



**HAL**  
open science

# Analyse de la concurrence intermodale : l'évaluation de la qualité des dessertes ferroviaires et aériennes

Minghui Chen

► **To cite this version:**

Minghui Chen. Analyse de la concurrence intermodale : l'évaluation de la qualité des dessertes ferroviaires et aériennes. Economies et finances. Université de Lyon, 2019. Français. NNT : 2019LYSE2080 . tel-02494016

**HAL Id: tel-02494016**

**<https://theses.hal.science/tel-02494016v1>**

Submitted on 28 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre NNT : 2019LYSE2080

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

Opérée au sein de

L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2

**École Doctorale : ED 486 Sciences Économique et de Gestion**

Discipline : Sciences économiques

Soutenue publiquement le 29 novembre 2019, par :

Minghui CHEN

---

**Analyse de la concurrence intermodale.**

*l'évaluation de la qualité des dessertes ferroviaires et  
aériennes.*

---

Devant le jury composé de :

Alain BONNAFOUS, Professeur émérite, Institut d'Études Politiques de Lyon, Président

Yves CROISSANT, Professeur des universités, Université de la Réunion, Rapporteur

Nathalie GAUSSIÉ, Maître de conférences HDR, Université de Bordeaux, Rapporteur

Laurent DENANT-BOEMONT, Professeur des universités, Université Rennes 1, Examineur

Philippe JAUSSEMERAND, Expert, LISEA, Examineur

Stéphanie SOUCHE, Professeure des universités, Université Lumière Lyon 2, Directrice de thèse

## Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « [Paternité – pas d'utilisation commerciale - pas de modification](#) » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

Université Lumière Lyon 2

**Ecole Doctorale 486 Sciences Economiques et de Gestion**

*Faculté des Sciences Economiques et de Gestion*

*Laboratoire Aménagement Economie Transports*

**Analyse de la concurrence  
intermodale – l'évaluation de la  
qualité des dessertes ferroviaires  
et aériennes**

*L'étude de cas de la LGV SEA Tours-Bordeaux*

Thèse de doctorat de sciences économiques

*Spécialité : Economie des transports*

Minghui CHEN

Directrice de recherche : Stéphanie SOUCHE LE CORVEC

Soutenance le 29 novembre 2019, devant le jury composé de

Yves CROISSANT, Professeur à l'Université de la Réunion, Rapporteur.

Nathalie GAUSSIER, Maitresse de Conférences HDR à l'Université de Bordeaux, Rapporteur.

Alain BONNAFOUS, Professeur émérite de l'Université de Lyon.

Laurent DENANT-BOEMONT, Professeur à l'Université de Rennes.

Philippe JAUSSERAND, Directeur général adjoint de LISEA.



*« C'est le temps que tu as perdu pour ta rose qui fait ta rose si importante. »*

Antoine de Saint-Exupéry

*A mes parents, ma femme Xinxin et mon fils Ruyi...*

# Remerciements

Je voudrais, dans un premier temps, remercier ma directrice de thèse, Stéphanie Souche Le Corvec, professeur à l'université de Lyon, pour la confiance qu'elle m'a accordée. Je lui remercie pour sa gentillesse, sa patience et surtout ses conseils pertinents.

J'adresse de sincères remerciements à Alain Bonnafous, Nathalie Gaussier et Claude Lacour pour leur relecture très enrichissante. Leurs conseils ont été très précieux pour l'accomplissement de cette thèse.

Je remercie également à Yves Croissant et Dominique Bouf pour avoir participé au comité de suivi de ma thèse. Leurs remarques m'ont aidé à soulever des doutes sur la méthode choisie et à concrétiser les sujets de recherches.

Je désire remercier tous les collègues de LISEA pour leur sympathie, leur amitié. En particulier, un grand merci à Philippe Jausserand et Maxime Lafage pour leurs conseils dans mon choix d'orientation professionnelle.

Je tiens à remercier également tous les membres du laboratoire LAET, pour m'avoir accueilli pendant les 18 premiers mois de ma thèse, pour leur bonne humeur et le bon moment qu'on vivait ensemble.

Je remercie de tout mon cœur ma femme et mes parents pour leur soutien et encouragements tout au long de ces trois années de thèse.



# Sommaire

<b>Remerciements.....</b>	<b>5</b>
<b>Sommaire.....</b>	<b>6</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>9</b>
<i>Première partie :.....</i>	<i>21</i>
<i>La concurrence dans le marché des transports.....</i>	<i>21</i>
<i>Introduction de la partie 1 .....</i>	<i>22</i>
<i>Chapitre 1.1 : Le concept de concurrence dans le secteur des transports.....</i>	<i>24</i>
<i>Chapitre 1.2 : Cadre théorique de l'analyse de la concurrence intermodale .....</i>	<i>80</i>
<i>Chapitre 1.3 : La qualité des dessertes comme attribut de l'accessibilité.....</i>	<i>104</i>
<i>Conclusion de la partie 1 .....</i>	<i>140</i>
<i>Deuxième partie :.....</i>	<i>143</i>
<i>De la mesure de l'accessibilité à l'analyse des effets de la qualité des dessertes</i> <i>.....</i>	<i>143</i>
<i>Introduction de la partie 2 :.....</i>	<i>144</i>
<i>Chapitre 2.1 : Les principes des modèles de choix discrets.....</i>	<i>146</i>
<i>Chapitre 2.2 : L'analyse du choix modal basée sur le programme d'activités et les</i> <i>opportunités à destination .....</i>	<i>165</i>
<i>Conclusion de la partie 2.....</i>	<i>188</i>
<i>Troisième partie :.....</i>	<i>190</i>

<i>Les effets de la qualité des dessertes sur le choix modal.....</i>	<i>190</i>
<i>Introduction de la partie 3 .....</i>	<i>191</i>
<i>Chapitre 3.1 : Les offres Air-Fer en concurrence dans le périmètre SEA .....</i>	<i>194</i>
<i>Chapitre 3.2 : Les enquêtes « voyageurs » et les données spécifiques « horaires » .....</i>	<i>218</i>
<i>Chapitre 3.3 : L'enjeu des indicateurs de la qualité des dessertes pour une meilleure analyse du choix modal .....</i>	<i>243</i>
<i>Conclusion de la partie 3.....</i>	<i>273</i>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>275</b>
<b>Bibliographie : .....</b>	<b>279</b>
<b>Annexe :.....</b>	<b>297</b>
<b>Table des illustrations - Encadrés.....</b>	<b>316</b>
<b>Table des illustrations - Figures.....</b>	<b>317</b>
<b>Table des illustrations - Tableaux.....</b>	<b>321</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>323</b>



# Introduction générale

## 1. Contexte

La LGV SEA (Ligne à Grande Vitesse Sud Europe Atlantique) a été mise en service le 2 juillet 2017. Cette nouvelle ligne entre Tours et Bordeaux est composée de 302 km de LGV et 38 km de raccordement vers les anciennes gares ferroviaires au centre-ville. Le temps de parcours sans arrêt entre Paris et Bordeaux a été réduit de 3h15 à 2h04 en train sans arrêt. Cette évolution de l'offre ferroviaire va impacter les comportements des voyageurs et modifier la compétitivité du train vis-à-vis des autres modes de transport.

Dès la phase de conception de ce projet en 1992, le report modal en faveur du train a été indiqué comme l'un des principaux objectifs. En tant que le mode de transport plus écologique, les coûts externes générés par le train sont moins importants par rapport aux autres modes. Les prévisions de trafic ont été établies que le train devait gagner des parts de marché grâce à cette nouvelle LGV. Le Dossier d'Enquête Publique du projet prévoyait un gain de 21 % de trafic sur l'Axe SEA par rapport à la situation de référence dont 47 % provenant du mode aérien, 19 % du report du mode routier et 34 % de l'induction. Il était ainsi prévu que la concurrence entre l'avion et le TGV serait très forte.

18 mois après sa mise en service, la LGV SEA confirme sa forte compétitivité vis-à-vis de l'avion. Sur la liaison Paris – Bordeaux, la baisse du trafic aérien atteint 28 % par rapport à la même période avant la mise en service. La compagnie aérienne Air France a été contrainte de baisser son niveau d'offre en raison de la concurrence du TGV.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre analyse de la concurrence Air-Fer. Nous cherchons à clarifier les questions de la concurrence dans le secteur du transport, à comprendre l'évolution des parts de marché des différents modes de transport et à trouver une méthode pertinente pour expliquer le phénomène des transferts modaux.

## 2. La concurrence dans le transport ferroviaire

Il convient donc de commencer notre thèse par clarification de la notion de concurrence et de la manière dont elle peut concerner le transport ferroviaire. Les rappels sur le concept de concurrence aident à comprendre les caractéristiques des questions de concurrence et les enjeux des différentes questions de concurrence dans le transport ferroviaire. Nous montrons l'intérêt d'analyser la concurrence intermodale pour le projet de LGV SEA.

Lorsqu'il est question d'ouverture à la concurrence du secteur ferroviaire, cela désigne en fait des dispositifs relatifs à une concurrence intramodale. Pour la mettre en œuvre, deux voies sont possibles : la première est une concurrence régulée par voie de délégation de service public, une procédure nécessitant "un appel d'offres compétitif assorti d'un cahier des charges stipulant les obligations de service public à respecter par l'entreprise retenue". Ce mécanisme est parfois appelé système de "franchise" par référence à la solution qui domine en Grande-Bretagne, où la presque totalité des services sont gérés par une vingtaine de franchises attribuées après appels d'offres. Il correspond à la notion française de délégation de service public mais au lieu d'un accord de gré à gré avec l'opérateur historique, tel qu'il est jusqu'ici pratiqué en France, plusieurs pays, à commencer par le Royaume Uni, ont choisi de rendre ce marché contestable et de l'ouvrir à des opérateurs internationaux. Le quatrième paquet ferroviaire adopté fin 2016 prévoit une généralisation de la mise en concurrence des opérateurs historiques.

La deuxième voie correspond à une ouverture à la concurrence non régulée, dite en "Open Access", avec des services exploités "sur une base uniquement commerciale et aux risques et périls de l'exploitant". Le quatrième paquet ferroviaire européen limite ce mode de concurrence aux services commerciaux, c'est-à-dire non conventionnés. En France, les lignes TGV, Thalys et Eurostar, le Thello de nuit Paris-Venise et le Thello de jour Marseille-Nice-Milan sont exploités en open access, ce qui est une pratique courante sur les grands corridors et trains de nuit internationaux.

Pour comprendre ces évolutions, il faut observer que le secteur du transport est une industrie multi produits. Il convient de distinguer la gestion de l'infrastructure et l'exploitation du service de transport. Le monopole est dit « naturel » pour la gestion de l'infrastructure. Il s'agit d'une structure de marché dans laquelle la production nécessite de lourdes infrastructures, les coûts fixes pour produire un bien sont très importants. Dans le marché du monopole naturel, l'économie

d'échelle existe telles qu'aucun concurrent n'a intérêt à entrer dans le marché. Pour l'exploitation du service de transport, le monopole n'est pas économiquement justifié. Les barrières à l'entrée qui empêchent l'arrivée des nouveaux entrants sont surtout techniques ou légales, alors que les techniques de concurrence pourraient permettre de réduire les coûts et d'améliorer le bien-être social.

Cette tendance historique d'ouverture à la concurrence dans le secteur ferroviaire peut donner l'impression que la concurrence est absente, alors que la concurrence existe depuis toujours sous la forme de la concurrence intermodale. Des différents modes de transport sur la même liaison sont le plus souvent en concurrence pour le service qu'ils proposent. C'est une des raisons pour laquelle les opérateurs des différents modes de transport ne sont pas en mesure de proposer un prix élevé qui maximise leurs recettes marginales.

La concurrence intermodale est un phénomène courant qui a été particulièrement observé avec le développement de la grande vitesse ferroviaire. La littérature montre des avantages de compétitivité du train dans un périmètre entre 1h30 et 3h30 grâce aux performances des TAGV<sup>1</sup> et le phénomène du transfert modal en faveur du train dans tous les pays disposant du service ferroviaire à grande vitesse (Givoni et Dobruszkes, 2013 et Albalade, 2015). Les études ont vérifié l'importance du transfert modal en faveur du train dans tous les pays disposant du service ferroviaire à grande vitesse. Dans certaines conditions maintenant bien établies, le train, grâce à la location des gares au centre-ville, est clairement plus rapide que l'avion. Par ailleurs, les études ont aussi montré l'importance des facteurs liés aux coûts de déplacements, à la régularité, au confort et à la sécurité pour expliquer la concurrence intermodale.

### 3. L'analyse du choix modal

L'analyse de la concurrence intermodale focalise le plus souvent sur les comportements de choix modal des voyageurs. L'évolution de la compétitivité des modes de transport est interprétée comme le résultat d'un choix rationnel des voyageurs pour leurs déplacements. Cette approche du choix modal des voyageurs est une approche désagrégée au sens où l'unité d'observation est le choix de

---

<sup>1</sup> Train A Grande Vitesse

chaque voyageur. Cette approche a été couramment appliquée, qui nous fournit des catégories pertinentes et appropriées pour analyser la concurrence intermodale (Bhat et Sardesai, 2006, Koppleman et Bhat, 2006, Moeckel *et al.*, 2014).

Nous distinguons quatre déterminants du choix modal (figure 1 ci-dessous). Les principales variables identifiées dans les travaux sur le choix modal seront détaillées dans les parties suivantes.

- Les caractéristiques des trajets comme le temps de parcours, les prix payés en transport et les motifs de déplacements.
- Les variables spatio-temporelles. A titre d'exemple, la régularité des services de transport, la qualité des dessertes qui englobe les informations concernant la fréquence de service et les horaires programmés, l'accessibilité au réseau de transport et le confort.
- Les caractéristiques des voyageurs comme leur âge, leur niveau de revenu et la composition des ménages.
- Les aspects socio-psychologiques comme la perception aux différents modes de transport, le mode de vie des voyageurs, l'utilisation d'un mode de transport peut même considéré comme un moyen de montrer l'identité social des voyageurs.

La littérature montre les facteurs principaux de ces déterminants du choix modal. L'analyse de la concurrence intermodale consiste à identifier les formes opératoires de ces facteurs et à estimer leurs effets sur les comportements des voyageurs.

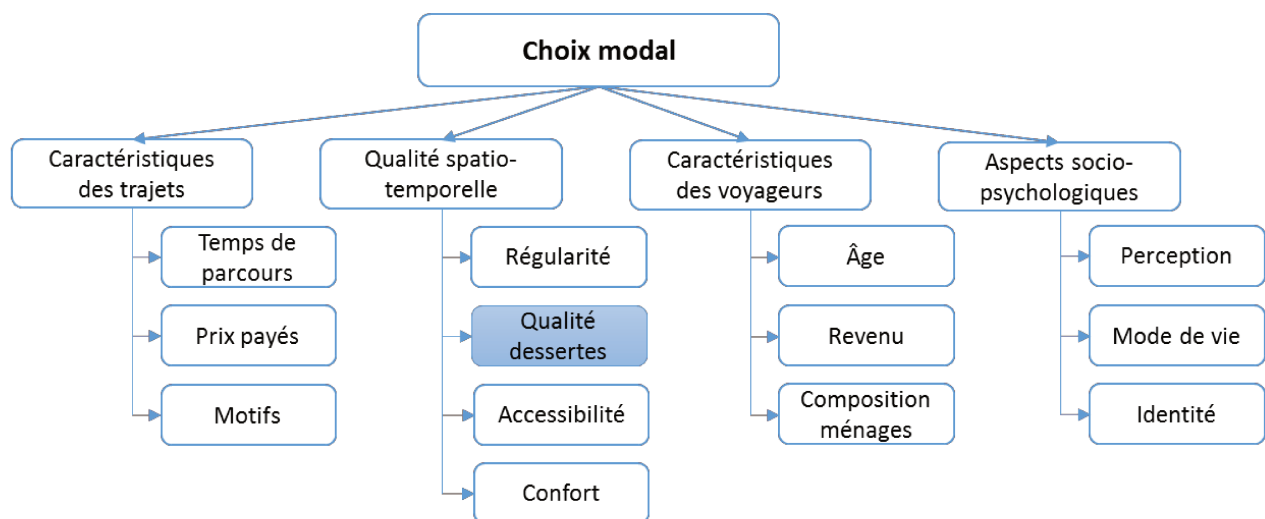


Figure 1 : les déterminants du choix modal et les principales variables identifiées (auteur, 2018)

Les modèles de choix discrets sont conçus pour étudier les comportements de choix des individus (Ben-Akiva et Lerman, 1985) et reposent sur la formalisation d'une fonction d'utilité. Les facteurs déterminants dans le cadre des études de choix modal correspondent aux variables explicatives de cette fonction d'utilité. Les voyageurs sont réputés faire-arbitrages dans le but de maximiser l'utilité.

Parmi les différentes variables explicatives du choix modal, le temps de parcours et les prix payés sont les plus souvent étudiés. La notion de coûts généralisés qui est fondamentale dans l'analyse de la compétitivité des modes de transport, est fondée sur ces deux variables déterminantes. Elle inclue l'ensemble des coûts du déplacement, le temps de transport est converti en valeur monétaire. La valeur du temps est utilisée pour la conversion du temps en euro. La compétitivité d'un mode s'améliore lorsque le temps de parcours est réduit et lorsque les prix payés baissent. Lorsqu'un mode de transport est plus rapide et moins cher, il devient dominant sur le marché.

Le processus de décision du choix modal est complexe, et d'autres variables présentées dans le cadre des modèles de choix modal pourraient aussi intervenir pour expliquer les comportements. La littérature sur chacune de ces variables est abondante. Les études existantes explorent chaque déterminant du choix modal et se spécialisent dans l'étude de l'une des variables explicatives.

## 4. Problématique

L'objectif de cette thèse est d'améliorer notre connaissance des comportements de choix modal des voyageurs entre l'avion et le train dans le contexte de la mise en service d'une nouvelle ligne ferroviaire à grande vitesse LGV. Nous cherchons en particulier à mieux maîtriser les effets liés à la qualité des dessertes sur les comportements des voyageurs. Dans cette optique, nous montrons d'abord les faiblesses des indicateurs standards de qualité des dessertes dans l'analyse du choix modal. Nous présentons ensuite des méthodes qui fournissent des informations complémentaires aux indicateurs standard, et alimentent ainsi des indicateurs plus pertinents dans les modèles de choix modal. Ces méthodes nous permettent enfin de proposer un modèle combiné qui explique à la fois le choix modal et le choix d'horaires des voyageurs.



Des rappels sur la théorie de concurrence nous permettront de poser le cadre économique de référence. L'objectif de ce travail de thèse n'est pas de contribuer à enrichir la théorie de la concurrence mais bien à alimenter le débat contemporain relatif aux impacts de la qualité des dessertes sur la concurrence intermodale, dans le cas présent entre l'avion et le train.

## 5. Vers une meilleure prise en compte de la qualité des dessertes

Parmi l'ensemble des facteurs déterminants que nous évoquons dans la figure 1, nous mettons en avant le rôle important de la qualité des dessertes. Par définition générale, celle-ci mesure la qualité que les transports desservent un lieu. En transport ferroviaire, la qualité des dessertes dépend des sillons tracés entre les différentes origines-destinations. Dans les études du choix modal, la qualité des dessertes est une variable explicative qui englobe les informations liées aux horaires de service programmés, à la fréquence de service, l'amplitude de service et l'intervalle de service.

Dans ce travail de thèse, notre sujet de recherche se concentre sur la qualité des dessertes. Dans la littérature et les travaux empiriques, cette variable est importante dans le processus de décision. C'est particulièrement le cas pour les services de transport public qui sont organisés sous contraintes des horaires contrairement à l'usage du véhicule individuel. Lorsque les horaires programmés ne sont pas adaptés aux besoins des déplacements, les voyageurs peuvent se tourner vers les autres modes de transport. Nous cherchons ainsi à savoir de quelle manière nous pourrions correctement évaluer les effets liés à la qualité des dessertes. Et de quelle manière les impacts d'un changement d'horaires peuvent être pris en compte dans l'étude du choix modal ?

Les indicateurs standard comme le nombre de trains, le nombre d'arrêts dans les gares et l'intervalle de service sont les plus souvent utilisés dans les études existantes. La littérature nous montre les problèmes que ces indicateurs peuvent générer dans l'étude du choix modal (Cascetta et Coppola, 2016 et Wilson et Nuzzolo, 2008). En effet, ces indicateurs ne prennent en compte que l'évolution de l'offre de transport, les besoins des voyageurs en termes des heures de déplacements sont absents dans l'analyse. Dans le cas d'un changement d'horaires, ces indicateurs ne permettent pas d'évaluer les nouveaux horaires en fonction des heures de départ et d'arrivée souhaitées des voyageurs.

La pertinence des indicateurs utilisés pour estimer les effets liés à la qualité des dessertes est une problématique qui nous paraît centrale. Bien que les études sur la modélisation des horaires soient nombreuses dans le domaine de l'urbain, en particulier au regard des questions de congestion, celles-ci sont moins présentes dans la littérature en transport interurbain. D'ici, nous considérons les déplacements à l'interne d'un bassin de vie, au sein de l'agglomération comme des déplacements urbains et les déplacements entre les différentes villes comme les déplacements interurbains. Le manque des travaux sur ce sujet sur les transports interurbains provient avant tout des difficultés méthodologiques.

Contrairement aux déplacements urbains qui sont principalement des déplacements domicile-travail en ville, les déplacements interurbains sont dans la plupart du temps, des déplacements non quotidiens et non soumis quotidiennement à des horaires de travail. Par conséquent, la question n'est pas simplement d'expliquer l'heure de départ des déplacements comme dans le cas des déplacements urbains, mais d'évaluer la qualité des horaires programmés en fonction des heures souhaitées des voyageurs. Ce sujet nécessite des méthodes plus sophistiquées et des données relativement rares. L'accès aux données est un obstacle majeur, il nous faut un indicateur représentant les préférences des voyageurs en termes d'heures de déplacements ou de données décrivant directement celles-ci.

Ce travail de recherche a donc pour principal objet l'évaluation de la qualité des dessertes pour les services de transport interurbain. Notre analyse commencera par montrer la différence entre une analyse basée sur la fréquence de service et une analyse basée sur les horaires. L'approche pertinente doit être fondée sur les programmes d'activités et pas seulement sur l'offre de transport. Notre travail sur la qualité des dessertes s'efforcera d'approfondir cette perspective et procéder à une modélisation de la qualité des horaires.

La figure ci-dessous montre le cadre général de notre analyse du choix modal. En évoquant la théorie de base, les méthodologies et les données utilisées, elle propose une présentation synthétique du schéma conceptuel de ce travail de thèse.

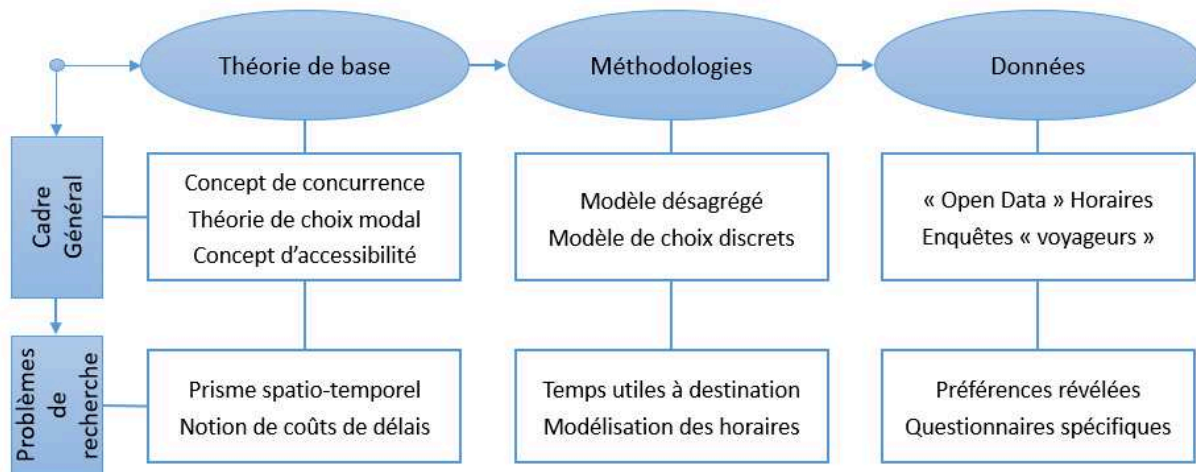


Figure 2 : le schéma conceptuel pour l'évaluation de la qualité des dessertes dans le cadre d'un travail de choix modal (auteur, 2018)

Nous présentons deux méthodes qui sont capables de répondre à notre problématique: les indicateurs de temps utile à destination et le modèle combiné choix modal – choix d’horaires. A l’aide de la première méthode, nous cherchons à améliorer la connaissance aux effets de la qualité des dessertes avec un nouveau module intégré dans les modèles de choix modal. Grâce à la deuxième méthode, nous traitons la problématique de recherche avec une nouvelle structure du modèle combiné qui explique en même temps le choix modal et le choix d’horaires. Ces méthodes sont élaborées sur la base des modèles de choix discrets.

- Les indicateurs de temps utile à destination sont basés sur le concept d’accessibilité spatio-temporelle. Nous supposons que les voyageurs souhaitent passer un certain temps à destination pour les activités principales. Par rapport aux méthodes basés uniquement sur l’offre de transport, cette approche basée sur le programme d’activité « Activity-Based Approach » est plus pertinente (Bhat et Koppelman, 1999). Le temps à destination fait partie du programme d’activités des voyageurs dans le cadre des déplacements allers-retours (Kim et Kwan, 2003). Par hypothèse, un mode de transport est plus compétitif lorsqu’il permet aux voyageurs de rester plus longtemps à destination.

Ici, on définit les activités principales par rapport au motif des déplacements. Si on retrace les déplacements des voyageurs sous forme d'une trajectoire pour les différents motifs de déplacements (travail, loisir, visite, etc.). Les activités associées au motif de déplacement sont considérées comme des activités secondaires. A titre d'exemple, le transport est considéré comme une activité secondaire pour réaliser les activités principales.

Nous pouvons aussi traduire le temps à destination comme du temps minimum nécessaire pour les activités principales. Nous supposons que les voyageurs ont besoin de passer un certain temps pour les activités principales à destination, la qualité des dessertes est évaluée en fonction des horaires offerts pour répondre à ces conditions. Nous montrons à travers cette thèse, l'indicateur temps utile à destination peut devenir l'outil d'évaluation de la qualité des dessertes.

- La deuxième méthode consiste à expliquer à la fois le choix modal et le choix d'horaires. L'idée est de ne pas travailler sur l'hypothèse du temps à destination mais sur les heures d'arrivée souhaitées des voyageurs. Cette méthode s'inscrit dans la famille des méthodes de modélisation des horaires qui est basée sur la notion de coûts de délais. Cette notion développée par Vickrey (1969) tient compte des horaires programmés par les opérateurs de transport et les heures d'arrivée souhaitées des voyageurs. Nous supposons que lorsque les horaires programmés des modes de transport ne correspondent pas aux heures d'arrivée souhaitées, les voyageurs subissent des pertes d'utilité. Le mode de transport est plus compétitif avec les horaires adaptés aux besoins des voyageurs.

Nous présenterons les caractéristiques des méthodes utilisées. L'objectif de recherche consiste à proposer une méthode pertinente capable d'estimer les effets liés à la qualité des dessertes. Dans ce travail de thèse, nous montrons que :

- L'avantage de la méthode liée au temps utile à destination est qu'elle nécessite moins de données. Néanmoins, le périmètre d'étude est relativement restreint, il s'applique uniquement dans le cas des trajets avec des courts séjours. Par ailleurs, cette méthode ne prend pas en compte les caractéristiques des opportunités à destination. Le temps minimum à destination est une hypothèse agrégée et une hypothèse forte.
- Le modèle combiné choix modal – choix d'horaires a l'avantage de pouvoir prendre en compte les préférences des voyageurs en termes d'heures d'arrivée. Néanmoins, ce modèle

nécessite des données rares. Nous évaluons l'utilité des horaires choisis et la qualité des horaires programmés en fonction d'heures d'arrivées souhaitées. Ce dernier est une information absente dans les enquêtes « voyageurs » standard, les enquêtes « voyageurs » spécifiques sont indispensables.

## 6. L'étude de cas sur la LGV SEA

Notre travail s'inscrit dans le programme d'étude de l'Observatoire socio-économique de LGV SEA. Grâce à ce dispositif mis à disposition par LISEA, nous avons pu obtenir les données nécessaires pour notre travail telles que les horaires programmés par les opérateurs de transport et les données des enquêtes « voyageurs » spécifiques. Les données collectées au sein de l'Observatoire nous ont permis de présenter le contexte d'étude du projet de LGV SEA. Cette présentation du contexte est nécessaire pour connaître la spécificité du projet et l'intérêt porté à notre problématique de recherche. Le présent travail a ainsi pu contribuer à la réalisation du bilan LOTI intermédiaire du projet de LGV SEA<sup>2</sup>.

Grâce aux données fournies par l'Observatoire socio-économique, les méthodes proposées dans ce travail de recherche ont été appliquées dans le cas du projet de LGV SEA.

- Les indicateurs de temps utile à destination nous montrent l'évolution de la qualité des dessertes sur les principales liaisons concernées par la LGV SEA. Ces indicateurs seront intégrés dans le modèle du choix modal afin d'expliquer le choix entre l'avion et le train sur la liaison Paris-Bordeaux.
- Basée sur les données liées aux heures d'arrivée souhaitées sur la liaison Paris-Bordeaux, le modèle combiné choix modal – choix d'horaire que nous appliquons peut tenir compte les caractéristiques des opportunités à destination. Ce modèle contribue à l'étude de prévision de la demande en tenant en compte du changement des horaires de l'avion et du train entre Paris et Bordeaux.

---

<sup>2</sup> LISEA. 2018. « Bilan LOTI intermédiaire de LGV SEA ». <https://www.lisea.fr/wp-content/uploads/2019/02/Bilan-LOTI-intermediaire-dec-janv-19.pdf>

Nous faisons une comparaison entre les modèles standard et nos modèles spécialisés en qualité des dessertes. Les avantages et les inconvénients de ces méthodes seront commentés afin de tirer des leçons sur l'utilisation de ces modèles. Nos résultats ont fait l'objet de deux publications au TRR en 2019<sup>3</sup>.

## 7. Plan de la thèse

Suivant la problématique définie précédemment, cette thèse est organisée en trois parties :

- Dans la première partie, nous présentons les questions de concurrence dans le marché des transports. Parmi les différentes formes de concurrence, nous nous intéressons à la concurrence intermodale, cette partie permet de comprendre de quoi il s'agit et pourquoi cette question est importante. Cette partie théorique comporte revue de littérature qui va nous servir pour élaborer notre problématique.
- La deuxième partie est constituée de deux chapitres qui présentent nos méthodes pour étudier la qualité des dessertes: le temps utile à destination et le modèle combiné choix modal – choix d'horaires. Dans cette partie méthodologique, nous présentons aussi les principes fondés sur la théorie de choix discrets et ils vont nous aider à préciser les spécificités de nos approches.
- Le contexte de notre étude de cas, les données et les résultats sont présentés dans la troisième partie. Nous présentons les données et les résultats de chaque méthode afin de commenter directement les avantages et les inconvénients.

---

<sup>3</sup> Chen, Minghui, et Stéphanie Souche Le Corvec. 2019. « On the Usefulness of a Combined Mode Choice-Schedule Choice Model: Case of the Paris–Bordeaux Rail Line (France) ». *Transportation Research Record*, mars, 0361198119837958. <https://doi.org/10.1177/0361198119837958>.

Chen, Minghui, Stéphanie Souche Le Corvec, et Alain Bonnaïfous. 2019. « Time Available at Destination: Tool to Evaluate the Quality of Public Transport Service and a Determinant of Mode Choice ». *Transportation Research Record*, mars, 0361198119837959. <https://doi.org/10.1177/0361198119837959>.



Première partie :

La concurrence dans le marché des  
transports



# Introduction de la partie 1

La concurrence est un concept fondamental, son origine remonte à la naissance de la théorie économique. Dans le secteur des transports, la concurrence est à la fois une question générique et spécifique. Comme dans toutes les industries, la concurrence est considérée comme un mécanisme permettant d'améliorer l'efficacité économique du marché de transport. La spécificité repose sur la présence du service public et du monopole naturel. Dans cette première partie, nous allons clarifier les caractéristiques des questions de concurrence dans le domaine de transport.

Dans le fondement théorique du concept de concurrence, la relation entre la concurrence et l'efficacité économique est essentielle. Nous présentons cette relation afin de comprendre la raison pour laquelle on cherche à mettre en place des mécanismes de concurrence. Le rôle de la concurrence comme un instrument de politique économique se justifie à travers la contribution de celle-ci pour atteindre l'optimum social.

Le rappel des principes théoriques du concept de concurrence va nous aider à comprendre la nature des problèmes de recherche. Notre étude est menée dans le contexte de la mise en service d'une nouvelle infrastructure ferroviaire à grande vitesse. La qualité de l'offre de transport s'améliore, ce qui va impacter le rapport concurrentiel dans le marché des transports. Cette partie va nous permettre d'identifier les différentes formes de concurrence et va nous guider pour traiter notre problématique de recherche.

Notre travail se concentre sur la concurrence intermodale du transport de voyageurs et en particulier sur la concurrence entre le train et l'avion. La nouvelle infrastructure ferroviaire à grande vitesse crée un nouveau contexte de concurrence entre les différents modes de transport. L'analyse de la concurrence intermodale est essentielle pour expliquer l'évolution de la compétitivité des différents modes de transport.

Dans cette partie, nous effectuons une revue de littérature sur l'analyse des comportements de déplacements des voyageurs et sur le choix modal. En particulier, nous nous interrogeons sur la manière d'étudier la qualité des dessertes dans le processus du choix modal. Malgré le rôle

important de ce facteur de qualité de service dans l'étude du choix modal, ce sujet est relativement peu abordé dans la littérature et encore moins lorsqu'il s'agit des études de transports interurbains. Cette revue de littérature nous permet de comprendre les causes du manque de travaux de recherche et l'intérêt de notre problématique.

Cette partie est une partie théorique, au sein de laquelle nous construisons les bases de notre travail de recherche.

Cette partie est organisée de manière suivante :

- Dans le chapitre 1.1, nous verrons d'abord la définition du concept de concurrence et les questions de concurrence de manière générale. Nous présentons les caractéristiques du secteur des transports et en particulier les marchés du transport ferroviaire. Parmi les questions de concurrence dans le transport ferroviaire, nous nous intéressons à la question de la concurrence intermodale.
- Dans le chapitre 1.2, nous présenterons la relation entre les comportements des voyageurs et la compétitivité des modes de transport. Ce chapitre se concentre sur le choix modal, est fondamentale dans l'analyse de la concurrence intermodale.
- Dans le chapitre 1.3, nous expliquons et présentons la base de notre travail qui permet de produire une analyse pertinente de la qualité des dessertes dans le cadre de l'analyse de la concurrence intermodale.

# Chapitre 1.1 : Le concept de concurrence dans le secteur des transports

## Introduction du chapitre 1.1

Etant donné que notre sujet de recherche porte sur l'analyse des questions de concurrence, il est nécessaire de commencer par décrire les principes du concept de concurrence. Ce chapitre contribue à présenter les théories fondamentales comme la concurrence pure et parfaite et la structure des marchés. Ce rappel théorique est nécessaire pour bien définir le sujet et pour montrer l'intérêt du sujet.

Dans le marché du transport ferroviaire, les opérateurs historiques sont dans la plupart du temps en monopole. En approfondissant l'analyse sur les questions de concurrence, nous nous apercevons que l'industrie ferroviaire est multiproduits. Si le monopole est dit « naturel » pour l'infrastructure ferroviaire, la mise en concurrence est possible pour l'exploitation du service ferroviaire. Les politiques de l'ouverture à la concurrence dirigées par la Commission Européenne consistent à introduire les mécanismes de concurrence dans le marché du transport ferroviaire intérieur des voyageurs.

Même si l'ouverture à la concurrence est prévue pour 2021 pour les grandes lignes dans le marché intérieur des voyageurs, cela ne veut pas dire que la concurrence est complètement absente en l'état actuel. Il existe par ailleurs la concurrence entre les différents modes de transport qui sont présents sur le même marché. Nous parlons de la concurrence intermodale qui existait depuis toujours et a pour fonction d'empêcher l'opérateur ferroviaire historique d'appliquer une tarification monopolistique.

Notre analyse se concentre sur les questions de la concurrence intermodale. C'est le sujet qui nous préoccupe le plus dans le cadre de la mise en service d'une nouvelle LGV. Ce chapitre contribue à

construire la base théorique de notre travail de recherche et à expliquer la raison pour laquelle la concurrence intermodale est un sujet intéressant à étudier.

Ce chapitre s'organise comme suit :

- Dans la section 1.1.1, nous présentons la définition du concept de concurrence, qui aide à comprendre les mécanismes de concurrence et l'efficacité des mécanismes de concurrence dans le marché des transports.
- Dans la section 1.1.2, nous présentons les caractéristiques des questions de concurrence dans le marché du transport ferroviaire. Les spécificités de ce marché résident sur la présence du monopole naturel et de la concurrence. Les caractéristiques des différentes formes de concurrence : Open Access, la concurrence intramodale et la concurrence intermodale, sont présentées dans cette section.
- Notre sujet de recherche se concentre sur les questions de la concurrence intermodale. Dans la section 1.1.3, nous faisons une revue de la littérature sur les études de suivi de l'offre et la demande dans le cadre des projets de LGV. Ces études montrent les effets liés à l'amélioration de l'offre ferroviaire sur la compétitivité des modes de transport et sur la mobilité des voyageurs.

## Section 1.1.1 : La concurrence et l'efficience économique

### *1.1.1.1 - La définition du concept de concurrence*

De manière générale, la concurrence décrit « *la rivalité entre plusieurs personnes, plusieurs forces poursuivant un même but* » (Larousse, 2018). Cette définition du concept de concurrence, désormais généralement acceptée, a été présentée par Stigler (2008). Le concept de concurrence englobe toutes les questions de la rivalité d'intérêts entre les individus, les groupes d'individus ou entre les différents pays.

La discussion sur la définition de la concurrence a commencé très tôt dans la science économique. Selon Vickers (1995) la définition précise de la concurrence dépend du contexte, des instruments et des objectifs. Dans son analyse, il distingue les acteurs privés et les acteurs publics afin d'illustrer la caractéristique multidimensionnelle du concept de concurrence. Les acteurs privés sont à la recherche des profits ou seulement des produits à bas prix et de meilleure qualité. Les acteurs publics s'intéressent aux surplus collectifs s'agissant de la somme des surplus de tous les acteurs économiques sur le marché. En outre, les instruments utilisés par les acteurs privés et les acteurs publics sont différents, et dépendent de leurs objectifs.

Demsetz (1982) a présenté les critères multidisciplinaires du concept de concurrence. Selon lui, la définition de la concurrence diffère et se concrétise selon que l'étude est faite en économie, en gestion ou en droit. Ces trois différentes disciplines ont toutes contribué à alimenter le concept de concurrence. La littérature sur les questions de concurrence dans chaque discipline est abondante.

- La conception de la concurrence en économie était essentiellement basée sur l'analyse de la structure de marché. La concurrence parfaite est une situation optimale du fonctionnement de l'économie par rapport à la structure de monopole (Schumpeter, 1934). Pour les économistes néoclassiques, la libre concurrence peut conduire les firmes à obtenir ou à conserver une position dominante, ils montrent ainsi que cette position dominante n'est pas dominante. Selon Robinson (1933), l'imperfection de la concurrence va engendrer une situation sous optimale du système productif et une répartition inégale des richesses. Les autorités concurrentielles doivent dès lors intervenir pour dénoncer la menace de la structure de monopole.

Le concept de concurrence a évolué dans les années 1980 avec la théorie des marchés contestables, il devient indépendant de la structure de marché et s'intéresse plutôt aux comportements concurrentiels. Selon Baumol *et al.* (1983), le marché est concurrentiel lorsqu'une firme peut entrer et sortir librement et sans coûts supplémentaires.

Nous présenterons ci-dessous plus en détail la définition du concept de concurrence dans l'histoire des pensées économiques.

- Dans le domaine de la gestion, le concept de concurrence se focalise sur la perception des firmes vis-à-vis de leurs clients et de leurs concurrents. Les firmes cherchent à conserver leurs avantages concurrentiels en proposant des biens et services adaptés aux besoins de

leur clientèle (Porter, 2008). La concurrence est vue comme un outil pour mieux connaître la demande du marché et pour évaluer la position concurrentielle des firmes. L'analyse consiste principalement à trouver la bonne stratégie concurrentielle sur le marché.

- Dans le domaine du droit et de la politique, la concurrence est vue comme « *l'ensemble des règles tendant au maintien d'une concurrence suffisante sur le marché considéré dans son ensemble, à l'exclusion de celles de portée plus limitée concernant la concurrence déloyale ou les pratiques restrictives* », Zevounou (2010). Le droit de la concurrence et la jurisprudence qui lui est associée font obstacle aux ententes, aux abus de position dominante et à la concentration dans le marché. Le droit de la concurrence a pour but de « *déterminer les règles du processus concurrentiel dans le marché et de réprimer les atteintes aux mécanismes de marché et son fonctionnement loyal et transparent* », (Ordonnance n° 86-1243, le droit de la concurrence, 1986).

Nous constatons qu'entre les différentes disciplines de recherche, la définition pour le concept de concurrence est différente mais étroitement liée.

Nous présentons de manière synthétique le développement du concept de concurrence en économie. Cette présentation nous aidera à comprendre les caractéristiques des questions de concurrence et à standardiser les vocabulaires utilisés dans la suite de ce travail.

### *1.1.1.2 - Le concept de concurrence dans l'histoire des pensées économiques*

L'analyse des questions de concurrence remonte à l'origine de l'économie. Le concept de concurrence a émergé dans les travaux des économistes classiques (Smith, 1776 et Ricardo, 1817). Les réflexions sur la notion de concurrence ont adopté une vision macro-économique et ont pour l'objectif d'approuver la libre concurrence. Dans le cadre de l'économie classique, la concurrence a été plutôt considérée comme une force de l'offre et de la demande permettant de déterminer le « juste prix » sur le marché. Les économistes classiques se sont intéressés essentiellement aux effets de la concurrence sur l'allocation des ressources.

La définition plus précise de la concurrence en économie a été développée par les économistes néoclassiques. Les travaux fondateurs de Cournot (1838) proposèrent une analyse des effets de la concurrence du point de vue des producteurs. Les prix des produits diminuent lorsque le nombre de producteurs augmente, jusqu'à la situation d'équilibre où le prix égalise le coût marginal de production. Les effets de la concurrence atteignent une limite lorsque l'offre d'un producteur est modeste par rapport au volume total de l'offre sur le marché. La concurrence a été perçue comme un outil pour conserver l'avantage concurrentiel.

Dans les travaux de Cournot, la question de l'asymétrie d'informations n'a pas été traitée. Jevons (1871) a complété l'hypothèse de la concurrence parfaite en indiquant que la transparence parfaite des informations est une condition nécessaire. Les travaux de Cournot et de Jevons ont contribué à la conception des deux principales hypothèses de la concurrence parfaite :

- La première hypothèse impose une condition d'atomicité qui décrit la situation où il y a un grand nombre de producteurs et consommateurs sur le marché. Aucun agent économique ne peut jouer un rôle prédominant sur le marché en modifiant individuellement le niveau d'offre et la demande. Sous la condition d'atomicité, les producteurs sont dans l'incapacité de décider les prix de vente sur le marché.
- La deuxième hypothèse est la présence du marché parfaitement transparent selon laquelle les producteurs et les consommateurs disposent de toutes les informations sur les prix, la qualité et les quantités des produits échangées. La transparence des informations empêche les producteurs de vendre leurs produits au-dessus du prix de marché.

La théorie de la concurrence parfaite a été ensuite enrichie pendant la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, principalement grâce aux travaux de Walras et Pareto (*Encadré 1*). L'analyse des questions de concurrence s'est orientée vers des mécanismes microéconomiques. Les hypothèses de la concurrence parfaite ont été complétées dans leurs travaux avec trois hypothèses complémentaires. Celles-ci ont été résumées dans les travaux d'Arrow et Debreu (1954) :

- Il existe une homogénéité du produit. Les acheteurs ne doivent avoir aucune préférence pour un produit en particulier, ils prennent indépendamment leurs décisions en fonction des prix.
- Les barrières à l'entrée et à la sortie sont supposées absentes. Les nouveaux entrants s'installent librement lorsqu'il y a une possibilité de réaliser des profits sur le marché. Ils

doivent aussi pouvoir sortir librement du marché en cas de baisse des profits. En conséquence, la concurrence s'accroît et le prix baisse.

- Les facteurs de production circulent librement sur le marché. Le travail (main d'œuvre) et le capital se dirigent spontanément vers les marchés où la demande est supérieure à l'offre. Ces facteurs de production doivent aussi librement circuler d'une industrie à l'autre.



---

*Encadré 1 : La concurrence pure et parfaite et l'équilibre de Pareto*

---

Pareto et Schièver (1927) ont élaboré l'équilibre général à travers des modèles mathématiques. La concurrence parfaite a pour objectif d'atteindre l'optimum, devenu l'optimum de Pareto, où « *on ne peut pas améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'un autre* ». L'équilibre général se trouve au point d'intersection de l'offre et la demande. Il s'agit d'une situation où aucune compétition supplémentaire n'est possible.

L'équilibre de Pareto peut être démontré grâce à la maximisation du bien-être de la société. Selon la condition du premier ordre, le gain marginal (l'écart entre l'utilité marginale et le coût marginal) est nul.

$$(C.P.O) \quad W'_{q^*} = U'_{q^*} - C'_{q^*} = 0$$

$$P^* = C'_{q^*} = C_m$$

*Avec*

$W_q$  : le gain sous la quantité produite  $q$

$U_q$  et  $C_q$  : l'utilité et le coûts avec la quantité produite  $q$

$C_m$  : le coût marginal

$q^*$  : la quantité produite à l'équilibre

Le prix est égal à ce que rapporte la production d'un produit supplémentaire à la société " $U'_{q^*} = P^*$ ". Le coût marginal " $C_m$ " égale à ce que coûte la production d'une unité supplémentaire à la société. L'équilibre général se trouve lorsque le prix du marché égalise le coût marginal de production " $P^* = C_m$ ".

Les producteurs cherchent à maximiser leurs profits, cet objectif peut être accompli à condition que les recettes marginales égalisent les coûts marginaux. Les recettes marginales désignent l'accroissement des recettes de producteurs, consécutifs à l'augmentation d'une unité supplémentaire produite. Il s'agit de l'optimum économique des producteurs.

