



MODÉLISATION DU PARTAGE MODAL AIR-FER EN ORIGINE - DESTINATION EN FRANCE ET EN EUROPE

Emmanuel FAVRE-BULLE

Un modèle de partage modal air-fer en transport de voyageurs en origine-destination est présenté dans cette note. Il vise plus particulièrement, au delà de l'étude des reports de voyageurs entre les modes aérien et ferroviaire, à préciser les flux de voyageurs intermodaux qui prennent successivement le train et l'avion. Il concerne les flux à l'intérieur de la métropole et à destination ou en provenance de l'Europe de l'Ouest.

Pour la moitié des voyageurs, la valeur du temps estimée par ce modèle est inférieure à 14 euros de l'heure pour le transport intérieur et 21 euros pour l'international. Le modèle développé permet notamment d'estimer une matrice origine-destination pour les passagers intermodaux sur le champ géographique du modèle. Il permet également d'étudier l'impact de politiques tarifaires ou d'infrastructures sur le développement de cette catégorie de passagers.

Dans le but de mieux comprendre les déterminants du partage modal entre le transport aérien et le transport ferroviaire, plusieurs modèles de partage modal ont été réalisés. Le modèle développé ici se situe dans la continuité des modèles simplifiés présentés par ailleurs¹. Il a été élaboré plus spécifiquement pour l'étude de l'intermodalité (voyageurs empruntant pour un même déplacement successivement le train et l'avion ou vice-versa) et des reports modaux sur les relations transversales en France et en Europe de l'Ouest, complétant ainsi l'approche développée avec les modèles précédents.

Ce modèle permet, comme les autres mentionnés ci-dessus, de simuler l'impact de politiques tarifaires ou de politiques d'infrastructures ferroviaires ayant un effet sur les temps de transport. Il s'agit d'un modèle de demande et les questions des capacités d'accueil des diverses infrastructures, tant ferroviaires qu'aériennes, n'ont pas été étudiées ici.

Le champ du modèle recouvre 38 zones en France (correspondant aux différents aéroports) et 28 zones en Europe proche, en se limitant aux zones pour lesquelles une substitution modale air/fer est possible, au moins à l'horizon 2025. Il a été ajouté un regroupement « reste du monde » pour tenir compte des flux vers/en provenance de destinations plus lointaines (Europe de l'Est, Maghreb, long courrier).

Le modèle est fondé sur une approche par origine-destination et tient compte des correspondances

Pour modéliser le comportement des voyageurs avec les objectifs visés ci-dessus, il convient de tenir compte, même de manière simplifiée, des correspondances entre modes et à l'intérieur d'un même mode (pour l'aérien uniquement²). C'est pourquoi une approche en deux temps a été retenue, à la différence des modèles simplifiés cités en introduction qui modélisaient des transports sur des liaisons :

¹ Voir dans ce même numéro : A. SAUVANT, « *Le partage modal air-fer sur les relations radiales en France et en Europe* ».

² Les correspondances fer-fer sont intégrées dans les données disponibles et ne nécessitent donc pas de modélisation (encadré 2).

VOYAGEURS

- dans un premier temps, la génération et la distribution des trafics tous modes confondus pour chaque origine-destination (OD) sur l'ensemble des zones étudiées sont effectuées via un modèle de type « gravitaire » détaillé ci-dessous ;
- dans un second temps, la répartition modale pour chaque OD est estimée en fonction des caractéristiques de prix et de temps de chaque mode (modèle de type « prix-temps ») pour les trois modes ou groupes de modes considérés (air, fer et intermodal air + fer).

En ce qui concerne les passagers du mode aérien, une troisième étape est ajoutée qui consiste à déterminer le trajet effectivement réalisé, en pratique à calculer la part des passagers qui effectuent une correspondance air-air et la part de ceux qui utilisent un vol direct, si celui-ci existe. Ces correspondances air-air sont prises en compte de manière simplifiée en première approche en supposant qu'elles sont concentrées sur le hub parisien.

Le modèle de génération-distribution donne les flux tous modes confondus

Dans la première phase du modèle, consacrée à la génération et à la distribution des transports, le trafic OD, tous modes confondus et dans les deux sens, entre deux zones i et j , est modélisé par une approche de type « gravitaire » (qui tire son nom de l'analogie avec la formule de la gravitation universelle). Elle consiste à supposer que le trafic entre deux zones i et j est proportionnel à « l'attractivité » de ces zones, affecté d'un coefficient d'atténuation qui est fonction du coût généralisé d'un déplacement entre les deux zones, c'est-à-dire prenant également en compte le temps de transport (encadré 1).

