

# Fondements techniques et économiques du transport ferroviaire des voyageurs à grande vitesse

par

D. MONNET

Société Nationale des Chemins de Fer Français, France

La politique de développement des transports ferroviaires de voyageurs à grande vitesse (250/300 km/h) sur des lignes nouvelles, dans laquelle la SNCF s'est engagée depuis près d'une dizaine d'années, repose principalement sur les idées ou constatations suivantes:

Les besoins de déplacement des voyageurs, à moyenne et longue distance (200 à 800 km), augmentent rapidement, plus vite que l'accroissement des revenus, et la SNCF a acquis la certitude qu'elle pouvait offrir un service compétitif, en qualité de service et en prix, vis-à-vis du recours à la voiture particulière ou au transport aérien.

Les études, recherches et expérimentations, qu'elle a poursuivies depuis une trentaine d'années dans le domaine des grandes vitesses, lui permettent d'assurer que, dans la gamme de vitesses visée ci-dessus, tous les problèmes techniques sont résolus, depuis la motorisation, le freinage, la captation du courant électrique, jusqu'à la sécurité des circulations, notamment en ce qui concerne la stabilité, et le confort des passagers. Elle peut affirmer que, non seulement ces problèmes sont résolus sur le plan technique, mais, également, que les solutions apportées, recourant à des moyens éprouvés et bien souvent classiques, le sont à un coût acceptable, notamment en ce qui concerne la maintenance, tant du matériel que des installations.

Sur le plan de l'exploitation, la double option prise, concernant à la fois la spécialisation des lignes nouvelles au trafic voyageurs et leur compatibilité avec le réseau existant, permet, tout en réduisant le coût de construction de l'infrastructure en rase campagne et en évitant d'avoir à créer de nouvelles pénétrations urbaines, d'amener le transport à grande vitesse au coeur des villes, d'offrir une desserte directe, sans rupture de charge, à des agglomérations situées en dehors de la ligne à grande vitesse et de réserver les infrastructures existantes, parallèles aux lignes nouvelles, pour les besoins du développement du trafic marchandises. Cette spécialisation conduit, en effet, à tirer un meilleur parti de l'ensemble des installations.

Ainsi, la création de lignes nouvelles, en nombre limité, sur quelques axes lourds convenablement choisis, greffées sur le réseau existant, traduit-elle une politique ferroviaire globale, permettant à la fois une amélioration très marquante de la qualité du service voyageurs et le développement du trafic marchandises, en éliminant les freins constitués par des sections du réseau en voie de saturation. Ce double avantage permet de rentabiliser les projets de lignes nouvelles grâce à l'apport du trafic supplémentaire qui en résulte, à la réduction de certaines dépenses d'exploitation, et au fait d'éviter des investissements de renforcement de la capacité sur les itinéraires existants; le poids relatif de ces avantages variant, évi-

demment, selon l'importance des axes de transport intéressés, les situations de concurrence, et le degré de saturation des lignes existantes. Le premier projet de ligne nouvelle, en cours de réalisation, entre PARIS et LYON, sur l'axe Paris - Sud-Est, permet d'illustrer ces considérations générales développées en introduction.

Au passage, seront évoquées les conclusions dégagées par la SNCF au double plan de l'analyse de la demande voyageurs, et de l'impact du TGV sur ce marché, ainsi que les connaissances acquises dans le domaine technologique et technico-économique, garantissant la viabilité, sur le plan des coûts, des nouvelles exploitations envisagées.

## L'ANALYSE DE LA DEMANDE: L'APPORT DE L'ECONOMETRIE

### Position du problème

L'analyse de la demande transport est une démarche préalable, indispensable à la recherche du type de service à offrir pour répondre aux besoins réels des usagers, et définir le compromis optimum entre les facteurs de qualité du service et le coût de production, dans le cadre d'une contrainte de rentabilité financière. Elle constitue l'outil de base indispensable à l'étude des projets d'amélioration des systèmes existants ou de mise en place de systèmes entièrement nouveaux, ainsi que des stratégies tarifaires qui les complètent sur le plan économique.

Dans le domaine du transport terrestre des voyageurs à grande vitesse, son objet propre est de répondre à la question suivante:

Quelle est l'influence du prix de transport et des paramètres de qualité du service sur le volume et la structure du trafic empruntant le service à grande vitesse ainsi que sur le trafic des modes de transport en situation de concurrence?

La réponse à cette question doit être apportée de façon différenciée:

- sur le plan géographique, les situations de concurrence varient, en effet, sensiblement selon les données de la géographie humaine

- sur le plan temporel, les situations de concurrence se déforment au cours du temps en fonction de l'élevation du niveau de vie par exemple ou des changements de l'offre des modes concurrents

Pour un flux élémentaire de trafic donné entre deux zones, la demande de transport pour un mode déterminé dépendra ainsi, à une époque donnée:

- des tarifs du mode
- des facteurs de qualité du service de la desserte envisagée: vitesse, fréquence, confort, sécurité et, à un degré moindre, régularité et „garantie” du service
- des tarifs et des qualités de service de modes concurrents.

Par ailleurs, cette demande évoluera au cours du

temps en raison de l'évolution temporelle, à la fois des éléments précédents, et des caractéristiques des zones considérées: démographie, structure d'activités, élévation du niveau des revenus, modification des comportements, etc.

### Diversité des situations de concurrence

Les études menées par la SNCF dans ce domaine reposent essentiellement sur deux types d'informations:

- des éléments statistiques relatifs aux flux de transport ferroviaires ou aériens, la route étant malheureusement fort déficiente en ce domaine,
- des éléments obtenus au cours d'enquêtes effectuées, soit à domicile, soit en cours de déplacements, concernant les divers modes.

Par ailleurs, ces études tendent à distinguer:

- les déplacements à caractère urbain,
- les déplacements à courte distance dans un domaine où les migrations journalières restent possibles,
- les déplacements à moyenne distance caractérisés essentiellement par la concurrence train - voiture dans une gamme de temps de parcours permettant l'aller et retour dans la journée ou la demi-journée,
- les déplacements à longue distance (400 - 800 km) où l'avion apparaît dans le champ de la concurrence,
- les déplacements plus longs encore où la formule du train de nuit devient la seule valable pour concurrencer efficacement l'avion.

De même, d'autres éléments de distinction apparaissent très importants:

- le motif et la durée d'absence du domicile, (affaires, déplacements personnels, vacances et tourisme)
- la situation des origines et destinations vis-à-vis de PARIS est également essentielle dans la situation française (déplacements „radiaux” intéressant PARIS, déplacements „transversaux” ou déplacements „passe-PARIS”)
- la taille du groupe qui se déplace simultanément.

Je m'étendrai sur les résultats obtenus plus particulièrement dans 2 domaines:

- déplacements radiaux à moyenne distance,
- concurrence train - avion sur les relations radiales à longue distance.

### Les déplacements radiaux à moyenne distance

Dans ce domaine caractérisé par la concurrence train - voiture, les études menées par la SNCF se sont attachées à la construction de modèles explicatifs des niveaux observés pour le trafic ferroviaire en fonction des caractéristiques des relations (populations desservies, distances) et des paramètres d'offre du transport ferroviaire (prix, vitesse, fréquence, confort, services directs) avec cette circonstance particulièrement malheureuse à savoir, la quasi-proportionnalité du prix du transport ferroviaire avec la distance du fait de la structure tarifaire.

Dans ce domaine, les séries temporelles homogènes faisant défaut, la seule approche qui semble praticable est d'utiliser des méthodes de régression sur une coupe géographique instantanée.

Ces méthodes ont commencé à être utilisées systématiquement en 1967 sur la base d'estimations de trafics annuels gare à gare obtenus par voie de sondage statistique, et elles ont conduit à développer deux types de modèles:

- des modèles de régression à élasticités constantes par rapport aux variables explicatives,
- des modèles à coûts généralisés, d'inspiration gravitaire.

