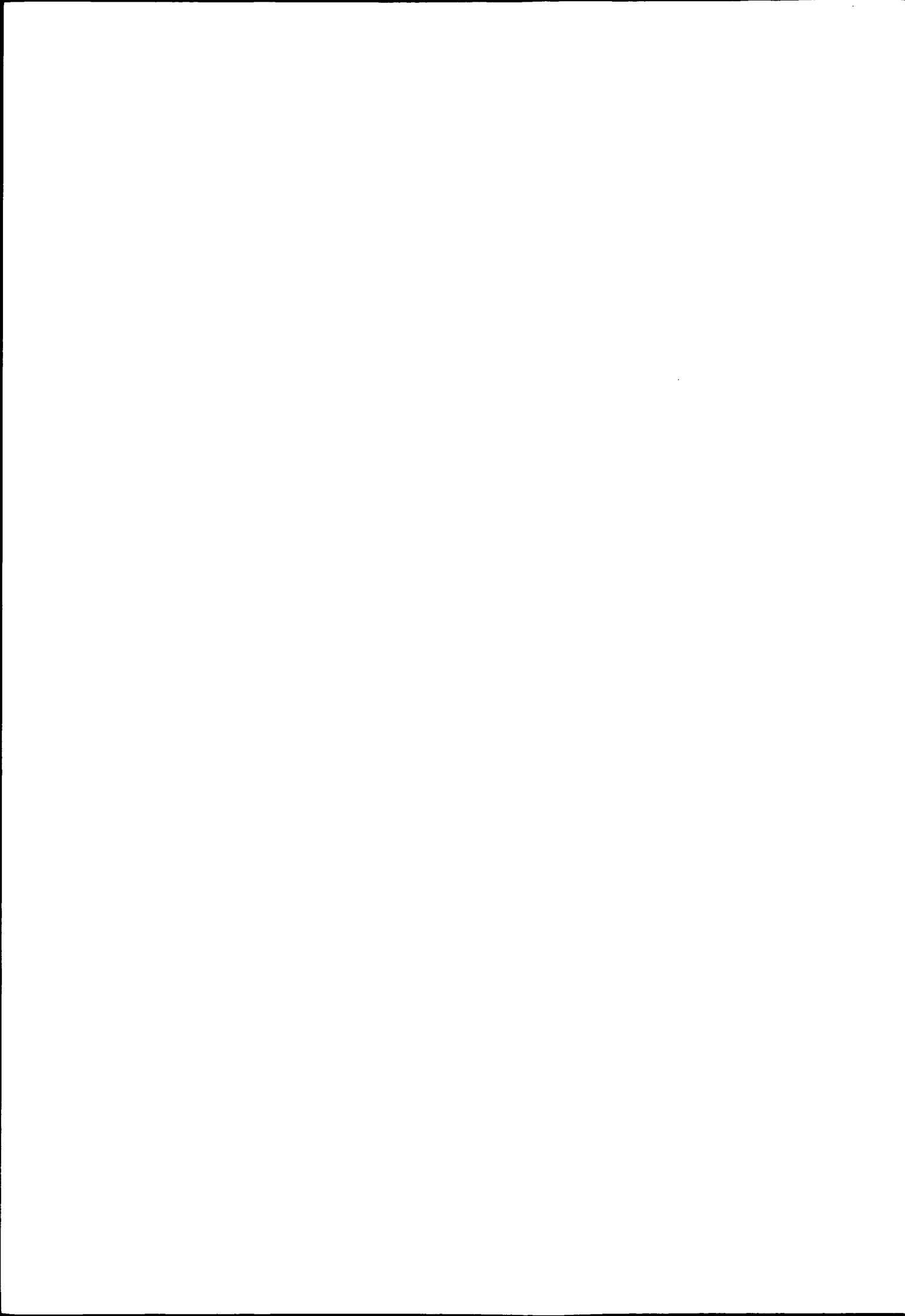


Les documents de travail du SES



# Impact de l'introduction du TGV sur l'évolution de la productivité de la SNCF

octobre 2001



# **SOMMAIRE**

SOMMAIRE .....	3
INTRODUCTION .....	5
1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE .....	7
2. ÉVOLUTION DE LA PRODUCTIVITÉ .....	12
2.1. INDICATEURS DE PRODUCTIVITÉ DU MATÉRIEL ROULANT .....	12
2.1.1. Productivité technique.....	13
2.1.2. Indicateur de remplissage.....	15
2.1.3. Productivité partielle du matériel roulant.....	16
2.1.4. Productivité technique, remplissage et productivité partielle du matériel roulant .....	18
2.2. PRODUCTIVITÉ GLOBALE DU CAPITAL ET DU TRAVAIL .....	19
2.2.1. TGV .....	20
2.2.2. Activité hors TGV .....	22
CONCLUSION.....	25
ANNEXES.....	31



# ***INTRODUCTION***

Les approches les plus fréquentes pour étudier la productivité d'une entreprise de chemin de fer considèrent l'entreprise dans sa globalité en la comparant à ses homologues étrangères. Elles ne prennent pas en compte les modifications profondes du processus de production de transport ferroviaire, notamment celles qui ont eu lieu en France, depuis le début des années 1980 avec la mise en service du réseau à grande vitesse.

La mise en service des trains à grande vitesse (TGV) a en effet permis une augmentation sensible du niveau de service, notamment en réduisant le temps de trajet. Ces trains sont aussi plus économes en travail que le chemin de fer classique du fait de taux d'occupation des sièges bien supérieurs aux trains de voyageurs classiques. Elle a, par contre, nécessité des investissements très importants en infrastructures et en matériel roulant (plus de 115 milliards de francs 1996 depuis 1975).

Le premier objectif de la présente étude<sup>1</sup> est de mieux connaître les évolutions de la productivité de la SNCF sur la période 1970-1998 en se focalisant sur la substitution progressive du TGV au train classique. Cette substitution est aujourd'hui très avancée, puisque, en 1998, 47 % des voyageurs-kilomètres produits par la SNCF correspondent à des transports en TGV.

Le second objectif de cette étude est d'apporter des éclairages sur la productivité commerciale et la productivité technique des différents types de matériel roulant. Celui-ci est en effet l'un des facteurs de production les plus facilement identifiables et l'évolution de l'intensité de l'utilisation des différents types de matériel est riche d'enseignements sur les évolutions qu'a connues la SNCF pendant les trente dernières années.

---

<sup>1</sup> Cette étude a été réalisée par Karine Briard, Institut d'économie industrielle, Toulouse.

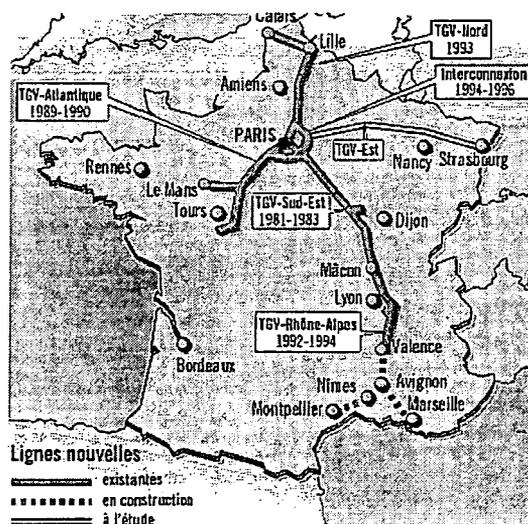


## 1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Actuellement, 32 000 kilomètres de voies ferroviaires irriguent le territoire français. Au cours de ces trois dernières décennies, la SNCF a été confrontée à l'essor de la concurrence dans le transport de personnes et le fret. Grâce à une amélioration de la qualité de service et une politique tarifaire compétitive, elle a maintenu son trafic global à un niveau proche de 500 unités-kilomètres (somme des voyageurs-kilomètres et des tonnes-kilomètres).

En renouvelant l'offre ferroviaire, le lancement du TGV au début des années quatre-vingt a permis de limiter la perte de part de marché au profit de la voiture individuelle. En 1998, 1 300 kilomètres de lignes nouvelles et 4 000 kilomètres de réseau secondaire ont drainé un neuvième du trafic voyageurs. La construction du réseau à grande vitesse s'est effectuée par étapes et les lignes à grande vitesse traversent désormais la France sur un axe Nord-Sud.

### *Étapes de la construction du réseau grande vitesse*



Le TGV est à l'image du dynamisme technologique de la SNCF. Mais la rentabilité de la grande vitesse passe par une utilisation maximale des infrastructures. La vitesse et la conduite assistée permettent de raccourcir les intervalles entre deux convois. Pour répondre à l'accroissement du trafic et au risque de saturation des lignes, la capacité est augmentée en surélevant les rames avec le TGV Duplex. L'effet réseau est renforcé avec le TGV Jonction, développé pour relier l'ensemble des lignes à grande vitesse (LGV) de la SNCF.

Le lancement du TGV s'inscrit dans la dynamique de performance lancée par la compagnie qui évolue vers une plus grande autonomie de gestion particulièrement depuis l'adoption de son statut d'EPIC en 1982. L'offre en termes de trains-kilomètres ou d'unités-kilomètres est directement affectée par ces nouvelles priorités et le contexte économique global.

Figure 1  
Circulation des trains  
(en millions de trains-kilomètres)

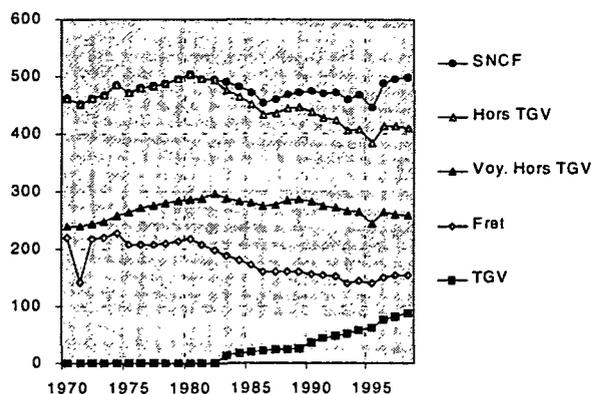
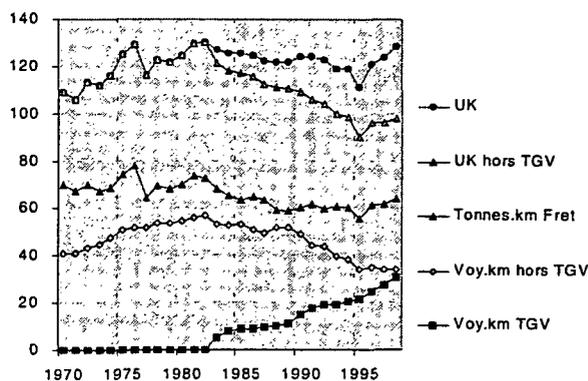


Figure 2  
Trafic  
(en milliards d'unités-kilomètres)



Au cours des trois dernières décennies, la circulation des trains de la SNCF est restée relativement stable. Après une croissance continue de l'ordre de 0,9 % par an jusqu'en 1980, le nombre de trains-kilomètres s'est ensuite maintenu au niveau de 1970 avant de retrouver le chiffre de 500 millions de trains-kilomètres en 1998.

Le trafic exprimé en unités-kilométriques (cf. figure 2) suit globalement la même évolution : une croissance de 1,5 % par an jusqu'en 1982, puis un léger fléchissement jusqu'en 1995 (- 0,6 % par an entre 1982 et 1994) et une reprise nette sur la fin des années quatre-vingt-dix avec un retour au niveau de trafic de 1982 soit 162 milliards d'unités-kilométriques.

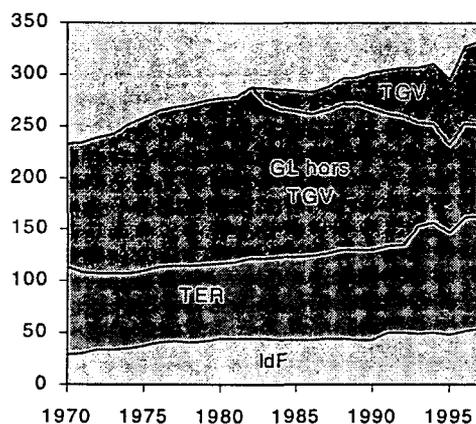
Le fret et le transport de voyageurs évoluent selon le contexte économique et réglementaire.

L'activité fret est étroitement corrélée au contexte économique général. Avec la mutation de l'industrie lourde des années soixante-dix et la crise pétrolière, l'évolution de la nature des produits transportés (moins de pondéreux, plus de produits manufacturés) a conduit à une stagnation du tonnage transporté entre 1970 et 1982. La suppression de la tarification routière obligatoire au milieu des années quatre-vingt et l'essor du transport routier de marchandises, son corollaire, accentue les difficultés du fret ferroviaire. Entre 1982 et 1994, le trafic baisse de 18 %, les trains-kilomètres de 27 %. Le transport de voyageurs croît de l'ordre de 2,8 % par an jusqu'en 1982, en partie grâce au développement de l'activité Île-de-France et des transports pour motifs de loisir. A partir de la moitié des années quatre-vingt, le nombre de voyageurs-kilomètres accuse une stagnation ponctuée de fortes chutes, souvent dues aux conflits sociaux qui paralysent l'activité ferroviaire (1986, 1993 et 1995 pour les principales). En particulier, la grève de 1995 cause une perte de près de 11 % du trafic voyageurs-kilomètres hors TGV, 6 % sur l'ensemble de l'activité voyageurs.

Depuis sa mise en service en 1981, le TGV occupe une part croissante dans le transport de passagers (14 % en 1985 contre 47 % en 1998). En réduisant le temps de trajet, la grande vitesse induit de nouveaux comportements de mobilité des usagers et permet de conquérir une nouvelle clientèle. Par ailleurs, cette substitution progressive du « voyageur grande vitesse » au « voyageur classique » s'effectue simultanément à l'extension du réseau LGV.

