintstat)[INRL]	-0.082395	0.044405	-1.8690	0.0600
(LOG mvtoom2)^2[INRL]	0.054071	0.002944	18.3658	0.0000
-RQ. (ADJ.) = -0.9676 SE= 0.263448 MAE= 0.192352 DurbinWat= 1.710				
previously: 0.8581 0.466182 0.333429 1.372				
0 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.				

## Model fitting results for: (LOG (Chargexpl-Assistance))[INRL]

dependent variable	coefficient	std. error	t-value	sig.level
INSTANT	3.922096	0.522524	7.5046	0.0000
LOG (Faxtot2/mvtoom2))^2[INRL]	0.024818	0.021839	3.9196	0.0012
LOG (Faxdomstat/Faxintstat)[INRL]	-0.022998	0.043618	-1.9028	0.0752
LOG mvtoom2)^2[INRL]	0.056646	0.002292	19.6565	0.0000
-RQ. (ADJ.) = 0.9715 SE= 0.258777 MAE= 0.190294 DurbinWat= 1.329				
previously: 0.8993 0.125012 0.082057 2.495				
0 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.				

## Model fitting results for: (LOG (Chargexpl-(Chargfin+Amort)))[INRL]

dependent variable	coefficient	std. error	t-value	sig.level
INSTANT	3.62743	0.719563	5.0412	0.0001
(LOG (Faxtot2/mvtoom2))^2[INRL]	0.115318	0.025542	4.5148	0.0004
LOG (Faxdomstat/Faxintstat)[INRL]	-0.067851	0.051809	-1.3096	0.2100
(LOG mvtoom2)^2[INRL]	0.052169	0.00921	5.3546	0.0000
LOG (Chargfin+Amort)[INRL]	-0.002737	0.127333	-0.0215	0.9831
-RQ. (ADJ.) = 0.3560 SE= 0.294054 MAE= 0.208206 DurbinWat= 1.279				
previously: 0.2704 0.251644 0.175544 1.981				
0 observations fitted, forecast(s) computed for 0 missing val. of dep. var.				

Les résultats ont la même qualité quelle que soit la variable à expliquer parmi les trois citées plus haut, et les coefficients des variables ont sensiblement les mêmes valeurs.

La régression expliquant les charges d'exploitation hors charges de capital, c'est-à-dire les dépenses de court terme, n'est pas améliorée quand on y introduit les charges de capital comme variable explicative représentative du volume d'équipement.

Il est possible, à partir de ces résultats, de déterminer la nature des rendements aéroportuaires, croissants ou décroissants. En prenant la relation qui explique les charges d'exploitation totales, on aboutit à la relation suivante :

$$\frac{dc}{c} = 0,10 \times 2 \frac{\frac{dpax}{pax}}{\frac{mt}{pax}} \times \log \left( \frac{pax}{mt} \right) + 0,05 \times 2 \times (\log mt) \times \frac{dmt}{mt} - 0,08 \frac{d \left( \frac{pax \text{ dom}}{pax \text{ int}} \right)}{\left( \frac{pax \text{ dom}}{pax \text{ int}} \right)}$$

Evaluons les coefficients pour deux aéroports de tailles différentes :

	n° 1	n° 6
Pax dom	1,88 x 10 <sup>7</sup>	1,98 x 10 <sup>6</sup>
Pax int	2,75 x 10 <sup>7</sup>	457 000
Pax total	4,63 x 10 <sup>7</sup>	2,44 x 10 <sup>6</sup>
mt com	424 000	34 058
$\frac{pax \text{ dom}}{pax \text{ int}}$	0,68	4,30
$\frac{pax \text{ total}}{mt}$	109	72
$\log \frac{pax}{mt}$	4,7	-4,27
$\log mt$	~13	~10,4
$\left( \frac{dc}{c} = \alpha \frac{\frac{dpax}{pax}}{\frac{mt}{pax}} \right) \alpha =$	0,94	0,85
$\left( \frac{dc}{c} = \beta \frac{dmt}{mt} \right) \beta =$	1,3	1,04

Il résulte de ces résultats que si le trafic augmente de 10% sans changement du nombre de mouvements, le coût augmentera de 9% environ (si le trafic augmente de 10% uniquement par augmentation du nombre de mouvements sans changement de l'emport, le coût augmente de 12% environ). Il y a donc des rendements d'échelle qui diminuent avec la taille de l'aéroport, et qui sont de l'ordre de 0,9. Si l'on considérait les coûts hors assistance, on trouverait des rendements d'échelle de 0,8.

## 2. INFRASTRUCTURES DE NAVIGATION AÉRIENNE

Aucune référence quantitative n'a été trouvée en ce domaine, qui est fort complexe comme l'ont montré les analyses comparatives de productivité ; le coût du contrôle aérien dépend en effet de nombreux facteurs tels que le volume de trafic, mais aussi la direction du trafic (flux parallèles ou croisés), la vitesse des avions (des vitesses hétérogènes rendent plus coûteux le contrôle), la répartition horaire du trafic ; enfin les répercussions géographiques sont lointaines : une congestion aux Baléares peut occasionner un encombrement à Amsterdam.

Les considérations qualitatives souvent émises sont les suivantes :

- A équipement donné, le coût marginal est d'abord très faible, puis croissant (on ne peut pas dépasser un nombre d'appareils par contrôleur, on ne peut pas réduire la taille des secteurs, de toute façon bornée par la nécessité d'un espace minimum de manœuvre, sans augmenter les coûts de transmission de l'information d'un secteur à l'autre). Les experts pensent que maintenant, avec les équipements actuels, on est autour de ce seuil où les rendements deviennent décroissants et où la saturation est proche.
- Quand on fait varier les équipements (radar monopulse, informatisation accrue), les coûts marginaux à court terme et à long terme baissent, et le seuil de saturation est repoussé. Il existe une incertitude technologique, liée à la difficulté d'informatisation complète, qui n'est pas actuellement possible sur le plan technique ; il semble qu'il y ait un mur ; jusqu'où pourra-t-on le repousser ?

En tout cas, actuellement et dans un proche avenir, on est dans une phase d'équipement et de rationalisation, et il faut considérer le coût marginal à long terme, et on fera l'hypothèse de rendements croissants amenant à un coût marginal inférieur au coût moyen. Quelle est l'importance des rendements d'échelle ? Les études sur le sujet sont encore en cours, et il n'est pas possible d'en dégager des résultats totalement sûrs. Selon les estimations, les économies d'échelle se situent entre 1 et 2, c'est-à-dire que le coût marginal serait compris entre la moitié du coût moyen et le coût moyen. Une hypothèse vraisemblable d'un coût marginal égal aux  $2/3$  du coût moyen sera retenue.

## CE QUE PAIENT ACTUELLEMENT LES MODES DE TRANSPORT

---

### 1. CHEMIN DE FER

Les conditions de paiement des infrastructures résultent pour le chemin de fer des comptes de gestion de l'infrastructure, joints. On y voit que les activités participent à hauteur de 4,2 MMds F à la couverture des charges d'infrastructure, correspondant en principe au coût marginal, et laissent un solde de 14,78 Mds de F couvert entre autres par une subvention de l'Etat de 10,4 MMds F.

### 2. INFRASTRUCTURES AÉRIENNES

Les dépenses payées par les usagers aériens concernent les aéroports (chiffres d'affaires) et la navigation aérienne (redevances perçues), soit en Milliards de F (source : tableau de bord DGAC) :

#### 2.1. Aéroports

Aéroports de Paris	5,270
Aéroports de Province	1,802

#### 2.2. Navigation aérienne

Redevances de route	2,435
RST CA	0,676
	<hr style="width: 10%; margin-left: auto; margin-right: 0;"/>
Total	10,18

Il faut noter que dans le chiffre d'affaires des aéroports, et notamment d'A. D. P. figurent des produits extra aéronautiques dont on ne connaît pas les charges. On les a inclus dans les totaux précédents :

- recettes commerciales ;
- prestations diverses ;
- recettes domaniales ;
- usage des installation ;
- assistance.

Ces recettes sont pratiquement égales aux recettes aéronautiques pour les aéroports de province, elles en sont près du double pour A.D.P.

	recettes aéronautiques/chiffre d'affaires
A.D.P.	32%
grands aéroports	42%
aéroports moyens	51%
aéroports moyens	39%

En supposant que les recettes aéronautiques équilibrent les charges, les charges aéronautiques seraient d'environ 3 Milliards de F.

### 3. ROUTES

Les dépenses assimilables à des redevances d'infrastructures et payées par les utilisateurs de la route recouvrent :

- la taxe sur les assurances ;
- la taxe sur les carburants ;
- quelques taxes spécifiques diverses (taxe à l'essence, vignette...) ;
- les péages autoroutiers.

Les chiffres suivants, issus du rapport de la CCTN, sont en Milliards de F :

	Voitures particulières + motos	Bus/Car	Utilitaires légers	Poids lourds	Total
Taxe sur les assurances	(12,1 + 0,8 + 0,6) 13,5	0,1	(0,44 + 1,21) 1,6	(0,86 + 0,61) 1,4	16,6
Taxe sur les carburants (hors TVA)	(83,7 - 18,3 + 2,6 - 0,6 + 2,0 - 0,3) 69,1	(1,6 - 0,1) 1,5	(3,4 - 0,8 + 12,0 - 1,7) 12,9	12,0 <sup>(11)</sup>	95,5
Taxes spécifiques diverses	(9,9 + 0 + 2,5) 12,4	1,0	(0,4 + 1,0) 1,4	0,8 <sup>(12)</sup>	15,6
Péages autoroutes	(10,25 + 0,13 + 0,1) 10,4	0,7	(0,2 + 0,6) 0,8	(3,2 + 1,5) 4,7	16,6
Total	105,4	3,3	16,7	18,9	144,3

En ce qui concerne la répartition de ces dépenses entre les réseaux, on supposera que :

- bien sûr les péages sont payés sur les autoroutes concédées ;
- la totalité des dépenses des V.U.L. est effectuée en zone urbaine (hypothèse grossière, mais sans conséquence pour l'analyse de la concurrence modale) ;
- pour les bus, cars et voitures particulières les dépenses hors péages, de 95,0 Mds F, se répartissent au prorata des kilométrages à raison donc de :  

$$\frac{95,0}{340} = 0,28 \text{ F/Véh-km} ;$$
- pour les P.L., le trafic des P.L. > 10 t <sup>(13)</sup>, qui seul intervient par la suite, représente 90% du total de la catégorie (voir le tableau général des trafics routiers donné dans le chapitre "Les trafics et les élasticités"), soit pour cette sous-catégorie une dépense totale de 17,0 Mds F.

<sup>11</sup> La CCTN fournit un chiffre de 14,1 Milliards de F. Mais ce chiffre est incertain et surévalué, car il comprend un solde non ventilé (cf. dossier "Bilan de la circulation et des consommations d'énergie" dans le rapport de la CCTN). Le groupe Brossier fournit pour la taxe sur les carburants de cette catégorie de véhicules un montant de 12 Milliards de F (cf. fiche Annexe) qui a été retenu.

<sup>12</sup> Estimation des recettes issues de la vignette et de la taxe à l'essieu.

<sup>13</sup> Plus de 5 t de chargement.

## CE QUE RAPPORTERAIT UNE TARIFICATION AU COÛT MARGINAL SOCIAL

### 1. CHEMIN DE FER

A la tarification au coût marginal d'usage, figurant dans les comptes de gestion, il faut ajouter les coûts sociaux ou externes (sûreté, environnement, congestion) :

En MdF	Rappel coût marginal d'usage	Sûreté ( <sup>14</sup> )	Environnement ( <sup>14</sup> )	Congestion ( <sup>15</sup> )	Coûts externes
Rapides-express (Banlieue) (SRV)	0,914 (1,701) (0,533)	0,07 (0,04) (0,51)	0,43 (0,12) ( )	0,3 (0,6) (0,1)	0,8 (0,8) (0,15)
Fret	1,235	0	0,37	0,1	0,47

Nota : les résultats concernant la banlieue et les SRV, qui ne participent pas à la même logique de coordination, ne sont figurés que pour mémoire.

### 2. INFRASTRUCTURES AÉRIENNES

Des considérations développées dans les chapitres précédents, la recette issue du coût marginal social serait, par rapport à ce que paient actuellement les usagers :

- inférieure de 1,0 MdF, compte tenu de l'existence de rendements croissants dans le coût du service de navigation aérienne ;
- supérieure de 0,7 MdF au titre des coûts d'environnement ;
- supérieure de 1,16 MdF au titre de la congestion aérienne ;
- supérieure de 0,15 MdF au titre de la sûreté ;
- inférieure de 0,7 MdF compte tenu des rendements croissants aéroportuaires.

Soit au total, supérieure de 0,3 MdF à ce que paient actuellement les usagers.

<sup>14</sup> Répartir au prorata des trafics, en chargeant la banlieue et les SRV pour la sûreté.

<sup>15</sup> Répartir selon les considérations de l'Annexe 2.

### 3. INFRASTRUCTURES ROUTIÈRES

Le groupe Brossier a calculé la recette issue au coût marginal social, hors environnement, pour les différents réseaux. Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Trafics en 10 <sup>9</sup> Véh-km (voy.-km)	Voyageurs ( <sup>16</sup> )	Utilitaires légers ( <sup>17</sup> )	P.L. ( <sup>18</sup> )	Total
CC	117,7	23,3	1,7	
CD	119,0	24,1	5,8	
RN	76,7	15,3	9,3	
AR concédées	30,2	5,9	6,1	
Total	343,6	68,6	22,9	435,1

(Trafics urbains et non urbains).

Recettes du coût marginal social en MdF			
CC	13,0	3,0	1,9
CD	16,5	3,1	4,0
RN	16,8	4,8	5,1
AR concédées	2,8	0,6	1,5
Total	49,1	11,6	12,5

(Urbain et non urbain).

Les besoins de la comparaison intermodale conduisent à modifier ces chiffres pour ce qui concerne les coûts de congestion. Ceux-ci ont été calculés pour des trajets de rase campagne purs. Or, les trajets interurbains comportent des parties urbaines, notamment les parties terminales. Si les coûts marginaux d'usage et les coûts de sécurité peuvent, en première approximation, être considérés comme identiques en rase campagne et en milieu urbain, il n'en est pas de même pour les coûts de congestion nettement plus forts en milieu urbain. Le rapport Josse 88 avait pris les hypothèses suivantes, qu'on réutilisera pour un calcul approché correcteur : 8% de parties urbaines dans les trajets interurbains, pour lesquels le coût de congestion est double de celui de la rase campagne, ce qui augmente les coûts de congestion de 4%.

<sup>16</sup> Catégories : VP < 1 t, car et bus.

<sup>17</sup> Catégorie : UL.

<sup>18</sup> Catégories : silhouettes 1 à 7, véhicules de plus de 15 ans, engins agricoles, véhicules étrangers.

Les coûts de congestion moyens sont, en Francs par véhicule-km, donnés dans le tableau suivant issu du rapport du groupe Brossier :

	Voyageurs	U.L.	P.L.		
			Camion	Remorque	Semi-remorque
CC	0,049	0,066	0,115	0,086	0,201
CD	0,049	0,066	0,115	0,086	0,201
RN	0,142	0,273	0,477	0,358	0,835
AR	0,021	0,040	0,070	0,052	0,122

La multiplication par les trafics donne pour le total des coûts de congestion le tableau suivant :

En Mds F	Voyageurs	U.L.	P.L.
CC	5,8	1,5	0,3
CD	5,8	1,6	1,6
RN	10,9	4,2	6,0
AR concédées	0,6	0,2	0,6

Le coût de congestion supplémentaire à ajouter au tableau précédent des recettes du c.m.s. est égal à 4% de celui-ci, soit :

En Mds F	Voyageurs	U.L.	P.L.
CC	0,2	0,1	0,0
CD	0,2	0,1	0,1
RN	0,4	0,2	0,2
AR concédées	0,0	0,0	0,0

Par ailleurs, le groupe Brossier a effectué deux calculs du coût d'insécurité : le premier avec des valeurs numériques du mort et du blessé faibles, celles retenues par la DR actuellement et nettement plus faibles que celles issues des réflexions les plus récentes en France et à l'étranger sur le sujet ; le tableau suivant fait apparaître ces deux séries de valeurs en MF :

	Hypothèse 1	Hypothèse 2
Tué	1,86	3,26
Blessé grave	0,17	0,34
Blessé léger	0,011	0,072
Dégat matériel	0,016	0,016

Les coûts globaux d'insécurité qui en résultent pour les diverses catégories de véhicules sont très différents, comme le montre les tableaux suivants :

#### Hypothèse 1

	Voyageurs	U.L.	P.L.	Total
CC	3,9	0,1	0,2	4,2
CD	7,1	0,3	0,4	7,8
RN	4,1	0,2	0,4	4,7
AR	0,8	0,0	0,1	0,9
Total	15,9	0,6	1,1	17,6

#### Hypothèse 2

	Voyageurs	U.L.	P.L.	Total
CC	12,0	0,4	1,0	13,4
CD	19,7	0,9	1,1	21,7
RN	11,7	0,6	1,1	13,4
AR	2,2	0,1	0,5	2,8
Total	45,6	2,0	3,7	51,3

C'est l'hypothèse 1 qui a été retenue dans le rapport. Dans une perspective d'évolution future, il vaut mieux pour les comparaisons intermodales retenir les valeurs de l'hypothèse 2. En revanche, il paraît raisonnable de ne compter à la charge des usagers que la part des dépenses qu'ils ne supportent pas eux-mêmes en raison de leur responsabilité dans l'accident (les dépenses occasionnées à eux-mêmes par leur propre responsabilité, ils les supportent, soit en frais directs, soit par leurs primes d'assurance). Les chiffres que l'on trouve sont alors très voisins de ceux de l'hypothèse 1, ce sont ceux appelés dans le rapport "coûts marginaux d'insécurité".

On gardera les chiffres du groupe Brossier, en ayant à l'esprit que les valeurs à introduire dans la tarification seraient des valeurs comportementales, fondées sur ce que les individus sont prêts à payer pour réduire les risques d'accidents, comme cela est calculé dans certains pays étrangers.

