



## LE PARTAGE MODAL AIR-FER SUR LES RELATIONS RADIALES EN FRANCE ET EN EUROPE

Alain SAUVANT

Deux modèles simplifiés de partage modal air-fer en transports de voyageurs sont présentés ici. L'un concerne les radiales intérieures métropolitaines françaises de et vers Paris, l'autre les radiales de l'Europe de l'Ouest, de et vers cette même ville.

Ces modèles reproduisent les données de flux disponibles avec une erreur quadratique de 2 % environ. Les modèles estiment la valeur du temps pour les voyageurs, avec une distribution dont la médiane est d'environ une vingtaine d'euros par heure. En transport intérieur, sur les radiales, la part du transport aérien est plus forte lorsque la fréquence des relations directe de ce mode est élevée, toutes choses égales par ailleurs.

De 2000 à 2002, plus le contexte concurrentiel était fort, et plus la baisse des prix a été sensible.

Enfin, cet exercice montre qu'il est possible de reconstituer raisonnablement les flux ferroviaires et aériens à partir de données publiques.

Dans le but de mieux comprendre les déterminants du partage modal entre le transport aérien et le transport ferroviaire, des modèles de partage modal ont été réalisés. Sont présentés ici des modèles simplifiés adaptés aux grandes radiales centrées sur Paris, intérieures à l'hexagone et dirigées vers l'Europe de l'Ouest.<sup>1</sup>

Ces modèles permettent de simuler l'impact de politiques tarifaires ou bien de politiques d'infrastructures ferroviaires ayant un effet sur les temps de transport. Il s'agit de modèles de demande, et les questions des capacités d'accueil des diverses infrastructures n'ont pas été étudiées ici.

### Des modèles de type prix-temps

Les modèles de partage modal retenus sont des modèles qui comparent les prix et les temps des deux modes considérés sur diverses liaisons. On les appelle ainsi des modèles prix-temps.

Le principe du modèle repose sur un arbitrage entre le temps de transport et son prix. On suppose ainsi que chaque usager  $i$  prend sa décision de choix modal en fonction des coûts généralisés de chaque mode.

$$\begin{aligned} C_{\text{fer}}^i &= p_{\text{fer}} + h^i * t_{\text{fer}} \\ C_{\text{air}}^i &= p_{\text{air}} + h^i * t_{\text{air}} \end{aligned}$$

$C_{\text{fer}}^i$  et  $C_{\text{air}}^i$  sont les prix généralisés du fer et de l'avion,  $p_{\text{fer}}$  et  $p_{\text{air}}$  sont les prix des deux modes,  $t_{\text{fer}}$  et  $t_{\text{air}}$  sont les temps de trajet, et  $h^i$  est la valeur du temps de l'individu  $i$ .

<sup>1</sup> Une autre note (*Modélisation du partage modal air-fer en origine-destination en France et en Europe*, Emmanuel FAVRE-BULLE, dans ce même numéro) présente un modèle en origine-destination, plus complexe mais plus adapté à l'étude des passagers multimodaux et des relations transversales.

## VOYAGEURS

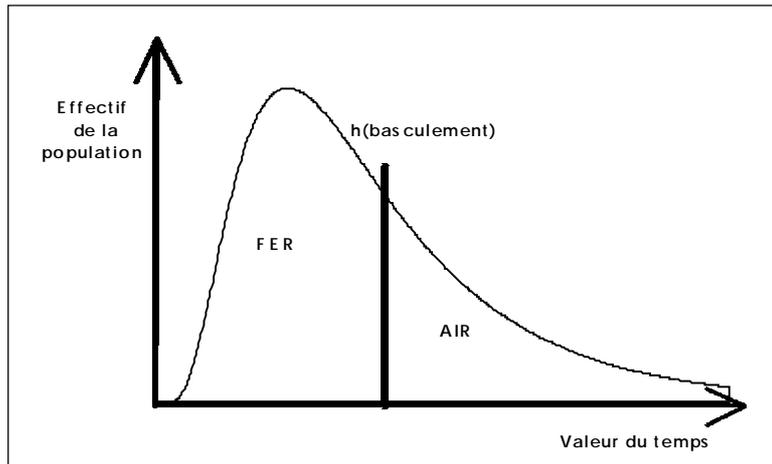
L'individu  $i$  est supposé choisir le fer si  $C_{fer}^i < C_{air}^i$ , soit si  $h^i < h_{\text{basculement}}$