#### Modèles à élasticités constantes

Ils ont été ajustés séparément pour expliquer les trafics en 1ère classe et en 2ème classe et j'en donnerai pour exemple les résultats obtenus sur un ensemble de 56 liaisons centrées sur PARIS en 1963, se situant dans une gamme de distances d'environ 100 à 300 km, qui se présentent comme suit, lorsque l'on prend comme variables explicatives les 4 variables: population (P) distance (D) temps de parcours (T) et l'intervalle moyen entre les trains (I) (voisin de l'inverse de la fréquence).

		P	D	T	I	Valeur de R (1)
1ère classe	Elasticité	0,98	+0,79	-1,50	-0,38	0,945
	Ecart type d'estimation	0,08	0,39	0,46	0,14	
2ème classe	Elasticité	0,61	-0,72	-0,26	-0,56	0,954
	Ecart type d'estimation	0,05	0,25	0,28	0,12	

(1) Coefficient de corrélation multiple

Ces résultats font ressortir évidemment une valeur explicative très forte de la population qui explique à elle seule une part notable de la variance avec le résultat un peu inattendu, mais cependant interprétable, d'une élasticité du trafic de 2ème classe nettement inférieure à 1.

Le deuxième résultat marquant est le caractère assez significatif des élasticités relatives à l'intervalle moyen, la plus faible valeur trouvée en 1ère semblant en partie s'expliquer par le fait que la fréquence de desserte est en général plus forte en 1ère qu'en 2ème classe, l'élasticité ayant tendance à décroître assez rapidement lorsque la fréquence augmente.

La différence de signe entre les élasticité distance de la 1ère classe et de la 2ème classe reflète la différence de comportement de ces deux groupes vis-à-vis du prix du voyage et surtout l'impact de la concurrence train/voiture particulière en ce qui concerne la 1ère classe. Alors qu'en 1ère classe, le voyageur est sensible au gain de

temps que lui procure le train (gain de temps qui s'accroît avec la distance) et relativement moins sensible au prix, en 2ème classe l'effet du prix l'emporte sur toute autre considération.

En conclusion, il semble bien que les modèles ainsi ajustés ne peuvent pas être utilisés comme fonctions de demande sans précautions. Dans ce souci, on est orienté vers la recherche de formes utilisant la notion de coût généralisé pour l'usager.

#### Modèles à coût généralisé

La démarche est simple: elle tend à assimiler aux coûts monétaires les désutilités entraînées pour l'usager par la durée du transport et l'intervalle moyen entre les trains en incluant les dépenses et sujétions imposées par les parcours terminaux.

La demande apparaît alors comme une fonction de la forme:

$$\bar{N} = \frac{p^\alpha}{(C_0 + cD + hT + h'1)^\beta}$$

Dans les conditions économiques actuelles, par exemple la valeur du temps associé aux voyageurs de 2ème classe s'établit à 16 F annexe.

L'élasticité  $\beta$  est de l'ordre de 2.

La valeur de la constante, représentative du coût et des sujétions terminales de transport s'établit à 35 F (pour des déplacements ayant une extrémité à Paris).

Une telle formulation permet notamment, outre de calculer les élasticités, vis-à-vis des variables d'offre dans une situation déterminée, d'avoir une idée de leur variation avec la distance, par exemple.

En conclusion, je voudrais également citer le rôle important d'autres paramètres qui ne figurent pas dans les exemples précédents donnés à titre illustratif: il en est notamment ainsi des ruptures de charge qui en elles-mêmes provoquent une chute de trafic importante.

Enfin, il ne faut pas se dissimuler que la formulation actuelle restera très imparfaite tant que l'on aura des difficultés à intégrer explicitement la concurrence de la voiture particulière; ce point fait actuellement l'objet de recherches qui pourraient peut-être aboutir à la conclusion que le trafic par voiture particulière est moins captif qu'on ne le pense généralement, tout au moins pour certains types de déplacements.

#### La concurrence train - avion: le modèle „Prix-temps”

Ce modèle se propose de décrire la répartition entre l'avion et le transport de surface.

Tout voyageur qui choisit entre le train et l'avion arbitre (au moins implicitement) un gain de temps de transport contre une dépense moindre. Cet arbitrage peut être interprété comme la comparaison entre le prix que le voyageur est prêt à payer pour l'heure de trajet économisée et le prix que l'heure lui coûte effectivement sur la relation considérée.

Le modèle utilisé suppose que la valeur horaire attribuée au temps de trajet économisé est répartie au sein de la population des voyages suivant une loi de distribution pour laquelle il est naturel de prendre la loi log normale qui représente bien la distribution du principal facteur explicatif: la répartition des revenus.

Le modèle peut se formuler par une intégrale donnant la part F du trafic fer:

$$F = \frac{1}{2 \mu \sigma} \int_0^x \frac{(Ly - L\mu)^2}{2 \sigma^2} \frac{dy}{y}$$

où

- x est le coût horaire du temps sur la relation considérée c'est-à-dire le rapport entre la différence des prix et la différence des temps du fer et de l'avion.

-  $\mu$  est la médiane de la valeur du temps dans la population des voyages

-  $\sigma$  caractérise la dispersion de la valeur du temps dans la population.

Les valeurs ajustées de  $\mu$  et  $\sigma$  dépendent essentiellement de la distribution des revenus, mais aussi des différences entre les situations de choix pour les voyages (temps terminaux, réduction, etc..) et des différences de comportement individuel.

Ce modèle a été ajusté sur des données de trafic commercial fer 1ère classe et avion pour les années 1965 - 1967 - 1969 - 1972. Ces clientèles sont en effet à peu près homogènes du point de vue du motif de voyage et des catégories socioprofessionnelles.

Divers ajustements effectués ont montré que les meilleurs facteurs explicatifs étaient:

le temps de trajet par les services les plus rapides y compris les temps terminaux comptés à partir du centre des agglomérations,

les perceptions moyennes effectives en y incluant pour le fer les suppléments train rapide.

On a obtenu les résultats suivants sur 10 relations où la concurrence est déjà ancienne qui sont représentées en coordonnées gausso-logarithmiques dans la planche 1 (année 1967):

- coefficient de corrélation (R): 0,930
- médiane de la valeur du temps ( $\mu$ ): 14,3 F
- écart-type de la distribution ( $\sigma$ ): 0,79

La valeur médiane du temps évolue en Francs constants de la manière suivante (Francs de 1965):

Année	1965	1967	1969	1972
Valeur de $\mu$ (F 1965)	11,7	12,9	22,4	27,3

On voit que la période 1967 - 1969 est caractérisée par une forte croissance de  $\mu$  (31,8% par an en moyenne), alors que les périodes encadrantes font apparaître des taux plus faibles (5% entre 1965 et 1967; 6,8 entre 1969 et 1972). C'est en effet au cours de cette période qu'Air Inter a intensifié la diffusion du transport aérien intérieur en France. Il semble qu'à l'avenir la croissance des valeurs du temps devrait se stabiliser et être plus directement liée à la croissance des revenus.

Ce modèle peut être utilisé de deux manières:

- sur la situation actuelle pour étudier la substitution entre modes en fonction de la modification de l'offre,
- dans des conditions d'offre données pour prévoir l'évolution du marché au fur et à mesure que les valeurs attribuées au temps s'accroissent.

Dans la situation actuelle il est par exemple possible de déterminer des élasticités de substitution directes et croisées en fonction du prix et du temps de parcours. Pour les obtenir, il suffit de faire varier marginalement le prix ou le temps de transport, de calculer le coût de l'heure qui en résulte et d'en déduire la nouvelle répartition de marché.

Ainsi sur la relation Paris-Lyon, dans les conditions de 1967, les élasticités de substitution directes et croisées pour le trafic 1ère classe par fer et pour le trafic aérien pouvaient s'évaluer comme suit, par rapport aux principales variables d'offre.