Enfin, il faut aussi, pour les comparaisons intermodales, tenir compte des coûts d'environnement. Ceux-ci, calculés dans le chapitre "Coûts sociaux de bruit et de pollution" sont les suivants en Milliards de F :

Voyageurs	5,8
répartis au prorata des trafics en :	
CC	2,0
CD	2,0
RN	1,3
AR concédées	0,5
Marchandises dont :	
UL	3,9
PL	3,9

En tenant compte de ces modifications concernant la congestion et l'environnement, les produits du coût marginal social seraient, pour la route, les suivants en Mds de F :

		Voyageurs	Utilitaires légers	Poids lourds
Total		(49,1 + 5,8 + 0,8) 55,7	(11,6 + 3,9 + 0,4) 15,9	(15,5 + 3,9 + 0,3) 19,7
dont :	CC	(13,0 + 2,0 + 0,2) 15,2		
	CD	(16,5 + 2,0 + 0,2) 18,7		
	RN	(16,8 + 1,3 + 0,4) 18,5		
	AR	(2,8 + 0,5 + 0,0) 3,3		

Notons que, selon les définitions du groupe Brossier, ces chiffres comportent les coûts relatifs à des trajets urbains, évalués à 104 Milliards de F, comptés sur voirie communale, et dont le coût marginal est supposé être égal à celui de la rase campagne.

#### 4. DÉCOMPOSITION ENTRE TRAJETS INTERURBAINS INFÉRIEURS ET SUPÉRIEURS À 80 KM POUR LES VOYAGEURS

Cette décomposition des trafics, recettes réelles, et produits du coût marginal social ne joue que pour le fer et la route. Elle résulte de prorata effectués à partir des tableaux précédents. Les chiffres sont en Milliards de F.

##### 4.1. Fer

	Trafic interurbain total en voy-km	Trafic à plus de 80 km	Trafic à moins de 80 km
SRV	1,45		1,45
R.E.	33,2	24,4	8,8
TGV	14,9	14,9	0
total	49,55	39,3	10,25

#### 4.2. Route

Type de voies	Traffics				Recettes actuelles sur les trajets de rase campagne						Produit du c.m.s.				
			Rase campagne										dont		
	Urbain	Rase campagne	Trajet à plus de 80 km	Trajet à moins de 80 km	Trajet à plus de 80 km			Trajet à moins de 80 km			Produit total	Urbain	Rase campagne	Trajet à plus de 80 km	Trajet à moins de 80 km
					Hors péage (19)	Péage	Total	Hors péage (19)	Péage	Total					
CC + CD		130,9		130,9				36,6		36,6	33,9	15,1	18,8		18,8
RN		75,3									18,5		18,5		
dont :															
RO		(57,8)	28,4	29,4	8,0		8,0	8,2		8,2	(14,1)		(14,1)	7,0	7,1
AR non concédées		(17,5)									(4,4)		(4,4)	3,5	0,9
			38,9	8,8	10,9	9,0	19,9	2,5		3,9					
AR concédées		30,2							1,4		3,3		3,3	2,7	0,6
Total	104,6	236,4	67,3	169,1	18,9	9,0	27,9	47,3	1,4	48,7	55,7	15,1	40,6	13,2	27,4

Trafic en Milliards de véhicules-kilomètres.

<sup>19</sup> Obtenue en multipliant les trafics par le taux de 0,28 F/km pour la partie hors péage.

Trajets à plus de 80 km

Recettes réelles :

sur AR 19,9

sur RN 8,0

Recettes issues du c.m.s. :

sur AR 6,2

sur RN 7,0

D'où le tableau (20) :

<b>Recettes réelles</b>	Réseau lent	Réseau rapide	Total
RO	4,5	3,5	8,0
AR	0	19,9	19,9
total	4,5	23,4	27,9
<b>Recettes du c.m.s.</b>			
RO	3,8	3,2	7,0
AR	0	6,2	6,2
total	3,8	9,4	13,2

---

20 Avec répartition au prorata des trafics.

## FICHE ANNEXE

**Recettes issues de la TIPP résultant des calculs  
du groupe Brossier (en MF)**

	RN	AR concedées	CD	CC	Total
Cars et bus	414	414	246	465	1 539
Poids lourds de plus de 15 ans	291	157	199	32	
Véhicules spéciaux	248	0	94	278	
Engins agricoles	24	0	48	48	3 077
Véhicules militaires	124	0	99	25	
P.L. étrangers	456	952	0	0	
Total	1 557	1 524	687	848	4 616
P.L. T.R.M.	3 644	1 973	2 911	404	8 932
Total véhicules utilitaires lourds et cars et bus	5 201	3 497	3 598	1 252	13 548

## LES COÛTS SOCIAUX D'ENVIRONNEMENT

---

Les transports portent atteinte à l'environnement par de nombreuses voies :

- pollution de l'air ;
- pollution du sol et de l'eau ;
- bruit ;
- effet de coupure ;
- conséquences esthétiques.

On ne traitera pas des conséquences esthétiques, ni de l'effet de coupure. Ces conséquences ont en effet été peu étudiées, les résultats les concernant sont minces, et les évaluations correspondantes sont par essence subjectives, au moins pour les conséquences esthétiques.

La pollution du sol et de l'eau représente un sujet plus tangible, mais les études la concernant sont peu nombreuses ; elles montrent en outre que les conséquences sont faibles. C'est pourquoi on laissera également de côté ce facteur.

On ne retiendra donc que le bruit et la pollution de l'air. Et encore dans ce dernier cas, on ne s'occupera pas de l'effet de serre. En effet il s'agit d'un phénomène mondial : l'augmentation de la teneur d'un gaz à effet de serre nuit non seulement au pays d'origine, mais aussi aux autres pays. Réciproquement les efforts d'un pays pour réduire ses émissions ne bénéficient que pour une faible part à ses citoyens. Les efforts de réduction doivent donc résulter d'une coopération internationale. Les actions isolées d'un pays comme le nôtre seraient trop coûteuses au regard des bénéfices qu'il en retirerait ; il n'y a pas de raison de faire supporter par nos transporteurs des efforts dont nous ne bénéficierons pas. De toute façon la lutte contre l'effet de serre semble bien passer par une taxe sur les combustibles, et pas par une taxe sur les infrastructures. Il ne reste donc de la liste initiale que la pollution locale de l'air et le bruit, qui vont être examinés successivement.

### 1. LA POLLUTION LOCALE DE L'AIR

On recensera ici les études des différents pays, de la comparaison desquelles on tirera un ordre de grandeur pour la France (il n'existe pas d'étude exhaustive pour le cas français) :

1°) L'étude "Planco" effectuée en Allemagne en 1991 fait apparaître pour la pollution de l'air les valeurs suivantes en pfenning par voyageurs-km et par tonne-km :

	Fer	Route Voitures-autocars	Voie d'eau
Voyageurs	0,21	3,62 0,74	
Marchandises	0,33	2,36	0,34

2°) Une étude Suédoise ("Air pollution fees and taxes in Sweden", par L. MANSSON, janvier 1991) fait apparaître les coûts totaux suivants, à l'échelle du pays, pour la pollution de l'air :

	Coût total en millions de couronnes suédoises	Trafic correspondant en millions de voy. ou tonne-km	
		passagers	marchandises
Route	16 300	96 400	25 500
Air	900		
Fer	60	6 120	19 100

Les coûts de pollution de l'air au voyageur ou à la tonne-km représentent, toujours selon cette étude :

- environ 20% du coût marginal d'infrastructure pour les voitures ;
- 2% de ce coût marginal pour le fer ;
- environ 20% (de 15% à 30% selon les appareils) des coûts d'infrastructure pour l'avion

3°) BEFAHY ("l'environnement, les effets globaux et locaux", CEMT, Lisbonne, 1992) indique les émissions spécifiques suivantes par mode pour la Belgique :

	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	SO <sub>2</sub>	Aér.
<b>Voyageurs (en gr/voy-km)</b>						
Chemin de fer classique	0,008	48,7	0,120	0,003	0,209	0,074
TGV	0,005	28,9	0,071	0,002	0,124	0,044
Voiture avec 1,7 passager	1,038	126,4	1,367	0,168	0,084	0,046
Avion	1,266	210,0	0,588	0,198	0,078	0,028

	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	SO <sub>2</sub>	Aér.
<b>Marchandises (en gr/Tonne)</b>						
Camion de CU > 10 T	2,10	—	1,85	0,92	—	0,04
Fer	0,6	—	0,40	0,02	—	0,08
Voie navigable	0,20	—	0,58	0,08	—	0,04

4°) Le rapport O. C. D. E. 1991 "Environnement et Transport" fournit pour les mêmes émissions les chiffres suivants, valables pour la R. F. A. en 1986 :

<b>Voyageurs en gr/voy-km</b>						
Voiture à essence	14,4	180	2,4	2,5	0,03	0,01
Train longue distance	0,01	45	0,15	0,01	0,3	0,07
Avion	2,2	465	1,8	0,4	0,15	0,07
<b>Marchandises en gr/tonne-km</b>						
Camions (zone longue)	0,25	140	3,0	0,32	0,18	0,17
Fer	0,15	48	0,4	0,07	0,18	0,07
Voie navigable	0,018	40	0,5	0,08	0,05	0,03

5°) Dans "Internationales Verkehrswesen" 1990 (Nov.-Déc.) A. Diekmann cite pour l'Allemagne les mêmes chiffres, mais prévoit en outre d'ici l'an 2 000 une diminution se traduisant pratiquement par une division par 3 de 1985 à 2000, cette diminution portant sur les véhicules routiers.

6°) Une étude "Prognos" de 1987 fait apparaître les consommations spécifiques suivantes comparées pour la route et le rail, en gr par unité de trafic.

	CO	NO <sub>x</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>x</sub>	Aér.
<b>Voyageurs</b>				
Route	9,3	1,7	1,1	0,03
Rail	0,06	0,43	0,43	0,08
<b>Marchandises</b>				
Route	3,7	3,3	1,6	0,07
Rail	0,03	0,2	0,01	0,04

7°) Une étude NLR CR 92377L "Passenger transport : energy use and air polluting emissions" fait apparaître des taux d'émission comparés d'un TGV et d'un Boeing 737-300.

	CO	NO <sub>x</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>
Avion	12,5	25,65	0,60	0,41
TGV	1,15	6,70	0,25	3,50

8°) L'UIC ("tarification de l'usage des infrastructures à imputer aux exploitants des transports terrestres" 1987) fait état d'une étude fournissant d'abord des équivalences de toxicité des différentes émissions :

	CO	NO <sub>x</sub>	C <sub>x</sub> H <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	Aér.
Facteurs de toxicité	1	125	100	100	100

et fournissant également des équivalents pondérés des émissions des différents modes en 1982 (en taux d'équivalent CO) en regard desquelles on a fait figurer une estimation des trafics correspondants :

	Emissions	Trafic	Par unité de trafic
Route	250 000	535	478
Rail	8 600	40	215
Aviation	2 000	10	200

Cette même source fournit pour 1982, une évaluation monétaire au voyageur ou à la tonne-km des deux modes :

En ECU par 1 000 unités	Voyageurs	Marchandises
Route	4,0	7,8
Fer	0,9	0,4

9°) L'étude "Le coût social des transports terrestres" (O. C. D. E. 1990) évalue à partir d'une synthèse des études existantes, les coûts sociaux nationaux de la pollution, rapportés au PIB. Ils seraient de 0,4% du PIB pour la pollution routière, et négligeables pour les autres modes.

Quels résultats d'ensemble tirer de ces références ? On peut d'abord synthétiser les tableaux présentés ci-dessous pour en déduire des facteurs de pondération globaux par mode. On prendra pour cela les indices de toxicité tirés de la référence 8.

En rassemblant les autres éléments de comparaison modale, on aboutit au tableau suivant, fournissant pour les études citées les comparaisons à l'unité de trafic par mode

	Réf (1) Unité pfg/km	Réf (2) Unité SEK/km (21)	Réf (3) Unité gr/unité de trafic	Réf (4) Unité gr/U.T.	Réf (6) Unité gr/U.T.	Réf (7) Rapport	Réf (8) Unité ECU/1000 U.T.	Réf (8) Unité ECU/1000 U.T. (20)
<b>Voyageurs</b>								
Routes (automobile)	3,62	0,13	189	564	325		4,0	2,00
Fer	0,21	0,0024	15,4	58	104		0,9	4,78
(TGV)			(9,1)			2,27		2,15
Avion			95	267		1		2,00
<b>Marchandises</b>								
Route	2,36	0,13	323	442	579		7,8	4,78
Fer	0,33	0,0024	52	82	30		0,4	2,15
Voie navigable	0,34		80	78				2,00
<b>Année</b>	1991	1991	1987	1986	1987	1992	1982	1982
<b>Pays</b>	A.	S.	B.	RFA	RFA	NL	RFA	RFA

On constate d'abord une grande dispersion entre les chiffres. On laissera de côté les références de 1982, pour deux raisons : les conditions techniques ont changé depuis 10 ans d'une part, et les études se sont améliorées. On ne regardera que les 5 premières références.

Celles-ci conduisent en moyenne aux résultats suivants valables en ordre de grandeur :

- en matière de voyageurs, et en voyageurs-km, la route est à peu près quatre fois plus polluante que l'avion et 10 fois plus polluante que le fer ;
- en matière de marchandises, et en tonnes-km la route est à peu près 10 fois plus polluante que le fer ;
- un voyageur-km est à peu près aussi polluant qu'une tonne-km.

Ces valeurs devraient, en raison des progrès techniques attendus, être modifiées dans l'avenir, la pollution routière et la pollution aérienne devraient être divisées par deux ou trois d'ici l'an 2000.

Ces résultats permettent de dresser le tableau suivant, donnant l'évaluation des coûts de pollution par mode :

pollution totale : 0,4% du PIB soit  $0,4/100 \times 6,5 \times 10^2$   
soit  $26 \times 10^9$  F.

<sup>21</sup> On a pris 1 voyageur = 1 tonne, et obtenu le même coût pour les voyageurs et marchandises, puisque l'étude initiale donnait un coût total par mode, sans distinguer voyageur et marchandise.

## — Clés de répartition :

	Route		Fer		Avion	Total
	Voy.	March.	Voy.	March.		
Trafic en 10 <sup>9</sup> V.-km ou T.-km	594	142	63	47	11,07	
Trafic pondéré	5940	1420	63	47	27,8	<b>7 525</b>
Part dans la pollution totale	0,788	0,189	0,01	0,005	0,005	<b>100</b>
Montant en MF	0,5	4,9	0,26	0,13	0,13	<b>26</b>

**2. LE BRUIT**

Le bruit est une nuisance beaucoup plus faible que la pollution de l'air. Dans l'étude OCDE déjà citée, on évalue son coût à 1/4 du coût de la pollution.

Par ailleurs les nuisances dues au bruit sont essentiellement locales ; pourtant l'insuffisance des statistiques fait qu'il est difficile dans le bruit des transports, notamment ferrés et routiers, de séparer les gênes dues aux bruits de la circulation urbaine et suburbaine de celles dues aux bruits des trafics interurbains.

Sous ces réserves, les études disponibles relatives au bruit font apparaître des résultats disparates :

1°) Dans l'étude "Le coût des transports terrestres", on conclut que le bruit routier représente 0,1% du PIB et le bruit ferroviaire 0,01%, soit dix fois moins.

2°) L'étude UIC déjà citée fournit une évaluation du coût par 1 000 unités de trafic de la lutte contre le bruit de :

- 0,7 ECU en Suisse pour le bruit ferroviaire ;
- 1,3 ECU en France pour le bruit routier.

3°) L'étude Planco également déjà citée fournit les valeurs suivantes en Pfg par unité de trafic :

	Fer	Route
Voyageurs	1,01	0,06
Marchandises	0,68	0,35

4°) L'étude "environnement et transports" fait état d'un sondage effectué en 1989 en RFA dans lequel les proportions de personnes fortement gênées par le bruit du chemin de fer sont de 20% contre 30% par l'avion et 50% par le bruit routier.

5°) En France, une enquête effectuée en 1977, sur un échantillon représentatif ("le bruit des trains" IRT 1984) fait apparaître un pourcentage d'individus gênés par le train de 6%, contre 8% pour l'avion, et 83% pour la route. Ces pourcentages étaient à peu près les mêmes en zone urbaine et en zone rurale.

6°) Dans "Transport policy and the environment" (1991) l'OCDE fait état d'un nombre de ménages (en millions) touchés par un bruit constant en RFA de :

- 7 132 pour la route ;
- 1 024 pour le fer ;
- 990 pour l'air.

Le même document fait état d'un nombre de maisons supportant un bruit de plus de 65 décibels de :

- 227 295 pour la route ;
- 26 865 pour le fer.

Il est difficile de tirer des conclusions sûres de cet ensemble disparate de renseignements.

Il semble toutefois apparaître que globalement, sur l'ensemble d'un territoire :

- le bruit ferroviaire est aussi gênant que le bruit aérien ;
- le bruit routier est en gros 10 fois plus gênant que l'un ou l'autre des autres modes
  - pour le fer 1 voy-km = 1 T-km ;
  - pour la route 5 voy-km = 1 T-km ;
  - le coût total du bruit est de 0,1% du PIB soit  $6,2 \times 10^9$  F.

Ces résultats permettent de dresser le tableau suivant :

	Route		Fer		Avion	Total
	Voy.	March.	Voy.	March.		
Trafic en 10 <sup>9</sup> V.-km ou T.-km	594	142	63	47	"	
Trafic pondéré	594	710	63	47	"	
Total		1 304		110		
Part dans le bruit	0,45	0,54	0,57	0,43	1,00	
Total proportion du mode		10		1	1	12 6,5
Montant en MMF - du bruit total - décomposé entre voyageurs et marchandises		5,4		0,55	0,55	6,5
	2,5	2,9	0,31	0,24	0,55	

### 3. RÉPARTITION DES COÛTS DE BRUIT ET DE POLLUTION ENTRE LES TRAFICS URBAINS ET LES TRAFICS INTERURBAINS

Les coûts qui viennent d'être déterminés ne s'appliquent pas tous à la circulation interurbaine, car ce sont essentiellement les populations urbaines qui les supportent, donc la circulation urbaine qui les produit.

Comment apprécier le partage entre les deux ?

Il faut tenir compte des coûts occasionnés par la circulation interurbaine aux populations de rase campagne, et de la part des coûts urbains occasionnée par les parties urbaines des trajets interurbains : le calcul est différent pour chaque mode.

En matière routière, l'INSEE évalue à 2 103, sur un parc total de 20 700, les résidences principales situées dans des communes rurales hors ZPIU soit 10% des logements totaux. On peut donc évaluer globalement le coût, du fait des trajets interurbains dans leur partie rase campagne à 10% du coût total.

Il faut y ajouter le coût des parties urbaines des trajets interurbains ; le linéaire des routes nationales en agglomération est de 8%, on peut donc supposer que les parties urbaines des trajets interurbains représentent 8% de ces trajets, soit  $18,9 \times 10^9$  Véh-km, soit encore 18% de la circulation urbaine, donc 18% des coûts occasionnés aux populations urbaines, supportant elles mêmes les 90% du coût total.