Lorsque les coûts marginaux égalisent les coûts moyens (coût total divisé par le nombre d'unité produite), nous sommes à l'optimum technique. C'est la situation où chaque unité supplémentaire de production coûte plus cher que le coût moyen, ce qui va faire augmenter le coût moyen de production. Les producteurs n'ont techniquement pas d'intérêt à produire à partir du moment où les coûts marginaux sont supérieurs aux coûts moyens.

Lorsque le coût moyen est égal à la recette moyenne, nous atteignons le seuil de vente à pertes. Les producteurs n'ont aucun intérêt à maintenir la production au-delà de ce seuil.

Au total, les cinq conditions présentées ci-dessus constituent les principes de la théorie de la Concurrence Pure et Parfaite (CPP). La théorie de la CPP est considérée désormais comme « un cas d'école » achevée. Le concept contemporain de la concurrence est théoriquement basé sur la CPP, dans la mesure où la concurrence est vue comme une structure de marché et comme un instrument pour promouvoir l'optimum social.

Les conditions de la CPP sont pourtant considérées comme « idéalistes » car elles sont difficiles à accomplir dans la réalité économique. Pour Cayla (2003), la théorie de la CPP dispose de deux défauts majeurs :

- Dans un premier temps, la CPP se focalise uniquement sur la courbe de la demande. Les coûts de production sont vus comme le régulateur du prix de vente, mais aucune explication n'a été donnée concernant la minimisation des coûts de production. Si tous les producteurs sont inefficients, l'offre à l'équilibre général va générer des pertes sociales.
- Dans un second temps, la CPP est fondée sur l'hypothèse du rendement décroissant. C'est-à-dire que le coût marginal de production est une fonction croissante de la quantité produite.

Dans les années 1930, un phénomène fréquent de la concentration des firmes a incité les économistes à élaborer des concepts pour expliquer les faits réels de la concurrence. Les réflexions sur la réalité économique de la théorie de la concurrence ont conduit à la naissance de la théorie de la concurrence imparfaite. Cette théorie considère la concurrence comme un outil pragmatique pour réguler les aspects néfastes du bon fonctionnement de l'économie. Cette théorie est fondée sur les travaux initiaux de la concurrence oligopole de Cournot (1838) et de Bertrand (1883), plus tard sur la théorie de la concurrence imparfaite de Robinson (1933) et la concurrence monopolistique de Chamberlin (1933).

Les travaux de Cournot (1838) en concurrence oligopole étaient les premiers à soulever les questions de la concurrence imparfaite (*Encadré 2*). Ses travaux ont réussi à montrer mathématiquement que le faible nombre de producteurs pourrait conduire au marché non optimal. Dans la situation de l'oligopole ou du monopole, les producteurs sont capables de choisir la quantité produite, par conséquent d'influencer la fonction de profit de leurs concurrents.

Bertrand (1883) a montré qu'avec un grand nombre de biens parfaitement homogènes et la transparence des informations sur le marché, le marché est un marché concurrentiel même si le nombre de producteurs est faible (*Encadré 2*).

---

*Encadré 2 : la théorie de Cournot (1838) et de Bertrand (1883)*

---

Selon la théorie de Cournot (1838), un producteur considère l'offre de son concurrent comme fixe. Les comportements de ces deux producteurs " $i = 1, 2$ " font établir un point d'équilibre sous le principe de la maximisation des profits " $\pi$ ". Les produits sur le marché sont supposés parfaitement substituables avec la quantité produite " $q_1$ " et " $q_2$ ", la quantité totale des produits est " $Q$ ", avec " $Q = q_1 + q_2$ ". La fonction de demande sur le marché est décroissante de la quantité, dénotée par un prix " $P(Q)$ ". Les coûts de production de ces deux producteurs sont " $c_1(q_1)$ " et " $c_2(q_2)$ ".

Les profits d'un producteur sont égaux aux recettes moins les coûts, ils s'écrivent de manière suivante :

$$\begin{aligned}\pi_1(q_1, q_2) &= q_1 * P(Q) - c_1(q_1) \\ \pi_2(q_1, q_2) &= q_2 * P(Q) - c_2(q_2)\end{aligned}$$

Les profits atteignent au maximum avec les conditions de premier ordre (CPO) :

$$\begin{aligned}P(Q^*) + q_1^* * \frac{\partial P}{\partial Q} - \frac{\partial c_1}{\partial q_1} &= 0 \\ P(Q^*) + q_2^* * \frac{\partial P}{\partial Q} - \frac{\partial c_2}{\partial q_2} &= 0\end{aligned}$$

Ces deux équations sont des fonctions implicites, car chaque producteur va choisir sa quantité produite en fonction de celle de l'autre. La réponse du producteur 1 est donc une fonction de réaction de la valeur " $q_2$ ", il en est de même pour le producteur 2.

L'équilibre de Cournot est la situation où aucun ne souhaite changer individuellement sa stratégie de production en quantité produite. En résultat, les producteurs vont choisir un prix qui est au-dessus du coût marginal. La concurrence duopolistique ou oligopolistique permet aux producteurs de faire des profits.

Bertrand (1883) a proposé un autre point de vue de la théorie de duopole. Selon Bertrand, la variable stratégique est constituée essentiellement par les prix. Les producteurs se font la concurrence non par la quantité mais par le prix. Le producteur qui propose le prix le plus bas gagnera la totalité de la demande sur le marché. Chaque producteur dispose d'une fonction de profit discontinue :

$$\pi_1(p_1, p_2) = \begin{cases} (p_1 - c_1) * D & \text{si } p_1 < p_2 \text{ ou } p_1 = p_2 \text{ et } c_1 < c_2 \\ \frac{(p_1 - c_1) * D}{2} & \text{si } p_1 = p_2 \text{ et } c_1 = c_2 \\ 0 & \text{autrement} \end{cases}$$

A l'équilibre de Bertrand, le prix proposé égal au coût marginal, tous les producteurs ne font pas de profits.

Chamberlin (1933) et Robinson (1933) considèrent la concurrence parfaite comme une situation inaccessible en pratique. Selon Robinson (1933), lorsque la concurrence est imparfaite, les producteurs ont l'intérêt à la monopolisation, ce qui permet à la fois d'augmenter les prix et de réduire les coûts de production. Chamberlin (1933) a montré les effets d'une différenciation des produits, les producteurs cherchent sans cesse à proposer des produits de caractéristiques différentes ou de qualité différente afin d'attirer leurs clients, donc à préserver le rôle du monopole. La théorie de la concurrence monopolistique ne repose pas sur une distinction de la structure de marché entre la concurrence parfaite et le monopole, mais plutôt sur les comportements des producteurs. Les producteurs sont des « Prices takers » et également des « Prices makers » sur le marché.

Dans la poursuite de cette approche basée sur les comportements des producteurs, les effets sur la menace des nouveaux entrants ont été étudiés dans les travaux de Baumol *et al.* (1983) intitulés la théorie des marchés contestables. Selon Baumol *et al.* (1983), la structure de marché CPP constitue nécessairement un marché contestable, mais la réciproque n'est pas vraie. C'est-à-dire que l'intensité de la concurrence n'est pas nécessairement expliquée par le nombre de producteurs ou de consommateurs sur le marché, celle-ci est déterminée par la menace d'entrée et la liberté de sortie des nouveaux concurrents.

Au sens de Stigler (1987), pour que le marché soit considéré comme contestable, l'entrée et la sortie au marché doivent être totalement libres. C'est-à-dire qu'aucun avantage ne doit être accordé aux entreprises historiques. La théorie du marché contestable montre qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un nombre important d'offreurs et de demandeurs sur le marché à la différence de ce que préconise la théorie de la concurrence parfaite.

L'absence des barrières de sortie constitue l'hypothèse fondamentale du marché contestable, car le nouvel entrant peut être dissuadé par des coûts irrécupérables. L'existence des coûts irrécupérables signifie que le nouvel entrant ne peut quitter le marché sans subir des coûts supplémentaires par rapport aux dépréciations normales du capital. Nous expliquons en détail dans le chapitre suivant, que c'est en raison du coût d'entrée important que cette théorie des marchés contestables s'adapte finalement mal au ferroviaire.

Même si les différentes pensées économiques sur le concept de concurrence tel que la concurrence parfaite, la concurrence imparfaite ou le marché contestable ne vont pas répondre parfaitement aux

questions que nous rencontrons dans les situations réelles dans les industries (Stigler, 2008). La CPP est toujours considérée comme la théorie de référence. Les méthodes de l'économie appliquée basée sur les hypothèses de CPP sont capables d'expliquer de manière pertinente les questions concrètes de la concurrence.

De nos jours, les questions se posent essentiellement sur la mise en œuvre des politiques de concurrence. Les autorités de régulation de la concurrence ont été créées afin de renforcer la compétitivité des entreprises et de les pousser à innover, in fine les mécanismes de concurrence devront conduire à baisser les prix de service et à améliorer le bien-être des consommateurs (Autorité de la concurrence, 2011). La concurrence est considérée comme un outil pour atteindre l'efficacité économique.

Ci-dessous, nous allons présenter le lien entre la concurrence et l'efficacité économique.

### *1.1.1.3 - De l'équilibre général à l'équilibre du monopole*

Quelle que soit l'approche adoptée, le développement du concept de concurrence consiste toujours à atteindre l'optimum social. Selon l'équilibre de Pareto, l'optimum social s'agit d'une structure de marché dans laquelle « *on ne peut pas améliorer le bien-être d'un individu sans détériorer celui d'un autre* », Pareto (1927). A l'optimum de Pareto, aucune concurrence supplémentaire n'est possible.

A travers cet objectif de l'optimum social, que l'on définit le lien entre la concurrence et l'efficacité<sup>4</sup>. Du point de vue général, la concurrence est considérée comme un outil permettant d'améliorer l'efficacité économique. Selon Allais (1971), la notion d'efficacité économique comporte trois dimensions :

- L'efficacité productive désigne la situation où, avec une technologie donnée, la production peut être réalisée au meilleur coût. Sous l'effet du mécanisme de la concurrence, les

---

<sup>4</sup> Il faut faire attention de ne pas confondre l'efficacité et l'efficacité. L'efficacité est la capacité d'atteindre un objectif et de produire l'effet attendu. L'efficacité désigne quant à elle la qualité d'un rendement permettant de réaliser un objectif avec un minimum de ressources.

producteurs inefficients font moins de profits et ils vont être éliminés du marché. Afin de survivre, les producteurs sont obligés de réduire les coûts de production.

- L'efficacité d'innovation peut être générée lorsque le système économique procure une incitation à innover. La concurrence est vue comme un processus de découverte efficace. Les producteurs sont incités à être plus innovants afin de préserver leurs parts de marché.
- L'efficacité d'allocation a pour objectif l'allocation efficace des ressources et la maximisation des surplus collectifs<sup>5</sup>. La concurrence accrue permet aux producteurs qui proposent les prix les plus bas de gagner des parts de marché. In fine, la concurrence va conduire à la situation de l'équilibre général où l'allocation des ressources est à l'optimum (sous hypothèse de CPP).

Les études ci-dessous ont montré une corrélation positive entre la concurrence et l'efficacité économique. Porter (2004) considère que la concurrence dynamique interne dans l'industrie d'un pays va conduire à son succès sur le marché international. Nickell (1996) a étudié les effets de la concurrence sur la productivité. A travers les exemples de la dérèglementation aux États-Unis et dans des pays européens, il a montré que la concurrence permet une meilleure efficacité productive et une augmentation des surplus collectifs.

Pourtant, la relation conceptuelle entre la concurrence et l'efficacité économique est difficile à prouver. L'équilibre général de Pareto est considéré comme la structure de marché dans laquelle l'allocation des ressources est la plus efficace, cela permet de maximiser les surplus collectifs, donc de contribuer à l'efficacité de l'allocation des ressources. Par définition, le marché à l'équilibre général est considéré comme le marché efficient.

Edgeworth (1881) traduit la relation entre la concurrence et l'efficacité par la théorie des jeux. Selon lui, le marché efficient est l'ensemble des allocations réalisables qui ne peuvent être améliorées par aucun producteur ou un sous-ensemble des producteurs. Samuelson (1938) a apporté la même approche selon laquelle la concurrence est la structure optimale dans la mesure où personne ne peut améliorer son bien-être sans détériorer celui des autres. Samuelson (1938) et Scherer et Ross (1990) ont aussi montré que le monopole, vu son pouvoir sur le marché, n'est pas

---

<sup>5</sup> Le surplus collectif est la somme du surplus des consommateurs et surplus des producteurs.

motivé à réduire ses coûts. Le monopole est donc une structure de marché inefficace en termes d'efficacité productive et d'efficacité innovatrice, car la production ne sera réalisée au meilleur coût, les producteurs n'ont pas intérêt à innover pour réduire les coûts de production.

Demsetz (1968) a étudié le lien entre l'efficacité et le monopole naturel. Il a montré que la régulation économique et l'entreprise publique ne sont pas forcément les solutions efficaces pour gérer l'existence du monopole naturel. Le système d'enchère permet de trouver l'entreprise qui assure les moindres coûts pour les services du monopole naturel. Dans le contexte du monopole naturel, l'absence de la concurrence supplémentaire n'est pas une condition nécessaire de l'efficacité économique.

La théorie du marché contestable de Baumol *et al.* (1982) a proposé un modèle traitant la question du monopole comme les résultats du marché à l'équilibre. Les nouveaux entrants potentiels conduisent à l'équilibre concurrentiel à long terme. La pression par la menace d'entrée sur le marché maintient les prix et les profits au niveau efficace. C'est-à-dire qu'à long terme, la menace de l'entrée potentielle va assurer que le prix marginal est égal à coût marginal de production même en l'absence de concurrence directe. Sur le marché contestable, une nouvelle entreprise cherche à entrer sur le marché en proposant un prix bas si le monopoleur fait des profits. Le monopoleur va au final baisser le prix et le maintenir au niveau du coût marginal afin d'exclure le nouvel entrant du marché.

Vickers (1995) a cherché à expliquer les effets directs d'une concurrence accrue sur l'efficacité. Il a résumé les effets de la concurrence sur l'efficacité économique en trois grandes catégories.

- Les effets sur l'organisation interne. Sous l'effet du mécanisme de la concurrence, les producteurs cherchent à réduire leurs coûts de production à travers une meilleure organisation interne. L'optimisation de l'organisation interne est un moyen pour améliorer l'efficacité productive.
- Les effets de sélection optimale. Les producteurs qui proposent un prix plus faible sont capables d'expulser leurs concurrents du marché. Dans un marché concurrentiel, il s'agit d'un processus de sélection du producteur le plus efficace, sous l'hypothèse que les producteurs sont homogènes.



- Les effets d'innovation et d'incitation. La concurrence est vue comme un processus de découverte efficace (Hayek, 2010). Les producteurs sont incités à être plus innovants afin de préserver leurs parts de marché. Les études empiriques concernant la compétition technologique montrent que l'innovation est positivement corrélée avec l'efficacité productive.

Le point faible de cette approche est que le processus dynamique de la concurrence n'a pas été suffisamment pris en compte. Dans une étude récente, Tisdell (2013) montre la difficulté pour prouver les effets liés au processus de sélection par rapport à ceux présentés par Vickers. Selon lui, les producteurs ne cherchent pas toujours à améliorer leur organisation interne car des coûts importants y sont associés. Les décisions stratégiques d'un producteur dépendent donc de celles des autres producteurs au sein d'un même marché. Pour Tisdell (2013), la concurrence n'est pas seulement un moyen pour sélectionner les producteurs les plus efficaces, elle a aussi pour vocation d'éliminer les producteurs qui ont échoué et à s'adapter aux nouveaux contextes concurrentiels. Lorsqu'il y a une grande incertitude sur le marché, les effets de la concurrence sont moins évidents.

Bien que la façon d'organiser un marché concurrentiel soit un sujet qui fait débat, personne ne niera le rôle de la concurrence comme un processus permettant de générer l'efficacité économique. Tout comme la théorie de la CPP, l'équilibre général est considéré comme un cas d'école fondamental pour analyser les effets de la concurrence sur l'efficacité économique. Dans des situations de vie réelle, la concurrence n'est pas toujours une structure de marché la plus efficace, mais elle est un outil pour atteindre l'équilibre général.

En ce qui concerne le lien entre la concurrence et l'efficacité, l'analyse des questions de concurrence dépend fortement des caractéristiques du marché. Dans un marché où les ressources et les facteurs de production circulent librement, la concurrence intervient facilement et librement comme un outil qui conduit à l'efficacité économique. Nous présentons dans la section 1.1.1.4 le marché du monopole naturel sur lequel la concurrence directe n'est pas possible sans l'intervention du pouvoir public.

Nous présentons ci-après les différentes structures de marché. Cette présentation est nécessaire pour comprendre les caractéristiques des questions de concurrence dans le marché du transport.

#### *1.1.1.4 - Les structures du marché et le monopole naturel*

La CPP et le monopole sont les deux structures de marché les plus souvent étudiées. Il s'agit des structures de marché extrêmes. Le nombre de producteur et de consommateur est important dans la structure CPP, la concurrence est forte sur le marché, les prix sont égale aux coûts marginaux. Dans le cas du monopole, un seul producteur est en face d'un grand nombre de consommateur, il est capable de générer des profits en fixant le prix est égal aux recettes marginales<sup>6</sup>.

Par ailleurs, d'autres structures de marché existent, caractérisées en fonction du nombre de producteurs et de consommateurs présents sur le marché. Nous pouvons spécifier les différentes structures de marché, dans lesquelles l'analyse des questions de concurrence se distingue. Nous présentons dans le tableau suivant la typologie du marché de Stackelberg (1952).

---

<sup>6</sup> Le prix est égal aux recettes marginales est une situation extrême. Il existe des différents types de monopole que la tarification monopolistique n'est pas toujours valide. Nous présenterons ces différents types de monopole dans les paragraphes suivants.

Tableau 1 : la typologie de structure de marché de Stackelberg (Stackelberg, 1952)

Consommateur Producteur	Un seul consommateur	Quelques consommateurs	Grand nombre de consommateurs
Un seul producteur	Monopole bilatéral	Monopole contrarié	Monopole
Quelques producteurs	Monopsone contrarié	Oligopole bilatéral	Oligopole
Grand nombre de producteurs	Monopsone	Oligopsone	Concurrence parfaite

La CPP est la structure de marché où le marché fait concourir un grand nombre de producteurs et un grand nombre de consommateurs. Les prix sont imposés par le marché aux producteurs et aux consommateurs.

La structure de l'oligopole décrit la situation où un petit nombre de producteurs sont présents sur le marché, ils proposent des produits homogènes ou légèrement différenciés faces à une infinité des consommateurs. Le pouvoir monopolistique est partagé entre les oligopoleurs, par conséquent les prix oligopolistiques restent rigides et peu fluctuants. Les barrières à l'entrée sont considérables dans un marché oligopolistique, le problème de collision entre les oligopoleurs arrive souvent.

L'oligopsone est un marché dans lequel il y a un petit nombre de consommateurs face à un grand nombre de producteurs. Il s'agit d'une situation symétrique de celle de l'oligopole. C'est l'exemple du secteur de l'agriculture au sein duquel l'industrie agroalimentaire dépend d'un petit nombre d'entreprise de la grande distribution.

Le monopsonne est la situation symétrique du monopole où un seul consommateur se trouve en face à un grand nombre de producteurs. Le monopsonne est dit contrarié lorsqu'un petit nombre de producteurs sont en face d'un seul consommateur. L'exemple typique est l'industrie de l'armement où l'Etat est le seul consommateur face aux marchands d'armes.

Le monopole bilatéral est une structure de marché où un seul producteur est en face d'un seul consommateur (il s'agit d'une situation courante dans le secteur public). Pour sauvegarder chacun

ses intérêts, le producteur monopoliste et le consommateur monopoliste devaient s'entendre sur les prix. Lorsqu'il y a des conflits d'intérêts, la situation est perdant-perdant : le producteur ne vend pas ses produits, le consommateur n'obtient pas les biens ou services dont ils ont besoin.

Le monopole décrit une situation extrême où un seul producteur s'occupe de la totalité du marché. Il détermine les prix et les quantités produites sur le marché pour maximiser son profit. Le monopole est une situation optimale pour le producteur, mais elle génère des pertes sèches pour la société (*Encadré 3*).

---

*Encadré 3 : La tarification de monopole et les pertes sèches*

---

La tarification de monopole se trouve au point d'intersection entre les recettes marginales et les coûts marginaux. Il s'agit d'un optimum économique pour les producteurs. Mathématiquement, la tarification de monopole s'écrit de manière suivante :

$$\pi_q = R_q - C_q \text{ avec } R_q = P_q * q$$

$$R'_q = R_m = P_q + P'_q * q$$

*Avec*

$\pi_q$  : les profits des producteurs

$R_q$  &  $C_q$  : les recettes et les coûts en fonction de la quantité produite  $q$

Selon la condition CPO :

$$(C.P.O) \quad \pi'_q = R_m - C_m = 0$$

$$P_q + P'_q * q = C_m \text{ et } P_q = C_m - P'_q * q$$

*Avec*

$R_m$  &  $C_m$  : les recettes marginales et les coûts marginaux de production

L'élasticité prix de la demande est négative, ce qui fait que :

$$P'_q * q \leq 0$$

$$P_q \geq C_m$$

La tarification de monopole correspond au cas où la quantité produite est inférieure mais les prix sont plus élevés que ceux de l'équilibre général. Cette tarification va générer des rentes de monopole pour le producteur mais des pertes sèches pour la société (Annexe – Figure 45).

Pourtant, la présence du monopole peut se justifier dans certains cas. Notamment dans le cas où la présence du monopole est « naturelle ». Ci-dessous, nous présentons la distinction de quatre formes du monopole.

- Le monopole pur décrit la situation standard où un seul producteur se trouve en face d'un grand nombre de clients potentiels. Le monopoleur est dominant sur le marché en tant que « Price-Maker ».

- Lorsque les pouvoirs publics accordent le droit de vente à un seul producteur, le marché est sous le monopole légal. Des barrières législatives sont présentes qui protègent le seul producteur sur le marché. C'est souvent le cas dans les secteurs publics ou dans l'industrie qui relève des intérêts publics.
- Le monopole technique désigne la situation où un seul producteur sur le marché détient un procédé ou un brevet. En découvrant une nouvelle technique de production, le producteur est capable de produire plus efficacement ou de produire avec moins de coûts. Il acquiert une position du monopole jusqu'à ce que ses concurrents soient capables de proposer des produits substituables.
- Le monopole est dit naturel lorsqu'un producteur se trouve tout seul peut être plus efficace sur le marché. Le monopole naturel se justifie lorsqu'il existe des coûts fixes importants relativement aux coûts variables, au rendement croissant ou de fortes externalités. L'exemple typique se trouve dans les industries de réseau où un investissement important en infrastructure est nécessaire.

Nous mettons l'accent sur le monopole naturel qui est un phénomène courant dans l'économie des industries de réseau. En pratique, nous testons l'existence du monopole naturel à l'aide du principe de sous additivité des coûts. Pour ce faire, il faut une analyse précise sur les fonctions de coûts en supposant que tous les producteurs ont accès à la même technologie et aux mêmes conditions de rémunération des facteurs de production.

Le monopole naturel est une situation courante de l'imperfection du mécanisme de marché. Les politiques publiques doivent être mises en œuvre pour éviter la distorsion dans l'allocation des ressources par le monopoleur. Le concept de monopole naturel a été développé pour la première fois par Adams (1887) qui le définit par la présence de rendements croissants. Ceci correspond à une structure de production dans laquelle les coûts fixes sont importants vis-à-vis des coûts variables. Par conséquent, l'entreprise historique est mieux placée sur le marché, aucun concurrent n'a intérêt à s'y positionner. Deux conditions sont nécessaires pour que le monopole soit véritablement « naturel » : l'économie d'échelle et l'économie d'envergure.

L'économie d'échelle est souvent utilisée sous le terme du rendement croissant<sup>7</sup>. Lorsque le rendement est croissant, le coût moyen est élevé et supérieur au coût marginal. Le coût moyen et le coût marginal décroissent consécutivement avec l'accroissement de la quantité produite puis remontent.

L'économie d'envergure décrit la situation lorsqu'il existe « *une synergie de fourniture entre plusieurs produits, un producteur est plus efficace pour la production de deux biens ou services que deux producteurs faces à chacun de ces biens ou services* », Sharkey (1982).

L'économie d'envergure est souvent démontrée en termes de coûts. Elle décrit la situation où il est moins coûteux de proposer les biens ou services par le même producteur.

Faulhaber (1975) a expliqué les principes du monopole naturel par la notion de sous additivité des coûts de production. Le monopole naturel décrit lorsqu'il est inefficent « *en termes de coûts de production, de multiplier le nombre de concurrents ou de démanteler le monopole existant* », Faulhaber (1975). Le coût de production d'un ou des produits sera moins élevé lorsqu'un seul producteur assure la production. Mathématiquement, la notion de sous additivité est présentée de manière suivante :

$$C(q_1, q_2) < C(q_1, 0) + C(0, q_2), \quad \forall q_1, q_2 \in Q$$

avec

$C(q_1, q_2)$  : les coûts de production des biens 1 et 2 par un seul producteur

$q_1, q_2$  : les quantités produites du bien 1 et du bien 2

Sharkey (1982) considère que la notion de sous additivité est la meilleure solution pour définir les caractéristiques du monopole naturel et que la présence simultanée de l'économie d'échelle et de l'économie d'envergure est une condition suffisante du monopole naturel. Par définition, l'entreprise en monopole naturel dispose d'une fonction de coûts sous additifs, en utilisant la technologie la plus avancée. Cela revient à supposer que tous les

---

<sup>7</sup> L'économie d'échelle est un indicateur qui repose sur le lien entre le coût de production et la quantité produite. Il traduit la situation où le coût moyen de production baisse consécutivement à l'augmentation de la production. Alors que le rendement croissant est en fonction de l'unité physique. Il repose principalement sur la relation entre les quantités des facteurs de production et les quantités produites. Ces deux notions peuvent être utilisées indifféremment lorsqu'on souhaite décrire la situation où le coût de production décroît avec la quantité de production.

entrants potentiels sur le marché ont les mêmes coûts ou les coûts plus élevés pour produire les mêmes biens et services.

La typologie de Stackelberg reste un modèle de référence en économie. Les critères de distinction des différentes structures de marché qu'elle propose sont basés sur le nombre de producteurs et consommateurs dans le marché. L'étude des questions de concurrence est faite avec l'approche dite structuraliste.

Nous pouvons simplifier le concept de concurrence en distinguant deux grands paradigmes : l'approche structuraliste et l'approche comportementaliste. Ces deux paradigmes portent des visions différentes pour étudier les questions de concurrence, les méthodes qu'ils proposent sont aussi différentes.

Selon l'approche structuraliste, la concurrence est une structure de marché qui est une structure efficace par rapport à la structure en monopole. Cette approche porte aussi le nom de l'approche SCP (Structure Comportement Performance) développée à l'école de Harvard (Mason, 1939). Alors que l'approche comportementaliste considère que les comportements des entreprises sont les facteurs de performance sur le marché (Stigler, 1987). Les économistes de l'école de Chicago l'ont nommé l'approche CPS (Comportement Performance Structure). Contrairement à l'approche SCP, la concurrence est vue comme un processus dynamique de sélection des entreprises les plus efficaces.

Un désaccord majeur entre l'approche structuraliste et l'approche comportementaliste se trouve dans le point de vue vis-à-vis l'oligopole et le monopole. L'approche SCP considère l'oligopole et le monopole comme deux structures de marché inefficaces. Alors que pour l'approche CPS, quel que soit la structure de marché, la CPP, l'oligopole et le monopole, pourrait toute être efficace. A titre d'exemple, un petit nombre de producteurs peuvent aussi se comporter de manière à pouvoir maximiser les surplus collectifs, à condition qu'il y ait une concurrence par les coûts ou par les prix ou que les producteurs soient sous la menace des nouveaux entrants.

L'autre distinction entre l'approche structuraliste et l'approche comportementaliste se fait à travers les politiques publiques qu'elles proposent. Les politiques d'intervention ont pour principales missions de prévenir l'abus de position dominante, donc d'éviter les pertes sèches générées par le monopole. L'Etat intervient pour « *garantir des conditions raisonnables au profit du public* », Mill



(1894). Ponti (2011) distingue trois types de politiques d'intervention dont les objectifs et les principaux champs d'application sont présentés dans le tableau ci-dessous.

- La réglementation est une intervention directe qui a principalement pour objectif une allocation optimale des ressources.
- La régulation est une intervention indirecte qui vise à maximiser les surplus collectifs et surtout à améliorer l'efficacité de production.
- La libéralisation correspond à une politique d'appel au mécanisme de marché.

Tableau 2 : les politiques d'intervention, leurs objectifs et leurs champs d'application (Ponti, 2011)

Objectifs	Politiques d'intervention	Champs d'application
Efficienc e d'allocation	Règlementation	- Biens & Services publics - Monopole naturel
Efficienc e productive	Régulation	- Barrière à l'entrée - Externalités - Asymétrie d'informations - Monopole sans rendement d'échelle croissant
	Libéralisation	- Marché concurrentiel

Le désaccord conceptuel entre l'approche structuraliste et l'approche comportementaliste porte essentiellement sur la manière dont les questions de monopole naturel sont traitées. L'approche SCP considère que le monopole naturel est une structure de marché efficace. L'Etat intervient pour protéger les intérêts des usagers contre une discrimination par les prix, alors que la tarification à l'équilibre général va générer des pertes d'exploitation pour les producteurs. Les pouvoirs publics doivent définir un niveau de prix juste et raisonnable dans le cadre des services publics ou intervenir

directement sous forme de subvention. L'approche CPS propose les politiques publiques qui consistent surtout à lever les barrières à l'entrée et à la sortie du marché. Selon cette approche, le monopole de l'entreprise historique et l'intervention directe des pouvoirs publics sur le marché ne se justifient pas. La menace des nouveaux entrants va pousser les entreprises à devenir plus efficaces et innovantes. Les coûts supportés par les collectivités sont par conséquent moins élevés, le marché s'approchera de l'optimum économique et social.

Nous nous intéressons au monopole naturel dans notre analyse puisque le secteur du transport ferroviaire est un exemple typique de la présence de cette structure de marché. En pratique, il est difficile d'affirmer la présence du monopole naturel. L'entreprise en monopole sur le marché peut posséder des multiproduits parmi lesquels la structure du monopole ne se justifie pas. C'est-à-dire qu'elle dispose des activités en monopole naturel et d'autres activités qui sont des activités industrielles normales (activités commerciales). C'est l'exemple d'EDF au sein de laquelle l'activité de production d'électricité est une activité commerciale, alors que l'activité de distribution d'électricité constitue un monopole naturel.

C'est aussi le cas pour SNCF, la gestion de l'infrastructure et l'exploitation de service présentent des caractéristiques différentes. La gestion de l'infrastructure ferroviaire génère des importants coûts fixes irrécupérables, cette activité remplit les conditions du monopole naturel. Néanmoins, l'exploitation du service ferroviaire est une activité commerciale. La concurrence pour l'exploitation du service ferroviaire est possible, nous reviendrons sur ce point dans la section suivante.

Avant que les politiques d'ouverture à la concurrence dirigée par la Commission Européenne soient mises en œuvre, les marchés du transport ferroviaire des pays européens ont été exploités par les opérateurs historiques. En ce qui concerne l'exploitation du service ferroviaire, leur monopole est avant tout un monopole technique et légal.

Dans la section suivante, nous effectuons une analyse spécifique qui consiste à appliquer le concept de concurrence dans le cas du secteur des transports et en particulier dans le cas du transport ferroviaire. Nous aborderons les différentes questions de concurrence sur le marché du transport ferroviaire, parmi lesquelles nous expliquons les raisons pour laquelle notre analyse se concentre sur la concurrence intermodale.

## Section 1.1.2 : La concurrence dans le transport ferroviaire.

Dans une industrie multiproduits comme le transport ferroviaire, la structure de marché est relativement complexe. Il est plus facile de comprendre les questions de concurrence sur le transport ferroviaire en distinguant les questions selon la nature des activités. Dans son livre « *Principes d'économie des transports* », Quinet (1998) distingue trois différents marchés ferroviaires : le marché des infrastructures, le marché des services ferroviaires et le marché des services de transports.

Dans le tableau ci-dessous, nous présentons les principales caractéristiques de ces marchés selon la typologie de Quinet (1998). Dans le même tableau, nous présentons aussi les structures de marché associées aux différents marchés et les politiques les plus généralement appliquées dans chaque marché.

Tableau 3 : les différents marchés dans le secteur du transport ferroviaire (Quinet, 1998)

	Caractéristiques	Structure de marché	Politiques du transport
<b>Infrastructure</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bien public</li> <li>- Coûts irrécupérables</li> <li>- Rendement croissant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monopole naturel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Financement public</li> <li>- Règlementation (Open Access)</li> </ul>
<b>Services ferroviaires</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Barrières à l'entrée</li> <li>- Service public (pour partie)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Monopole légal</li> <li>- Monopole technique</li> <li>- Concurrence oligopole (Concurrence intramodale)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Subvention</li> <li>- Libéralisation</li> </ul>
<b>Services de transport</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Services substituables</li> <li>- Externalité environnementale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marché concurrentiel</li> <li>- Concurrence oligopole (Concurrence intermodale)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Régulation</li> <li>- Libéralisation</li> </ul>

Cette typologie de distinction entre l'infrastructure, les services ferroviaires et les services des transports est cohérente avec la politique de séparation verticale du secteur ferroviaire qui consiste à séparer la gestion de l'infrastructure et les services d'exploitation. L'infrastructure ferroviaire est un bien public et ce marché de l'infrastructure est caractérisé par le monopole naturel. L'exploitation du service ferroviaire et les services de transport sont des activités industrielles « normales ».

Les politiques de la Commission Européenne sont en faveur de l'introduction de la concurrence dans le secteur ferroviaire afin de construire un marché unique du transport ferroviaire en Europe. Pour ce faire, une séparation verticale entre le gestionnaire de l'infrastructure et l'opérateur de transport ferroviaire est demandée par la Commission Européenne.

La plupart des pays européens ont commencé depuis 1991 le processus de la séparation verticale de leur système ferroviaire. Le niveau de séparation est plus élevé en Grande Bretagne, aux Pays Bas et en Suède avec un gestionnaire de l'infrastructure totalement indépendant. En Allemagne, en

Autriche et en Italie, il existe une structure de holding qui englobe les deux fonctions de l'offre ferroviaire. En France, le processus de séparation verticale est en cours. Deux réformes ferroviaires ont été achevées dans la perspective de mettre en concurrence le marché ferroviaire.

- La première réforme est marquée par la création de Réseau Ferré de France (RFF) en 1997 qui est le gestionnaire de l'infrastructure, indépendant de l'entreprise ferroviaire historique SNCF.
- La deuxième réforme a eu lieu en 2015, qui a donné vie à un gestionnaire d'infrastructure unifié (SNCF Réseau). Cette réforme ferroviaire fait apparaître un groupe ferroviaire verticalement intégré en France : le groupe SNCF.
- En juin 2018, une nouvelle réforme a été lancée qui consiste à régler le problème d'endettement de la SNCF et à préparer l'ouverture à la concurrence. Cette réforme a évoqué le changement de statut de la SNCF d'un EPIC à une société anonyme à capitaux publics et la disparition du statut de cheminot pour les nouvelles embauches<sup>8</sup>. Dans le cadre de cette réforme, SNCF Gares & Connexions, historiquement rattaché à SNCF Mobilité, allait être intégrée au périmètre de SNCF Réseau.



\*Les modalités de rattachement de Gares & Connexions à SNCF Réseau restent à déterminer.

Figure 3 : Organisation du groupe SNCF (Réalisé : Auteur, 2019)

<sup>8</sup> Rapport Spinetta - « Avenir du transport ferroviaire », 15.02.2018.

En gardant à l'esprit la distinction entre les différentes activités au sein du secteur de transport ferroviaire, nous saurons évoquer les différentes questions de concurrence qui correspondent aux différents types d'activités du transport ferroviaire.

- Dans le marché de l'infrastructure, les questions de concurrence se concentrent sur le droit d'accès à l'utilisation de l'infrastructure. La politique dite d'« Open Access » de la Commission Européenne donnera un libre accès à l'utilisation des infrastructures ferroviaires dans les pays européens.
- Pour les services ferroviaires, la politique de l'ouverture à la concurrence consiste à mettre en concurrence les différents opérateurs de transport ferroviaire dans le marché ou pour le marché. Ce sont les deux principales formes de concurrence intramodale que nous présenterons plus en détails ci-dessous.
- Dans le marché des services de transport, nous distinguons le transport de voyageurs et le service de fret. Dans notre étude, l'analyse ne porte que sur le transport de voyageurs. Dans le marché du transport, le train est en concurrence avec les autres modes de transport. Le marché du service de transport est en concurrence intermodale.

Ci-après, nous présentons plus en détail les principales caractéristiques de ces différentes questions de concurrence.

### *1.1.2.1 - La concurrence pour l'accès au marché de l'infrastructure : l'Open Access*

Au sein du système de transport, les infrastructures sont constituées principalement par l'ensemble des installations fixes au sol (les routes, les rails, les aéroports) dédiées spécifiquement aux différents modes de transport et les équipements de signalisation.

Les réseaux ferroviaires appartiennent à l'Etat, le gestionnaire des infrastructures est donc sous le statut d'établissement public. Le gestionnaire de l'infrastructure travaille pour les

missions suivantes : l'évaluation *ex ante*<sup>9</sup>, la planification, la construction, la maintenance du réseau, la gestion d'accès au réseau, l'attribution des sillons et l'évaluation *ex post*<sup>10</sup>. En France, SNCF Réseau est le propriétaire et le principal gestionnaire du réseau ferré national français. SNCF Réseau assure l'accès à l'infrastructure ferroviaire, elle collecte des péages liés à l'utilisation de l'infrastructure.

- Une première caractéristique du marché d'infrastructure est le besoin d'investissements initiaux importants et les coûts irrécupérables (Sunk Costs)<sup>11</sup>. La théorie des marchés contestables (notamment Baumol, 1982) introduit la distinction entre les coûts fixes récupérables et les coûts fixes irrécupérables. Les coûts fixes récupérables font partie des coûts que les producteurs peuvent récupérer à sa sortie du marché. Les coûts fixes irrécupérables sont non recouvrables en cas de décision de cessation de l'activité.

Dans le secteur ferroviaire, le financement d'une nouvelle LGV est de l'ordre de plusieurs milliards d'euros, la réalisation d'un projet d'infrastructure de transport est le fruit d'un long débat public, des enquêtes d'utilité publique (DUP) et des études socio-économiques. Ces étapes constituent des coûts irrécupérables dans la mesure où ils ont été engagés exclusivement pour un projet (Figure 3). Les résultats d'évaluation d'un projet permettent de tirer des leçons mais ne peuvent pas être utilisés directement pour un autre projet. La durée de construction d'une nouvelle ligne est longue (de 5 à 6 ans pour une ligne LGV de 300 km). Ceci constitue aussi des coûts irrécupérables importants. La durée de vie d'une nouvelle voie ferrée est entre 30 et 50 ans. Les rails ne peuvent pas être revendus lorsqu'ils sont construits.

---

<sup>9</sup> L'évaluation sur la situation avant la mise en service du projet.

<sup>10</sup> L'évaluation sur la situation après la mise en service du projet.

<sup>11</sup> Les coûts irrécupérables sont « *des coûts fixes qui ont déjà été engagés et ne peuvent être récupérés. Ces coûts sont liés à certaines activités exigeant des actifs spécialisés qui ne peuvent pas facilement être affectés à d'autres usages* ». Commission des Communautés européennes, 2006.

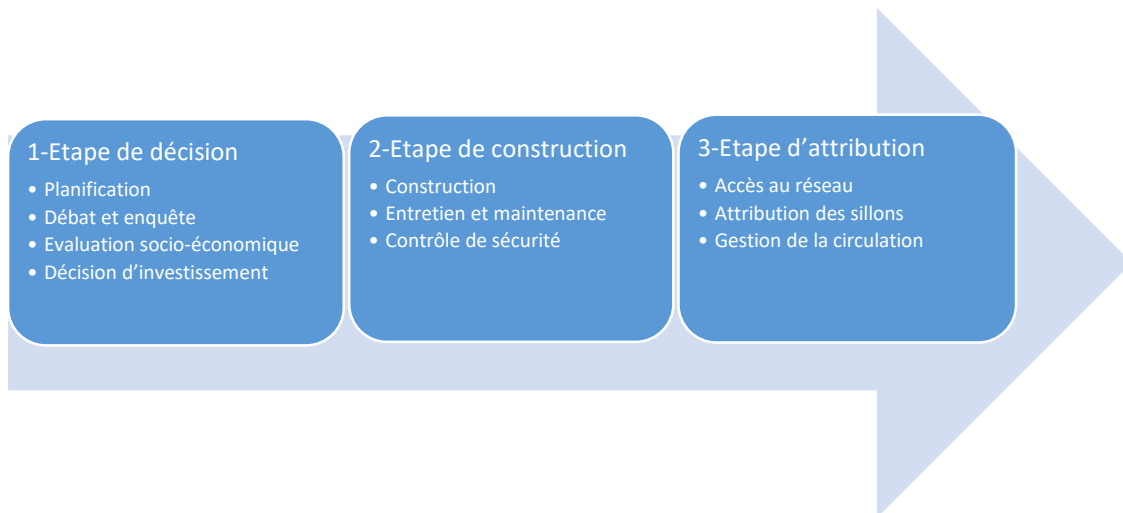


Figure 4 : les étapes pour réaliser un projet de ligne ferroviaire à grande vitesse (Auteur, 2018)

- La deuxième caractéristique du marché d'infrastructure est la présence des rendements d'échelle croissants. Les investissements initiaux sont importants, les coûts moyens sont une fonction décroissante de la quantité produite. Les coûts moyens sont supérieurs aux coûts marginaux. Les coûts variables, composés principalement des coûts d'exploitation et de maintenance de l'infrastructure, sont relativement bas par rapport aux coûts fixes. Les coûts d'exploitation sont supportés par les opérateurs de transport, les coûts de maintenance sont supportés par les gestionnaires de l'infrastructure.
- L'économie de densité et l'économie de taille sont nécessaires pour justifier l'existence de rendement croissant dans le marché d'infrastructure ferroviaire (Nash, 2011).
  - Lorsque la taille de réseau est supposée constante et que la variation du trafic est plus forte que la variation des coûts, nous constatons l'économie de densité dans le secteur du transport ferroviaire.
  - Si le niveau du trafic est constant et que la taille du réseau s'agrandit, et que les coûts augmentent de manière moins importante, il s'agit d'un phénomène d'économie de taille positive.

La gestion de l'infrastructure remplit ces deux conditions nécessaires, qui fait que il est plus coûteux pour les collectivités d'avoir deux gestionnaires de l'infrastructure en concurrence pour la même infrastructure (Preston *et al.*, 1999, Van de Velde *et al.*, 2012).



Dans le marché de l'infrastructure, il y a un large éventail de situations dans lesquelles l'intervention est nécessaire. L'Etat peut intervenir financièrement afin d'assurer le financement des infrastructures dès la phase de planification et jusqu'à l'entretien et la maintenance. Le financement des infrastructures est généralement assuré par fonds publics et dans de rares cas par un partenariat public-privé (PPP<sup>12</sup>).

Il existe aussi d'autres formes d'intervention directe. L'Etat peut intervenir pour assurer la bonne accessibilité du réseau ferroviaire sur son territoire, la sécurité et la compensation des externalités négatives pendant la phase de construction de l'infrastructure. L'Etat intervient aussi pour régulariser la tarification de l'infrastructure (les redevances d'utilisation du réseau). Cette intervention assure que le gestionnaire des infrastructures, en monopole dans le marché, n'applique pas une tarification trop élevée. Les redevances d'utilisation du réseau, la quantité et la qualité des sillons sont précisées dans les contrats entre le gestionnaire d'infrastructure et les opérateurs ferroviaires.

L'ouverture à la concurrence (Open Access) dirigée par la Commission Européenne est une intervention publique pour réglementer l'accès à l'infrastructure. Le principe d'Open Access défini par la Commission Européenne désigne une politique qui permet à n'importe quel opérateur ferroviaire de n'importe quel pays de pouvoir enregistrer ses demandes de sillons et de les obtenir dans des conditions transparentes. Entre 2001 et 2016, la Commission Européenne a publié quatre « Paquets ferroviaires » pour diriger une procédure de libéralisation longue du transport transeuropéen de fret jusqu'aux marchés de transport ferroviaire de voyageurs nationaux. Si les délais fixés dans le quatrième paquet sont bien respectés, le marché des infrastructures sera totalement en Open Access à partir de l'année 2023.

---

<sup>12</sup> Partenariat entre fonds publics et fonds privés. Dans le cas d'un PPP sous formes de concession, le concessionnaire construit, maintient et exploite l'infrastructure pendant la durée du contrat de concession, en contrepartie, il reçoit un péage d'utilisation auprès des opérateurs ferroviaires.

---

*Encadré 4 : « Paquets ferroviaires » de la Commission Européenne (CE)*

---

- Avant le premier paquet, la directive 91/440/CEE portait sur la désintégration verticale des opérateurs ferroviaires nationaux et exigeait au minimum une séparation comptable entre l'infrastructure et le service ferroviaire.
- La CE a annoncé son intention d'ouverture à la concurrence de fret sur le réseau transeuropéen dans son premier paquet en 2001. L'autre objectif était d'améliorer l'efficacité de la législation du système ferroviaire européen. La directive 2001/14/CE a précisé les fonctions du gestionnaire de réseau et a imposé la création d'un organisme de régulation indépendant.
- Le deuxième paquet (2004) portait essentiellement sur les mesures d'harmonisation des règles de sécurité et sur l'interopérabilité (Spécifications Techniques d'Interopérabilité, STI).
- Le troisième paquet ferroviaire avait pour objectif d'ouvrir le marché des services internationaux de transport ferroviaire de voyageurs au plus tard en 2010.
- Le quatrième paquet (2016) a pour objectif une ouverture à la concurrence des marchés ferroviaires nationaux. La date d'ouverture est en 2020 pour les grandes lignes et en 2023 pour les lignes conventionnées.

### *1.1.2.2 - La concurrence entre les opérateurs du transport ferroviaire : la concurrence intramodale*

Jusqu'au début des années 1980, le monopole était la structure de marché la plus fréquemment accordée dans tous les pays par les autorités publiques aux opérateurs ferroviaires. Depuis, l'ouverture à la concurrence a constitué un enjeu économique majeur. La volonté d'introduire la concurrence est initiée par la remise en cause du monopole naturel dans le marché du transport ferroviaire. La concurrence intramodale vise à mettre en concurrence les opérateurs du transport pour le service d'exploitation ferroviaire qui est par nature une activité commerciale.