	Temps fer	Prix fer	Prix avion
Trafic Fer 1ère	- 1	- 0.7	+ 1.8
Trafic Avion	+ 2	+ 1.4	+ 3.7

Ces élasticités varient suivant les relations, ainsi à plus courte distance on observe des élasticités - prix du trafic fer 1ère classe par rapport au prix du fer nettement plus faibles (-0.3 pour Paris - Nantes par exemple).

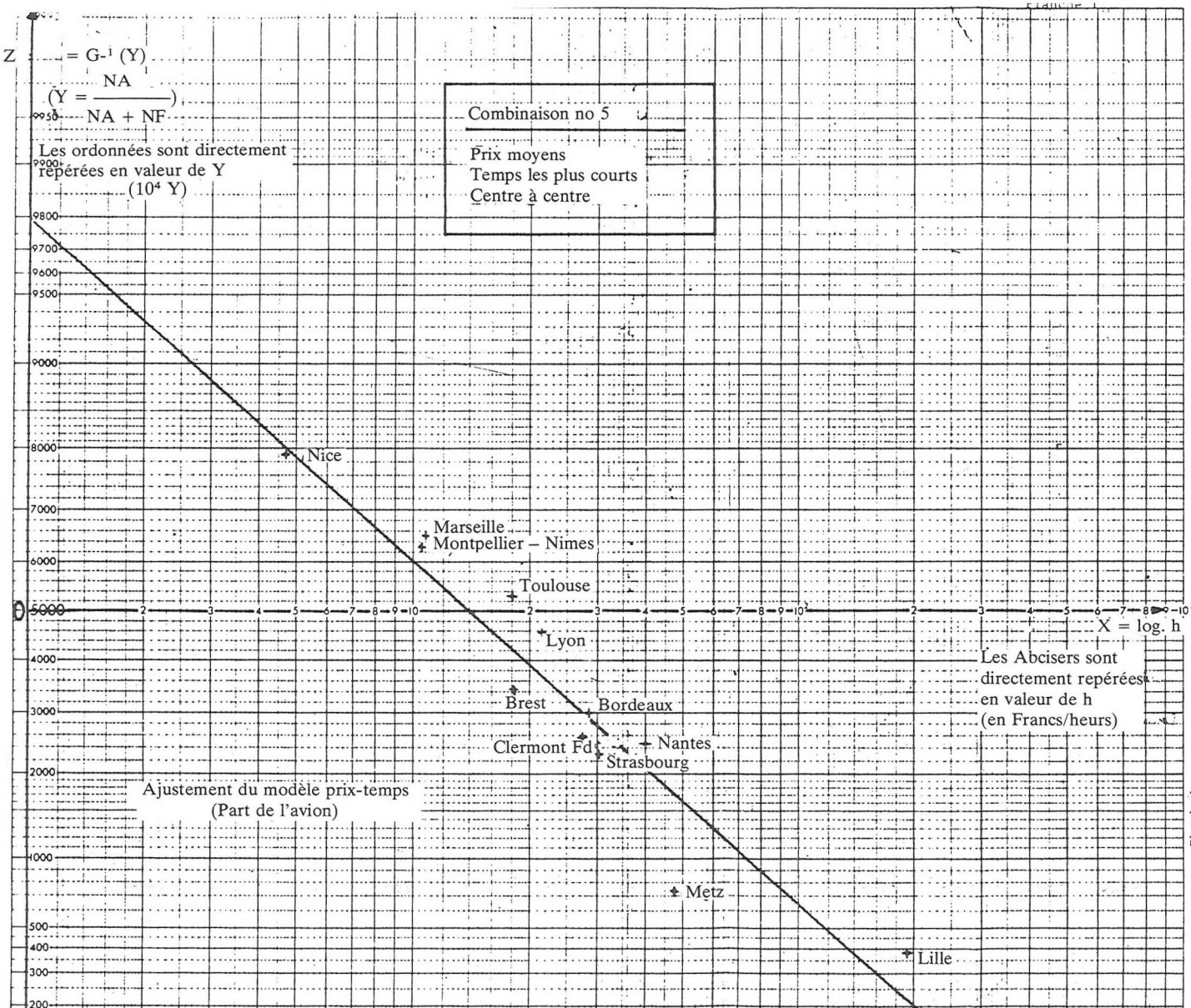
#### Conséquences pour la politique commerciale de la SNCF

Les modèles présentés ci-dessus montrent que, à qualités de confort et de sécurité respectives données, le marché des transports interurbains de voyageurs à moyenne distance (400 à 800 km) est sensible aux trois paramètres prix-temps de parcours-fréquence. Suivant le segment de marché auquel on a affaire, le paramètre prépondérant sera tantôt le prix (marchés 2ème classe fer - voiture particulière), tantôt le temps porte à porte

$Z = G^{-1}(Y)$   
 $(Y = \frac{NA}{NA + NF})$

Les ordonnées sont directement  
 repérées en valeur de Y  
 (10<sup>4</sup> Y)

Combinaison no 5  
 Prix moyens  
 Temps les plus courts  
 Centre à centre



Ajustement du modèle prix-temps  
 (Part de l'avion)

Les Abscises sont  
 directement repérées  
 en valeur de h  
 (en Francs/heurs)

Planche 1

(marchés 1ère classe fer – avion), la paramètre fréquence jouant sur tous les marchés un rôle secondaire quoiqu'important.

Les conclusions ont orienté la SNCF vers le développement des services rapides et fréquents en tirant parti au maximum des possibilités techniques du matériel et des infrastructures ferroviaires existantes. Ces dernières sont généralement loin d'être saturées, ce qui permet d'augmenter les fréquences sur un grand nombre de relations, au prix d'un accroissement modéré des coûts d'exploitation. C'est ce qui a pu être fait sur Paris – Lille et Paris – Le Havre par exemple.

L'augmentation de la vitesse peut être obtenue par l'utilisation de matériels plus performants, sans modification de l'infrastructure. Mais le gain ainsi obtenu reste faible en général. Pourtant dans certains cas particuliers, cette méthode peut conduire à des résultats substantiels, comme par exemple sur la ligne Paris – Cherbourg où grâce aux turbo trains de la première génération il a été possible d'obtenir en 1970 un gain de temps d'environ 20% sur le meilleur train antérieur. Sur cette ligne, on a procédé simultanément à un doublement de la fréquence.

Une augmentation plus grande de la vitesse nécessite une rectification des courbes, une modification de la signalisation, et éventuellement un renforcement des installations fixes de traction électrique, plus ou moins importants selon le niveau de vitesse visé. Le niveau maximum de vitesse économiquement praticable de cette manière, éminemment variable en fonction des caractéristiques de tracé, se situe dans la gamme 160 – 200 km/h. C'est ainsi que des relevements de vitesse échelonnés ont été pratiqués, par exemple depuis 1967 sur la ligne Paris – Toulouse, avec la mise en marche du Capitole (200 km/h sur la section Les Aubrais – Vierzon) et depuis 1973 sur Paris – Bordeaux, la longueur cumulée des sections de voies aptes à 200 km/h atteignant aujourd'hui 780 km, et procurant un gain de temps de 10 à 12% sur les meilleurs trains antérieurs.

Pour gagner davantage de temps encore, il est nécessaire de construire des lignes nouvelles, mais il se pose alors le problème du choix de la meilleure technique qu'il convient de développer.

## LES POSSIBILITES TECHNIQUES DES SYSTEMES

### Les systèmes étudiés

Dès lors que des voies nouvelles doivent être construites pour dépasser significativement la vitesse de 200 km/h, il n'y a pas a priori de raison fondamentale à fixer un objectif de vitesse plutôt qu'un autre, une technique de transport plutôt qu'une autre. Il convient donc d'ouvrir aussi largement que possible l'éventail des solutions envisageables; le choix entre ces solutions devant s'effectuer suivant des critères à la fois techniques (faisabilité, sécurité, fiabilité, nuisances) et économiques (capacité, consommation des ressources rares, rentabilité).