Le coût imputable aux déplacements interurbains serait ainsi de :

$$10\% + 18\% \times 0,9 = 25\% \text{ des coûts totaux pour la route.}$$

Pour le chemin de fer, on imputera les coûts sociaux :

• des marchandises en totalité au trafic interurbain ;	
• des voyageurs, au prorata des trafics des trains soit :	
- Trafic suburbain	14,15
- R.E.	48,16
- Total	62,31

Soit 22% pour le trafic urbain

78% pour le trafic interurbain

Pour l'avion, la totalité des coûts est à imputer aux déplacements interurbains.

On corrigera cette répartition pour les P.L. en tenant compte de ce que les gros P.L. qui circulent en interurbain sont plus nuisants que les petits P.L. et les V.U.L. qui eux roulent en milieu urbain.

Ces ratios permettent de dresser le tableau final suivant :

Coûts en MMds F	Route		Fer		Avion	Total
	Voy.	March.	Voy.	March.	Voy.	
Bruit	2,5	2,9	0,31	0,24	0,55	6,5
Pollution	20,5	4,9	0,26	0,13	0,26	26
Total	23,0	7,8	0,57	0,37	0,81	32,5
<b>Déplacements urbains</b>						
Part en %	75%	50%	22%	0%	0%	
Montant	17,25	3,9	0,12	0	0	21,27
<b>Déplacements interurbains</b>						
Part en %	25%	50%	78%	100%	100%	
Montant	5,75	3,9	0,44	0,37	0,81	11,27
Total	23,0	7,8	0,57	0,37	0,81	32,5

## COÛTS DE CONGESTION AÉRIENS ET FERRÉS

---

Ces modes de transport collectif présentent des coûts de congestion, mais ceux-ci sont d'une nature différente de ceux que l'on rencontre dans le domaine routier. Dans ce dernier secteur, un usager supplémentaire réduit la vitesse de chacun des autres, et c'est là que réside le coût de congestion.

Dans les modes collectifs au delà d'un certain niveau de trafic des phénomènes de gêne mutuelle apparaissent, mais dans des conditions bien différentes pour le fer et l'avion. Les avions peuvent se gêner soit en vol, soit à l'atterrissage ou au décollage. La gêne à l'atterrissage-décollage est une gêne d'exclusion : il peut atterrir — décoller — 1 avion toutes les 1,5 minute par exemple. Si pendant la période de temps considéré, il y a des créneaux de temps libres et si un avion se présente pendant un de ces créneaux libres, il ne procure aucune gêne ; s'il se présente pendant une période où tous les créneaux sont occupés, son atterrissage — décollage — obligera à décaler chacun des avions qui se suivent sans discontinuer durant cette période. l'effet de la congestion est alors de décaler l'heure de départ, non d'augmenter le temps de trajet. (Il pourrait d'ailleurs se produire que le décalage d'horaire fasse perdre de la clientèle à certains vols et conduisent à les supprimer).

La gêne en vol découle des règles de sécurité imposées par le contrôle aérien. Elle peut aussi, en première approximation s'analyser comme un décalage dans les heures de départ (puisque l'on ne fait partir les avions que lorsqu'on est sûr que leur vol se déroulera normalement). Ceci n'est vrai qu'en première approximation car le contrôle est plus difficile, donc plus coûteux et autorisant un moindre débit, lorsque les flux à contrôler se croisent, ce qui est le cas en Europe par rapport aux Etats Unis.

Les gênes précédentes sont des gênes planifiées, prévues, inscrites dans les horaires des compagnies. Il y a aussi des gênes opérationnelles, davantage comparables aux gênes routières, qui se traduisent par des retards lorsque le trafic est trop dense : un incident léger bloquera le système avec une probabilité et une intensité d'autant plus fortes que sa charge est élevée.

La gêne du trafic ferroviaire présente les mêmes aspects, mais avec un degré de complication supplémentaire tenant à ce que les trains n'ont pas tous la même vitesse. Si

les trains roulaient tous selon le même graphique horaire, l'analyse serait exactement la même que pour le transport aérien. Mais les trains se classent en catégories qui roulent à des vitesses différentes et s'arrêtent en des points plus ou moins nombreux. Pour les voyageurs on peut distinguer :

- les TGV ;
- les rapides express ;
- les omnibus, SRV et trains de banlieue.

Quand un train d'un certain type, par exemple un S.R.V., s'introduit dans une grille composée de sillons parallèles à vitesses et arrêts différents, par exemple des rapides-express et que l'on veut à tout prix imposer sa grille horaire, son arrivée oblige à décaler ou retarder certains de ces certains pour laisser le passage au S.R.V. ; elle pourra même souvent conduire à des suppressions, les trains initialement envisagés n'ayant plus, en raison de leur décalage ou retard, la clientèle prévue (par exemple un trop grand décalage d'un train de primeurs annule son intérêt, et fait basculer le trafic sur la route).

On va s'efforcer de préciser et quantifier ces différents points dans la suite de cette note, successivement pour l'avion et le fer.

L'annexe I présente les différents modèles utilisés pour cela.

## **1. CONGESTION AÉRIENNE**

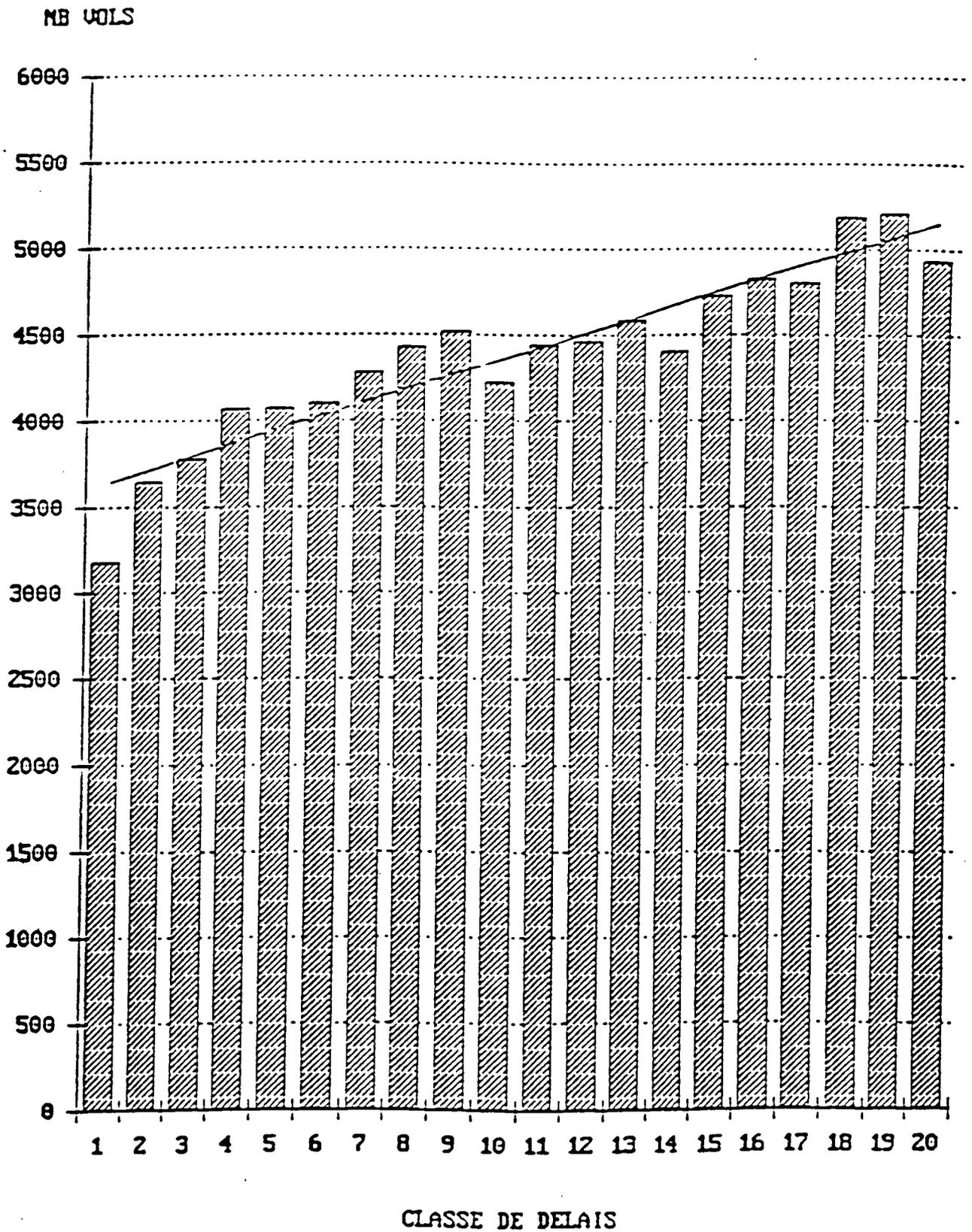
La congestion aérienne s'exerce par deux voies :

- les retards des avions par rapport à l'horaire prévu
- la saturation des créneaux horaires

### **1.1. Les retards d'avions**

L'effet de la congestion aérienne sur les retards d'avions est matérialisé par le graphique joint extrait de la brochure "SCTA bilan 1991" (p. 63). Ce graphique fait apparaître une corrélation entre les classes de délais, au nombre de 20 (et correspondant chacun à 18 à 20 jours de trafic par classe). Le retard est nul lorsque le trafic est de 3 500 vols et maximum pour un trafic de 5 000 vols. La quantification de ces retards n'est pas fournie.

# TRAFIC PAR CLASSE DE DELAIS



On peut calculer le délai moyen au départ des aéroports en France. Les délais par classe de retard sont fournis par le tableau joint issu de la D.G.A.C. Il en résulte un retard total d'environ 51 000 heures par an, qui, rapporté au nombre total de départs annuels, qu'on peut évaluer à 700 000, aboutit à un retard moyen par vol de 0,07 heure.

Ce chiffre est à comparer aux statistiques d'Air Inter qui établissent pour 1990 un délai moyen de 2,9 minutes soit 0,048 heure, pour cause ATC ; on supposera, hypothèse corroborée par le graphique précédent, que le retard varie proportionnellement au trafic ; on tiendra également compte de ce que les retards ATC ne sont pas tous liés à la congestion. Un sondage a fait apparaître que seuls les 2/3 d'entre eux le sont. On retiendra donc un retard moyen de  $0,048 \times \frac{2}{3} = 0,032$  heure.

En se référant à l'annexe I § 3, on peut utiliser la formulation mathématique suivante :

$$R = a + bq$$

$$R = 0 \quad \text{si } q \leq 3\,500 \text{ vols/jour}$$

$$R = 0,064 \quad \text{si } q = 5\,000 \text{ vols/jour}$$

on en déduit :

$$a = -0,64 \times \frac{3\,500}{1\,500}$$

$$b = 0,64 \times \frac{1}{1\,500}$$

le coût de congestion est alors :

$$0 \text{ si } q < 3\,500 \text{ vols}$$

$$bq = 0,147 \text{ si } q = 3\,500 \text{ vols}$$

$$0,21 \text{ si } q = 5\,000 \text{ vols}$$

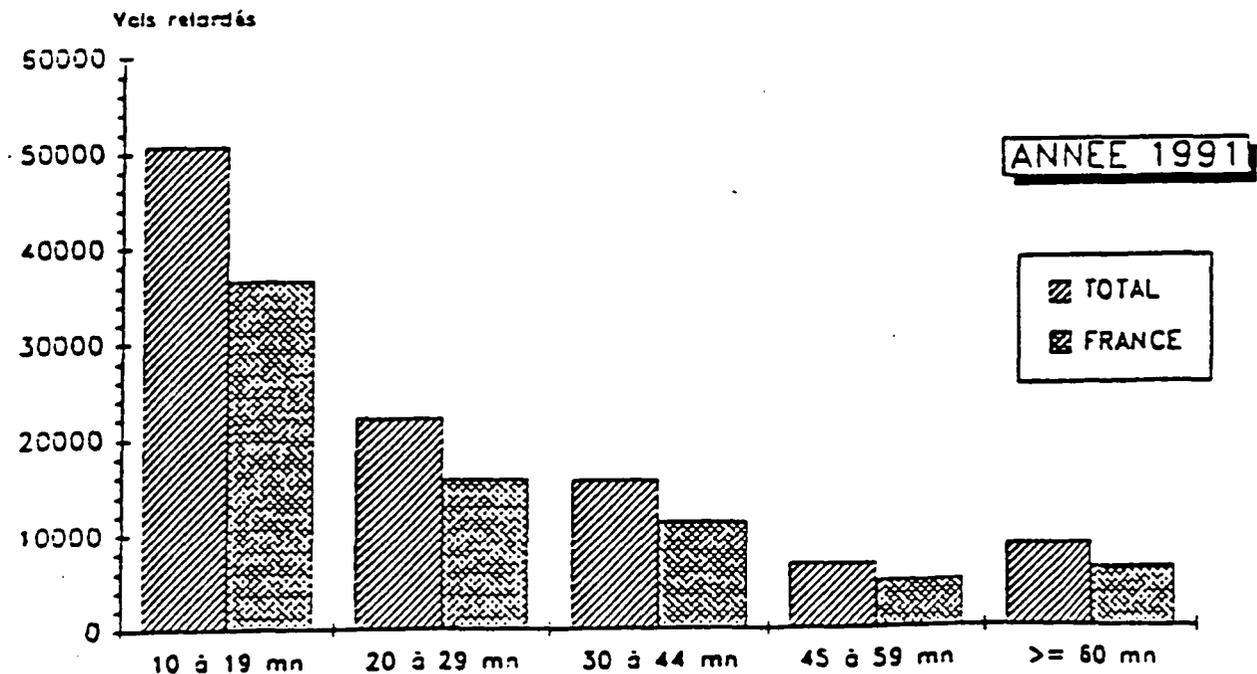
En fait la courbe donnant le retard en fonction du trafic n'est probablement pas une droite ; il est plus vraisemblable qu'elle est au départ plus progressivement croissante. On fera l'hypothèse prudente d'un coût de congestion variant de 0 pour  $q = 3\,500$  à 0,21h pour  $q = 5\,000$  avec une valeur moyenne de 0,10 h. par vol, soit à peu près 3 fois le retard moyen.

Quel est le coût de la perte d'une heure de vol ? Il faut additionner la perte de temps pour les usagers et la perte financière pour les compagnies.

## Répartition des retards sup.à 10 mn.au départ des aéroports de France

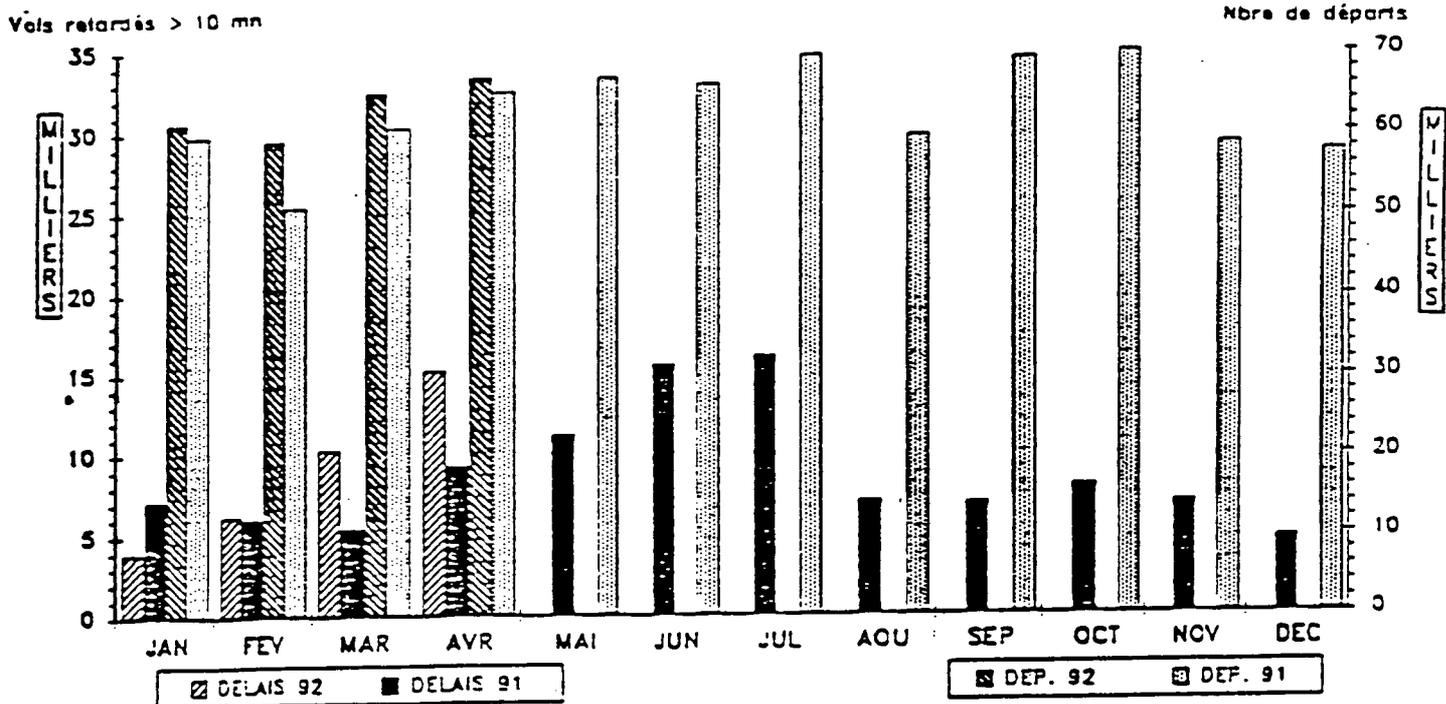
	10 à 19mn	20 à 29mn	30 à 44mn	45 à 59mn	>=60 mn	TOTAL 1991
JANVIER	3.560	1.648	1.078	472	384	7.142
FEVRIER	2.551	1.332	983	430	693	5.989
MARS	2.899	1.156	778	307	304	5.444
AVRIL	4.490	2.019	1.525	605	636	9.275
MAI	5.259	2.467	1.771	807	859	11.163
JUIN	5.979	3.022	2.570	1.412	2.570	15.553
JUILLET	7.249	3.563	2.747	1.197	1.337	16.093
AOUT	4.069	1.477	885	318	321	7.070
SEPTEMBRE	4.022	1.351	780	317	447	6.917
OCTOBRE	4.425	1.650	1.055	417	445	7.992
NOVEMBRE	3.677	1.445	854	401	597	6.974
DECEMBRE	2.641	1.003	642	209	247	4.742
<b>TOTAL 91</b>	<b>50.821</b>	<b>22.133</b>	<b>15.668</b>	<b>6.892</b>	<b>8.840</b>	<b>104.354</b>