$$\text{où } h_{\text{basculement}} = \frac{P_{air} - P_{fer}}{t_{fer} - t_{air}}$$

On fait ensuite l'hypothèse que les valeurs du temps suivent une loi log-normale, comme les revenus auxquels elles sont en général corrélées (graphique 1).

La probabilité de choisir le fer, i.e. la part modale du fer est donc :  $\text{pr}(\text{fer}) = \text{prob}(h < h_{\text{basculement}})$ .

Graphique 1 - Hypothèse de distribution de la valeur du temps



**La prise en compte des fréquences, des temps d'accès et des autres temps**

Les temps de trajet  $t_f$  et  $t_a$  comprennent en fait plusieurs éléments :

- un temps de trajet de l'origine vers la gare  $t_{OG}$  ou l'aéroport  $t_{OA}$ , incluant éventuellement un délai de précaution ;
- un temps d'attente lié aux fréquences limitées dans les modes,  $t_{LF}$  et  $t_{LA}$  ;
- pour le mode aérien et le service Eurostar, un temps  $t_{HLE}$  lié à l'heure-limite d'enregistrement (HLE) ;
- un temps de trajet gare à gare  $t_{GG}$  ou aéroport à aéroport  $t_{AA}$  ;
- un temps de trajet de la gare  $t_{GD}$  ou de l'aéroport  $t_{AD}$  vers la destination finale, incluant éventuellement des formalités et la récupération des bagages.

Seuls sont connus avec précision les temps de trajet gare à gare et aéroport à aéroport ainsi que les délais d'heure-limite d'enregistrement. Les autres délais sont très variables d'un voyageur à l'autre, en fonction de nombreux paramètres.

On a ainsi :  $t_{fer} = t_{OG} + t_{LF} + t_{HLE\_F} + t_{GG} + t_{GD}$  et  $t_{air} = t_{OA} + t_{LA} + t_{HLE\_A} + t_{AA} + t_{AD}$ .

Et par suite, le terme utilisé pour calculer la valeur du temps de basculement peut s'écrire :

$$t_{fer} - t_{air} = [t_{GG} + t_{LF} + t_{HLE\_F}] - [(t_{OA} - t_{OG}) + t_{HLE\_A} + t_{AA} + (t_{AD} - t_{GD})] - t_{LA}$$

$$= [t_{GG} + t_{LF} + t_{HLE\_F}] - t_{forfait} - t_{LA}$$

avec  $t_{forfait} = [(t_{OA} - t_{OG}) + t_{HLE\_A} + t_{AA} + (t_{AD} - t_{GD})].0$

Le temps  $t_{forfait}$  s'interprète comme un équivalent aérien du temps de trajet ferroviaire de gare à gare. Il dépend peu de la liaison considérée, les temps de trajets aériens étant peu variables en fonction de la destination à l'intérieur de l'ensemble des radiales intérieures d'une part, ou des radiales internationales France-Europe de l'Ouest d'autre part.

## VOYAGEURS

### **Une méthode simplifiée de prise en compte des trafics de correspondance**

Les données de flux de transport aérien sont des données sur liaisons, et non pas en origine-destination (encadré). Il convient donc de retraiter ces chiffres pour isoler le trafic radial, ou celui qui se comporte de manière similaire. A cet effet, on isole de manière sommaire le trafic de correspondance. Dans le cadre de ce modèle, ce trafic est défini comme l'ensemble des voyageurs qui, arrivés à Paris, reprennent un vol à destination de la province ou de l'Europe, ou un long courrier (et inversement pour l'autre sens de parcours).