En France, l'opérateur historique (SNCF) est en monopole sur le marché ferroviaire. La loi d'orientation des transports intérieurs (LOTI) de 1982 a accordé le droit d'exploitation des lignes ferroviaires, des locomotives et des gares ferroviaires à la SNCF. En l'état actuel, l'infrastructure n'est pas en Open Access pour les autres opérateurs ferroviaires pour le service des transports

ferroviaires intérieurs de voyageurs. Une barrière à l'entrée législative (le droit d'exploitation confié à SNCF) existe qui constitue un monopole légal sur le marché, le monopole de SNCF est avant tout un monopole légal.

Par ailleurs, la compétence technique des opérateurs historiques constitue une autre forme de barrière à l'entrée pour les opérateurs qui s'intéressent au marché ferroviaire français. L'acquisition des matériels roulants, la propriété d'un réseau de maintenance et de vente sont des obstacles majeurs.

- Après avoir obtenu le droit d'exploitation, l'opérateur ferroviaire supporte les coûts d'acquisition des matériels roulants. Ces coûts ne sont pas négligeables pour un nouvel entrant. Jusqu'à présent, le marché du matériel roulant d'occasion n'existe pas du fait de l'hétérogénéité des normes technologiques et des types de voies dans les différents pays et parfois au sein d'un pays.
- Le réseau de vente représente une infrastructure essentielle et coûteuse : les points de vente, les terminaux de billetterie automatiques et les sites internet commerciaux. Il constitue un avantage concurrentiel pour l'opérateur historique. Pour que les nouveaux entrants se trouvent dans une situation de concurrence équitable, l'accès équitable et non discriminatoire du réseau de vente (distributeur de billets, guichet dans les halls de la gare, etc.) est nécessaire.

Même lorsque l'infrastructure est en Open Access, le marché du service ferroviaire est généralement en concurrence oligopolistique, car le nombre optimum d'entreprises sur le marché ferroviaire est limité, la demande est faible pour faire vivre un grand nombre d'opérateurs et pour nourrir les économies d'échelle (Smith *et al.*, 2009). En Suède, S.J. (Statens Järnvägar) exploite majoritairement des services ferroviaires à longue distance, un faible nombre d'opérateurs (7 au total) sont présents sur le marché pour répondre aux appels d'offre. En Allemagne, la situation est similaire, où D.B. (Deutsche Bahn) contrôle la majorité du marché (99 %), deux autres opérateurs représentent environ 1 % des parts de marché.

Théoriquement, lorsque les capacités de l'offre ne sont pas soumises à des contraintes et lorsque les offres ne sont pas différenciées, la concurrence se fera principalement par les prix. Selon Quinet et Vickerman (2005), les opérateurs, soumis à des contraintes de capacité, n'offrent pas des produits parfaitement symétriques. Selon ces auteurs, la concurrence entre les opérateurs

ferroviaires est en réalité moins forte que la concurrence par les prix au sens de Bertrand et plutôt proche de la concurrence oligopolistique de Cournot.

Le pouvoir public intervient dans le marché ferroviaire parce que le transport ferroviaire de voyageurs est considéré comme un service universel. Par définition, le service universel est «*toute activité d'une collectivité publique visant à satisfaire un besoin d'intérêt général*», (Larousse Encyclopédie, 2016). Selon le Conseil Constitutionnel Français (1979), les principes de service universel sont la continuité, l'adaptabilité et l'égalité. La continuité du service universel repose sur le principe qu'il doit répondre aux besoins d'intérêt général sans interruption. Même pendant la période de grève, les opérateurs du service universel doivent maintenir un niveau minimum du service. Le principe de l'adaptabilité consiste à faire évoluer le service universel dans le temps afin de proposer des services adaptés à l'évolution des besoins des usagers. L'égalité du service universel repose sur le fait que le droit d'accès au service doit être non discriminatoire.

Le principe de l'égalité est majeur dans le transport ferroviaire de voyageurs. L'égalité pour utiliser le transport ferroviaire se traduit par une obligation d'accessibilité aux services universels menacés d'exclusion. La loi est ainsi rédigée : La société SNCF a pour mission d'assurer un « *bon fonctionnement du système de transport ferroviaire national, au bénéfice de l'ensemble des acteurs de ce système, notamment en matière de gestion de crise et de coordination des acteurs pour la mise en accessibilité du système de transport ferroviaire national aux personnes handicapées ou à mobilité réduite* », (L'article L. 2111-9, Loi n°2018-515).

Le service dit universel doit être disponible et accessible à tous les individus même s'il rend l'activité économiquement déficitaire. Cela explique la raison pour laquelle l'intervention publique est nécessaire. Dans le cadre du service universel, les « petites lignes » peu fréquentées doivent être assurées par un service minimum. Alors que, les lignes peu fréquentées maintenues dans le cadre des missions de service universel vont générer des pertes d'exploitation pour les opérateurs de transport.

La subvention croisée est une des caractéristiques du système ferroviaire français. Cette subvention apparaît lorsqu'il n'y a pas de séparation comptable, les recettes sur les lignes rentables sont versées sur les lignes non rentables (à titre d'exemple, 0,4 milliard d'euros de déficits des Trains d'Equilibre du Territoire TET sont supportés par SNCF, Rapport Spinetta, 2018). Les opérateurs ont besoin de moins de subventions extérieures, les coûts pour les collectivités et les régions sont

moins élevés. Mais, ce mécanisme manque d'incitation pour les opérateurs dans la mesure où, de toute manière, les coûts seront subventionnés. Le mécanisme de subvention croisée est aussi à l'encontre des politiques de l'ouverture à la concurrence.

Au regard des caractéristiques du service ferroviaire présentées ci-dessus, nous pouvons résumer les conditions nécessaires pour la concurrence intramodale. L'infrastructure doit être en Open Access, il doit y avoir une bonne articulation entre les mécanismes de la concurrence et l'obligation de service universel, la transparence des informations entre les autorités publiques et les opérateurs, l'interdiction de subvention croisée.

Nous distinguons deux modèles de concurrence intramodale : la concurrence pour le marché et la concurrence dans le marché. Chadwick (1859) est le principal promoteur de ces deux typologies.

- La concurrence pour le marché concerne la concurrence ex-ante pour obtenir le droit d'exploitation. Le mécanisme d'enchère est essentiel permettant de l'obtention du droit de servir la demande (Mougeot et Naegelen, 2005). Les opérateurs de transport sont en concurrence pour le droit d'exploitation pendant une durée déterminée. L'adjudication des droits de franchise est réalisée à l'aide d'un système d'enchères. La concurrence pour le marché est principalement dédiée à l'exploitation des lignes conventionnelles (principalement les lignes interrégionales, le Transport Express Régional (TER), les trains Corail).
- La concurrence dans le marché désigne la situation où plusieurs opérateurs de transport sont présents simultanément sur le même marché. Elle s'agit d'une concurrence *ex post* dans le marché entre les opérateurs. Les nouveaux entrants peuvent concurrencer directement l'opérateur historique ou jouer le rôle d'un concurrent potentiel (Gomez-Ibanez et De Rus, 2006). Les opérateurs sont incités à être plus efficaces afin de gagner des parts de marché. Cette forme de concurrence concerne les lignes commerciales et notamment les lignes TAGV.

Jusqu'en 2018, 8 pays européens n'ont pas encore libéralisé leurs services domestiques de transport ferroviaire de voyageurs ; 5 pays européens ont libéralisé totalement leurs marchés de transport ferroviaire à la concurrence ; 4 pays européens ont ouvert à la concurrence, mais sans nouvel entrant. Les Pays-Bas seront le seul pays qui n'a ouvert à la concurrence que les services conventionnés et où la concurrence est actuellement effective (Données : ARAFER, 2015). Le

schéma récapitule l'état de l'ouverture du marché ferroviaire en Europe est présenté dans l'annexe (Figure 46).

La modalité de l'ouverture à la concurrence est différente selon les pays. Au Royaume-Unis, l'ouverture à la concurrence s'effectue avec le modèle de concurrence pour le marché. Le réseau ferroviaire britannique est découpé en plusieurs franchises. Ce modèle de l'ouverture à la concurrence a conduit jusqu'au démantèlement de l'opérateur historique. La concurrence dans le marché a aussi été choisie par la Suède. L'Allemagne a choisi le modèle de l'ouverture à la concurrence en fonction de la nature des services de transport. Pour les services ferroviaires de voyageurs à longue distance, l'opérateur historique D.B. est face à la concurrence des opérateurs privés et des opérateurs étrangers. Les services ferroviaires régionaux allemands sont en revanche en concurrence pour le marché, les autorités régionales lancent des appels d'offre pour mettre en concurrence les opérateurs.

Selon le rapport publié par ARAFER (2018), nous constatons que la politique de l'ouverture à la concurrence s'accompagne d'une forte hausse de l'offre et la demande de transport. Au Royaume-Uni, le transport ferroviaire intérieur de voyageurs a été libéralisé en 1994. Entre 1998 et 2016, le nombre de trains.km a augmenté de 30 %. Le nombre de voyageurs.km a presque doublé sur la période de 1994 à 2015. En Suède, l'ouverture à la concurrence des services de transport ferroviaire régionaux a commencé à partir de 1990. L'offre de transport en termes de nombre de trains.km a augmenté de 53 % entre 1990 et 2014. La fréquentation en termes de voyageurs.km a doublé entre 1992 et 2008. En Allemagne, l'ouverture à la concurrence en 1997 a aussi montré ses effets positifs sur l'offre et la demande ferroviaire. Le nombre de trains.km en Allemagne était en croissance de 20 % entre 1996 et 2014, la fréquentation en termes du voyageurs.km s'est accrue de 29 % sur la période 1996-2006.

Outre l'ouverture à la concurrence, plusieurs autres facteurs peuvent aussi expliquer cette hausse de la fréquentation. Selon les données OCDE (2018), l'évolution du niveau d'investissement en infrastructure ferroviaire depuis 1995 dans les principaux pays concernés est aussi une des principales explications (Annexe-Figure 47). La construction des nouvelles lignes ferroviaires et la rénovation des lignes classiques constituent un élément important de la performance du réseau ferroviaire.

On constate par ailleurs que l'ouverture à la concurrence pourrait devenir une opportunité pour l'opérateur historique. En Allemagne, le D.B. a vu son volume de trafic en voyageurs.km s'accroître de 12 % entre 2002 et 2009. Les parts de marché de l'opérateur historique suédois S.J. ont diminué mais la S.J. a malgré tout conservé son volume d'activité global grâce à l'augmentation du trafic sur leur réseau.

Les effets directs de l'ouverture à la concurrence incitent les opérateurs à produire de manière plus efficiente. Entre le début de l'ouverture à la concurrence et 2015, les coûts d'exploitation des opérateurs ferroviaires en termes du trains.km ont baissé entre 20% et 30 % en Allemagne et en Suède. L'ouverture à la concurrence a aussi contribué à la baisse significative des coûts supportés par les autorités organisatrices. Les subventions des services conventionnés ont été réduites de l'ordre de 10 % à 43 % en Allemagne, en Suède et au Royaume-Uni.

Ces résultats montrent que la concurrence pour le marché pourrait améliorer l'efficacité économique du système ferroviaire. Les effets observés de la concurrence sont positifs pour les nouveaux entrants, l'opérateur historique en termes du volume de l'offre et la demande et positifs pour les collectivités en matière des coûts.

Néanmoins, les effets de la concurrence dans le marché restent incertains. Ivaldi et Vibes (2008) ont montré l'efficacité d'un nouvel entrant low-cost sur le marché ferroviaire allemand contribuant à une baisse de la tarification pour les voyageurs. La limite de leurs études est que les résultats sont obtenus sous des hypothèses fortes des coûts d'exploitation faibles du service low-cost. Johnson et Nash (2011) ont montré des résultats similaires pour l'ouverture à la concurrence des services de cabotage. Leurs études ont montré que les nouveaux arrivants et l'opérateur historique sont tous perdants de la politique de l'ouverture à la concurrence, sauf si les nouveaux arrivants pourraient bénéficier des coûts significativement plus faibles. Sur les lignes reliant Madrid à Séville et Valence, Alvarez San-Jaime *et al.* (2015) montrent que l'ouverture à la concurrence permet d'améliorer le bien-être collectif à condition de pouvoir générer une baisse de prix et une hausse de trafic suffisamment importants.

En France, le transport ferroviaire de marchandises a été entièrement ouvert à la concurrence en mars 2006. La part de marché du fret ferroviaire en France s'est légèrement redressée de 2 % entre 2010 et 2015. Le marché du transport international de voyageurs a été mis en concurrence en 2007. La création de SNCF Réseau en 2015 a fait apparaître un groupe SNCF verticalement intégré.

L'opérateur ferroviaire historique (SNCF Mobilités) est aussi le propriétaire des actifs incorporels comme les gares ferroviaires, les centres de maintenance. En l'état actuel, les barrières à l'entrée pour les nouveaux opérateurs ferroviaires sont toujours nombreuses: les conditions liées à l'accès non discriminant aux infrastructures, à la suppression des barrières techniques et locales et à l'accès au réseau de vente ne sont pas prévues à l'heure actuelle. Le problème social, notamment en ce qui concerne le statut des cheminots reste un obstacle majeur, car l'ouverture à la concurrence nécessite d'un transfert des personnels vers le domaine privé.

En juin 2018, un projet de loi « pour un nouveau pacte ferroviaire » a été adopté pour réformer la SNCF. Ce projet de loi affirme l'ouverture à la concurrence en France en 2019 pour les trains régionaux et en décembre 2020 pour les TAGV.

On parle tellement souvent de l'ouverture à la concurrence qu'elle nous donne l'impression que la concurrence est absente dans le transport ferroviaire de voyageurs, alors que l'absence de la concurrence est une description imprécise pour le marché du transport ferroviaire. Le transport ferroviaire, en tant qu'un service de transport, est sous la pression de la concurrence des autres modes de transport.

Nous présentons la concurrence intermodale qui constitue, en l'état actuel, un mécanisme de marché efficace pour améliorer l'efficacité économique du transport ferroviaire.

### *1.1.2.3 - La concurrence entre les différents modes de transport : la concurrence intermodale*

La concurrence intermodale est un phénomène courant dans le secteur des transports. Les différents modes de transport sont tous substituables sur le marché du transport de voyageurs. La pression de la concurrence pousse les opérateurs de transport à proposer des services moins chers, plus rapides et confortables. En concurrence pour gagner des parts de marché, les opérateurs de transport sont incités à innover et à devenir plus efficaces.

En 1910, la part modale du train dans le transport intérieur de voyageurs a atteint plus de 93 % en France. Même jusqu'aux années 1950, le transport ferroviaire a constitué le mode dominant pour le transport de voyageurs. Cette position dominante s'est expliquée principalement par sa capacité



et sa rapidité relative. Depuis, les parts de marché du train diminuent rapidement, en 2018, elles représentent seulement environ 10 % en France.

Depuis les années 1995, nous observons une légère hausse de part modale du train en France grâce au développement du service ferroviaire à grande vitesse. Le trafic ferroviaire a augmenté de 10 % en termes de voyageurs.km entre 2000 et 2011. Depuis 2011, le transport intérieur de voyageurs en France a progressé de 1,2 % en atteignant près de 10 % des parts de marché et près de 950 milliards de voyageurs.km en 2016. Pourtant, les parts de marché du train baissent depuis 2008 à cause du plafonnement de la fréquentation en TGV et de la baisse de la fréquentation des TER (Annexe-Figure 48).

Nous observons le même phénomène dans les autres pays européens, la part modale du train représente moins de 8 % en moyenne en Europe en 2018. La figure 5 montre l'évolution des parts de marché du transport ferroviaire de voyageurs pendant la période 1995 - 2015. Nous constatons que la part modale du train dans le marché du transport de voyageurs est plus importante en France et en Suède (supérieur à 9,5 %) par rapport à celle-ci en Allemagne, en Italie et au Royaume-Uni.

Nous observons que les pays qui ont connu des croissances de parts de marché du train les plus spectaculaires sur 20 ans sont les pays qui ont pratiqué la concurrence intramodale : la Suède et le Royaume Uni. Du côté allemand, les trafics ferroviaires ont progressé dès la fin des années 90, à la suite de l'ouverture à la concurrence pour les trains quotidiens. Les parts de marché du train ont fortement augmenté en France entre 1995 et 2008 grâce aux gains de parts de marché du TGV sur l'avion mais celles-ci ont ensuite stagnées.

**Répartition modale du transport de voyageurs**  
 % dans le total intérieur de passagers-km  
**Trains**

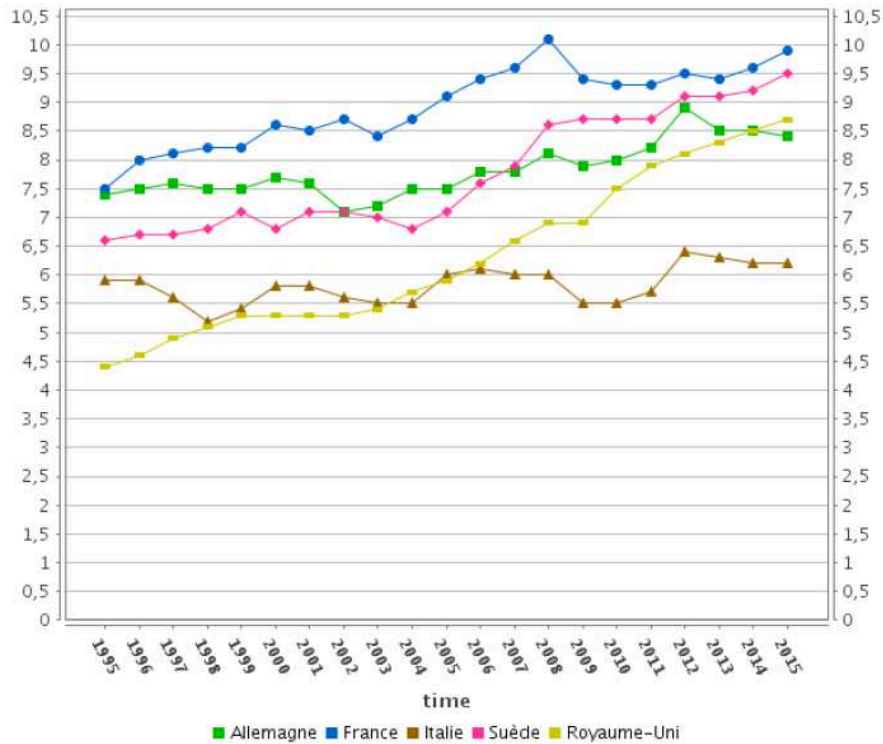


Figure 5 : la part modale du train dans le total intérieur de voyageurs.km entre 1995 et 2015 (Eurostat, 2018)

Selon les données INSEE, le transport intérieur de voyageurs par avion en France a augmenté de 33 % en voyageurs.km entre 1990 et 2000. Entre 2000 et 2010, le trafic aérien a connu un repli de 16 % du fait de la concurrence de TAGV. Depuis l'année 2010, le trafic aérien a progressé notamment grâce au développement des services Low-Cost. En 2017, le trafic aérien pour le transport intérieur de voyageurs a retrouvé son niveau de 2010.

En 2016, le train représente 26 % des parts de marché sur la distance 300 et 600 km contre 5 % pour l'avion. La compétitivité de l'avion s'améliore lorsque la distance parcourue augmente. Sur la distance 600 km et 1000 km, l'avion représente environ 16 % des parts de marché, les parts de marché de train s'améliorent légèrement de 26 % à 28 %. Sur la distance de plus de 1000 km, l'avion représente 93 % des parts de marché (Données SDES, 2018). Selon ces chiffres, nous constatons la position dominante de la voiture particulière sur la distance inférieure à 1000 km.

La compétitivité de la voiture s'améliore fortement depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle grâce au progrès technique et à l'investissement en infrastructure. La part du transport routier en Europe passe de

moins de 10 % en 1920 à environ 83 % en 2011. Depuis l'année 2000, le trafic du transport routier de voyageurs a augmenté de plus de 10 % dans l'UE-27 (Données Eurostat, 2018). En l'état actuel, le marché du transport de voyageurs reste largement dominé par la voiture dans l'ensemble des pays européens. Les impacts de la compétition avec le TAGV sont relativement limités, cela est expliqué par la faible évolution des parts de marché de la voiture depuis l'arrivée du TAGV.

Le service d'autocar a aussi fortement progressé, il est susceptible de réduire le trafic ferroviaire. Dans les pays européens, l'ouverture à la concurrence du service d'autocar est assez récente. Les études empiriques au Royaume-Uni et en Allemagne montrent que la concurrence n'est pas forte entre le train et l'autocar car ces deux services ne s'adressent pas à la même clientèle. Les usagers de l'autocar voyagent davantage pour le motif loisir, alors que les usagers du train voyagent principalement pour le motif professionnel (White et Robbins, 2012).

En France, après la promulgation du droit de cabotage, le service en autocar commence à monter en puissance sur les liaisons de moyenne distance. La loi dite Macron a permis la libéralisation du transport régulier interurbain de voyageurs par autocar en France. Selon les rapports de l'ARAFER, nous observons une expansion forte du service d'autocar depuis l'ouverture à la concurrence. Le nombre de villes desservies en autocar passe de 136 villes en 2015 à 238 villes en 2018. Pendant la même période, le nombre de liaisons commercialisées passe de 689 à 1 438 liaisons. Trois opérateurs d'autocar sont actuellement présents sur le marché : Ouibus, Flixbus et Eurolines/Isilines. Les services d'autocar ont transporté près de 7,1 millions de voyageurs en 2017, soit 14,5 % de hausse par rapport à l'année 2016. Le nombre de voyageurs transportés continue de grimper en 2018 avec déjà 6,8 millions de voyageurs enregistrés pour les trois premières trimestres 2018 (Données ARAFER, 2018).

L'autocar et le train s'adressent à des différents segments de clientèle. Les études réalisées sur le réseau d'autocar au Royaume-Uni et en Allemagne ont montré que le tarif moyen en autocar est 30 % à 50 % inférieur au tarif moyen en train. Le service d'autocar s'adresse principalement à ceux qui disposent d'une faible disponibilité à payer. L'autocar peut aussi concurrencer le service ferroviaire en répondant mieux aux besoins des segments de clientèle bien ciblés (Van de Velde, 2015). Le niveau de demande en autocar est très sensible à l'évolution du tarif ferroviaire, alors que le niveau de demande en train ne réagit que très peu face à la diminution du tarif en autocar (Augustin *et al.*, 2014). Pour cette raison, nous nous apercevons qu'en général, le volume du trafic

en autocar augmente fortement pendant les premières années de mise en service, mais stagne rapidement.

Le service de covoiturage a émergé en France depuis peu de temps. Il s'agit de l'utilisation commune d'un véhicule par un conducteur non professionnel et un ou plusieurs passager(s) dans le but d'effectuer tout ou une partie d'un trajet commun (CERTU, 2007). Le covoiturage offre un service de transport à moindre coût, à la fois pour le conducteur et pour les passagers. Le service de covoiturage avec un tarif relativement faible, est très attractif sur les courtes et moyennes distances. Celui-ci est considéré par la SNCF comme un concurrent direct pour leur service de transports régionaux de voyageurs.

La concurrence intermodale est la situation dans laquelle les modes de transport offrent des services de transport substituables. L'analyse de la concurrence intermodale commence par la délimitation du marché. Cette étape contribue à identifier le périmètre d'étude qui est défini comme un marché pertinent au sein duquel les différents modes de transport offrent des services substituables.

Selon la définition généralement acceptée, la substituabilité décrit « *la possibilité pour un terme dans une proposition d'être substitué à un autre* », (Larousse, 2018). Dans le droit de la concurrence, la substituabilité est définie « *lorsque les demandeurs ou les utilisateurs considèrent les biens ou les services comme des moyens alternatifs entre lesquels ils peuvent arbitrer pour satisfaire une même demande* », (Cons. Conc. Déc. N°99-D-41, 22 juin 1999). Pour déterminer si les modes de transport sont substituables, plusieurs critères ont été élaborés. Nous présentons le critère du domaine technique de compétence et de la zone économique d'intervention qui sont des critères généralement acceptés pour analyser la substituabilité des modes de transport (Quinet et Vickerman, 2005) :

- Le domaine technique de compétence est caractérisé par les indicateurs techniques comme la vitesse maximale, le nombre de sièges, le confort (*Encadré 5*). Un mode de transport est dans sa zone d'exclusivité lorsque, pour des raisons techniques, il est le seul à proposer des services sur le marché. A titre d'exemple, l'avion est absent sur les liaisons de courte distance. Le train et la voiture sont quant à eux exclus du marché pour des trajets intercontinentaux à très longue distance.

---

### *Encadré 5 : La concurrence technique*

---

La concurrence technique se manifeste sous la forme de recherche de vitesse. Pour les voyageurs, le temps passé dans le transport est un coût. La vitesse plus élevée signifie des coûts plus faibles pour les usagers et donc des gains de compétitivité pour le mode de transport concerné.

- Pour le transport ferroviaire, la vitesse commerciale des trains ne cesse de s'améliorer depuis la naissance du TAGV. La vitesse du Shinkansen au Japon a évolué de 210 km/h à 320 km/h. Le TGV en France circulait initialement à 260 km/h et maintenant à 300 km/h sur la plupart des lignes. Les « normes chinoises » consistent à faire rouler les trains à 350 km/h sur leurs réseaux à grande vitesse. Ces pays sont aussi en compétition pour le record de vitesse en train. Aujourd'hui, le record de vitesse est détenu par les français avec 574,8 km/h. Le projet « Hyperloop » aux Etats-Unis, a l'ambition de faire rouler les trains à 1102 km/h, donc plus rapide que la vitesse commerciale d'un avion.
- L'innovation technique dans le secteur aéronautique est aussi remarquable. Le modèle révolutionnaire de l'aviation civile Boeing 707 était capable de voler à 960 km/h en 1957. Le Concorde (1976 – 2003) a même permis l'aviation commerciale supersonique à 2145 km/h. Pourtant, la plus haute vitesse entraîne des coûts élevés, une forte consommation de carburant et une capacité contraignante. L'exploitation du service aérien supersonique n'était pas rentable. L'amélioration de la performance commerciale des avions se fait notamment grâce à l'augmentation de la capacité, à la diminution de consommation et à l'amélioration de l'autonomie. Le Boeing 707 (1957) était le premier modèle qui a connu un succès commercial en emportant jusqu'à 180 passagers sur plus de 6 000 km. En 2005, le modèle Airbus A380 est capable de transporter 525 passagers sur plus de 15 400 km.
- Le record de vitesse de la voiture se multiplie sans arrêt depuis les années 60, jusqu'à atteindre à 1228 km/h en 1997 avec le véhicule Thrust SSC (Royaume-Uni), supérieur à la vitesse supersonique. Pourtant, la vitesse commerciale est strictement limitée pour des raisons de sécurité (la vitesse est illimitée sur certains tronçons de voie rapide en Allemagne). Aujourd'hui, le développement technique de la voiture s'oriente principalement vers le confort et la sécurité.

Pourtant, il convient de souligner que l'utilité marginale de la vitesse est décroissante, à titre d'exemple, sur la liaison Paris et Lyon, en passant de 300 km/h à 330 km/h, le temps gagné est seulement de moins de 8 minutes sur un trajet de 2 heures.

- La zone économique d'intervention désigne le marché au sein duquel le mode de transport concerné propose un service attractif. La compétitivité d'un mode de transport est forte lorsqu'il est superposé économiquement à d'autres modes de transport. C'est lorsque le

service proposé est de meilleure qualité et à moindre coût qu'un mode de transport devient économiquement plus attractif. Par ailleurs, il faut être prudent dans l'analyse car le pouvoir concurrentiel d'un mode de transport dépend du besoin de déplacements des usagers, il est peut-être plus fort sur un segment de clientèle mais pas sur un autre.

Dans sa zone économique d'intervention, l'amélioration de l'offre d'un mode de transport va générer un transfert modal au détriment des autres modes de transport alternatifs. Le transfert modal ou le report modal désigne « *le passage d'un individu d'un mode de transport à un autre pour arriver à la même destination*», (Kaufmann, 2002). Il faut apporter une vision dynamique dans l'analyse de la concurrence intermodale, le contexte de l'offre de transport est évolutif, la conjoncture économique, les nouvelles politiques de transport et les innovations techniques et commerciales impactent la compétitivité des modes de transport.

L'analyse de la compétitivité d'un mode de transport et du phénomène de transfert modal dépend des caractéristiques de l'offre de transport et des besoins de déplacements des voyageurs. Lorsque l'offre de transport ferroviaire s'améliore, le train élargit sa zone économique d'intervention, les modes de transport se trouvent dès lors dans le même domaine technique de compétence et dans la même zone économique d'intervention. Par conséquent, les parts de marché du train vont augmenter au détriment des autres modes de transport.

En Europe, les politiques publiques de transports favorisent le développement du mode ferroviaire. On souhaite générer des transferts modaux en faveur du train car par rapport aux autres modes de transport, le train génère moins d'externalités négatives pour la collectivité.

En général, nous distinguons quatre grands types d'externalités : la congestion, l'insécurité, l'environnement et les effets liés à l'aménagement du territoire. L'UTP<sup>13</sup> (2017) a évalué les valeurs des coûts externes marginaux de différents modes de transport en France. Le rapport montre que, pour les déplacements interurbains, les coûts externes marginaux en TGV sont 4 fois moins chers (en centime euro par voyageurs.km) pour la collectivité par rapport à l'autocar, environ 6

---

<sup>13</sup> UTP : Union des Transports Publics et Ferroviaires

fois moins chers par rapport à l'avion, 7 fois moins chers par rapport à la voiture sur l'autoroute et 15 fois moins chers par rapport à la voiture qui roulent en dehors des autoroutes.

Les politiques européennes fixent des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) pour chaque pays membre. En 2010, la loi dite « Grenelle II », portant engagement sur ce sujet, l'objectif fixé de diviser par 4 des émissions de GES à l'horizon 2050. En ce qui concerne le secteur du transport, ceci se traduit par des politiques en faveur de l'utilisation des transports collectifs et surtout du train. En France, les émissions de GES en train sont en forte baisse depuis 1990, alors que les émissions de GES pour le transport aérien, le transport routier et le transport maritime sont plus élevées par rapport au niveau de l'année 1990 (Annexe-Figure 49).

## Section 1.1.3 : La concurrence Air-Fer dans le contexte d'une nouvelle LGV

### *1.1.3.1 - L'impact d'une nouvelle LGV*

La compétitivité du train s'améliore grâce à la mise en service du TAGV. Albalade *et al.* (2015) a notamment montré que la distance parcourue et le temps de trajet sont des déterminants significatifs pour expliquer l'évolution du volume de trafic. On considère généralement que le TAGV est très compétitif sur la moyenne distance entre 400 et 800 km qui correspond au temps de parcours entre 1h30 et 2h30 (Janic, 1993, Givoni et Dobruszkes, 2013). Au-delà de cette zone, l'avion reste le mode de transport dominant.

Lorsque la distance de parcours est courte, l'augmentation de la vitesse de train n'est pas importante. Pour créer des effets de vitesse à moyenne et longue distances, le nombre d'arrêts intermédiaires doit être faible. Le nouveau service de TAGV s'accompagne d'une hausse de tarif. Tous ces éléments font que le TAGV est en dehors de sa zone de compétitivité sur les liaisons de courte distance Ollivro (2000).

Sur les liaisons de moyenne distance, la forte compétitivité du TAGV oblige les compagnies aériennes à modifier leurs offres de service. Dobruszkes (2014) a étudié les impacts des nouvelles LGV sur l'offre de transport aérien en Europe. En faisant un suivi de l'évolution de fréquence et de nombre de sièges proposés, on distingue trois réactions différentes du secteur aérien face à la concurrence du TAGV :

- L'introduction du service TAGV entraîne la fermeture ou la quasi-fermeture des liaisons aériennes. C'est ce qui s'est passé sur la liaison Paris-Metz et Paris-Bruxelles.
- Le phénomène le plus souvent observé est la diminution du nombre de sièges proposé en avion. C'est la stratégie que les compagnies aériennes privilègent face à la nouvelle LGV. Nous avons observé ce phénomène sur les liaisons Bruxelles-Londres, Paris-Lyon et Paris-Marseille.
- L'introduction du service TAGV ne freine pas la croissance du trafic aérien. Ce phénomène s'est produit sur certaines liaisons où le TAGV ne propose pas de dessertes directes, comme le cas de Cologne-Munich.

De manière générale, nous constatons que sur les liaisons de moyenne distance où les dessertes ferroviaires existent, les parts de marché de l'avion sont fortement impactées par l'arrivée du nouveau service TAGV, ce qui fait que les compagnies aériennes adoptent des nouvelles stratégies pour faire face à la concurrence.

Par ailleurs, la concurrence Air-Fer impacte la tarification des voyageurs. La nouvelle infrastructure ferroviaire permet d'améliorer la qualité du service ferroviaire. Pourtant des coûts sont associés aux temps gagnés. La mise en service d'une LGV s'accompagne généralement d'une hausse de tarifs en train pour les voyageurs (A titre d'exemple, un billet coûte moyennement entre 10 € et 15 € plus cher depuis l'arrivée de la LGV SEA). Les compagnies aériennes sont contraintes d'appliquer une stratégie de concurrence par les prix afin de conserver leurs parts de marché. Le rapport de Steer Davies Gleave (2004) a prouvé que les tarifs aériens sur les moyennes distances ont baissé après la mise en service des LGV. Les travaux de Yang et Chang (2012) ont montré une corrélation négative entre les tarifs aériens et la vitesse des trains. De manière générale, nous constatons que le service ferroviaire à grande vitesse génère une baisse des tarifs aériens.



Plusieurs travaux ont aussi montré que les effets de la concurrence Air-Fer sur les tarifs aériens vont rapidement s'atténuer. Les nouveaux tarifs aériens proposés sur le marché vont conduire à un nouvel équilibre sur le marché du transport. Vickerman (1997) a montré que la baisse des tarifs aériens a eu lieu seulement pendant la première année qui suit la mise en service de la LGV, après la baisse des tarifs aériens deviennent plus modérée. Sur le cas d'Eurotunnel, Behrens et Pels (2009) ont montré des effets moins importants liés à la concurrence Air-Fer sur les tarifs aériens. Les tarifs proposés par les compagnies aériennes vont se stabiliser rapidement pendant les premières années de mise en service de LGV. Leurs travaux ont aussi montré que les effets de la concurrence Air-Fer ne sont pas significatifs lorsque les études sont faites à long terme.

Face à la forte concurrence, les opérateurs de transport peuvent aussi adopter une stratégie de différenciation. C'est le cas des services « low-cost » qui ont été développés afin de capter les clients dont la valeur du temps est faible. Le service « low-cost » développé dans le secteur aérien est compétitif avec la concurrence du TAGV sur la moyenne distance (Albalade et Bel, 2012). Behrens et Pels (2009) ont montré que le service du TAGV est en concurrence directe avec le service aérien « low-cost » sur la liaison London-Paris, le service aérien conventionnel a été in fine exclu du marché de transport de voyageurs.

Par ailleurs, l'amélioration de l'offre de transport grâce à la mise en service d'une infrastructure ferroviaire génère des trafics supplémentaires. Les nouveaux clients sont attirés sur le réseau par la nouvelle offre de transport qui est plus attractive. On utilise le terme « trafic induit » pour désigner cette réaction de la demande à l'offre améliorée. Les trafics induits se produisent aussi lorsque les opérateurs de transport proposent un nouveau service de transport comme le cas du service « low-cost ». Selon SNCF, le service Ouigo a transporté 33 millions voyageurs entre 2013 et 2018 dont la moitié s'agit des trafics induits. La prise en compte du trafic induit est aussi une étape importante dans la modélisation du trafic. Cette question fera un sujet de recherche indépendant que nous ne traitons pas dans le cadre de notre analyse.

### *1.1.3.2 - La zone de compétitivité du TAGV*

L'analyse de la concurrence intermodale et le phénomène du transfert modal est un sujet important dans l'évaluation socio-économique des projets LGV. Dans le cadre de l'évaluation *ex ante*, nous

devons étudier le transfert modal afin de faire une prévision de la demande. L'analyse de la concurrence intermodale est donc une étape nécessaire pour connaître le niveau du trafic sur le tracé de LGV. Pour l'évaluation *ex post*, nous effectuons une comparaison avant-après la LGV afin d'évaluer les effets de la LGV sur l'offre et la demande de transport, nous vérifions le volume du transfert modal par rapport aux résultats de l'évaluation *ex ante* et expliquons les éventuels écarts.

Cette comparaison *ex ante / ex post* est la méthode directe pour étudier la concurrence Air-Fer. Les études portées sur ce sujet sont considérées comme des études de suivi du projet. Elles reflètent les réactions réelles de l'offre de transport et du marché pour le train et l'avion.

Ces études de suivi nous montrent la zone de compétitivité du TGV en fonction de la distance et du temps de parcours. La distance et le temps de parcours sont des mesures agrégées pour évaluer la compétitivité du TGV par rapport à l'avion. Sur la distance entre 400 et 800 km, la concurrence entre l'avion et le TGV est la plus forte (Janic, 1993 et Givoni et Dobruszkes, 2013). Wardman *et al.* (2002) considèrent qu'une distance de moins de 750 km, le nouveau service du TGV crée du report modal en faveur du train.

Le temps de parcours est un indicateur pertinent pour déterminer la zone de compétitivité du TAGV. La concurrence Air-Fer est plus forte lorsque le temps de parcours en TAGV est à 2 h 30. Le rapport publié par l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) (2010) a évoqué que le service TAGV est moins rapide mais plus compétitif par rapport à l'avion lorsque le temps de parcours en TAGV est dans l'intervalle de 2 h à 3 h 30. Dans cet intervalle de temps, le TAGV occupe la majorité des parts de marché. Albalade et al (2015) ont obtenu des résultats similaires en affirmant que la zone de compétitivité du TAGV est entre 1 h 30 et 3 h.

Nous présentons ci-dessous les études de suivi sur les principaux projets de LGV. Cette présentation va aider à bien visualiser les effets de la concurrence Air-Fer sur l'évolution du volume de trafic en train et en avion. Le transfert modal sous l'influence de la nouvelle LGV s'effectue principalement entre le train et l'avion, les effets de la concurrence se traduisent souvent par un transfert modal en faveur du train.

La LGV Sud-Est relie les deux métropoles françaises de Paris et de Lyon, elle était le premier projet de LGV en Europe. La première phase de cette ligne a été mise en service en 1981 puis la deuxième phase en 1983, le temps de parcours est de 2 h. Selon les données publiées par la

Commission Européenne (1996), les parts de marché de l'avion ont baissé de 31 % à 7 % entre 1981 et 1984 sur cette liaison. Pendant la même période, les parts de marché du train ont augmenté de 40 % à 72 %. Le report modal en faveur du TGV se fait principalement au détriment de l'avion. Wilken (2000) a constaté qu'entre 1980 et 1990, le trafic aérien entre Paris et Lyon a baissé de 44 %, cette baisse concerne principalement le trafic domestique. Ces études ont montré que le TGV est très compétitif par rapport à l'avion au seuil de 2 h.

Le projet de LGV Atlantique en France a été mis en service en 1990 sur la distance de 279 km. Patterson et Perl (1999) ont observé une baisse de 5 % du trafic aérien sur l'axe Paris-Nantes dont le temps de parcours était d'environ 3 h. Paris et Bordeaux s'est rapproché grâce à la mise en service de la LGV Atlantique, le temps de parcours entre ces deux métropoles françaises était de 3 h 15<sup>14</sup>. Sur cette liaison, Kroes (2000) a constaté un transfert du trafic de 20 % de l'avion vers le TGV. Ces travaux montrent qu'au seuil de 3 h, le TGV continue à gagner des parts de marché mais le report modal est à un plus faible niveau.

En Espagne, le service ferroviaire à grande vitesse AVE (Alta Velocidad Española) sur la liaison Madrid-Séville a été mis en service en 1992, le trajet entre ces deux villes a été réduit à 2 h 30. Selon les données publiées par la Commission Européenne (1996), les parts de marché de l'avion ont chuté de 40 % à 13% entre 1991 et 1994, pendant que les parts de marché de train ont augmenté de 16 % à 51 %. Le report modal du train vers l'avion était important. Albalade et Bel (2012) ont travaillé sur la même liaison et ont constaté que les parts de marché de train ont atteint 85 % en 2009. Sur la liaison Barcelona-Séville dont le temps de trajet est de 5 h 30, les études d'Albalade et Bel (2012) ont montré que l'AVE occupait seulement 30 % des parts de marché. Nous considérons que lorsque le temps de parcours est supérieur à 5 h, l'avion deviendrait le mode de transport dominant sur le marché.

Quelques travaux ont été réalisés sur les liaisons internationales en Europe. Lopez et Anton (2003) ont montré que le TAGV détient 95 % des parts de marché sur la liaison Paris-Bruxelles dont le temps de trajet est de 1 h 25. Le temps de parcours en Eurostar est de 3 h entre Paris et Londres, les parts de marché du TAGV sur cette liaison atteint à 60 %, l'avion a perdu 56 % des passagers.

---

<sup>14</sup> Le temps de parcours entre Paris et Bordeaux a diminué après la mise en service de la LGV.

Ces études ont montré des résultats cohérents avec les travaux présentés ci-dessus. Le TAGV est plus compétitif par rapport à l'avion dans l'intervalle de 1 h 30 et 3 h.

Sur la liaison Paris-Amsterdam dont le temps de trajet dépasse 4 h, les études de Lopez et Anton (2003) ont montré que le TAGV détient 45 % des parts de marché, le report modal n'était pas important. Sur la même liaison, Kores (2000) a constaté seulement 5 % du transfert modal de l'avion vers le TAGV. Nous considérons que lorsque le temps de trajet dépasse 4 h, les effets de la concurrence Air-Fer sont faibles.

En Corée du sud, une forte baisse du trafic aérien entre 20 % et 90 %, en fonction des liaisons étudiées, a été constatée sur le marché du transport intérieur de voyageurs après la mise en service des projets de LGV en 2004. Toutes les liaisons LGV en Corée du sud sont inférieures à 450 km, la baisse du trafic aérien est importante lorsque la distance parcourue est proche de 300 km (Park et Ha, 2006). A titre d'exemple, les parts de marché de l'avion ont baissé de 42 % en 2004 à 17 % en 2008 sur la liaison Seoul-Busan (330 km) (Givoni et Dobruszkes, 2013). Ce phénomène de report modal en faveur du TAGV en Corée du sud est similaire à ce qui s'est passé en Europe.

Selon le rapport de l'opérateur JR East en 2016, le service aérien est exclu du marché après la mise en service du TAGV Shinkansen au Japon sur les liaisons Tokyo-Sendai. Shinkansen est très compétitif sur cette liaison de 1 h 40. Le même phénomène a été observé sur Tokyo-Niigata (2 h 05) et Tokyo-Morioka (2 h 15), le service aérien n'a pas pu survivre. En ayant la capacité de circuler à 320 km/h, Shinkansen est capable de prendre des parts de marché de l'avion sur les liaisons inférieures à 750 km. Au Japon, les parts de marché du rail atteint 70 % en 2013 (Données: MLIT<sup>15</sup>).

La Chine détient actuellement le plus grand réseau de LGV du monde. On observe déjà des effets de la concurrence Air-Fer. L'avion a été exclu du marché sur la liaison Qingdao-Jinan dont le temps de parcours est inférieur à 2 h 30. Sur la liaison Guangzhou-Wuhan (3 h), l'offre aérienne a baissé de plus de 30 %. A l'aéroport de Wuhan, 70 % des liaisons domestiques inférieures à 600 km ont été supprimé (Fu *et al.*, 2012). Avec la nouvelle norme de grande vitesse ferroviaire en Chine à 350 km/h, les études ont même montré que le report modal de l'avion vers le rail est important jusqu'à la distance inférieure à 1000 km. Les villes sont très congestionnées qui fait que les trajets d'accès aux aéroports perturbent la compétitivité de l'avion. Les études affirment aussi que lorsque

---

<sup>15</sup> MLIT : <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h27/hakusho/h28/data/datindex.html>

le temps de parcours est supérieur à 4 h 30, les projets de LGV n'ont pas entraîné de forte baisse du trafic aérien (Zhang *et al.*, 2018).

Tableau 4 : les impacts de la nouvelle LGV sur les parts de marché Air-Fer

Auteurs	Liaisons	Trajets	Impacts observés
<b>Europe</b>			
<b>Commission Européenne (1996)</b>	Paris-Lyon	2h	Baisse des parts de marché d'avion de 31 % à 7 % entre 1981 – 1984. Baisse de 44 % du trafic aérien.
<b>Wilken (2000)</b>			
<b>Patterson et Perl (1999)</b>	Paris-Nantes (LGV Atlantique)	3h	Baisse de 5 % du trafic aérien.
<b>Kroes (2000)</b>	Paris-Bordeaux (LGV Atlantique)	3h	20 % du report modal en faveur du TAGV.
<b>Commission Européenne (1996)</b>	Madrid - Séville	2h30	Baisse des parts de marché d'avion de 40 % à 13 % entre 1991 et 1994.
<b>Albalate et Bel (2012)</b>			85 % des marchés occupés par TAGV.
<b>Albalate et Bel (2012)</b>	Barcelona-Séville	5h30	30 % des marchés occupés par TAGV.
<b>Lopez et Anton (2001)</b>	Paris-Bruxelles	1h30	95 % des marchés occupés par TAGV.
<b>Lopez et Anton (2001)</b>	Paris-Londres	3h	Avion a perdu 56 % des passagers. 60 % des marchés occupé par TAGV.
<b>Kroes (2019)</b>	Paris-Amsterdam (2000)	4h15	TAGV occupait 45 % des marchés en 2000.
<b>Lopez et Anton (2001)</b>			5 % du report modal de l'avion vers le train.
<b>Corée du sud</b>			
<b>Givoni et Dobruszkes (2013)</b>	Seoul-Busan	1h15	Baisse des parts de marché d'avion de 42 % à 17 % entre 2004 et 2008.
<b>Japon</b>			
<b>JR East (2016)</b>	Tokyo-Sendai Tokyo-Niigata Tokyo-Morioka	Entre 1h40 et 2h15	Avion a été exclu du marché.
<b>Chine</b>			
<b>(Fu et al., 2012)</b>	Qingdao-Jinan	2h30	Avion a été exclu du marché.
<b>(Fu et al., 2012)</b> <b>(Zhang et al., 2018)</b>	Guangzhou-Wuhan	3h	Baisse de plus de 30 % de l'offre aérienne.

Les études ont aussi montré que le report modal a lieu principalement pendant la première année de l'exploitation de la nouvelle LGV (Wilken, 2000). C'est l'exemple de la liaison Paris-Londres, l'augmentation des parts de marché du TAGV était de l'ordre de 30 % pendant la première année, les parts de marché de l'avion et du train se sont stabilisées depuis.