## Répartition des vols retardés au départ des aéroports français

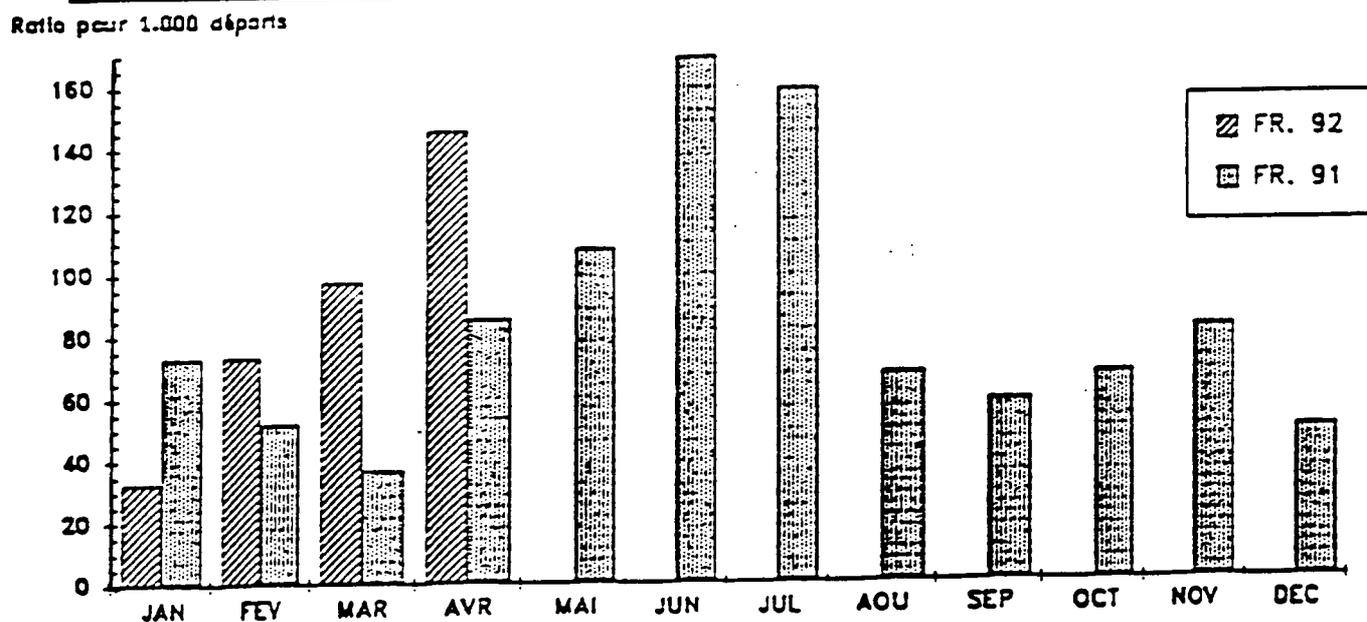


## EVOLUTION DES DELAIS ET DES RATIOS POUR 1.000 DEPARTS (1991-1992)

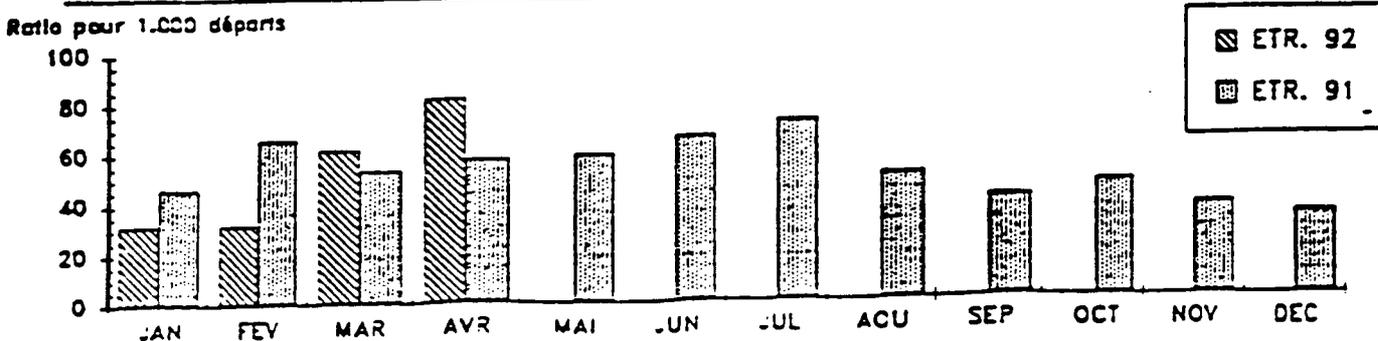
### Délais et départs enregistrés sur les aéroports français



### Ratio pour 1.000 départs des délais d'origine française



### Ratio pour 1.000 départs des délais d'origine étrangère





Au total la recette issue de ce coût marginal de congestion serait de :

$$0,7 + 0,13 = 0,83 \text{ MdF.}$$

## 1.2. La saturation des créneaux horaires

Elle existe à Roissy et Orly et résulte des capacités des pistes et des espaces d'approche.

Les capacités sont données dans le tableau suivant :

	Orly	Roissy
Nombre de mouvements théoriques par heure :		
Arrivées	34	40
Départs	36	40
Total	70	76
Capacité théorique par heure pour un jour donné sur les 30 semaines d'été	2 100	2 280
Capacité réelle, égale à 80% de la capacité théorique	1 680	1 824

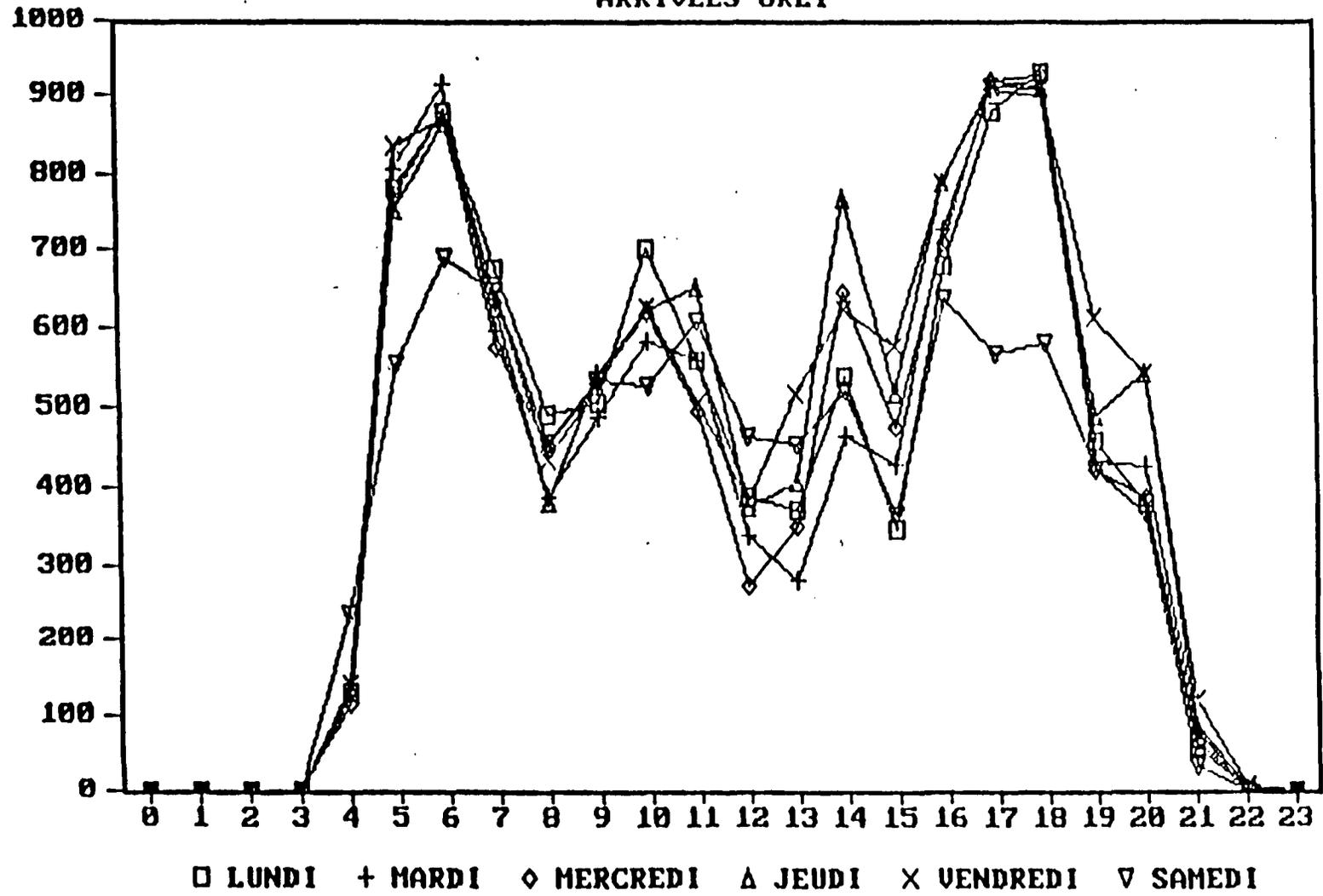
En comparant ces chiffres aux graphiques de répartition des créneaux arrivées et départs à Orly et Roissy (demandes exprimées par les utilisateurs), on arrive à la conclusion que la saturation ne se produit ni le samedi ni le dimanche, et qu'elle se rencontre à Orly comme à Roissy, 2 heures le matin et 2 heures le soir. En prolongeant ces résultats sur l'ensemble de l'année, on fera l'hypothèse que Orly et Roissy sont saturés 2 fois 2 heures par jour durant les jours ouvrables. Si l'on fait l'hypothèse qu'il s'agit de périodes où les souhaits des arrivants ou des partants sont concentrés à un instant précis, qu'on supposera correspondre au milieu des périodes de 2 heures, c'est alors la 2<sup>ème</sup> formule du § 1 de l'annexe qui s'applique :

le coût de congestion est  $cN_i \delta\theta_i$ ,  $c$  étant le coût horaire de décalage d'un vol,  $N_i$  le nombre de vols décalés et  $\delta\theta_i$ , le temps de décalage.

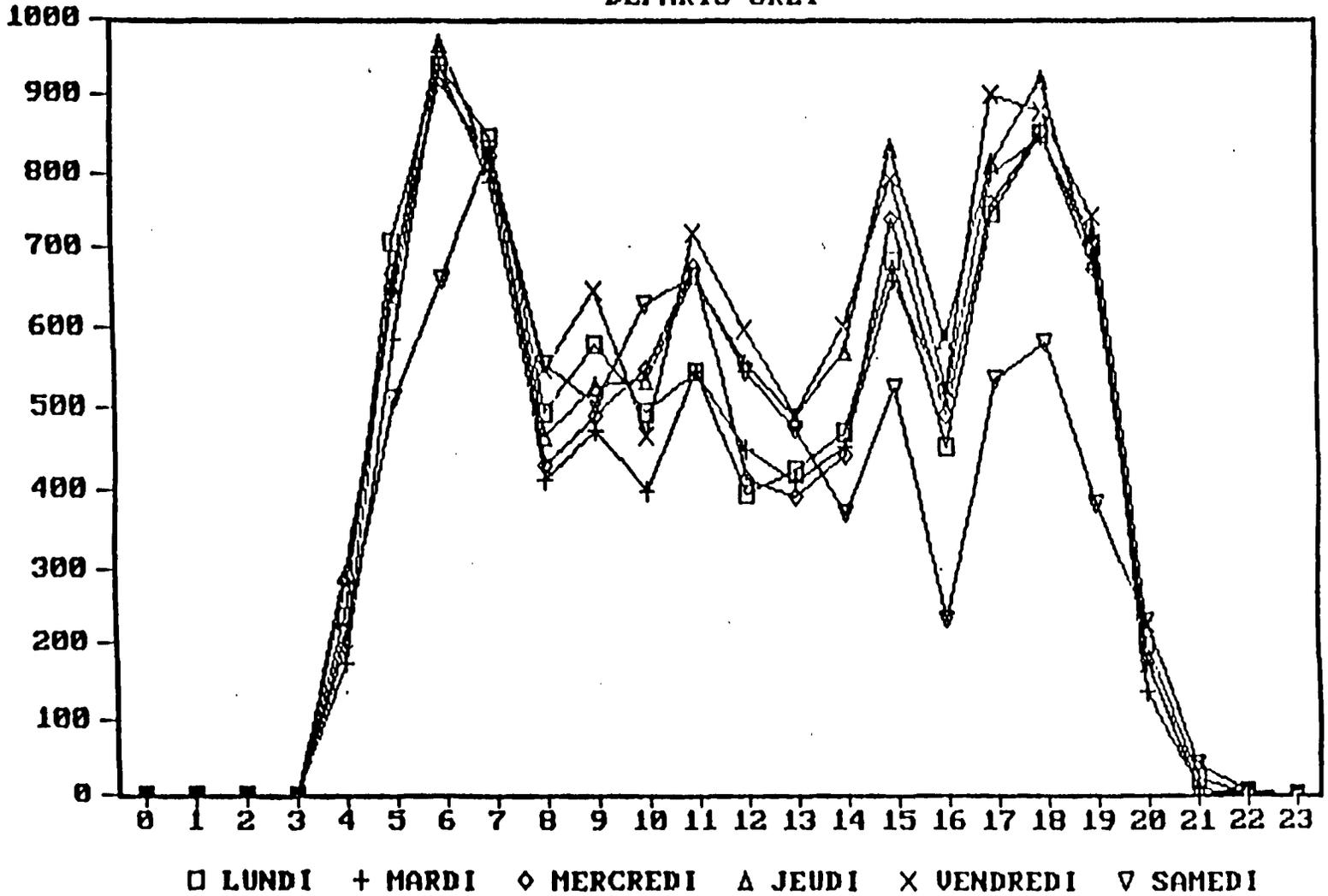
Quel est ce coût de congestion ?

- pour un vol à l'extrémité de la plage il est nul ;
- pour un vol au centre de la plage, il est maximum et égal à :  $c$  ;
- pour un vol situé à la distance temporelle  $x$ , il est égal à  $Cx$ .

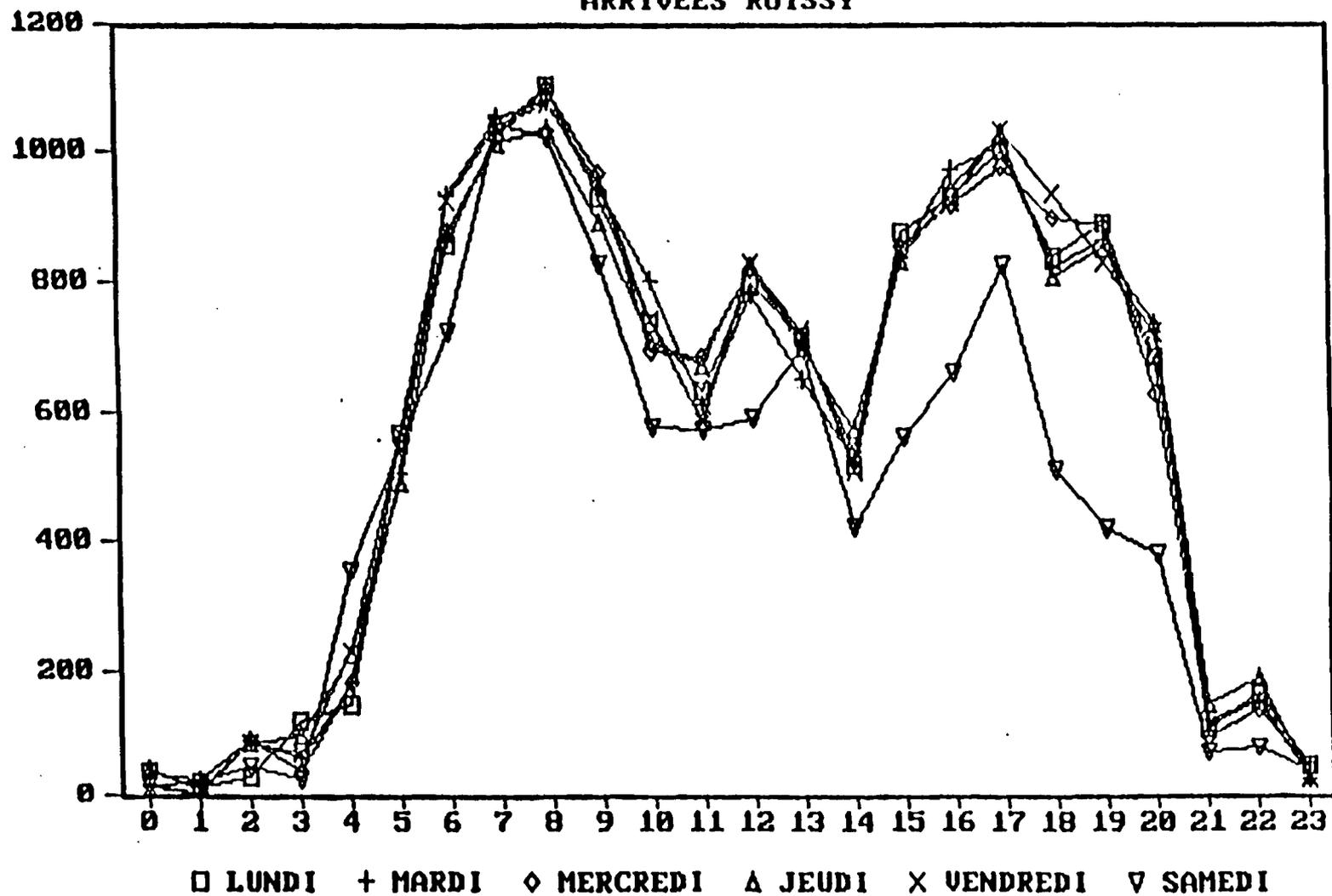
REPARTITION DES CRENEAUX  
ARRIVEES ORLY