Encadré 1

Un modèle gravitaire

Le modèle gravitaire utilisé dans la première étape de modélisation peut prendre a priori plusieurs formes. Une formulation générale est du type :

$$Q_{ij} = O_i \cdot D_j \cdot f(C_{ij})$$

où

- Q_{ij} est le flux de la zone i à la zone j ;
- O_i représente un facteur d'émission pour la zone i ;
- D_j représente un facteur d'attraction pour la zone j ;
- f est une fonction décroissante appelée fonction d'impédance ;
- C_{ij} est le coût généralisé de circulation entre i et j ;

La formulation retenue dans le cadre de cette étude prend pour fonction f une fonction exponentielle décroissante et pour le coût généralisé une moyenne pondérée des coûts généralisés des différents modes ou combinaisons de modes. D'autres formulations ont été testées et donnent des résultats de qualité légèrement inférieure. Plus précisément, la formule est la suivante :

$$Q_{ij} = A_i \cdot A_j \cdot \exp\left(-\beta \cdot \sum_{m=\text{modes}} PM_m^{ij} \cdot (P_m^{ij} + h \cdot T_m^{ij})\right)$$

où :

- A_i représente le facteur d'émission-attraction pour la zone i . Les facteurs d'émission et d'attraction sont supposés égaux pour une zone donnée dans la mesure où les observations sont des flux aller-retour ;
- β est un coefficient lié à la sensibilité du partage modal au coût généralisé ;
- PM_m^{ij} , T_m^{ij} , P_m^{ij} sont respectivement les parts modales, temps et prix du mode m (ou combinaison de modes) pour le flux de l'OD de la zone i à la zone j ;
- h est la valeur du temps (cf ci-dessous).

Les paramètres A_i , β et h sont déterminés lors de l'estimation du modèle. Les flux générés par le modèle sont des flux par OD dans les deux sens. La quantité $P_m^{ij} + h \cdot T_m^{ij}$ représente le coût généralisé du mode m qui servira également de base au modèle de partage modal. La quantité $\sum_{m=\text{modes}} PM_m^{ij} \cdot (P_m^{ij} + h \cdot T_m^{ij})$ est donc un coût généralisé moyen (sur l'ensemble des modes) pour l'OD de la zone i à la zone j .

Un modèle prix-temps réalise le partage modal

Le modèle de partage modal est un modèle de type prix-temps avec trois modes. Au delà de l'air et du fer, une originalité du modèle est de considérer un troisième mode représentant les passagers intermodaux air + fer considérés comme un mode à part entière³. Le principe est le suivant :

Chaque usager k choisit son mode en fonction des coûts généralisés de chaque mode m exprimés comme $P_m + h^k \cdot T_m$, où h^k est la valeur du temps de l'individu k (les exposants indiquant l'OD ont été enlevés pour simplifier l'écriture). L'individu k choisit le mode dont le coût généralisé est inférieur à celui des deux autres. Pour une OD donnée, en fonction des différentes configurations de prix et de temps pour les trois modes, ce mécanisme conduit à définir des valeurs du temps

de basculement entre les modes pris deux à deux, du type $\frac{P_{air} - P_{fer}}{T_{fer} - T_{air}}$. Le mode choisi par l'individu k est alors déterminé par la position de sa valeur du temps par rapport à ces valeurs de basculement. Par exemple, le mode ferroviaire est considéré comme préférable au mode aérien si $C_{fer} \leq C_{air}$, soit si $h^k \leq \frac{P_{air} - P_{fer}}{T_{fer} - T_{air}}$.

On fait ensuite l'hypothèse que les valeurs du temps suivent une loi log-normale, comme les revenus auxquels elles sont en général corrélées. On peut ainsi calculer la part modale de chaque mode, égale à la probabilité de choisir ce mode. A titre d'exemple, dans le cas où seuls les modes aérien et ferroviaire sont en concurrence, on peut obtenir $PM_{fer} = prob(h \leq h_{\text{basculement}})$.

Compte tenu de leurs caractéristiques différentes, on a retenu deux distributions de valeur du temps distinctes pour le transport intérieur et pour le transport international.