L'exemple du Paris-Marseille montre que le trafic de correspondance (majoritairement sur CDG) est difficilement reportable sur le TGV : ainsi l'évolution du trafic avant et après le TGV Méditerranée sur Orly-Marseille est de - 34 % contre - 5% sur CDG-Marseille.

Les taux de correspondance sont actuellement de 23 % sur les vols domestiques et de 54 % sur les vols européens (source Air France). Le taux de trafic difficilement reportable (noté TDR par la suite), est calculé de la manière suivante :

- en métropole, sur 23 passagers en correspondance sur des vols domestiques, 20 le seraient sur du long courrier ou sur l'Europe et 3 sur la métropole. Les correspondances métropole-métropole sont considérées comme non captives et transférées sur le TGV pour l'essentiel à l'horizon 2020. Sur les flux internationaux, à partir de l'exemple de Marseille, un report de 3 passagers sur 20 a été retenu. On aboutit ainsi à 17 % de trafic difficilement reportable (TDR) ;
- sur l'Europe de l'Ouest<sup>2</sup>, un calcul analogue aboutit au taux de 40 % de TDR en première approche.

Le modèle prend ainsi en compte tous les aspects du report modal.

### **Implémentation du modèle pour les radiales intérieures**

Le modèle a été calé pour les radiales intérieures sur la situation 2000.

En ce qui concerne les prix, les prix les plus bas (découverte J30 à la SNCF ou tarifs promotionnels aériens) se sont révélés les plus explicatifs, et ont donc été retenus respectivement pour représenter  $p_{\text{fer}}$  et  $p_{\text{air}}$  (moitié du prix aller-retour). Même si un nombre parfois faible de voyageurs est susceptible d'avoir accès à ce tarif, il constitue le moins mauvais indicateur disponible de la profondeur des réductions tarifaires moyennes.

En ce qui concerne les temps :

- le temps d'HLE (heure-limite d'enregistrement) ferroviaire  $t_{\text{HLE}_F}$  n'a pas lieu d'être pris en compte pour des radiales intérieures donc  $t_{\text{HLE}_F} = 0$  ;
- la fréquence de desserte ferroviaire ne s'est pas révélée statistiquement explicative du partage modal, donc  $t_{I_F} = 0$  ;
- la fréquence de la desserte aérienne directe est par contre explicative du partage modal. Le temps  $t_{I_A}$  relatif à cet effet-fréquence est supposé égal à  $k * \min(\text{Amplitude}/\text{freq}_{\text{air\_direct}}, \text{Plafond})$ , où  $\text{freq}_{\text{air\_direct}}$  est la fréquence moyenne journalière en aller-retour,  $k$ , Amplitude et Plafond étant des paramètres à caler ;
- le terme  $t_{\text{forfait}}$  résulte également du calage du modèle et est en première approche uniforme pour toutes les liaisons étudiées ;
- les meilleurs temps de trajet ont été utilisés pour représenter les temps de trajet de gare à gare  $t_{GG}$ .

On a donc dans le cas d'espèce :  $t_{\text{fer}} - t_{\text{air}} = t_{GG} - t_{\text{forfait}} - t_{I_A}$ .

<sup>2</sup> Royaume-Uni, Benelux, Allemagne, Suisse, Italie, Espagne.

## VOYAGEURS

La valeur du temps de basculement a été plafonnée, ce qui correspond à ce que la part modale du fer soit supérieure à un plancher (représentant les inconditionnels du fer).

Le modèle est ensuite calé sur les relations radiales vers les zones correspondant aux différents aéroports (35 zones), en se limitant aux liaisons pour lesquelles une substitution modale air-fer est possible à l'horizon 2025. Il s'agit des régions suivantes : Alsace, PACA, Languedoc-Roussillon, Aquitaine, Pays de Loire, Rhône-Alpes, Midi-Pyrénées, Bretagne, Lorraine.