### Le système ferroviaire

Le chemin de fer constitue une solution satisfaisante au regard de ces critères. En effet, il y a maintenant près de 20 ans qu'a été démontrée la possibilité de réaliser des vitesses supérieures à 330 km/h avec le matériel commercial de l'époque sur des voies non aménagées du réseau existant. Les essais systématiques effectués avec les prototypes expérimentaux à turbines d'une part (TGV 001), électrique d'autre part (Z 7001) ont confirmé que ces vitesses étaient réalisables en toute sécurité en service continu sur des voies ordinaires, pourvu que les rayons en plan et profil soient adaptés. Par ailleurs les composants utilisés sont de technologie connue, ce qui permet d'assurer leur fiabilité et d'estimer leurs

coûts (en capital, entretien, consommations) avec une bonne approximation. Enfin l'utilisation de voies à écartement standard permet de profiter de la continuité de passage des lignes nouvelles sur les lignes existantes, ce qui est source d'avantages importants: cela permet d'éviter les ruptures de charges pour les voyageurs qui doivent poursuivre leur voyage au-delà des extrémités de la ligne nouvelle, cela permet également en utilisant les terminaux et les pénétrantes existantes d'aboutir au coeur des villes sans avoir à engager de coûteux investissements.

Les calculs effectués par la SNCF ont montré par ailleurs que les coûts d'exploitation (charges de capital du matériel, coûts d'entretien, d'énergie, de personnel, frais généraux et commerciaux) pouvaient être non seulement du même ordre de grandeur, mais inférieurs à ceux des trains classiques, grâce à la réduction des distances et à l'augmentation de productivité procurée par la vitesse (amélioration des rotations). La seule condition économique à la construction de lignes nouvelles est que celles-ci drainent un trafic suffisamment important pour assurer la rentabilité de l'investissement d'infrastructure. L'utilisation des modèles de demande évoqués au chapitre précédent a montré que cette condition était très largement réalisée dès aujourd'hui sur la ligne Paris – Lyon, et que d'autres lignes pouvaient devenir rentables, sous certaines conditions, dans un avenir plus ou moins proche: Paris – Lille et triangle Paris – Bruxelles – Calais (sous condition de réalisation du tunnel sous la Manche), Paris – Le Mans – Tours notamment, en visant la gamme des vitesses situées entre 250 et 300 km/h.

### Les techniques non conventionnelles

Si le chemin de fer constitue une bonne solution pour cette gamme de vitesse, on peut se demander si des objectifs plus élevés, de l'ordre de 400 à 500 km/h, ne permettraient pas de fournir une solution meilleure encore.

Tout d'abord il n'est pas exclu que le chemin de fer puisse y parvenir. En effet, des essais récents aux Etats-Unis ont permis de dépasser la vitesse de 400 km/h sur rails, classiques pour la sustentation et le guidage, la propulsion étant assurée par un moteur linéaire chevauchant une plaque de réaction placée dans l'axe de la voie, ce qui permet de s'affranchir de l'adhérence.

Bien que la limite de vitesse réalisable par le moyen de cette adhérence ne soit pas connu, on s'accorde généralement à la situer aux environs de 400 km/h. Si donc nous devons encore aujourd'hui confesser notre ignorance sur cette limite technique du chemin de fer, nous ne pouvons pas conclure à son inadéquation à des vitesses comprises entre 300 et 400 km/h. Les recherches menées dans ce domaine par les réseaux devraient permettre de fournir dans quelque temps une réponse moins évasive.

La difficulté principale à résoudre pour assurer la sustentation et le guidage à grande vitesse par le système roue/rail réside dans le maintien de la stabilité. En effet, les irrégularités de la voie appliquant sur les roues des perturbations d'intensité croissante avec la vitesse, plus la vitesse augmente, plus il est nécessaire, soit de réduire les tolérances de la voie, soit de compliquer les organes de suspension des bogies.

Pour surmonter ces difficultés, les techniciens ont imaginé des systèmes évitant tout contact entre la voie et le véhicule. Ce sont les techniques dites non conventionnelles, qu'on peut classer en fonction de la nature physique des forces mises en oeuvre (procédés pneumatiques ou électromagnétiques) et de leur signe (attraction ou répulsion).

L'absence de contact voie/véhicule impose d'avoir recours pour la propulsion à un procédé affranchi de l'ad-

hérence. Deux classes de propulseurs ont été expérimentés: les propulseurs thermiques (turbo-moteurs entraînant une hélice, turbo-réacteurs) associés exclusivement à la technique „coussin d'air”, et les propulseurs électriques (moteur linéaire, dont la partie active peut être placée dans la voie ou sur le véhicule) qui peuvent être du type asynchrone ou synchrone et peuvent être associés à tous les types de sustentation – guidage expérimentés à ce jour.

Indépendamment des difficultés de mise au point des composantes et des incertitudes qui en résultent pour les systèmes, quant aux délais de mise au point jusqu'à la phase opérationnelle, et aux coûts qu'il est possible d'envisager, ces systèmes ont par définition le handicap important d'avoir une infrastructure non compatible avec le réseau ferroviaire existant, ce qui les empêche de bénéficier des avantages évoqués plus haut.

### Intérêt des différents créneaux de vitesse

Les niveaux de vitesse que permettent d'atteindre les systèmes ferroviaires d'une part, les systèmes non conventionnels d'autre part, étant supposés par hypothèse d'un ordre de grandeur différent, soit par exemple 350 et 500 km/h respectivement, il convient de s'interroger sur leurs avantages et éventuellement leurs inconvénients.

#### Influence de la vitesse sur le temps de parcours

Il est intéressant de comparer les ordres de grandeur des temps de parcours sur une distance moyenne (600 km par exemple) pour des vitesses moyennes de plus en plus grandes dans la gamme envisagée. On obtient le tableau suivant:

Vitesse moyenne (km/h)	150	200	250	300	400	500
Temps de parcours (minutes)	240	180	144	120	90	72
Gain de temps procuré par un supplément de vitesse de 100 km/h (minutes)	96	60	41	30	18	12

Le gain de temps procuré par un accroissement constant de vitesse (ici 100 km/h) s'amenuise donc très rapidement lorsque la vitesse initiale augmente.

#### Influence de la vitesse sur la puissance et l'énergie consommée.

Par ailleurs, la puissance nécessaire pour vaincre la résistance de l'air au niveau du sol augmente considérablement avec la vitesse, comme le montre le tableau ci-après, calculé pour une rame de 300 places au gabarit ferroviaire:

Vitesse maximale (km/h)	200	300	400	500
Puissance de propulsion (kW)	1600	5500	12000	23000

L'installation de ces puissances à partir de 400 km/h, soulève des problèmes considérables de poids (moteurs et convertisseurs électriques) et d'encombrement (volume de ces équipements). Or les expériences récentes effectuées sur les systèmes à sustentation électromagnétique ou électro-dynamique montrent qu'à ces vitesses, les traînées électro-magnétiques de sustentation atteignent des valeurs d'un ordre de grandeur comparable à celles de la traînée aérodynamique. C'est donc une puissance double de la puissance de propulsion qu'il conviendrait d'envisager, ou même triple de celle-ci

pour les systèmes à mauvais rendement électrique.

Il y a donc là, à performances égales, un handicap important pour les techniques à sustentation électromagnétique.

Par ailleurs tous les coûts et consommations liés à la puissance augmentent avec la vitesse; c'est le cas en particulier de l'énergie, dont les modes non conventionnels sont fort peu économes. En se limitant au contraire à des vitesses de l'ordre de 300 km/h, on reste dans le domaine des moteurs rotatifs classiques à bon rendement, et avec le système ferroviaire on fait bien évidemment l'économie des consommations d'énergie pour réaliser les fonctions de sustentation et de guidage.