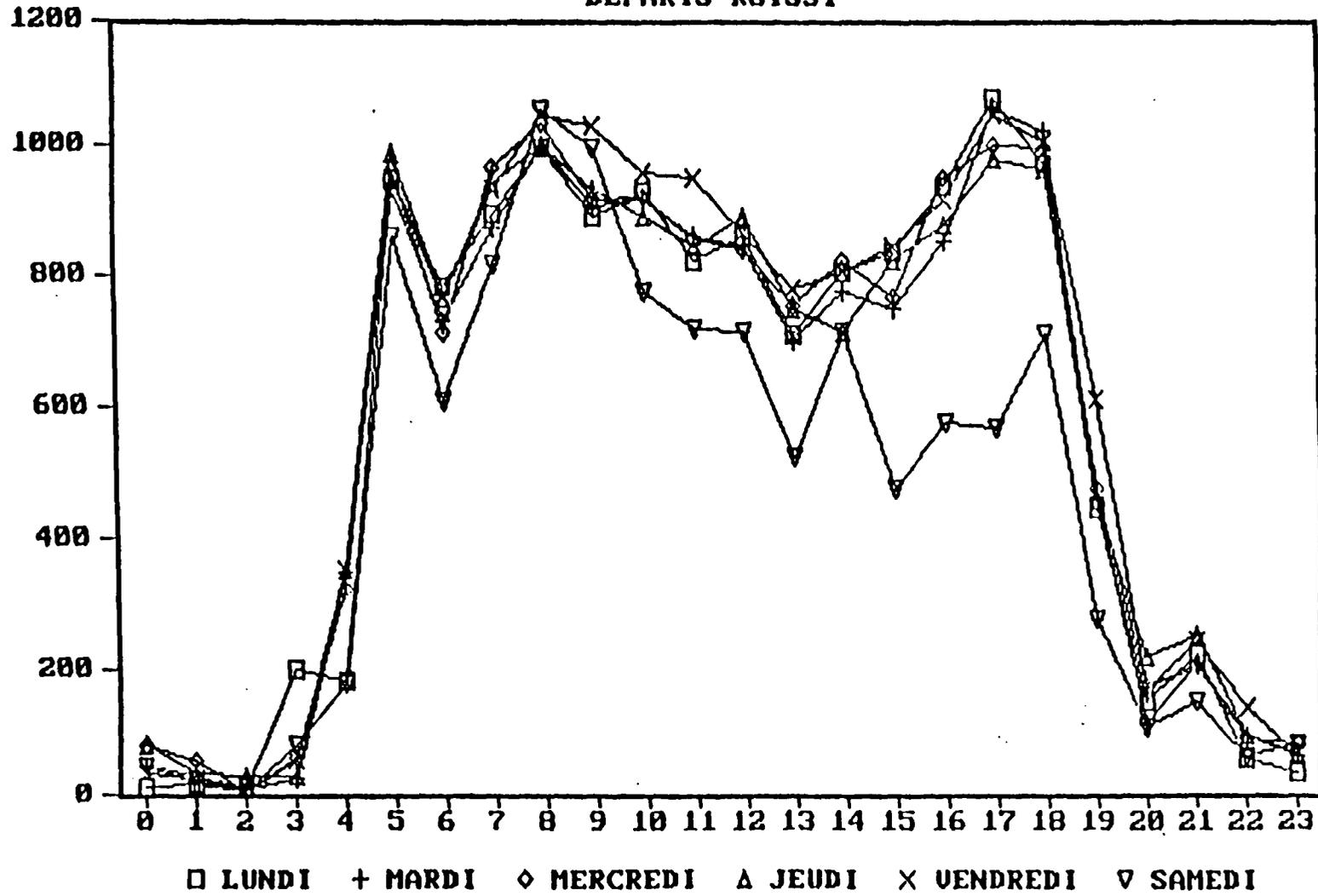
REPARTITION DES CRENEAUX  
DEPARTS ORLY



REPARTITION DES CRENEAUX  
ARRIVEES ROISSY



REPARTITION DES CRENEAUX  
DEPARTS ROISSY



En moyenne, il sera de :  $c/2$  par vol des plages congestionnées. Or il y a par jour ouvrable :

- 4 heures congestionnées à Orly, supportant :  $70 \times 4 \times 0,8 = 224$  vols ;
- 4 heures congestionnées à Roissy, supportant :  $76 \times 4 \times 0,8 = 244$  vols.

Soit par jour ouvrable  $c/2$  ( $224 + 244$ ) = 234 C. Que vaut C ? C'est le coût de décalage de 1 heure de vol arrivant à - ou partant de - ADP.

ADP a reçu en 1990 46,9 millions de passagers dont  $29/2 = 14,5$  millions étrangers, soit 32,4 millions de passagers français, pour 424 000 vols commerciaux soit 76 passagers par vol. Pour chacun d'eux, le coût de l'heure de décalage est  $3/4 \times 201 = 150$  F (cf. note "trafic et élasticités") C est donc :  $76 \times 150 = 11\ 100$  F par J.O. La recette qui serait issue d'une taxe analogue serait :  $11\ 100 \times 234 = 2,6$  MF et dans l'année  $2,6 \times 52 \times 5 = 670$  MF. Mais l'hypothèse faite au départ est très extrême ; en fait, tous les voyageurs ne désirent pas arriver au milieu de la plage de pointe. Pour tenir compte qualitativement de ce fait, on divisera par deux le chiffre précédent.

A titre de comparaison, les créneaux horaires de l'aéroport de Londre ont été évalués à 10 Milliards de F. (Study on airport slot allocation" Department of transport. SDSCICON, Septembre 1991)

### 1.3. Coût de congestion aérien total

Ce coût s'élève à :

• Retards	0,83 MdF
• Créneaux horaires	0,33 MdF
• Total	1,16 MdF

## 2. COÛTS DE CONGESTION FERROVIAIRES

On peut songer à trois sortes de coûts de congestion en matière ferroviaire :

1°) Les retards par rapport aux horaires prévus en cas de trafic élevé. Les études en cours sur ce sujet sont délicates et n'ont pas permis de dégager des valeurs numériques assez précises pour être intégrées dans le calcul d'un coût de congestion.

2°) Les décalages occasionnés aux autres trains par chacun des trains de la grille. Pour déterminer le coût social correspondant il faudrait, à défaut des études statistiques exposées en Annexe (§ 3), rétablir les grilles horaires en l'absence de chacun des trains qui les composent, et imputer à chaque train la différence des temps de trajet et des heures d'arrivée. Devant l'ampleur d'une telle tâche, on en est réduit à des supputations fondées d'abord sur l'expérience et le sentiment des spécialistes des horaires à la SNCF, selon lesquels cet effet est relativement faible, notamment en comparaison de l'effet suivant, celui de suppression des trains incompatibles.

En fait il ne joue pas sur les trains d'une même catégorie qui sur une ligne donnée, ne se gèrent pas l'une l'autre. Il n'intervient que pour les mélanges de trains de vitesses différentes. Souvent ils doivent conduire à des décalages de trains, ce qui à partir d'une grille optimale n'entraîne pas de coûts sociaux. Ces considérations justifient les affirmations des experts de l'entreprise, mais ce point serait à confirmer par une étude ad hoc.

3°) La suppression des trains incompatibles. C'est selon les experts de l'entreprise le poste le plus important. En adoptant pour son évaluation les principes développés dans l'Annexe (§ 3) une procédure permettant l'appréciation du montant total correspondant serait fondée sur la remarque que les trains d'une même nature (sillons horaires parallèles) ne s'excluent pas, et que les incompatibilités proviennent du mélange de trains différents. Il conviendrait alors de classer les trains en familles homogènes, et d'examiner comment, en l'absence de contrainte résultant des autres familles, chacune aurait pu se développer.

L'ensemble de ces considérations justifie la poursuite des études concernant la congestion ferroviaire, mais ne permet pas d'en prendre une vue quantifiée.

Pour avoir une évaluation approximative de cette congestion, on se fondera sur les dépenses d'infrastructure faites pour la supprimer, c'est-à-dire sur les investissements de capacité. Ceux-ci sont d'un montant annuel stable d'environ 550 MF, dont 90 en rase campagne et 460 en milieu urbain.

Sur les 460 MF en milieu urbain, les 3/4 concernent les trains de banlieue et SRV (soit 345 MF) et le 1/4 restant concerne les trains interurbains soit 115 MF. Au total, le montant d'investissement annuel à imputer aux trains interurbains est de  $115 + 90 = 205$  MF.

Sur la base d'une durée de vie de ces investissements de 32 ans (moyenne entre les durées de vie des différentes portions), la charge annuelle de capital qui en résulte est, sur la base d'un taux d'actualisation de 8% par an, de :  $205 \times \frac{32}{2} \left( 0,08 + \frac{2}{32} \right) = 460$  MF.

Cette charge de capital est à répartir entre les différentes catégories de trains ; la répartition qui suit est faite en tenant compte des trafics et de la répartition horaire de chaque catégorie :

Fret	100
Rapide express à moins de 80 km	120
Rapide-express à plus de 80 km service lent	120
Rapide-express à plus de 80 km service rapide	120
TOTAL	460 MF

## LES INCERTITUDES DU COÛT MOYEN

---

On avance souvent, non sans raison, que le coût marginal présente des aléas de calcul, manque de précision et de fiabilité. Il faut bien voir que les tarifications à l'équilibre budgétaire ne sont pas non plus exemptes d'aléas, et ces aléas découlent de la rémunération du capital.

Dans une activité courante, cette rémunération est encadrée par un marché. Quand un restaurateur ne fait pas ses affaires, il peut revendre son local ou le louer et en tirer un revenu ; il n'acceptera pas que son activité de restauration lui rapporte un profit insuffisant et en particulier réduise la rémunération de son capital : si c'est le cas, il fera mieux d'abandonner cette activité et de vivre sur son capital.

En matière d'infrastructure il n'en est pas ainsi, ou plus exactement il n'en serait ainsi que dans un univers de prévision parfaite. Alors chaque activité ne serait entreprise que si elle rapportait un profit normal, après rémunération du capital engagé selon les normes du marché. Comme la prévision est parfaite, elle se réalise, le capital obtient sa rémunération, et on aboutit à la marge aux égalités : somme actualisée des bénéfices attendus = coût de la construction <sup>(21)</sup> et rendement du capital = intérêt du marché.

Mais l'incertitude, qui est forte en matière d'infrastructure, vient bouleverser ce schéma d'autant qu'il n'y a pas de marché d'occasion. L'autoroute A4, qui représentait avant sa mise en service un capital de l'ordre de 10 000 MF (en francs actuels), égal à son coût de construction, n'en valait plus que peut-être 2 500 MF quelques mois après, lorsqu'on s'est aperçu que les prévisions de trafic et de recettes ne se réalisaient pas. On ne pouvait pas la revendre pour en faire un usage plus rentable, comme ç'aurait été le cas s'il s'était agi de camions ou de voitures. Et pourtant il était impensable - et non rentable - de fermer l'autoroute.

La rémunération du capital a donc fluctué en quelques mois de 1000 MF à 250 MF (rémunération du capital économique ; la dette et ses intérêts ont été payés, mais par d'autres, les repreneurs). Ce cas n'est pas isolé, des réseaux entiers voient leur rentabilité se modifier. Le réseau Freycinet qui était (peut-être) rentable au début du siècle, ne l'est

---

<sup>21</sup> S'il y avait un marché de revente (comme pour les véhicules), ces deux termes seraient aussi égaux à la valeur du marché.

plus maintenant. Le phénomène prend un tour accru en matière d'infrastructures de transport en raison de leur longue durée de vie, au cours de laquelle de nombreuses péripéties se produisent, et au cours de laquelle l'écart entre capital économique et capital comptable est accentué par le phénomène de l'inflation.

On peut prendre une vue de la distorsion entre les modes que ces phénomènes entraînent en comparant pour les principaux opérateurs, le capital technique résultant d'une évaluation technique des installations et l'actif comptable, deux repères qui peuvent jalonner les évaluations du capital économique, dont on ne voit pas quelle autre définition lui donner que de le considérer comme la somme des bénéfices actualisés futurs, et dont la valeur fluctuera donc amplement.

En Millions de F	SNCF infrastructure	ADP	Aéroports de province	Navigation aérienne
<b>Actif immobilisé comptable</b>				
Brut	150 environ	7,6	5,0	3,0
Net	70 environ	20	20	
<b>Valeur à neuf de l'actif</b>	965	20	20	5
<b>Valeur "Technique" <sup>(23)</sup> de l'actif</b>	450	15	15	5
<b>Charges financières comptables</b>	2,8	0,6	0,2	0,4
<b>Charges économiques sur la valeur "technique" de l'actif (comptées à 10%)</b>	45	1,5	1,5	0,5

<sup>23</sup> Estimée sur la base d'une dépréciation linéaire du capital.

## LES DÉPENSES DE SÉCURITÉ-SÛRETÉ POUR LE FER ET L'AÉRIEN

---

Certaines dépenses sont prises en charge par les exploitants eux-mêmes, les autres sont financées par les Ministères de la Défense (gendarmes), ou de l'Intérieur (Police, C.R.S.).

En examinant successivement chacun des deux modes, on rappellera brièvement les dépenses des exploitants, mais on insistera davantage sur celles financées par ailleurs, qu'il faut inclure dans les dépenses de transport, car elles sont liées à son écoulement et varient avec le niveau de trafic.

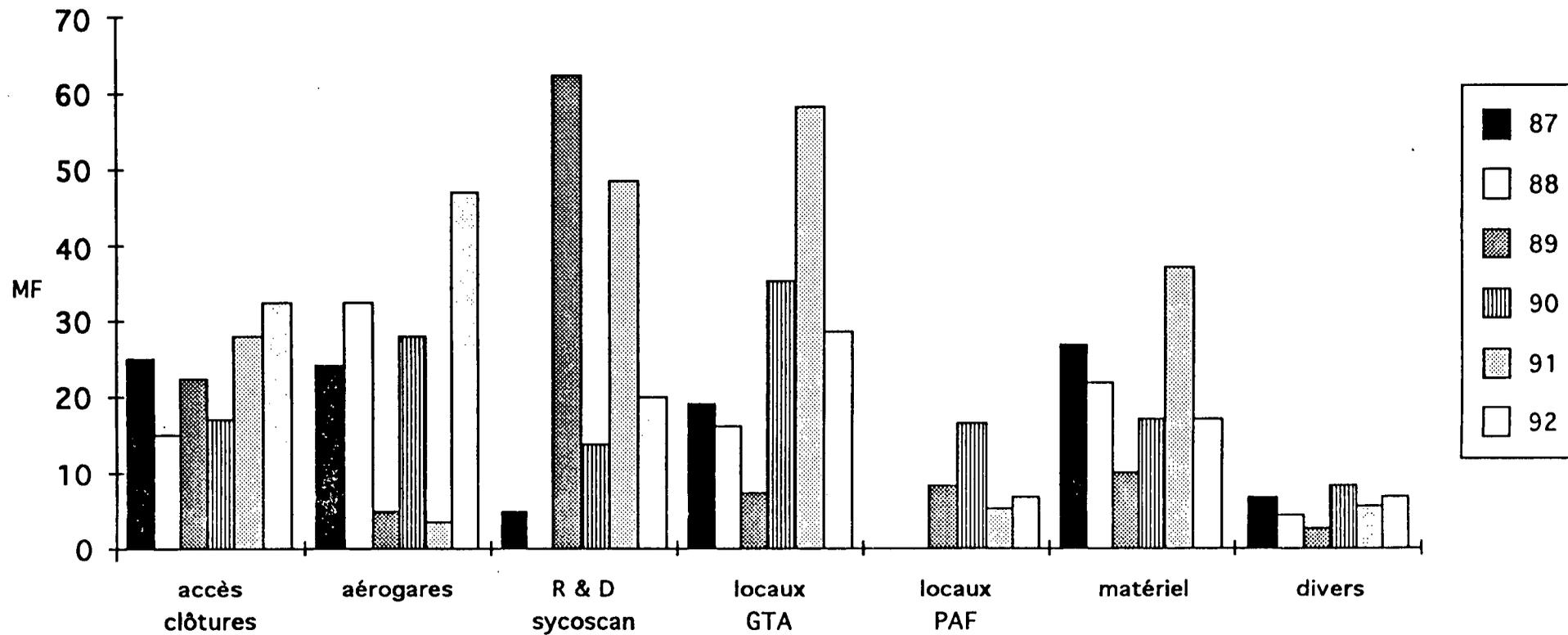
### 1. TRANSPORT AÉRIEN

Les dépenses actuellement supportées par la D.G.A.C., et couvertes par les usagers au moyen de la taxe de sûreté, sont définies en montant total et en utilisation par les tableaux ci-joints.

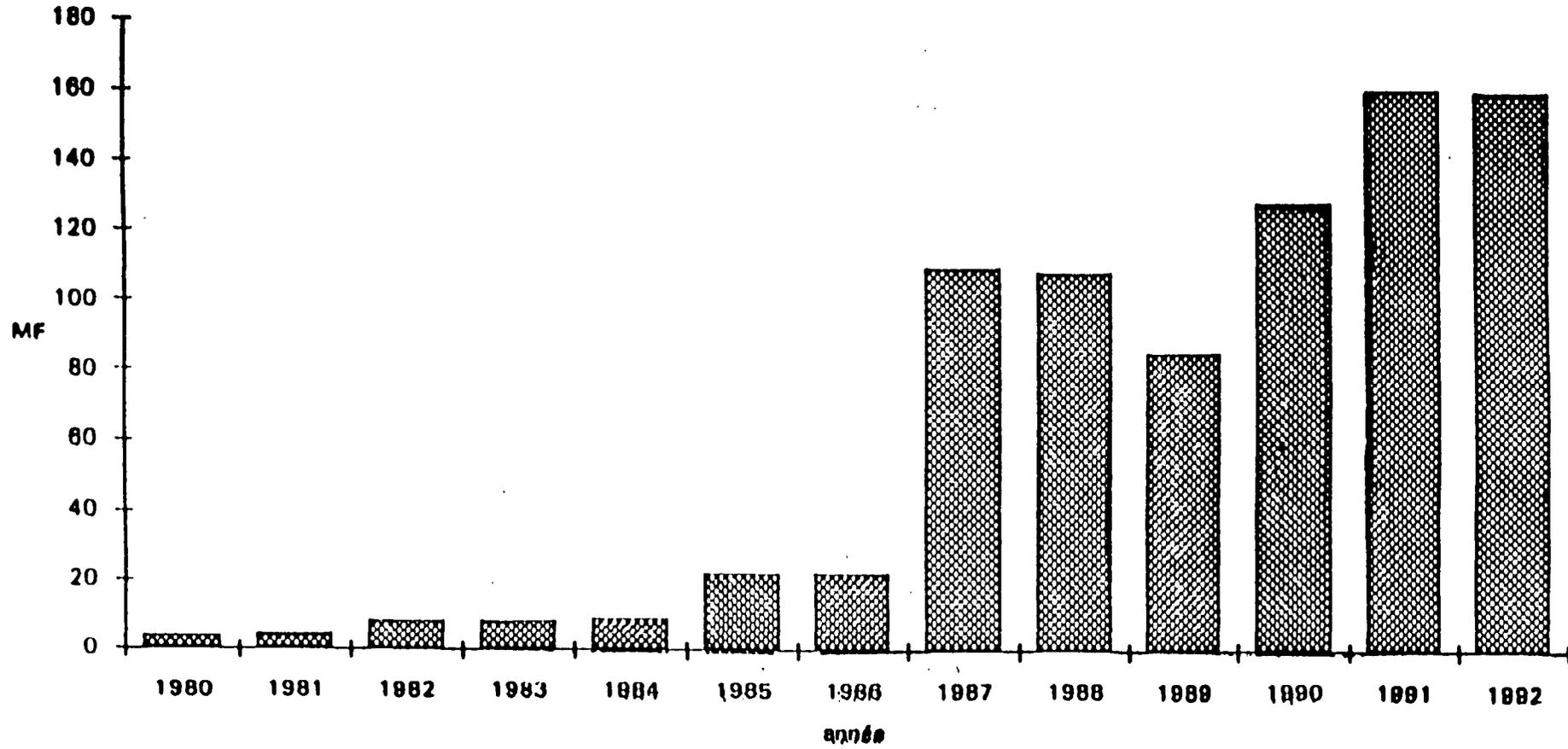
Par ailleurs les Ministères de l'Intérieur et de la Défense utilisent dans et au voisinage immédiat des aéroports des effectifs divers :

- La Gendarmerie du Transport Aérien (GTA) dispose de 700 agents titulaires et de 400 auxiliaires. La PAF dispose de 2 400 agents et de 400 auxiliaires sur les aéroports.
- On estime que seulement 40% de l'activité des agents de la PAF est consacrée à la sûreté, proportion qui s'élève à 80% pour les auxiliaires PAF.
- Le coût unitaire moyen d'un titulaire PAF ou GTA est de 260 KF. Celui d'un auxiliaire est 62 KF. Total : 477 MF.
- En réalité, la PAF se désengage, notamment sur les aéroports parisiens, des fonctions de sûreté pour se concentrer sur le contrôle de l'immigration.  
Ce retrait équivaut à 1 400 postes (1 000 titulaires - 400 auxiliaires) soit 124 MF.
- La GTA est fortement sollicitée lors des voyages officiels, essentiellement à Paris : 120 en moyenne annuelle, utilisant 10 à 30 GTA chacun. On doit donc défalquer environ 15 postes de titulaires GTA, soit 4 MF environ.