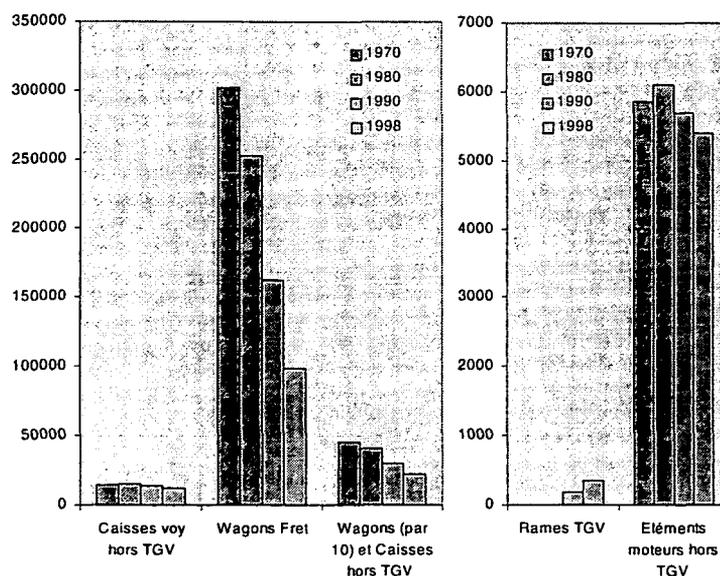
L'accélération du programme TGV dans les années quatre-vingt-dix avec les mises en service successives des TGV Atlantique, Nord et Sud-Est, se traduit par une accélération du taux de croissance de la circulation des trains (13 % par an en moyenne entre 1992 et 1998 contre 11 % entre 1985 et 1992) et du trafic TGV (12 % entre 1992 et 1998 contre 8 % entre 1985 et 1992). Toutefois, la majeure partie de cette croissance s'effectue en remplacement du service de transport de voyageurs classique.

Figure 3  
Circulation des trains de voyageurs<sup>2</sup>  
(en millions de trains-kilomètres)



Parallèlement à une politique active d'offre, la SNCF entreprend une rationalisation de ses activités fret et voyageurs. La taille du réseau passe de 37 582 kilomètres de lignes exploitées en 1970 à 31 851 en 1998 soit une réduction de plus de 15 %. Parallèlement, on note une contraction des nombres d'éléments de matériel.

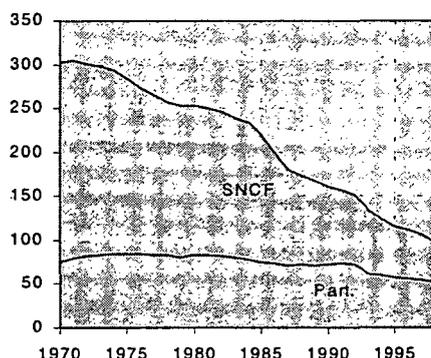
Figure 4  
Éléments remorqués et moteurs (en unités)



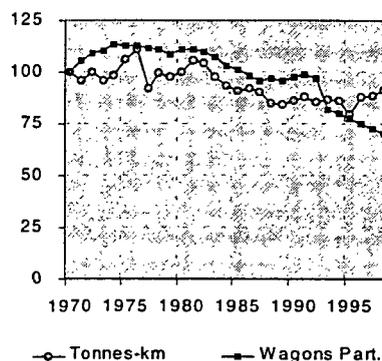
<sup>2</sup> Ce phénomène de substitution est très net en termes de circulation des trains : sur la période 1975-1985, la circulation des trains des services régionaux (hors Île-de-France) et celle du service « Grandes lignes » croissent de respectivement 9 et 10 %. Dans un scénario où ces deux types de service auraient continué de progresser au même rythme, les trains-kilomètres « Grandes lignes » seraient de l'ordre de 220 millions en 1998 contre les 170 millions effectivement réalisés.

Hormis les rames TGV qui correspondent à une activité en phase de croissance, le parc de matériel roulant de la SNCF se réduit. Cette rationalisation affecte particulièrement l'activité fret avec une division par trois du nombre de wagons entre 1970 et 1998 (302 200 contre 98 300) : les éléments remorqués parvenus en fin de vie ne sont pas renouvelés conduisant ainsi à un vieillissement du parc (14 ans en 1970, 25 ans en 1998). Cependant le nombre de wagons de particuliers reste proportionnel au trafic (cf. figure 9).

**Figure 5**  
**Nombre de wagons**  
**(réseau et particuliers)**  
**(en millions)**



**Figure 6**  
**Évolution des wagons de particuliers**  
**et du trafic fret**  
**(base 100 en 1970)**



L'activité voyageurs est nettement moins touchée que le fret par la réduction des éléments remorqués avec un nombre de caisses voyageurs en baisse de 17 % sur la période 1970-1998.

Quelle que soit l'activité, la réduction du matériel roulant est nettement plus sensible sur les vingt dernières années : sur les 204 000 wagons retirés du parc, les trois-quarts le sont entre 1980 et 1998 et le parc de caisses diminue à un rythme annuel de 1,1 % par an sur les deux dernières décennies après avoir connu une légère augmentation jusqu'en 1980 (15 340 caisses en 1980 contre 14 984 en 1970). Enfin, les éléments moteurs sont réduits en moindre proportion puisqu'ils passent de 5 868 en 1970 à 5 392 en 1998, soit une baisse de 8 %.

Les stocks bruts témoignent du déséquilibre des dépenses en matériel roulant entre l'activité TGV et les autres activités (cf. figure 8).

Figure 7  
Services du capital  
(millions de francs 1980)

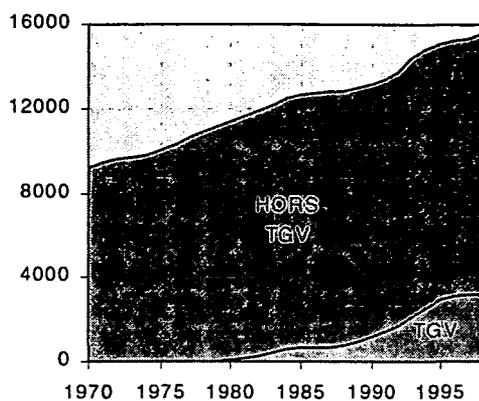
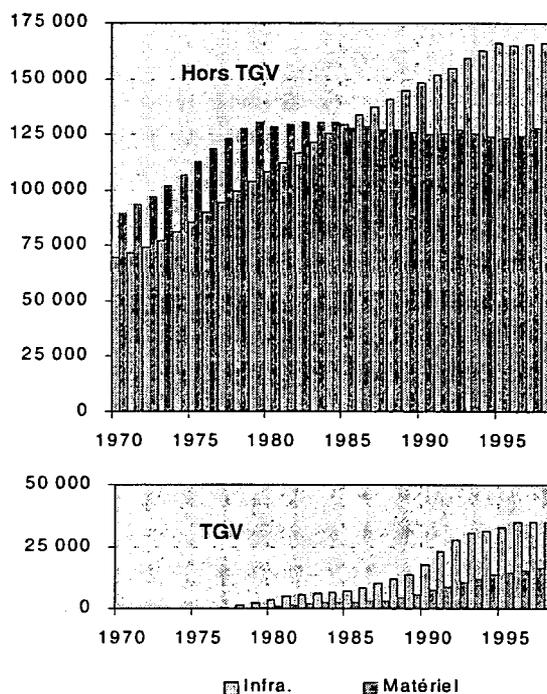


Figure 8  
Stocks bruts des activités « SNCF hors TGV »  
et TGV  
(en millions de francs 1980)



Sur la période 1970-1998, les services du capital de la SNCF croissent à un taux annuel moyen quasi constant de 1,9 %. Dans les années quatre-vingt, le lancement de la grande vitesse change progressivement la donne. La création de ce nouveau service accapare une partie importante des fonds auparavant affectés au réseau classique en totalité.

## 2. ÉVOLUTION DE LA PRODUCTIVITÉ

### 2.1. Indicateurs de productivité du matériel roulant

A partir des données du trafic, du parcours des trains et des effectifs d'engins moteurs et remorqués, trois indicateurs peuvent être calculés : la productivité du matériel roulant (*unités-kilomètres/éléments*), la productivité technique (*trains-kilomètres/éléments*) et le niveau de remplissage des trains (*unités-kilomètres/trains-kilomètres*). Leur évolution traduit les choix stratégiques de la SNCF en matière de gestion de matériel roulant.

Tableau 1  
Définition des indicateurs techniques du matériel roulant

Indicateurs	Productivité technique	Indicateur de remplissage	Productivité partielle du matériel roulant
TGV	$\frac{\text{Trains.km TGV}}{\text{Rames TGV}}$	$\frac{\text{Voy.km TGV}}{\text{Trains.km TGV}}$	$\frac{\text{Voy.km TGV}}{\text{Rames TGV}}$
Éléments moteurs hors TGV	$\frac{\text{Trains.km hors TGV}}{\text{Elements moteurs hors TGV}}$	$\frac{\text{Unités.km hors TGV}}{\text{Trains.km hors TGV}}$	$\frac{\text{Unités.km hors TGV}}{\text{Elements moteurs hors TGV}}$
Caisses voyageurs <sup>3</sup> hors TGV	$\frac{\text{Trains.km voy. hors TGV}}{\text{Caisses voy. hors TGV}}$	$\frac{\text{Voy.km hors TGV}}{\text{Trains.km Voy. hors TGV}}$	$\frac{\text{Voy.km hors TGV}}{\text{Caisses Voy. hors TGV}}$
Wagons de fret	$\frac{\text{Trains.km fret}}{\text{Wagons}}$	$\frac{\text{Tonnes.km}}{\text{Trains.km fret}}$	$\frac{\text{Tonnes.km}}{\text{Wagons}}$
Ensemble voyageur + fret hors TGV <sup>4</sup>	$\frac{\text{Trains.km hors TGV}}{\text{Caisses et wagons hors TGV}}$	$\frac{\text{Unités.km hors TGV}}{\text{Trains.km hors TGV}}$	$\frac{\text{Unités.km hors TGV}}{\text{Caisses et wagons. hors TGV}}$
SNCF	$\frac{\text{Trains.km}}{\text{Caisses et wagons}}$	$\frac{\text{Unités.km}}{\text{Trains.km}}$	$\frac{\text{Unités.km}}{\text{Caisses et wagons}}$

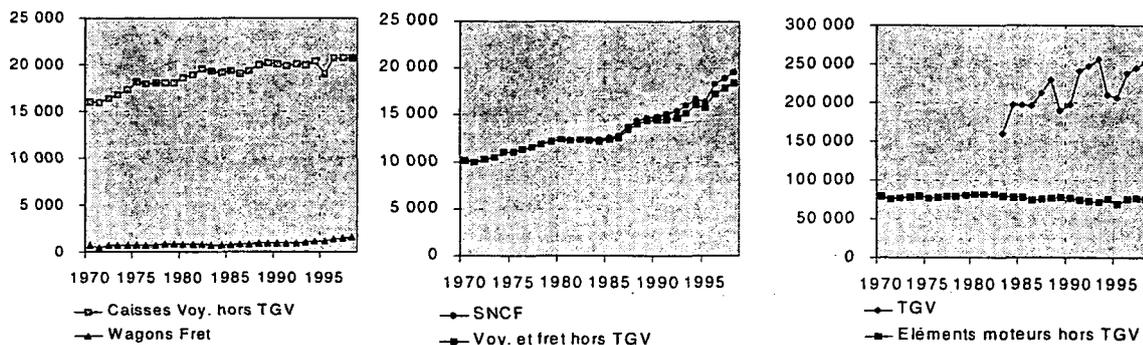
<sup>3</sup> Éléments moteurs hors TGV : locomotives électriques et diesel, automotrices, autorails et turbotrains ; caisses voyageurs : voitures, automotrices, autorails, turbotrains ; wagons : wagons réseaux, wagons de particuliers.

<sup>4</sup> L'unité de l'agrégat « Éléments caisses et wagons » représente 10 wagons ou une caisse. Cette relation d'équivalence entre les éléments remorqués fret et voyageurs est justifiée par le rapport de coût de ces éléments : 4,6 millions de francs de 1996 pour une voiture Corail, autour de 500 000 francs en moyenne pour un wagon.

### 2.1.1. Productivité technique

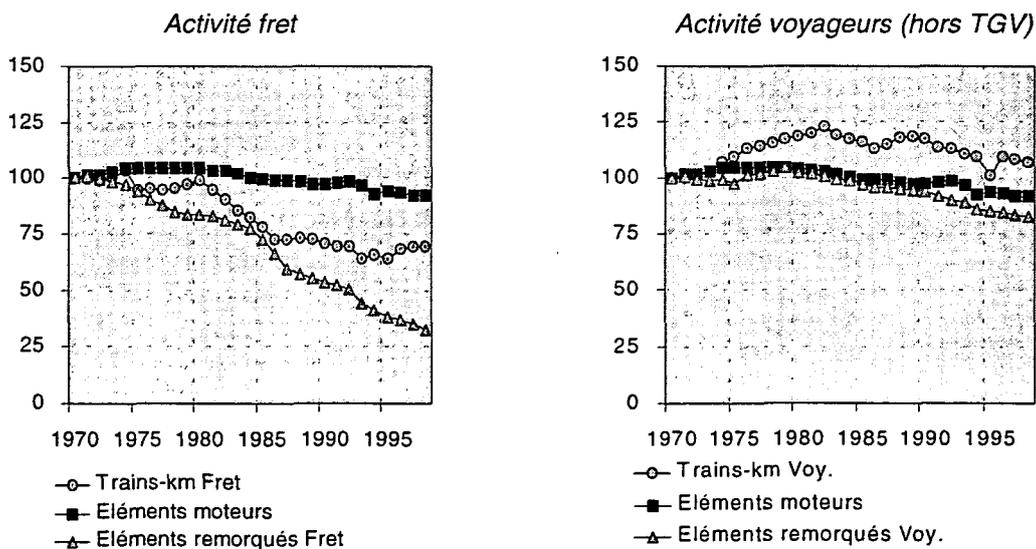
Le ratio entre le parcours des trains et les effectifs en matériel renseigne sur l'adéquation du parc à l'offre de trains-kilomètres.