C'est ainsi que pour réaliser le temps de trajet en 2 heures sur les 425 km de la ligne nouvelle Paris – Lyon la consommation d'énergie électrique par siège kilomètre offert, s'établit à 11 grammes d'équivalent pétrole, soit environ 0,05 kWh.

### Conclusion

Indépendamment des problèmes techniques rapidement évoqués ci-dessus on peut schématiser la comparaison entre TGV et systèmes non conventionnels (SNC) selon deux cas de figures différents:

- soit en restant dans le domaine des vitesses accessibles aux techniques ferroviaires, c'est-à-dire jusque 350 km/h environ. Dans ce cas, la concurrence entre SNC et TGV peut s'apprécier principalement sur le plan des coûts. Les SNC sont plus chers que les TGV sur 3 postes au moins: investissements d'infrastructures en zones urbaines, puissance de sustentation-guidage (traînées induites), consommations d'énergie. Par ailleurs, les frais de personnel et les frais généraux sont du même ordre de grandeur dans les deux systèmes, puisque la qualité de service est comparable. Les SNC ne peuvent présenter d'intérêt que si sur d'autres postes de dépenses, leurs coûts sont notablement plus bas que ceux des TGV: investissements d'infrastructures en rase campagne, entretien de la voie et des véhicules. Or, si cela est effectivement probable pour les coûts d'entretien, il est douteux qu'il en soit de même à caractéristique de tracé identique, pour le coût d'établissement de l'infrastructure,

- soit en supposant que la SNC offrirait une qualité de service, en terme de vitesse, très supérieure à celle du TGV, dans la gamme de 400 à 500 km/h de vitesse moyenne. De tels niveaux de vitesse exigent des caractéristiques de tracé coûteuses et des puissances très importantes, qui impliquent probablement le recours à des techniques de voie active; les coûts supplémentaires correspondants sont à mettre en regard de la fraction du marché qui requiert un tel niveau de qualité.

Il semble qu'une telle fraction soit relativement faible et on peut s'interroger sur le fait de savoir si elle justifie à elle seule les coûts correspondants.

Par ailleurs, la non compatibilité constitue pour la SNC un handicap important, qui peut cependant être résolu dans certains cas.

Cependant si, en raison des éléments évoqués ci-dessus, il paraît illusoire d'escompter des développements commerciaux de SNC à court et moyen terme, les recherches correspondantes peuvent présenter un intérêt éventuel pour le grand avenir.

### EVALUATION DES COÛTS DU SYSTEME FERROVIAIRE À GRANDE VITESSE

Si l'augmentation de la vitesse (et de la fréquence) a une influence largement positive sur les niveaux de trafic interurbain de voyageurs, et si la réalisation de vitesses comprises entre 300 et 350 km/h en service commercial est possible dans un avenir très proche, en recourant à la technique ferroviaire, il reste à s'assurer que les coûts

correspondants restent dans les limites tels qu'ils conduisent à une rentabilité suffisante des capitaux à investir.

### **Structure des coûts: méthodologie**

Certains éléments de coût sont parfaitement calculables, car les phénomènes qui leur donnent naissance sont identiques dans le chemin de fer traditionnel. C'est le cas en particulier des coûts variables en fonction du temps d'utilisation: main d'oeuvre (conduite et accompagnement des trains notamment), nettoyage et entretien des aménagements intérieurs des voitures (propreté, entretien des sièges et revêtements des sols et parois, équipements d'éclairage et de climatisation), entretien des appareillages fixes ou suspendus (réservoirs, robinetterie, équipements pneumatiques et électriques sur caisse, automatismes divers).

D'autres éléments sont connus au niveau du coût unitaire. C'est le cas par exemple de l'énergie. Il convient alors d'en évaluer les consommations. On peut classer dans cette catégorie les coûts d'entretien de la voie, des équipements non suspendus des trains (organes de roulement, équipements sur bogies, freins, pantographes), des équipements de liaison (suspensions, transmissions mécaniques, attelages), ainsi que les parties extérieures des caisses (peintures, glaces, joints, appareillages extérieurs). Pour ces équipements en effet, il existe un coût unitaire d'intervention connu, mais il est nécessaire de procéder à des expérimentations en service réel afin d'évaluer la fréquence et l'importance de ces interventions.

Avant de procéder à de telles expérimentations qui pourraient se révéler inutilement onéreuses en cas d'insuccès, il convient néanmoins de procéder à des évaluations préalables pour lesquelles la participation de techniciens expérimentés est absolument nécessaire. Grâce à une telle expertise, qui doit être conduite avec prudence et réalisme, il a été possible d'évaluer un ordre de grandeur raisonnable des coûts.

Ultérieurement, après avoir acquis la conviction par cette approche que les ordres de grandeur ainsi dégagés étaient raisonnables, la SNCF s'est engagée dans la construction de prototypes et dans un programme d'expérimentation à grandes vitesses pour confirmer et préciser ces premières évaluations.

### **Modèle de coûts: vitesse optimale**

On distingue trois types de coûts: les coûts de construction de la ligne, les coûts d'exploitation, et les coûts annexes du transport.

#### *Coût de construction de la ligne*

Ce coût est fonction essentiellement des caractéristiques géométriques en plan, en profil et en travers de la voie. Celles-ci dépendent non seulement de la vitesse maximale envisagée, mais aussi de la disparité des trafics. Ainsi, une voie construite pour acheminer simultanément des trains de voyageurs à 300 km/h et des trains lourds de marchandises à 120 km/h devra avoir des courbes de grand rayon (car les devers qui pourraient être acceptés sur des rayons plus faibles par le matériel voyageur à grande vitesse ne conviendraient pas au matériel marchandises) et des déclivités faibles (5 à 8%) déterminées par les limites de traction en rampe des locomotives remorquant les trains les plus lourds. Une telle voie sera d'autant plus difficile à inscrire dans le relief que celui-ci sera plus accidenté: la proportion d'ouvrages d'art (tunnel, viaducs) de déblais et de remblais deviendra vite très importante et pèsera lourdement sur le coût de construction de la ligne.

Si au contraire on spécialise la ligne au trafic des voyageurs à grande vitesse, on peut tracer des rayons plus courts en compensant la force centrifuge par un

devers acceptable, et des déclivités plus fortes (35%) autorisées par le taux important de motorisation des essieux. Il en résulte un abaissement considérable des frais de terrassements et d'ouvrages d'art. Par ailleurs, ces caractéristiques géométriques sont voisines de celles des autoroutes, ce qui permet le jumelage des deux infrastructures, et procure d'intéressantes possibilités de réduction des coûts. Enfin, cette option facilite l'évaluation des coûts et leur contrôle.

Le coût d'une voie ferrée double ayant les caractéristiques précédentes, comprenant: acquisitions de terrain, terrassements et ouvrages d'art, voie sur traverses en béton (rail de 60 kg/m), installations de sécurité, d'électrification, d'entretien et de voirie de service, clôture complète (pas de passages à niveau) se situe à environ 8 MF/km (hors TVA) dans les conditions économiques actuelles, et dans les conditions françaises sur le plan de la topographie et de la densité d'habitat.

#### *Coûts directs d'exploitation*

Ce sont les coûts liés au matériel roulant et à son exploitation. Ils comprennent:

- des coûts annuels fixes qui ne dépendent que du volume du parc nécessaire à l'exploitation,
- des coûts dépendant de l'utilisation, appréciée sur une base temporelle ou kilométrique.

#### *Coûts annexes*

On regroupe sous ce vocable l'ensemble des coûts occasionnés par le trafic, mais qui ne sont pas liés directement au matériel roulant et à son utilisation.

Il est possible, grâce aux lois de variation de ces diverses natures de coûts, d'établir un modèle mathématique permettant de calculer une vitesse optimale en fonction de paramètres techniques ou de paramètres relatifs à la demande et de coûts unitaires spécifiques.