Par ailleurs, les études ont aussi montré l'évolution de l'offre de transport dans le contexte de la concurrence forte entre l'avion et le train. Albalate *et al.* (2015) ont étudié les effets de la concurrence Air-Fer sur la fréquence de service et le nombre de sièges du service aérien. Leurs études ont montré qu'une concurrence directe entre le TAGV et l'avion dans quatre pays européens : France, Allemagne, Italie et Espagne, a généré une baisse de l'offre de service aérien. Ils se sont aperçus que la mise en service du TAGV n'est pas un facteur déterminant pour expliquer l'évolution de la fréquence de service aérien. Les compagnies aériennes préfèrent maintenir le niveau de fréquence de service et proposent des appareils de petite taille.

Un autre résultat important montré par les travaux d'Albalate, al. (2015) est la corrélation positive entre la compétitivité du service aérien et la distance. La concurrence Air-Fer est forte sur les liaisons de moyen et court-courriers, pourtant l'avion reste le mode de transport dominant sur les liaisons long-courriers.

Ivaldi et Vibes (2008) ont étudié les stratégies des opérateurs de transport dans le contexte de la concurrence Air-Fer. Leurs travaux ont montré que les opérateurs de transport modifient le niveau de tarifs dans le nouveau contexte de concurrence intermodale. Dans l'étude de cas sur la liaison Cologne-Berlin, Ivaldi et Vibes (2008) ont trouvé une forte concurrence entre l'avion, le train et le véhicule particulier qui se traduit par une plus grande valeur de l'élasticité prix de la demande. Leurs études ont montré que le degré de substituabilité est plus élevé entre l'avion et le train.

---

*Encadré 6 : Le modèle d'Ivaldi et Vibes (2008)*

---

Le modèle d'Ivaldi et Vibes (2008) est fondé sur la théorie de concurrence oligopolistique de Cournot selon laquelle le marché va converger vers l'équilibre de Nash sous les mécanismes de concurrence. Il s'agit de la situation où chaque opérateur détermine ses tarifs dans le but de maximiser son profit en sachant que ses concurrents feront de même. Le profit des opérateurs de transport " $\pi_i$ " s'écrit :

$$\pi_i = (p_i - c_i) * q_i - K$$

*Avec*

*$p_i$  : prix unitaire du service proposé par un opérateur  $i$*

*$c_i$  : coûts marginaux de production*

*$q_i$  : quantité de produit offert par un opérateur  $i$*

*$K$  : coûts fixes*

L'augmentation du prix a des effets positifs sur les recettes marginales mais des effets négatifs sur le niveau du trafic. L'équilibre se trouve à la condition du premier ordre (CPO). Ivaldi et Vibes (2008) ont utilisé l'indice de Lerner<sup>1</sup> pour montrer le degré de concurrence d'un opérateur de transport dans le marché. L'indice de Lerner " $I_L$ " est égal à :

$$I_L = \frac{p_i - c_i}{p_i}$$

En concurrence parfaite, le prix marginal est égal au coût marginal, l'indice de Lerner est donc nul. Plus l'indice de Lerner est grand, plus l'écart entre le prix et le coût marginal sera important. Les opérateurs cherchent à maximiser leur profit, ils disposeront le pouvoir monopole sur le marché dans la situation extrême. Sous la structure de monopole, l'indice de Lerner " $I_L$ " est égal à l'inverse de l'élasticité de la demande :

$$I_L = -\frac{1}{\eta}$$

*Avec*

*$\eta$  : l'élasticité de la demande (sera présentée dans l'encadré 7)*

Les études que nous avons présentées sont des études de suivi avec une comparaison avant-après du projet de LGV. Ces études ne peuvent être réalisées qu'avec des données liées à l'évolution du trafic de voyageurs. Néanmoins, l'accès aux données est un vrai problème. Kroes (2019) a résumé deux principaux problèmes liés à l'accès aux données. L'explication majeure est que les opérateurs



de transport considèrent les données liées au trafic comme leur secret commercial et refusent de les communiquer ou ne les communiquent qu'au niveau très agrégé. Une autre explication est que les travaux existants sont très orientés vers la prévision de la demande, l'évaluation *ex post* est par conséquent devient plus difficile.

## Conclusion du chapitre 1.1

Le concept de concurrence est important mais difficile à définir. Pourtant, les études sont d'accord sur l'objectif des mécanismes de la concurrence qui maximisent les surplus collectifs et à favoriser l'efficacité économique dans la société. L'idée courante est qu'une concurrence accrue permet d'améliorer l'efficacité économique, elle a aussi des effets positifs.

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière synthétique le développement du concept de concurrence dans l'histoire de pensée économique. Cette présentation fait un rappel des fondamentaux en économie pour pouvoir comprendre les caractéristiques des différentes structures de marchés et pour bien caractériser les questions de concurrence dans le secteur du transport ferroviaire.

Les questions de concurrence sont particulièrement compliquées en ce qui concerne le marché du transport ferroviaire de voyageurs. La présence du monopole naturel est justifiée, pour la gestion de l'infrastructure, mais ce n'est pas le cas pour l'exploitation du service ferroviaire. Pourtant, les opérateurs historiques sont pour le plus souvent dans la situation de monopole sur le marché pour l'exploitation des services ferroviaires.

En effet, les services de transport ferroviaire sont de nature multiproduits. Ce chapitre montre les différentes formes de concurrence dans le transport ferroviaire. L'ouverture à la concurrence est possible pour le service d'exploitation. L'ouverture à la concurrence peut prendre la forme d'une concurrence « pour le marché » ou « dans le marché », la première consiste à attribuer le marché à un seul opérateur par l'appel d'offre et la seconde permet une concurrence entre plusieurs opérateurs sur un seul marché.

Les politiques de l'ouverture à la concurrence initiées par la Commission Européenne visent à construire un marché ferroviaire unique et libre en Europe. Dans le cadre du 4<sup>ème</sup> Paquet ferroviaire, les échéances d'ouverture à la concurrence s'approchent. Les études sur les impacts des politiques de l'ouverture à la concurrence sont nombreuses, et donnent des messages trompeurs : la concurrence serait absente sur le marché du transport ferroviaire. En effet, l'opérateur ferroviaire est notamment en concurrence avec les opérateurs des autres modes de transport alternatifs.

Notre sujet de recherche concerne les questions de la concurrence intermodale. Nous avons présenté les effets liés à la concurrence intermodale observés dans les pays disposant des projets de LGV. La compétitivité du TAGV s'améliore lorsque le temps de parcours se réduit. La concurrence entre le train et l'avion est plus importante. Dans la phase de conception du projet, nous avons besoin de prévoir le gain de compétitivité du TAGV et l'évolution des parts de marché qu'il va engendrer.

Ce premier chapitre constitue des analyses de la concurrence intermodale et montre l'intérêt de notre travail porte sur la concurrence Air-Fer.

Dans le chapitre 1.2, nous allons nous concentrer sur l'analyse de la concurrence intermodale. Les comportements de choix modaux des voyageurs sont essentiels pour comprendre l'évolution de la compétitivité des modes de transport. Nous présenterons les modèles de choix modal qui permet d'identifier les principaux facteurs explicatifs des comportements des voyageurs. Selon les principes de la théorie des choix discrets, lorsque l'offre d'un mode de transport s'améliore, la probabilité de choisir ce mode de transport s'améliore.

# Chapitre 1.2 : Cadre théorique de l'analyse de la concurrence intermodale

## Introduction du chapitre 1.2

La concurrence intermodale est un sujet important dans le contexte de la mise en service des projets de LGV. Les travaux que nous avons cités dans le chapitre précédent ont montré que la forte compétitivité du TAGV sur la moyenne distance s'accompagne d'un phénomène du report modal en faveur du train.

L'analyse de la concurrence intermodale consiste à expliquer l'évolution de la compétitivité des modes de transports et des parts de marché. Cela revient à expliquer les comportements de choix modal des voyageurs. Le transfert modal est expliqué par le changement des choix de voyageurs en faveur d'un autre mode de transport au lieu du mode de transport qu'ils prennent habituellement. Nous analysons la concurrence intermodale par expliquer le changement des décisions de choix modal des voyageurs.

Le concept de choix modal nous fournit le cadre théorique pour expliquer les décisions de choix modal des voyageurs. Les modèles de choix modal basés sur la théorie de l'utilité aléatoire et l'approche microéconomique, sont souvent utilisées dans les analyses de prévision de la demande et l'évaluation de la compétitivité des modes de transport.

L'étude du choix modal consiste à identifier les déterminants du choix modal des voyageurs. Dans ce chapitre, nous faisons une revue de littérature sur les principaux déterminants du choix modal. Elle va nous permettre de comprendre la raison pour laquelle la compétitivité du TAGV s'améliore par rapport aux autres modes de transport concurrents. Dans l'approche microéconomique, nous aurons besoin d'effectuer des enquêtes pour comprendre les comportements de choix modal des

voyageurs. La revue de littérature est une bonne méthode pour nous guider dans la construction du questionnaire d'enquêtes.

C'est aussi grâce à cette présentation que nous arriverons à élaborer notre problématique de recherche. Parmi les facteurs du choix modal, le niveau de dessertes est souvent étudié mais les effets de celui-ci sont difficiles à évaluer.

Ce chapitre 1.2 est composé de deux sections :

- Dans la section 1.2.1, nous présentons la modélisation de choix modal, ainsi que les principes de la théorie des choix discrets, cela permet de connaître la manière d'expliquer les comportements de choix modal et d'évoquer les différentes catégories de facteurs de choix modal.
- Dans la section 1.2.2, nous ferons une revue de littérature sur les principaux déterminants du choix modal. Ce sont les variables explicatives qui ont été identifiées comme déterminantes dans les travaux existants.

## Section 1.2.1 : Le concept de choix modal

Par définition, le choix modal décrit le choix du mode de transport qu'effectuent les voyageurs pour leurs déplacements. Comme tous types de décision humaine, le choix modal est un processus complexe et de nombreux facteurs interviennent pour expliquer la décision finale. Selon Ben-Akiva et Lerman (1985), le processus de décision du choix modal peut être appréhendé comme un regroupement des éléments suivant :

- L'unité d'observation : les voyageurs.
- Les alternatives de choix : les modes de transport. Les voyageurs choisissent parmi les modes substituables sur le marché du transport. Le périmètre d'étude est déterminé par le nombre d'alternatives disponibles.
- Les attributs : les caractéristiques des alternatives. Ils déterminent l'attractivité des différents modes de transport et vont être utilisés comme des variables explicatives dans les

études du choix modal. L'un des objectifs de l'étude du choix modal consiste à évaluer les effets liés aux attributs du choix modal.

- Les règles de décision : les outils statistiques utilisés pour expliquer les choix des voyageurs. L'étude du choix modal repose essentiellement sur la théorie des choix discrets. Les voyageurs comparent l'utilité des différents modes de transport et choisissent le mode de transport qui maximise l'utilité des déplacements.

Nous pouvons schématiser le processus de décision du choix modal afin de présenter la relation entre ces différents éléments.

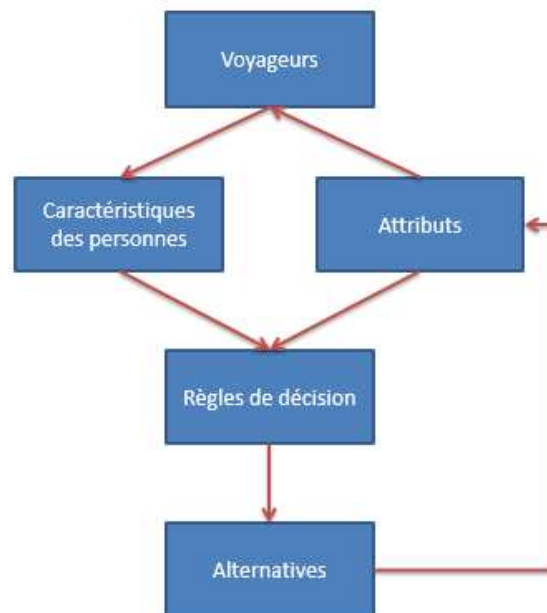


Figure 6 : le processus de décision du choix modal (Auteur, 2018)

Concrètement, ce schéma explique les relations suivantes :

- les voyageurs choisissent le mode de transport en fonction des attributs des différents modes de transport (les alternatives) ;
- les caractéristiques socio-économiques et sociodémographiques déterminent leur capacité à se déplacer et à prendre des décisions parmi les modes de transport ;

- leur choix du mode de transport s'effectue en respectant des règles de décision. Les règles de décision déterminent les méthodes que l'on utilise pour analyser le choix modal des voyageurs.
- le choix modal des voyageurs va être impacté par le changement des attributs des modes de transport. Les attributs des alternatives sont des facteurs de l'offre de transport. Lorsqu'il y a une évolution des attributs et en supposant que les caractéristiques des personnes restent inchangées, le changement de décision est fort probable.

Pour étudier les choix modaux, on travaille dans le cadre de la théorie de l'utilité aléatoire. Cette théorie suppose que les voyageurs font leur choix parmi les modes de transports, vont toujours choisir le mode de transport qui maximise l'utilité des déplacements. L'étude du choix modal basée sur la théorie de l'utilité s'inscrit dans la perspective d'une modélisation désagrégée des comportements de voyageurs (McFadden, 1973).

Les modèles de choix discrets sont les plus souvent appliqués pour étudier les comportements de choix modal. La fonction d'utilité est composée par une composante déterministe et une composante aléatoire. La composante déterministe concerne les facteurs observables et mesurables pour expliquer les choix des voyageurs. La composante aléatoire est des erreurs d'observation et des éléments non identifiables. Les premières applications des modèles de choix discrets sur les questions de choix modal datent des années 60 (Ben-Akiva et Lerman, 1985).

Les modèles de choix discrets ont été initialement conçus pour l'étude psychologique. Cela vise à expliquer le phénomène de l'inconscience et de l'incohérence de choix des individus (Tversky, 1969). Les incertitudes et les erreurs d'observation sont prises en compte dans la composante aléatoire de la fonction d'utilité du modèle de choix discrets. Ils correspondent à la composante aléatoire de la fonction d'utilité des voyageurs. Manski et Lerman (1977) identifie quatre sources d'incertitude dans le processus des choix de voyageurs:

- Les attributs non observés : les facteurs affectant le choix des individus ne sont pas entièrement connus.
- Les facteurs d'utilité non observés : il existe une hétérogénéité au sein de la population.
- L'information imparfaite et les erreurs de mesure : les caractéristiques observables ne sont pas connues avec une précision parfaite.

- L'utilisation des variables instrumentales : dans le processus de modélisation, nous sommes souvent contraints d'utiliser des variables instrumentales qui ont des relations causales avec une des variables explicatives. L'utilisation de ces variables instrumentales crée des incertitudes dans la mesure où le lien causal n'pourra pas être maîtrisé parfaitement.

Nous faisons l'hypothèse que les voyageurs disposent chacun d'une fonction d'utilité composée par une composante déterministe et une composante aléatoire. Les incertitudes sont interprétées par la composante aléatoire de la fonction d'utilité. Le choix des voyageurs est le résultat de la maximisation de l'utilité. Dans le cadre de la théorie de l'utilité aléatoire (Manski et McFadden, 1981), la fonction d'utilité peut être présentée de manière suivante :

$$U_i = V_i + \varepsilon_i$$

$$= \sum_{k \in K}^K \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i, \quad i \in \{1, \dots, J\}$$

avec

$U_i$  : l'utilité de l'alternative  $i$  parmi l'ensemble des alternatives  $J$

$V_i$  : la fonction d'utilité indirecte de l'alternative  $i$

$X_{ki}$  :  $k$  – nième variable explicative dans la fonction d'utilité

$\beta_k$  :  $k$  – nième paramètre à estimer

$\varepsilon_i$  : le terme aléatoire

Manski et McFadden (1981) définies la composante déterministe de la fonction d'utilité " $\sum_{k \in K}^K \beta_k X_{ki}$ " comme une fonction d'utilité indirecte " $V_i$ ". Les variables explicatives " $X$ " représentent les variables déterminantes de l'utilité d'un mode de transport. Les coefficients estimés " $\beta_k$ " montrent les effets des variables explicatives pour expliquer les décisions des voyageurs.

Les incertitudes dans le processus de décision sont représentées par la composante aléatoire de la fonction d'utilité " $\varepsilon$ ". Ce terme aléatoire est essentiel en fonction des hypothèses qu'on fait sur la distribution de celui-ci, les incertitudes seront prises en compte dans le processus du choix modal.

Il existe plusieurs formes de modèles de choix discrets. Le choix du modèle dépend des hypothèses de distribution des termes aléatoires. Concrètement, la méthode d'estimation des modèles de choix discrets dépend de la distribution de l'écart des termes aléatoires. Si nous supposons " $\varepsilon = \varepsilon_j - \varepsilon_i$ ", la probabilité de choix du mode de transport " $i$ " dépend de la distribution du terme " $\varepsilon$ ". Nous expliquerons plus loin dans ce chapitre de manière détaillée les hypothèses de la distribution des termes aléatoires.

L'estimation des modèles de choix discrets est effectuée grâce au processus de la maximisation d'utilité. Nous supposons que les voyageurs vont toujours choisir le mode de transport dont l'utilité est la meilleure. Avant de pouvoir les comparer, il faut d'abord que ces deux modes de transport soient réellement comparables. Deux hypothèses sont fondamentales pour les modèles de choix discrets : l'hypothèse de rationalité instrumentale parfaite et l'hypothèse de préférence complète et transitive (Ben-Akiva et Lerman, 1985).

- La rationalité instrumentale parfaite suppose que les voyageurs font leur choix de manière rationnelle. Cette hypothèse est essentielle dans la théorie de l'utilité aléatoire. Néanmoins, la rationalité instrumentale parfaite est une hypothèse forte. Les individus ne sont pas guidés par des choix parfaits, leurs choix dépendent des états d'esprit et du contexte de décision. C'est la raison pour laquelle lorsqu'un individu effectue des choix répétés entre plusieurs alternatives dans des circonstances similaires, leurs choix ne sont pas toujours les mêmes. Selon les principes des modèles de choix discrets, les aléas et les facteurs de choix non-observés sont supposés avoir été pris en compte dans le terme aléatoire de la fonction d'utilité.
- La deuxième hypothèse est l'hypothèse de préférence complète et transitive. Cette hypothèse assure la comparabilité des différentes alternatives de choix. Ce concept, déjà considéré comme achevé, a été notamment développé par Arrow et Debreu (1954). La formule mathématique du concept de préférence est présentée ci-dessous :

On suppose un vecteur des alternatives " $J$ ".



$$J = \{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}$$

avec

$J$  : l'ensemble des alternatives

Les relations suivantes montrent l'existence de la préférence complète et transitive.

- $J_1 \succcurlyeq J_2$  signifie que l'alternative 1 est préférée ou indifférente à l'alternative 2
- $J_2 \succcurlyeq J_3$  signifie que l'alternative 2 est préférée ou indifférente à l'alternative 3.
- Selon la relation de préférence complète et transitive, lorsque  $J_1 \succcurlyeq J_2$  et  $J_2 \succcurlyeq J_3$ , alors  $J_1 \succcurlyeq J_3$  : l'alternative 1 est préférée ou indifférente à l'alternative 3.

Lorsque les modèles prennent en compte uniquement la composante déterministe du choix modal, ils expliquent uniquement les relations de préférence " $(U_j > U_i)$ ", " $(U_i \sim U_j)$ " et " $(U_i > U_j)$ ". Ces relations de préférence correspondent respectivement à la probabilité de choix égale à 0,  $1/2$ , 1 pour l'alternative " $i$ ".

La composante aléatoire de la fonction d'utilité dans les modèles de choix discrets permet de recourir à une approche probabiliste. Les termes aléatoires intégrés dans la fonction d'utilité font que la probabilité de choix varie entre 0 et 1.

Afin de mieux expliquer les principes des modèles de choix discrets, nous faisons une illustration par un modèle de choix binominal (situation du choix entre deux alternatives). Ce modèle très courant dans la modélisation de la demande permettra de mieux comprendre les mécanismes des modèles de choix discrets.

Nous supposons deux modes de transport substituables " $i$ " et " $j$ " sur le marché, l'équation ci-dessous montre la probabilité de choisir le mode " $i$ " par rapport au mode " $j$ ".

$$\begin{aligned} P_i &= P ( V_i + \varepsilon_i > V_j + \varepsilon_j ) \\ &= P ( V_i - V_j > \varepsilon_j - \varepsilon_i ) \end{aligned}$$

avec

$P_i$  : la probabilité de choisir le mode  $i$

Les fonctions d'utilité indirecte " $V_i$ " et " $V_j$ " sont composées par les variables explicatives et les paramètres à estimer. La solution des modèles de choix discrets repose donc sur les effets des variables significatives et les hypothèses de distribution des termes aléatoires " $\varepsilon_i$ " et " $\varepsilon_j$ ".

L'étude du choix modal consiste à identifier les variables significatives et à estimer leurs effets sur la probabilité de choix entre les modes de transport. Dans le cadre de la fonction d'utilité de Manski et McFadden (1981), les modèles de choix discrets consistent à identifier le vecteur des variables " $X$ " et ensuite à estimer le vecteur des paramètres " $\beta$ ".

La littérature montre que les caractéristiques des modes de transport sont les plus importantes pour expliquer le choix modal. Les effets liés aux temps de trajet et les prix payés pour les déplacements sont déterminants comme les facteurs du choix modal. Lorsque le temps de trajet et les prix payés évoluent, on observe souvent un changement de comportements des voyageurs.

Néanmoins, le temps de trajet et les prix ne suffisent pas à tout expliquer : de nombreuses variables concernant la qualité de service, les caractéristiques personnelles des voyageurs et les caractéristiques socio-psychologiques des voyageurs vont aussi impacter le choix modal (Ortuzar et Willumsen, 2011). Les études du choix modal contribuent à identifier les facteurs de choix modal qui peuvent être classés en différentes catégories en faisant le lien entre le concept de choix modal et la notion de mobilité.

### *1.2.1.1 - Le lien entre la notion de mobilité et le choix modal*

La notion de mobilité est un concept plus large partagée qui concerne notamment les domaines du transport et celui de l'urbanisme. Selon la définition généralement reconnue, la mobilité désigne « l'ensemble des actions qui concourent au déplacement des personnes caractérisé par un motif à l'origine et un motif à la destination en utilisant un ou plusieurs modes de transports » (Petit, 2003, Massot et Orfeuill, 2005).

Les pratiques de mobilité confrontent les voyageurs et les diverses opportunités dans l'espace. Le réseau de transport constitue des moyens techniques pour les déplacements. La mobilité des voyageurs dépend par ailleurs de leurs caractéristiques économiques et sociales et leurs aptitudes psychologiques, cognitives et culturelles.

La mobilité des voyageurs est une notion multidimensionnelle, le choix modal en est une dimension importante. La notion de « Motilité » développée par Kaufmann (2002) résume les composantes de mobilité et met en relation la mobilité et le choix modal :

- L'accès au service de transport est la première composante de la mobilité. Il dépend de l'ensemble des conditions de l'offre de transport. Les caractéristiques de l'offre et l'organisation spatiale des opportunités à la destination sont aussi à prendre en compte.
- La deuxième composante de la mobilité est la « compétence » des voyageurs. Elle exprime les savoir-faire et les capacités des personnes. Les caractéristiques économiques et sociales des voyageurs déterminent leurs capacités et aux règles à se déplacer.
- L'appropriation est la troisième composante de la mobilité. Elle relève notamment des stratégies, de la valeur, des perceptions et des habitudes des voyageurs dans la situation du choix modal. On trouve dans le cadre de cette composante de la mobilité, essentiellement les facteurs sociologiques et psychologiques des voyageurs.

La notion de mobilité englobe les comportements de déplacement, l'offre de transport et le territoire concerné. Elle permet d'intégrer l'analyse des comportements de voyageurs dans la dimension spatio-temporelle. Les déplacements peuvent être classés selon la temporalité et l'espace. La typologie de mobilité spatiale de Kaufmann montre bien les caractéristiques des déplacements effectués (Tableau ci-dessous).

Tableau 5 : la typologie de mobilité spatiale (Kaufmann, 1999)

<div style="text-align: center;">Temps Espace</div>	Temporalité courte	Temporalité longue
Interne du bassin de vie	Mobilité quotidienne	Mobilité résidentielle
Externe du bassin de vie	Mobilité interurbaine	Migration

Quatre types de mobilité sont classés en fonction de la temporalité et de l'espace parcouru. La littérature pour chaque type de mobilité est abondante. Cette typologie de mobilité spatiale nous permet de définir notre périmètre d'étude.

- La mobilité quotidienne se produit à l'intérieur du bassin de vie. Ce sont notamment les nombreux déplacements domicile-travail que nous effectuons quotidiennement dans le milieu urbain.
- Les déplacements de temporalité longue au sein du bassin de vie sont définis comme la mobilité résidentielle. En général, la ville s'organise de sorte que les déplacements urbains ne soient pas de temporalité longue.
- Les déplacements avec une temporalité longue et à l'extérieur du bassin de vie sont caractérisés comme la mobilité interurbaine. Ce sont les déplacements entre les différentes agglomérations. Ces déplacements sont les plus courants pour les déplacements interurbains avec les modes de transport rapides.
- Lorsque les déplacements sont effectués dans la temporalité longue et à l'extérieur du bassin de vie, ils sont considérés comme de la migration.

La détermination du périmètre d'étude est une étape nécessaire pour l'étude du choix modal. Les études du choix modal pour la mobilité urbaine et pour la mobilité interurbaine sont de nature très différente. Pour ces deux périmètres d'étude différents, les variables déterminantes du choix modal identifiées ne sont pas les mêmes.

Selon cette typologie, l'analyse de la concurrence Air-Fer entre deux métropoles françaises : Paris et Bordeaux peut être classée comme l'étude de la mobilité interurbaine, car les déplacements réguliers Paris – Bordeaux sont à l'extérieur du bassin de vie et dans la plupart du temps de courte durée.

La typologie de mobilité et le concept de « Motilité » de Kaufmann (2002) nous proposent une catégorisation des variables explicatives du choix modal. Dans le cadre de l'étude du choix modal pour la mobilité interurbaine, nous distinguons quatre catégories de variables : les variables liées aux caractéristiques des voyageurs, les variables spatio-temporelles, les variables des déplacements et les variables socio-psychologiques.

La figure 7 ci-dessous présente le lien entre les composantes de la notion de « Motilité » et les différentes catégories de variables déterminantes du choix modal.

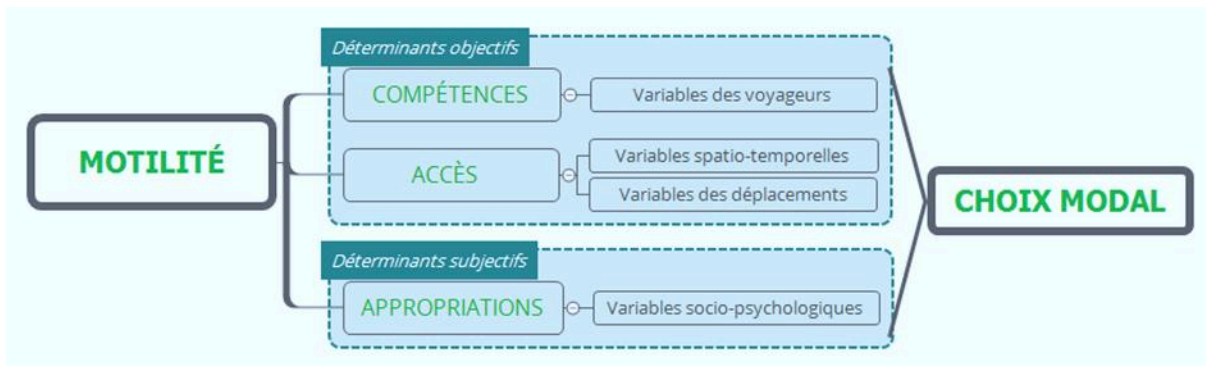


Figure 7 : les catégories des variables déterminantes de choix modal selon la notion de "Motilité". (Auteur, 2018 sources : Kaufmann, 2002)

Nous faisons alors une revue de littérature sur les variables déterminantes du choix modal. La littérature va nous permettre de voir les principales variables déterminantes identifiées pour expliquer les comportements de choix modal.

## Section 1.2.2 : Les variables déterminantes du choix modal

Les modèles de choix discrets permettent d'identifier les variables déterminantes du choix modal. Dans une approche microéconomique, l'étude du choix modal consiste essentiellement à estimer les effets des variables identifiées par les modèles de choix discrets sur les comportements de choix des voyageurs.

Dans cette section, nous présentons, de manière non exhaustive, les principales variables déterminantes du choix modal identifiées dans la littérature. La littérature nous aidera à comprendre le processus de décision du choix modal. Cela nous donnera des orientations pour notre travail notamment dans la constitution de notre base de données.

### *1.2.2.1 - Les variables des déplacements*

Elles regroupent les caractéristiques de l'offre de transport comme le temps de parcours et les prix payés. Par ailleurs, les variables comme le motif de déplacement qui évoquent des hétérogénéités des comportements appartiennent aussi à ce groupe des variables :

- Le temps de transport

Le temps de transport est un proxy conceptuel de la distance et de la vitesse. On observe une amélioration des parts de marché lorsque le temps de transport diminue (Givoni *et al.*, 2012, Dobreszkes *et al.*, 2014). Les études de la compétitivité du TAGV que nous avons présentées dans le chapitre précédent ont principalement utilisé le temps de transport pour déterminer la zone de compétitivité des différents modes de transports.

Martín et Nombela (2007) ont montré que sur la moyenne et longue distance, les effets de la diminution du temps de transport sur la demande de transport sont plus importants. Le temps de transport est composé par le temps dans le véhicule et le temps hors de véhicule. Les voyageurs sont relativement plus sensibles au temps hors de véhicule (Bhat, 1998 et

Gonzalez-Savignat, 2004). En particulier, nous verrons toute l'importance du transport des derniers kilomètres.

La « valeur du temps » de transport est différente en fonction des caractéristiques des voyageurs et le motif des déplacements. Les travaux existants montrent que les voyageurs d'affaires sont plus sensibles à l'évolution du temps de transport (Bhat, 1998, Van de Walle et Steenberghen, 2006).

- Les tarifs

Le tarif est un facteur essentiel du coût généralisé du déplacement. Il s'agit des prix payés pour accéder au service de transport. Cette variable est supposée négativement corrélée avec le choix modal. Lorsque les prix payés d'un mode de transport augmentent, les coûts généralisés du déplacement augmentent, ce qui se traduit par une baisse de la probabilité de choix de ce mode de transport.

Dans le périmètre urbain, Ivaldi et Vibes (2008) et Litman (2018) ont montré que les voyageurs sont sensibles à l'évolution des tarifs de transports collectifs. Par ailleurs, leurs études considèrent que les effets liés aux prix payés sont moins importants pour ceux qui choisissent de voyager en voiture.

Comme par exemple le temps de transport, les effets d'une évolution des tarifs diffèrent en fonction du motif de déplacement. En général, les voyageurs d'affaire sont moins sensibles à l'évolution des prix (Wardman, 2001).

- Les motifs de déplacement

Les motifs de déplacement décrivent directement les besoins de déplacements des voyageurs. Pour la mobilité urbaine à l'intérieur d'une agglomération, les voyageurs d'affaires utilisent plus fréquemment la voiture comme leur principal moyen de déplacements, les voyageurs pour motif personnel utilisent plus souvent les transports collectifs (O'Fallon *et al.*, 2004, Limtanakoo *et al.*, 2006).

Sur le même sujet, Van de Walle et Steenberghen (2006) ont montré que les déplacements pour motif personnel (loisirs, visites, etc.) s'effectuent le plus souvent en voiture lorsqu'ils s'agissent des déplacements interurbains. A travers une étude de cas espagnol, Martín et Nombela (2007) ont montré que les voyageurs pour motif professionnel sont plus sensibles

au temps de transport et vont préférer les transports collectifs pour les déplacements interurbains.

### 1.2.2.2 - *Les variables spatio-temporelles*

Elles prennent en compte la localisation des opportunités (les activités à la destination) et le programme d'activités des voyageurs. L'aspect spatio-temporel est une dimension importante du choix modal, les variables de cette catégorie ont été trouvées significatives pour expliquer les comportements des voyageurs (Arbués *et al.*, 2016).

- La taille de la ville, bassin potentiel de clientèle

La concentration de la population dans le bassin urbain, l'offre d'opportunité dans la ville sont significatives pour expliquer le choix modal. Lorsque la ville est dense, la distance moyenne des déplacements domicile-travail est courte. Ces facteurs contribuent à expliquer la raison pour laquelle l'utilisation des transports collectifs et des modes de transports doux<sup>16</sup> est plus courante (Camagni *et al.*, 2001, Cirillo et Axhausen, 2006).

Le bassin potentiel de clientèle détermine le volume du trafic. Sur des liaisons interurbaines, les études ont montré que le niveau de fréquence des services de transport collectif est élevé entre les grandes villes dont le bassin de clientèle est grand (Givoni *et al.*, 2012, Arbués *et al.*, 2016).

- L'accessibilité au service de transports collectifs

L'accessibilité au service de transports collectifs est généralement mesurée en fonction de la distance. Pour la mobilité urbaine, lorsque la distance parcourue est longue, la probabilité de choisir la voiture particulière est élevée (Van de Walle et Steenberghen, 2006). Les transports collectifs sont performants sur les trajets de courte distance. A titre d'exemple, Scheiner (2010) a montré qu'en Allemagne les personnes habitent à l'intérieur d'un rayon de 1 km autour des stations de transports collectifs utilisent moins leur voiture.

---

<sup>16</sup> Les transports doux désignent tous les modes de transport sans moteur qui ne gèrent pas de pollution : les marches à pied, le vélo, etc.



L'accessibilité aux transports collectifs est aussi une variable explicative déterminante pour la mobilité interurbaine. Garmendia *et al.* (2011) ont montré que la probabilité de choisir le TAGV est élevée lorsque les voyageurs n'habitent à proximité de la gare ferroviaire. Le temps de rabattement et le temps de diffusion (le temps pour rejoindre à la destination finale depuis la gare) contribuent aussi à expliquer le choix modal. En particulier, Limtanakool *et al.* (2006) ont trouvé que les voyageurs sont particulièrement sensibles aux temps de diffusion.

- La qualité des dessertes

Les transports collectifs fonctionnent avec un plan de transport et des horaires programmés. La qualité des dessertes dépend des horaires, est un facteur déterminant du choix modal. Pour les déplacements en ville, les transports collectifs ont une fréquence de service élevée avec un service cadencé. On observe en général une probabilité élevée de choisir les transports collectifs en ville aux heures de pointe. Les passagers considèrent que les transports collectifs ont une bonne qualité des dessertes. Par ailleurs, le problème de congestion pénalise l'utilisation de voiture (Nurul Habib *et al.*, 2009).

Dans le périmètre interurbain, la qualité des dessertes est aussi un facteur important pour expliquer le choix modal, mais les effets de cette variable sont plus difficiles à évaluer (Cascetta et Papola, 2012). Les travaux de Romàn *et al.* (2014) ont montré que la fréquence de service a des effets positifs sur le choix modal, mais les effets observés sont faibles. Les études ont montré le problème de la pertinence des indicateurs utilisés pour évaluer la qualité des dessertes.

- Parking

Le parking est un facteur clé pour expliquer le choix modal pour la mobilité urbaine en voiture. Lorsqu'il y a un parking à disposition à la destination, les voyageurs ont une forte probabilité de voyager en voiture (O'Fallon *et al.*, 2004, Ye *et al.*, 2007). Outre que la disponibilité, les tarifs de stationnement jouent aussi un rôle important. Brown *et al.* (2003) ont montré que la diminution des tarifs de stationnement incite les voyageurs à utiliser leurs voitures.

### 1.2.2.3 - Les caractères personnels des voyageurs

Cette catégorie de variables décrit les caractéristiques socio-économiques des voyageurs. Nous distinguons les variables comme l'âge et le genre ainsi que les variables liées au revenu, à la possession d'un permis de conduire et au niveau de motorisation.

#### - Âge

Nous constatons que l'utilisation de la voiture s'accroît avec l'âge pour les déplacements urbains. Une tendance inverse a été observée chez les personnes âgées (Cirillo et Axhausen, 2006, Kim et Ulfarsson, 2008, Arbués, *et al.*, 2016). Les travaux existants ont aussi montré que l'âge est corrélé positivement avec le niveau de motorisation. Le niveau de motorisation des personnes qui ont entre 30 et 50 ans est le plus élevé.

Dans le périmètre interurbain, Limtanakool *et al.* (2006) ont trouvé que les voyageurs anglais qui ont entre 30 et 50 ans ont plus de chance de voyager en voiture, mais la significativité de cette variable est faible. A travers une étude de cas allemande, Kuhnimhof *et al.* (2012) ont montré que la probabilité de choisir la voiture pour les déplacements interurbains est faible lorsque les voyageurs ont entre 18 et 30 ans. De manière générale parmi les études dans le périmètre interurbain, la plupart d'entre eux n'ont pas trouvé d'effets significatifs liés à l'âge sur le choix modal.

#### - Revenu

Dans les travaux de Goodwin *et al.* (2004) et d'Hensher et Rose (2007), le revenu a été trouvé comme une variable positivement corrélée avec l'utilisation de la voiture. Les voyageurs qui ont un niveau de revenu élevé préfèrent utiliser leur voiture, leur choix est peu influencé par les coûts de déplacements en voiture. La littérature montre que la distribution de la valeur du temps dépend de la distribution du revenu (Mallett, 2001). Les voyageurs qui ont un faible niveau de revenu utilisent davantage les transports collectifs. Bresson *et al.* (2003) a aussi montré que le niveau du revenu est négativement corrélé avec le niveau du trafic en autocar.

Schafer et Victor (2000) ont choisi d'expliquer le choix modal avec le budget-temps de transport qu'il s'agit d'un concept initialement développé par Zahavi (1973). Selon la « loi de Zahavi », le budget temps de transport quotidien est constant. La croissance des revenus

permet d'accéder aux vitesses plus rapides et d'augmenter la distance parcourue. Les voyageurs avec un niveau de revenu élevé vont donc choisir les modes de transport les plus rapides et généralement plus coûteux. Roth et Zahavi (1981) ont montré que le budget-temps de transport est plus élevé pour les ménages qui ont de faibles revenus.

Les analyses du choix modal sont d'accord sur le fait que le revenu est un facteur important pour expliquer les comportements de choix modal. Pourtant, très peu de travaux ont réellement tenu compte de cette variable. En pratique, les méthodes des enquêtes sont fréquemment utilisées. Hors, le niveau du revenu est une information personnelle, difficile à obtenir. Une autre difficulté est que les effets liés aux revenus sont souvent corrélés avec les autres variables concernant les caractéristiques sociodémographiques des voyageurs (Garcia-Ferrer *et al.*, 2006)

- La composition des ménages

La composition des ménages est un facteur important pour expliquer le choix modal. A titre d'exemple, la taille des ménages est une variable souvent étudiée dans le milieu urbain, les résultats montrent une corrélation positive entre la taille du ménage et l'utilisation des voitures. Ainsi, la présence des enfants a des effets positifs sur l'utilisation des voitures (Cirillo et Axhausen, 2006).

Pour la mobilité interurbaine, la composition des ménages impacte aussi le choix du mode de transport. Les travaux de Limtanakool *et al.* (2006) ont montré des effets positifs de la taille de ménages sur l'utilisation des voitures sur des liaisons de moyenne et longue distance.

- La motorisation des voyageurs

La motorisation des voyageurs (la disposition de voiture et de permis de conduire) est considérée comme une variable significative pour expliquer le choix modal dans les études en milieu urbain et interurbain. Lorsque le niveau de motorisation est élevé, la probabilité de se déplacer en voiture sera élevée (Cirillo et Axhausen, 2002 et Goodwin *et al.*, 2004). La disposition de voiture est aussi corrélée avec le choix du lieu de résidence. Les ménages qui ne disposent pas de voiture cherchent à habiter plus proche du centre-ville (Scheiner, 2010).

#### 1.2.2.4 - Les variables socio-psychologiques

Elles prennent en compte les effets liés à la perception, aux habitudes et à la mode de vie des voyageurs. Ces variables sont considérées comme des déterminants subjectifs du choix modal. Les effets de ces variables sont plus difficiles à évaluer (Van Acker *et al.*, 2010, Scheiner et Holz-Rau, 2007).

- La perception

Les voyageurs peuvent préférer un mode de transport qu'un autre pour des raisons purement subjectives. Selon Kaufmann (2002), la perception du temps de déplacements et des coûts de transport sont souvent différentes selon le mode de transport. Le temps ressenti pour les transports collectifs est plus long par rapport au temps de déplacements réel. Ce biais de perception est favorable à l'utilisation de la voiture. La perception des voyageurs sur la qualité des alternatives peut parfois devenir déterminante. A titre d'exemple, le voyageur choisit toujours le train parce qu'il a peur de l'avion. Van Exel et Rietveld (2010) ont trouvé que la perception des automobilistes sur le temps de parcours conduit à éliminer le transport collectif parmi leurs alternatives de transport.

- Le mode de vie

Le mode de vie est corrélé avec le statut et le niveau du revenu des voyageurs. Scheiner et Holz-Rau (2007) ont montré que l'habitude des voyageurs peut avoir des impacts sur les décisions du choix modal. Cette variable constitue un frein pour le transfert modal vers les modes de transport collectif. Brisbois (2010) a montré que le manque d'espaces personnels en transports collectifs est perçu très négativement pour le choix de ce mode de transport.

- L'identité

Le choix du mode de transport peut devenir un symbole d'identité. On attribue une valeur symbolique au choix modal, par exemple : étant voyagé en voiture, on montre la capacité individuelle et la richesse dont on dispose. Lorsqu'on voyage en transports collectifs, on veut montrer qu'on est écologique. Steg *et al.* (2001) ont trouvé que les personnes peuvent se déplacer en voiture uniquement pour montrer leur identité et leur position sociale. Le

choix du mode de transport peut être considéré comme un moyen pour se distinguer avec les autres (Petit, 2003). Dans le processus de choix modal, la voiture et les transports collectifs peuvent représenter des identités sociales différentes.

Parmi ces variables explicatives identifiées dans la littérature sur le choix modal, le temps de transport et les prix payés sont les plus importantes. Ce sont les principales informations que nous consultons avant de prendre la décision de se déplacer avec un ou plusieurs modes de transport. Le choix du mode de transport change lorsque l'évolution de l'offre de transport en termes de temps de transport et de prix payé (Wardman, 2001). Les coûts généralisés composés par le temps de transport et les prix payés, deviennent une notion fondamentale en économie des transports permettant d'expliquer les comportements de choix modal (Quinet, 1998). Nous présentons ci-dessous les principes de la notion de coûts généralisés.

### *1.2.2.5 - La notion des coûts généralisés et la valeur du temps*

On a évoqué cette notion plus haut dans ce chapitre, il est temps de préciser les composantes de cette notion et notamment celle qui concerne la valeur du temps. Dans l'économie des transports, l'utilité du temps est une notion essentielle. Les voyageurs effectuent des déplacements pour réaliser des activités principales à destination. Le temps passé dans le transport est considéré comme un coût et une source de désutilité<sup>17</sup>. Le processus de décision dans le choix modal consiste à minimiser le temps de transport et à conserver le temps pour les activités principales.

Les coûts généralisés de transport sont composés par les coûts directs et les coûts liés aux temps de transport. Le temps de transport est converti sous forme monétaire par le paramètre de valeur du temps. La fonction de coûts généralisés " $C_g$ " peut être présentée mathématiquement par l'équation suivante :

$$C_g = p_i + h * t_i$$

---

<sup>17</sup> Nous faisons hypothèses que l'utilité des déplacements est évaluée uniquement par rapport aux activités principales. Le temps de trajet est considéré comme des coûts, on ne tient pas compte qu'il est possible d'effectuer des autres activités durant le trajet, notamment le fait de pouvoir travailler en transports collectifs.

*avec*

*i* : le mode de transport *i*

*p<sub>i</sub>* : les prix payés

*t<sub>i</sub>* : le temps de transport consacré

*h* : la valeur du temps

La valeur du temps joue un rôle majeur dans cette fonction de coûts généralisés. Ce paramètre permet de quantifier les coûts liés au temps passé dans le transport. Dans son article « *la théorie de l'allocation du temps* », Lesourne (1964) et Becker (1965) étaient les premiers à introduire la rareté du temps dans le calcul économique. Lorsqu'un voyageur choisit un mode de transport plus rapide mais coûteux, il souhaite échanger les ressources matérielles (l'argent) contre les ressources temporelles (le temps), c'est-à-dire qu'il paie plus cher afin d'avoir plus de temps disponible pour les activités principales à destination.

De Serpa (1973) a enrichi le modèle de Becker en introduisant les contraintes de temps nécessaire pour les activités principales. La valeur du temps peut varier en fonction des contraintes temporelles de chaque activité. Small (1982) a aussi contribué au développement de la notion de valeur du temps. Small considère que la valeur du temps varie entre les différentes périodes de la journée. De manière générale, nous considérons que la valeur du temps détermine la combinaison optimale des activités qu'une personne peut exercer et le temps optimal consacré à chaque activité (Gronau, 2017). La décision optimale des déplacements s'explique donc par la manière par laquelle les voyageurs organisent leurs déplacements et leurs activités principales.

Si nous supposons une fonction d'utilité "*U*" composée par l'ensemble des déplacements, les voyageurs cherchent à maximiser l'utilité des déplacements sous contrainte de leur budget et de temps.

$$\text{Max } U_{(x_1 \dots x_i \dots x_n)}$$

*Sous contraintes*

$$\sum_i^n p_i * X_i \leq R \quad \text{et} \quad \sum_i^n t_i * X_i \leq T$$

avec

$X_{1...i...n}$  : les modes de transport pour les déplacements

$p_i$  : les prix payés

$t_i$  : le temps de transport consacré

$R$  : la contrainte du budget (revenu)

$T$  : la contrainte du temps

Pour les voyageurs, l'utilité maximale des déplacements est la solution optimale de l'allocation des activités. On obtient la solution de maximisation de l'utilité à l'aide de la dérivation du Lagrangien. La solution optimale peut être calculée selon la condition de premier ordre (CPO).