**Figure 9**  
**Niveau de productivité des éléments moteurs et remorqués**  
(en trains-kilomètres par élément)



Avec une réduction massive des éléments remorqués et une très légère baisse de la circulation des trains sur l'ensemble de la période 1970-1998, la productivité technique de la SNCF « hors TGV » croît à un rythme annuel moyen de 2,2 %. Le quasi-maintien de l'effectif des engins moteurs se traduit par une évolution de leur productivité technique conforme à celle des trains-kilomètres.

**Figure 10**  
**Évolution des trains-kilomètres et de l'effectif en matériel**  
(base 100 en 1970)

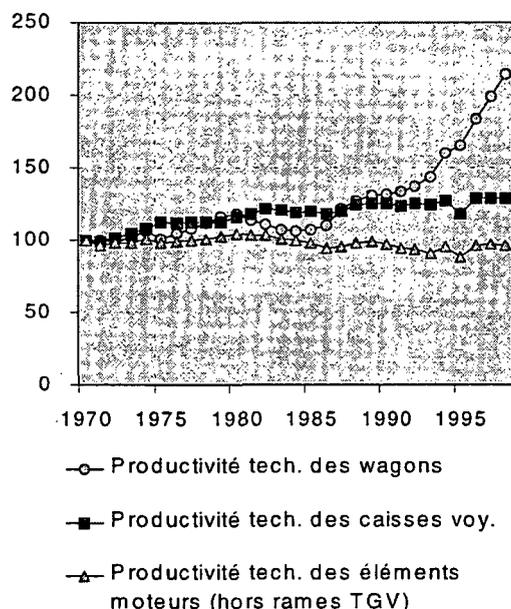


Les gains de productivité technique du matériel remorqué sont essentiellement réalisés dans le fret. La réduction par trois du parc de wagons est nettement supérieure à la baisse des trains-kilomètres (30 % sur l'ensemble de la période sous revue dont 25 % entre 1980 et 1998).

Avec une circulation des trains relativement constante et un parc de caisses et d'éléments moteurs en légère baisse, la productivité technique de l'activité voyageurs augmente de l'ordre de 30 % entre 1970 et 1998, l'essentiel de la croissance étant réalisé avant 1980 grâce à l'accroissement des trains-kilomètres de 25 % sur la décennie.

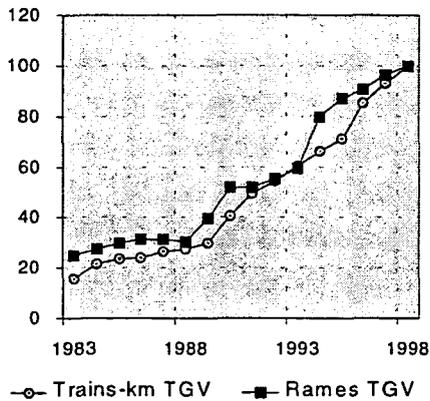
La stagnation de la circulation des trains (augmentation des trains-kilomètres voyageurs et baisse de même ampleur dans le fret) se traduit par le maintien du niveau de productivité du matériel moteur dont l'effectif reste globalement constant.

Figure 11  
**Évolution de la productivité technique des activités fret et voyageurs**  
 (base 100 en 1970)

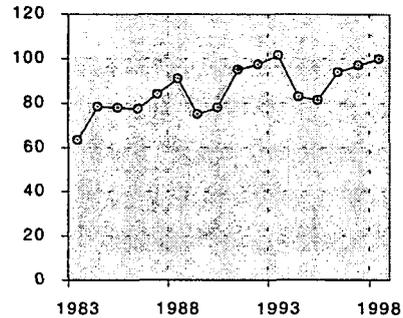


La productivité technique du train grande vitesse croît nettement plus que les autres activités de la SNCF. Sur la période d'exploitation du TGV, elle s'accroît de 60 %. Cette performance est marquée par deux périodes de baisse pouvant être attribuées à la mise en service des lignes nouvelles Atlantique (1989-1990), et Nord et Interconnexion Est (1993).

**Figure 12**  
**Évolution des trains-kilomètres TGV**  
**et des rames TGV**  
 (base 100 en 1998)



**Figure 13**  
**Évolution de la productivité**  
**technique des rames TGV**  
 (base 100 en 1998)

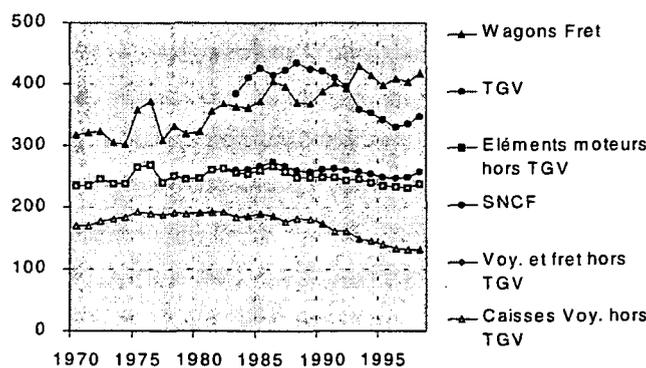


En résumé, la productivité technique de la SNCF est tirée par le fret et le TGV. La croissance de la productivité du transport de marchandises caractérise le phénomène de rattrapage d'une activité où le sureffectif de wagons est manifeste ; celle du TGV est symptomatique d'une activité en démarrage.

#### 2.1.2. Indicateur de remplissage

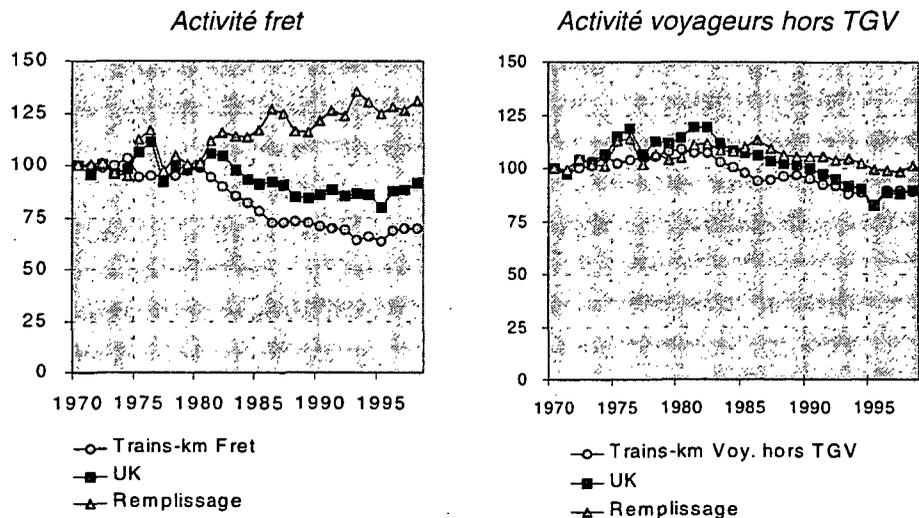
Le niveau de remplissage, mesuré en unités (voyageurs ou tonnes) par train, fournit des indications sur l'adéquation de l'offre à la demande en termes quantitatifs.

**Figure 14**  
**Niveau de remplissage en unités de trafic par train**



A l'échelle de la SNCF, le trafic évolue au même rythme que le parcours des trains avec pour corollaire une stagnation du niveau de remplissage des trains. Toutefois, cette évolution est différenciée selon les activités.

Figure 15  
Évolution des trains-kilomètres et du trafic  
(base 100 en 1970)



Sur les trois dernières décennies, le remplissage des trains de fret s'améliore à un rythme constant de l'ordre de 1 % par an (300 tonnes par train en 1970, 400 tonnes en 1998) grâce à une baisse du trafic moins rapide que la circulation des trains (- 9 % contre - 30 % sur la période 1970-1998).

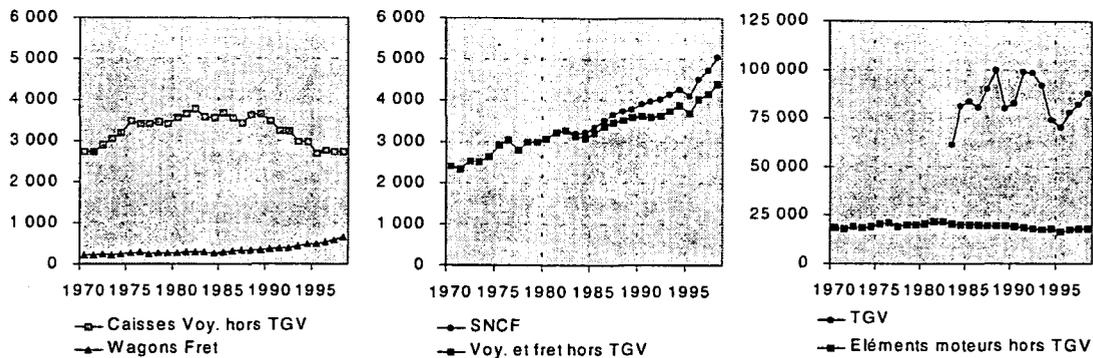
Dans le transport de passagers « hors TGV », l'évolution quasi-conjointe des trains-kilomètres et des voyageurs-kilomètres se traduit par un niveau de remplissage variant entre 194 voyageurs par caisse (en 1981) et 132 voyageurs par caisse (en 1998).

Pour le TGV, le niveau de remplissage des rames diminue avec la mise en service des TGV Rhône-Alpes et Nord moins fréquentés que le TGV Sud-Est. Ce n'est que dans la seconde moitié des années quatre-vingt-dix que le remplissage s'améliore mais sans retrouver le niveau de la fin des années quatre-vingt.

### 2.1.3. Productivité partielle du matériel roulant

Le niveau de productivité du matériel roulant reflète à la fois le niveau de remplissage et la productivité technique et, en cela, il caractérise l'adéquation de l'offre ferroviaire à la demande de déplacements.

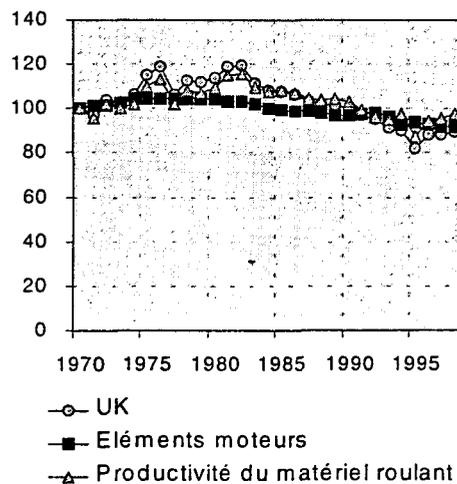
**Figure 16**  
**Niveau de productivité des matériels remorqués et moteurs**  
 (en milliers d'unités-kilomètres par élément)



Sur la période 1970-1998, la réduction massive des éléments remorqués, l'ajustement du parc moteur et le maintien du niveau de trafic ont permis à la SNCF d'accroître de façon importante la productivité de son matériel remorqué « hors TGV » avec une croissance continue de l'ordre de 2,6 % par an, et de limiter la baisse de la productivité des éléments moteurs (- 0,6 % hors TGV, + 0,6 % en incluant le TGV).

Avec une baisse des trafics, la division par trois des wagons de fret entre 1970 et 1998 se traduit par une croissance de 180 % de l'indicateur sur la période. La croissance de la productivité des éléments remorqués fret est continue. Le niveau de l'indicateur voyageurs-kilomètres par caisse croît de l'ordre de 2,7 % par an jusqu'en 1982, atteint un maximum de 3 785 voyageurs-kilomètres par caisse, puis décroît jusqu'en 1998 à un niveau de 2 730 voyageurs-kilomètres par caisse.

**Figure 17**  
**Évolution des éléments moteurs et du trafic en UK « hors TGV »**  
 (base 100 en 1970)

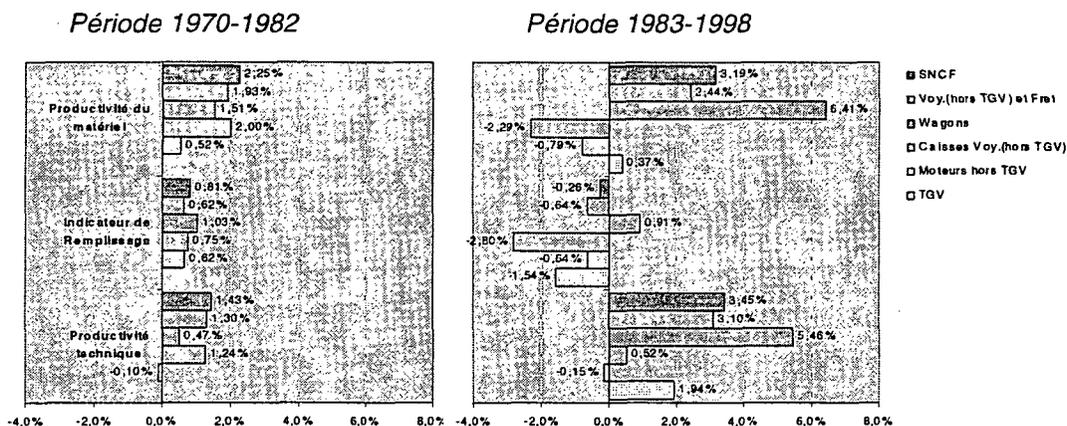


L'évolution de la productivité du matériel moteur de la SNCF « hors TGV » se scinde en deux périodes. Jusqu'en 1975, la légère augmentation des éléments et la croissance du trafic conduisent à une croissance de l'indicateur de 10 % sur les cinq ans. Les années suivantes, la crise pétrolière et la rationalisation du parc mènent à une réduction continue des éléments moteurs à un taux annuel moyen de l'ordre de 0,7 %. En 1998, la productivité du matériel roulant s'élève à 18,1 millions d'unités-kilomètres par élément moteur (hors rames TGV).