Les régions Auvergne et Limousin n'ont pas servi au calage, pour pouvoir tester la validité du modèle. Les régions Picardie, Nord-Pas-de-Calais, Champagne-Ardenne, Franche-Comté, Poitou-Charentes, Centre, Haute-Normandie et Basse-Normandie ne comportent pas de liaison aérienne significative vers Paris. La région Corse ne comporte pas de liaison ferroviaire vers Paris.

Les données de flux ferroviaires par zone d'aéroport (zonage fin) sont regroupées par région en vue de la comparaison avec les données de flux ferroviaires réels. Un calage est ensuite effectué en minimisant les moindres carrés des erreurs sur les parts modales du fer au niveau régional.

Les principaux paramètres résultant du calage du modèle pour les radiales intérieures sont les suivants :

$t_{\text{forfait}} = 161 \text{ mn} = 2 \text{ h } 41 \text{ mn}$

médiane de la valeur du temps : 21,6 euros/heure.

En ce qui concerne la prise en compte des fréquences, les paramètres résultant du calage sont (cf définition ci-dessus) :

$k = 54 \%$

Amplitude = 676 mn = 11 h 16 mn

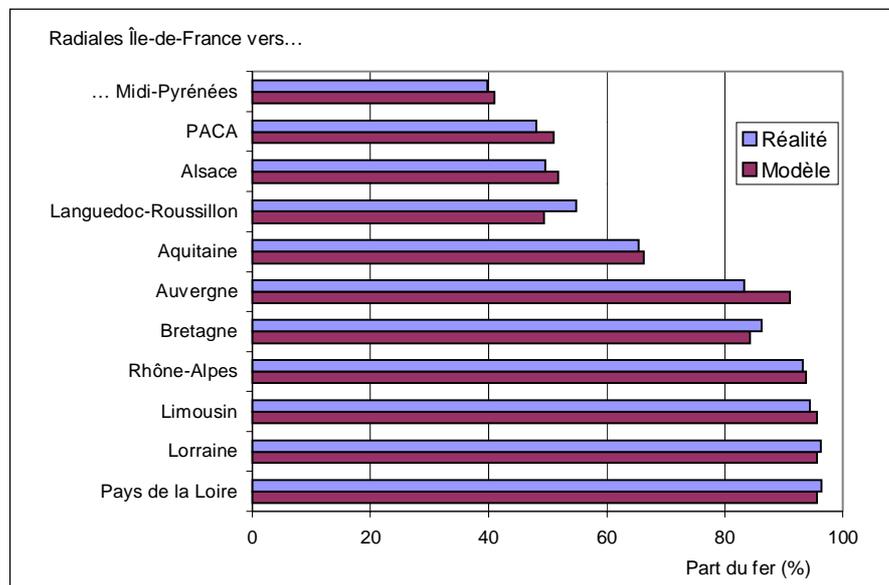
Plafond = 360 mn = 6 h

La mesure de la qualité de l'ajustement se fait grâce au calcul d'une erreur quadratique moyenne sur les parts modales :

$$\sqrt{\frac{\sum (pm_{\text{fer}}^{\text{modèle}} - pm_{\text{fer}}^{\text{réel}})^2}{n}} = 2,4 \%$$

La qualité de l'ajustement est illustrée au niveau régional (graphique 2).