L'un de ces paramètres de la demande joue un rôle fondamental: la valeur du temps. Grâce à celle-ci, on peut tester l'adaptation de tel ou tel mode à tel ou tel segment du marché des voyages. Par exemple, il est possible de constater que la vitesse de 500 km/h est optimale pour une valeur du temps très élevée - ce qui signifie que, avec la distribution actuelle des valeurs du temps, le segment de marché intéressé est très étroit.

Le modèle a été exploité pour le TGV, et pour les valeurs moyennes du temps de l'ensemble de la clientèle ferroviaire et aérienne. On a pu ainsi établir que la vitesse moyenne optimale à l'horizon 1980 - 2000 évoluerait entre 250 et 300 km/h avec une dispersion allant de 230 km/h environ pour le voyageur de 2ème classe à 350 km/h pour le voyageur de 1ère classe. Ces ordres de grandeur ont été confirmés par des études semblables faites par l'UIC.

### **Expérimentations**

Pour conforter ses évaluations concernant les coûts, la SNCF a passé commande, en juillet 1969, d'une rame expérimentale à turbines, le TGV 001. Cette rame, livrée en 1972, a effectué en trois ans plus de 320.000 km à des vitesses supérieures à 200 km/h, la vitesse de 300 km/h ayant été dépassée au cours de 156 marches d'essais. En 1974 et 1975, une automotrice électrique, la Z 7001, venait compléter ces essais pour étudier un nouveau bogie et une nouvelle transmission. Elle a effectué en 2 ans près de 275.000 km, dont 39 marches à des vitesses supérieures à 300 km/h. C'est donc une expérience portant sur 600.000 km parcourus à une vitesse supérieure à 200 km/h, qui a été menée à bien au cours des quatre années précédentes.

Ces essais avaient d'ailleurs été précédés, avant la mise en service du Capitole à 200 km/h, de nombreux essais de stabilité et de captation de courant à la vitesse



de 230 km/h sur du matériel moteur et remorqué de série. De même, avant la mise en service en mars 1970 de la première génération du turbo train ETC sur la ligne Paris - Cherbourg, le turbo train expérimental TGS avait permis d'explorer le domaine des vitesses jusqu'à 250 km/h. Enfin un programme d'essais allant jusqu'à 250 km/h s'est déroulé avec la rame RTG 01 simultanément au programme TGV 001.

#### *Programme d'essais du TGV 001*

##### Les objectifs

Le but poursuivi était d'accumuler très rapidement les enseignements nécessaires à la mise au point des rames de série, en poussant jusqu'aux limites l'étude du comportement des organes essentiels afin de procéder au choix des options fondamentales.

Par ailleurs, ces essais devaient permettre de confronter à la réalité les prévisions des études théoriques antérieures, portant sur l'aérodynamisme, la stabilité, les transmissions, l'équipement électrique et le freinage.

La rame expérimentale devait donc permettre de procéder aisément à des réglages progressifs dans une gamme étendue pour un grand nombre de paramètres permettant d'assurer en toute sécurité les fonctions principales: mise en marche et régulation des groupes propulseurs, captation d'air, stabilité du roulement, suspension, transmissions, liaisons caisses-bogies, freinage.

Elle devait également, après mise au point des domaines de sécurité pour l'ensemble des paramètres, permettre de rechercher la combinaison optimale sur le plan de l'endurance compatible avec les performances maximales de vitesse.

##### Les essais

Ceux-ci se sont déroulés en trois phases:

- 1 - vérification de bon fonctionnement des composants et réglages à poste fixe ou à faible vitesse,
- 2 - montée progressive en vitesse (jusqu'à 200 km/h) et amélioration des réglages,
- 3 - exploration aux limites et essais d'endurance.

C'est évidemment cette dernière phase qui présente le plus d'intérêt. L'exploration aux limites concerne:

- les performances de stabilité, freinage, vitesse, adhérence
  - le comportement des groupes propulseurs et des organes de sécurité (boîtes d'essieux, transmissions, liaisons caisse-bogies, organes de suspension, etc.).
- Des essais particulièrement approfondis ont porté sur les éléments suivants:
- la stabilité (mesure des efforts transversaux en courbes de différents rayons, aux franchissements d'aiguilles, sur chantiers de nivellement, etc.)
  - le freinage (avec toutes les combinaisons permises par les équipements)
  - l'adhérence (dans les conditions climatiques les plus diverses).
  - l'aérodynamique (écoulements sur les différentes parties de la rame, couche limite, effet de souffle, résistance à l'avancement).

##### Performances

La vitesse maximale de 318 km/h a été atteinte le 8 décembre 1972. Ce résultat met en évidence les excellentes caractéristiques aérodynamiques de la rame, qui se sont révélées plus favorables que prévu. Il en résulte un gain d'environ 30 km/h par rapport à la vitesse maximale envisagée. Les consommations d'énergie seront donc inférieures à ce qui avait été prévu, ce qui constitue un facteur important d'économie sur le coût d'exploitation.

La stabilité ne constitue pas une qualité constante, mais évolue en fonction de l'usure des tables de roulement.

Aussi, après avoir procédé aux réglages initiaux (conicité de 1/40, empattement du bogie, rigidité de la suspension, amortissement anti-lacet, charges non suspendues) et constaté qu'ils ne conduisaient pas à des instabilités importantes dans la gamme des vitesses envisagées, il y avait lieu d'étudier leur évolution dans le temps, au cours des essais d'endurance. Ceux-ci se sont montrés satisfaisants, mais ils ont fait apparaître l'importance de paramètres que le TGV 001 ne permettait pas d'explorer dans une gamme suffisamment large: la masse suspendue du bogie, son empattement, la rigidité des liaisons entre essieux et châssis de bogie. Aussi a-t-il été décidé d'explorer ces paramètres sur un nouvel engin expérimental, la Z 7001.

Le freinage s'est également révélé excellent, permettant une décélération moyenne allant de 0,91 m/s<sup>2</sup> à 300 km/h, à 1 m/s<sup>2</sup> à 220 km/h; grâce à un ensemble de 4 types de freins pouvant fonctionner suivant toutes les combinaisons: frein rhéostatique, frein rotatif à courants de Foucault, patins électromagnétiques, frein pneumatique à sabots, sans provoquer d'échauffements dangereux pour les tables de roulement. On a pu observer que l'adhérence ne constituait pas, dans la limite des vitesses pratiquées, un obstacle à une progression plus importante de la vitesse.

Dans le domaine des nuisances, le bruit a fait l'objet d'études approfondies, qui permettent d'affirmer que les normes sont respectées en toutes circonstances: le TGV 001 apparaît plus silencieux à 300 km/h qu'un train classique à 200 km/h.

On a pu également constater le bon comportement des organes mettant en jeu la sécurité: outre les bogies, les liaisons entre caisses, les attaches d'amortisseurs, etc.

#### *Programme d'essais de la Z 7001*

Comme il a été dit ci-dessus, le programme d'essais de la Z 7001 visait essentiellement l'étude du comportement d'un bogie de plus grand empattement, plus léger et mieux découpé de la caisse, afin de réduire son agressivité par rapport à la voie, d'améliorer sa stabilité, et si possible le confort des voyageurs comme le laissaient pressentir les modèles mathématiques et les expériences antérieures.

Par ailleurs, dans le domaine du freinage, il y avait lieu de poursuivre l'expérimentation d'un nouveau système de frein linéaire à courants de Foucault sans contact avec le rail, susceptible de développer une puissance de freinage deux fois plus élevée par unité de longueur que celle du patin électromagnétique équipant le TGV 001 (lequel prend appui sur le rail).

Enfin s'ajoutait à ces objectifs de comportement aux limites l'étude habituelle relative à l'endurance des organes dont dépendent la sécurité et le bon fonctionnement du véhicule, ainsi que la recherche de la technologie optimale pour une utilisation commerciale.