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial X_i} &= \frac{\partial V}{\partial R} * p_i + \frac{\partial V}{\partial T} * t_i \\ &= \frac{\partial V}{\partial R} * \left( p_i + \frac{\frac{\partial V}{\partial T}}{\frac{\partial V}{\partial R}} * t_i \right) \end{aligned}$$

avec

$V$  : le composant déterministe de la fonction d'utilité

$\frac{\partial V}{\partial R}$  : l'utilité marginale du revenu

$p_i + \frac{\frac{\partial V}{\partial T}}{\frac{\partial V}{\partial R}} * t_i$  : la fonction de coûts généralisés

La fonction d'utilité optimale est composée par deux composantes : l'utilité marginale du revenu et la fonction de coûts généralisés (Blayac et Causse, 2001). La valeur du temps correspond au rapport entre l'utilité marginale du temps et l'utilité marginale du revenu. Beesley (1965) était l'un

des premiers à montrer la relation entre la valeur du temps et le revenu. La diminution du temps de transport permet aux voyageurs d'aller plus loin et d'accéder à des nouvelles opportunités. Lorsque le temps de parcours augmente, la valeur du temps va diminuer, certains voyageurs préfèrent le mode de transport lent et moins coûteux. Les voyageurs échangent de temps contre l'argent en choisissant un mode est plus rapide mais relativement cher.

Cette formule de la valeur du temps est généralement acceptée. Elle explique la relation entre le budget et le temps pour les déplacements. Nous distinguons la valeur du temps révélée et la valeur du temps déclarée selon la nature des données qu'ont été utilisées. Les enquêtes lourdes et coûteuses sont nécessaires pour pouvoir calculer ces deux types de valeur du temps. La valeur du temps est un indice important qu'on regarde systématiquement dans le cadre des études de choix modal. La valeur du temps peut être calculée à travers les coefficients du modèle de choix discrets liés au temps et aux prix payés.

La valeur du temps est aussi un paramètre essentiel dans l'évaluation des politiques de transport. Dans les analyses coûts-avantages des projets d'infrastructure, l'évolution de la valeur du temps va fortement influencer les résultats d'évaluation, ce qui va être déterminante pour le choix public d'investissement des projets. Il existe par conséquent la valeur du temps tutélaire qui s'agit d'une valeur standardisée pour les calculs socio-économiques des projets<sup>18</sup>. Elle est une valeur agrégée et simple à appliquer, l'inconvénient majeur est qu'elle ne prenne pas en compte la spécificité des contextes d'étude. La valeur du temps tutélaire en France est présentée par le rapport Boiteux 2 (2001) puis le rapport Quinet (2013) qui offre des classements de la valeur du temps en fonction de la distance parcourue, du mode de transport et du motif de déplacement.

Dans l'étude de cas sur la liaison Paris-Bordeaux, le temps de parcours et les prix payés évoluent fortement suite à la mise en service de la LGV SEA. Nous verrons dans la partie d'application de cette thèse que l'évolution des parts de marché du train et de l'avion est essentiellement expliquée par le changement de ces deux facteurs de l'offre de transport.

---

<sup>18</sup> A titre d'exemple, les valeurs tutélaires à la valeur du temps pour les projets d'infrastructure français ont été proposées dans le rapport Boiteux 2 (2001).



## Conclusion du chapitre 1.2

L'analyse de la concurrence intermodale consiste à expliquer l'évolution des parts de marché des différents modes de transport. Cette analyse est basée principalement sur les comportements de choix modal des voyageurs.

La décision du choix modal est un processus complexe. De nombreux facteurs interviennent et déterminent les décisions finales. Ces facteurs sont parfois observables et mesurables. A titre d'exemple, les voyageurs vont réagir et vont probablement changer leurs comportements de choix modal lorsqu'il y a une évolution de l'offre de transport. Ce changement de comportements de choix modal se traduit par un phénomène de transferts modaux. En outre, des incertitudes et aléas existent aussi qui font que l'étude du choix modal soit biaisée si uniquement les composantes déterministes ont été prises en compte.

Les modèles de choix discrets permettent de prendre en compte les incertitudes dans l'étude du choix modal. Dans la fonction d'utilité des voyageurs, nous introduisons un terme aléatoire dont la distribution peut être définie par des hypothèses. Grâce à ces modèles, nous expliquons la compétitivité d'un mode de transport par l'évolution de la probabilité de choix des voyageurs d'un mode de transport par rapport aux autres modes de transport alternatifs. Ces modèles de choix discrets sont désormais bien développés, qui nous fournissent des outils pour expliquer les comportements de choix modal.

Il est important de présenter le choix modal dans le périmètre d'étude plus large. Cette présentation nous permet d'identifier les différentes catégories de variables déterminantes du choix modal : les variables de déplacements, spatio-temporelles, celles des voyageurs et les socio-psychologiques.

La littérature montre que le temps de transport et les prix payés sont les variables les plus importantes pour expliquer le choix modal. En mettant en relation ces deux variables, les coûts généralisés de transport devient un concept de base en économie des transports. Le temps de transport est converti en coûts monétaires à l'aide de la valeur du temps. Nous pouvons comparer la compétitivité des différents modes de transport ou évaluer la compétitivité des modes de transport à l'aide des coûts généralisés.

Nous avons évoqué dans ce chapitre l'importance des variables liées à la qualité des dessertes dans le processus de décision du choix modal. La littérature montre que la qualité des dessertes regroupe des variables déterminantes comme la fréquence de service et l'intervalle de service. Ces variables en tant que facteurs importants de la qualité de service, sont impactées lorsqu'il y a une évolution des facteurs de l'offre de transport.

Dans le chapitre 1.3, nous évoquerons les problèmes rencontrés dans l'évaluation de la qualité des dessertes. En effet, les variables liées à la qualité des dessertes ont souvent été étudiées, mais soulèvent des problèmes théoriques et méthodologiques. Avec les indicateurs standard comme la fréquence de service ou l'intervalle de service, il est difficile d'estimer correctement les effets liés à la qualité des dessertes. Nous présenterons le problème des indicateurs standard et les indicateurs et modèles basés sur l'accessibilité spatio-temporelle qui sont plus pertinents pour évaluer les effets de la qualité des dessertes.

# Chapitre 1.3 : La qualité des dessertes comme attribut de l'accessibilité

## Introduction du chapitre 1.3

La qualité des dessertes est déterminante pour expliquer les comportements de choix modal. Lorsque la qualité des dessertes est meilleure, l'offre de transport correspondra mieux aux besoins des voyageurs, la probabilité de choisir ce mode de transport augmente.

La qualité des dessertes joue un rôle majeur dans l'analyse de la compétitivité des modes de transport. Les transports collectifs circulent selon le plan de transport. Lorsqu'un mode de transport propose des horaires adaptés aux besoins des voyageurs, la probabilité de choix augmente. Par rapport à la voiture particulière, les services des transports collectifs ne sont pas continués dans la journée. Les départs et arrivés sont sous contrainte des horaires. Cela conduit à une perte de compétitivité du transport collectif par rapport à la voiture particulière.

Dans le contexte de la mise en service d'une nouvelle LGV, la qualité des dessertes est un sujet préoccupant pour tous les acteurs concernés. Les questions liées à la qualité des dessertes regroupent de nombreuses informations :

- Le nombre de trains qui circule entre les métropoles relativement éloignés.
- Le nombre d'arrêts intermédiaires pour les villes de taille plus modeste.
- Les amplitudes d'horaires programmés.
- La cohérence de l'intervalle de service par rapport aux besoins des voyageurs.
- La répartition des horaires dans la journée.

D'un côté, les usagers, les collectivités locales et les gestionnaires d'infrastructure demandent toujours plus de train afin d'améliorer l'accessibilité des territoires, de maximiser l'utilisation de la ligne et d'absorber des trafics au détriment des modes de transport plus polluants ou souvent saturés. De l'autre côté, les opérateurs de transport proposent souvent de réduire le nombre de train dans le but d'optimiser le taux de remplissage des trains et la rentabilité de leurs activités.

Les débats autour des questions de dessertes ont eu lieu pendant la phase de pré-inauguration de la LGV SEA Tours-Bordeaux (France) entre SNCF Mobilités et LISEA. Le nombre total des trains directs entre Paris et Bordeaux proposé par SNCF Mobilités était initialement de 13,5 allers-retours par jour dans les deux sens de circulation<sup>19</sup>. Toutefois après de longs débats entre les différents acteurs ferroviaires, il s'élève désormais à 18,5 par jour.

Le nombre d'arrêts dans les villes intermédiaires est toujours jugé insuffisant et s'avère être un problème persistant pour les collectivités locales. Leurs réactions sont compréhensibles en sachant que les collectivités locales ont participé au financement du projet LGV SEA à la hauteur de 1,3 milliard d'euros. En décembre 2017, le changement d'horaires sur la LGV SEA par SNCF Mobilités<sup>20</sup> a suscité des mécontentements et des manifestations contre le nombre d'arrêts dans les villes intermédiaires (comme Angoulême par exemple).

Jusqu'à présent, ce sont notamment les deux premiers facteurs, le nombre de service et le nombre d'arrêts intermédiaires qui ont alimenté les débats sur les questions des dessertes entre les différents acteurs de transport. Dans le cadre du modèle de choix modal, ces deux facteurs sont représentés par l'indicateur de fréquence de service.

La fréquence de service est l'indicateur standard du modèle de choix modal pour analyser de la concurrence intermodale. La mise en service d'une nouvelle LGV génère une amélioration de la compétitivité du TAGV en termes de temps de parcours. Les réactions des compagnies aériennes pour faire face à la compétition du TAGV montrent l'importance de la fréquence de service. Nous avons déjà évoqué que, dans la plupart des cas, les compagnies aériennes préfèrent maintenir le niveau de la fréquence de service et en même temps proposer des appareils de plus petites tailles

---

<sup>19</sup> 13 trains dans le sens de circulation Paris à Bordeaux et 14 trains dans le sens de circulation Bordeaux à Paris.

<sup>20</sup> SNCF Mobilités est une entreprise d'EPIC (Etablissement Public Industriel et Commercial) du groupe SNCF. Elle est opérateur ferroviaire historique en France et exploitant du service de transport ferroviaire de voyageurs et de marchandises.

afin de faire face à la concurrence du TAGV et sauvegarder leurs parts de marché. Les travaux d'Albalade *et al.* (2015) ont montré que la concurrence Air-Fer est significative pour expliquer l'évolution du nombre de sièges en avion, mais n'est pas significative pour expliquer l'évolution de la fréquence de service.

La pertinence des indicateurs devient un défi important dans les études de la modélisation de la demande de transport. Il est intéressant de regarder comment la qualité des dessertes a été évaluée. Les indicateurs standard comme la fréquence de service permettent-ils d'évaluer correctement les effets de la qualité des dessertes ? Quels sont les problèmes identifiés dans les travaux existants ?

Il s'agit maintenant de savoir de quelle manière nous pouvons mieux évaluer les effets liés à la qualité des dessertes. Avec des indicateurs plus pertinents qui ne sont pas basés sur la fréquence de service, mais sur les horaires de service. Les méthodes sont présentées dans les deux dernières sections de ce chapitre. Cela permet de comprendre comment les comportements de choix modal des voyageurs vont être impactés lorsqu'il y a une évolution de la qualité des dessertes.

Ce chapitre est organisé en trois sections :

- Dans la section 1.3.1, nous évoquerons les problèmes de pertinence des indicateurs standard pour étudier les effets de la qualité des dessertes.
- Dans la section 1.3.2, nous présenterons l'indicateur de temps utile à destination. Nous calculons le temps que les voyageurs peuvent rester à la destination pour les activités principales. C'est une approche basée sur le programme d'activité et capable de faire le lien entre le choix modal et la théorie de l'accessibilité.
- Dans la section 1.3.3, nous présentons la modélisation basée sur les horaires. Cette méthode consiste à prendre en compte les horaires dans la modélisation de la demande, ce qui n'était pas le cas. Par rapport à l'indicateur de temps utile à destination, la modélisation basée sur les horaires a l'avantage de tenir compte des caractéristiques des opportunités à la destination.

## Section 1.3.1 : Les limites des indicateurs standard pour étudier la qualité des dessertes

Les indicateurs standard comme la fréquence de service (le nombre d'allers-retours) et l'intervalle des services (le temps d'attente entre deux services) sont utilisés dans les travaux de modélisation du choix modal. Ces indicateurs permettent de connaître l'évolution du niveau de dessertes de transport. Et surtout parce que les données pour construire ces indicateurs sont accessibles. Afin de distinguer les modèles de choix modal avec ces indicateurs standard et les modèles qui ont pris en compte les horaires, Wilson et Nuzzolo (2008) ont proposé une typologie d'étude de la qualité des dessertes :

- Les modèles avec les indicateurs standard sont catégorisés comme les modèles standard basés sur la fréquence de service. Le nom initialement proposé à ces modèles est « Frequency-Based Model ».
- Les modèles qui ont pris en compte les horaires de service dans la modélisation de la demande sont considérés comme la modélisation des horaires dont le nom initialement proposé est « Schedule-Based Modeling ».

Selon Wilson et Nuzzolo (2008), les indicateurs standard sont des indicateurs agrégés qui conduisent à faire une hypothèse de « l'individu moyen ». Ils supposent que le niveau de dessertes est identique pour tous les voyageurs. Cette hypothèse est à l'origine de la faiblesse des modèles standard car l'utilité des déplacements peut varier entre les voyageurs selon l'heure de départ et d'arrivée et selon les motifs de déplacements.

Les indicateurs standard sont des indicateurs agrégés qui mesurent seulement la quantité de l'offre de transport. Ces indicateurs orientent les modèles vers une approche basée sur l'offre de transport « Supply-Oriented Approach » (Pinjari *et al.*, 2011). Afin de comprendre la faiblesse des indicateurs standard, il faut distinguer la quantité de service et la qualité de service. Les indicateurs standard qui mesurent la quantité de service sont dans une seule perspective de l'offre de transport. Pour pouvoir mesurer la qualité de service, les indicateurs doivent s'inscrire dans une perspective de l'interaction entre l'offre et la demande de transport.

Selon Bhat et Koppelman (1999), l'indicateur pertinent doit pouvoir prendre en compte les besoins de déplacements des voyageurs, car les activités de transport sont des activités dérivées, les voyageurs font des déplacements dans le but de réaliser des activités principales à destination. L'approche basée sur le programme d'activités « Activity-Based Approach » est plus pertinente permettant d'orienter les études vers une perspective d'interaction entre l'offre et la demande de transport.

Le problème de pertinence des indicateurs est à l'origine lié aux faiblesses de l'approche « Supply-Oriented Approach ». Il existe plusieurs points de distinction entre l'approche basée sur l'offre et l'approche basée sur le programme d'activités.

- D'abord, le niveau d'agrégation de ces deux approches est différent. L'approche classique est fondée sur un niveau agrégé. L'approche basée sur le programme d'activités consiste à travailler sur un niveau désagrégé en se focalisant sur les comportements des voyageurs. L'approche classique se concentre sur le trajet et sans connaître la motivation et des raisons de déplacements, alors que l'approche basée sur le programme d'activités se focalise sur les besoins de déplacements des voyageurs (Davidson *et al.*, 2007). L'approche basée sur le programme d'activités permet d'une meilleure connaissance des comportements de déplacements des voyageurs par rapport à l'approche classique.
- L'autre distinction repose sur la manière dont les déplacements sont interprétés. Selon l'approche classique, les déplacements sont indépendants les uns des autres. Le lien entre les déplacements n'est pas pris en compte. Alors que selon l'approche basée sur le programme d'activités, les déplacements peuvent être regroupés en trajectoire, une trajectoire représente les déplacements allers-retours ainsi que les déplacements dont les caractéristiques sont similaires.
- La dernière distinction entre ces deux approches est liée à la manière d'envisager la dimension temporelle. Dans l'approche classique, le temps est considéré simplement comme un coût de transport. En revanche, l'approche basée sur le programme d'activités se focalise sur l'attribution des temps dans la journée. La dimension temporelle constitue une contrainte dans la fonction d'utilité des voyageurs. Un changement d'horaires va avoir des impacts différents pour chaque voyageur.

Dans les modèles de prévision de la demande de transport, les études étaient principalement destinées à estimer le niveau de demande à long terme. L'organisation de l'offre de transport est donc basée sur des indicateurs agrégés de demande à long terme (comme dans le cas de la variable « fréquence »). Lorsqu'on travaille au niveau désagrégé pour comprendre les choix des voyageurs, l'utilisation de ces indicateurs agrégés devient problématique. L'approche basée sur le programme d'activités dispose d'avantages lorsqu'on souhaite évaluer de manière plus précise les effets d'un changement de l'offre sur la demande de transport.

Il y a un problème de pertinence des indicateurs lorsqu'on utilise les indicateurs standard. La modélisation de la demande de transport nécessite de travailler au niveau désagrégé en fonction du choix de chaque voyageur, alors que les indicateurs standard sont des indicateurs agrégés de l'offre de transport. Pour cette raison, nous observons des résultats incohérents dans la littérature sur l'étude du choix modal. Les indicateurs standard utilisés ne nous permettent pas d'estimer correctement les effets de la qualité des dessertes sur les comportements de choix modal des voyageurs.

Dans la littérature, les travaux sur la concurrence intermodale ont évoqué le problème des indicateurs liés à la qualité des dessertes. Dans l'étude de cas sur la LGV Madrid-Zaragoza-Barcelona, Román *et al.* (2010) ont utilisé la fréquence de service pour évaluer les effets de la qualité des dessertes. Ils ont utilisé un indicateur basé sur le nombre de trains toutes les 15 minutes ou toutes les 30 minutes avant et après 9 h. Cette variable a été trouvée non significative pour expliquer le choix modal, contrairement à ce qu'ils ont supposé.

Gonzalez-Savignat (2004) a étudié la concurrence Train-Avion sur la même liaison, les résultats montrent des effets très marginaux de la fréquence de service sur la décision du choix modal. La variable « fréquence » est introduite par le nombre de trains par heure. Lorsqu'on modifie la valeur de cette variable à travers les scénarios, les impacts sur la probabilité de choix modal ne varient quasiment pas. C'est-à-dire que les effets liés à la fréquence de service sont très marginaux pour expliquer la probabilité de choix modal, qui est un résultat inattendu.

Lorsqu'on utilise les coefficients liés aux indicateurs standard pour calculer des indices de demande de transport, la pertinence des indicateurs est essentielle. Pagliara *et al.* (2012) ont étudié les choix modaux sur la liaison Barcelona-Madrid. A l'aide des coefficients de leur modèle de choix modal, ils ont calculé le consentement à payer des voyageurs pour la fréquence de service. Un très faible



consentement à payer a été trouvé pour une unité d'amélioration de la fréquence de service. Ils considèrent que les effets de la fréquence de service sont susceptibles d'être sous-évalués. Dans la vie réelle, ils ont observé une forte fréquence de service aérien sur la liaison Barcelona-Madrid, proche d'un service de cadencement avec 20 min d'intervalle. Les compagnies aériennes attribuent un rôle important à la fréquence de service. Elles préfèrent maintenir le service cadencé, et réduire le nombre de sièges pour faire face à la concurrence du TAGV.

L'utilisation des indicateurs standard pose problème aussi lorsqu'on calcule l'élasticité de la demande. Dans une étude de cas anglais, Wardman (1997) considère que les modèles standard ont tendance à surestimer les coefficients liés à l'intervalle de service (le temps d'attente pour le prochain train), l'élasticité - fréquence de demande est surestimée. C'est-à-dire que les effets liés à la variation de l'intervalle de service sur la demande sont surestimés. La recommandation que Wardman (1997) a fait consiste à diviser par deux la valeur de l'élasticité-fréquence de demande afin de retrouver une valeur cohérente par rapport à ce qu'on observe réellement.

Pour étudier la concurrence entre l'avion et le train sur la liaison Londres-Paris, Behrens et Pels (2009) ont aussi mis en question des valeurs très élevées de l'élasticité - fréquence de demande dans leur modèle. Ils considèrent que les indicateurs standard de la fréquence de services ne sont pas pertinents car les contraintes de capacité des différents modes de transport n'ont pas été prises en compte.

---

*Encadré 7 : La notion d'élasticité de la demande*

---

La notion d'élasticité de la demande a paru en 1890 dans les travaux de Marshall. Nous distinguons en général l'élasticité simple et l'élasticité croisée. Si nous prenons l'exemple de l'élasticité prix de la demande, l'élasticité simple correspond aux effets de la variation d'un pourcent du prix d'un bien sur la demande de ce bien, l'élasticité croisée quant à elle correspond aux effets de la variation d'un pourcent du prix d'un bien sur la demande d'un autre bien.

Si nous supposons un mode de transport "i", l'élasticité prix de la demande " $\eta_i$ " de ce mode de transport s'écrit de la manière suivante :

$$\eta_i = \frac{\Delta s_i / s_i}{\Delta p_i / p_i} = \frac{\partial s_i}{\partial p_i} \frac{p_i}{s_i}$$

*Avec*

$p_i$  : prix du mode de transport i

$s_i$  : les parts de marché d'un mode de transport i

Nous supposons que le mode de transport "i" et le mode de transport "j" sont substituables, l'élasticité croisée " $\eta_{ij}$ " d'une variation de parts de marché du "i" par rapport à la variation de prix du "j" peut être présentée avec l'équation suivante :

$$\eta_{ij} = \frac{\Delta s_i / s_i}{\Delta p_j / p_j} = \frac{\partial s_i}{\partial p_j} \frac{p_j}{s_i}$$

*Avec*

$p_j$ : prix du mode de transport j

L'élasticité croisée de la demande est très utile pour déterminer si les deux modes de transport sont réellement en concurrence sur le même marché.

Selon la littérature, les études ne doivent pas se concentrer uniquement sur les caractéristiques de l'offre de transport. Les indicateurs agrégés, malgré leurs avantages en termes d'application, peuvent générer des aléas dans le processus d'estimation. L'indicateur pertinent doit adopter l'approche basée sur le programme d'activités afin d'évaluer correctement la qualité des dessertes. Lorsque les dessertes ne correspondent pas aux besoins de déplacement, l'utilité des déplacements sera plus faible.

Dans l'évaluation de la qualité des dessertes, l'absence de lien entre l'offre de transport et les besoins des voyageurs génère les problèmes de pertinence des indicateurs standard. Nous présentons dans la section suivante la théorie de l'accessibilité dans le but d'évoquer des indicateurs pertinents pour évaluer les effets liés aux dessertes. La théorie de l'accessibilité a été élaborée pour mettre en relation le système de transport, la capacité des voyageurs et les opportunités sur le territoire. Nous présenterons les principes de cette théorie dans la section suivante.

## Section 1.3.2 : Des indicateurs pertinents basés sur la théorie de l'accessibilité

### *1.3.2.1 - Les mesures d'accessibilité*

La théorie de l'accessibilité apparaît vers la fin des années 50 dans un article de Hansen. Son objectif était de développer un concept permettant d'étudier le lien entre la localisation spatiale des opportunités dans le territoire et le trafic routier (Hansen, 1959). Selon la définition de Hansen, l'accessibilité correspond aux opportunités potentielles d'interaction. Depuis, cette théorie s'est développée, la nouvelle définition devient : la possibilité d'atteindre le lieu des opportunités avec le système de transport (Dalvi et Martin, 1976). Selon la définition généralement acceptée, l'accessibilité reflète la qualité du système de transport permettant aux voyageurs d'accéder aux opportunités localisées dans les différents points du territoire (Geurs et Van Wee, 2004).

L'accessibilité devient une théorie multidimensionnelle qui regroupe l'organisation du territoire, le système du transport et la capacité individuelle des voyageurs. L'accessibilité est aussi considérée comme une liberté de choix des individus pour participer aux différentes activités et aux bénéfices liés à ces activités. En s'appuyant sur une approche désagrégée, cette théorie permet d'évaluer la qualité du service de transport en fonction des comportements individuels de déplacements et en fonction des opportunités à la destination.

De nombreuses mesures d'accessibilité ont été élaborées afin d'évaluer les effets liés à l'évolution de l'accessibilité. Les travaux de Geurs et Van Wee (2004), Mercier (2008) et Van Wee (2016) proposent de distinguer les mesures d'accessibilité en cinq grandes catégories.

- Les mesures d'accessibilité basées sur l'infrastructure. Les caractéristiques des infrastructures sont importantes dans la constitution des indicateurs d'accessibilité. Nous y trouvons dans cette catégorie les indicateurs comme le temps de parcours, la congestion et la vitesse. Ces indicateurs se sont inscrits dans l'approche classique de « Supply-Oriented Approach ». L'inconvénient est que les caractéristiques des opportunités à la destination ainsi que les utilités associées pour les voyageurs ne sont pas prises en compte.
- Les mesures d'accessibilité isochrones. Ces mesures sont initialement conçues pour évaluer les caractéristiques géométriques des opportunités à la destination avec la prise en compte de la structure du réseau de transport. La courbe isochrone est l'indicateur le plus souvent utilisé, elle désigne une courbe géo-localisée délimitant un territoire où chaque point est accessible depuis une origine fixe, sous contrainte des coûts de transport que les individus peuvent supporter (Richer et Palmier, 2012).

Selon cette définition, l'accessibilité peut donc être considérée simplement comme une fonction décroissante de la distance en fonction des coûts de déplacements (Equation 1) :

$$A_i = \sum_j A_{ij} = \sum_j f(d_{ij}) \quad (1)$$

*avec*

$A_i$  : l'accessibilité depuis la zone  $i$

$A_{ij}$  : l'accessibilité de la zone  $j$  depuis la zone  $i$

$f(d_{ij})$  : la fonction de la résistance (fonction de coûts des déplacements)

$d_{ij}$  : la distance entre  $i$  et  $j$

La formule d'accessibilité isochrone peut être transformée en remplaçant la fonction de la résistance par la fonction des coûts et des opportunités dans la zone de destination (Equation

2). Nous arriverons à compter le nombre d'opportunités potentiellement atteignables dans une zone isochrone fixe.

$$A_i = \sum_j A_{ij} = \sum_j \theta_{ij} * O_j \quad (2)$$

avec

$$\begin{cases} \theta_{ij} = 1, & \text{si } C_{ij} < C_{ij}^* \\ \theta_{ij} = 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$\theta_{ij}$  : un paramètre en fonction des coûts de déplacement

$C_{ij}$  : les coûts de déplacements entre  $i$  et  $j$

$C_{ij}^*$  : la contrainte des coûts maximum que les individus peuvent supporter

$O_j$  : les opportunités dans la zone  $j$

Les indicateurs d'accessibilité isochrones sont relativement simples à mettre en place, les données utilisées sont facilement disponibles. Cependant, seules la distance parcourue, le temps de parcours et les prix payés sont pris en compte, les facteurs de la qualité de service notamment en termes de la qualité des dessertes sont absents.

Par ailleurs, les mesures d'accessibilité isochrones présentent l'accessibilité entre deux lieux différents. Les individus et les opportunités au sein de la zone étudiée sont considérés comme homogènes. Si on commence à prendre en compte les caractéristiques des voyageurs et leurs trajets, l'accessibilité est différente pour chaque voyageur. Cela rend les résultats peu lisibles et difficiles à interpréter.

- Les mesures d'accessibilité gravitaire. Hansen (1959) est le premier à utiliser les mesures d'accessibilité gravitaire. Cette catégorie d'indicateurs consiste à établir une relation entre les opportunités à la destination et les coûts de transport à partir d'un point d'origine. Selon Koenig (1974), l'accessibilité gravitaire repose sur les opportunités et les coûts des déplacements. Les opportunités sont des moteurs de déplacements, les coûts des déplacements sont considérés comme un élément résistant pour les déplacements.

De façon générale, l'accessibilité gravitaire est la méthode la plus répandue pour étudier l'accessibilité des opportunités au sein de la zone étudiée. L'accessibilité est mesurée en fonction de la localisation des opportunités, pondérées par une fonction de résistance (Encadré 8). La formule de l'accessibilité gravitaire s'écrit de manière suivante (Equation 3) :

$$A_i = \sum_j A_{ij} = \sum_j f(C_{ij}) * O_j \quad (3)$$

avec

$f(C_{ij})$  : une fonction de résistance aux coûts de déplacements

$O_j$  : les opportunités dans la zone  $j$

Comme les mesures d'accessibilité présentées jusqu'ici, l'accessibilité gravitaire s'inscrit toujours dans une approche agrégée en fonction du nombre d'opportunités dans la zone étudiée. L'accessibilité gravitaire contribue notamment à mesurer la distribution spatiale des opportunités. La principale limite de celle-ci est que les caractéristiques des individus ne sont pas prises en compte. L'accessibilité dans une zone ciblée est considérée comme identique pour tous les individus. L'autre limite concerne l'absence des effets de compétition dans l'analyse entre les différentes opportunités dans le périmètre d'étude (Geurs et Van Eck, 2001).

---

*Encadré 8 : La fonction de résistance de l'accessibilité gravitaire*

---

Les coûts de transport sont le principal élément résistant des déplacements (Geurs et Van Wee, 2004). Dans le cadre des mesures d'accessibilité gravitaire, la fonction de résistance est une composante essentielle pour le calcul de l'accessibilité. Le choix de cette fonction est une question souvent soulignée dans la littérature. Deux types de fonction sont les plus courantes (Reggiani *et al.*, 2011) :

- La fonction puissance :  $f(C_{ij}) = C_{ij}^{-\beta}$
- La fonction exponentielle :  $f(C_{ij}) = e^{-\beta C_{ij}}$

Selon Reggiani *et al.* (2011), lorsque les voyageurs sont homogènes, la fonction exponentielle est plus appropriée. En revanche, l'utilisation de la fonction puissance est préférable lorsque les voyageurs sont issus d'un groupe hétérogène.

Il faut faire attention au choix de la forme fonctionnelle lorsqu'on veut appliquer le modèle calibré à une échelle différente ou lorsque l'unité de calcul change. Selon Fotheringham et O'Kelly (1989), l'utilisation de la fonction puissance sur des échelles différentes ne modifiera pas le paramètre de résistance, alors qu'il n'est pas possible d'utiliser la fonction exponentielle d'un modèle calé à l'échelle urbain sur une étude à l'échelle interurbain.

- Les mesures d'accessibilité spatio-temporelles ont été développées dans les travaux de *Time-Geography* (Hägerstrand, 1975). Cette approche vise essentiellement à prendre en compte le programme d'activités quotidien des voyageurs et les contraintes spatio-temporelles pour réaliser les activités à la destination (Kim et Kwan, 2003). Les horaires de début et de fin des activités dispersées dans les différents lieux sont des contraintes spatio-temporelles qu'on supporte quotidiennement pour les déplacements domicile-travail.

Grâce aux mesures d'accessibilité spatio-temporelles, la localisation et la disponibilité temporelle des opportunités sont prises en compte dans l'analyse. De plus, les mesures d'accessibilité spatio-temporelles disposent de l'avantage de pouvoir analyser l'accessibilité à l'échelle individuelle. Il s'agit, pour chaque voyageur, de tracer la trajectoire des déplacements en fonction de son programme d'activités.

Nous pouvons distinguer deux approches d'accessibilité spatio-temporelle : la modélisation d'accessibilité sous contraintes du programme d'activités et la modélisation combinée du choix d'activités et choix d'horaires (Raux *et al.*, 2007).

Les travaux de Miller (1999, 2004) et Kwan (2000) ont adopté la première approche de l'accessibilité spatio-temporelle. Ils considèrent la localisation et la disponibilité des activités comme des contraintes exogènes dans un travail de modélisation de la demande. C'est-à-dire que les voyageurs vont organiser ses activités sous contraintes de la disponibilité spatio-temporelle des activités à la destination.

Selon la deuxième approche de l'accessibilité spatio-temporelle, le programme d'activités est considéré comme un élément endogène du travail de modélisation. Le modèle cherche à expliquer à la fois le choix du mode et le choix des activités. Nous trouvons dans cette deuxième catégorie d'approche notamment les travaux de Ben Akiva et Bowman (2001), Bhat et Steed (2002) et Vovsha et Bradley (2006).

Les horaires programmés des transports collectifs sont des éléments importants dans l'analyse de l'accessibilité spatio-temporelle. Ceux-ci constituent aussi l'élément majeur de la qualité de service des modes de transport collectifs. Les mesures d'accessibilité spatio-temporelles sont adaptées pour l'étude du choix d'horaires, celles-ci ont été utilisées dans les études de l'accessibilité en urbain. Nous allons présenter plus en détails l'application de ces mesures d'accessibilité dans l'évaluation de la qualité des dessertes dans la prochaine sous-section 1.3.2.2.

- Les mesures d'accessibilité basées sur l'utilité sont fondées sur la théorie microéconomique des consommateurs (dont le plus connu est McFadden, 1975). L'accessibilité dépend de l'utilité que les individus accordent aux différentes activités à la destination. Les voyageurs vont choisir le mode de transport qui permet de maximiser l'utilité des déplacements. Le choix modal est donc les résultats de la maximisation d'utilité et sera estimé grâce aux méthodes de calcul économétriques. Les mesures d'accessibilité basées sur l'utilité ont l'avantage de pouvoir être prises en compte les caractéristiques des opportunités au niveau microéconomique (Geurs *et al.*, 2015).

Néanmoins, les mesures d'accessibilité basées sur l'utilité sont les plus difficiles à mettre en œuvre. Elles sont très exigeantes en termes de données, puisque l'analyse est faite au



niveau microéconomique et en fonction de l'utilité de différentes activités. Par ailleurs, les coefficients estimés à l'aide du processus de maximisation sont difficiles à interpréter. Ce sont les principaux inconvénients qui expliquent l'application relativement rare de ces mesures d'accessibilité dans la littérature (Mercier, 2008).

Nous avons présenté les avantages des mesures d'accessibilité qui répondent aux besoins de notre sujet de recherche et vont nous aider à élaborer des indicateurs pertinents dans l'évaluation de la qualité des dessertes. Les mesures d'accessibilité gravitaire et d'accessibilité spatio-temporelle qui sont capables de prendre en compte les opportunités à la destination et de travailler au niveau désagrégé seront utilisées pour élaborer des indicateurs de qualité des dessertes plus pertinents.

Nous présenterons le cadre conceptuel et les formules de nos modèles dans la sous-section suivante. Nos modèles s'agissent d'une combinaison entre les mesures d'accessibilité gravitaire et les mesures spatio-temporelles. Nous souhaitons cumuler les avantages de ces deux mesures d'accessibilité afin de traiter le problème lié à l'évaluation de la qualité des dessertes.

Cette idée de travailler simultanément sur l'accessibilité gravitaire et l'accessibilité spatio-temporelle rejoint le concept proposé par Kim et Kwan (2003). Ils considèrent que la mesure d'accessibilité avancée devrait être le nombre cumulatif des opportunités depuis l'origine des déplacements, mesuré sous des contraintes spatio-temporelles (temps de parcours, les horaires programmés, le temps à destination, etc.). C'est une solution intermédiaire entre l'accessibilité gravitaire et l'accessibilité basé sur l'utilité. Cette solution est efficace pour réduire les inconvénients de ces deux mesures d'accessibilité. Grâce à celle-ci, nous arriverons à travailler au niveau désagrégé puisque l'accessibilité est mesurée en fonction de la trajectoire de déplacements de chaque voyageur et en même temps nous éviterons d'estimer l'utilité pour chaque activité.

Les données nécessaires pour travailler sur les déplacements et les opportunités à l'échelle micro sont conséquentes. C'est aussi pour cette raison que l'étude avec l'approche désagrégée est difficile. Avec le développement du système d'informations géographiques (SIG), les conditions d'accès aux données s'améliorent pour les études de l'accessibilité (Chen *et al.*, 2011).

Les travaux de l'analyse de l'accessibilité spatio-temporelle continuent d'être améliorés afin de prendre en compte la compétition entre les opportunités à la destination. Les mesures proposées sont capables de gérer le problème de répartition déséquilibré des opportunités dans la zone étudiée (Souche *et al.*, 2016). Les travaux de Wang *et al.* (2015) et Zondag *et al.* (2015) ont montré que les

mesures d'accessibilité constituent des importants outils d'aide à la décision. Les mesures d'accessibilité qui sont capables de prendre en compte les caractéristiques des opportunités dans le territoire permettent d'étudier le problème d'équité spatiale et sociale,

Dans le cadre de notre étude sur la qualité des dessertes, nous nous sommes rendu compte de la nécessité d'établir le lien entre la capacité des voyageurs, le système de transport et les opportunités dans les territoires. Cette nécessité provient des faiblesse des indicateurs standard pour expliquer les comportements réels des voyageurs. Nous avons besoin de travailler à l'échelle individuelle et de prendre en compte les caractéristiques des opportunités à la destination.

La théorie de l'accessibilité fournit la base pour l'élaboration des indicateurs pertinents. Nous présentons ci-dessous le cadre conceptuel et les formules de nos modèles pour étudier la qualité des dessertes. Nous arriverons mieux à visualiser l'insuffisance des indicateurs standard et à mieux traiter les questions de dessertes.

### *1.3.2.2 - L'analyse des dessertes dans la dimension spatio-temporelle*

Il existe plusieurs mesures pour étudier l'accessibilité. Nous choisissons parmi celles-ci, les mesures adaptées à l'évaluation de la qualité des dessertes. Nous avons évoqué la défaillance de l'évaluation de la qualité des dessertes avec les indicateurs standard comme la fréquence de service et l'intervalle de service, l'indicateur pertinent doit permettre d'adopter une approche désagrégée et de prendre en compte les opportunités à la destination.

Dans l'analyse des dessertes, nous avons besoin des mesures d'accessibilité qui soient capables d'analyser l'organisation des opportunités dans l'espace et par ailleurs de tenir compte de la disponibilité des opportunités dans le temps.

A l'aide des mesures d'accessibilité spatio-temporelles, l'analyse des dessertes peut prendre deux formes différentes :

- Dans le cadre de l'accessibilité spatio-temporelle, les horaires de service des transports collectifs peuvent être intégrés dans la modélisation comme un facteur exogène. Les

horaires constituent des contraintes spatio-temporelles pour les déplacements des voyageurs en transports collectifs.

- Les horaires peuvent aussi être intégrés directement dans le processus de modélisation comme un facteur endogène. Le modèle pour expliquer les comportements de déplacements des voyageurs devient un modèle combiné qui expliquera à la fois le choix du mode de transport et le choix des horaires.

Les déplacements peuvent être représentés dans l'espace et dans le temps sous forme de trajectoire (Jones et Zhang, 1997). La trajectoire des déplacements correspond aux mouvements spatio-temporels observés ou envisagés par les voyageurs. Pour un voyageur quelconque, la trajectoire des déplacements dans la journée montre les motifs des déplacements : domicile-travail, achat, loisir, etc. La trajectoire des déplacements est limitée en fonction du temps disponible dans la journée.

La trajectoire des déplacements et son périmètre sont fondamentaux dans les mesures d'accessibilité spatio-temporelles. Sen (1990) considère que les individus sont sous contraintes de la capacité (le temps et les ressources disponibles) et de leur espace de vie quotidienne. Les individus présents dans un lieu, vont être absents dans un autre lieu. Cette contrainte de capacité contribue à délimiter le périmètre de la trajectoire des déplacements.

Miller (2004) a développé la notion de la zone potentiellement atteignable fondée sur les principes de la trajectoire et les contraintes des déplacements. Selon lui, les déplacements des voyageurs sont limités à une zone PPA (Potential Path Area). Cette zone PPA est déterminée par les heures d'arrivée pour les trajets d'aller et les heures de départ pour les trajets de retour.

La figure 8, initialement présentée par Miller (2004), nous aide à mieux comprendre la notion de trajectoire des déplacements et la zone PPA.

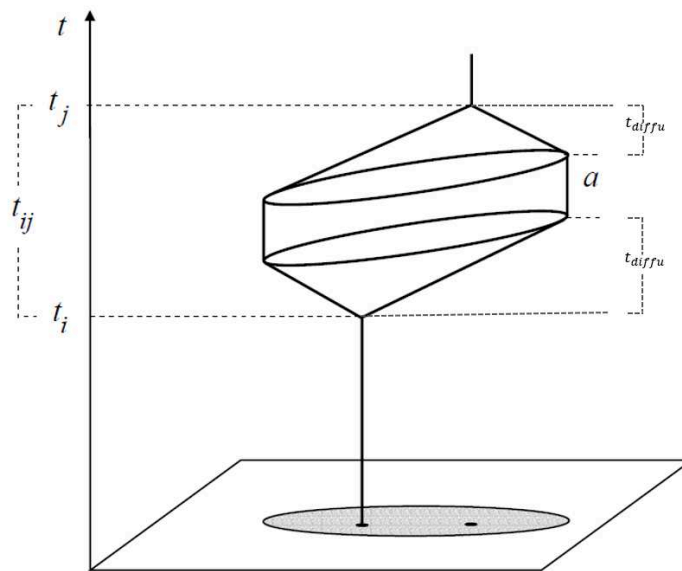


Figure 8 : la représentation de la zone PPA (Miller, 2004)

Cette figure est une graphique en trois dimensions. Le carré en bas du graphique montre l'espace dans lequel les déplacements ont lieu. L'axe "t" est la troisième dimension qui présente la dimension temporelle des déplacements. Nous pouvons tracer une trajectoire des déplacements sous les contraintes concernant l'heure d'arrivée " $t_i$ " et l'heure de départ " $t_j$ ".

Sous les contraintes des heures d'arrivée et de départ, nous arriverons à présenter la zone grise qui est la zone PPA du trajet. On obtient aussi " $t_{ij}$ " qui est le temps maximum sur le lieu d'arrivée. Il correspond à l'écart entre l'heure d'arrivée à la destination " $t_i$ " et l'heure de retour depuis la destination " $t_j$ ".

En prenant en compte le temps de diffusion " $t_{diffu}$ " (le temps pour rejoindre la destination finale), nous obtenons le temps utile à destination pour les voyageurs représenté par la zone " $\alpha$ ". Cette zone " $\alpha$ " correspond au temps dont les voyageurs disposent à leur destination pour les activités principales. Dans le processus de calcul, le temps de diffusion doit être déduit deux fois du calcul de temps utile à destination, car les voyageurs se déplacent pour rejoindre la destination finale depuis la gare et ensuite de la destination finale à la gare.

Le temps utile à destination peut être démontré mathématiquement (Equation 4) :

$$\alpha = t_j - t_i - 2 * t_{diffu} \quad (4)$$

*avec*

$\alpha$  : le temps utile à destination

$t_j$  : l'heure de retour

$t_i$  : l'heure d'arrivée

$t_{diffu}$  : le temps de diffusion à la destination

Kwan et Weber (2008) considèrent le temps utile à destination comme une condition spatio-temporelle nécessaire pour les activités principales. L'accessibilité peut être mesurée par la surface de la zone PPA et par le nombre d'activités réalisables sous contrainte du temps minimum nécessaire à destination. L'accessibilité sera meilleure à condition que le temps à destination soit suffisamment important.

Cette notion du temps utile à destination a déjà été utilisée dans l'analyse de la qualité des dessertes. Baptiste (2003) a développé des indicateurs d'accessibilité permettant d'évaluer la qualité des horaires programmés par les opérateurs de transport. L'Hostis et Decoupigny (2001), L'Hostis et Conesa (2010) ont aussi travaillé sur ces indicateurs d'accessibilité spatio-temporelle. Les résultats des recherches montrent la pertinence des indicateurs basés sur le temps utile à destination dans le contexte de la mise en service d'une nouvelle infrastructure ferroviaire. Les voyageurs profitent des effets de vitesse pour aller plus loin ou passer plus de temps à destination.

Nous supposons que les heures d'arrivée et de retour sont totalement aléatoires et que les voyageurs cherchent à maximiser le temps à destination. Le temps utile à destination est calculé en fonction d'une contrainte du temps total disponible " $T$ " (" $T = 24h/jour$ ") et le temps de transport généralisé " $t$ ".

$$\alpha = T - 2t \quad (5)$$

*avec*

*T : le temps total disponible*

*t : le temps de transport généralisé*

Le temps utile à destination est négativement corrélé avec le temps de transport généralisé. Lorsque le temps de transport généralisé diminue, les voyageurs disposent de plus de temps utile à destination.

Nous sommes capables de montrer la relation entre le temps utile à destination et les coûts généralisés de transport. La fonction de coûts généralisés a été présentée dans la section 1.2.2.5 :

$$C_{ij} = p + h * t_{ij}$$

Devient :

$$C_{ij} = p + h * (T - a_j)/2 \quad (6)$$

*avec*

*C<sub>ij</sub> : les coûts généralisés entre la ville i et la ville j*

*p : les prix payés*

*h : la valeur du temps*

*a<sub>j</sub> : le temps utile à ville j*

Le temps utile à destination est donc négativement corrélé avec les coûts généralisés de transport.

De plus, selon l'accessibilité spatio-temporelle, les opportunités à la destination sont sous contrainte du temps utile à destination. Si nous supposons "*t<sub>k</sub>*", le temps nécessaire pour une activité "*k*" dans la ville "*j*". La somme du temps passé pour les activités principales doit être inférieure ou égale au temps utile à destination. Nous obtenons "*O<sub>j</sub>*" le nombre d'opportunités dans la ville "*j*" sous condition de :

$$\sum_k^{o_j} t_k \leq a_j \quad (7)$$

avec

$t_k$  : le temps nécessaire pour l'activité  $k$

$O_j$  : les opportunités dans la ville  $j$

Le temps utile à destination détermine le nombre total des opportunités " $O_j$ " auxquelles les voyageurs peuvent accéder à la destination. En l'absence d'informations concernant les caractéristiques des opportunités à la destination, nous supposons que les opportunités à la destination sont homogènes et toujours disponibles. Sous cette hypothèse, le nombre total des opportunités est égale au temps utile à destination divisé par le temps nécessaire pour chaque activité.

$$O_j = a_j / t_k \quad (8)$$

avec

$a_j$  : le temps utile à destination

$t_k$  : le temps nécessaire pour les activités homogènes  $k$

En tenant compte la formule générique de l'accessibilité gravitaire et des formules de coûts généralisés de transport, on obtient la formule de l'accessibilité suivante (Equation 9):

$$A_i = \sum_j f(C_{ij}) * a_j / t_k \quad (9)$$

avec

$A_i$  : l'accessibilité depuis une ville  $i$

Nous avons montré que le temps utile à destination est négativement corrélé avec les coûts généralisés de transport. Grâce à cette équation, nous arrivons à démontrer que le temps utile à destination est positivement corrélé avec le niveau d'accessibilité, conformément à notre hypothèse.

Koenig (1974) développe la théorie économique de l'accessibilité en mettant en relation la théorie micro-économique du consommateur et l'accessibilité des déplacements. Il considère que les individus associent une utilité à chaque activité et à la localisation des activités. Selon cette théorie, l'utilité des déplacements correspond à l'utilité que l'individu attribue aux activités principales à destination. Koenig (1974) fait l'hypothèse que l'utilité d'une destination est une variable aléatoire de loi de distribution exponentielle négative. A titre d'exemple, la probabilité de pouvoir exercer une activité à la destination décroît lorsque le temps nécessaire pour cette activité augmente. En fonction des hypothèses sur le comportement des individus et des hypothèses sur la distribution probabiliste de l'utilité, Koenig propose la fonction d'utilité depuis la zone  $i$  qui s'écrit (Equation 10) :

$$U_i = (1/\beta)\log A_i \quad (10)$$

avec

$$A_i = \sum_j \exp^{-\beta C_{ij}} * O_j$$

$U_i$  : Utilité que peut retirer d'un déplacement depuis la ville  $i$

$\beta$  : un paramètre

$O_j$  : les opportunités dans la ville  $j$

Ici, Koenig fait hypothèse que la fonction de résistance de l'accessibilité est une fonction exponentielle.