Le calcul des valeurs de basculement nécessite de préciser les temps de transport T_m^{ij} . Ceux-ci comprennent en fait plusieurs éléments :

1. un temps de transport de l'origine vers la gare ou l'aéroport, incluant éventuellement un délai de précaution ;
2. un temps d'attente lié aux fréquences de la desserte ;
3. pour le mode aérien et le service Eurostar, un temps lié à l'heure-limite d'enregistrement (HLE) ;
4. un temps de transport gare à gare ou aéroport à aéroport ;
5. pour les passagers intermodaux, un temps de correspondance à Paris pour aller de la gare à l'aéroport ou inversement ;
6. un temps de transport de la gare ou de l'aéroport vers la destination finale, incluant éventuellement des formalités et la récupération des bagages.

³ Le fonctionnement du modèle est très proche de celui proposé par A. SAUVANT (cf supra).

VOYAGEURS

Seuls sont connus avec une certaine précision les temps de transport gare à gare ou 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. Pour simplifier le calcul des valeurs du temps de basculement, il a été défini un temps d'accès différentiel qui est identique pour toutes les origines-destinations. Il est égal à la différence entre les modes pris deux à deux des temps n° 1, 2, 3 et 6 ci-dessus. Sa valeur est obtenue lors de l'estimation du modèle.

Il a été tenu compte des fréquences des dessertes, via un temps d'attente (point 2 ci-dessus). Celui-ci est supposé inversement proportionnel à la fréquence (exprimée en nombre de dessertes aller-retour par jour), de la forme

$\min\left(\frac{\textit{Amplitude}}{\textit{freq}_{\textit{mode}}}, \textit{plafond}\right)$ où $\textit{freq}_{\textit{mode}}$ est la fréquence moyenne journalière en aller-retour, $\textit{Amplitude}$ et $\textit{plafond}$ étant des paramètres à estimer.

Pour les passagers intermodaux, correspondant au 3^{ème} mode air + fer, un temps de transport forfaitaire de 90 minutes est ajouté au temps du déplacement pour tenir compte du temps de transport entre la gare (à Paris ou à CDG) et l'aéroport (Orly ou CDG) et éventuellement des formalités et de la récupération des bagages (point 5 ci-dessus)⁴.

Le modèle est implémenté en l'estimant à partir des données de flux air et fer

Les données disponibles pour l'estimation du modèle sont des flux pour les modes aérien et ferroviaire, à l'échelle régionale pour le fer et par liaison pour l'air, pour l'année 2000 (encadré 2).

Le modèle fournit quant à lui des flux de zone à zone. Il convient donc de les regrouper par région pour les comparer avec les flux ferroviaires observés (disponibles sur des bases agrégées). Les flux aériens obtenus sont à la bonne échelle géographique, mais il reste à tenir compte des possibilités de correspondances aériennes pour les OD transversales.

Seules les relations les plus importantes comportent une liaison aérienne directe. Pour ces dernières, un taux de correspondance à Paris est également implémenté (en distinguant le trafic intérieur du trafic international) et sa valeur est obtenue lors de l'estimation du modèle.

L'estimation des paramètres de l'ensemble du modèle (pour ses deux phases) peut alors être effectuée en minimisant la somme des carrés des écarts entre les flux modélisés (air et fer) et les données disponibles.

Les principaux paramètres résultant de l'estimation du modèle sont les suivants :

- médiane de la distribution des valeurs du temps pour le trafic intérieur : 14,1 euros/heure (il s'agit de la médiane d'une distribution log-normale, la moyenne est donc supérieure) ;
- médiane de la distribution des valeurs du temps pour le trafic international ouest-européen : 20,8 euros/heure ;
- temps d'accès différentiel (qui tient compte du temps d'accès à la gare ou l'aéroport au départ et à l'arrivée) : 1h 36mn ;
- taux de correspondance moyen à Paris sur les lignes intérieures : 26 % ;
- taux de correspondance moyen à Paris sur les lignes internationales ouest-européennes : 20 % (ce taux n'inclut pas les passagers en correspondance

⁴ Il s'agit d'une estimation à partir du temps de trajet donné par les opérateurs (RATP, SNCF) qui conduit à un nombre de passagers intermodaux sur la plate-forme parisienne cohérent avec les différentes enquêtes disponibles.