Les essais se sont déroulés en trois phases, comme pour le TGV 001. Ils ont permis d'obtenir une stabilité latérale de caisse très satisfaisante aux très grandes vitesses, par simple réglage des amortisseurs transversaux, après avoir élucidé les lois de variations de la vitesse critique en fonction du parcours d'usure des tables de roulement (paramètre imputable au seul véhicule), de la conicité équivalente (paramètre intégrant en plus les caractéristiques de pose de la voie: écartement et angle de pose) et du couple d'amortissement anti-lacet.

Compte tenu de ces bons résultats, il a été décidé de poursuivre les essais du TGV 001 en dotant celui-ci de bogies identiques à ceux de la Z 7001.

L'ensemble de ces essais a permis de définir les caractéristiques de deux rames de pré-série qui seront pratiquement identiques au matériel retenu en définition pour l'exploitation commerciale.



## LA LIGNE NOUVELLE PARIS – LYON

L'ensemble des considérations qui précèdent a été utilisé pour définir ce que serait l'impact sur la demande de transport, de la création d'une ligne nouvelle entre Paris et Lyon utilisant, ainsi qu'il a été dit, les pénétrations urbaines existantes, de façon à définir les caractéristiques optimales du service sur cette ligne et à évaluer la rentabilité d'un tel projet. De façon plus précise, l'ensemble des études économiques a été mené selon une démarche qui peut se synthétiser selon le schéma de la *planche 2* qui met en évidence les principales interactions entre les divers éléments pris en compte.

### Les prévisions de trafic

Les flux élémentaires de trafic intéressés par le projet peuvent se regrouper en fonction des données de géographie humaine de l'implantation de la ligne nouvelle et des lignes existantes selon trois „axes” :

- Paris – Lyon,
- Paris – Savoie,
- Paris – Bourgogne.

Le premier regroupe l'ensemble des courants de trafic qui pourraient emprunter la totalité de la ligne nouvelle, le second ceux qui l'emprunteraient sur le tronçon Paris – Mâcon, le troisième est relatif au tronçon Paris –

St-Florentin. Une excellente visualisation de ces trois axes est fournie par ce que nous appelons „l'arbre à boules” (planche 3).

En nombre de voyageurs par fer, l'importance relative des 3 axes se situe comme suit :

Axe Paris – Lyon	: 60%
Axe Paris – Savoie	: 17%
Axe Paris – Bourgogne	: 23%

Pour les études, on a défini une „situation de référence” sans ligne nouvelle qui repose sur une projection tendancielle de la qualité de service des modes existants (vitesse, fréquence, temps d'arrêt), de leurs prix de vente et de la valeur du temps ainsi que des trafics en cause, à l'horizon de la date de mise en service de la ligne nouvelle, prévue pour 1982-1983.

Après avoir ainsi défini la situation de référence, pour chaque mode (fer 1ère classe, fer 2ème classe, avion, route), on détermine, à l'aide des modèles économétriques, les répercussions de la mise en service de la ligne nouvelle :

- reports de trafics ferroviaires de l'ancienne ligne sur la nouvelle,
- reports de l'avion sur le train,
- reports de la route sur le train,
- induction de trafics nouveaux.