Les diverses étapes du lancement du TGV se traduisent par une discontinuité de l'évolution de la productivité du matériel roulant qui oscille autour de 80 millions de voyageurs-kilomètres par rame et par an.

#### 2.1.4. Productivité technique, remplissage et productivité partielle du matériel roulant

Figure 18  
Taux de croissance annuel des indicateurs de productivité et de remplissage



Pendant les années soixante-dix, la productivité technique, la productivité du matériel roulant et le niveau de remplissage évoluent positivement, quelle que soit l'activité. Les deux décennies suivantes sont marquées par l'écart très important des évolutions du transport de voyageurs et du transport de marchandises sur tous les indicateurs.

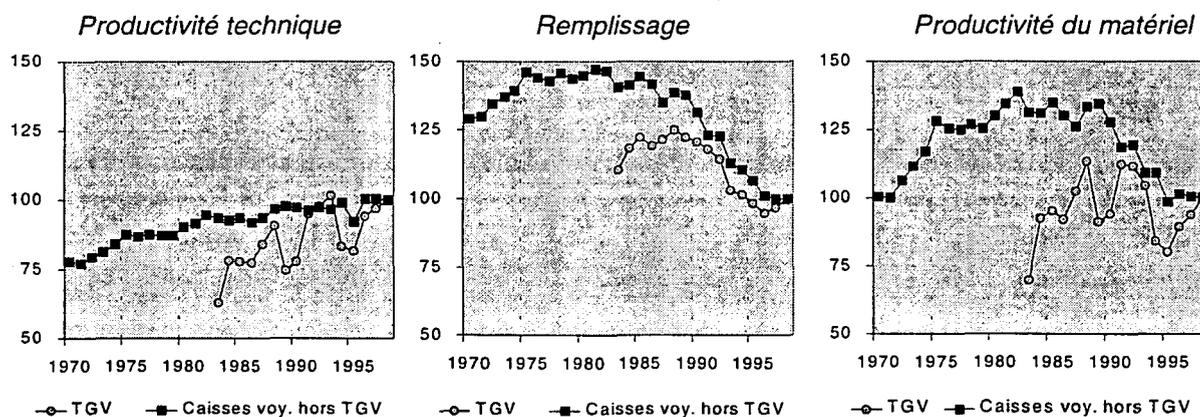
Le fret présente un taux de croissance de productivité technique dix fois supérieur à celui du transport de passagers « hors TGV » et maintient le rythme de croissance du niveau de remplissage de la décennie soixante-dix (0,91 % contre 1,03 %). L'activité connaît la plus forte croissance de productivité partielle du matériel roulant (+ 64 % entre 1970 et 1998) avec une accélération du taux de croissance à partir de 1985 (taux annuel moyen de 6,4 % sur la période 1985-1998 contre 1,5 % sur la période précédente). Cette évolution est le résultat de la conjugaison d'un accroissement de la productivité technique - permise par la réduction massive du parc de wagons par rapport à la baisse du trafic - et de l'amélioration du tonnage transporté par train de l'ordre de 20 % sur les 28 années sous revue.

La baisse des trains-kilomètres de fret, plus sensible que la baisse du trafic, se traduit entre autres par un accroissement du niveau de remplissage des trains. Cette évolution témoigne des efforts de rationalisation entrepris dans le transport de marchandises tels que la réduction du parc avec retrait des wagons en surnombre. Le non renouvellement des éléments remorqués induit toutefois un vieillissement du parc et par conséquent une baisse du niveau de service du fret. En outre, cette politique permet à la compagnie de diminuer ses coûts d'entretien de ce matériel en surnombre et d'orienter les dépenses vers le transport de voyageurs<sup>5</sup>.

Quant au transport de voyageurs, au cours des trois dernières décennies, le nombre de trains-kilomètres par caisse s'est accru de façon continue, de l'ordre de 0,9 % par an. Cette évolution est la même pour la circulation des trains TGV mais la tendance est marquée par les étapes de la construction du réseau et le surdimensionnement du parc en phase de démarrage d'une nouvelle ligne (cf. figure 19).

A partir de la fin des années quatre-vingt, le nombre de voyageurs par train décroît. Mais la chute du niveau de remplissage est plus nette sur le transport de voyageurs classique que sur le TGV et s'accélère nettement après 1990 (taux annuel moyen de 1,8 % entre 1985-1990 ; 3,4 % entre 1990-1998). De fait, la croissance du trafic à grande vitesse permet une augmentation de 25 % de la productivité du matériel roulant de l'activité, à l'inverse de l'activité voyageurs classique où elle baisse de 25 % sur la période 1985-1998.

**Figure 19**  
**Évolution de la productivité technique, du remplissage et de la productivité du matériel**  
**des rames TGV et des éléments remorqués voyageurs**  
(base 100 en 1998)



## 2.2. Productivité globale du capital et du travail

La productivité globale se mesure comme le rapport entre la production et un agrégat des facteurs. Contrairement à la productivité apparente des facteurs, la productivité *globale* tient compte du poids relatif de chaque facteur dans le processus de production.

<sup>5</sup> D'autres éléments peuvent avoir participé à cette évolution et notamment le partage des voies avec les trains de voyageurs qui limite la circulation des trains de fret en occupant le réseau et en imposant des contraintes horaires.

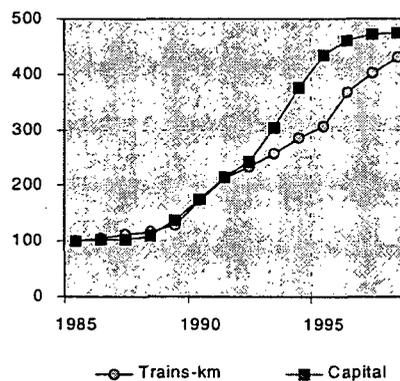
Plusieurs possibilités se présentent pour agréger les facteurs de production. Cette étude retient comme pondération les élasticités du produit par rapport aux facteurs comme pondérations ce qui suppose d'estimer la fonction de production<sup>6</sup> en imposant des rendements d'échelle constants.

Pour une compagnie ferroviaire, la production peut être exprimée en trains-kilomètres ou en unités kilométriques. Le parcours des trains tend à ne tenir compte que des caractéristiques d'offre alors que le trafic représente un point d'équilibre entre offre et demande. Ce dernier fait davantage intervenir des considérations commerciales (arguments tarifaires, coûts de marketing, publicité et autres dépenses liées à l'attraction de la demande). L'objet étant la mesure de la productivité au sens strict, la mesure retenue pour la production est exprimée en trains-kilomètres<sup>7</sup>. Dans cette étude, seuls sont considérés le travail et le capital, appréciés à leur coût d'usage en millions de francs 1980<sup>8</sup>. Le capital est représenté par les services qu'il fournit et le travail par les frais de personnel y compris les charges sociales.

### 2.2.1. TGV

Le transport de voyageurs à grande vitesse requiert un matériel spécifique et nécessite la construction d'infrastructures permettant de circuler à des vitesses supérieures à 200 km/h. L'amélioration de la qualité de service engendre donc des coûts nettement supérieurs à ceux de l'activité classique. La rentabilité des lignes TGV doit être suffisante pour justifier les dépenses engagées et compenser les difficultés subies par l'ensemble des autres activités.

Figure 20  
Évolution des trains-kilomètres et des services de capital TGV<sup>9</sup>  
(base 100 en 1970)



<sup>6</sup> Classiquement, la productivité globale est mesurée par des méthodes non paramétriques telles l'indice de Törnqvist où le poids d'un facteur de production est représenté par la part de coût du facteur dans le coût total. La comparaison des deux méthodes est présentée en annexe 2.

<sup>7</sup> Une évaluation de la productivité à partir des unités-kilomètres est réalisée et présente des résultats peu différents (cf. annexe 3).

<sup>8</sup> Le détail de la base de données est précisé en annexe 1.

<sup>9</sup> Le travail affecté à l'activité TGV est supposé proportionnel au parcours des trains de TGV (80 francs de 1996 par train-kilomètre).

Jusqu'en 1992, le nombre de trains-kilomètres évolue au même rythme que les services du capital. Le début des années quatre-vingt-dix est marqué par un léger ralentissement du taux de croissance du parcours des trains qui conduit à un surdimensionnement des équipements par rapport à l'offre. Cette situation tend à se résorber à la fin des années quatre-vingt-dix avec le ralentissement des programmes de construction de nouvelles lignes grande vitesse et une accélération de la croissance du nombre de trains-kilomètres après la mise en place du système Socrate.

La liaison entre le parcours des trains et les services du capital peut être modélisée par la relation suivante, le nombre de trains-kilomètres étant exprimé en millions, le capital en millions de francs de 1980<sup>10</sup> :

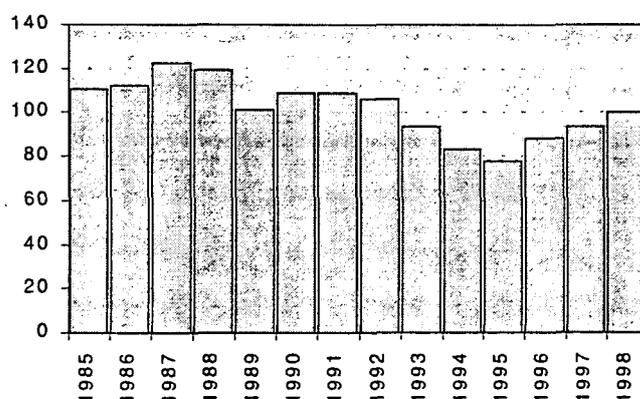
$$\ln(\text{Trains.km}_t) = - 2.30 + 0.82 \ln(\text{Capital}_t)$$

L'élasticité du produit par rapport au capital est estimée à 0,82. Autrement dit, un accroissement de 1 % des services du capital permet une augmentation de 0,82 % des trains-kilomètres. Ce paramètre étant inférieur à l'unité<sup>11</sup>, la fonction de production ainsi spécifiée présente des rendements décroissants à l'échelle.

Classiquement, l'industrie ferroviaire est perçue comme une activité à rendements croissants en raison des coûts fixes de démarrage importants et des effets de réseau permis par l'interconnexion des lignes. Toutefois, les lignes à grande vitesse ont été mises en service dans l'ordre des trafics décroissants et des coûts unitaires croissants, ce qui aboutit à faire apparaître des rendements légèrement décroissants ; par ailleurs, la fonction spécifiée dans cette étude retient pour facteur explicatif les services du capital et non les investissements ou le stock brut.

Avec une élasticité proche de un, la productivité apparente du capital est une approximation convenable de la productivité globale de l'activité.

Figure 21  
Évolution de la productivité apparente du capital dans l'activité TGV  
(base 100 en 1998)



<sup>10</sup> Détails de la régression en annexe 2.

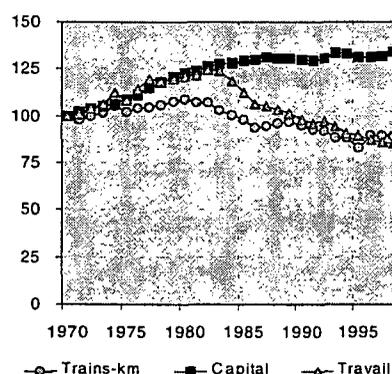
<sup>11</sup> Intervalle de confiance à 95 % : IC(95 %)=[0.74 ; 0.91]

Sur la période 1985-1998, la productivité oscille de plus ou moins 20 % autour du niveau de 1985 soit 30,3 trains-kilomètres pour 1 000 francs 1980 de services de capital. Les fluctuations du niveau de productivité reproduisent les diverses étapes de la construction du réseau LGV : l'essor du TGV Sud-Est à partir de 1985, la libération de capitaux lors de la construction des lignes Atlantique, Nord, Lyon-Valence puis de l'Interconnexion est. A ces éléments s'ajoutent des phénomènes conjoncturels, comme les difficultés soulevées par le système de réservation Socrate<sup>12</sup>, les grèves de 1995 ou, plus globalement, le cycle économique général.

## 2.2.2. Activité hors TGV

Le TGV a eu plusieurs impacts sur les autres activités de la SNCF. En particulier, les sommes immobilisées pour le développement du réseau à grande vitesse ont conduit à une contraction des montants consacrés au renouvellement des équipements, notamment en termes de matériel remorqué. En termes d'offre, une partie du trafic « Grandes lignes » a été absorbée par le TGV.

Figure 22  
Évolution des trains-kilomètres, capital et travail « hors TGV »  
(base 100 en 1970)



Les dépenses en capital étant orientées de façon prioritaire vers l'activité TGV, le taux de croissance des services du capital des autres activités de la SNCF fléchit à partir de 1985 (1,7 % par an entre 1970 et 1985 contre 0,3 % sur la période suivante). Dès 1982, le parcours des trains décroît en raison de plusieurs facteurs : la substitution du trafic trains classiques par le TGV, la concurrence du mode routier dans le fret et le transport de passagers, un contexte économique général peu favorable (contre-choc pétrolier).

Le calcul de l'indice de productivité globale réclame d'imposer des rendements constants à l'activité<sup>13</sup>. En exprimant les services du capital et les frais de personnel en francs de 1980, la fonction de production contrainte est alors :

$$\ln (\text{Trains.km}_t) = -3,76 + 0,19 \ln (\text{Capital}_t) + 0,81 \ln (\text{Travail}_t)$$

<sup>12</sup> Socrate : Système Offrant à la Clientèle des Réservations d'Affaires et de Tourisme en Europe.

<sup>13</sup> Le test d'hypothèse de rendements constants est présenté en annexe 3.