VOYAGEURS

- sur les trajets Europe hors métropole–international, il comprend uniquement les passagers sur les trajets province–Europe hors métropole) ;
- le paramètre « Amplitude » qui tient compte des fréquences est de 6h 40mn.

Encadré 2

Les données disponibles et leurs limites

L'ensemble des précisions sur les données disponibles relatives aux modèles simplifiés présentés dans une autre note⁵ sont valables pour ce modèle.

Pour les liaisons où les données de prix/temps n'étaient pas disponibles ou lacunaires (transversales essentiellement), les données ont été complétées par des estimations fondées suivant les liaisons sur la distance parcourue, le prix/temps d'une liaison similaire ou, à défaut, le prix/temps du trajet passant par Paris avec un coefficient d'ajustement.

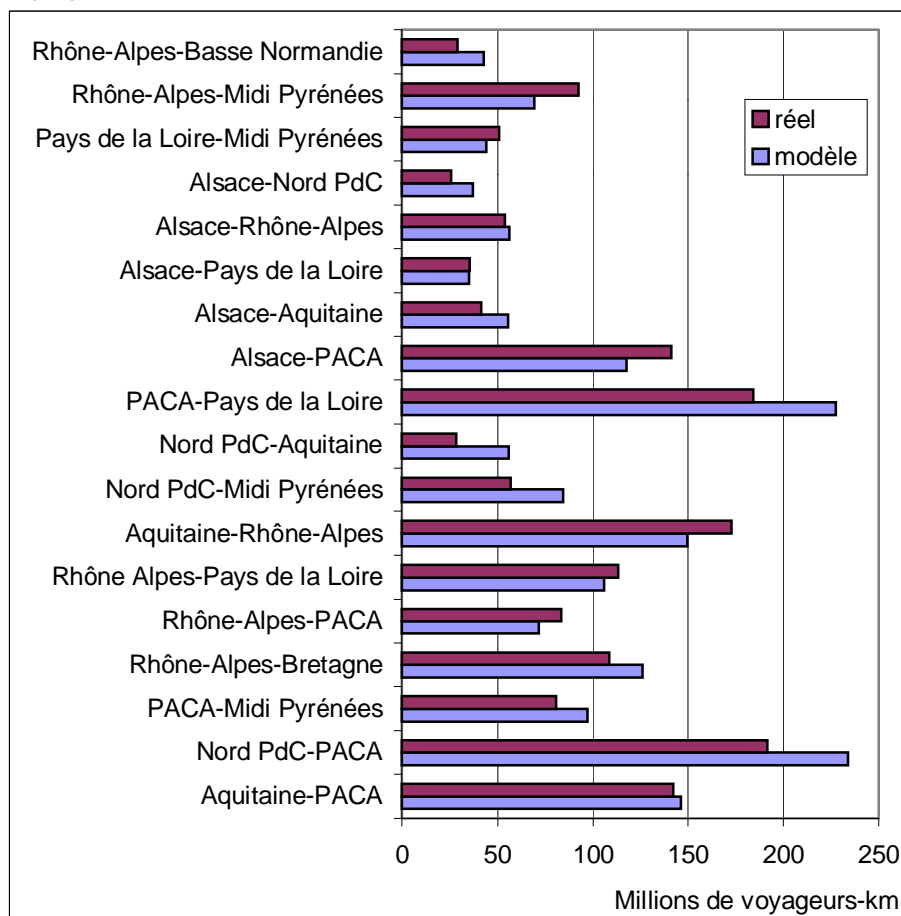
Définition

Un passager est considéré comme intermodal s'il emprunte successivement les modes ferroviaire et aérien dans cet ordre ou dans l'ordre inverse. Pour simplifier, il est supposé que l'ensemble des passagers intermodaux effectue sa correspondance air-fer sur la plate-forme parisienne ce qui est le cas pour la grande majorité d'entre eux. A titre d'exemple, un passager intermodal souhaitant se rendre de Marseille à Nantes pourrait emprunter le mode aérien de Marseille jusqu'à Orly puis le mode ferroviaire de Montparnasse à Nantes.

Comparaison modèle - observations

La comparaison pour l'année 2000, des flux en millions de voyageurs-kilomètres observés et estimés par le modèle pour les modes ferroviaire et aérien illustre la qualité de l'ajustement pour chaque type de relation, radiales ou transversales, intérieures ou internationales (graphiques 1 à 5).