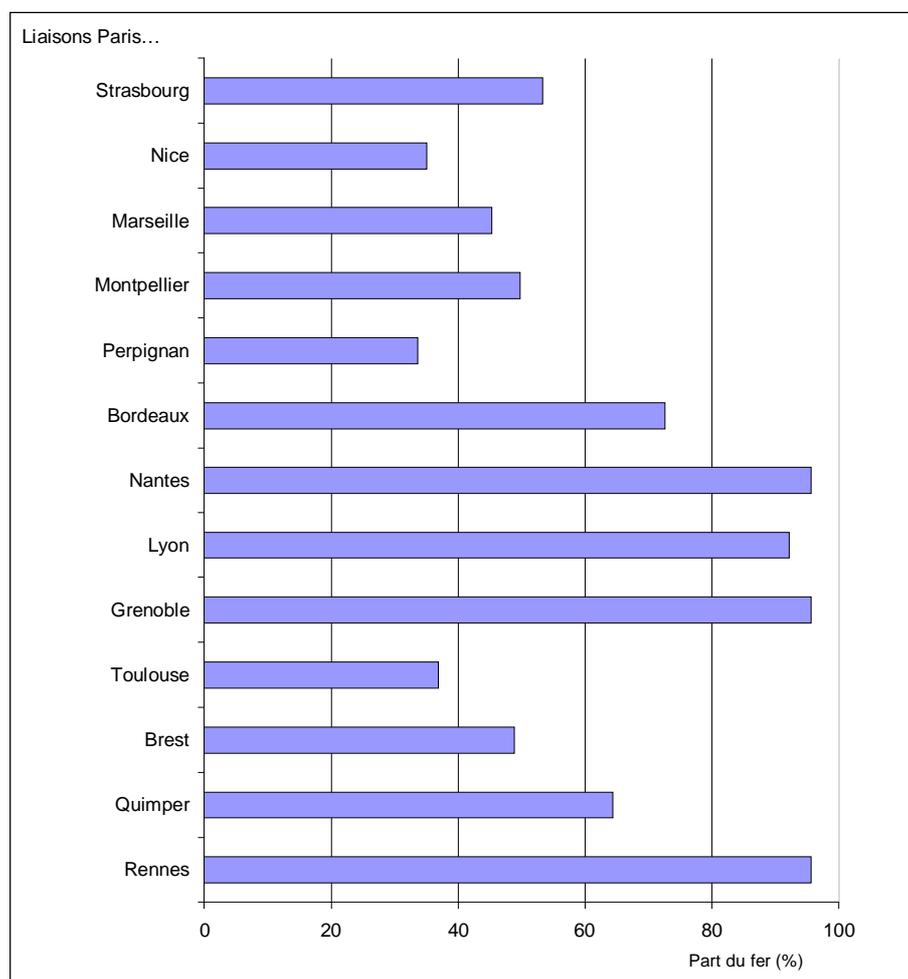
**Graphique 2 - Radiales intérieures, année 2000 : Comparaison modèle-réalité (Trafic aérien difficilement reportable non pris en compte)**



## VOYAGEURS

Le modèle fournit une estimation de la part modale du fer pour les radiales métropolitaines dans un zonage plus fin (graphique 3).

Graphique 3 - Part modale du fer (extraits du modèle) par liaison intérieure en 2000 (Trafic aérien difficilement reportable exclu)



### Implémentation du modèle pour les radiales internationales ouest- européennes

Le modèle relatif aux radiales internationales ouest-européennes est basé sur le même principe.

En ce qui concerne les prix, les prix les plus bas se sont révélés les plus explicatifs, et ont donc été retenus respectivement pour représenter  $p_{\text{fer}}$  et  $p_{\text{air}}$ .

En ce qui concerne les temps :

- le temps d'HLE ferroviaire  $t_{\text{HLE}_F}$  n'a pas lieu d'être pris en compte sauf pour Eurostar ;
- les fréquences de dessertes ferroviaires et aériennes ne se sont pas révélées statistiquement explicatives du partage modal, donc  $t_{L_F} = 0$  et  $t_{L_A} = 0$  ;
- le terme  $t_{\text{forfait}}$  résulte également du calage du modèle et est en première approche uniforme pour toutes les liaisons étudiées ;
- les meilleurs temps de trajet ont été utilisés pour représenter les temps de trajet de gare à gare  $t_{\text{GG}}$ .