A l'issue de l'équation 9 et de l'équation 10, nous montrons l'utilité des déplacements depuis la ville  $i$  en fonction du temps utile à destination dans la ville  $j$ .



$$U_i = (1/\beta) \log \left[ \sum_j f(C_{ij}) * a_j / t_k \right] \quad (11)$$

avec

$C_{ij}$  : les coûts généralisés entre la ville  $i$  et la ville  $j$

$a_j$  : le temps utile à ville  $j$

$t_k$  : le temps nécessaire pour l'activité  $k$

Les voyageurs cherchent à maximiser le temps utile à destination dans le but de maximiser l'accessibilité et donc de maximiser l'utilité des déplacements. Selon l'équation 11, le temps utile à destination est positivement corrélé avec l'utilité des déplacements. Il peut être intégré comme une variable explicative dans la fonction d'utilité des voyageurs. Nous supposons que cette variable soit significative pour expliquer la probabilité de choix modal des voyageurs.

Pourtant, l'homogénéité des opportunités dans la zone étudiée est une hypothèse forte. Lorsque les voyageurs peuvent décider les heures d'arrivée et de retour de manière libre et aléatoire, l'hypothèse d'homogénéité pose moins de problème théorique et méthodologique car les voyageurs choisissent les allers et les retours adaptés à leur emploi du temps pour leurs activités principales.

Néanmoins, cette hypothèse est moins pertinente lorsque les heures d'arrivée et de retour sont sous contrainte des horaires programmés. Dans le cas où les horaires programmés ne s'adaptent pas ou sont moins adaptés aux caractéristiques des opportunités à destination, les voyageurs subissent des pertes d'utilité. Le fait de rester plus de temps à destination ne conduit pas nécessairement à une augmentation d'utilité pour les déplacements.

En effet, la limite majeure de la notion de temps utile à destination est liée aux difficultés de prendre en compte les caractéristiques des opportunités à la destination. Dans la section 1.3.3, nous présenterons une autre approche capable de prendre en compte les caractéristiques des opportunités à la destination dans l'analyse des comportements de voyageurs.

## Section 1.3.3 : Les caractéristiques des opportunités dans une approche microéconomique

Kim et Kwan (2003) ont évoqué l'existence de l'hétérogénéité des opportunités dans la zone PPA. Ils étudient la disponibilité des opportunités en fonction des heures d'arrivée et de retour. Au sein de la zone PPA, les mesures proposées par Kim et Kwan conduisent à identifier les opportunités réalisables à la destination FOS (Feasible Opportunity Set). Selon eux, les opportunités FOS correspondent aux activités potentiellement réalisables à la destination pour un trajet d'aller - retour. Le temps disponible pour les différentes activités varie en fonction des heures d'arrivée et de retour des voyageurs. La disponibilité des activités dépend aussi des horaires d'ouverture et de fermeture de celles-ci.

La figure 9 ci-dessous montre le cadre conceptuel des opportunités FOS dans une trajectoire des déplacements d'aller-retour.

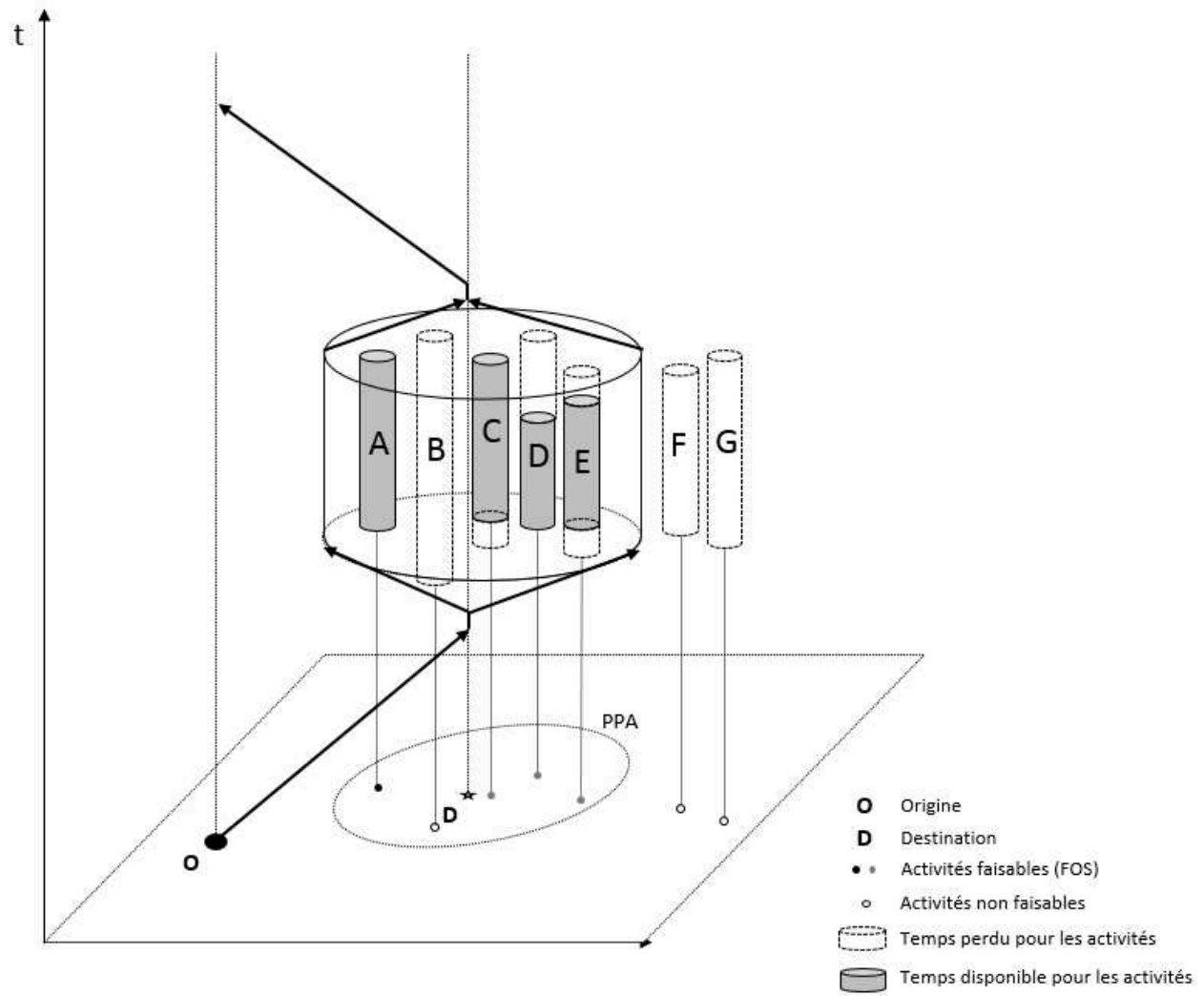


Figure 9 : la démonstration des FOS dans une zone PPA (Réalisé par Auteur, 2018)

Cette figure est une démonstration en trois dimensions de l'accessibilité spatio-temporelle. L'axe "t" représente la dimension temporelle, il montre le temps passé en transport, le temps utile à destination et le temps passé pour les différentes activités. Le carré en bas du graphique est la dimension spatiale qui montre la localisation des différentes activités à la destination.

La zone potentiellement atteignable PPA est représentée par le cercle en pointillés dans la dimension « espace » en bas du graphique. Dans la dimension « espace », la gare ferroviaire est

présentée par l'étoile. Les flèches représentent les déplacements d'aller-retour vers ou depuis la gare ferroviaire et les déplacements du dernier kilomètre pour rejoindre les destinations finales.

Nous supposons des activités "A, B, C, D, E" dans la zone PPA et "F, G" hors la zone PPA. C'est-à-dire que les activités "F, G" ne sont pas accessibles avec les horaires d'aller-retour choisis.

L'avantage de cette approche est la prise en compte de la disponibilité temporelle des activités. Dans ce graphique, la disponibilité des activités en fonction des horaires d'ouverture et de fermeture est présentée sous forme de bâtons en couleur gris. Lorsque les horaires choisis pour les déplacements génèrent du temps perdu, le temps perdu est représenté par la partie blanche en pointillés des bâtons.

Nous pouvons dès lors analyser le niveau d'accessibilité pour chaque activité.

- Selon l'exemple montré dans cette figure, les heures des déplacements choisies correspondent parfaitement aux besoins du temps pour l'activité "A". Cette activité est présentée par le point noir dans la zone PPA.
- Par contre, l'activité "B" n'est plus disponible aux heures de déplacements choisies. Les voyageurs arrivent trop tard pour pouvoir exercer cette activité. Cette activité se trouve dans la zone PPA, mais elle n'est pas réalisable avec les heures des déplacements choisis. L'activité "B" est présentée par le point blanc dans la zone PPA.
- L'activité "D" est disponible à l'heure d'arrivée choisie, mais la durée de disponibilité est très courte. Les voyageurs perdent du temps en attendant son retour à l'origine. La même situation pour les activités "C et E" : les heures des déplacements ne correspondent pas parfaitement à la durée de disponibilité de ces activités. Par conséquent, les voyageurs perdent du temps à destination. Ces activités sont présentées par les points gris dans la zone PPA.

La disponibilité des opportunités dans l'espace et dans le temps est prise en compte dans cette approche. Cela conduit à la notion de temps perdu à destination<sup>21</sup>. Lorsque les horaires programmés

---

<sup>21</sup> Le temps est considéré comme perdu lorsqu'il ne s'agit pas pour réaliser les activités principales. Les voyageurs peuvent profiter du temps pour réaliser des activités secondaires lorsqu'ils arrivent en avance. Dans notre étude, nous ne discutons pas l'utilité des activités secondaires pour les voyageurs.

ne correspondent pas à la période de disponibilité des activités, les voyageurs n'ont pas l'accès à ces activités ou sont contraints d'attendre donc de perdre du temps à la destination.

Cette notion de temps perdu est essentielle dans l'analyse des comportements de déplacements des voyageurs. Pour les voyageurs, le temps perdu correspond à la perte d'utilité pour les déplacements. Dans l'approche désagrégée, nous aimerons connaître la disponibilité des activités pour les déplacements de chaque voyageur. Nous avons besoin de mesurer la partie du temps perdu et d'évaluer les impacts de celle-ci sur les comportements des voyageurs.

Vickrey (1969) propose une solution adaptée pour quantifier la perte d'utilité liée au temps perdu à la destination. Vickrey définit une notion de coûts de délais : « Schedule Delay (SD) » qui correspond aux écarts entre les arrivées en avance ou en retard<sup>22</sup> par rapport aux heures d'arrivée souhaitées. On suppose que les voyageurs souhaitent arriver au moment du début des activités à la destination et partir lorsque les activités sont terminées. La notion de coûts de délais permet d'évaluer la qualité des horaires programmés par les opérateurs de transports collectifs. Lorsque les horaires programmés ne correspondent pas à la période de disponibilité des activités à la destination, ils génèrent des pertes d'utilité pour les voyageurs.

Dans la figure 10 ci-dessous, nous présentons une trajectoire d'un trajet interurbain entre l'origine et la destination. Comme les figures précédentes, ce graphique est aussi sous la dimension spatio-temporelle. Les horaires choisis pour le trajet d'aller et de retour permettent aux voyageurs de profiter du temps à destination et de disposer une zone PPA. Nous supposons que les voyageurs se déplacent pour exercer deux activités "A" et "B" à la destination.

---

<sup>22</sup> Ici, cette notion n'est pas au sens traditionnel du terme « en retard ». Les voyageurs ne sont pas victimes d'une variation de temps de parcours, ils sont contraints d'arriver en retard par rapport aux heures d'arrivée souhaitées puisque les horaires ne leur permettent pas d'arriver à l'heure.

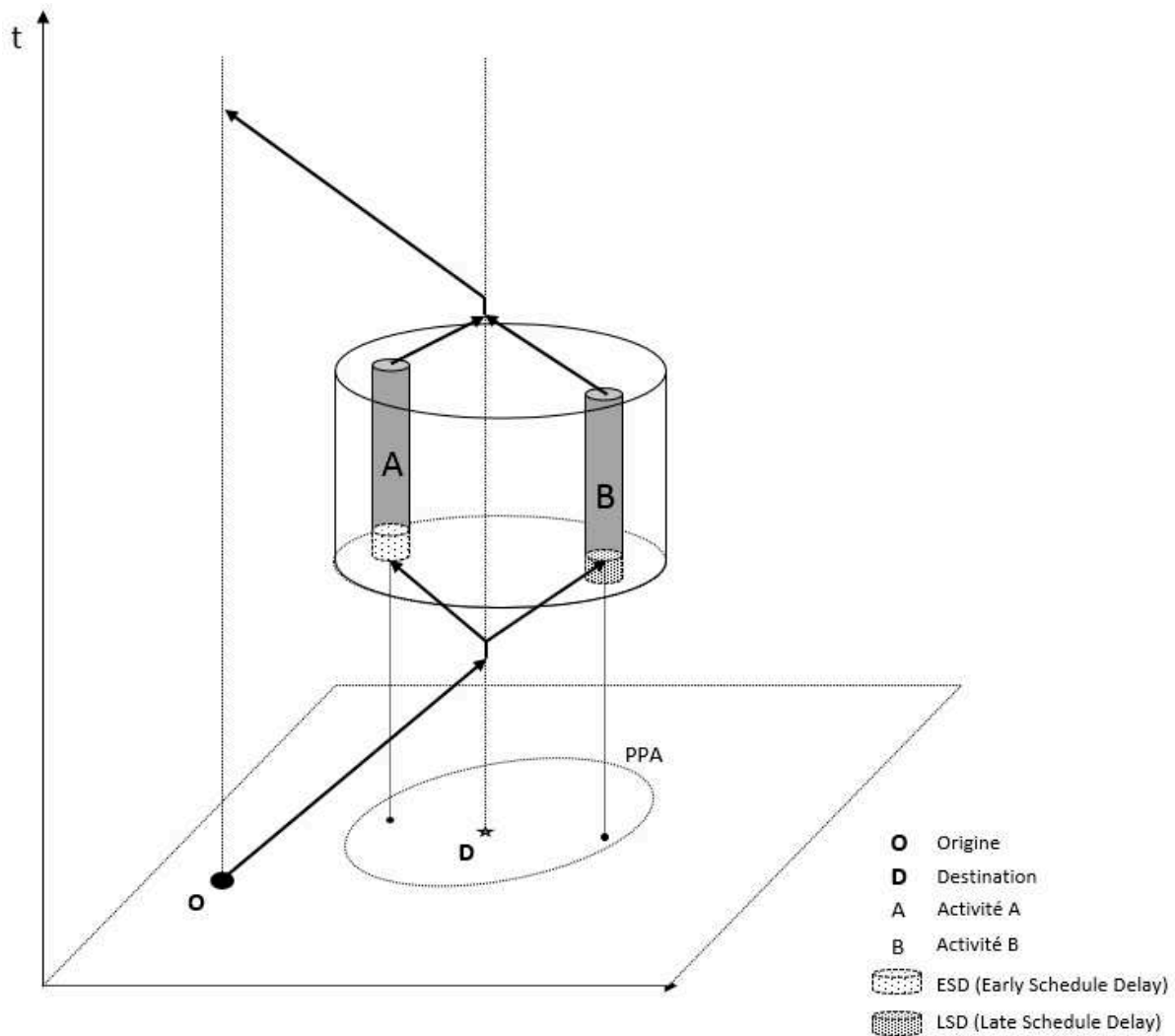


Figure 10 : les coûts de délais pour un aller-retour interurbain entre l'origine et la destination

Dans notre exemple, avec les horaires choisis, les voyageurs arrivent plus tôt par rapport à l'heure de début de l'activité "A". Le temps perdu à la destination est représentée par une zone temporelle lié aux arrivées en avance « Early Schedule Delay (ESD) ». La zone ESD correspond aux coûts de délais liés aux arrivées en avance.

Pour les voyageurs qui souhaitent exercer l'activité "B", ils sont contraints d'arriver en retard par rapport à l'heure de début de l'activité. Si nous supposons que l'activité "B" est toujours accessible, les voyageurs subissent une perte du temps liée au retard. Dans cette figure, nous observons une zone temporelle de retard à destination « Late Schedule Delay (LSD) ». Cette zone LSD correspond aux coûts de délais liés aux arrivées en retard

"*ESD*" et "*LSD*" contribuant à évaluer la qualité des dessertes en fonction des heures d'arrivée souhaitées des voyageurs. Ces deux variables sont des éléments essentiels dans le cadre de la modélisation des horaires. Le calcul des coûts de délais dépend de l'heure d'arrivée effective et de l'heure d'arrivée souhaitée. Les formules de calcul sont présentées ci-dessous (Equation 12).

$$\left\{ \begin{array}{ll} ESD = PAT - H_d - t & , \quad \text{si } PAT > H_d + t \\ ESD = LSD = 0 & , \quad \text{si } PAT = H_d + t \\ LSD = H_d + t - PAT & , \quad \text{si } PAT < H_d + t \end{array} \right. \quad (12)$$

avec

*PAT* (*Preferred Arrival Time*) : l'heure d'arrivée souhaitée

*ESD* : les coûts liés aux arrivées en avance

*LSD* : les coûts liés aux arrivées en retard

*t* : le temps de trajet

*H<sub>d</sub>* : l'heure de départ

Nous supposons que l'heure de départ des voyageurs est une information connue. L'heure d'arrivée effective égale à la somme de l'heure de départ "*H<sub>d</sub>*" et le temps de trajet "*t*". Lorsque la valeur de cette somme est inférieure à la valeur de l'heure d'arrivée souhaitée "*PAT*", les voyageurs arrivent en avance. Lorsque la somme de "*H<sub>d</sub>*" et "*t*" est supérieur à la valeur de "*PAT*", les voyageurs arrivent en retard. La valeur de "*ESD*" et "*LSD*" sont nulles si les voyageurs arrivent à l'heure d'arrivée souhaitée.

Selon Vickrey (1969), les coûts de délais constituent un élément important de la fonction des coûts de déplacements. Dans la fonction d'utilité des voyageurs, les coûts de délais contribuent à l'intégration de deux variables explicatives qui représentent respectivement les coûts liés aux arrivées en avance "*ESD*" et les coûts liés aux arrivées en retard "*LSD*". Les coefficients de ces variables montrent les effets des coûts de délais sur les comportements de choix des voyageurs.

En fonction de l'équation du temps utile à destination de la section 1.3.2 (Equation 5) et de l'équation pour le calcul des « Schedule Delay » (Equation 12), nous obtenons l'équation suivante qui décrit la relation entre le temps utile à destination et les coûts de délais (Equation 13).

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha = T - H_d - 2t - ESD & , \quad \text{si } PAT > H_d + t \\ \alpha = T - H_d - 2t & , \quad \text{si } PAT = H_d + t \\ \alpha = T - t - PAT - LSD & , \quad \text{si } PAT < H_d + t \end{array} \right. \quad (13)$$

avec

$\alpha$  : le temps utile à destination

$T$  : le temps total disponible

$t$  : le temps de transport généralisé

L'équation 13 montre que les coûts de délais "*ESD*" et "*LSD*" sont négativement corrélés avec le temps utile à destination. Le temps utile à destination diminue lorsque les valeurs de "*ESD*" et "*LSD*" augmentent.

Dans l'équation 11, nous avons démontré que le temps utile à destination est positivement corrélé avec l'utilité des déplacements. A l'aide de l'équation 13, nous démontrons que les coûts de délais "*ESD*" et "*LSD*" sont négativement corrélés avec le temps utile à destination et donc négativement corrélés avec l'utilité des déplacements.

Selon Vickrey (1969), "*ESD*" et "*LSD*" sont les deux nouvelles variables à intégrer dans la fonction d'utilité des voyageurs. Basée sur la notion de coûts de délais, la fonction d'utilité proposée par Polak et Jones (1997) est la suivante (Equation 14):

$$U = \alpha * t + \beta * p + \gamma * ESD + \delta * LSD + \dots + \varepsilon \quad (14)$$

avec

$t$  : les temps de trajet

$p$  : les prix payés en transports

*ESD* : les coûts liés aux arrivées en avance

*LSD* : les coûts liés aux arrivées en retard

$\varepsilon$  : le terme aléatoire



L'explication des comportements des voyageurs se fait de la même manière : nous supposons que les comportements de choix des voyageurs sont le résultat de la maximisation d'utilité. Le terme aléatoire " $\varepsilon$ " contribue à prendre en compte les effets non observés.

Les coefficients associés à ces deux variables : " $\gamma$ " et " $\delta$ " correspondent aux effets des coûts de délais sur la décision de choix des voyageurs. Selon la relation que nous avons démontrée entre les coûts de délais et l'utilité des déplacements, nous faisons l'hypothèse que les coefficients associés aux coûts de délais sont négatifs.

L'arbitrage entre les coefficients du temps de transport et du prix payé " $\alpha/\beta$ " nous donne la valeur du temps des voyageurs. Le ratio " $\delta/\gamma$ " nous permet de mesurer l'arbitrage entre les arrivées en avance et en retard. Ces ratios sont très utiles, qui fournissent des informations synthétiques sur les effets liés aux coûts de délais.

Des travaux de modélisation des horaires sont basés sur cette notion de coûts de délais. Cette méthode est capable de mesurer l'utilité des horaires programmés. Cette méthodologie est le plus souvent utilisée dans le contexte urbain pour expliquer le phénomène de congestion. Les travaux ont pour l'objectif de comprendre la concentration des heures de départ pour les déplacements domicile-travail. La question qu'on cherche à expliquer est celle du choix de l'heure de départ.

Le contexte dans le milieu interurbain est différent. Les voyageurs ne partent pas à l'heure aléatoire, mais en fonction des horaires programmés par les opérateurs de transport. Le service de transport interurbain n'est pas un service cadencé comme le cas du transport urbain. La question centrale est d'évaluer la qualité des horaires programmés par rapport aux horaires de déplacements souhaités. Nous trouvons peu de travaux étudiant la modélisation des horaires au milieu interurbain notamment à cause de la manque de données. Ci-dessous, nous faisons une revue de littérature des travaux sur la modélisation des horaires afin de montrer les avantages et inconvénients de cette méthodologie.

Dans le contexte urbain, de nombreuses études ont montré la pertinence de la modélisation des horaires pour améliorer la connaissance des comportements des voyageurs. On cherche à expliquer le choix de l'heure de départ des voyageurs parmi les différentes tranches horaires dans la journée (Arnott *et al.*, 1992). Le choix de l'heure de départ est donc devenu un choix discret, les modèles de choix discrets ont été le plus souvent utilisés pour expliquer les choix de l'heure de départ des voyageurs.

La méthode des choix discrets simplifie le processus d'estimation en classant des tranches d'horaires. La journée devient discontinue avec un découpage par tranche d'heure et le choix de l'heure de départ devient un choix discret. Pourtant, les horaires sont par nature continus dans la journée. Les méthodes des choix discrets vont donc générer des biais d'estimation. Bhat et Steed (2002) ont proposé des modèles « Hazard » qui considèrent le choix de l'heure de départ comme une question de choix continue. Ce modèle décrit la probabilité conditionnelle qu'un évènement soit terminé. Dans le cadre de la modélisation de l'heure de départ, il explique la probabilité qu'un évènement « à la maison » se termine pour un nouvel évènement « aller au travail ». Nurul Habib *et al.* (2009) ont fait une comparaison entre les modèles de choix discrets et le modèle « Hazard », les résultats montrent que le modèle « Hazard » est significativement meilleur.

Par ailleurs, les études de la modélisation des horaires traitent le plus souvent conjointement le choix du mode et le choix de l'heure de départ (Ben-Akiva et Bowman, 2001 ; Vovsha et Bradley, 2006). Les résultats montrent que le choix de l'heure de départ en tant que dimension nouvelle de la modélisation permet d'améliorer la qualité d'estimation du modèle. Les modèles combinés choix modal – choix d'horaires sont de meilleure qualité par rapport aux modèles traitant seul le choix modal ou le choix d'horaires.

Dans le milieu interurbain, le contexte d'étude est différent. Les travaux basés sur la modélisation des horaires sont en nombre relativement réduit (Wilson et Nuzzolo, 2008). Les horaires de service sont programmés par les opérateurs de transport. En plus, les horaires programmés ne sont pas cadencés comme dans le cas du système de transport collectif urbain. La question de recherche n'est plus le choix de l'heure de départ, mais plutôt le choix d'horaires parmi les horaires programmés (Cascetta et Coppola, 2016). Les horaires programmés<sup>23</sup> sur le réseau constituent des contraintes temporelles pour les déplacements. La qualité des horaires programmés va impacter le processus de décision du choix modal des voyageurs. Lorsque les horaires sont incohérents aux besoins des voyageurs, ils génèrent des coûts supplémentaires et des pertes d'utilité.

---

<sup>23</sup> La fiche horaires est une donnée publique facilement accessible, ce qui permet aux voyageurs de préparer leurs déplacements au préalable. Les horaires contiennent aussi d'autres informations importantes comme la fréquence de service, l'amplitude de service, la densité de service, etc. Ces données sont accessibles sur le site internet de la SNCF ([www.oui.sncf](http://www.oui.sncf), 2017).

Dans la littérature, la modélisation de la demande en périmètre interurbain a très peu traité la question du choix d'horaires. Selon Wilson et Nuzzolo (2008), il existe deux principales explications à ce manque d'intérêt :

- D'une part, le service du transport collectif en interurbain est de faible fréquence par rapport aux services cadencés. Les voyageurs n'arrivent pas à l'heure aléatoire mais à l'heure qui leur convient. La modélisation des horaires a été développée essentiellement pour expliquer le phénomène de congestion.
- D'autre part, les informations spatio-temporelles sont absentes dans la base des données des enquêtes « voyageurs » standard. Dans une approche désagrégée, la modélisation des horaires nécessite des données précises sur la chaîne complète des déplacements et les contraintes horaires liées aux activités principales à destination (Ben-Akiva et Abou-Zeid, 2013). Les données liées aux heures d'arrivée effectives et aux heures arrivées souhaitées sont rares.

Des solutions alternatives ont été proposées dans plusieurs travaux. Abkowitz (1980) et Small (1982) ont utilisé des heures d'embauche officielles comme l'heure d'arrivée de préférence. L'inconvénient est que cette hypothèse ne concerne que le motif domicile-travail. Small (1999), Wang *et al.* (2015) ont travaillé avec les heures d'arrivée habituelles. L'utilisation de ces données s'accompagne d'hypothèses fortes qui vont mettre en cause les résultats d'estimation.

Malgré ces difficultés, nous pouvons trouver quelques travaux sur la modélisation des horaires dans le milieu interurbain. Nuzzolo *et al.* (2007) ont élaboré un modèle basé sur la modélisation des horaires pour étudier la concurrence entre la voiture, l'avion et le TGV. Les résultats de leurs travaux montrent les effets significatifs des variables liées à l'utilité des horaires pour expliquer le choix modal. Cascetta et Coppola (2016) ont effectué une comparaison entre les modèles avec des indicateurs standard et les indicateurs basés sur les horaires. Ils ont montré une meilleure performance des indicateurs basés sur les horaires pour estimer correctement les effets de la qualité des dessertes. Ces études sont aussi capables d'évaluer les coûts de délais liés aux horaires inadaptés aux besoins de déplacements.

Au lieu d'étudier indépendamment le choix modal et le choix d'horaires, on peut raisonnablement supposer que le processus de décision soit composé du choix modal et du choix d'horaires. Les

travaux existants ont montré de forte corrélation entre ces deux décisions de choix (Bhat, 1998). Ces travaux ont aussi montré la performance des modèles combinés par rapport aux modèles qui traitent séparément le choix modal et le choix d'horaires (Jara Diaz et Guevara, 2003 ; Munizaga *et al.*, 2008). Nurul Habib *et al.* (2009) ont montré que les coefficients de corrélation choix modal-choix d'horaires sont significatifs, ce qui signifie que de nombreux facteurs déterminants n'auraient pas été captés si le choix modal et le choix d'horaires avaient été modélisés séparément.

Le choix d'horaires a été ensuite intégré sur la prévision de la demande. Le Southern California Association of Governments (SCAG, 2003) et Miller *et al.*, (2015) ont proposé de distinguer l'heure de pointe et l'heure creuse dans l'étude du choix modal dans leurs études de cas sur la région Los Angeles et la région Toronto. Ces études ont montré la performance de la modélisation d'horaires pour améliorer la qualité des modèles de prévision.

Du point de vue théorique, nous avons montré que la théorie de l'accessibilité et la notion de coûts des délais sont plus pertinentes que l'approche basée sur la fréquence de service pour analyser la qualité des dessertes. La littérature sur la modélisation des horaires a aussi montré la pertinence des méthodes basées sur ces théories par rapport aux indicateurs standard pour les déplacements interurbains.

Dans ce travail de recherche, nous essayons d'appliquer les coûts de délais de Vickrey (1969) et de travailler sur la modélisation des horaires dans une étude de cas interurbain. Nous proposons différentes solutions pour mieux estimer les effets liés à la qualité des dessertes, tout en étant conscient des difficultés liées à l'accès aux données, nos méthodes seront adaptées à différentes situations et applicables en fonction des données disponibles.

## Conclusion du chapitre 1.3

La qualité des dessertes est un facteur de compétitivité pour les différents modes de transport. La littérature conforme que l'évolution de la qualité des dessertes impacte le choix modal des voyageurs. L'importance de la qualité des dessertes a été montrée par de nombreuses études de modélisation qui prennent en compte la qualité des dessertes comme une variable explicative du

choix modal. La pertinence des indicateurs utilisés est un défi majeur pour les études de modélisation.

Le problème des indicateurs standard comme la fréquence de service et l'intervalle de service dans les études du choix modal réside dans les limites de l'approche basée sur la fréquence. En prenant en compte seulement l'évolution de l'offre de transport, les indicateurs standard ne sont pas suffisamment pertinents. La limite majeure de ces indicateurs tient au fait que les besoins des déplacements en termes d'heures d'arrivée et de départ ne sont pas pris en compte dans l'analyse.

La notion de temps utile à destination contribue à orienter les études vers une approche basée sur le programme d'activités. Basée sur la théorie de l'accessibilité, cette notion fait le lien entre le réseau de transport et les opportunités à la destination. Lorsqu'un mode de transport permet aux voyageurs de rester plus longtemps, l'utilité associée sera plus élevée. Les indicateurs de temps utile à destination sont un outil pour évaluer la qualité des dessertes. Nous supposons le temps minimum nécessaire à destination pour les activités principales. Sous cette hypothèse, la qualité des dessertes est meilleure lorsque les voyageurs disposent de plus de possibilité d'aller-retour sur une journée.

Dans le cadre de la notion de temps utile à destination, nous supposons que les opportunités à la destination sont homogènes. Pourtant, les voyageurs subissent une perte d'utilité lorsqu'ils arrivent au moment où les opportunités ne sont pas disponibles. Le manque de prise en compte des caractéristiques des opportunités à la destination dans l'analyse est le principal inconvénient de cette méthode.

Nous nous interrogeons sur la manière de prendre en compte les caractéristiques des opportunités à la destination. Dans une étude des déplacements interurbains, les horaires programmés vont impacter le programme d'activités des déplacements. Le modèle combiné choix modal – choix d'horaires est adapté pour évaluer la qualité des horaires dans l'analyse de la concurrence entre les différents modes de transport.

Les coûts de délais sont considérés comme la base conceptuelle de modélisation des horaires. Nous mesurons l'utilité des déplacements en fonction des heures d'arrivée effectives et les heures d'arrivée souhaitées, les voyageurs perdent de l'utilité lorsqu'ils arrivent en avance ou en retard. En prenant en compte les besoins des voyageurs en termes d'heures d'arrivée souhaitées, cette

méthode est théoriquement plus pertinente. Suivant cette demande, le besoin de données est aussi plus contraignant.

# Conclusion de la partie 1

Notre sujet de recherche consiste à analyser la concurrence Air-Fer dans le contexte de la mise en service de la LGV SEA. Cette nouvelle LGV réduit le temps de parcours entre Paris et Bordeaux de 3h15 à 2h04. La compétitivité du TGV s'améliore grâce aux effets de la vitesse et qu'il y aura des transferts modaux en faveur du train. L'analyse de la concurrence Air-Fer et le transfert modal de l'avion vers le train est une étape importante de l'évaluation du projet.

Cette première partie consiste d'abord à donner les éléments de base pour comprendre les mécanismes de concurrence, le lien entre la concurrence et les concepts liés aux structures de marché.

Nous adaptons ensuite notre analyse au marché du transport ferroviaire. Les questions de concurrence sont plus compliquées avec notamment la présence des questions de monopole naturel. Il faut préciser les trois différentes formes de concurrence : Open Access, Concurrence intramodale et Concurrence intermodale.

La littérature est riche en ce qui concerne les questions de concurrence Air-Fer, les travaux existants montrent l'évolution de la compétitivité du train grâce au service ferroviaire à grande vitesse. Nous faisons une revue de littérature pour résumer ce qui s'est passé en termes du transfert modal dans le cas des projets de LGV. Les études ont montré que les transferts modaux qui suivent la mise en service de la LGV, se font principalement au détriment de l'avion et en faveur du train, et comment les compagnies aériennes réagissent face à la concurrence. Sur les liaisons où l'avion est toujours capable de concurrencer le train, les compagnies aériennes préfèrent sauvegarder le nombre de vols afin de conserver sa compétitivité.

Les facteurs pour expliquer la concurrence entre l'avion et le train sont nombreux. En adoptant une approche désagrégée, nous arriverons à identifier ces facteurs déterminants et à estimer les effets qui y sont associés. Nous avons présenté les principes du choix modal qui permet d'expliquer les effets de l'évolution de l'offre de transport sur la demande. Selon la littérature, les variables de

déplacements, les variables spatio-temporelles, les variables personnelles des voyageurs et les variables socio-psychologiques sont des facteurs déterminants du choix modal.

La qualité des dessertes appartenant au groupe des variables spatio-temporelles est une variable déterminante du choix modal. Pourtant cette variable est difficile à maîtriser. Les indicateurs standard comme la fréquence de service et l'intervalle de service génèrent des problèmes dans l'analyse du choix modal. Cette question de la pertinence des indicateurs dans l'analyse de la qualité des dessertes a été abordée dans le chapitre 1.3 de cette partie

Le problème de pertinence des indicateurs standard repose essentiellement sur les caractéristiques agrégées de ces indicateurs. Les besoins des voyageurs pour les activités principales à destination ne sont pas pris en compte. La littérature nous montre que l'approche pertinente doit tenir compte les contraintes spatio-temporelles des déplacements et des caractéristiques des opportunités à la destination.

Nous présentons les mesures d'accessibilité qui fournissent un cadre pour élaborer des méthodes pour évaluer la qualité des dessertes. Les mesures d'accessibilité sont capables de mettre en relation la capacité des voyageurs, le système de transport et l'attribution des opportunités à la destination. En particulier, les mesures d'accessibilité spatio-temporelles sont adaptées pour les questions de dessertes. La trajectoire des déplacements est sous des contraintes spatio-temporelles.

En particulier, nous arrivons à démontrer théoriquement les limites des indicateurs standard à l'aide des mesures d'accessibilité spatio-temporelle. Ces mesures nous proposent en même temps des méthodes pour remédier aux problèmes des indicateurs standard. Les indicateurs pertinents devraient prendre en compte les horaires des déplacements choisis des voyageurs et la disponibilité des opportunités à la destination.

Pourtant, il est difficile d'accéder aux données liées aux caractéristiques spatio-temporelles des opportunités à la destination sont difficiles à obtenir. Dans le cadre d'une modélisation de la demande avec l'approche désagrégée, ces données deviennent encore plus rares. Sur ce sujet, la notion de coûts de délais de Vickrey (1969) fournit des méthodes pertinentes qui peuvent être intégrées dans le cadre de la théorie de l'utilité aléatoire. Les besoins des déplacements pour les activités principales sont représentés par les heures d'arrivée souhaitées. Lorsque les horaires programmés ne permettent pas d'arriver aux heures d'arrivée souhaitées, les voyageurs subissent



des pertes d'utilité. Dans la fonction d'utilité des voyageurs, la qualité des dessertes est évaluée en fonction des pertes d'utilité liées aux arrivées en avance et aux arrivées en retard.

Dans cette partie, nous avons présenté le fondement théorique de notre travail de recherche : les mesures d'accessibilité et la notion de coûts de délais. Nous avons montré, à travers les schémas du cadre conceptuel et la revue de littérature, que les indicateurs élaborés à la base de ces deux concepts sont plus pertinents que les indicateurs standard pour analyser la qualité des dessertes dans le cadre d'une étude de la concurrence intermodale.

Dans la partie 2, nous présenterons les méthodes développées avec en référence le cadre théorique posé par ces deux thèmes: les indicateurs de temps utile à destination et la modélisation basée sur les horaires. Ces méthodes ont des caractéristiques différentes et peuvent être appliquées en fonction de la disponibilité des données.

## Deuxième partie :

De la mesure de l'accessibilité à  
l'analyse des effets de la qualité des  
dessertes

## Introduction de la partie 2 :

Le transfert modal peut être considéré comme un changement de comportements des voyageurs en faveur d'un mode de transport alternatif. Il s'agit d'une approche microéconomique basée sur la théorie de l'utilité aléatoire. Les principes du choix modal ont été présentés dans la partie 1.

Dans cette partie, nous présentons les principes des modèles de choix discrets. Les modèles de choix discrets sont utilisés dans les études de comportements de choix modal. Ces modèles s'inscrivent dans le cadre de l'approche probabiliste : ils consistent à estimer la probabilité de choix des voyageurs entre les différents modes de transport alternatifs. Différentes formes des modèles de choix discrets ont été élaborées afin de pouvoir adapter les différentes questions de recherche.

Cette deuxième partie consiste à présenter les méthodes appliquées pour l'évaluation de la qualité des dessertes. Lorsque nous proposons des méthodes, il faut respecter quelques règles afin que les méthodes proposées soient pertinentes. Ben-Akiva et Lerman (1985) ont mis en évidence les règles d'une analyse des comportements de choix des voyageurs. Ce sont des critères standard à respecter lorsque l'on veut proposer des méthodologies pour un travail de modélisation :

- Premièrement, l'étude ne doit pas être fondée que sur des hypothèses mais sur des observations. Nous devons utiliser des données d'enquêtes « voyageurs » pour caler les modèles. Nous cherchons à expliquer les comportements des voyageurs en fonction de leurs préférences déclarées ou révélées.
- Deuxièmement, les modèles utilisés ne peuvent pas être restreints sur un seul cas, ils doivent permettre une application générale. Nous devons proposer une méthodologie traitant notre problématique, qui peut aussi être appliquée dans d'autres études de cas.
- Troisièmement, le modèle choisi doit être opérationnel de sorte que les paramètres et les variables explicatives soient mesurables. Nous devons nous interroger sur le problème d'accès aux données pour caler les modèles.

Nous allons ensuite présenter: les indicateurs de temps utile à destination et le modèle combiné choix modal – choix d’horaires. Ces deux méthodes sont destinées à évaluer les effets liés à la qualité des dessertes sur les comportements de choix modal. Pour chaque méthode, nous vérifions si les règles de Ben-Akiva et Lerman (1985) ont été respectées.

Les indicateurs de temps utile à destination sont plus faciles à appliquer et plus souples en matière des données nécessaires, mais leur application est conditionnée par des hypothèses relativement fortes. Le modèle combiné choix modal – choix d’horaires est théoriquement plus solide, pourtant le type de données nécessaires est une condition relativement contraignante. Dans cette partie, nous allons présenter ces méthodes en soulignant leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans le chapitre 2.1, nous présentons les modèles de choix discrets. Les méthodes que nous élaborons dans ce travail de recherche sont basées sur les principes des modèles de choix discrets.

Dans le chapitre 2.2, nous présentons les deux méthodes: les indicateurs de temps utile à destination et le modèle combiné choix modal – choix d’horaires.

# Chapitre 2.1 : Les principes des modèles de choix discrets

## Introduction du chapitre 2.1

Avec l'approche désagrégée, nous analysons la compétitivité des modes de transport à travers le choix modal des voyageurs. Dans la phase *ex ante* du projet de l'infrastructure de transport, les modèles de choix modal sont fondamentaux et une composante essentielle de la prévision de trafic. Lorsque l'offre de transport évolue, ces modèles permettent d'expliquer l'évolution de la demande de transport.

Nous avons présenté dans le chapitre 1.2 les principes des modèles de choix discrets qui sont basés sur la théorie de l'utilité aléatoire sont développés pour analyser les comportements de choix des individus. Ces modèles qui correspondent à une approche désagrégée disposent de plusieurs avantages :

- Ces modèles sont fondés sur la théorie de l'utilité aléatoire selon laquelle l'utilité d'un mode de transport est une fonction linéaire<sup>24</sup> des variables explicatives. Les coefficients des variables explicatives sont relativement simples à estimer.
- Les coefficients estimés peuvent varier en fonction du mode de transport étudié afin de montrer les effets des variables explicatives sur les différents modes de transport. A titre

---

<sup>24</sup> Une fonction linéaire s'exprime une relation linéaire entre la variable à expliquer et les variables explicatives. La forme de la fonction linéaire est  $f(x) = \beta x$  où  $\beta$  est un vecteur de coefficients qui peut-être un nombre entier, décimal ou fractionnaire. Sur un graphique, une fonction linéaire se représente une droite passant par l'origine du repaire.

d'exemple, les coefficients liés aux temps de parcours et aux prix payés sont différents pour l'avion et le train.

- Ces modèles permettent de générer des ratios synthétiques comme la valeur du temps. Les calculs se font à travers le rapport entre les coefficients des variables explicatives et les coefficients des prix payés. Ces ratios nous donnent des valeurs monétaires liées à l'évolution de l'offre de transport, ce sont des outils importants d'aide à la décision.
- Les caractéristiques des personnes peuvent être intégrées dans le modèle, ce qui améliore la qualité du modèle pour expliquer les comportements individuels des voyageurs.

Nous faisons un rappel de quelques principes de la théorie de l'utilité aléatoire de McFadden (1981) que nous avons présenté dans le chapitre 1.2 :

- Les voyageurs disposent d'une fonction d'utilité composée par une composante déterministe et un terme aléatoire.
- La composante déterministe est présentée par une fonction d'utilité indirecte " $V$ " au sein de laquelle on trouve des variables explicatives observables et les paramètres qui y sont associés.
- Le terme aléatoire est ajouté afin de prendre en compte les aléas et les facteurs non observables.

La solution des modèles de choix discrets réside dans les hypothèses de distribution des termes aléatoires " $\varepsilon$ ". Lorsque les variables déterminantes du choix modal sont identifiées, les paramètres sont estimés, nous sommes capables d'expliquer le choix modal des voyageurs et de prévoir la probabilité de leur choix dans un nouveau contexte d'offre de transport.

Les hypothèses sur la distribution des termes aléatoires sont importantes dans le processus d'estimation des modèles de choix discrets. En fonction des hypothèses sur la distribution des termes aléatoires, nous distinguons les différentes formes du modèle de choix discrets.

Dans la section 2.1.1, nous présentons les modèles standard de la famille des modèles de choix discrets : les modèles Probit et Logit. Ce sont les modèles les plus souvent appliqués, mais les hypothèses de ces modèles sont fortes. Nous présentons également la méthode du maximum de vraisemblance qui servira pour estimer les modèles de choix discrets. Dans la section 2.1.2, nous

présentons les modèles dérivés par rapport aux modèles standard, qui sont capables de relâcher les hypothèses IID du modèle Logit.

## Section 2.1.1 : Les modèles de choix discrets standard : le modèle Probit et le modèle Logit

Les modèles de choix discrets sont des modèles de demande désagrégés. Pour l'étude du choix modal, ils contribuent à expliquer les comportements de choix des voyageurs au niveau individuel. Les différentes formes du modèle appartenant à cette famille de modèle ont des caractéristiques distinctes et sont basées sur des hypothèses différentes. Dans cette section, nous comparons les avantages et les inconvénients de ces modèles, ce qui nous aidera pour expliquer par la suite notre choix de modèle.

### 2.1.1.1 - *Le modèle Logit*

Le modèle Logit a été élaboré par Luce (1959) et Marschak (1960), ce modèle est basé sur l'hypothèse de la distribution Gumbel des termes aléatoires " $\varepsilon$ ". La fonction de distribution Gumbel se présente sous forme d'une distribution logistique avec une fonction de calcul fermée. La distribution de la loi Gumbel est une distribution similaire à celle de la loi normale.

La fonction de répartition de la loi Gumbel s'écrit :

$$F(\varepsilon) = e^{-e^{-\mu(\varepsilon-\eta)}}, \quad \mu > 0$$

*avec*

$\mu$  : *le paramètre d'échelle*

$\eta$  : *le paramètre de position*

Si on suppose une distribution Gumbel centrée avec les paramètres " $(0, \mu)$ ", la fonction de répartition devient :

$$F(\varepsilon) = \frac{1}{1 + e^{-\mu\varepsilon}}$$

La probabilité de choisir l'alternative " $i$ " par rapport à l'alternative " $j$ " s'écrit de la manière suivante (McFadden, 1981) :

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{\mu(v_j - v_i)}} = \frac{e^{\mu v_i}}{e^{\mu v_i} + e^{\mu v_j}}$$

Dans le cas du choix multinomial parmi l'ensemble des alternatives " $J$ ", la probabilité de choix du modèle Logit multinomial s'écrit :

$$P_i = \frac{e^{\mu v_i}}{\sum_{j \in J} e^{\mu v_j}}, \quad i, j \in \{1 \dots J\}, \quad i \neq j$$

Dans le cadre du modèle de choix modal, l'objectif consiste à identifier les facteurs déterminants du choix modal et à estimer les effets qui y sont associés. Cette équation peut être transformée pour retrouver la formulation de la fonction d'utilité qui est composée par les variables explicatives du modèle. La formule du modèle Logit peut être transformée de la manière suivante :

$$\ln \left[ \frac{P_i}{1 - P_i} \right] = \sum_{k \in K} \beta_k X_{ki}$$

avec

$k$  :  $k$  - ième variable explicative



$K$  : l'ensemble des variables explicatives

$\beta$  : les paramètres à estimer

$X$  : la variable explicative

Nous avons dans la partie gauche de cette formulation l'équation " $\frac{P_i}{1-P_i}$ ". Il s'agit du rapport de probabilité de choisir le mode de transport " $i$ " par rapport à la probabilité de choisir les autres alternatives. On définit ce rapport de probabilité de choix par la notion de « Odds Ratio ». Dans la partie droite de cette formulation, nous retrouvons la fonction d'utilité indirecte de McFadden. Les variables explicatives de la fonction d'utilité indirecte sont dans une fonction linéaire permettent d'expliquer le « Odds Ratio » sous la forme logarithmique.