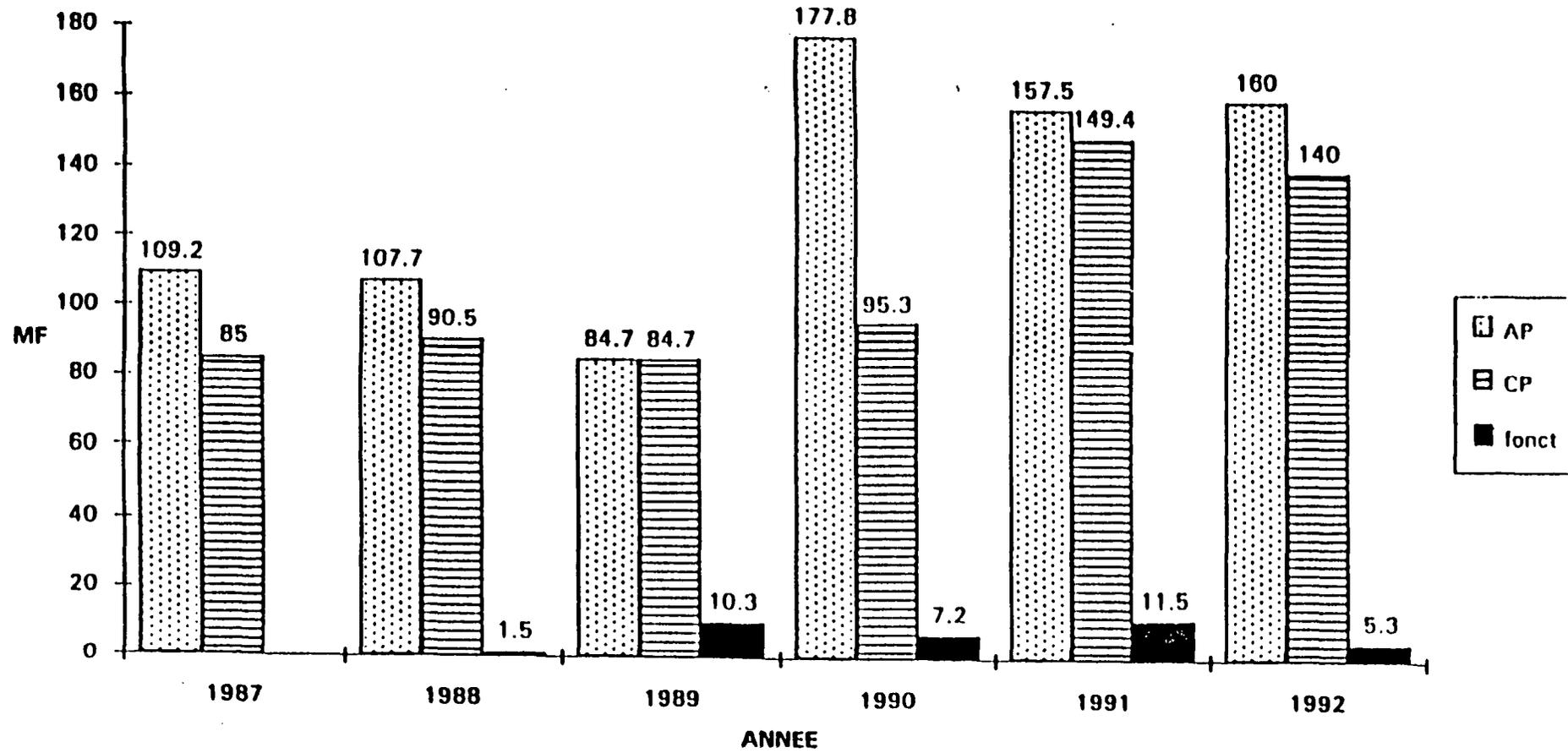
## REPARTITION DU BUDGET SURETE PAR NATURE D'OPERATION



### BUDGET SURETE 1980 - 1992



### SURETE 1987 - 1992



- Les actions de sûreté visent principalement le trafic international. En rapportant ces actions au nombre de passagers français effectuant un trajet international en proportion du nombre de passagers internationaux, on peut retenir en première approximation un facteur 1/2.

Au total, le coût externe de sûreté est de  $(477 - 124 - 4) \times 0,5$ , soit 175 MF.

## **2. CHEMIN DE FER**

La SNCF prend part directement aux missions de sécurité par :

- un service de surveillance général de 1 100 agents ;
- un service de sûreté en Région Ile-de-France de 356 agents ;
- un service spécial de sûreté grandes lignes ;
- et par un équipement et des locaux pour le personnel de sûreté en provenance des Ministères de l'Intérieur et de la Défense.

Ceux-ci comportent une brigade de sécurité de 330 agents, et un effectif mal connu de la PAF. On retiendra comme financés de l'extérieur et non payés par les usagers un effectif de 400 agents soit, à 300 000 F/an, 120 Millions de F.

## LES PRINCIPES DE TARIFICATION ENVISAGEABLES

---

Le principe de tarification le plus élémentaire est l'application du coût marginal ; c'est alors que les utilisateurs du service en cause sont orientés dans leurs choix de la façon la plus efficace pour l'ensemble de la collectivité.

Ce principe doit toutefois être complété dans son application aux transports en raison de l'existence dans ce secteur de nombreux effets externes : effets d'encombrement résultant de la gêne matérielle et des pertes de temps que les utilisateurs s'occasionnent les uns aux autres, et effets d'environnement, résultant notamment du bruit et de la pollution, occasionnés par le transport aux riverains. Il faut intégrer ces éléments dans la tarification pour que l'usager des transports supporte les conséquences des inconvénients qu'il cause à autrui et adapte sa conduite en conséquence, pour atteindre l'efficacité collective. On aboutit alors à ce qu'il est convenu d'appeler le coût marginal social.

Un cas extrême de la gêne mutuelle que s'occasionnent les usagers est celui où cette gêne est nulle tant que le flux est inférieur à la capacité de l'infrastructure ; et dès que cette capacité est atteinte les usagers font la queue. Le cas typique est celui d'un pont par exemple, où la perte de temps due au trafic est négligeable tant que le débit est inférieur à la capacité du pont et devient très grande dès que le débit à l'entrée est supérieur à la capacité. Dans ce cas la tarification sera constante et égale au coût marginal d'entretien et de fonctionnement de l'ouvrage dans les périodes où il n'est pas saturé, et supérieur, et égale à la valeur qui égalise la demande à la capacité de l'ouvrage en période de pointe.

Si la taille de l'infrastructure est adaptée aux besoins, on démontre que cette tarification en période de pointe est aussi le coût marginal d'augmentation de la capacité parfois appelé coût de développement. Un inconvénient de cette tarification marginaliste (coût marginal social, ou tarification de pointe éventuellement amendée pour tenir compte de l'imparfaite tarification des modes concurrents) est qu'elle est d'une part très variable dans le temps (selon l'heure de l'année, d'une année sur l'autre), et dans l'espace (d'une localisation à l'autre), et d'autre part qu'elle ne recouvre qu'exceptionnellement (rendements constants, absence d'effets externes) les dépenses d'infrastructures.

Le déficit qui se produit en présence de rendements croissants, situation fréquente dans les monopoles publics, doit être comblé par les subventions publiques ; leur calcul est

délicat, incertain ; il pénalise des finances publiques et lorsque la gestion des infrastructures est assurée par une entreprise ne contribue pas à clarifier sa gestion.

Ceci conduit à porter l'attention sur des systèmes de tarification dont l'objectif est de couvrir la totalité des dépenses. Lorsqu'un seul type de transport est assuré par l'infrastructure, le calcul d'un tel tarif est simple : on divise les dépenses totales par le volume de trafic. Des complications surgissent de l'existence de plusieurs clientèles ; comment alors répartir les dépenses communes ? Les règles comptables usuelles ont toute une part d'arbitraire d'autant plus regrettable que ces dépenses communes sont importantes, ce qui est le cas des infrastructures de transport, où les dépenses directement affectables sont faibles.

Une règle rationnelle, dont on démontre qu'elle permet d'atteindre le maximum d'efficacité économique sous la contrainte d'équilibre budgétaire est la tarification dite de Ramsey-Boiteux, qui consiste à fixer pour chaque clientèle un prix qui est d'autant supérieur au coût marginal que la clientèle correspondante est captive. En termes mathématiques :

$$\frac{P_i - c_i}{P_i} = \frac{k}{e_i}$$

formule où :

- i : est ce segment de clientèle ;
- $p_i$  : les prix de Ramsey-Boiteux ;
- $c_i$  : le coût marginal relatif à la clientèle i ;
- $e_i$  : l'élasticité pour le clientèle i ;
- k : un coefficient fixé de manière à égaliser recettes et dépenses.

Cette règle de tarification au coût marginal doit être modifiée lorsque l'environnement économique de l'infrastructure en cause n'est pas lui-même tarifé au coût marginal ; ainsi lorsqu'une infrastructure concurrente est tarifée à un prix différent de son coût marginal ; des formules permettent de calculer l'écart entre prix et coût marginal, en fonction de l'écart correspondant pour l'infrastructure concurrente et en fonction des élasticités de report du trafic d'une infrastructure à l'autre. C'est ce qu'on peut appeler le "coût marginal social harmonisé".

Lorsque, l'infrastructure n'étant pas saturée et ne devant pas le devenir à un horizon proche, aucune saturation n'est à envisager, seul le coût marginal à court terme existe. Mais si ce coût marginal est très faible, on se trouve dans une situation voisine de celle que l'économie traite sous le nom de "bien public", c'est-à-dire un bien dont l'usage par un consommateur ne coûte rien, et ne restreint pas l'usage par un autre consommateur ; un archétype de bien public est constitué par l'émission radiophonique ou télévisée.

Comment récupérer la dépense de production d'un bien public - dans le cas présent la dépense de construction et d'entretien de l'infrastructure ? Une règle dont on démontre qu'elle aboutit à une situation d'efficacité économique est de faire payer à chaque usager un tarif proportionnel à l'utilité que représente pour lui ce bien public, lié à sa disponibilité à payer. Mais encore faut-il pour appliquer cette règle, arriver à apprécier la disponibilité à payer de chaque usager.

De toute façon, lorsque la gestion de l'infrastructure est assurée par une entreprise indépendante de l'Etat, la tarification au coût marginal ou la tarification de Ramsey-Boiteux reviennent à imposer à l'entreprise des règles de tarifications particulières contraires à son comportement naturel de recherche de profit, à lui attribuer des subventions calculées en fonction des coûts et de la demande, et à passer avec elle des contrats d'engagements réciproques.

Dans les négociations correspondantes l'entreprise possède une bien meilleure information que sa tutelle, et peut donc biaiser les calculs de subvention en sa faveur, ne pas rechercher tous les gains de productivité - pénibles pour elles en termes d'effort et de perturbations sociales - que la tutelle espère.

On peut au moyen de contrats judicieusement élaborés dont les clauses incitent l'entreprise sous tutelle, en poursuivant son propre intérêt, à poursuivre aussi les orientations souhaitées par la tutelle, mais les clauses qu'ils comportent aboutissent à des systèmes de tarification différents de la tarification marginaliste à laquelle on aboutirait en situation de parfaite information réciproque. En général les tarifs sont plus proches du coût moyen.

Enfin rappelons qu'une entreprise privée livrée à ses seules tendances rechercherait à maximiser son profit, ce qui conduirait à des prix égaux aux coûts moyens si elle est en situation de concurrence (le profit sera alors sinon nul, en tout cas très faible) et nettement supérieurs aux coûts moyens si elle est en situation de monopole.

## MODÉLISATION DE LA TARIFICATION AÉRIENNE

On va ici bâtir un modèle représentant la concurrence entre le rail et l'avion, tenant compte des éléments suivants :

- multiplicité et diversité des liaisons convergeant vers une même ville ;
- existence de deux plages horaires, l'une en pointe, l'autre hors pointe ;
- existence d'une congestion aérienne sur la plage horaire en pointe ;
- contrainte d'équilibre budgétaire sur le gestionnaire des infrastructures aériennes (aéroports et navigation aérienne) et sur le gestionnaire des infrastructures ferrées ;
- existence de rendements constants dans les activités d'exploitation tant aériennes que ferrées.

On décrira chaque liaison  $i$  par les caractéristiques suivantes (on omet les indices  $i$  dans cette présentation) :

	Nombre d'usagers	Avion		Coût marginal par passager	Fer		Coût marginal par passager
		Nombre de déplacements par usager	Prix		Nombre de déplacements par passager	Prix	
1 <sup>ère</sup> période	$n$	$a_1$	$pa_1$	$T_1$	$f_1$	$pf_1$	$R_1$
2 <sup>ème</sup> période	$n$	$a_2$	$pa_2$	$T_2$	$f_2$	$pf_2$	$R_2$

Dans le tableau qui précède, les coûts marginaux incluent à la fois l'exploitation et le coût marginal d'usage des infrastructures.

On suppose en outre que :

- chaque avion de la ligne a une capacité proportionnelle au nombre  $n$  d'usagers de la liaison ;
- les fonctions d'utilité des individus sont toutes identiques et égales à :

$$U = V(a_1 a_2 f_1 f_2 x) + C$$

$C$  étant le bien courant de prix unité, et  $x$  le temps de transport aérien, composé uniquement du coût de congestion causé par l'encombrement des pistes de la ville vers laquelle convergent toutes les liaisons :

$$x = g\left(\sum_i a_i^2\right);$$

- les fonctions de coût du transport aérien (du transport ferroviaire) comportent un terme constant T (R).

Le problème à résoudre est :

$$\text{Max } \sum_i n_i U_i$$

avec les contraintes :

$$CT = T + \sum (na_1 T_1 + na_2 T_2) = \sum (na_1 pa_1 + na_2 pa_2)$$

$$CR = R + \sum (nf_1 R_1 + nf_2 R_2) = \sum (nf_1 pf_1 + nf_2 pf_2)$$

et la limitation des ressources disponibles.

Le comportement de l'utilisateur, qui maximise son utilité sous la contrainte de revenu, aboutit aux fonctions de demande reliant les quantités aux prix, définies par :

$$\frac{\partial V}{\partial a_1} = pa_1 \text{ et les autres relations analogues.}$$

En introduisant les élasticités  $E = \left( \text{par exemple } E_{a_1/f_2} = \frac{\partial a_1}{\partial pf_2} \times \frac{pf_2}{a_1} \right)$

et en posant :

$$\bullet \text{ A} = \begin{cases} A_1 = a_1 pa_1 - a_1 T_1 \\ A_2 = a_2 pa_2 - a_2 T_2 \\ F_1 = f_1 pf_1 - f_1 R_1 \\ F_2 = f_2 pf_2 - f_2 R_2 \end{cases}$$

$$\bullet \frac{\partial U}{\partial x} = X$$

$$\bullet \sum_i n_i = N$$

$$\bullet \text{ et } \frac{N}{n} X' g' a_2 = Ka_2 T_2$$

on trouve :

$$\begin{aligned} & [ E(a_1/a_1) (a_1 \times pa_1 - a_1 T_1) + E(a_2/a_1) (a_2 \times pa_2 - a_2 T_2) ] (1 - \lambda) \\ & + [ E(f_1/a_1) (f_1 \times pf_1 - f_1 R_1) + E(f_2/a_1) (f_2 \times pf_2 - f_2 R_2) ] (1 - \mu) \\ & + \frac{N}{n} Xg'E(a_2/a_1) a_2 - \lambda a_1 pa_1 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & [ E(a_1/a_2) (a_1 \times pa_1 - a_1 T_1) + E(a_2/a_2) (a_2 \times pa_2 - a_2 T_2) ] (1 - \lambda) \\ & + [ E(f_1/a_2) (f_1 \times pf_1 - f_1 R_1) + E(f_2/a_2) (f_2 \times pf_2 - f_2 R_2) ] (1 - \mu) \\ & + \frac{N}{n} Xg'E(a_2/a_2) a_2 - \lambda a_2 pa_2 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [ E (a_1/f_1) (a_1 \times pa_1 - a_1 T_1) + E (a_2/f_1) (a_2 \times pa_2 - a_2 T_2) ] (1 - \lambda) \\
& + [ E (f_1/f_1) (f_1 \times pf_1 - f_1 R_1) + E (f_2/f_1) (f_2 \times pf_2 - f_2 R_2) ] (1 - \mu) \\
& + \frac{N}{n} Xg'E (a_2/f_1) a_2 - \mu f_1 pf_1 = 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [ E (a_1/f_2) (a_1 \times pa_1 - a_1 T_1) + E (a_2/f_2) (a_2 \times pa_2 - a_2 T_2) ] (1 - \lambda) \\
& + [ E (f_1/f_2) (f_1 \times pf_1 - f_1 R_1) + E (f_2/f_2) (f_2 \times pf_2 - f_2 R_2) ] (1 - \mu) \\
& + \frac{N}{n} Xg'E (a_2/f_2) a_2 - \mu f_2 pf_2 = 0
\end{aligned}$$

ou encore :

$$MA = Ka_2 T_2 \begin{array}{l} E (a_2/a_1) \\ E (a_2/a_2) \\ E (a_2/f_1) \\ E (a_2/f_2) \end{array} - \begin{array}{l} \lambda a_1 T_1 \\ \lambda a_2 T_2 \\ \mu f_1 R_1 \\ \mu f_2 R_2 \end{array}$$

A peut être interprété comme le vecteur représentant les différences entre la recette issue de la tarification cherchée et celle issue du coût marginal.