Les dépenses en infrastructures et en matériel roulant pour le transport de passagers « classique » et le fret sont effectuées principalement au titre de l'entretien et du renouvellement. Le facteur capital est donc peu corrélé avec le parcours des trains, ce qui explique le poids prépondérant du travail dans la fonction de production des trains-kilomètres avec une élasticité de 0,81.

En moyenne sur l'ensemble de la période 1970-1998, la productivité de l'activité « hors TGV » est de 26 trains-kilomètres pour 1 000 francs (de 1980) de facteur. Toutes choses égales par ailleurs, une variation de 1 % des frais de personnel (respectivement des services de capital) se traduit par une baisse de 0,81 % (resp. 0,19 %) de la productivité globale<sup>14</sup>.

Figure 23  
Évolution de la productivité globale autour de la valeur moyenne dans l'activité « hors TGV » (base 100 en 1998)

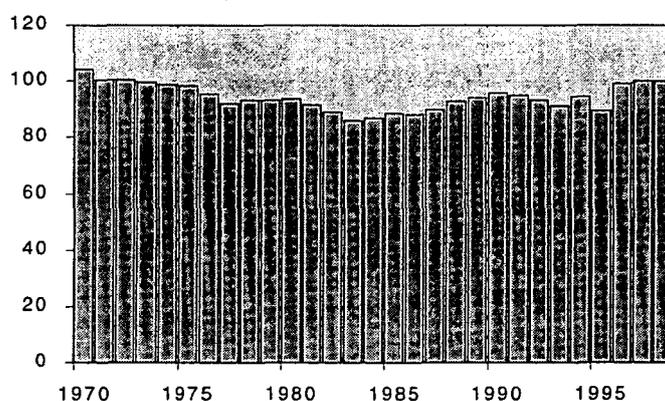
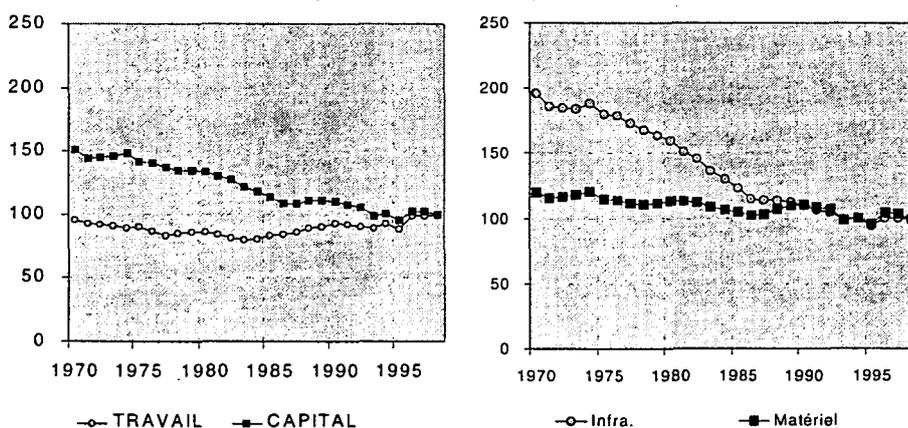


Figure 24  
Évolution de la productivité partielle du travail et du capital, infrastructures et matériel, de l'activité « hors TGV » (base 100 en 1998)



<sup>14</sup> Toutefois, il est vraisemblable que les élasticités aient évolué au cours des trente dernières années avec la mise en place de modes de production de plus en plus intensifs en capital. Sur une analyse menée sur des périodes plus courtes, il est possible d'apprécier de tels changements dans la structure de la production. Ainsi, en régressant sur la période 1977-1998, l'élasticité des trains-kilomètres par rapport aux services du capital est estimée à 0,34 et 0,66 pour le travail ; sur la période 1983-1998, ces élasticités sont respectivement de 0,51 et 0,49.

La stabilité de la productivité apparente du travail et du matériel témoigne de l'ajustement de ces facteurs à l'évolution de la production. Toutefois, aucune relation de causalité ne peut être déduite des fonctions de production. Autrement dit, l'estimation ne fournit pas les éléments permettant de dire si la réduction des coûts a conduit à une baisse de la circulation des trains ou si l'évolution négative du nombre de trains-kilomètres a amené la SNCF à diminuer les facteurs affectés à l'activité.

En outre, la chute de la productivité apparente du capital, et plus particulièrement celle des infrastructures, est difficile à analyser car les trois-quarts du réseau parcourus par les TGV ne sont pas des lignes à grande vitesse. La contrepartie de ce partage des lignes est qu'une fraction des investissements réalisés sur le réseau « classique » serait donc à imputer au TGV.

# CONCLUSION

Les principaux enseignements de la présente étude sont les suivants :

1. *La pertinence de la décomposition par grandes activités pour l'étude des fonctions de production*

La décomposition de l'activité de la SNCF en séparant le TGV du train classique permet d'identifier des fonctions de production spécifiques à chacune des activités, alors que les tentatives visant à dégager des fonctions de production simplifiées pour l'ensemble de la SNCF n'ont pu aboutir à des résultats satisfaisants.

La fonction de production de l'activité TGV et celle des trains classiques sont radicalement différentes ; la première fait essentiellement appel au facteur capital (infrastructures nouvelles et matériel roulant TGV spécifique) ; la seconde, au facteur travail.

2. *Le TGV : une activité à rendements légèrement décroissants par rapport au capital*

Le rendement d'échelle de la production de trains-kilomètres TGV par rapport au capital (infrastructure des lignes à grande vitesse et matériel roulant TGV) ressort à un niveau un peu inférieur aux rendements constants (élasticité de 0,82). Celui de la production de voyageurs-kilomètres TGV par rapport au capital ressort également à un niveau correspondant à des rendements décroissants (élasticité de 0,67).

On aurait pu s'attendre à des rendements croissants, notamment du fait des économies de réseau permises par l'interconnexion des lignes à grande vitesse. Toutefois, les lignes à grande vitesse ont été mises en service dans l'ordre des trafics décroissants et des coûts unitaires croissants ce qui aboutit à faire apparaître des rendements légèrement décroissants par rapport aux services du capital. Cet effet est d'ailleurs plus net si l'on considère la production commercialisée (voyageurs-kilomètres) et non la production technique (trains-kilomètres).

3. *Le train classique : une activité à rendements légèrement décroissants par rapport au travail*

Les rendements d'échelle de l'activité train classique (voyageurs et fret) par rapport au travail présente également des caractéristiques de rendements presque constants (élasticité par rapport au travail de 0,81 de la production mesurée en trains-kilomètres ou de 0,79 mesurée en unités-kilomètres). La chute de la production de trains-kilomètres de l'activité classique depuis le milieu des années quatre-vingt a en effet à peu près suivi celle de la quantité de travail sur cette même période, avec un décalage de trois ans environ.

Les tests économétriques effectués ne permettent pas de mettre en évidence la corrélation entre les services du capital et le niveau de production pour l'activité train classique ; cette relation ne pourrait être mise en évidence que sur une période plus longue que celle de la présente étude.

4. *L'évolution de l'utilisation du matériel roulant : le contrecoup du TGV sur les trains classiques de voyageurs*

L'évolution des paramètres d'utilisation du matériel roulant est peu différenciée d'un type de matériel à l'autre sur la période 1970-1982 (avant le TGV).

Par contre, la période 1983-1998 (après la première ligne à grande vitesse) fait apparaître des évolutions très contrastées de ces indicateurs. En particulier, les matériels voyageurs classiques remorqués voient leur taux de remplissage baisser de 2,8 % en moyenne par an sur la période. Cela représente une baisse assez significative de 50 % en base 1998 sur l'ensemble de cette période. Cette baisse n'est que très peu compensée par une amélioration de la productivité technique de ces matériels (+ 0,52 % par an).

Le développement de l'activité TGV a donc eu pour effet global de réduire significativement le nombre moyen de voyageurs dans les trains classiques et, par voie de conséquence, la productivité partielle de la production de transport ferroviaire classique de voyageurs par rapport au matériel roulant.

Cet effet permet d'éclairer le paradoxe apparent de la situation de la SNCF, qui a connu pendant les années quatre-vingt-dix une forte chute de ses résultats comptables alors que les trafics TGV de la plupart des projets de lignes à grande vitesse ont été à peu près à la hauteur des prévisions (à l'exception notable de la LGV Nord). Compte tenu des contraintes de desserte d'aménagement du territoire et du dimensionnement du parc pour l'absorption des pointes exceptionnelles, l'activité trains classiques voyageurs n'a pu réduire ses coûts de production aussi vite que son trafic a chuté. Le coût de ce maintien de l'offre en trains classiques se chiffre à plusieurs milliards de francs par an.

Le contrecoup sur les trains classiques du développement des relations TGV ressort ainsi comme un élément important de la dégradation de l'équilibre financier de la SNCF sur cette période

5. *La faiblesse de l'évolution de la productivité de chaque grande activité*

D'autres travaux sur la productivité ferroviaire concluent à un accroissement de la productivité de la SNCF sur la période des trente dernières années. Ces travaux incluent toutefois dans la mesure de la production certaines subventions des pouvoirs publics ainsi que la production immobilisée.

La présente étude, où la production est mesurée en unités physiques (trains-kilomètres ou voyageurs-kilomètres ou tonnes-kilomètres), n'a pas permis de mettre en évidence d'évolutions significatives de la productivité de chacune des grandes activités considérées (TGV et hors TGV) sur la période des trente dernières années.

L'évolution positive de la productivité globale de la SNCF provient donc pour une large part d'un effet de substitution entre les modes de production TGV et train classique.



## *Références méthodologiques et statistiques*

- (1) SNCF, (oct.1993), « Statistiques rétrospectives », direction du Contrôle de gestion - Département méthodes et systèmes, édition 1984 mise à jour n° 12 (résultats 1992).
- (2) SNCF, (années diverses), « Mémentos statistiques », direction du Contrôle de gestion - Département méthodes et systèmes.
- (3) Comptes de l'exercice SNCF (1980 à 1984, 1996).
- (4) OEST, E. Quinet et al, (nov. 1993), « Le coût du capital des infrastructures de transport » - rapport final.
- (5) B. Chane-Kune, N. Mulder, (2000), « Stock de capital et productivité dans les transports Français. Une comparaison internationale ». Document de travail du CEPII.
- (6) K. Briard (2001), « Évolution et comparaison de la productivité globale des facteurs : la SNCF et la Deutsche Bahn ».
- (7) N. Mulder, A. Rémy, (2001), « La productivité dans les transports », dans la collection « Les études du SES ».



<b>ANNEXE 1 : MESURE DES FACTEURS DE PRODUCTION</b> .....	<b>33</b>
1. TRAVAIL .....	33
2. CAPITAL .....	35
<b>ANNEXE 2 : MESURE DE LA PRODUCTIVITÉ GLOBALE</b> .....	<b>37</b>
1. ESTIMATION ÉCONOMÉTRIQUE DE LA PRODUCTIVITÉ .....	37
1.1. Activité TGV .....	38
1.2. Activité hors TGV .....	40
1.2.1. <i>Estimation de la fonction de production</i> .....	40
1.2.2. <i>Mesure de la productivité globale</i> .....	42
1.3. Ensemble SNCF .....	43
2. COMPARAISON DES MÉTHODES DE CALCUL DE LA PRODUCTIVITÉ GLOBALE DES FACTEURS .....	44
<b>ANNEXE 3 : TESTS D'HYPOTHÈSES - RENDEMENTS D'ÉCHELLE CONSTANTS</b> .....	<b>47</b>
<b>ANNEXE 4 : VARIANTE - PRODUCTION EN UNITÉS-KILOMÈTRES</b> .....	<b>49</b>
1. ESTIMATION DES FONCTIONS DE PRODUCTION .....	49
2. ÉVOLUTION DE LA PRODUCTIVITÉ .....	50
2.1. Activité TGV .....	50
2.2. Activité hors TGV .....	50
2.3. Ensemble SNCF .....	51
3. TESTS DE RENDEMENTS CONSTANTS .....	51



# ANNEXE 1

## Mesure des facteurs de production

### 1. TRAVAIL

La quantité de travail est mesurée par les frais de personnel, charges sociales comprises, évalués en francs constants de 1980<sup>15</sup>. L'absence de données sur la quantité de travail affectée à l'activité TGV oblige à estimer les coûts affectés à l'activité.

*Tableau 2*  
**Estimation du coût d'exploitation (hors péage)**  
**d'un train de voyageurs hors frais généraux et coûts de commercialisation**

	TGV en unité simple	TGV en unité multiple	TGV <sup>16</sup>
<b>Hypothèses</b>			
Heures de circulation / an	2000	2000	2000
Vitesse moyenne (km/h)	165	165	165
<b>Coûts kilométriques (franc/km)</b>			
Coût de possession matériel (cf. tableau 3)	27	54	50
<b>Travail</b>			
Équipages (cf. tableau 4)	13	19	15
Divers travail	27	59	37
<b>TOTAL</b>	<b>67</b>	<b>124</b>	<b>102</b>

*Tableau 3*  
**Estimation du coût de possession du matériel TGV**

	TGV en unité simple	TGV en unité multiple
<b>Hypothèses</b>		
Coût d'achat (en millions de francs 96)	100	200
Durée de vie (ans)	27	27
Taux d'intérêt	8%	8%
<b>Coût de possession du matériel sur la base d'une annuité (principal et intérêts) et d'un taux d'intérêt constants</b>		
KF96/an	8883	17765
F96/h	4441	8883
F96/km	27	54

<sup>15</sup> Sauf mention particulière, les mesures présentées dans cette étude sont exprimées en francs de 1980.