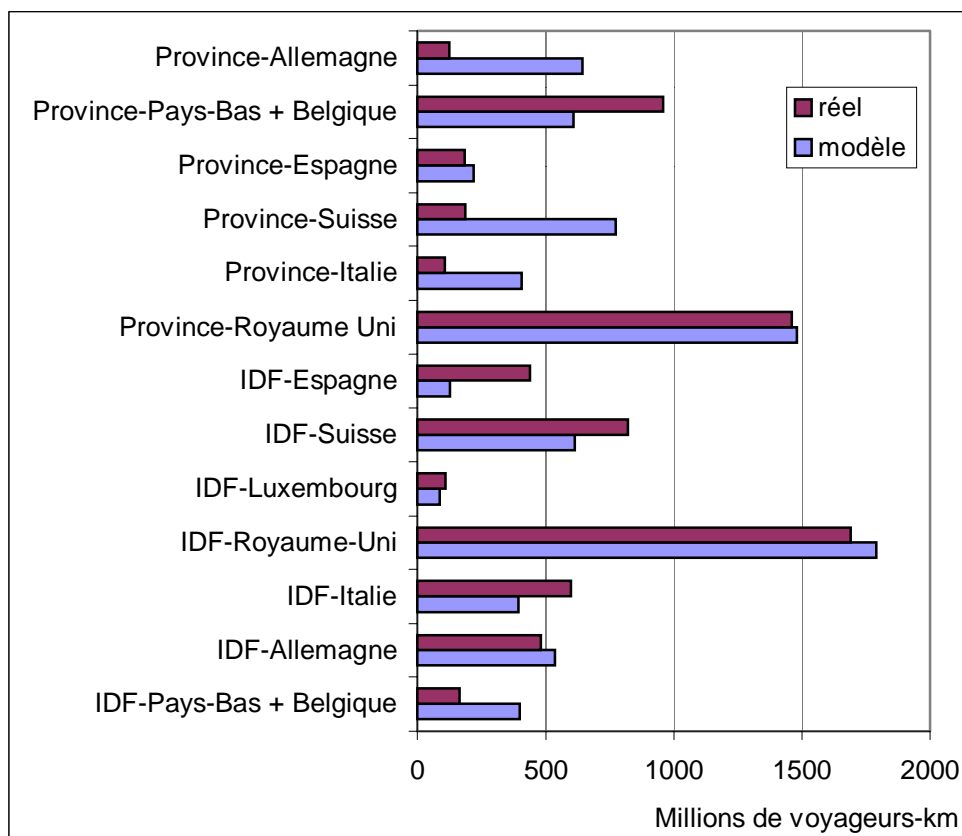
Graphique 1 : Air - Relations transversales intérieures



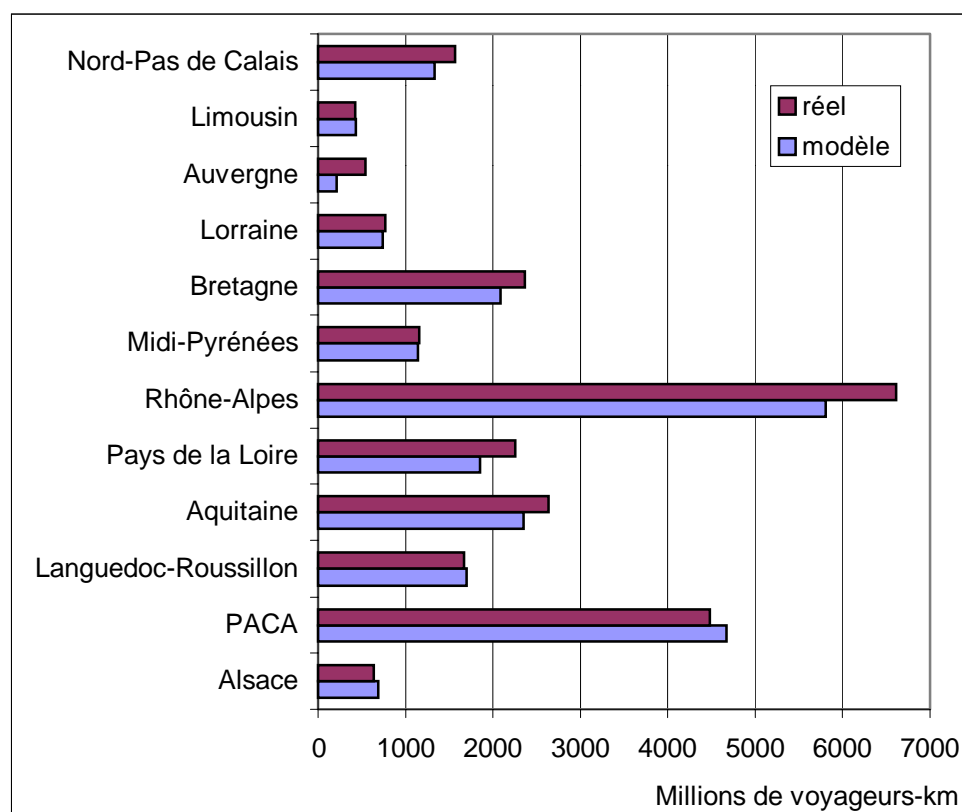
⁵ Voir « Le partage modal air-fer sur les relations radiales en France et en Europe », Alain SAUVANT, dans ce même numéro.