On a donc dans le cas d'espèce :  $t_{\text{fer}} - t_{\text{air}} = t_{\text{GG}} + t_{\text{HLE}_F} (\text{Eurostar}) - t_{\text{forfait}}$

La valeur du temps de basculement est encadrée dans un intervalle, reflétant le fait qu'on constate toujours une part modale non nulle de l'avion et du train sur chacune des relations étudiées.

## VOYAGEURS

Le modèle est ensuite calé sur les relations radiales internationales ouest-européennes en se limitant aux pays pour lesquels une substitution modale air-fer est envisageable à l'horizon 2025. Il s'agit des pays suivants : Royaume-Uni, Benelux, Allemagne, Suisse, Italie, Espagne. A l'intérieur de ces pays, un zonage a été défini comportant vingt-huit zones au total. Les données de flux ferroviaires dans ce zonage sont regroupées par pays en vue de la comparaison avec les données de flux ferroviaires réels. Un calage est ensuite effectué en minimisant les moindres carrés des erreurs sur les parts modales du fer au niveau des pays.

Les principaux paramètres résultant du calage du modèle pour les radiales internationales sont les suivants :

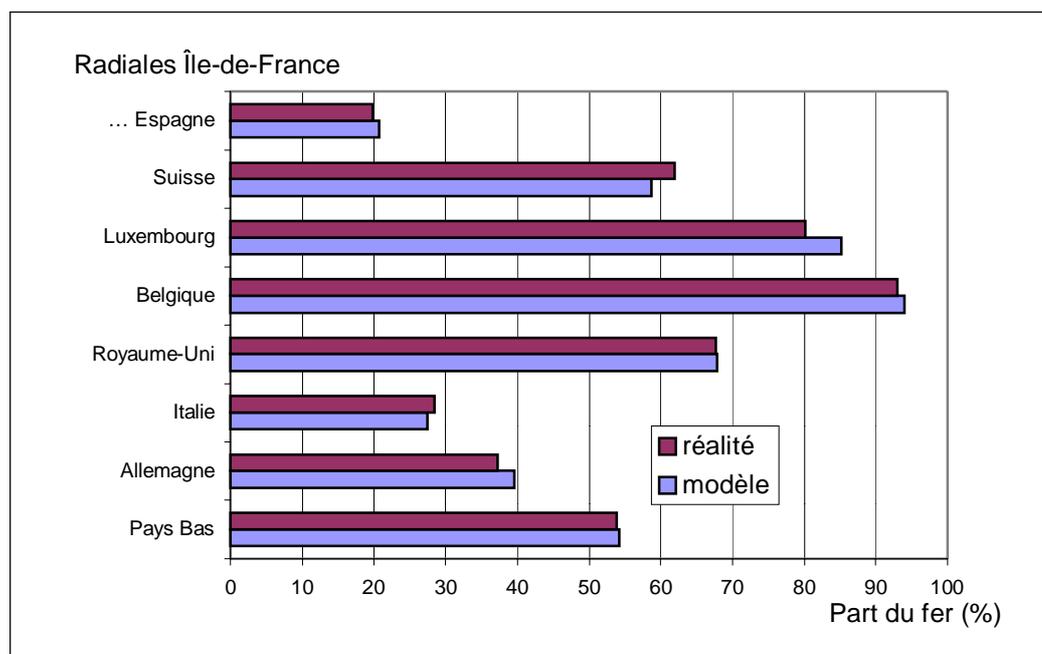
$t_{\text{forfait}} = 196 \text{ mn} = 3 \text{ h } 16 \text{ mn}$   
 médiane de la valeur du temps : 19,3 euros/heure.

On trouve ainsi une valeur de  $t_{\text{forfait}}$  un peu plus élevée que pour les radiales intérieures, reflétant une durée de vol un peu plus importante pour les radiales internationales. La répartition des valeurs du temps est en revanche similaire.