<sup>16</sup> TGV -0.7 Unité simple + 0.3 Unité multiple

*Tableau 4*  
**Estimation du coût d'équipage TGV**

	<i>TGV en unité simple</i>	<i>TGV en unité multiple</i>
<b>Hypothèses</b>		
Parcours d'un train (1 000 km/an)	330	330
Vitesse moyenne d'un TGV (km/h)	165	165
Heures de circulation du train/an	2000	2000
Nombre de mécaniciens par train	1	1
Nombre de contrôleurs par train	3	5
Frais de personnel par agent (KF/an)	300	300
Heures de travail à bord du train/an	800	800
<i>Heures de travail à bord du train/jour</i>	4	4
<i>Jours de travail/an</i>	200	200
Frais de personnel (KF/an)	27	54
Frais de personnel (F/km)	13 F	19 F
* <i>hors accueil au pied du train</i>		

L'évaluation des coûts du travail repose en partie sur une hypothèse de vitesse des TGV. La mise en relation du parcours train et du nombre de rames permet d'estimer une vitesse moyenne des TGV de 165 km/h en 1998. La valeur alors estimée du coût du travail concerne les effectifs directement affectés à la circulation des TGV mais ne tient pas compte des aspects commerciaux et des frais généraux. Aussi, le coût du travail peut-il vraisemblablement être estimé à 80 francs (aux conditions économique de 1996) par train-kilomètre.

Compte tenu de la part encore modeste des trains-kilomètres de TGV sur l'ensemble de la période étudiée, les évaluations sont robustes aux différentes hypothèses. Deux estimations des paramètres sont présentées dans le tableau ci-dessous. Le modèle de référence reprend une hypothèse du coût du travail de 80 francs par train-kilomètre TGV, le modèle de variante retient une hypothèse de 50 francs:

	<i>Paramètres libres</i>		<i>Paramètres contraints</i>	
	<i>Réf.</i>	<i>Variante</i>	<i>Réf.</i>	<i>Variante</i>
Cst	3,13	3,42	-3,76	-3,69
Coef. Capital	-0,23	-0,19	0,19	0,28
Coef. Travail	0,51	0,45	0,81	0,72

Malgré une différence importante des hypothèses considérées (coût du travail entre 50 francs et 80 francs par train-kilomètre TGV), les paramètres des fonctions de production estimées sont voisins. Les résultats présentés dans la présente étude restent donc valables pour un coût du travail inférieur à 80 francs par train-kilomètre TGV.

## 2. CAPITAL

Le facteur capital est représenté par ses services<sup>17</sup> mesurés en francs constants 1980. L'évaluation des services du capital est réalisée par la méthode de l'inventaire permanent qui nécessite de collecter les séries de dépenses d'investissements antérieures aux années effectivement étudiées et ceci sur une période correspondant à la durée de vie des actifs.

Tableau 5  
Durée de vie des actifs en capital (en années)<sup>18</sup>

	Durée
Bâtiments et autres constructions	45
Matériel roulant <sup>19</sup>	27
Autres équipements	16

Les services de chacune des composantes du capital (matériel, infrastructures et équipement) sont évalués indépendamment avant d'être agrégés en tenant compte des retards inhérents à la mise en place opérationnelle. Les retards retenus sont de trois ans pour l'infrastructure, un an pour les autres actifs comme le matériel. Ces délais correspondent à la moitié de la durée séparant la date d'engagement des premières dépenses et la date de mise en service des équipements.

Les services du capital sont définis comme :

$$\text{Services du capital}_t = K_{t-3}^{\text{Infra}} + K_{t-1}^{\text{Matériel}} + K_{t-1}^{\text{Autres}}$$

$$\text{avec } K_t^i = (\delta_i + r) \times \left[ S_{t-1}^i + I_t^i - \delta_i \left( \sum_{j=t-1-L}^{t-1} I_j^i \right) \right]$$

où

$K^i$  : services offerts par l'actif  $i$  ;

$S^i$  : stock net d'actif  $i$  ;

$I^i$  : dépenses d'investissement en actif  $i$  ;

$L^i$  : durée de vie en années de l'actif  $i$  ;

$\delta_i$  : taux de dépréciation arithmétique de l'actif  $i$

$r$  : taux de rendement du capital (5 % par hypothèse quelque soit l'actif).

<sup>17</sup> Une question controversée dans les analyses de productivité est de savoir si la contribution du capital à la production doit être évaluée par le stock brut, le stock net (stock brut hors dépréciation ou coût d'usage) ou les services rendus par ce stock. L'inconvénient majeur des deux premières mesures est d'être, précisément, des mesures de stock alors que toutes les autres variables sont des mesures de flux (circulation des trains, dépenses de personnel etc.).

L'évaluation de ces services nécessite de disposer du rendement du stock. Dans les industries généralement déficitaires comme les chemins de fer, on préfère retenir un taux de rendement fixe de 5 %.

Les estimations sont réalisées via une approche néoclassique standard qui consiste à relier le prix des services du capital au prix d'achat d'un actif et sa valeur actualisée effective (somme des flux futurs de services fournis par cet actif). Toutefois, selon la structure choisie pour la dépréciation, la nature des anticipations d'appréciation du capital et le taux nominal de rendement ou le taux d'escompte, les applications empiriques peuvent présenter des résultats très différents.

En France, les infrastructures et le matériel ferroviaire n'ont pas un marché clairement identifié sur lequel peuvent être réalisées des plus ou moins values. Ainsi, dans cette étude, le terme d'appréciation n'est pas pris en compte.

<sup>18</sup> Le cadre conceptuel est cohérent avec l'étude du CEPII de B. Chane-Kune et N. Mulder « *Stock de capital et productivité dans les transports Français. Une comparaison internationale* » dans la « *Productivité dans les transports* » (2001).

<sup>19</sup> Durée de vie de 25 ans car la durée de vie commerciale est d'environ 35 ans mais comprend une rénovation à mi-vie non prise en compte.

Tableau 6  
Sources des dépenses d'investissements en capital<sup>20</sup>

	TGV		HORS TGV	
	Infra. (hors GOP)	Équipement et entretien	Infra. (hors GOP)	Mat, équip. et entretien
1950				
...				
1974			<b>OEST</b>	
1975	<b>OEST</b>		Installations fixes	
1976	"Lignes nouvelles"		+	
1977			banlieue	
1978		<b>Mémento SNCF</b>		
1979			<b>SNCF</b>	
1980		En proportion	Matériel TGV	Matériel + équip. SNCF -
1981		du matériel TGV		Mat. + équip. TGV
1982		(base 1992)		
...				
1990				
1991				
1992			<b>Mémento SNCF</b>	
1993			Installations fixes	
1994		* Estimation	**Estimation	+ banlieue
1995				
1996				
1997	<b>Mémento</b>		En proportion équip.	
1998	<b>SNCF</b>		et mat. base 1996	<b>Chiffre de 1997</b>

GOP : Grandes Opérations Périodiques

\* Les dépenses en achat de rames TGV sont reconstituées à partir du prix moyen d'une rame TGV, estimé à 80 millions de francs de 1980, et aux variations annuelles du nombre de rames du parc. Lorsque ces variations sont négatives, les dépenses en matériel roulant sont supposées nulles.

\*\* Les dépenses en entretien sont fondées sur les dépenses en mobilier et outillage pondérées par le poids du matériel TGV dans « Matériel roulant y compris matériel acquis en location vente et en crédit-bail » des Mémentos SNCF. Si cette valeur est supérieure au montant signalé sous le titre « Dépenses en mobilier et outillage - national », la valeur retenue est celle de ce dernier.

<sup>20</sup> Les données fournies par l'OEST couvrent une période insuffisante pour déterminer le stock net de capital en 1970. Le chiffre de l'année 1958 est donc celui du bilan.

## **ANNEXE 2**

### **Mesure de la productivité globale**

La productivité est un indicateur important de l'efficacité avec laquelle une firme rationalise son processus de production en limitant le « gaspillage » par une meilleure combinaison des facteurs. La productivité globale des facteurs s'exprime comme le ratio de la production et d'un agrégat des facteurs de production. La difficulté consiste alors à évaluer les pondérations de chacun des facteurs. Cette étude choisit de les estimer statistiquement via la spécification de fonctions de production présentant des rendements d'échelle constants. Classiquement, des mesures non paramétriques sont aussi utilisées pour évaluer la productivité globale. Les aspects théoriques des deux méthodes sont comparés dans la seconde partie de cette annexe.

#### **1. ESTIMATION ÉCONOMÉTRIQUE DE LA PRODUCTIVITÉ**

Deux facteurs sont considérés : les services du capital et le travail. La fonction de production estimée est de la forme générale  $Y = AX_1^{\alpha_1} X_2^{\alpha_2}$

où

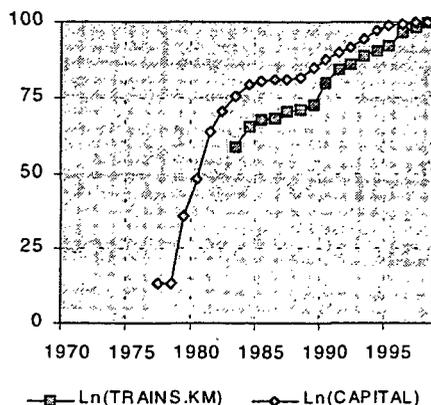
Y : production ;  
X<sub>i</sub> : facteur de production i ;  
A : productivité globale ;  
α<sub>i</sub> : élasticité du produit par rapport au facteur i

ou, de façon équivalente sous forme log-linéaire :

$$\ln(Y) = a + \alpha_1 \ln(X_1) + \alpha_2 \ln(X_2) \quad \text{avec } a = \ln(A)$$

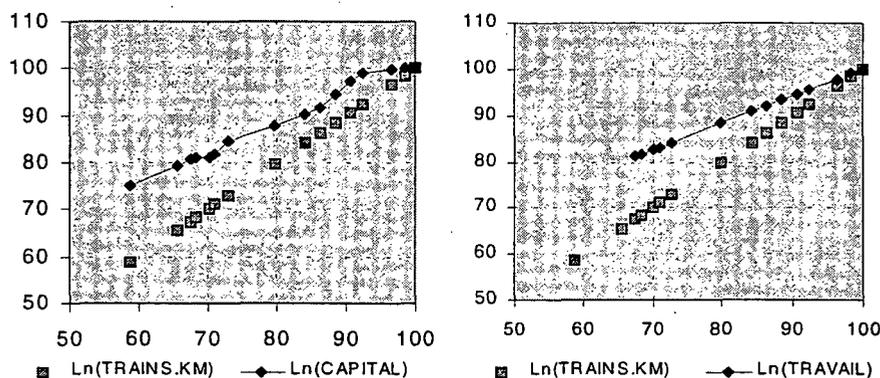
## 1.1. Activité TGV

Figure 25  
Évolution  
(base 100 en 1998)



L'évolution conjointe des séries de trains-kilomètres TGV et de services du capital associés à l'activité présage d'une liaison linéaire de bonne qualité. Celle-ci est confirmée par le nuage de points représentant l'évolution de la variable  $\text{Ln}(\text{Capital})$  en fonction de  $\text{Ln}(\text{Trains-km})$ .

Figure 26  
Évolution des variables  $\text{Ln}(\text{Capital})$  et  $\text{Ln}(\text{Travail})$   
en fonction de la variable  $\text{Ln}(\text{Trains-km})$   
(base 100 en 1998)



Le mode d'estimation des dépenses en travail pour l'activité TGV incite à ne pas tenir compte du facteur travail comme variable explicative. Seule la relation entre la circulation des TGV et les services du capital est alors modélisée<sup>21</sup>. L'écart type est précisé entre parenthèses.

$$\text{Ln}(\text{Trains.km}_t) = -2.30 + 0.82 \text{Ln}(\text{Capital}_t)$$

(2.255) (0.035)

<sup>21</sup> Seules sont prises en compte les infrastructures de lignes à grande vitesse (LGV) alors que une partie des parcours TGV s'effectue sur ligne classique.

Le coefficient de détermination multiple  $R^2$  de 98 % et la significativité des paramètres<sup>22</sup> attestent de la fiabilité de la relation.

*Remarque* : en régressant sur les services fournis par chacune des composantes du capital, la fonction de production prend la forme suivante ( $R^2= 97,5 \%$ ) :

$$\ln (\text{Trains.km}_t) = - 1.73 + 0.45 \ln (\text{Infra}_{t-3}) + 0.37 \ln (\text{Matériel et autres}_{t-1})$$

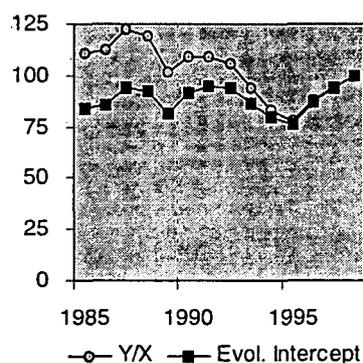
(0.250)    (0.159)                    (0.161)

L'estimation des élasticités lors de la régression permet de définir quel est le facteur « déterminant » dans la production. En particulier, lorsqu'un seul facteur  $X$  est significatif dans la prédiction de la production  $Y$  et que l'élasticité est proche de l'unité, le rapport  $Y/X$  se confond avec la productivité globale.

Dans le cas de rendements d'échelle proches de l'unité, l'évolution de l'ordonnée à l'origine de la fonction de production sous forme log-linéaire reflète les modifications de la technologie, l'intensité avec laquelle le travail et le capital sont utilisés dans les améliorations de l'organisation à travers le temps.

De la même façon, lorsqu'un seul facteur détermine la production, l'écart entre l'évolution de la productivité apparente du facteur et celle de l'ordonnée à l'origine est un indicateur de l'importance des rendements d'échelle dans la productivité. Avec des rendements d'échelle de 82 %, l'activité TGV se prête bien à ce type d'analyse.

*Figure 27*  
**Évolution de la productivité TGV**  
(base 100 en 1998)



La figure rapproche l'évolution de la productivité apparente des services du capital (désignée par  $Y/X$ ) et l'évolution du ratio  $Y/X^r$ , en désignant par  $r$  les rendements d'échelle de l'activité (ici l'élasticité du produit au capital). L'écart est de l'ordre de 25 % sur les 13 ans.