Pour en explorer les caractéristiques, on va opérer par simulation, en fixant des valeurs numériques vraisemblables aux paramètres, et en faisant varier certains d'entre eux autour de leur valeur moyenne.

La matrice M aurait d'après les résultats d'élasticité de Matisse, l'expression suivante :

$$\begin{array}{cccc}
- 1,0 (1 - 2\lambda) & 0,37 (1 - \lambda) & 0,3 (1 - \mu) & 0,09 (1 - \mu) \\
0,37 (1 - \lambda) & - 1,8 (1 - 2\lambda) & 0,03 (1 - \mu) & 0,22 (1 - \mu) \\
0,3 (1 - \lambda) & 0,03 (1 - \lambda) & - 0,8 (1 - 2\mu) & 0 \\
0,09 (1 - \lambda) & 0,22 (1 - \lambda) & 0 & - 1,2 (1 - 2\mu)
\end{array}$$

Compte tenu de l'imprécision des déterminations et pour simplifier les calculs en faisant apparaître les tendances qualitatives, on la remplacera par la matrice plus simple :

$$\begin{array}{cccc}
- (1 - 2\lambda) & 0,316 (1 - \lambda) & 0,316 (1 - \mu) & 0 \\
0,316 (1 - \lambda) & - (1 - 2\lambda) & 0 & 0,316 (1 - \mu) \\
0,316 (1 - \lambda) & 0 & - (1 - 2\mu) & 0 \\
0 & 0,316 (1 - \lambda) & 0 & - (1 - 2\mu)
\end{array}$$

Remarquons aussi que  $\lambda$  et  $\mu$ , variables duales des contraintes d'équilibre budgétaire, sont petites. Ainsi, dans le transport aérien, le prix du billet hors coûts d'infrastructures représente pour les transports intérieurs au moins 80% du coût total et la part fixe des dépenses d'infrastructure représente moins de la moitié du reste, c'est-à-dire que le

rapport entre coût marginal et tarification à l'équilibre est de l'ordre de 0,9. La variable  $\lambda$  doit se situer entre 0 et 0,1. La variable  $\mu$  relative au transport ferré est peut-être un peu plus forte, car les dépenses fixes sont plus importantes, mais reste faible. Mais de toute façon, à partir d'ici, on prendra  $\mu = 0$ .

Cela justifie des calculs d'approximation au premier ordre pris en  $\lambda$ , et aboutit aux valeurs suivantes pour les éléments  $I(ij)$  de  $M^{-1}$  :

$$J(1,1) = -0,9(1 - 2,1\lambda)$$

$$J(1,2) = -0,316(1 - \lambda)$$

$$J(1,3) = -0,28(1 - 3,2\lambda)$$

$$J(1,4) = -0,1(1 - 2\lambda)$$

$$J(2,2) = -0,9(1 - 2,1\lambda)$$

$$J(2,3) = -0,1(1 - 2\lambda)$$

$$J(2,4) = -0,28(1 - 3,2\lambda)$$

$$J(3,3) = -0,8(1 - 4,4\lambda)$$

$$J(3,4) = -0,03(1 - 2\lambda)$$

$$J(4,4) = -0,8(1 - 4,4\lambda)$$

On en déduit :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = -0,3 K a_2 T_2 (1 + \lambda) + \lambda a_1 T_1 + 0,34 \lambda a_2 T_2 \\ A_2 = 0,77 K a_2 T_2 (1 + 2,1\lambda) + 0,34 \lambda a_1 T_1 + \lambda a_2 T_2 \\ F_1 = -0,1 K a_2 T_2 (1 + 3,1\lambda) + 0,31 \lambda a_1 T_1 + 0,11 \lambda a_2 T_2 \\ F_2 = 0,31 \lambda K a_2 T_2 + 0,11 \lambda a_1 T_1 + 0,32 \lambda a_2 T_2 \end{array} \right.$$

Analysons les résultats en prenant des valeurs particulières des paramètres et en allant du simple au complexe :

1 - On retrouve le résultat classique selon lequel en l'absence de congestion ( $k = 0$ ) et de contrainte d'équilibre budgétaire ( $\lambda = 0$ ), la tarification optimale est la tarification au coût marginal d'usage :

$$A_1 = A_2 = F_1 = F_2 = 0$$

2 - Par ailleurs, on verrait facilement que, en l'absence de contrainte d'équilibre budgétaire, et si les élasticités croisées étaient nulles (matrice des élasticités diagonale), on retrouverait la tarification au coût marginal social, qui internalise les effets externes :

$$A_2 = K a_2 T_2 \quad \text{et bien sûr } A_1 = F_1 = F_2 = 0$$

3 - L'existence d'élasticités croisées conduit par rapport au cas précédent :

- à moins charger le service congestionné ;
- à réduire la tarification des services substitués.

4 - Par rapport au cas 2 (élasticités croisées nulles), on verrait facilement que l'existence d'une contrainte d'équilibre budgétaire aboutit à la tarification de Ramsey.

5 - En l'absence de congestion ( $k = 0$ ), mais avec contrainte d'équilibre budgétaire et en présence d'élasticités croisées, la contrainte budgétaire sur les infrastructures aériennes a un effet modeste sur la tarification ferroviaire (c'est l'effet calculé à travers le coût marginal social harmonisé) et un effet plus important sur la tarification des infrastructures aériennes. Pour elles, l'effet est de répartir le péage pur (différence entre le tarif et le coût marginal social) plus également entre les services.

6 - La forme des formules fait également apparaître l'assiette de la tarification :

- La partie de la tarification correspondant au coût marginal d'usage des infrastructures doit bien sûr être assise sur le fait générateur de ce coût marginal d'usage : pour la navigation aérienne, le vol x kilomètre ; pour les aéroports, le passager (pour la piste, le poids de l'avion à la puissance quatrième ; mais les pistes représentent une très faible part du coût des aéroports, et l'essentiel est dans les aérogares).
- Il est plus intéressant de se pencher sur les autres parties de la tarification :
  - Le coût de congestion est proportionnel au nombre d'usagers retardés (coefficient  $N/n$  intervenant dans  $k$ ), c'est-à-dire que chaque avion paie la même somme quelle que soit sa taille.
  - Le péage conduisant à assurer l'équilibre budgétaire doit être proportionnel au coût marginal total du transport aérien occasionné par l'utilisateur, par l'intermédiaire des termes en  $\lambda_1 T_1$  et  $\lambda_2 T_2$  ; or ce coût marginal est essentiellement composé du prix du billet, et est lié au nombre de passagers et à la distance qu'ils parcourent.

Il en résulte que la tarification des infrastructures aériennes pourrait comprendre différents termes, dont il serait facile de préciser l'importance relative à partir de données concrètes :

- un élément assis sur le nombre d'usagers couvrant le coût marginal des aéroports ;
- un élément assis sur le parcours de chaque avion et couvrant le coût marginal de la navigation aérienne ;

- un élément assis sur l'atterrissage de chaque avion et représentant en gros <sup>(24)</sup> le coût de congestion ;
- le complément nécessaire pour arriver à l'équilibre budgétaire serait assis sur le passager kilomètre, aussi bien pour les aéroports que pour la navigation.

Ceci constitue à la fois une certaine justification des règles actuelles qui comportent des termes proportionnels à la taille de l'avion et à la distance qu'il parcourt, et permettrait de recadrer ces règles compte tenu de l'importance relative des frais fixes, des frais variables et des coûts de congestion.

---

<sup>24</sup> En gros, car les formules précédentes tendent à montrer que le coût marginal de congestion ne devrait pas être imputé en totalité, compte tenu des reports temporels de la période de pointe vers la période hors pointe.

## LISTE DES ÉTUDES À POURSUIVRE

---

Ces études auraient pour but de lever des incertitudes dont sont frappées certaines des évaluations du rapport et de prolonger l'analyse à laquelle il procède :

— Il faudrait pouvoir mieux segmenter le marché des transports et notamment celui des marchandises, et connaître pour chacun de ces segments l'offre (résultats en termes de contribution à la SNCF) et la demande (élasticités).

— Il faudrait mieux connaître les coûts concernant l'environnement. Il est dommage qu'on ne puisse pas faire mieux que de transposer des études étrangères.

— Il faudrait approfondir les questions de congestion dans les modes collectifs. En matière aérienne des études sont lancées à la DGAC concernant les retards ; il faudrait également creuser la question de l'évaluation des sillons horaires. Pour la SNCF, il serait intéressant de mener l'étude proposée dans l'Annexe I.

— Il apparaît indispensable d'attaquer le problème des déplacements urbains et suburbains qui sont importants à la fois en eux-mêmes, parcequ'ils constituent les trajets terminaux de déplacements interurbains, et parce qu'on a toute raison de penser que pour eux les écarts entre prix et coûts sont élevés et que les coûts externes sont élevés.

— Enfin, sur un plan plus théorique, il faudrait analyser :

- les fonctions de coût des infrastructures aériennes, notamment pour le contrôle aérien ;
- les résultats du modèle d'optimisation fine des tarifs en tenant compte des phénomènes de concurrence modale et des reports pointe-hors pointe (prolongement du "modèle théorique").

— Et sur un plan plus appliqué, il serait intéressant de :

- analyser l'évolution des tarifications dans le temps, pour affiner les prévisions globales et sommaires émises dans le rapport ;
- explorer les possibilités stratégiques de la SNCF en matière de développement des activités ;
- approfondir les problèmes de mise en œuvre des principes de tarification proposés pour la S.N.C.F., en tenant compte notamment d'une plus fine segmentation des marchés, des problèmes d'adaptation dynamique, et de l'impact des aspects péri-urbains et urbains.

**ANNEXE 1**  
**MODÈLES D'EFFETS EXTERNES DE CONGESTION**  
**DES MODES DE TRANSPORT COLLECTIF**

---

**1. COÛT SOCIAL OCCASIONNÉ PAR L'INTRODUCTION D'UN**  
**SERVICE SUPPLÉMENTAIRE CONDUISANT À UN DÉPLACEMENT**  
**DES SERVICES ANCIENS**

Dans le paragraphe précédent, on a examiné l'effet de la tarification sur le volume du trafic, la fréquence des services étant donnée.

Ici, on se placera dans une situation différente, celle où la demande totale est donnée et où les moments de départ des différents services changent à la suite de l'introduction d'un nouveau service.

1.1. On supposera d'abord que chaque service ancien dessert une destination différente, que les usagers de chaque service  $i$  sont uniformément répartis quant à leurs désirs de départ sur un intervalle d'étendue  $2h_i$ , et que le départ du service est décalé de  $O_i$  par rapport au centre de l'intervalle précédent ; soit  $n_i$  le nombre d'usagers du service  $i$  à l'unité de temps. Le coût du temps total de décalage par rapport aux horaires désirés est :

$$A_1 = n_i \left[ \int_0^{h_i - \theta_i} ctdt + \int_0^{h_i + \theta_i} ctdt \right] \text{ si } \theta_i \text{ est dans l'intervalle } -h \dots +h$$

ou :

$$A_2 = n_i \left[ \int_{h_i - \theta_i}^{h_i + \theta_i} ctdt \right] \text{ si } \theta_i \text{ est dehors de l'intervalle}$$

soit :

$$A_1 = cn_i (h_i^2 + \theta_i^2)$$

ou :

$$A_2 = 2cn_i h_i \theta_i = cN_i \theta_i$$

$N_i$  étant le nombre d'usagers du service  $i$ .

Alors si l'occurrence d'un nouveau service oblige à déplacer de  $\delta\theta_i$  l'heure de départ, le coût collectif est :

ou :

$$\begin{aligned} \delta A_1 &= 2cn_i \theta_i S\theta_i & \text{si } |\theta_i| < h \\ \delta A_2 &= cN_i S\theta_i & \text{si } |\theta_i| \geq h \end{aligned}$$

Cette formule a deux applications particulières :

1°) Chaque service est placé de manière optimale c'est-à-dire que  $\theta_i = 0$  ; alors  $\delta A_1 = 0$  . Son déplacement marginal n'entraîne pas de perte sociale. Ce cas sera par exemple celui des arrivées de vols intercontinentaux, ou de vols continentaux en heure creuse. Les usagers n'ont pas de désir précis d'heure de départ ou d'arrivée, et la congestion à l'arrivée ou au départ est suffisamment faible pour que les heures de départ puissent être optimisées (ou tout au moins la sous-optimisation ne vient pas de la congestion du trafic) ; alors si un nouveau vol veut prendre la place d'un vol existant, le déplacement du vol existant n'a pas un coût social appréciable.

2°) Le service n'est pas placé de manière optimale. Alors il y a un coût social de déplacement du service égal à l'une ou l'autre des valeurs des formules précédentes. Un cas particulier est celui des pointes du matin et du soir des vols courts, correspondant à une clientèle d'hommes d'affaires qui veulent arriver à leur rendez-vous, donc partir à une heure précise, la même pour tous. On est alors dans le cas où  $h_i = 0$ , et où le coût social du décalage est donné par :  $\delta A_2 = cN_i \delta \theta_i$

Ces remarques s'appliquent aussi bien sûr au cas du chemin de fer : les trains de longues distance ou délais placés en heure creuse ne produisent guère de coût social quand on décale leur heure de départ ; en revanche les trains de courte distance, correspondant aux trajets particuliers, ou de court délai, et correspondant aux déplacements d'affaire d'une journée, produisent un coût social.

**1.2.** On supposera maintenant que les services anciens assurent la même desserte. Alors l'introduction d'une nouvelle desserte n'occasionne pas de coût social externe mais au contraire un effet externe positif ; si la desserte est organisée de façon à atteindre l'optimum collectif et reorganisée en ce sens après l'effet externe est compensé par le coût supplémentaire du service :

$$A + \gamma q$$

A : dépense fixe

$\gamma$  : coût marginal

q : supplément éventuel de trafic occasionné  
par l'augmentation des fréquences

**1.3.** Cas particulier du mélange de trains différents pour le chemin de fer. Lorsque sur un réseau ferré circulent des trains de vitesses et d'arrêts différents - des trains dont les

sillons horaires ne sont pas parallèles ; l'appréciation du coût social est plus délicate. En principe il faudrait établir une grille horaire optimisée sans le train dont on cherche le coût social, une autre grille optimisée avec ce train, qui entraînerait des décalages et des ralentissements des trains anciens ; le coût social du train considéré serait égal à la somme des décalages et des ralentissements ainsi déterminés.

En fait on ne peut effectuer un tel calcul pour chaque train. Il faudrait - ce serait un long travail - établir des relations statistiques entre le décalage et quelques variables explicatives du coût social, parmi lesquelles on peut songer à :

- la vitesse moyenne des trains autour du sillon en cause, et l'écart-type de ces vitesses ;
- l'écart entre cette vitesse moyenne et celle du train qu'on veut introduire dans la grille ;
- la densité des trains (nombre de trains par heure) ;
- le nombre moyen d'arrêts des trains autour du sillon en cause ;
- le nombre d'arrêts du train considéré ;
- la longueur du parcours.

Il faudrait déterminer environ une centaine de cas différents, pour chacun d'eux le coût social correspondant et, à partir de là, effectuer des ajustements statistiques expliquant ce coût social à partir des variables explicatives telles que les précitées.

1.4. Lorsque un train (ou un avion) est décalé, il peut se produire, si le décalage est sensible, que son remplissage baisse et que le bénéfice de l'exploitant diminue. Il faudrait compter cet effet au titre du coût social, ainsi d'ailleurs que la perte de surplus pour l'usager éliminé ; mais cette dernière perte est du 2<sup>ème</sup> ordre

## **2. CAS PARTICULIER DE LA SUPPRESSION D'UN TRAIN**

Il peut aussi se produire que le décalage occasionné à certains trains entraîne leur suppression, la clientèle qu'ils drainaient n'étant plus intéressée par le nouveau sillon qui leur est alloué.

On est alors en présence de trains incompatibles, et se pose le problème de saisir lequel retenir et quoi lui faire payer. La SNCF s'est posée ce problème dans le cadre de la mise en œuvre de la directive européenne sur l'ouverture des réseaux. Elle propose un critère de choix constitué par le bénéfice "normé", correspondant à ce que rapporte en contribution nette le train en cause, compte tenu de sa catégorie ; cela conduit à faire payer

au train retenu la somme des contributions normées des trains que sa présence conduit à éliminer.

Ce critère n'est pas en théorie parfaitement satisfaisant. En toute rigueur et logique, il faudrait choisir le service sur la base de ce qu'il rapporte à la collectivité, et qui n'est pas égal à sa contribution mais comprend les éléments suivants :

- Si le service en question n'est pas assuré par le train, il le sera par un autre moyen (autocar, avion, camion) et il faut compter la différence entre le bénéfice ferroviaire et celui de l'entreprise qui mettrait en oeuvre le moyen alternatif. Soit  $B_F - B_A$ .
- Il faut compter non seulement les différences entre bénéfices des exploitants mais aussi la différence entre les surplus des usagers mesurée par la différence entre les coûts généralisés de transport sur le mode ferroviaire et sur le mode alternatif. Si le changement de mode entraîne une diminution de trafic (trafic "désinduit") il faut compter pour ce trafic "désinduit" la 1/2 différence des coûts généralisés par le mode ferroviaire et par le mode alternatif. Soit  $(S_F - S_A)$  le terme global de surplus de l'utilisateur.
- Il faut aussi tenir compte de la différence des effets externes non internalisés, sur l'environnement essentiellement, par le mode ferroviaire et par le mode alternatif. Soit  $(E_F - E_A)$  ce terme.

Au total, en toute rigueur, il faudrait choisir entre trains incompatibles selon le critère :

$$AU = U_F - U_A = (B_F - B_A) + (S_F - S_A) + (E_F - E_A) \text{ (25)}.$$

Et choisir le train pour lequel le AU est le plus élevé, alors que la SNCF propose de classer les services selon le critère  $B_F$ .

Mais le calcul de  $U_F - U_A$  (24) est impossible pour chaque train objet d'incompatibilité, et il faut rechercher une expression simplifiée de (24). Pour cela, remarquons que dans la plupart des cas, le bénéfice de l'exploitant alternatif, routier ou aérien, est faible, s'agissant de modes à rendement constant.  $B_A$  sera en général faible par rapport à  $B_F$ .