La mesure de la qualité de l'ajustement (illustrée par le graphique 4) se fait comme précédemment grâce au calcul d'une erreur quadratique moyenne sur les parts modales :

$$\sqrt{\frac{\sum (pm^{\text{mod } ele}_{\text{fer}} - pm^{\text{réel }}_{\text{fer}})^2}{n}} = 2,2 \%$$

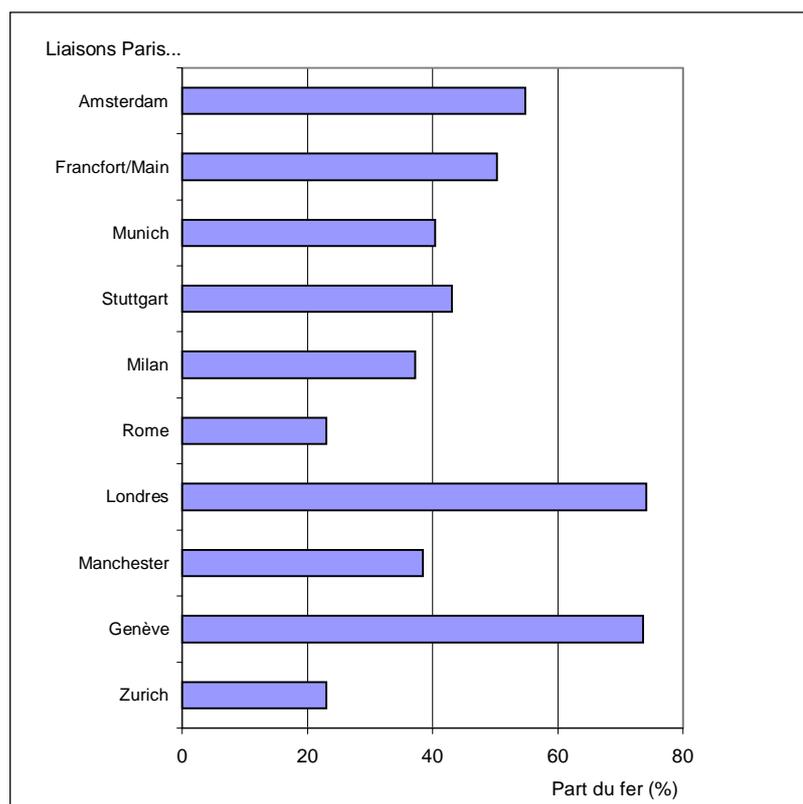
**Graphique 4 - Radiales internationales ouest-européennes, année 2000 : Comparaison modèle-réalité (Trafic aérien difficilement reportable non pris en compte)**



Le modèle fournit une estimation de la part modale du fer pour les radiales ouest-européennes (graphique 5).

## VOYAGEURS

Graphique 5 - Part modale du fer (extraits du modèle) par liaison internationale en 2000  
(Trafic aérien difficilement reportable exclu)



### Quelques exemples d'applications concrètes

A titre d'illustration des utilisations du modèle, il est possible de simuler, par exemple sur la liaison Paris-Toulouse, l'impact de quelques variables sur la part modale de l'air et du fer. En 2000, la part modale du fer reconstituée par le modèle était de 37 %. L'impact de quelques scénarios retenus uniquement à titre d'exemple est le suivant :

Test de sensibilité	Nouvelle part modale du fer
Temps fer diminué de 1 heure	44 %
Prix air diminué de 20 %	27 %
Heure-limite d'enregistrement air augmentée de 15 minutes	40 %

A plus grande échelle, le modèle peut servir à étudier l'effet de politiques tarifaires ou d'infrastructures (via leur impact sur le temps de transport) sur les différentes parts modales.

Le modèle permet également une analyse de la situation de l'année 2002. Ont ainsi été prises en compte les réductions des temps de trajet ferroviaire permises par la LGV Méditerranée, qui sont environ d'une heure pour les destinations concernées.

Un des problèmes de ce test réside dans les incertitudes pesant sur les évolutions des prix sur la période 2000-2002. Cette période a ainsi vu, outre l'ouverture du TGV Méditerranée, l'introduction à partir du 31 mars 2002 de liaisons à bas prix commercialisées sous le nom d'Air Lib express.