<sup>22</sup> Statistiques de Student de (- 9.02) pour la constante, 23.75 pour la variable explicative ; c'est-à-dire bien supérieures, en valeur absolue, à la valeur critique de 1,96 du Student au niveau de confiance de 95 %.

## 1.2. Activité hors TGV

### 1.2.1. Estimation de la fonction de production

Figure 28  
Évolution des variables  $\text{Ln}(\text{Trains-km})$ ,  $\text{Ln}(\text{Capital})$  et  $\text{Ln}(\text{Travail})$ <sup>23</sup> pour le hors TGV  
(base 100 en 1998)

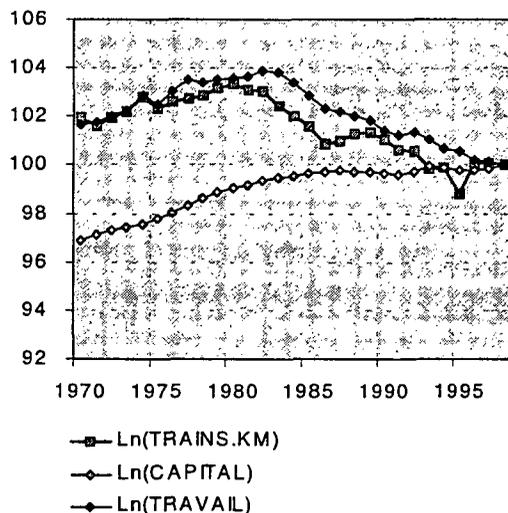
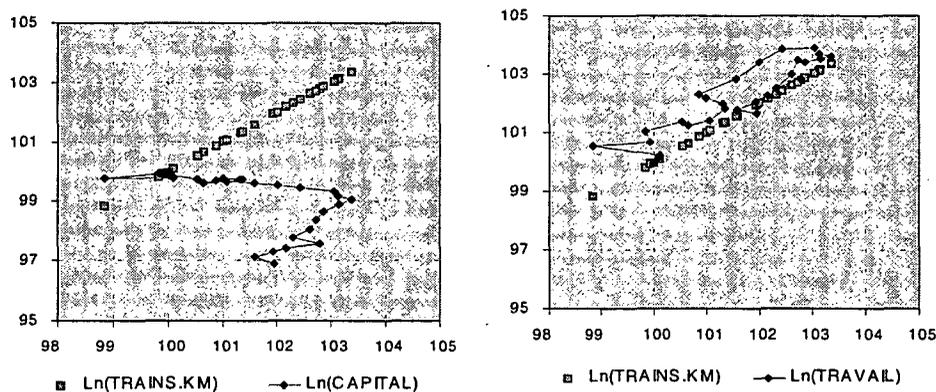


Figure 29  
Nuages de points des variables  $\text{Ln}(\text{Capital})$  et  $\text{Ln}(\text{Travail})$  en fonction de  $\text{Ln}(\text{Trains-km})$   
pour le hors TGV  
(base 100 en 1998).



Le graphique de corrélation entre les trains-kilomètres « hors TGV » et la quantité de travail affectée à l'activité présage d'une faible liaison entre les deux variables.

<sup>23</sup> La quantité de travail de l'activité hors TGV utilisée dans les différentes évaluations présentées dans ce paragraphe est déterminée par différence à partir d'une estimation du coût du travail de 80 F par train-kilomètre de TGV. Les résultats sont robustes à cette hypothèse (cf. annexe 1).

La matrice de corrélation confirme cette première impression :

LN	TRAINS.KM	CAPITAL	TRAVAIL
TRAINS.KM	1		
CAPITAL	-0,54	1	
TRAVAIL	0,90	-0,30	1

L'analyse de régression confirme les remarques descriptives précédentes. Dans la liaison simple entre  $\ln(\text{Trains-km})$  et  $\ln(\text{Travail})$ , la constante n'est pas significative (statistique de Student de 0,92).

L'estimation de la fonction de production à partir des deux facteurs primaires présente un  $R^2$  ajusté de 89 % et tous les paramètres sont significatifs<sup>24</sup> :

$$\ln(\text{Trains.km}_i) = 3,13 - 0,23 \ln(\text{Capital}_i) + 0,51 \ln(\text{Travail}_i)$$

(0.722)      (0.052)      (0.041)

Le modèle avec contrainte de rendements constants (somme des élasticités égale à l'unité) est équivalent à la régression simple de la variable  $[\ln(\text{Trains.km}_i) - \ln(\text{Travail}_i)]$  sur la variable  $[\ln(\text{Capital}_i) - \ln(\text{Travail}_i)]$ . Tester la significativité du paramètre associé à la variable explicative revient alors à tester l'hypothèse de rendements d'échelle constants. Avec une statistique de Student de 3,40, l'hypothèse n'est pas rejetée. Bien que le  $R^2$  soit de 55 %, les paramètres ainsi déterminés peuvent être retenus, la fonction de production Cobb-Douglas est alors :

$$\ln(\text{Trains.km}_i) = -3,76 + 0,19 \ln(\text{Capital}_i) + 0,81 \ln(\text{Travail}_i)$$

(0.039)      (0.056)      (0.056)

Le tableau ci-dessous rappelle les paramètres des fonctions de production estimées ainsi que leur intervalle de confiance au niveau 95 %<sup>25</sup>.

Activité j	TGV			HORS TGV			HORS TGV		
	Paramètres libres			Paramètres libres			Rendements constants		
	Coef.	IC(95 %)		Coef.	IC(95 %)		Coef.	IC(95 %)	
Constante	-2,30	-3,30	-1,30	3,13	1,71	4,55	-3,76	-3,84	-3,68
Capital j	0,82	0,72	0,92	-0,23	-0,33	-0,13	0,19	0,08	0,30
Travail j				0,51	0,43	0,59	0,81	0,70	0,92
R <sup>2</sup>	98 %			89 %					

Les intervalles de confiance confirment le signe des paramètres des fonctions de production. En particulier, avec une confiance de 95 %, le paramètre associé au capital de la fonction de production de l'activité « hors TGV » est négatif ce qui s'interprète comme une relation négative entre la circulation des trains et les services du capital. Ce constat peut être justifié par l'insuffisance de capital investi pour compenser l'usure du réseau non intégrée dans le taux de dépréciation.

<sup>24</sup> Statistiques de Student de 4.33 pour la constante, - 4.40 pour le Capital et 12.32 pour le Travail.

<sup>25</sup> La valeur estimée  $m$  d'un paramètre donné représente, en fait, la valeur centrale d'un intervalle dont les bornes sont  $[m - t_{\alpha}\sigma]$  et  $[m + t_{\alpha}\sigma]$  où  $t_{\alpha}$  est la valeur critique de la statistique de Student au niveau de confiance  $\alpha$  ( $t_{95\%} = 1,96$ ) et  $\sigma$  est l'écart-type du paramètre (précisé entre parenthèses dans l'écriture des fonctions de production). Pour  $\alpha = 95\%$ , la « vraie » valeur du paramètre a ainsi une probabilité de 95 % d'appartenir à l'intervalle de confiance IC (95 %).

### 1.2.2. Mesure de la productivité globale

Pour l'activité « hors TGV », l'analyse de régression montre que le seul facteur travail ne permet pas d'expliquer de façon correcte la circulation des trains. La productivité partielle du travail ne peut donc être retenue comme approximation de la productivité globale des facteurs. La régression de la variable  $\text{Ln}(\text{Trains-km}_i^{\text{HorsTGV}})$  sur  $\text{Ln}(\text{Travail}_i^{\text{HorsTGV}})$  et  $\text{Ln}(\text{Capital}_i^{\text{HorsTGV}})$  est significative et explique 89 % de la variance de la variable dépendante.

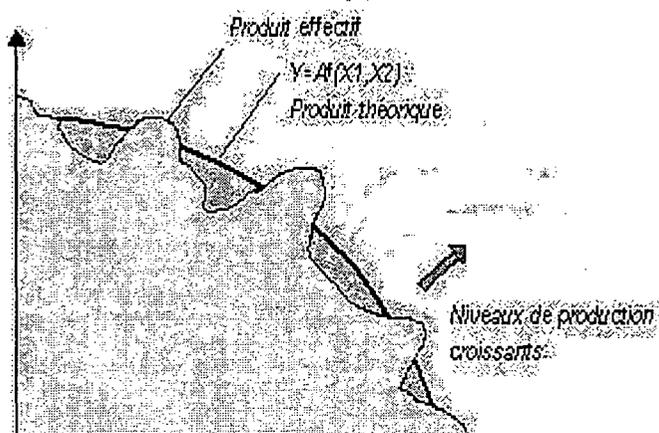
La fonction de production estimée est une relation « idéale » entre la production et les facteurs. Elle est déterminée de façon que la somme des résidus - définis comme l'écart entre les logarithmes de la production théorique et de la production effective - soit nulle sur les  $T$  dates. La fonction de production est une relation de long terme. Elle ne permet de mesurer qu'une productivité moyenne  $A = \exp(a)$  sur les  $T$  dates. En supposant que la contribution de chaque facteur dans le processus de production est inchangée, le résidu représente la variation (positive ou négative) de productivité par rapport à la fonction de production<sup>26</sup>. Le niveau de productivité d'une année donnée peut alors être défini comme le produit de l'efficacité moyenne sur l'ensemble de la période d'échantillonnage et le résidu de l'année considérée.

En imposant des rendements constants à l'échelle, elle est mesurée par le ratio<sup>27</sup> :

$$A_t = \frac{Y_t}{X_{1t}^{a_1} X_{2t}^{a_2}} \Leftrightarrow A_t = \exp(a + e_t)$$

où

$Y$  : Trains-kilomètres effectifs ;  
 $e$  : résidu de la régression ;  
 $a$  : estimation de la constante ;  
 $a_1 + a_2 = 1$  paramètres estimés.



<sup>26</sup> Dans les modèles de frontière où les résidus, toujours positifs, représentent la *perte* de productivité par rapport à la fonction théorique.

<sup>27</sup>  $\text{Ln}(Y_t) = \text{Ln}(\hat{Y}_t) + e_t$  ;  $\text{Ln}(\hat{Y}_t) = a + b_1 \text{Ln}(X_{1t}) + b_2 \text{Ln}(X_{2t})$   
 $\Rightarrow \text{Ln}(Y_t) = (a + e_t) + b_1 \text{Ln}(X_{1t}) + b_2 \text{Ln}(X_{2t})$

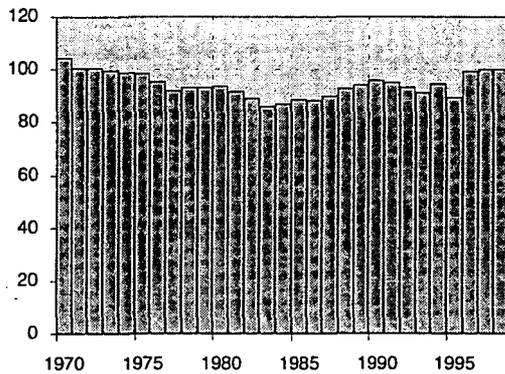
Au résidu près, la mesure de productivité peut être rapprochée des évolutions des productivités apparentes de chacun des facteurs. Le logarithme de la productivité globale s'exprime comme la moyenne des logarithmes des productivités partielles pondérée par les élasticités des facteurs associés :

$$A_t = \frac{Y_t}{X_{1t}^{\alpha_1} X_{2t}^{\alpha_2}} \Leftrightarrow \text{Ln}(A_t) = \text{Ln}(Y_t) - \alpha_1 \text{Ln}(X_{1t}) - \alpha_2 \text{Ln}(X_{2t})$$

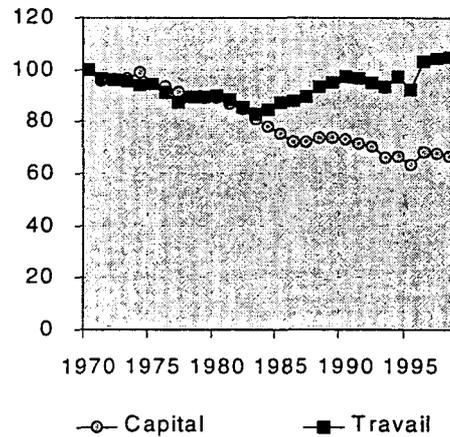
$$\Leftrightarrow \text{Ln}(A_t) = \alpha_1 \{ \text{Ln}(Y_t) - \text{Ln}(X_{1t}) \} + \alpha_2 \{ \text{Ln}(Y_t) - \text{Ln}(X_{2t}) \}$$

$$\Leftrightarrow \text{Ln}(A_t) = \alpha_1 \text{Ln}\left(\frac{Y_t}{X_{1t}}\right) + \alpha_2 \text{Ln}\left(\frac{Y_t}{X_{2t}}\right)$$

**Figure 30**  
**Évolution de la productivité pour l'activité hors TGV**  
(base 100 en 1998)



**Figure 31**  
**Évolution de la productivité apparente du travail et du capital**  
(base 100 en 1998)



### 1.3. Ensemble SNCF

**Figure 32**  
**Nuages de points des variables Ln(Capital) et Ln(Travail)**  
**en fonction de Ln(Trains-km) pour la SNCF**  
(base 100 en 1998).