$S_F - S_A$  sera positif, puisque s'il avait le choix, l'utilisateur choisirait le service ferré. On peut penser que  $S_F - S_A$  est corrélé à  $B_F - B_A$  et d'un ordre de grandeur plus faible si la tarification proposée à l'utilisateur est fixée de façon correcte, pour épouser le surplus.

Quant au terme  $E_F - E_A$  il sera faible en valeur absolue si le mode de substitution est l'avion ( $E_F$  et  $E_A$  sont faibles), en revanche il sera négatif si le mode de substitution est la

---

<sup>25</sup> Tout à fait similaire au calcul de rentabilité des investissements.

route, plus nuisible à l'environnement. On pourrait calculer une valeur nommée de  $E_A$  dans ce dernier cas, à partir des données du chapitre sur les coûts externes.

Au total, compte tenu notamment de la difficulté de calcul des autres termes,  $B_F$  est un indicateur acceptable de l'intérêt d'un service ferroviaire, qui devrait en général être bien corrélé avec l'indicateur "correct", sous réserve de tenir compte des effets négatifs vis-à-vis de l'environnement si le mode de substitution du service ferroviaire en cause est routier.

Mais ce critère sous-évalue la perte dans la mesure où il néglige le surplus des usagers.

Il faut noter qu'un système d'enchères transparentes conduirait logiquement chaque service candidat à proposer comme valeur  $B_F - B_A$ , et que la règle de choix serait de retenir le service qui fait la proposition la plus forte, en lui faisant payer le montant de la 2<sup>ème</sup> meilleure enchère ce qui constitue à la fois un mécanisme de révélation de la vérité, et un moyen par lequel l'élu paie le coût que son admission occasionne - sous réserve de l'absence de surplus des usagers, ou de proportionabilité de ce surplus au bénéfice, et d'absence d'effet externe.

### 3. LE COÛT SOCIAL DES RETARDS ALÉATOIRES

Jusqu'ici on s'est occupé des effets externes sur l'établissement des horaires programmés ; l'introduction d'un service supplémentaire a des effets sur les autres services, qui auraient pu être organisés différemment et plus efficacement en son absence. Le coût social correspondant existe, il est prévu, officialisé, publié implicitement.

Un autre effet externe existe, celui qui résulte de la plus grande probabilité d'incident, donc de retard par rapport à l'horaire publié lorsque le trafic est élevé. Bien que son origine soit différente des phénomènes de congestion routiers, son analyse est similaire. Elle consiste à examiner la corrélation entre les retards par rapport aux horaires prévus et le trafic (obtenue en distinguant les zones géographiques, ou les périodes temporelles ou les deux). Elle fera apparaître un retard, préjudiciable à la fois aux usagers et aux exploitants. Soient :

$R$  : le retard en heures par rapport à l'horaire officiel pour chaque unité de trafic (vol, ou train...);

$q$  : le trafic exprimé en unité de trafic ;

$h$  : la valeur du temps de l'utilisateur ;

$h_i$  : le nombre d'utilisateurs du vol  $i$  ( $i$  varie de 1 à  $q$ ) ;

on fait l'hypothèse que :

$$R = \begin{cases} a + bq & \text{si } a + bq > 0 \\ 0 & \text{si } a + bq < 0 \end{cases}$$

Le coût social total résultant d'un trafic  $q$  sera :  $C = R_q = (a + bq)q$ .

Le coût marginal sera :  $C_m = \frac{dC}{dq} = a + 2bq$ .

Cette expression se décompose en :

- $a + bq$  c'est le retard ressenti par l'unité de trafic elle-même, supporté en nature ;
- $bq$  c'est le supplément de retard infligé aux autres unités de trafic (chaque unité de trafic est retardée de  $b$ ).

C'est la valeur monétaire de ce retard qu'il faut considérer comme le coût marginal de retard. Elle s'exprime sur les usagers et sur les compagnies. Sur les usagers, chaque unité de trafic  $i$  retardée de  $bq$ , subit une perte de  $bhn_i$ . La perte totale correspondante est :

$$bh \sum_i n_i = bh n q$$

où  $n$  est le nombre moyen d'usagers par unité de trafic.

Pour les compagnies, chaque unité de trafic  $i$  coûte, en temps marginal d'opérations (heures supplémentaires de personnel essentiellement),  $c_i$ , et le coût total correspondant est :

$$b \sum c_i = bqc$$

$c$  étant le coût marginal d'opération (moyenné sur l'ensemble des compagnies) d'une unité de trafic. Le coût social total est :  $bhnq + bqc$ .

**Nota :**  $q$  peut éventuellement être un vecteur représentatif des paramètres causes du retard s'ils sont plusieurs et ne se réduisent pas au nombre d'unités de trafic, et on peut alors dérouler un raisonnement similaire au précédent.

ANNEXE 2  
CALCUL NUMÉRIQUE DES TERMES CORRECTEURS  
D'OPTIMISATION

---

Les tableaux qui suivent aboutissent au calcul, conformément à la note "Evaluation des contributions aux charges d'infrastructures..." de septembre 1989, des corrections à apporter aux coûts marginaux de la SNCF pour tenir compte de l'imparfaite tarification des autres modes.

Voyageurs à moins de 80 km

Année 1988

Mode	Recette réelle	Recette c.m.s.	$\Delta R$	élasticité $e_{M/F}^{(26)}$	$\Delta R \times e_{M/F}$
Route	48,7	27,4	21,3	0,001	0,02
Fer			$\Delta R$	- 0,3	- 0,3 $\Delta R$

$$\Delta R = 0,1 \text{ Mds de F}$$

<sup>26</sup> Les trafics interurbains à moins de 80 km des modes sont en Mds Voyageurs x km :

Route :  $169,1 \times 1,85 = 312,8$

Fer : 10,25.

En négligeant les effets revenus, et en supposant que tout le trafic éliminé du fer à la suite d'une augmentation des tarifs fer se replie sur la route, on obtient le résultat suivant à partir d'une augmentation de 10% du tarif fer

- modification du trafic fer - 0,3
  - modification du trafic route + 0,3
  - variation relative du trafic routier 0,3
- $$\frac{0,3}{312,8} = 0,001$$

## Voyageurs à plus de 80 km

Année 1990

	Recette réelle	Recette c.m.s.	$\Delta R$	$e_{M/F}$	$e_{M/F} \times \Delta R$
<b>Service ferré lent</b>					
Route réseau lent	4,5	3,8	0,7	0,19	0,13
Route réseau rapide	23,4	9,4	14,0	0,20	2,8
Service ferré lent			$\Delta R_L$	- 1,1	- 1,1 $\Delta R_L$
Service ferré rapide			$\Delta R_R$	+ 0,02	+ 0,02 $\Delta R_R$
Avion	10,2	10,5	- 0,3	0,3	- 0,09
<b>Service ferré rapide</b>					
Route réseau lent	4,5	3,8	0,7	0,013	0,009
Route réseau rapide	23,4	9,4	14,0	0,018	0,25
Service ferré lent			$\Delta R_L$	0,04	0,04 $\Delta R_L$
Service ferré rapide			$\Delta R_R$	- 1,00	- 1,00 $\Delta R_R$
Avion	10,2	10,5	- 0,3	0,32	- 0,10

$$\begin{array}{l}
 * 50 \quad \left| \begin{array}{l} 0,13 + 2,8 - 0,09 - 1,1 \Delta R_L - 0,02 \Delta R_R = 0 \\ 0,009 + 0,25 - 0,10 + 0,04 \Delta R_L - 1,00 \Delta R_R = 0 \end{array} \right. \\
 \left| \begin{array}{l} 2,84 - 1,1 \Delta R_L - 0,02 \Delta R_R = 0 \\ 0,159 + 0,04 \Delta R_L - 1,00 \Delta R_R = 0 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\text{soit} \quad \left| \begin{array}{l} \Delta R_L = 2,6 \\ \Delta R_R = 0,26 \\ \Delta R_L = 2,6 \\ \Delta R_R = 0,3 \end{array} \right.$$

## Calcul en globalisant les services ferrés

Année 1990

Mode	Recette réelle	Recette c. m. s.	$\Delta R$	$e_{M/F}$	$e_{M/F} \Delta R$
Route	27,9	13,2	14,7	0,20	2,94
Fer			$\Delta R$	- 1,0	- 1,0 $\Delta R$
Avion	10,2	10,5	- 0,3	0,30	- 0,09

$$2,94 - 0,09 - 1,0 \Delta R = 0$$

$$\Delta R = 2,85$$

$\Delta R = 2,9$
------------------

## 3 Voyageurs à plus de 80 km

Année 2010

	$\Delta R$ 88	2010 / 1988	$\Delta R$ 2010	$e_{MC/F}$ 2010	$e_{MC/F} \Delta R$
<b>Service ferré lent</b>					
Route réseau lent	0,7	0,44	0,31	0,15	0,0465
Route réseau rapide	14,0	1,4	19,6	0,12	2,35
Service fer lent	$\Delta R'_L$	0,27	$\Delta R_L$	- 0,81	- 0,81 $\Delta R_L$
Service fer rapide	$\Delta R'_L$	5,7	$\Delta R_L$	0,02	0,02 $\Delta R_R$
Avion	- 0,3	1,6	- 0,48	0,12	- 0,055

<b>Service ferré rapide</b>					
Route réseau lent	0,7	0,44	0,308	0,08	0,025
Route réseau rapide	14,0	1,4	19,6	0,12	2,35
Service fer lent	$\Delta R'_L$	0,27	$\Delta R_L$	0,13	0,13 $\Delta R_L$
Service fer rapide	$\Delta R'_R$	5,7	$\Delta R_R$	- 0,75	- 0,75 $\Delta R_R$
Avion	- 0,3	1,6	- 0,48	0,20	- 0,10

<b>Service fer total</b>					
Route réseau lent	0,7	0,44	0,308	0,18	0,055
Route réseau rapide	14,0	1,4	19,6	0,20	3,92
Service fer	$\Delta R'$	2,3	$\Delta R$	- 0,75	- 0,75 $\Delta R$
Avion	- 0,3	1,6	- 0,48	0,28	- 0,13

$$\begin{cases} 0,0465 + 2,35 - 0,055 - 0,81 \Delta R_L + 0,02 \Delta R_R = 0 \\ 0,025 + 2,35 - 0,10 + 0,13 \Delta R_L - 0,75 \Delta R_R = 0 \end{cases}$$

$$\Delta R_R = 3,55$$

$$\Delta R_L = 2,98$$

Arrondi à :  $\Delta R_R = 3,6$

$$\Delta R_L = 3,0$$

### Calcul en globalisant les réseaux ferrés

$$0,055 + 3,92 - 0,13 - 0,75 \Delta R = 0$$

$$\Delta R = \frac{3,83}{0,75} = 5,1$$

$\Delta R = 5,10$
-------------------

### Marchandise

Mode	Recette réelle	Recette c.m.s.	$\Delta R$	Elasticité $e_{M/F}$	$\Delta R * e_{M/F}$
Route	17,0	19,7	- 2,7	+ 0,43	- 1,16
Fer			$\Delta R_F$	- 1,0	- $\Delta R_F$

$$\Delta R_F = - 1,08$$

$\Delta R_F = - 1,1$
----------------------

On vérifie que le résultat ne change pas si l'on restreint le périmètre de concurrence, et si l'on prend les valeurs d'élasticités correspondantes, et si l'on suppose que l'écart entre coût marginal social et taxes réellement payées est le même quel que soit le segment du marché des transports routiers. En fait, les gros poids lourds sur grandes distances, ceux qui concurrencent le plus le fer, paient moins de taxes sur l'essence que la moyenne et davantage de péages. Il est probable que pour eux l'écart (coût marginal social - recettes des taxes actuelles) est plus fort que la moyenne, ce qui donne à penser que le terme précédemment calculé est probablement trop faible en valeur absolue.

\*  
\*   \*

L'incertitude sur le périmètre de concurrence et sur la part des taxes payées par les différents poids lourds doit rendre très précautionneux si l'on veut appliquer les relations précédentes au cas de variations autour des valeurs moyennes du calcul. Le cas se présente à l'occasion des changements de taxes sur les carburants ; l'application directe, en variation, des formules globales peut conduire à des erreurs.

Il vaut mieux alors partir d'une autre expression de la contribution, celle qui définit l'écart entre prix et coût marginal :

$$(p_R - c_R) \frac{\partial q_R}{\partial p_R} + (p_F - c_F) \frac{\partial q_F}{\partial p_F} = 0$$

En tenant compte du fait que  $q_R + q_F$ , le trafic total, est en première approximation constant, on en déduit :  $p_R - c_R = p_F - c_F$ .

Si la taxation kilométrique routière change de  $(dp)$ , la contribution kilométrique  $\gamma$  ferroviaire change de :  $(- dp)$ .

L'application de cette formule nécessiterait une connaissance parfaite du périmètre de concurrence ; elle est néanmoins plus fiable que l'application de la formule complète donnant la contribution totale. Elle est en outre davantage dans l'esprit du mécanisme d'harmonisation fondé sur une contribution kilométrique et non globale.

Ces difficultés de calcul en variation sont atténuées dans le cas des transports de voyageurs : le marché est mieux segmenté, les taxes payées sont moins variables d'un usager à l'autre à l'intérieur d'un même segment de marché, et le calcul en variation est

plus fiable. Cela est heureux car la formule  $\delta\gamma = -\delta p$  n'est plus qu'approchée, la demande totale n'étant pas constante.

Ces réflexions montrent que si l'écart (tarif pays - c.m.s.) change dans un mode concurrent, cela induit un changement de contribution kilométrique ferroviaire, donc un changement du prix payé par l'exploitant pour l'usage de l'infrastructure (ce prix payé est égal au coût marginal d'usage de l'infrastructure diminué de la contribution kilométrique), donc un changement dans le prix de la prestation finale payé par l'usager (individu ou chargeur) de la SNCF, donc un changement des trafics. Mais, par construction en quelque sorte, l'équilibre du compte d'infrastructure reste inchangé, comme celui des services d'exploitation : pour le trafic ancien, le changement de contribution est juste compensé par la variation de prix d'usage de l'infrastructure ; et pour le trafic supplémentaire (ou supprimé) engendré, le supplément de coût (le coût marginal) est égal aux recettes venant d'une part de l'exploitant et d'autre part de la contribution de l'Etat.

### ANNEXE 3

## VARIANTES CONCERNANT LA SÉCURITÉ ET L'EFFET DE SERRE

Le tableau de la note "présentation générale et synthèse" a été repris en tenant compte de deux variantes :

- coût tutélaire du mort de 4,5 MF au lieu de 1,86 (et augmentation des coûts des blessés) ;
- prise en compte de l'effet de serre. Ceci entraîne une augmentation des coûts externes :
  - pour le fret, de 3,2 GF pour la route  
0,32 GF pour le fer
  - pour les voyageurs, de 58,9 GF pour la route  
2,2 GF pour le fer.

Les coûts sociaux routiers sont alors augmentés des montants suivants, par catégorie de trafic :

En GF	Rappel des coûts marginaux sociaux pris dans le rapport	Augmentation du coût marginal social liée aux nouvelles valeurs de la sécurité	Augmentation du coût marginal social liée à l'effet de serre
Total		32,3	62,1
Fret (P.L.)	19,7	2,6	3,2
Voyageurs dont :		29,7	58,9
– milieu urbain	—	9,1	18,0
– rase campagne à moins de 80 km	18,8	14,7	29,1
– rase campagne à plus de 80 km services lents	3,0	1,7	3,4
– rase campagne à plus de 80 km services rapides	9,4	4,2	8,4

Les conséquences sur le tableau de synthèse sont les suivantes :

### 1. Changements de valeur unitaire de la sécurité

En GF	Variation du terme correcteur d'harmonisation
Fret	- 1,1
Rapides-express dont :	- 1,15
– moins de 80 km	- 0,05
– services lents à plus de 80 km	- 1,0
– services rapides à plus de 80 km	- 0,1
Total	- 2,25

### 2. Prise en compte de l'effet de serre

En GF	Augmentation du coût marginal social ferroviaire	Augmentation du terme correcteur d'harmonisation
Fret	0,32	- 1,4
Rapides-express dont :	2,2	2,3
– moins de 80 km	0,5	- 0,1
– services lents à plus de 80 km	1,1	- 2,0
– services rapides à plus de 80 km	0,6	- 0,2
Total	2,5	- 3,7

## ANNEXE 4

### EVALUATION SOMMAIRE DES COÛTS SOCIAUX LIÉS AUX RETARDS DES TRAINS

---

Deux types d'analyses statistiques ont été faites.

La première, corrélant les retards moyens de chaque jour de l'année avec le trafic total de la journée correspondante, n'a fait apparaître aucune liaison significative.

La seconde, qui établit des relations géographiques par région, fait apparaître des résultats qui vont être présentés, mais qui sont fragiles et que des analyses complémentaires devraient préciser.

La SNCF a calculé par région un certain nombre de données concernant les retards des rapides express (voir la note "Régularité des Circulations" du 22.10.92) :

- Le nombre de minutes perdues par an (NMP).
- Le nombre de minutes perdues rapportées au nombre de trains R.E. ayant circulé dans l'année (NMP/N.T.).
- La longueur moyenne de parcours des trains dans la région considérée (LPT).
- Le nombre de trains x kilomètres ayant parcouru la région dans l'année (LPT x NT).

A partir de ces données, il est possible de déterminer la loi qui donne, par kilomètre parcouru par un train R.E., le nombre de minutes perdues par an en fonction du trafic annuel. On aboutit, par ces données géographiques, à une corrélation linéaire de la forme :

$$\frac{NMP}{LPT} = a NT + b NT^2$$

La perte de temps  $t$  par kilomètre pour un train est, en minutes, de :

$$t = \left( \frac{NMP}{LPT} \right) \times \frac{1}{NT} = a + b NT$$

Le produit du coût de congestion est, selon une formule classique :

$$NT \times \frac{dt}{d NT} = b NT$$

$b$  vaut :  $0,15 \times 10^{-6}$

NT est en moyenne de 50 000.

Le coût de congestion est donc en minutes par kilomètres parcourus par train de :  $7,5 \times 10^{-3}$  minutes.

Chaque R.E. supplémentaire circulant sur 1 km fait perdre aux autres R.E. 0,0075 minutes au total. Comme chaque R.E. comporte environ 1 000 usagers, la perte de temps totale est de 6 minutes par kilomètre parcouru. Il y a  $48 \times 10^9$  voyageurs x km de R.E., donc  $48 \times 10^6$  km de train R.E., qui occasionnent un coût marginal de retard dont le produit serait de  $48 \times 7,5 \times 10^6$  minutes soit  $48 \times 7,5 \times 2 \times 10^6 = 730 \times 10^6$  F (en valorisant la minutes à 2 F).