Les variables explicatives de la fonction d'utilité n'ont pas besoin de respecter la loi normale multidimensionnelle de Gauss. Il n'est pas nécessaire de vérifier l'hypothèse de normalité des variables explicatives étudiées. Toutefois, si la distribution des variables explicatives respecte la loi normale, les résultats de la régression logistique sont relativement plus stables (Ben-Akiva et Lerman, 1985).

Le principal inconvénient du modèle Logit repose sur les hypothèses IID (Indépendant et Identiquement Distribués) : les termes aléatoires de la fonction d'utilité sont indépendants et identiquement distribués. Il est important de bien comprendre ces hypothèses pour que les résultats d'estimation ne soient pas biaisés.

- Les termes aléatoires des alternatives sont indépendants, ils ne doivent pas être corrélés entre eux. L'exemple « Red and Blue buses » de Luce (1959) illustre le problème de non indépendance des termes aléatoires. Le bus rouge et le bus bleu sont considérés comme deux alternatives dans le modèle alors que pour les utilisateurs, ces deux bus sont considérés comme un seul mode de transport. La probabilité calculée par le modèle est donc biaisée.
- Les termes aléatoires vont varier de manière identique pour les alternatives. Le paramètre d'échelle de la distribution Gumbel doit être identique pour toutes les alternatives. A titre d'exemple, pour les facteurs qualitatifs non observables comme le confort et la sécurité, les effets liés à ces variables à travers les différents modes de transport sont supposés indifférents pour les voyageurs.

En pratique, nous confrontons fréquemment des situations dans lesquelles les hypothèses IID ne sont pas respectées. Nous présentons dans la section suivante les méthodes permettant de relâcher toutes ou une partie de ces hypothèses IID.

La méthode du maximum de vraisemblance est utilisée pour caler les modèles Logit et Probit. Cette méthode vise à trouver la valeur des paramètres " $\beta$ " qui maximise la probabilité d'estimer correctement le choix qui a été fait. Ci-dessous, nous allons résumer les principes de la méthode du maximum de vraisemblance.

### 2.1.1.2 - Le modèle Probit

Dans le cadre des modèles de choix discrets, l'hypothèse la plus solide et à priori consiste à supposer une distribution normale des termes aléatoires " $\varepsilon$ ". Le modèle de choix discrets basé sur l'hypothèse de la loi normale centrée réduite est nommé le modèle Probit. Le modèle Probit a émergé avec les travaux de Thurstone (1927). La première application du modèle Probit en économie des transports se trouve dans les travaux de Lisco (1967).

Par hypothèse du modèle Probit, les termes aléatoires de la fonction d'utilité correspondent à la somme des variables non observables et indépendantes, suivant une distribution normale " $\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ ". La probabilité de choisir l'alternative " $i$ " par rapport à l'alternative " $j$ " s'écrit :

$$P_i = \Phi\left(\frac{V_i - V_j}{\sigma}\right) \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{V_i - V_j} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right) d\varepsilon$$

avec

$P_i$  : la probabilité de choisir le mode  $i$

$\Phi(\cdot)$  : une distribution normale cumulative

$V$  : la fonction d'utilité indirecte

$\varepsilon$  : le terme aléatoire

$\sigma$  : les écarts types du terme aléatoire  $\varepsilon$

La valeur des écarts types du terme aléatoire " $\sigma$ " est strictement positive. On suppose le plus souvent que " $\sigma = 1$ ", ce qui suppose une distribution suivant une loi normale centrée réduite des écarts des termes aléatoires " $\varepsilon$ ".

Dans le cas de choix multiple, on suppose que les termes aléatoires " $\varepsilon \in \{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_j\}$ " sont distribués selon la loi normale multivariée de moyenne nulle et que la fonction d'utilité " $U$ " et l'écart des termes aléatoires sont dans une matrice de dimension " $J * 1$ ". La matrice variance-covariance des termes aléatoires est donc dans une dimension de " $J * J$ ". La distribution des termes aléatoires qui suit la loi normale s'écrit : " $\varepsilon \sim N(0, \Sigma_\varepsilon)$ ". Les résultats du modèle Probit multinomial sont donc sous forme intégrale de " $J - 1$ ". La probabilité de choisir le mode du transport  $i$  s'écrit de manière suivante :

$$P_i = \int_{-\infty}^{V_1 - V_i} \dots \int_{-\infty}^{V_j - V_i} N(\varepsilon_1 - \varepsilon_i, \dots, \varepsilon_j - \varepsilon_i; \Sigma_\varepsilon^*) d(\varepsilon_1 - \varepsilon_i, \dots, \varepsilon_j - \varepsilon_i),$$

$$\forall i, j \in \{1, \dots, J - 1\}, i \neq j$$

avec

$J$  : l'ensemble des alternatives de transport

Selon la formulation du modèle Probit, la probabilité calculée se présente sous la forme d'une intégrale. Par conséquent, l'estimation du modèle Probit devient compliquée lorsqu'il y a plusieurs alternatives de choix, les résultats sont difficiles à interpréter. L'estimation de la matrice de variance-covariance est aussi difficile puisque la taille de la matrice est une fonction croissante du nombre d'alternatives. Ce sont les principaux inconvénients du modèle Probit.

Le modèle Logit propose une fonction de calcul plus facile à appliquer en supposant que la distribution des termes aléatoires respecte la loi de Gumbel. Le processus d'estimation et d'interprétation des résultats devient plus simple tout en gardant une qualité d'estimation similaire. Le modèle Logit est le modèle le plus souvent utilisé dans les travaux pour étudier le choix modal.

### 2.1.1.3 - La méthode du maximum de vraisemblance

Ben-Akiva et Lerman (1985) ont appliqué la méthode de maximum de vraisemblance avec leurs travaux d'application de la modélisation de demande de transport. Selon eux, la fonction de vraisemblance dans le cadre du choix modal multiple s'écrit :

$$L = \prod_{n=1}^N \prod_{i \in J} P_{in}^{y_{in}}$$

avec

$L$  : Vraisemblance (Likelihood)

$N$  : le nombre total des individus  $n$  dans l'échantillon

$$y_{in} = \begin{cases} 1, & \text{si l'individu } n \text{ choisi l'alternative } i \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Afin de simplifier son application, on utilise le plus souvent le logarithme de cette fonction de vraisemblance, car la fonction de log-vraisemblance est croissante, ce qui facilite le processus de maximisation. Les résultats du maximum de vraisemblance sont ceux de la maximisation du log-vraisemblance, la valeur des paramètres estimés n'est pas impactée. La fonction de log-vraisemblance s'écrit :

$$LL = \sum_{n=1}^N \sum_{i \in J} y_{in} \ln P_{in}$$

avec

$LL$  : log de vraisemblance (log likelihood)

Les résultats de la maximisation de log de vraisemblance se trouvent à l'optimum de la condition de premier ordre (C.P.O) :

$$C.P.O : \quad \frac{\partial LL}{\partial \beta} = \sum_{n=1}^N \sum_{i \in J} \frac{y_{in}}{P_{in}} \frac{\partial P_{in}}{\partial \beta} = 0$$

McFadden (1974) a montré que la condition du second ordre de la fonction de log de vraisemblance donne lieu à une valeur négative. Le maximum de log de vraisemblance est donc une fonction concave qui donnera une solution unique.

Il existe des logiciels statistiques qui permettent d'accélérer le processus de calcul de la maximisation de vraisemblance. Nous choisissons le logiciel R dans notre partie expliquée pour caler nos modèles de choix discrets<sup>25</sup>. Ce logiciel, comme la plupart des logiciels de calcul statistique, utilise l'algorithme de Newton-Raphson<sup>26</sup> pour effectuer la maximisation de log de vraisemblance.

## Section 2.1.2 : Les modèles dérivés pour relâcher les hypothèses IID

Le modèle Logit est le plus souvent appliqué pour étudier le choix modal des voyageurs. Nous préférons ce modèle principalement parce qu'il est plus facile à estimer et donne des résultats interprétables. Pourtant les hypothèses IID restent un inconvénient majeur. Des formes dérivées de

---

<sup>25</sup> Nous détaillerons les packages utilisés et les références bibliographiques dans la chapitre 2.2.

<sup>26</sup> L'algorithme Newton-Raphson adopte un processus itératif de l'étape  $i$  à l'étape  $i+1$  en utilisant la formule suivante

$$\beta^{i+1} = \beta^i - (\partial LL / \partial \beta \partial \beta')^{-1} * \partial LL / \partial \beta$$

*Avec*

$\beta$  : le vecteur des paramètres

$i$  : l'étape d'itération

modèles de choix discrets existent qui permettent de relâcher toutes ou une partie des hypothèses IID.

### 2.1.2.1 - Les modèles GEV (*Generalized Extreme Value*)

La famille des modèles GEV est le plus souvent utilisée pour modéliser les comportements de choix des voyageurs (De Jong *et al.*, 2003). Dans le cadre des modèles GEV, nous supposons que la distribution du terme  $\varepsilon$  suit une distribution de Gumbel. Les avantages du modèle Logit en termes de structure du modèle sont conservés.

Selon la formule générique des modèles GEV présentée par Ben-Akiva et Lerman (1985), la probabilité de choisir l'alternative " $i$ " s'écrit de la manière suivante :

$$P_i = \frac{e^{V_i + \ln G_i}}{\sum_{j=1}^J e^{V_j + \ln G_j}}, \quad i, j \in J, i \neq j$$

*avec*

$P_i$  : la probabilité de choisir l'alternative  $i$

$J$  : l'ensemble des alternatives de transport

$V$  : la fonction d'utilité indirecte

$G$  : une fonction non négative et homogène de degré  $\mu$

La fonction " $G$ " est essentielle dans l'équation des modèles GEV qui permet de gérer une éventuelle corrélation entre les alternatives. Cette fonction est non négative, homogène et de degré " $\mu$ ". Elle est composée par une fonction exponentielle des fonctions d'utilité indirectes. Les hypothèses sur la distribution de la fonction " $G$ " permettent de gérer les différentes structures de corrélation des alternatives, car la probabilité de choisir une alternative dépend non seulement de sa fonction d'utilité indirecte mais aussi des fonctions d'utilité des autres alternatives.

Lorsque nous supposons que toutes les alternatives sont indépendantes, les termes aléatoires sont indépendants et identiquement distribués. La probabilité de choix respecte les hypothèses IID. La fonction "G" s'écrit de manière suivante :

$$G = \sum_{j=1}^J y_j^\mu$$

avec

$y$  : la fonction d'utilité indirecte sous forme exponentielle

$\mu$  : le paramètre d'échelle de la loi Gumbel

La probabilité de choix sous l'hypothèse IID s'écrit :

$$P_i = \frac{e^{V_i} * \mu * e^{V_i(\mu-1)}}{\mu * \sum_{j=1}^J e^{\mu V_j}}$$

$$= \frac{e^{\mu V_i}}{\sum_{j=1}^J e^{\mu V_j}}$$

Nous obtenons la formule du modèle Logit Multinomial Standard (MNL-Multinomial Logit model). Donc, par définition, le modèle Logit standard est un cas spécifique appartenant aux modèles GEV.

L'intérêt majeur des modèles GEV est leur capacité à relâcher les hypothèses IID. Dans les études du choix modal, le problème le plus fréquemment rencontré est la corrélation des alternatives. C'est le cas lorsque deux alternatives de transport appartiennent à un même groupe. Le modèle Logit emboîté (NL-Nested Logit model) permet partiellement de résoudre ce problème. Il suppose que les voyageurs choisissent d'abord le groupe des modes de transport et ensuite le mode de transport au sein du groupe. Lorsque le modèle doit traiter la question du choix multinomial en ayant la corrélation des alternatives, le modèle NL améliorera la qualité d'estimation par rapport au modèle standard Logit MNL (Koppelman et Bhat, 2006).

Le modèle NL est capable de gérer la structure de corrélation du modèle grâce à la fonction "G" des modèles GEV. Deux paramètres d'échelle sont ajoutés afin de gérer la structure du modèle à deux niveaux. L'hypothèse de la fonction "G" du modèle NL est présentée ci-dessous.

$$G = \sum_{m=1}^M \left( \sum_{j \in I} y_j^{\mu_m} \right)^{\mu/\mu_m}, \quad 0 < \mu/\mu_m \leq 1$$

avec

$m$  : le groupe des alternatives

$M$  : l'ensemble des groupes d'alternatives

$I$  : l'alternative dans le groupe  $m$

$\mu_m$  : le paramètre structurel du groupe  $m$

Le ratio " $\mu/\mu_m$ " indique la corrélation entre les alternatives qui appartiennent au même groupe. Il correspond au paramètre d'échelle du niveau supérieur de modèle. Le ratio " $\mu$ " correspond au paramètre d'échelle du niveau inférieur de modèle.

La probabilité de choix du modèle NL s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{aligned} P_i &= P(i|m)P(m) \\ &= \frac{e^{V_i(\mu/\mu_m)} \left( \sum_{j \in I} e^{\mu_m V_j} \right)^{\mu/\mu_m - 1} * \mu_m e^{V_i(\mu_m - 1)}}{\mu * \sum_{m=1}^M \left( \sum_{j \in I} e^{\mu_m V_j} \right)^{\mu/\mu_m}} \\ &= \frac{e^{\mu_m V_i}}{\sum_{j \in I} e^{\mu_m V_j}} * \frac{\left( \sum_{i \in I} e^{\mu_m V_i} \right)^{\mu/\mu_m}}{\sum_{m=1}^M \left( \sum_{j \in I} e^{\mu_m V_j} \right)^{\mu/\mu_m}} \end{aligned}$$

Le modèle NL est considéré comme un modèle à deux niveaux. Le choix du groupe des modes de transport est au niveau supérieur, le choix du mode est au niveau inférieur. Ce modèle permet de gérer la corrélation entre les différents groupes d'alternatives. Cela renvoie au un problème de corrélation intergroupe. Dans cette situation, les alternatives appartenant aux différents groupes



doivent être indépendantes. Lorsqu'une alternative appartient à deux ou plusieurs groupes d'alternatives, c'est ce que nous appelons la corrélation intra-groupe, alors le modèle NL ne peut plus gérer le problème de corrélation dans le processus d'estimation du modèle.

Dans le cas de la corrélation intra-groupe, la structure de corrélation du modèle devient complexe. Le modèle Logit Emboîté Croisé (CNL-Cross Nested Logit) est une solution pertinente pour gérer la structure de corrélation en prenant en compte la corrélation intra-groupe. Ce modèle dérivé propose une structure de corrélation plus flexible que le modèle MNL et le modèle NL.

Small (1987) était le premier à proposer la formulation du modèle CNL. Le modèle est connu sous le nom du modèle GEV ordonné (Ordered GEV model). La formule généralement acceptée du modèle CNL est celle de Ben-Akiva et Bierlaire (1999). Ils ont réussi à démontrer la formule du modèle CNL à travers la formule standard des modèles GEV. Selon eux, la fonction "G" du modèle GEV doit s'écrire de la manière suivante :

$$G = \sum_{m=1}^M \left( \sum_{j=1} \alpha_{jm} y_j^{\mu_m} \right)^{\mu/\mu_m}, \quad 0 \leq \alpha_{jm} \leq 1$$

avec

$\alpha_{jm}$  : un paramètre d'allocation de l'alternative  $j$  dans le groupe  $m$

$\mu_m$  : le paramètre structurel du groupe  $m$

$y_j$  : la fonction d'utilité indirecte sous forme exponentielle

Le paramètre d'allocation " $\alpha_{jm}$ " indique le pourcentage que les alternatives appartiennent à chaque groupe. La somme des paramètres " $\alpha_{jm}$ " doit être égale à 1. Si nous supposons que le paramètre d'allocation de l'alternative " $i$ " dans le groupe " $m$ " est égal à 0, alors l'alternative " $i$ " n'appartient pas au groupe " $m$ ".

La probabilité du modèle CNL s'écrit de manière suivante :

$$P_i = \sum_m P(i|m)P(m)$$

$$= \sum_m^M \left( \frac{\alpha_{jm} e^{\mu_m V_i}}{\sum_{j \in I} \alpha_{jm} e^{\mu_m V_j}} * \frac{(\sum_{i \in I} \alpha_{jm} e^{\mu_m V_i})^{\mu/\mu_m}}{\sum_{m=1}^M (\sum_{j \in I} \alpha_{jm} e^{\mu_m V_j})^{\mu/\mu_m}} \right)$$

Le paramètre d'échelle de la loi Gumbel " $\mu$ " n'est pas identifiable, la procédure habituelle est de fixer une valeur appropriée " $\mu$ " égale à 1. L'étape importante de l'estimation du modèle CNL consiste à trouver la valeur des paramètres structurels des groupes " $\mu_m$ ". Le ratio " $\mu/\mu_m$ " indique la corrélation entre les alternatives.

L'avantage majeur de ces modèles GEV est qu'ils conservent la forme fermée (closed-form models) de la fonction du modèle. Ils conservent donc les avantages du modèle Logit standard ce qui explique leur application dominante dans les travaux de modélisation de la demande de transport. Pourtant, ces modèles ne sont pas capables de gérer l'hétérogénéité des comportements.

Ces dernières années, les modèles GEV ont été fréquemment utilisés dans la modélisation des horaires. Cascetta et Papola (2003) ont effectué une comparaison entre les différents modèles GEV sur l'étude de cas italien pour expliquer le choix modal et le choix d'horaires. Leurs résultats montrent que le modèle CNL est meilleur que les modèles NL et MNL à 98 % de degré de confiance. Sur l'étude de cas anglais, Hess et Polak (2006) ont montré que le modèle CNL est significativement plus performant que le modèle MNL et les modèles NL pour expliquer conjointement le choix modal, le choix d'itinéraire et le choix du mode d'accès. Ding *et al.* (2015) ont travaillé sur la métropole de Washington pour expliquer le choix modal et le choix de l'heure de départ. Leurs résultats montrent aussi que le modèle CNL est statistiquement plus performant que le modèle MNL et le modèle NL. Ces études ont montré que lorsque nous travaillons sur la question de choix modal et choix d'horaires, la corrélation intra-groupe est présente. Le modèle CNL est statistiquement plus performant que les modèles MNL et NL.

Nous avons indiqué que la plupart des études de modélisation des horaires traite les questions de la congestion en urbain. Dans notre étude de cas, nous allons comparer la qualité d'estimation des différents modèles GEV pour les transports collectifs interurbains.

Par ailleurs, nous allons aussi tester les résultats du modèle Logit Multinomial Mixte (MMNL). Ce modèle est aussi une solution efficace pour relâcher les hypothèses IID. Il a été développé dans la

fin des années 90 et a rapidement montré sa pertinence pour traiter les questions de comportements de déplacements.

### 2.1.2.2 - *Les principes du modèle MMNL (Mixed Multinomial Logit)*

Le modèle Logit Multinomial Mixte (MMNL) est le modèle qui permet de relâcher les hypothèses IID et en même temps de gérer le problème d'hétérogénéité des voyageurs. Ce modèle porte aussi le nom de « modèle avec des coefficients aléatoires ». Le principe du modèle MMNL consiste à faire varier les coefficients du modèle entre les différents décideurs. De ce fait, ce modèle prend en compte les préférences différentes des voyageurs dans leur processus de choix modal. Il a été créé sur la base de la méthode de simulation des comportements (Stern, 1997).

Les premières réflexions sur le modèle MMNL ont débuté dans les travaux de Boyd et Mellman (1980) et McFadden (1984). Ce modèle commence à devenir populaire à la fin des années 90. Les principales caractéristiques du modèle MMNL ont été résumées dans les travaux de McFadden et Train (2000), Hensher et Greene (2002), ces auteurs ont réussi à montrer la pertinence de ce modèle pour relâcher les hypothèses IID du modèle Logit.

Ce modèle est aussi performant pour traiter les questions du choix conjoint. Bhat (1998) a développé un modèle MMNL pour expliquer le choix modal et le choix de l'heure de départ pour la région de San Francisco Bay aux Etats-Unis. Les résultats de son étude montrent que le modèle MMNL permet une meilleure qualité d'estimation par rapport au modèle standard MNL. De Jong *et al.* (2003) ont travaillé sur la même problématique pour les villes des Pays-Bas. Après avoir comparé les résultats d'estimation des modèles MNL, NL et MMNL, ils ont montré que la qualité d'estimation du modèle MMNL est meilleure pour expliquer les comportements de choix modal – choix de l'heure de départ. Börjesson (2008) a utilisé le modèle MMNL pour étudier le phénomène de congestion dans la ville de Stockholm. Son travail a montré l'utilité du modèle MMNL pour gérer la corrélation des alternatives de transport et le problème d'hétérogénéité des heures de départ. L'estimation du modèle MMNL consiste à considérer les coefficients comme des variables aléatoires. Sur la base du modèle Logit standard MNL, nous supposons un vecteur des coefficients

aléatoires " $\eta$ " avec une fonction de distribution cumulative " $f(\eta; \Omega)$ ", " $\Omega$ " est un paramètre fixe de la fonction de distribution. Les coefficients " $\eta$ " peuvent prendre différentes formes de distribution comme la distribution normale, log-normale, uniforme ou triangulaire.

$$P'(\eta_i) = \frac{e^{(\beta' x_{in} + \eta_i)}}{\sum_{j \in J} e^{(\beta' x_{jn} + \eta_j)}}$$

avec

$P'(\eta_i)$  : la probabilité du  $\eta_i$  avec le modèle MNL

$\eta$  : un vecteur des coefficients aléatoires

Si le vecteur des variables explicatives " $x_i$ " contient des variables spécifiques associées à chaque alternative étudiée, les effets spécifiques aux alternatives sont montrés par les coefficients aléatoires " $\beta' + \eta_i$ ". Les coefficients aléatoires " $\eta_i$ " permettent de gérer la corrélation entre les différentes alternatives. La matrice de covariance du modèle MMNL prend en compte la corrélation des variables explicatives entre les alternatives. Grâce à ce vecteur des coefficients aléatoires complémentaire " $\eta$ ", le modèle MMNL est capable de gérer les structures de corrélation plus complexes. La probabilité de choix du modèle MMNL s'écrit de manière suivante :

$$P_i = \int P'(\eta_i) f(\eta_i | \Omega) d\eta_i$$

avec

$\Omega$  : un paramètre fixe de la distribution de  $\eta_i$

La formule du modèle MMNL est sous forme d'intégrale. Le vecteur des paramètres " $\Omega$ " est fixé par hypothèse, la fonction de distribution " $\eta$ " est générée par une méthode de tirage au sort. Le plus souvent, la probabilité " $P'(\eta_i)$ " est calculée par la méthode de simulation dite de Monte Carlo

(Stern, 1997). Celle-ci correspond à la moyenne des probabilités calculées à l'issue de nombreux tirages<sup>27</sup>.

L'avantage du modèle MMNL est qu'il est capable de gérer une structure de corrélation plus complexe en relâchant les hypothèses IID. Par ailleurs, en adoptant la méthode de simulation dans le processus de maximisation de la vraisemblance, ce modèle permet de traiter le problème d'hétérogénéité des observations. La formule du modèle est sous forme d'intégrale, l'estimation du modèle prend en effet du temps et les résultats sont difficiles à interpréter.

En pratique, le modèle MMNL est considéré comme le plus avancé pour gérer les problèmes de corrélation entre les alternatives et d'hétérogénéité. Nous allons tester le modèle MMNL pour notre travail et comparer ses résultats avec ceux des modèles MNL, NL et CNL. L'objectif de cette comparaison consiste à trouver le modèle le plus adapté pour notre étude de cas.

## Conclusion du chapitre 2.1

Les modèles de choix discrets sont adaptés aux études des comportements de choix modal des voyageurs. Dans une approche désagrégée, les modèles de choix discrets expliquent la probabilité de choix d'un mode de transport par rapport aux modes de transport alternatifs. Les erreurs d'observation et les facteurs non observés sont gérés par les hypothèses de distribution d'un terme aléatoire de la fonction d'utilité des voyageurs. La qualité d'estimation du modèle s'améliore avec cette approche probabiliste.

Parmi cette famille des modèles de choix discrets, les études du choix modal ont le plus souvent choisi les modèles Logit. Ces modèles sont plus faciles à caler, les résultats sont plus faciles à

---

<sup>27</sup>

$$SP_i = (1/R) \sum_{r=1}^R P'(\eta_{ir})$$

*avec*

*SP<sub>i</sub> : la probabilité de choisir le mode de transport i par la méthode de simulation*

*R : le nombre total de tirages*

*r : le numéro de tirage*

interpréter. Les modèles Logit sont basés sur l'hypothèse de distribution de Gumbel qui est une distribution similaire à la distribution normale. Les résultats d'estimation ont souvent une qualité d'estimation équivalente que les modèles Probit mais plus facile à appliquer. Pourtant, le respect des hypothèses IID sont des contraintes majeures pour les modèles Logit.

En pratique, nous avons à travailler souvent avec des situations où les alternatives sont corrélées. Nous avons besoin des modèles plus sophistiqués pour gérer des structures de modèles complexes. Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles dérivés des modèles Logit: les modèles de GEV et le modèle de MMNL. Ces modèles sont capables de relâcher les hypothèses IID et en même temps de conserver les avantages des modèles Logit.

Dans notre partie consacrée à l'étude de cas, nous allons tester les différents modèles de choix discrets. Le choix du modèle a été effectué par rapport aux caractéristiques de notre sujet et aux questions de corrélation des alternatives que nous avons rencontrées. L'objectif de ce travail de recherche consiste aussi à trouver le modèle le plus adapté à notre étude.

Les modèles de choix discrets contribuent à expliquer la probabilité de choix entre les modes de transport, lorsque l'offre d'un mode de transport s'améliore, la probabilité de choix devient plus élevée. L'estimation de la probabilité de choix est effectuée en comparant les fonctions d'utilité des différents modes de transport. Le processus d'estimation consiste à identifier les variables explicatives déterminantes et à estimer les effets de ces variables sur le choix modal.

La pertinence des indicateurs utilisés est essentielle si nous souhaitons estimer correctement la probabilité de choix des voyageurs. Nous avons évoqué le problème de pertinence des indicateurs standard pour l'évaluation de la qualité des dessertes. Dans le cadre des modèles de choix discrets, les indicateurs seront utilisés comme des variables explicatives de la fonction d'utilité des voyageurs. Lorsque les indicateurs sont pertinents, ils apporteront des améliorations pour mieux expliquer les comportements de choix des voyageurs.

Dans le chapitre 2.2, nous allons nous concentrer sur les variables explicatives des modèles de choix discrets. Nous proposerons des indicateurs plus performants afin de mieux prendre en compte la qualité des dessertes dans le processus de décision du choix modal. Par ailleurs, nous proposerons des structures des modèles plus adaptées à notre problématique de recherche. Nous présenterons nos méthodologies de recherche dans le chapitre 2.2.



# Chapitre 2.2 : L'analyse du choix modal basée sur le programme d'activités et les opportunités à destination

## Introduction du chapitre 2.2

Nous avons présenté les limites des indicateurs standard : fréquence de service et l'intervalle de service dans les travaux de modélisation du choix modal (section 1.3.1). Nous nous interrogeons maintenant sur la question de la pertinence des indicateurs pour évaluer les effets de la qualité des dessertes.

Dans ce chapitre, les méthodologies que nous proposons sont fondées sur la théorie de l'accessibilité et l'approche basée sur le programme d'activités. Nos méthodes sont capables d'apporter des informations complémentaires aux travaux de modélisation ou de remplacer les indicateurs standard par des indicateurs plus pertinents afin d'améliorer la qualité d'estimation des modèles de choix modal.

Les deux méthodes que nous proposons pour mieux maîtriser les effets liés à la qualité des dessertes sont :

- La première méthode consiste à constituer des indicateurs basés sur la notion de temps utile à destination. L'objectif est de proposer des indicateurs pertinents qui soient capables de prendre en compte la chaîne complète des déplacements et les contraintes liées aux horaires programmés.

Nous verrons que cette méthode ne nécessite pas un changement de la structure du modèle et qu'elle est relativement simple à appliquer. Ainsi, cette méthode demande moins de



données, elle contribue essentiellement à apporter des informations complémentaires liées à l'amplitude d'horaires pour mieux expliquer les comportements de choix modal des voyageurs. Toutefois, cette méthode ne permet pas de prendre en compte les caractéristiques des opportunités à la destination.

- La deuxième méthode est la modélisation combinée du choix modal – choix d'horaires. Cette méthode est basée sur la notion de coûts de délais, donc s'inscrit dans le cadre d'une approche désagrégée. Les horaires programmés des différents modes de transport sont évalués en fonction des heures d'arrivées souhaitées des voyageurs.

Par rapport à la première méthode, cette méthode a l'avantage de pouvoir prendre en compte les caractéristiques des opportunités à la destination mais les contraintes en matière des données sont plus importantes. La littérature nous a montré la pertinence de la modélisation combinée par rapport aux modèles traitant séparément les questions du choix modal et du choix d'horaires.

Ces méthodes sont spécifiquement conçues pour évaluer la compétitivité des modes de transports dans le nouveau contexte de la concurrence intermodale. Nous allons traiter la question de la qualité des dessertes qui est très peu étudiée dans la modélisation de la demande en interurbain. Ces méthodes nous aideront à mieux expliquer les comportements de choix modal des voyageurs et nous permettront d'évaluer l'évolution des parts de marché du train et de l'avion.

## Section 2.2.1 : Les indicateurs de temps utile à destination

Nous avons présenté le fondement théorique de la notion de temps utile à destination dans la section 1.3.2. Pour un aller-retour, le temps utile à destination égale à l'écart entre l'heure de départ du trajet de retour et l'heure d'arrivée à la destination. Les enquêtes « voyageurs » nous fournissent des données sur le temps d'accès à la gare et le temps lié aux derniers kilomètres qui permettent d'une analyse au niveau désagrégé.

L'économie des transports considère généralement que les transports sont des coûts que les voyageurs doivent supporter pour réaliser des activités principales à destination. Nous avons démontré que le temps utile à destination est négativement corrélé avec le temps de transport généralisé et positivement corrélé avec l'accessibilité. Les voyageurs cherchent à maximiser le temps utile à destination dans le but de maximiser l'utilité des déplacements. Le temps utile à destination est un élément important à prendre en compte dans la modélisation de la demande de transport.

Dans la figure 11 ci-dessous, nous sommes capables de montrer le temps maximum disponible à destination pour tous les horaires d'aller-retour dans la journée sur la liaison Paris-Bordeaux, avec une présentation graphique en trois dimensions. L'axe x – « Départ de Bordeaux » correspond aux horaires pour les trains au départ de Bordeaux et qui arrivent à Paris. L'axe y – « Retour à Bordeaux » correspond aux horaires programmés pour les trains de Paris à Bordeaux. En fonction de ces deux axes, nous disposons des informations nécessaires pour calculer le temps utile à destination. Les résultats sont montrés sur l'axe z – « Temps à destination ».

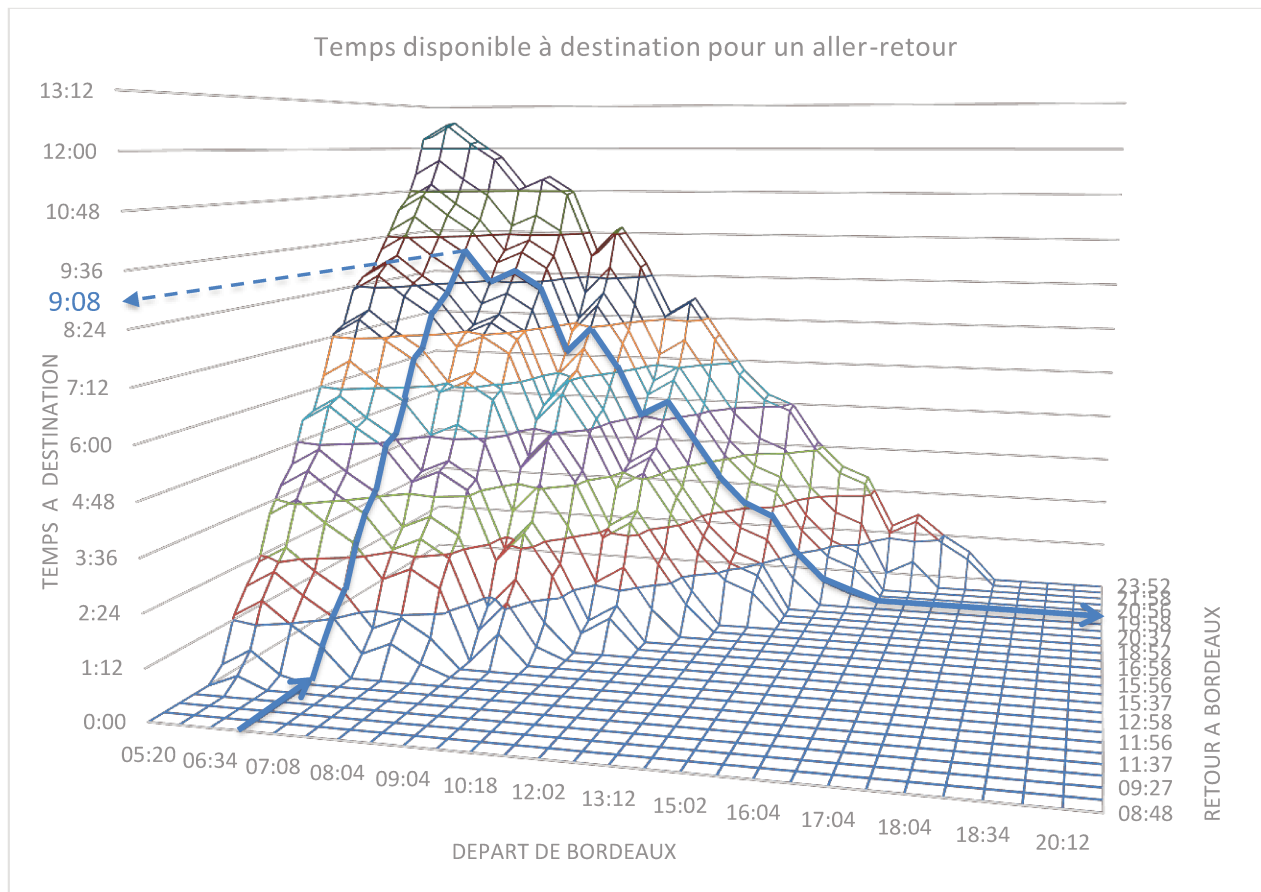


Figure 11 : le temps disponible à destination pour un aller-retour dans la journée entre Paris et Bordeaux (données : [www.oui.sncf](http://www.oui.sncf). Réalisé par l'auteur selon une présentation proposée par Joho (2013))

Cette figure montre que lorsque les voyageurs doivent prendre le train ou l'avion pour se déplacer, les horaires programmés deviennent des contraintes de déplacements. Les horaires constituent aussi des contraintes pour le temps utile à destination qui est calculé en fonction de l'heure de départ et de l'heure de retour. En effet, le temps utile à destination recouvre plusieurs informations incluant le temps de parcours, l'intervalle de service et l'amplitude d'horaires.

Lorsque le temps de parcours est réduit, les voyageurs arrivent plus tôt à destination en partant à la même heure depuis l'origine de déplacement, les effets de la vitesse se font sentir aussi pour le trajet de retour. Par conséquent, si les voyageurs choisissent toujours les mêmes allers et retours, le temps utile à destination augmente grâce à la réduction du temps de parcours.

La densité du quadrillage de cette figure montre l'intervalle de service. Dans le cas où le quadrillage est dense, les voyageurs perdent moins de temps à destination lorsqu'ils changent leurs horaires des déplacements.

Selon la figure 11, nous constatons qu'un voyageur qui se déplace de Bordeaux à Paris et retourne à Bordeaux peut rester maximum environ 13 h à Paris, s'il décide de prendre le premier train au départ de Bordeaux et le dernier train pour retourner à Bordeaux. Le temps utile à destination dépend donc de l'amplitude d'horaires programmé. Une amplitude d'horaires plus élargie permet aux voyageurs de disposer de plus de temps utile à destination.

Par ailleurs, le temps maximum dont les voyageurs disposent à destination varie selon les heures d'aller et les heures de retour choisis. Pour un usager du train qui souhaite partir après 6 : 00 du matin de Bordeaux et retourner à Bordeaux avant 20 : 00, sous contrainte des horaires programmés le temps maximum dont il dispose à destination est de 9 h 08 (figure 11).

Nous pouvons mesurer l'évolution du temps utile à destination afin d'évaluer la qualité des horaires programmés.

### *2.2.1.1 - L'indicateur TAD (Temps utile A Destination)*

Le temps utile à destination peut être calculé en fonction des horaires programmés. Cet indicateur prend en compte la chaîne complète des déplacements pour les allers-retours dans la journée. Nous le définissons comme l'indicateur TAD (Temps utile A Destination). Par définition, la valeur du TAD est le temps utile dont chaque voyageur dispose à la destination. Cet indicateur fournit des informations sur le temps de parcours, l'intervalle de service et l'amplitude d'horaires. Dans le cadre d'un modèle de choix modal, ces informations complémentaires pourraient permettre d'améliorer notre connaissance aux comportements des voyageurs.

Le calcul est relativement simple, le TAD correspond aux écarts entre les heures de départ pour le trajet retour et les heures d'arrivée pour le trajet aller. Nous pouvons par ailleurs prendre en compte le temps d'accès à la gare (le temps de rabattement) et le temps pour rejoindre la destination finale (le temps de diffusion).

Nous pourrions calculer le temps utile à destination pour chaque voyageur qui fait des allers-retours sur une O-D choisie. Le TAD est donc calculé en fonction des horaires réellement choisis par les voyageurs. L'avantage de cet indicateur est qu'il est possible d'être appliqué dans le cadre d'une étude de demande désagrégée.

Les enquêtes « voyageurs » nous aident à collecter les informations concernant les horaires choisis des voyageurs. Dans le questionnaire d'enquête, nous pouvons demander aux voyageurs l'heure de départ et l'heure d'arrivée du train qu'ils ont pris. Les horaires programmés des différents modes de transport deviennent des données d'input pour le calcul du TAD. Ces données informant le temps de trajet de gare à gare.

Par ailleurs, Dans le cadre de nos enquêtes « voyageurs », nous demandons aux personnes enquêtées de déclarer le temps de rabattement depuis leur domicile et le temps de diffusion pour rejoindre à leur destination finale. Ce sont des informations indispensables pour le calcul du temps utile à destination.

Le schéma ci-dessous montre la conception de l'indicateur TAD.

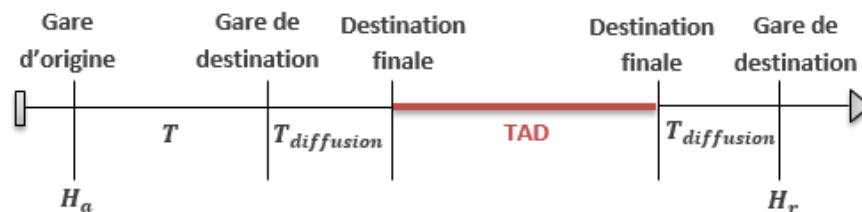


Figure 12 : la chaîne des déplacements aller-retour pour le calcul du TAD

Les coefficients présentés dans ce schéma et le calcul du TAD sont présentés dans la formule suivante (les explications plus détaillées se trouvent dans l'équation 4 de la section 1.3.2.2):

$$TAD = H_r - 2 * (T_{diffusion}) - T - H_a$$

avec

*TAD : Temps utile A Destination*

*H<sub>r</sub> : l'horaire de départ planifié pour le trajet de retour*

*T<sub>diffusion</sub> : le temps de diffusion*

*T : le temps de parcours*

*H<sub>a</sub> : l'horaire de départ planifié pour le trajet d'aller*

Dans le but de maximiser l'utilité des déplacements, nous supposons que les voyageurs se déplacent pour rester le plus de temps à destination. Nous avons démontré la relation entre le temps utile à destination et l'utilité des déplacements dans l'équation 11 de la section 1.3.2.2. Lorsque le temps utile à destination est important, l'utilité du déplacement devient meilleure. Nous allons tester cette hypothèse avec l'étude de cas sur la liaison Paris-Bordeaux.

Dans la fonction d'utilité des déplacements de chaque mode de transport, le TAD constitue une variable explicative qui contribuerait ainsi à expliquer les comportements de choix modal des voyageurs.

La fonction d'utilité intégrant le TAD s'écrit de la manière suivante<sup>28</sup> :

$$U_1 = \alpha + \beta Cost + \gamma Access + \delta Diffusion + \theta Frequency + \sigma TAD + \dots + \varepsilon$$

*avec*

*U<sub>1</sub> : la fonction d'utilité du modèle TAD*

*α : la constante*

*Cost : les prix payés*

*Access : le temps d'accès*

*Diffusion : le temps de diffusion*

*Frequency : la fréquence de service*

---

<sup>28</sup> Il s'agit d'une présentation non exclusive des variables explicatives dans le modèle du choix modal.

Pour caler les modèles de choix discrets, nous procédons à une maximisation de vraisemblance. Ce processus de maximisation nous permet aussi de sélectionner les variables déterminantes du choix modal. Lorsque les variables déterminantes sont sélectionnées, l'étude du choix modal consiste à estimer les coefficients des variables explicatives. Ceux-ci montrent les effets liés aux différentes variables sur la probabilité de choix pour chaque mode de transport.

Le coefficient de la variable TAD indique les effets liés au temps utile à destination sur le choix modal des voyageurs. Par hypothèse, le coefficient de la variable TAD devrait être significatif et positif. Lorsqu'un mode de transport permet aux voyageurs de rester plus de temps à destination, on suppose que la probabilité de choisir ce mode de transport sera élevée.

Dans le cadre d'une étude de la concurrence entre le train et l'avion, l'indicateur de fréquence de service mesure le nombre total de trains et d'avions qui ont circulés dans la journée. Au lieu de s'appuyer sur cet indicateur agrégé, nous préférons prendre en compte uniquement les horaires proches de l'heure de départ des voyageurs. En fonction des horaires programmés, nous prenons en compte les trains et les avions dont l'heure de départ inclus dans l'intervalle de deux heures par rapport à l'heure de départ choisie par les voyageurs (hypothèse testée par un test de sensibilité). Cet indicateur s'inscrit dans une approche désagrégée, il indique la fréquence de service utile pour les voyageurs. La fréquence utile correspond au nombre de trains et avions disponibles au moment où les voyageurs ont besoin de se déplacer. Calculé en fonction du choix de chaque voyageur, cet indicateur évite le problème de séparation parfaite<sup>29</sup> dans le modèle du choix binomial.

L'autre variable souvent utilisée dans les modèles standard est l'intervalle de service. Par définition, l'intervalle de service correspond au temps d'attente entre deux trains ou avions. En général, cette variable est agrégée, prend en compte d'un temps d'attente moyen dans la modélisation. Dans nos travaux, nous préférons travailler dans le cadre d'une approche désagrégée. L'intervalle de service, dans notre modèle, correspond au temps d'attente pour le prochain service par rapport à l'heure de départ effective. Cet indicateur évalue la qualité des dessertes en fonction du temps d'attente que la personne aurait à subir si elle ratait son train ou son vol.

---

<sup>29</sup> La séparation parfaite est un problème de « overfitting » lorsqu'une variable explicative explique parfaitement la variable à expliquer. Dans le cadre d'un modèle binomial, le nombre de trains et le nombre d'avion proposés sont différents qui expliquent parfaitement le choix modal.

Tels qu'ils sont définies, la fréquence de service et l'intervalle de service révèlent les mêmes informations. Lorsqu'il y a une bonne fréquence de service, le nombre de trains et d'avions est important, en particulier le temps d'attente pour le prochain train ou avion devrait être plus court, et l'intervalle de service devrait donc être plus faible. Nous supposons donc que ces deux variables devraient être corrélées. Cette hypothèse est testée statistiquement dans la partie consacrée à notre étude de cas sur la liaison Paris-Bordeaux.

Les fonctions d'utilité des modèles standard avec la fréquence de service et l'intervalle de service peuvent être présentées de manière suivante :

$$U_2 = \alpha + \beta Cost + \gamma Access + \delta Diffusion + \theta Frequency + \dots + \varepsilon$$

$$U_3 = \alpha + \beta Cost + \gamma Access + \delta Diffusion + \theta Headway + \dots + \varepsilon$$

*avec*

*U<sub>2</sub> : la fonction d'utilité du modèle de fréquence de service*

*U<sub>3</sub> : la fonction d'utilité du modèle d'intervalle de service*

Comme pour le modèle "*U<sub>1</sub>*" ces deux fonctions d'utilité sont aussi présentées sous forme de fonction linéaire de la théorie de l'utilité aléatoire de McFadden (1981). Dans ces deux modèles, les variables utilisées sont les variables standard liées à la fréquence de service et à l'intervalle de service. Nous vérifions dans un premier temps, la significativité de ces variables. Dans un deuxième temps, nous testons la qualité du modèle en ajoutant la variable TAD.

Les coefficients "*β, γ, θ, σ et δ*" sont les paramètres qui montrent les effets de la qualité des dessertes sur la probabilité de choix des voyageurs. L'estimation de ces coefficients va être faite grâce à la méthode de la maximisation de vraisemblance.

Pour notre étude de cas, nous disposons de deux alternatives de choix : l'avion et le train. Nous effectuons une étude du choix modal pour expliquer la probabilité de choix de ces deux modes de transport. Il s'agit donc d'un modèle Logit Binomial appartenant à la famille du modèle Logit et conçu pour traiter les questions du choix binomial.



Les objectifs de notre étude sont doubles : premièrement, nous montrons que la variable "TAD" est significative pour expliquer la probabilité de choix des voyageurs. Deuxièmement, nous comparons la qualité des trois différents modèles " $U_1, U_2$  et  $U_3$ " pour l'étude de la concurrence Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux. Nous supposons que le temps utile à destination est un indicateur pertinent pour expliquer les comportements de choix modal et qu'il apportera des informations complémentaires aux indicateurs standard. Nous souhaitons pouvoir montrer que le modèle " $U_1$ " disposerait d'une meilleure qualité d'estimation par rapport aux deux autres modèles standard " $U_2$  et  $U_3$ ".