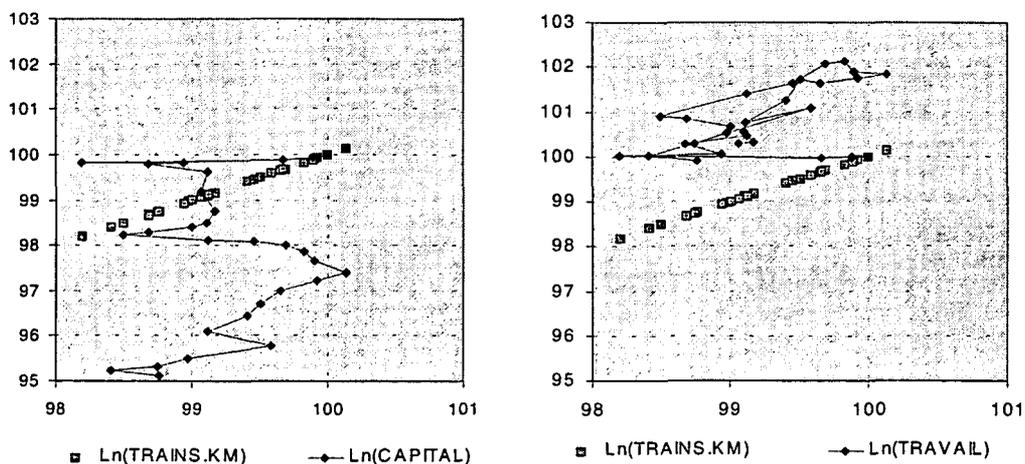


Tableau 7  
Coefficients de corrélation entre variables « SNCF »

	TRAINS.KM	CAPITAL	TRAVAIL		Ln(TRAINSKM)	Ln(CAPITAL)	Ln( TRAVAIL)
TRAINS.KM	1			Ln(TRAINSKM)	1		
CAPITAL	0,09	1		Ln(CAPITAL)	0,11	1	
TRAVAIL	0,55	-0,25	1	Ln( TRAVAIL)	0,45	0,00	1

L'absence de relation linéaire entre la variable réponse  $Ln(Trains-km)$  et les variables explicatives  $Ln(Capital)$  et  $Ln(Travail)$  est manifeste à partir des coefficients de corrélation. Le  $R^2$  ajusté de 18 % le confirme. Bien que les paramètres estimés soient tous significatifs en imposant une contrainte de rendements constants, le coefficient de détermination est trop faible pour que la relation soit retenue<sup>28</sup>.

## 2. COMPARAISON DES MÉTHODES DE CALCUL DE LA PRODUCTIVITÉ GLOBALE DES FACTEURS<sup>29</sup>

La mesure de la productivité consiste à comparer des produits et des facteurs de production ; plus spécifiquement, il s'agit de regarder comment les relations produits - facteurs varient au cours du temps et/ ou diffèrent entre compagnies.

Plusieurs approches peuvent être identifiées pour mesurer la productivité globale des facteurs. On distingue les approches non paramétriques et des approches paramétriques ou statistiques. Les diverses techniques d'indices numériques sont des mesures non paramétriques puisqu'elles peuvent être directement construites à partir des données sans avoir besoin d'estimation d'une fonction de coût ou de production. Par exemple, la méthode de la TFP (pour *Total Factor Productivity*) consiste à mesurer la productivité comme le ratio d'un agrégat des produits et d'un agrégat des facteurs Capital, Travail et Consommations intermédiaires, l'indice étant celui de Törnqvist<sup>30</sup>.

Un concept alternatif consiste en la mesure du glissement de la fonction de production ou de coût. De telles fonctions ne peuvent être observées directement à partir des données. A la place, une relation fonctionnelle doit être spécifiée, une forme fonctionnelle choisie. Finalement, cette forme doit être statistiquement estimée à partir des données. Ces approches se réfèrent à des mesures paramétriques car les paramètres de la fonction de coût ou de production doivent être estimés. Avec l'estimation de la fonction de production, la productivité est définie comme le glissement vers le haut de la fonction. L'estimation statistique est nécessaire car les vraies fonctions de production sont inconnues. C'est la méthode retenue dans cette étude.

<sup>28</sup> A titre d'information :  $Ln(Trains.km_i) = -3.74 + 0.21 Ln(Capital_i) + 0.79 Ln(Travail_i)$

<sup>29</sup> Ce paragraphe s'inspire de Thretheway, Oum et Waters (1992) *Transportation Research* Vol 26A, No 6, pp 493-505.

<sup>30</sup> En notant  $X_i$  la quantité de facteur  $i$ ,  $x_i$  la part de coût du facteur  $i$  dans le coût total,  $Y_i$  la quantité de produit  $i$ ,  $y_i$  la part de recette du produit  $i$  dans la recette totale ; pour une année donnée, le niveau de productivité est :  $A = \frac{\prod Y_i^{y_i}}{\prod X_i^{x_i}}$ . Pour plus de détails (cf. annexe 2).

Figure 33

**Approches paramétriques et non paramétriques - différences méthodologiques**

	Méthode non paramétrique TFP	Méthode paramétrique Fonctions de production	
AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité de tenir compte de la diversité des facteurs de production et des services</li> <li>• Témoigne de l'évolution des contributions productives des facteurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une fonction de production par produit avec facteurs explicatifs agrégés</li> <li>• Ne tient pas compte de l'évolution des contributions productives</li> </ul>	INCONVÉNIENTS
INCONVÉNIENTS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Méthode déterministe qui, par définition, ne permet pas d'évaluer la pertinence des résultats et qui, de fait, réclame une grande précision dans la collecte des données</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesure de l'erreur commise lors de l'estimation</li> </ul>	AVANTAGES



**Tests d'hypothèses - rendements d'échelle constants**

La fonction de production sous la forme log-linéaire est :

$$\ln Y = a + b_1 \ln X_1 + b_2 \ln X_2$$

où :

$Y = (Y_1, \dots, Y_T)'$  : production exprimée en trains-kilomètres ;

$X_i = (X_{i1}, \dots, X_{iT})'$  : facteur de production  $i$ .

Selon que la somme des élasticités du produit par rapport à chaque facteur est inférieure, égale ou supérieure à l'unité, les rendements d'échelle sont décroissants, constants ou croissants. Autrement dit, on a :

si	$b_1 + b_2 < 1$	rendements d'échelle décroissants ;
si	$b_1 + b_2 = 1$	rendements d'échelle constants ;
si	$b_1 + b_2 > 1$	rendements d'échelle croissants.

En désignant par  $L$  le facteur travail et par  $K$  le facteur capital, ces trois relations, appliquées à la fonction de production sous forme log-linéaire, conduisent à écrire :

$$(\ln Y - \ln X_2) = a + b_1 (\ln X_1 - \ln X_2) + \varepsilon \ln X_2$$

avec

$\varepsilon < 0$  si rendements d'échelle décroissants ;

$\varepsilon = 0$  si rendements d'échelle constants ;

$\varepsilon > 0$  si rendements d'échelle croissants.

Test bilatéralTest unilatéral

$H_0 : \varepsilon = 0 \Leftrightarrow$  rendements constants

$H_0 : \varepsilon = 0 \Leftrightarrow$  rendements constants

$H_1 : \varepsilon \neq 0 \Leftrightarrow$  rendements non constant

$H_1 : \varepsilon < 0 \Leftrightarrow$  rendements décroissants

Statistique de test :  $U = \frac{\bar{\varepsilon}}{\sigma_{\varepsilon}}$

Sous  $H_0$ ,  $U$  suit une loi de Student à 27 degrés de libertés.

*Règle de décision :*

Au seuil de 5 %, l'hypothèse nulle du test bilatéral est rejetée si la variable aléatoire d'échantillonnage  $u = \bar{\varepsilon} / \hat{\sigma}_{\varepsilon}$  est supérieure en valeur absolue à la valeur critique  $T_{97,5\%}(27)$  de 2,37. L'hypothèse nulle du test unilatéral est rejetée si  $u$  est supérieur à  $T_{95\%}(27) = 2,05$ .

De façon équivalente, l'hypothèse de rendements constants est rejetée au niveau de confiance de 95 % si la valeur  $0$  n'appartient pas à l'intervalle de confiance à 95 % pour le test bilatéral et 90 % pour le test unilatéral.



## Variante - production en unités-kilomètres

La productivité se définit comme le rapport entre la production et les facteurs de production. Le transport offre de nombreux indicateurs de mesure de la production. Cette étude présente les évaluations effectuées avec le parcours des trains qui s'apparente à une offre de places sans qu'interviennent les aspects commerciaux comme c'est le cas pour le trafic.

Une relation liant les trains-kilomètres aux facteurs de production est une fonction de production ; si la variable dépendante est exprimée en unités-kilomètres, la relation représente alors la forme réduite de l'équilibre offre-demande de transport<sup>32</sup>.

### 1. ESTIMATION DES FONCTIONS DE PRODUCTION

En exprimant les variables explicatives dans les mêmes unités que précédemment et les unités-kilométriques étant exprimées en milliards, les régressions conduisent à retenir les relations suivantes :

$$\text{Activité TGV : } \quad \text{Ln (Unités.km}_j) = -2,10 + 0,67 \text{ Ln (Capital}_j) \\ (0,319) \quad (0,043)$$

$$\text{Activité hors TGV : } \quad \text{Ln (Unités.km}_j) = -2,59 - 0,06 \text{ Ln (Capital}_j) + 0,79 \text{ Ln (Travail}_j) \\ (1,103) \quad (0,078) \quad (0,063)$$

Activité hors TGV avec rendements constants :

$$\text{Ln (Unités.km}_j) = -5,22 + 0,09 \text{ Ln (Capital}_j) + 0,91 \text{ Ln (Travail}_j) \\ (0,030) \quad (0,044) \quad (0,044)$$

SNCF avec rendements constants :

$$\text{Ln (Unités.km}_j) = -5,07 + 0,27 \text{ Ln (Capital}_j) + 0,73 \text{ Ln (Travail}_j) \\ (0,025) \quad (0,038) \quad (0,038)$$

Activité j	TGV			HORS TGV			HORS TGV		
	Paramètres libres			Paramètres libres			Rendements constants		
	Coef.	IC(95 %)		Coef.	IC(95 %)		Coef.	IC(95 %)	
Constante	-2,10	-2,86	-1,35	-2,58	-5,20	0,04	-5,22	-5,29	-5,14
Capital j	0,67	0,56	0,77	-0,06	-0,25	0,12	0,09	-0,01	0,20
Travail j				0,79	0,64	0,94	0,91	0,80	1,01
R <sup>2</sup>	98 %			86 %			84 %		

<sup>32</sup> La forme réduite intègre les aspects tarifaires puisque les prix permettent la convergence vers l'équilibre offre-demande.

SNCF			
	Rendements constants		
	Coef.	IC(95 %)	
Constante	-5,07	-5,125	-5,021
Capital	0,27	0,187	0,343
Travail	0,73	0,657	0,813
R <sup>2</sup>	44 %		

Les coefficients associés au facteur capital sont inférieurs aux paramètres estimés lorsque la variable dépendante est exprimée en trains-kilomètres quelle que soit l'activité. En particulier, le facteur capital n'est pas significatif dans la fonction de production « hors TGV » que la contrainte soit imposée ou non sur les paramètres.

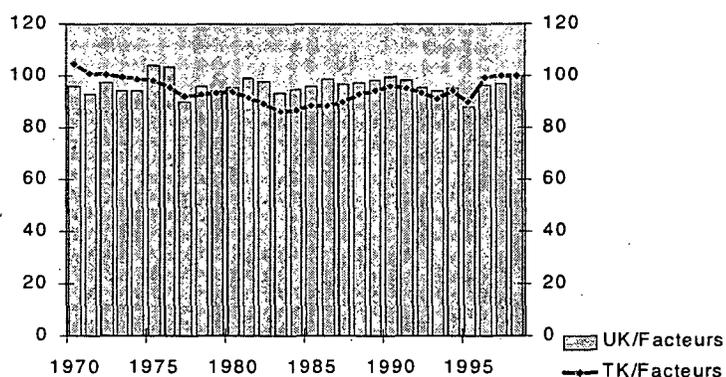
## 2. ÉVOLUTION DE LA PRODUCTIVITÉ

### 2.1. Activité TGV

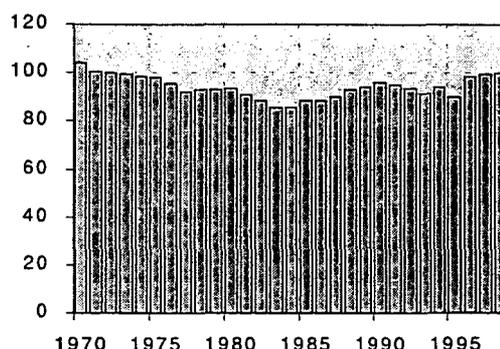
Le coefficient associé au capital est trop éloigné de l'unité pour que la mesure de productivité apparente du capital reflète de façon pertinente la productivité globale de l'activité.

### 2.2. Activité hors TGV

Figure 35  
Évolution de la productivité en trains-kilomètres (TK) et d'unités-kilomètres (UK) par facteur (base 100 en 1970)



### 2.3. Ensemble SNCF



### 3. TESTS DE RENDEMENTS CONSTANTS<sup>33</sup>

Dans la relation suivante, en adoptant les mêmes notations que précédemment, les économies d'échelle sont représentées par le paramètre  $\varepsilon$  :

$$(\ln Y - \ln L) = a + b_1 (\ln K - \ln L) + \varepsilon \ln L$$

*Résultats de la régression :*

	Coef.	IC(90 %)		IC(95 %)	
Constante	-2,58	-4,843	-0,318	-4,847	-0,314
Ln(K)-Ln(L)	-0,06	-0,223	0,096	-0,224	0,096
Ln(L)	-0,27	-0,510	-0,039	-0,510	-0,038

*Décision du test:*

La régression conduit à retenir une valeur de -0,27 pour  $\varepsilon$  (rendements d'échelle de 0,73) avec un niveau de confiance de 95 %. Les intervalles de confiance à 95 % et à 90 % pour  $\varepsilon$  ne contiennent pas la valeur 0, ce qui conduit à rejeter l'hypothèse de rendements constants au profit des rendements décroissants au seuil de confiance de 5 %<sup>34</sup>.

<sup>33</sup> Cf. annexe 3.

<sup>34</sup> L'intervalle de confiance à 99 % pour  $\varepsilon$  est [-0.625 ; 0.076].