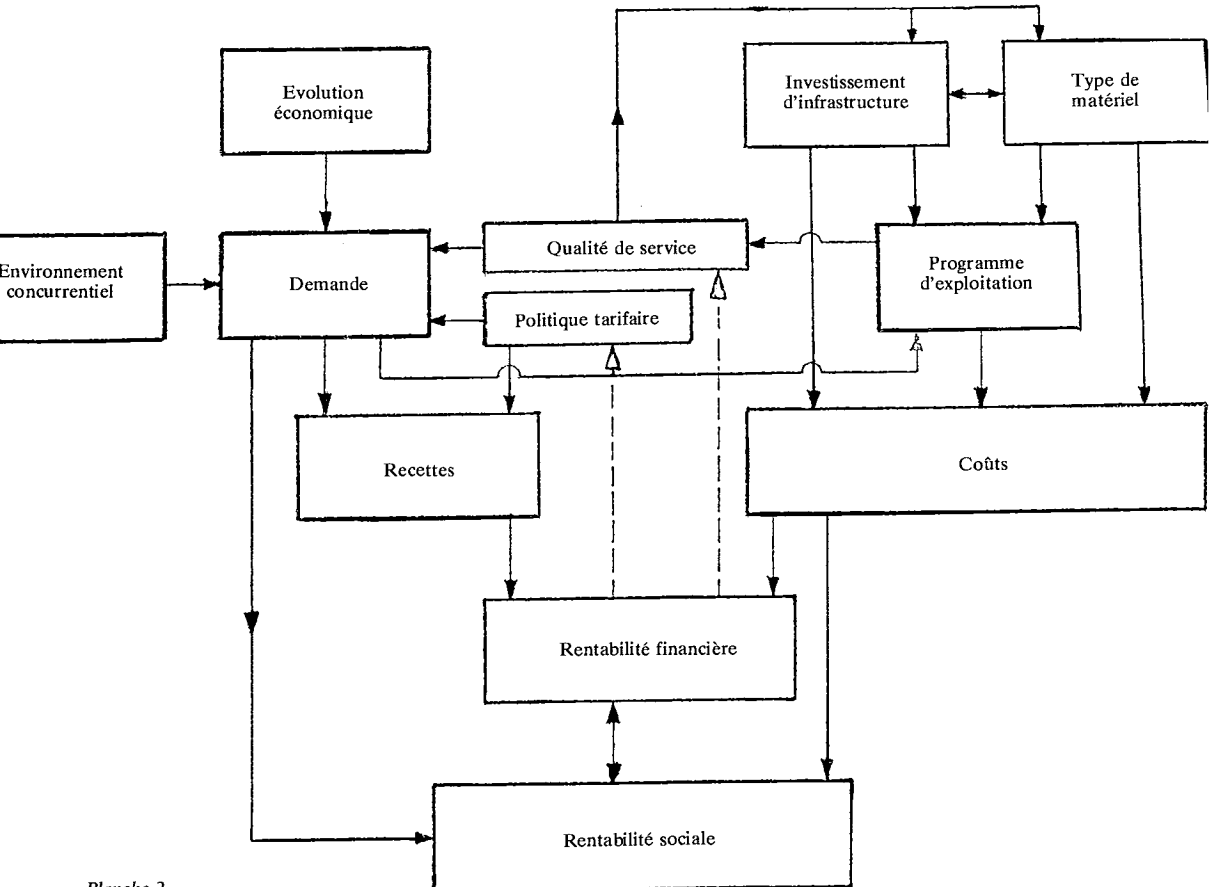


Planche 2

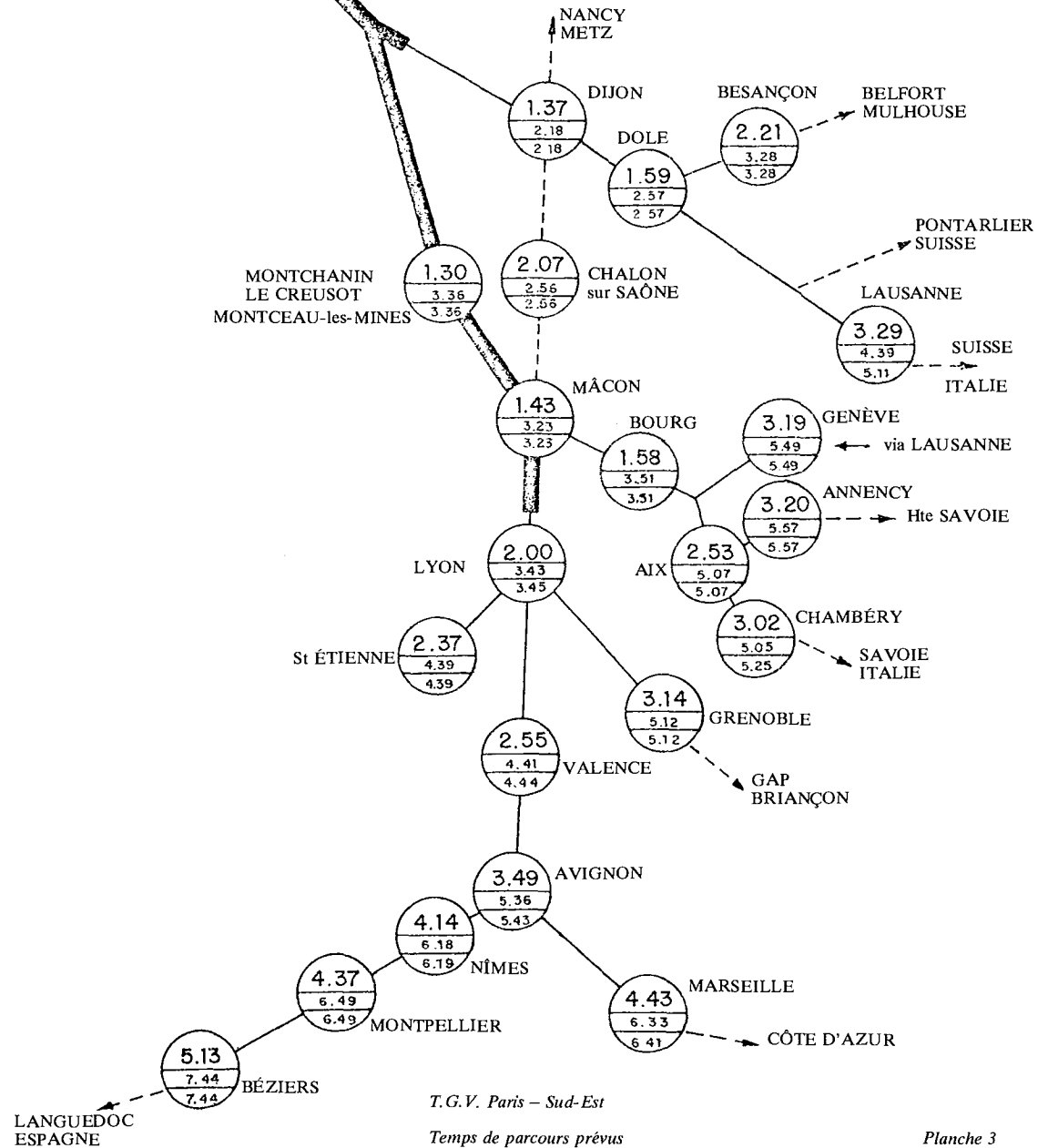
PARIS

**Légende**

Temps de parcours futurs depuis PARIS

Meilleurs temps du service d'hiver 1976/77

2.00	} 1 <sup>o</sup> Cl.
3.43	
3.45	



T.G.V. Paris - Sud-Est  
Temps de parcours prévus

Les résultats de ces projections conduisent aux prévisions de trafic suivantes:

Situation de référence				
	Trafics observés <sup>1)</sup>			Trafic projeté <sup>1)</sup> en situation de référence
	1969	1972	1975	1982-1983
Fer 1ère classe	2.533	2.839	3.350	3.992
Fer 2ème classe	7.948	8.662	9.950	11.513
Avion	1.942	2.779	3.502	6.218
Total	12.423	14.280	16.802	21.723

Situation avec ligne nouvelle	
	Trafics en 1982-1983 <sup>1)</sup>
Fer 1ère classe sur ligne nouvelle	6.060
Fer 1ère classe sur ligne ancienne	870
Fer 2ème sur ligne nouvelle	10.840
Fer 2ème classe sur ligne ancienne	3.800
Total général FER	21.570
Total Fer ligne nouvelle	16.900
Avion résiduel	4.490
Avion détourné	1.730
Avion antérieur	6.220
Total fer + avion	26.060

La répartition du trafic de la ligne nouvelle se ferait de la manière suivante:

	Trafics en 1982-1983 <sup>1)</sup>
Trafic reporté de l'ancienne ligne	
1ère classe	3.130
2ème classe	7.710
Trafic reporté de l'avion	
1ère classe	1.730
Trafic reporté de la route et trafic induit par la ligne nouvelle	
1ère classe	1.200
2ème classe	3.130
Total	16.900

<sup>1)</sup> en milliers de voyageurs par an.

Simultanément, le report de 70% environ du trafic voyageurs de l'ancienne ligne sur la ligne nouvelle permettra de résoudre le problème de la saturation de la ligne actuelle, qui se traduit par une détérioration du service non seulement des voyageurs, mais surtout des marchandises et pour ces dernières, par des augmentations de coûts importantes résultant de la nécessité de recourir à des itinéraires de détournements plus longs et moins bien équipés.

### Programme d'exploitation

Les études de trafic global annuel par classe et par relation ont été complétées par l'étude de la distribution temporelle du trafic par mois, semaine, jour de la semaine, et à l'intérieur de la journée, par tranches horaires, afin de déterminer avec suffisamment de précision les moyens d'exploitation à mettre en oeuvre, compte tenu des performances réalisables.

On a ensuite bâti un programme d'exploitation permettant de satisfaire la demande, qui donne à la fois l'importance du parc nécessaire et les éléments de pro-

ductivité moyenne (nombre de kilomètres, d'heures, de parcours effectués annuellement par rame) qui permet de calculer les coûts d'exploitation ainsi que la qualité de la desserte en termes de fréquence.

### Les coûts du projet

#### L'infrastructure

A l'exclusion des investissements liés aux installations terminales, le coût de construction de la ligne nouvelle s'élève, dans les conditions économiques du 1.01.1976 à 3 317 MF soit 8,5 MF/km, frais généraux et taxes incluses.

La décomposition de ce coût en ses principales composantes, est la suivante, en pourcentage:

Acquisition de terrains	: 5,8%
Retablisement des voiries traversées	: 6,0%
Plate-forme (terrassements)	: 28,7%
Ouvrages d'art	: 22,0%
Superstructures (voie, signalisation)	: 27,3%
Electrification	: 10,2%

#### Le matériel roulant

Le matériel roulant sera constitué par des rames automotrices articulées composées chacune de 2 motrices aux extrémités et de 8 remorques, et comportant 13 bogies dont 6 moteurs, capables de circuler à la fois en courant continu 1500 volts et en courant alternatif 25000 volts Hz.

Leur capacité totale sera de 384 places pour une masse de 380 tonnes à vide et leur puissance, de 6.300 kW, leur permettra de circuler à une vitesse de 260 km/h.

Leur coût, résultant d'un marché passé, est de 22,2 MF, hors taxes, dans les conditions du 1.01.1976, soit environ 58.000 F/place offerte.

#### Coût d'exploitation des rames

On se bornera à indiquer les postes essentiels du coût d'exploitation des rames; pour un parcours annuel prévu de 380.000 km effectué à la fois sur la ligne nouvelle et sur le réseau existant, ils se situent aux niveaux suivants, par rame-km:

énergie: 2,5 F/km
entretien: 7,3 F/km

### Rentabilité du projet

La rentabilité du projet trouve son origine dans trois sources différentes:

- la réduction des coûts d'acheminement du trafic ferroviaire préexistant à la ligne nouvelle et reporté sur celle-ci,
- l'apport de trafic nouveau, en provenance des autres modes, ou engendré par l'amélioration des conditions de desserte,
- la réduction des coûts d'acheminement du trafic marchandises obtenue en allégeant la ligne actuelle de la majeure partie de son trafic voyageurs.

Au total, la rentabilité immédiate d'un tel projet se situe approximativement à 15% et si les échéances prévues à l'heure actuelle pour sa mise en service sont respectées, l'ensemble des investissements engagés sera récupéré avant 1990, en termes de comptabilité d'entreprise.

Sur le plan collectif, l'intérêt en est également considérable; compte tenu des avantages monétaires ou des avantages de temps apportés aux usagers, la rentabilité sociale du projet, en valeur actualisée sur 20 ans dépasse largement 30%.