On s'intéresse à des liaisons importantes où le flux aérien a dépassé 600 000 voyageurs en 2002. Dans quelle mesure les variations de prix expliquent-elles l'évolution du trafic aérien entre 2000 et 2002 sur une liaison donnée ? Selon le modèle, les évolutions de flux constatées sur la relation Paris-Marseille sont expliquées par une baisse de 27 % du prix aérien entre 2000 et 2002 (tableau 1).

## VOYAGEURS

La typologie des liaisons est assez explicative des évolutions de prix : plus l'intensité de la concurrence a été forte, et plus la pression à la baisse des prix semble avoir été élevée.

Tableau 1 - Evolutions relatives des prix air-fer explicatives des évolutions de trafic constatées

Type de liaisons	Différentiel d'évolution du prix air-fer explicative des évolutions de trafic constatées
<b>Liaisons fortement concurrencées par le TGV Méditerranée (moins de 4 heures en TGV)</b>	
Paris Marseille	-27%
Paris Montpellier	-19%
Paris Toulon	-24%
<b>Autres liaisons avec au moins 2 compagnies aériennes en 2002</b>	
Paris Nice	-2%
Paris Toulouse	0%
<b>Autres liaisons avec une seule compagnie aérienne en 2002</b>	
Paris Strasbourg	13%
Paris Bordeaux	9%
Paris Lyon	9%

### Encadré

#### Les données disponibles et leurs limites

Une des contraintes fortes de cette démarche a été le type de données disponibles, qui pour chacun des modes présente des limites, différentes d'un mode à l'autre. Seules des données publiques ont été utilisées.

En ce qui concerne les données de flux (voyageurs), ont été utilisées :

- pour le fer, les matrices de flux (OD) région administrative/région administrative (françaises) et région administrative française/pays étranger (ventes SNCF) conformément à la convention SNCF-SES ;
- pour l'aérien, les données de flux par liaison, publiées par la DGAC, collectées en vertu des recommandations de l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale).

Pour les données de prix, ont été utilisées :

- pour le fer, les données de prix publiques du plein tarif de seconde classe, ainsi que les tarifs promotionnels les plus bas (découverte J30 ou similaire) de l'année 2000 ;
- pour l'aérien, les données de plein tarif de la classe économique, ainsi que des tarifs promotionnels de l'année 2000<sup>3</sup>. Pour des liaisons de faible volume, où les données n'étaient pas disponibles, ces données ont été complétées par des estimations du SES.

Egalement, des données de fréquences journalières ferroviaires (directes ou avec correspondance) et aériennes (directes) sur les liaisons en 2000 étaient disponibles.

Les données de flux ferroviaires présentent l'avantage de rendre compte des flux sur une base d'origine-destination, à la différence des données aériennes, qui rendent compte des flux par liaison (exemple : un voyageur effectuant un trajet Brest-Toulon via Orly apparaîtra une fois sur Brest-Paris et une autre fois sur Paris-Toulon). Par contre, la finesse géographique des données de flux aériens est plus importante que celle des flux ferroviaires.

On notera que pour les flux ferroviaires internationaux, seules sont connues en général (sauf pour la Suisse et l'Italie) les données des ventes de la SNCF, qui ne représentent en général que moins de la moitié des flux totaux. Des estimations des flux vers les différents pays européens proches ont donc été effectuées par le SES, en croisant des informations spécifiques (Eurostar, Thalys), des données de flux de voyageurs sur le dernier tronçon avant la frontière (dernières données disponibles en 1992), avec un bouclage sur les trafics ferroviaires internationaux totaux.

En ce qui concerne les prix, des données de produit moyen par liaison, qui auraient pu être utiles, n'étaient pas disponibles.

<sup>3</sup> L'ensemble des prix des différentes classes tarifaires constitue des informations publiques, à la différence des quotas de classes qui ne le sont pas. ■