VOYAGEURS

Graphique 2 : Fer - Relations radiales et transversales ouest-européennes

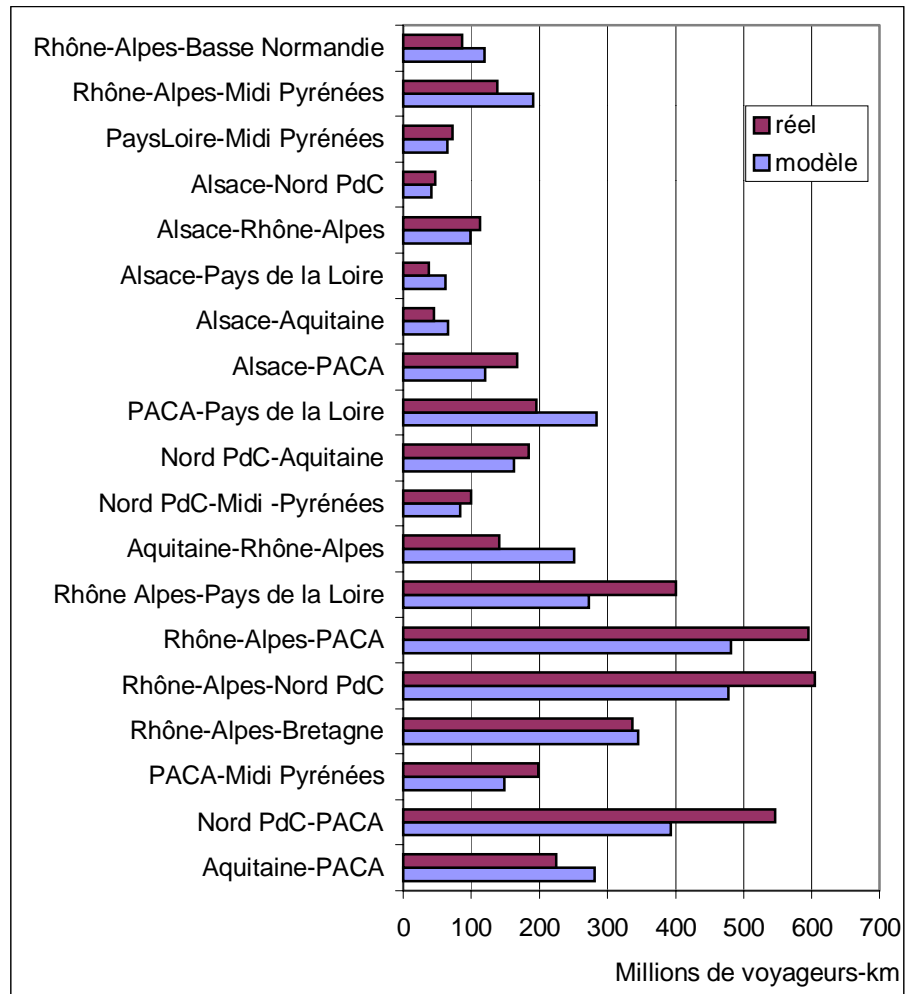


Graphique 3 : Fer - Relations radiales intérieures

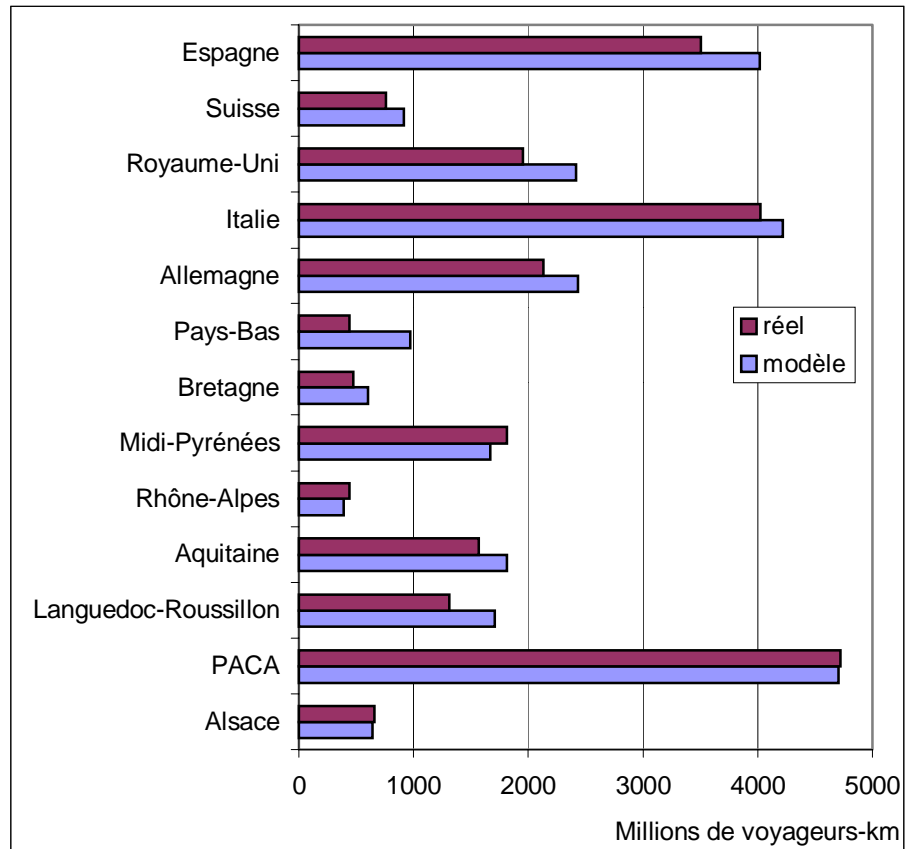


VOYAGEURS

Graphique 4 : Fer - Relations transversales intérieures



Graphique 5 : Air - Relations radiales intérieures et ouest-européennes



VOYAGEURS

Quelques exemples d'applications concrètes

A titre d'illustration des utilisations possibles du modèle, on simule sur l'OD transversale Marseille–Brest, l'impact de quelques variables sur la part des trois modes (air, fer et intermodal air + fer).

On constate que les différentes parts modales telles qu'estimées par le modèle sont sensibles à l'influence des variables prix et temps (Tableau 1).

Tableau 1 : Sensibilité de la part modale à quelques scénarios

Part modale	en %		
	Air	Fer	Air + fer
Situation estimée par le modèle en 2000	48	38	14
Temps fer diminué de 1 heure	48	45	7
Prix air diminué de 20 %	67	33	0
Heure-limite d'enregistrement augmentée de 15 minutes	46	39	15

A l'échelle d'une liaison, les résultats des tests de sensibilité dépendent beaucoup des caractéristiques initiales de celle-ci. 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.

Les passagers intermodaux

Pour l'année qui sert de base à l'estimation des paramètres (2000), le modèle fournit également le total des passagers intermodaux et leur décomposition par origine-destination. Il s'agit de l'ensemble des passagers intermodaux sur la plate-forme parisienne ainsi que ceux des aéroports de province. En regroupant les trafics par région administrative, les OD province-province les plus importantes en terme de trafic sont :

Passagers intermodaux

en milliers de passagers

PACA-Basse-Normandie	70
Languedoc Roussillon-Bretagne	70
Nord Pas de Calais–Aquitaine	50
PACA-Bretagne	45

Pour les OD du type province-étranger, les trafics les plus importants se situent sur les OD suivantes :

Passagers intermodaux

en milliers de passagers

Royaume Uni-Rhône Alpes	160
Nord Pas de Calais-Italie	160
Bretagne-Italie	140
Rhône-Alpes–Allemagne	130