Le modèle " $U_1$ " avec la variable "TAD" est fondé sur l'hypothèse de la maximisation du temps utile à destination. Même si nous avons montré que le temps utile à destination est positivement corrélé avec l'utilité des déplacements, cette hypothèse reste une hypothèse forte. La limite de cet indicateur est qu'il ne tient pas compte de la caractéristique des opportunités à la destination. L'utilité du temps à destination est supposée homogène pour toutes les activités pendant la durée du séjour. Toutefois le temps pourrait avoir des utilités différentes en fonction du programme d'activités de chaque voyageur. Cette limite du modèle " $U_1$ " est intrinsèque à la théorie d'utilité aléatoire tout en sachant que l'hypothèse de rationalité des voyageurs est déjà une hypothèse forte dans l'étude du choix modal.

L'indicateur TAD apporte des informations complémentaires aux indicateurs standard mais il ne permet pas de prendre en compte l'hétérogénéité des activités à la destination. Cette limite de l'indicateur repose sur l'hypothèse de la maximisation du temps à destination. Nous considérons que lorsque le TAD est plus important, la probabilité de choix d'un mode sera élevée, mais nous ne saurons pas dire si la qualité des dessertes de ce mode de transport adapterait mieux au programme des activités des voyageurs.

### *2.2.1.2 - L'indicateur COP (COmbinaisons Pertinentes)*

Dans le cadre du modèle TAD, les opportunités à la destination sont supposées homogènes. Afin de prendre en compte l'hétérogénéité des opportunités à destination et la complexité du programme d'activités des voyageurs, il nous faut un indicateur qui se concentre sur la trajectoire des déplacements. Dans cette perspective, nous abandonnons l'hypothèse de maximisation du temps à

destination, mais faire des hypothèses sur le temps dont les voyageurs ont besoin pour les activités principales.

Pour ce faire, il nous faut des informations précises sur le programme d'activités des voyageurs pour leurs déplacements. Or, ces informations sont très rares lorsque la chaîne de déplacements est complexe et notamment lorsqu'il s'agit de déplacements interurbains. Ces informations sont également absentes dans notre étude de cas.

Pour résoudre ce problème de manque des données, dans le cadre de l'élaboration de l'indicateur COP, nous supposons un Temps Nécessaire à Destination (TND). Nous supposons que, pour chaque trajectoire aller-retour, les voyageurs ont besoin d'un temps minimum pour réaliser les activités principales. Parmi les horaires programmés, les voyageurs choisissons uniquement les horaires qui leur permettent de rester un temps supérieur au TND.

L'indicateur COP est un proxy de l'indicateur de TAD. Cet indicateur a été développé par Joho (2013) au sein de l'Observatoire Socio-Economique de LISEA<sup>30</sup>. Il a été utilisé pour mesurer la qualité des dessertes sur la liaison Paris-Bordeaux pour le train et l'avion. Nous présentons les principes de cet indicateur ainsi que ses avantages et ses limites. Nous montrons dans la troisième partie de cette thèse que cet indicateur est un outil efficace pour analyser l'évolution de la qualité des dessertes dans le contexte d'une nouvelle infrastructure de transport.

Le COP est calculé en fonction de l'hypothèse posée sur le TAD. En fonction des contraintes de temps nécessaire à destination, nous pourrions évaluer le nombre de combinaisons allers-retours qui correspond aux besoins de déplacements des voyageurs. Cet indicateur s'inscrit dans la logique d'aller-retour, il est surtout pertinent pour évaluer la qualité des dessertes pour les allers-retours dans la journée.

Dans le contexte de la mise en service d'une nouvelle infrastructure de transport, le COP mesure la qualité des dessertes en fonction de l'évolution du nombre de combinaisons pertinentes. Une combinaison d'aller-retour est considérée comme pertinente lorsqu'elle permet aux voyageurs de rester un temps supérieur au TND. Nous utilisons les horaires programmés des modes de transport pour compter le nombre de combinaisons d'allers-retours. Il s'agit, pour un trajet d'aller, du

---

<sup>30</sup> Société concessionnaire et gestionnaire d'infrastructure de la LGV SEA Tours-Bordeaux jusqu'en 2061.

nombre de trajets de retour qui permettent aux voyageurs de rester à destination un temps au moins équivalent au TND. L'indicateur COP fournit par ailleurs des informations concernant l'amplitude des horaires. Le nombre de COP sera plus élevé lorsque les horaires de train se concentrent tôt le matin et tard le soir.

L'accès aux données est une des principales difficultés de cet indicateur. Sans les données de préférence déclarée sur le TND pour chaque voyageur, cette hypothèse de TND s'inscrit toujours dans une approche agrégée. C'est-à-dire que nous supposons qu'un individu « moyen » a besoin de passer au moins un certain temps (TND) pour des allers-retours dans la journée.

En ce qui concerne la liaison Paris-Bordeaux, l'indicateur COP a déjà été appliqué avant la mise en service de la LGV SEA. Cette étude a fait l'objet d'une publication en 2016 (Bonnafous, 2016). Dans cette thèse, nous nous situons après la mise en service de la LGV. Nous souhaitons montrer que cet indicateur est un outil pertinent pour mesurer l'évolution de la qualité des dessertes dans le cadre de la mise en service d'une nouvelle infrastructure de transport.

Nous supposons que le TND est égale à 4 h, cela consiste à supposer que les voyageurs qui font des allers-retours dans la journée entre Paris et Bordeaux ont besoin de rester 4 h à destination pour leurs activités principales. Le choix de 4 h minimum à destination est fait aussi pour des raisons pratiques et est testé avec un test de sensibilité. Lorsque l'hypothèse dépasse les 4 h, aucune combinaison des allers-retours n'est disponible en train dans la situation *ex ante* de la LGV SEA. Lorsque l'hypothèse est inférieure à 4 h, nous disposons d'un très grand nombre de combinaisons pertinentes dans la situation *ex ante* et *ex post* de la LGV SEA.

Le 4 h minimum à destination pour un aller-retour dans la journée est une hypothèse agrégée. Cela correspond au temps moyen nécessaire pour une réunion de travail ou un séminaire dans le cas des déplacements à moyenne et longue distances. Comme toutes les hypothèses agrégées, cette hypothèse est forte lorsqu'on souhaite analyser les comportements des voyageurs au niveau désagrégé mais elle est raisonnable pour une comparaison de la qualité des dessertes entre le train et l'avion.

Le cadre conceptuel de l'indicateur COP est schématisé dans la figure 13:



Figure 13 : le nombre de combinaisons pertinentes sous l'hypothèse de 4 h minimum à destination.

L'indicateur COP a le potentiel d'être appliqué dans le contexte des déplacements domicile-travail. Nous pouvons faire des hypothèses sur les contraintes de l'heure d'arrivée à destination et de départ pour rejoindre le domicile. A titre d'exemple, en prenant en compte l'heure d'embauche et de débauche habituelle, nous supposons une contrainte d'arrivée à destination avant 9 : 00 et une contrainte de retour à partir de 17 : 00, le COP correspond aux combinaisons d'allers-retours qui respectent ces contraintes.

L'étude du COP sous les hypothèses d'heures d'arrivée et de retour est présentée dans la figure 14 ci-dessous.



Figure 14 : le nombre de combinaisons pertinentes sous les contraintes d'heure d'arrivée et de retour

Les déplacements interurbains sont relativement moins contraints par les heures d'arrivée et de retour. Cette forme de l'indicateur COP n'a pas été appliquée sur la liaison Paris-Bordeaux.

Par ailleurs, nous devons faire des hypothèses sur le trajet de rabattement et le trajet de diffusion pour les déplacements entre les différentes O-D (origines-destinations). Le COP est un indicateur agrégé qui tient compte de la chaîne complète des déplacements. A titre d'exemple, pour un aller-retour de Bordeaux à Paris, nous supposons que le temps de rabattement est de 15 min, le temps

dans la gare est de 5 min et le temps de diffusion à Paris est de 35 min. Ces différentes hypothèses sont confirmées par les enquêtes « voyageurs » que nous avons effectuées et grâce aux outils de SIM (Système d'Informations Multimodaux).

Joho (2013) a développé un algorithme pour présenter le nombre de COP sous forme de sillons-horaires<sup>31</sup>. L'algorithme permet de montrer l'emplacement des trains entre une origine et une destination dans un graphique espace-temps. Nous trouverons dans le graphique sillons-horaires les informations concernant l'heure de départ et d'arrivée et la distance parcourue. Nous appliquons ici cet algorithme avec l'hypothèse de 4 h minimum à destination et pour la situation après la mise en service de la LGV SEA. Les figures ci-dessous montrent l'exemple d'un aller-retour entre Bordeaux et Paris dans la situation *ex ante* et la situation *ex post* de la LGV.

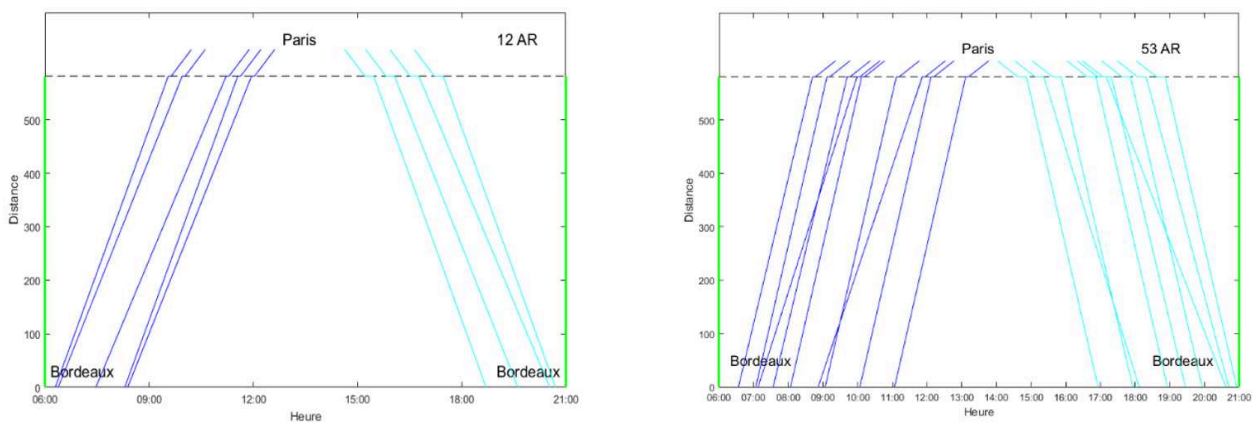


Figure 15 : l'évolution du nombre de COP pour un aller-retour Bordeaux-Paris sous l'hypothèse de 4 h minimum à destination (la situation *ex ante* à gauche et la situation *ex post* à droite, inspiré des travaux de Joho (2013))

Les sillons en bleu foncé correspondent aux horaires aller de Bordeaux à Paris et en bleu clair aux horaires de retour Paris - Bordeaux. Cette figure nous montre que le nombre de COP s'est fortement amélioré puisqu'il passe de 12 allers-retours à 53 allers-retours après la mise en service de la LGV SEA. Les effets de la vitesse sont la principale explication de cette amélioration de la qualité des dessertes, ce qui se traduit dans la figure 15 par les sillons-horaires qui s'approchent des angles

<sup>31</sup> Un sillon-horaire décrit « la capacité d'infrastructure requise pour faire circuler un train donné d'un point à un autre à un moment donné », Directive 2001/14/CE du Parlement européen et du Conseil du 26 février 2001.

verticaux dans la situation *ex post*. En effet, comme les TGV vont plus vite grâce à la LGV, les voyageurs peuvent partir plus tard de chez eux et sont capables d'arriver plus tôt à la destination.

Cet exemple montre que l'indicateur COP est un outil efficace pour mesurer la qualité des dessertes. Le nombre de COP évolue lorsqu'il y a un changement d'horaires. Il peut ainsi contribuer à comparer la qualité des dessertes de différents modes de transport. Dans la partie suivante, nous effectuons une étude du COP sur la LGV SEA. Cette étude a été commencée au sein de l'Observatoire Socio-Economique de LISEA<sup>32</sup> à partir de 2013 par Joho (2013). A l'aide de cet indicateur, nous montrons l'évolution de la qualité des dessertes sur les principales liaisons de la LGV SEA après la mise en service de la LGV SEA.

Par rapport aux indicateurs standard, l'indicateur COP a l'avantage de pouvoir prendre en compte les caractéristiques des opportunités à la destination à l'aide des hypothèses sur le temps minimum à destination ou sur les contraintes d'heures d'arrivées et de retours. Pourtant, l'indicateur COP dispose de plusieurs faiblesses :

- Premièrement, cet indicateur est applicable uniquement dans le cas d'allers-retours dans la journée. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'il n'a pas été appliqué dans notre étude de la modélisation de la demande sur la liaison Paris-Bordeaux.
- Deuxièmement, il s'inscrit toujours dans une approche agrégée, les hypothèses sont faites sur un individu « moyen ». L'hétérogénéité de la demande ne peut donc pas être prise en compte dans l'analyse.

Dans l'élaboration des méthodes, il y a une nécessité de trouver un équilibre entre le cadre conceptuel du modèle pertinent et le besoin en données. Le modèle avec TAD a pour fonction d'étudier le choix modal dans le cadre de la modélisation. Il est applicable avec des données d'enquête standard mais les opportunités à la destination sont supposées homogènes. La méthode basée sur le COP prend en compte les contraintes pour les activités principales à destination mais elle se situe à un niveau agrégé. Sans les données de préférences déclarées, cette méthode ne peut pas être intégrée dans l'étude du choix modal.

---

<sup>32</sup> Société concessionnaire et gestionnaire d'infrastructure de la LGV SEA Tours-Bordeaux jusqu'en 2061.

En tenant compte les limites des indicateurs TAD et COP, nous cherchons une méthode qui a la capacité de prendre en compte les besoins des déplacements des voyageurs pour les activités principales et qui s'inscrit dans une approche désagrégée. Nous nous appuyons sur la notion de coûts de délais de Vickrey (1969) afin d'améliorer notre connaissance sur les effets de la qualité des dessertes sur le choix modal. Le calcul des coûts de délais nécessite les données concernant les heures d'arrivée souhaitées à la destination finale, nous conduisons des enquêtes « voyageurs » avec les questionnaires spécifiques afin de récupérer ces données. Le modèle utilisé est sous forme d'un modèle combiné qui explique à la fois le choix du mode et le choix des horaires de déplacements. Les principes de ce modèle seront présentés dans la section suivante.

## Section 2.2.2 : Modèle combiné choix modal – choix d'horaires

Selon Vickrey (1969), la notion de coûts de délais prend en compte les caractéristiques des opportunités à destination en fonction des heures d'arrivées souhaitées des voyageurs. Les coûts de délais correspondent aux écarts entre les heures d'arrivée effectives<sup>33</sup> et les heures d'arrivée souhaitées. En effet, les horaires programmés constituent des contraintes de déplacements et lorsqu'ils ne correspondent pas aux heures d'arrivées souhaitées, les voyageurs subissent des pertes d'utilité. C'est sur cette base que la modélisation combinée du choix modal – choix d'horaires a été élaborée.

Nous disposons de deux alternatives de choix dans la dimension du choix modal de notre modèle: le train et l'avion. Basée sur la notion de coûts de délais, la dimension du choix d'horaires du

---

<sup>33</sup> Nous ne traitons pas le problème de régularité du temps de parcours. Les heures d'arrivée effectives correspondent aux horaires programmés par les opérateurs de transport. Durant les enquêtes réalisées, les trains et les avions étaient aussi à l'heure.

modèle est construite en fonction des heures d'arrivée souhaitées des voyageurs. Nous distinguons les arrivées en avance et les arrivées en retard<sup>34</sup>.

Dans notre modèle combiné choix modal – choix d'horaires, nous disposons donc de quatre alternatives de choix :

---

<sup>34</sup> Dans le questionnaire, nous posons la question « à quelle heure souhaitez-vous arriver à la destination finale ? », l'heure d'arrivée souhaitée est ensuite comparée avec l'heure d'arrivée effective à la gare en ajoutant le temps de diffusion estimé. Ceci fait que, dans notre échantillon, les voyageurs arrivent toujours en avance ou en retard par rapport à l'heure d'arrivée souhaitée.



Tableau 6 : les alternatives du choix du modèle combiné choix modal - choix d'horaires

Choix modal	Choix d'horaires	Alternatives
Train	Arrive en avance	Early Train
	Arrive en retard	Late Train
Avion	Arrive en avance	Early Air
	Arrive en retard	Late Air

Selon la théorie de l'utilité aléatoire, les fonctions d'utilités indirectes de notre modèle sont les suivantes. Les variables de coûts de délais sont des variables spécifiques aux alternatives. Elles nous permettent d'estimer les effets liés aux arrivées en avance et les arrivées en retard.

$$V_{EarlyTrain} = \alpha_{time} * t_{ET} + \beta_{cost} * p_{ET} + \dots + \gamma_{ET} * Delay_{ET}$$

$$V_{LateTrain} = \alpha_{time} * t_{LT} + \beta_{cost} * p_{LT} + \dots + \gamma_{LT} * Delay_{LT}$$

$$V_{EarlyAir} = \alpha_{time} * t_{EA} + \beta_{cost} * p_{EA} + \dots + \gamma_{EA} * Delay_{EA}$$

$$V_{LateAir} = \alpha_{time} * t_{LA} + \beta_{cost} * p_{LA} + \dots + \gamma_{LA} * Delay_{LA}$$

avec

$t$  : le temps de trajet

$p$  : les prix payés en transports

$Delay$  : les coûts de délais

La structure du modèle MNL est présentée ci-dessous :

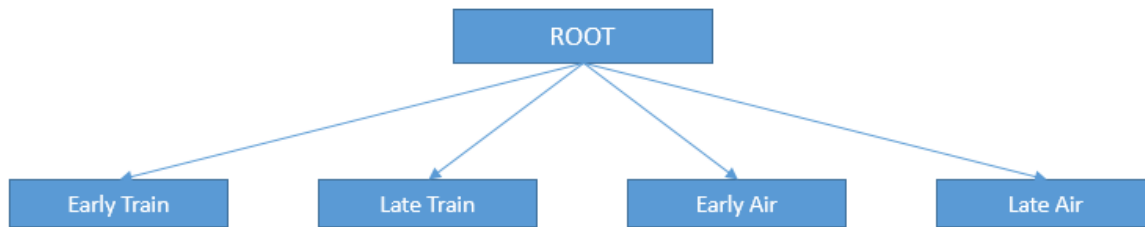


Figure 16 : la structure du modèle MNL<sup>35</sup>

Les voyageurs ont le choix entre le train qui arrive en avance, le train qui arrive en retard, l'avion qui arrive en avance et l'avion qui arrive en retard. Les variables liées aux coûts de délais sont des variables spécifiques aux alternatives qui nous aident à estimer les effets de ces variables sur la probabilité de choix modal des voyageurs.

Cette structure du modèle pourrait générer des problèmes de corrélation entre les alternatives. Ces problèmes pourraient être des problèmes de corrélation intergroupe. A titre d'exemple, le train arrive en avance et le train arrive en retard pourraient appartenir au groupe « Train » et l'avion arrive en avance et l'avion arrive en retard pourraient appartenir au groupe « Air ». Par ailleurs, les alternatives pourraient être corrélées dans la dimension « horaires ». Le train arrive en avance et l'avion arrive en avance pourraient appartenir au groupe « Early » et les deux autres alternatives pourraient appartenir au groupe « Late ».

Les problèmes de corrélation des alternatives pourraient aussi être des problèmes de corrélation intragroupe. A titre d'exemple, l'alternative « EarlyTrain » pourrait appartenir au groupe « Early » et ainsi au groupe « Train ». L'existence de ces problèmes de corrélation des alternatives doit être prise en compte dans l'étude de modélisation. Les hypothèses IID ne sont pas respectées, ce qui fait que les formes standard des modèles Logit ne pourront pas être utilisées directement. Il nous faut des modèles qui permettent de relâcher les hypothèses IID pour ne pas biaiser les résultats d'estimation.

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les modèles dérivés du modèle Logit standard permettant de relâcher les hypothèses IID. Le modèle NL est le plus souvent utilisé pour gérer la corrélation des alternatives : les alternatives sont regroupées, la structure du modèle est à deux

---

<sup>35</sup> ROOT : la racine du modèle

étapes pour le choix du mode et le choix des horaires. Pour chaque étape du modèle, nous ajoutons un paramètre d'échelle à chaque groupe des alternatives afin de pouvoir gérer la corrélation des alternatives.

Toutefois, dans le modèle qu'on propose, deux différentes structures du modèle existent. Les voyageurs peuvent d'abord choisir le mode de transport et ensuite choisir les horaires ou en premier temps choisir les horaires et choisir le mode de transport dans un deuxième lieu. Ces deux structures du modèle sont présentées dans les figures 17 et 18.

- La structure du modèle avec le choix modal au niveau supérieur et le choix d'horaires au niveau inférieur (figure 17 ci-dessous).

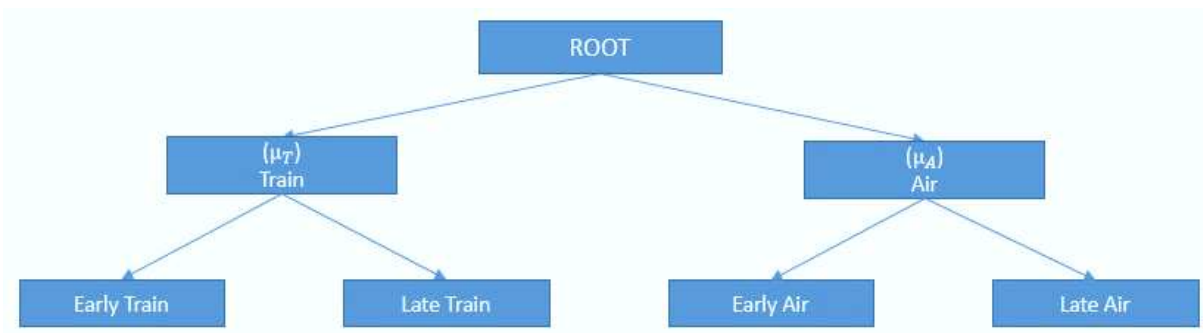


Figure 17 : la structure du modèle NL avec au niveau supérieur le choix modal<sup>36</sup>

- La deuxième structure avec le choix d'horaires au niveau supérieur et le choix modal au niveau inférieur. (voir figures 18 ci-après).

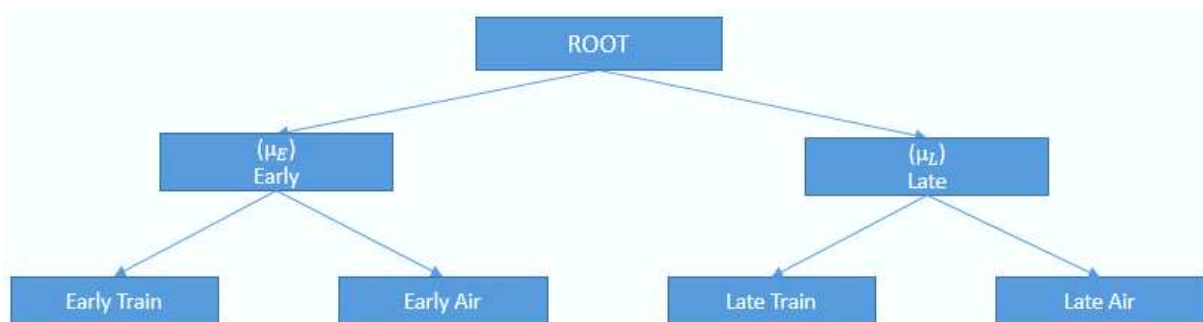


Figure 18 : la structure du modèle NL avec au niveau supérieur le choix d'horaires

---

<sup>36</sup>  $\mu$  est le paramètre du groupe

Il existerait potentiellement une corrélation intragroupe dans ces deux structures du modèle NL. A titre d'exemple, l'alternative « Early Train » dans le groupe « Train » pourrait être corrélée avec l'alternative « Early Air » dans le groupe « Air », puisque ces deux alternatives regroupent les voyageurs qui choisissent d'arriver en avance par rapport aux heures d'arrivée souhaitées.

Dans notre étude de cas, quatre différents groupes apparaissent dans la structure du modèle CNL : le groupe « Train » pour le train, le groupe « Air » pour l'avion, le groupe « Early » pour les arrivées en avance et le groupe « Late » pour les arrivées en retard. Le modèle CNL pourrait être une solution efficace pour gérer le problème de corrélation intragroupe.

Le modèle CNL dispose d'une structure de corrélation relativement flexible. Nous ajoutons des paramètres d'échelle et des paramètres d'allocation des alternatives afin de gérer la corrélation intragroupe. La structure du modèle CNL de notre étude de cas s'écrit de manière suivante :

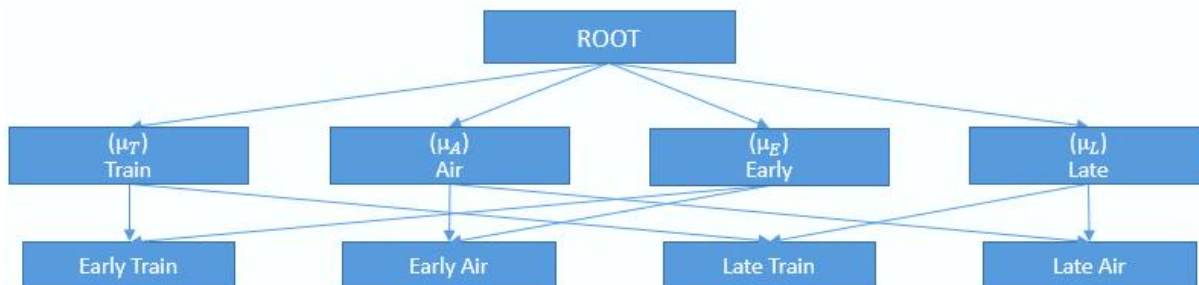


Figure 19 : la structure du modèle CNL

Cette structure du modèle avec quatre alternatives est similaire à ce que Cascetta et Coppola (2016) ont utilisé pour expliquer la concurrence entre l'autocar et le train sur une étude de cas pour l'Italie. Nous supposons que les voyageurs choisissent les horaires les plus proches des heures d'arrivée souhaitées. Ils ne vont pas anticiper leurs voyages en prenant le train d'avant. Il s'agit d'une hypothèse forte qui pourrait potentiellement surestimer les parts de marché des différents modes. Cascetta et Coppola (2016) ont également travaillé sous cette hypothèse sur les meilleurs horaires par rapport aux heures d'arrivée souhaitées et ont évoqué la possible surestimation des parts de marché dans l'étude de la prévision de la demande.

La première explication qui nous pousse à choisir cette structure du modèle est liée à la nature des données. Nos données sont des données de préférences révélées. Les voyageurs répondent aux questionnaires sur leurs caractéristiques personnelles et les trajets qu'ils viennent d'effectuer. Par conséquent, les voyageurs ont déjà choisi les horaires les mieux adaptés aux heures d'arrivée souhaitées ou dans certain cas, ils ont anticipé les déplacements en calant l'heure de rendez-vous en fonction des horaires de train ou d'avion. Dans notre base des données, il y a seulement 4 % des voyageurs (57 personnes enquêtées) qui n'ont pas choisi les meilleurs horaires. Les données en préférences déclarées auraient pu résoudre ce problème.

La deuxième explication repose sur la taille insuffisante des échantillons. Dans notre modèle, il n'est pas possible d'estimer un modèle avec tous les horaires programmés par les opérateurs de transport. Dans ce cas, le nombre d'alternatives serait trop important pour permettre à l'algorithme de se converger correctement. Ce problème de calage du modèle est aussi lié au nombre faible des personnes qui n'ont pas choisi les horaires les plus proches des heures d'arrivées souhaitées.

Par ailleurs, pour gérer le problème de corrélation dans nos modèles, nous testons aussi le modèle MMNL. Son application devient populaire car il permet à la fois de gérer la corrélation des alternatives et de prendre en compte le problème d'hétérogénéité entre les voyageurs. Ce modèle utilise la méthode de simulation dans le processus de maximisation de la vraisemblance. Les coefficients des variables peuvent être considérés comme variables dans le processus d'estimation.

Ces différents modèles sont appliqués dans la partie suivante. Nous comparons leur qualité afin de trouver le meilleur pour la question de la concurrence Air-Fer sur la liaison Paris – Bordeaux.

Pour caler les modèles MNL, NL et MMNL, nous avons utilisé le package « mlogit » développé par Croissant (2018). Le modèle CNL a été calé avec le logiciel Biogeme développé par Bierlaire (2006) puisque le package « mlogit » sous R ne dispose pas actuellement de l'algorithme pour caler le modèle CNL. Afin d'assurer la crédibilité de nos résultats, tous les modèles sous langage R ont été codés en Python pour pouvoir les tester sous Biogeme.

## Conclusion du chapitre 2.2

Dans ce chapitre, nous proposons deux méthodes pour mieux prendre en compte la qualité des dessertes dans l'étude du choix modal : les indicateurs de temps utile à destination et le modèle combiné choix modal – choix d'horaire.

La méthode basée sur le Temps utile A Destination (TAD) présente de nombreux avantages notamment en termes de mesurabilité. Il nous faut connaître les horaires d'aller et les horaires de retour pour pouvoir constituer les indicateurs de temps utile à destination. Ces données sont des données de « Open source » relativement faciles à récupérer sur les sites des opérateurs de transport. L'inconvénient des méthodes utilisant le temps utile à destination est que les caractéristiques des opportunités à la destination ne sont pas prises en compte dans l'analyse. Les opportunités sont considérées comme homogènes. Nous supposons que les voyageurs cherchent à maximiser le temps utile à destination.

L'indicateur du nombre de COmbinaisons Pertinentes (COP) est fondé sur le même principe que l'indicateur TAD. Il est calculé en fonction des hypothèses sur le temps minimum nécessaire à destination. L'avantage de cet indicateur est qu'il permet de comparer la qualité des dessertes entre deux périodes différentes et entre des différents modes de transport. L'inconvénient repose sur son champ d'application relativement restreint. Il ne peut être utilisé que dans le cadre des allers-retours dans la journée. C'est pour cette raison que l'indicateur COP n'a pas été appliqué dans notre étude de modélisation.

La limite majeure de ces deux indicateurs TAD et COP réside dans le fait que les caractéristiques des opportunités à la destination ne sont pas prises en compte. Ces indicateurs sont fondés sur des hypothèses de temps maximum à destination ou temps minimum à destination, alors que le temps consacré réellement aux activités principales est une information manquante.

Afin d'approfondir notre analyse pour prendre en compte les caractéristiques des opportunités, nous recourons au modèle combiné choix modal – choix d'horaires. Cette méthode explique à la fois le choix entre l'avion et le train et l'arrivée tôt ou l'arrivée en retard par rapport aux heures d'arrivée souhaitées. La constitution des alternatives est effectuée en fonction des heures d'arrivée effectives et les heures d'arrivée souhaitées. Nous supposons que les voyageurs souhaitent arriver au moment du démarrage des activités, les horaires inadaptés vont générer des pertes de temps et donc des pertes d'utilité pour les déplacements.

Le cadre conceptuel du modèle combiné est plus solide par rapport aux indicateurs TAD et COP dans la modélisation de la demande. Toutefois, les données nécessaires sont relativement plus contraignantes. Nous conduisons des enquêtes « voyageurs » et construisons nos questionnaires afin de récupérer les données nécessaires pour cette méthode. Nous présenterons nos données liées aux horaires choisies et aux heures d'arrivées souhaitées des voyageurs dans la partie suivante.

La sélection du modèle est une étape importante dans un travail de modélisation. Face aux problèmes de pertinence méthodologique et du manque de données, nous devons trouver un équilibre entre un modèle le plus sophistiqué mais exigeant en termes des données et un modèle plus pratique qui nécessite moins de données. Nous préférons en général le modèle dont la structure est la moins compliquée. En même temps, il faut faire attention aux hypothèses du modèle utilisé afin d'éviter des biais d'estimation. Lorsque les hypothèses IID des modèles Logit ne sont pas respectées, il faut recourir à des modèles plus sophistiqués comme les modèles NL, CNL et MMNL. Nous montrons à travers nos études de cas, la pertinence de nos méthodes pour améliorer nos connaissances sur les effets liés à la qualité des dessertes.

## Conclusion de la partie 2

Notre partie 2 est de matière méthodologique permettant de présenter les modèles utilisés pour étudier les comportements de choix modal. Nous présentons les modèles de choix discrets ainsi que les avantages et les inconvénients des différents modèles. Les modèles de choix discrets présentés dans cette partie sont des modèles largement appliqués dans les recherches en économie des transports. La littérature montre que ces modèles sont les plus adaptés pour étudier les comportements de choix modal des voyageurs.

Nous avons présenté les modèles standard dans le chapitre 2.1 : modèles Probit et Logit ainsi que les modèles capables de relâcher les hypothèses IID : Logit emboîté, Logit emboîté croisé et Logit mixte. Cette présentation méthodologique est adaptée spécifiquement à notre problématique et à notre étude de cas. Nous montrons les structures des différents modèles pour résoudre les problèmes de corrélation des alternatives. Dans la partie 3, ces modèles vont être testés afin que

nous puissions décider le meilleur modèle pour l'étude de la concurrence Air-Fer sur la liaison Paris – Bordeaux.

Dans le chapitre 2.2, nous montrons comment il est possible d'évaluer les effets de la qualité des dessertes. La constitution de notre méthodologie repose sur une approche qui n'est pas uniquement basée sur l'offre de transport, mais aussi sur le programme d'activités. Nous approfondissons ensuite notre analyse afin de prendre en compte les caractéristiques des opportunités à la destination.

Dans le chapitre 2.2, nous discutons les avantages et les inconvénients de chaque méthode proposée dans ce travail de thèse. Les indicateurs du temps utile à destination sont des outils d'évaluation de la qualité des dessertes. Nous montrons que le TAD pourrait être intégré dans le modèle du choix modal afin d'améliorer la qualité d'estimation. Le COP peut être utilisé comme un outil de comparaison de la qualité des dessertes entre différentes périodes et différents modes de transport. Les données nécessaires pour ces indicateurs sont relativement accessibles ce qui facilite son application. Par contre, les opportunités à la destination sont considérées comme homogènes ce qui est une hypothèse forte. La méthode la plus pertinente devrait permettre de prendre en compte les caractéristiques des opportunités à la destination.

Nous présentons ensuite le modèle combiné choix modal – choix d'horaires qui permet de prendre en compte les caractéristiques des opportunités dans la modélisation de la demande. Nous considérons que les heures d'arrivée souhaitées correspondent aux besoins des voyageurs pour leurs activités principales. Les effets liés à la qualité des dessertes sont évalués en fonction des écarts entre l'heure d'arrivée effective et l'heure d'arrivée souhaitée des voyageurs. Le modèle que nous adoptons pour notre étude de cas est similaire à celui de Cascetta et Coppola (2016). Nous disposons de quatre alternatives : le train arrive en avance, le train arrive en retard, l'avion arrive en avance et l'avion arrive en retard. Le modèle estimé est un modèle combiné choix modal – choix d'horaires.

Dans la partie 3, nous allons présenter le contexte de notre étude de cas : la mise en service de la LGV SEA et ses effets sur l'offre de transport et la mobilité, les données dont nous disposons pour nos travaux de modélisation et les résultats de notre recherche.



Troisième partie :

Les effets de la qualité des dessertes sur  
le choix modal

# Introduction de la partie 3

Notre sujet de recherche a été élaboré par rapport aux questions que nous rencontrons dans le cadre du projet de LGV SEA. La qualité des dessertes est toujours un sujet important lors de la mise en service d'une nouvelle infrastructure de transport. Dans le cas du projet de LGV SEA, cette question est particulièrement intéressante car les conflits d'intérêts entre les différents acteurs ferroviaires : le concessionnaire, l'opérateur et les acteurs locaux, se concentrent en effet sur la question de la qualité des dessertes.

Après avoir présenté la base théorique dans la partie 1 de cette thèse et les méthodes dans la partie 2, il est temps de démontrer la pertinence de nos méthodes pour répondre à notre problématique de recherche. Cette troisième partie est une partie d'application dans laquelle nous présentons les données et les résultats de cette recherche.

La constitution de la base de données est une étape essentielle. L'Observatoire Socio-Economique est un dispositif précieux pour évaluer les effets du projet de LGV SEA sur l'offre et la demande de transport et sur les territoires traversés (*Encadré 9*). Il permet de collecter des données et de financer les enquêtes « voyageurs ». Nous présenterons dans cette partie ces données indispensables qui nous aideront à effectuer notre travail et pour montrer la pertinence de notre étude.

---

*Encadré 9 : L'Observatoire Socio-Economique (OSE) de la LGV SEA*

---

Prévu dans le contrat de concession, l'OSE a été créé en 2012 par LISEA. Ses principales missions consistent à assurer le suivi socio-économique de la LGV SEA et à en évaluer les effets et retombées, en phase de construction puis en phase d'exploitation du projet.

L'OSE LGV SEA doit perdurer au moins 10 ans après la mise en service de la LGV SEA, soit jusqu'en 2027. Cela en fait un outil inédit d'évaluation *ex post* de grand projet. L'Observatoire a travaillé de concert avec les services de l'Etat et des collectivités territoriales, les acteurs économiques et des équipes universitaires afin de faire progresser les connaissances sur les enjeux et impacts d'une telle infrastructure.

Les principaux objectifs socio-économiques de l'Observatoire sont ainsi les suivants :

- recueillir, analyser et diffuser les données disponibles sur le projet LGV SEA ;
- mesurer et évaluer les effets de la LGV SEA sur la mobilité, l'emploi, les économies locales et l'aménagement du territoire ;
- révéler les effets constatés et les conséquences, directs et indirects, sur les acteurs des territoires ;
- aider les décideurs publics à orienter leurs politiques d'aménagement et éventuellement à améliorer la conception des futurs projets.

Les études et recherches menées au sein de l'Observatoire suivies par un comité scientifique composé d'universitaires et d'experts, sous la présidence d'Alain Bonnafous. Ces travaux sont orientés et évalués par un comité de suivi, composé de représentants de l'administration (dont le CGEDD) et du concédente SNCF Réseau.

Le présent travail de thèse s'inscrit dans le programme de l'OSE a pour principal objectif d'étudier les effets de la LGV SEA sur l'offre de transport et la mobilité. Une partie des résultats a été reprise dans le « bilan LOTI intermédiaire » du projet SEA.

Cette partie consiste à présenter les résultats et les analyser et les discuter l'étude de cas de la concurrence Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux. L'objectif est de monter la capacité de nos méthodes pour évaluer les effets liés à la qualité des dessertes sur le choix modal et les intérêts de ces méthodes pour l'analyse de la concurrence intermodale.

Cette partie est structurée de la manière suivante :

- Dans le chapitre 3.1, nous présentons le contexte de concurrence Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux. La mobilité et l'offre des différents modes de transport ont évolué depuis la mise en service de la LGV SEA. Après un an d'exploitation commerciale de cette ligne, nous observons les premiers effets de la concurrence Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux. Les contenus de cette partie ont contribué à la réalisation du bilan LOTI intermédiaire de LGV SEA<sup>37</sup>.
- Nous présentons les données mobilisées dans le chapitre 3.2. Nous disposons essentiellement des données « Open Data » de la SNCF et des données des enquêtes « voyageurs ». Nous discutons aussi les limites de cette base des données vers la fin de ce chapitre.
- Nous montrons les résultats de nos modèles le chapitre 3.3. Nous comparons les différents modèles et choisirons celui qui est adapté à notre problématique. Nous montrons ensuite la pertinence de nos méthodes pour mieux expliquer les comportements des voyageurs et discutons les limites de ces méthodes. Les résultats de nos modèles ont fait l'objet de deux publications sur TRR (Transportation Research Record)<sup>38</sup>.

---

<sup>37</sup> Chen, M.H. et Lafage, M. Bilan LOTI intermédiaire de la LGV SEA Europe Atlantique, LISEA, 2018. <https://www.lisea.fr/wp-content/uploads/2019/02/Bilan-LOTI-intermediaire-dec-janv-19.pdf>

<sup>38</sup> Chen, M. H., et S. Souche Le Corvec. On the Usefulness of a Combined Mode Choice-Schedule Choice Model: Case of the Paris-Bordeaux Rail Line (France). Transportation Research Record, 2019. 2673-4: 697–707.

Chen, M. H., A. Bonnafous, et S. Souche Le Corvec. Time Available at Destination: Tool to Evaluate the Quality of Public Transport Service and a Determinant of Mode Choice. Transportation Research Record, 2019. 2673-4: 733–742.

# Chapitre 3.1 : Les offres Air-Fer en concurrence dans le périmètre SEA

## Introduction du chapitre 3.1

La mise en service de la LGV SEA a pour effet d'avoir fortement impacté l'offre de transport ferroviaire. Depuis, le contexte de la concurrence Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux évolue. Après un an d'exploitation commerciale, nous commençons à observer les effets de la compétitivité du train et de l'avion des liaisons concernées par la LGV SEA.

Ce chapitre éclaire le contexte de la concurrence Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux et montre en quoi cette question de la concurrence intermodale est importante dans l'analyse des effets de la LGV SEA.

Les éléments de ce chapitre ont été utilisés dans le cadre du bilan LOTI intermédiaire de LGV SEA pour montrer l'évolution de l'offre de transport avant et après la mise en service de LGV SEA.

Ce chapitre est composé de deux sections :

- Dans la section 3.1.1, nous présentons les principales caractéristiques et les objectifs de la LGV SEA. Nous analysons également l'évolution de l'offre de transport ferroviaire avant et après la LGV.
- Dans la section 3.1.2, nous décrivons le nouveau contexte de la concurrence intermodale sur la liaison Paris-Bordeaux. Un an depuis la mise en service de la LGV SEA, les premiers effets de la concurrence intermodale sur la demande de transport commencent à apparaître.

## Section 3.1.1 : Le projet de LGV Sud Europe Atlantique (SEA)

Pendant le Grenelle de l'environnement en 2007, le gouvernement a annoncé un plan de construction de 2 000 km de LGV pour 2020 avec 800 km de LGV prévues en 2017 (la mise en service de la LGV SEA et LGV BPL), puis 2 500 km supplémentaires pour 2030. Dans le cadre du Schéma National des Infrastructures de Transport (SNIT) relative à la mise en œuvre de ce plan, trois LGV ont été lancées en France entre 2005 et 2010 : la LGV SEA, la LGV Bretagne Pays-de-Loire (BPL) et le Contournement Nîmes-Montpellier (CNM).

En ce qui concerne la LGV SEA, la concertation et le débat public ont débuté bien avant le SNIT. L'approbation du schéma directeur du projet SEA est datée de 1992. Les travaux de construction de la ligne ont commencé en 2012. La LGV SEA est mise en service commercial depuis juillet 2017. Nous présentons les principaux jalons du projet LGV SEA et plus de détails seront données dans le tableau 22 en annexe.

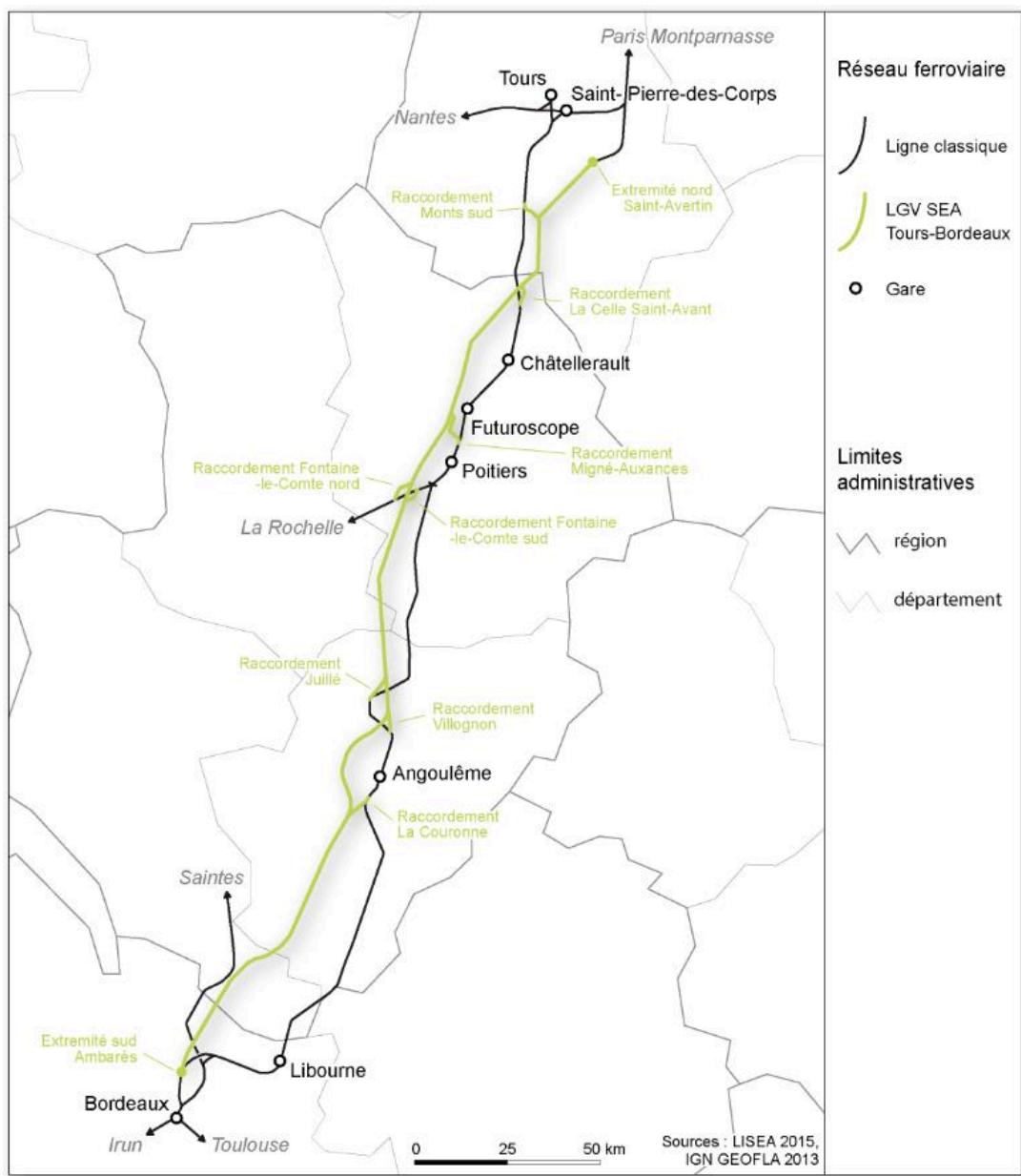
### *3.1.1.1 - Les caractéristiques et les objectifs du projet de LGV SEA*

La Ligne LGV SEA traverse 2 régions (Centre, Poitou-Charentes-Limousin-Aquitaine), 6 départements (Indre-et-Loire, Vienne, Deux-Sèvres, Charente, Charente-Maritime et Gironde) et 113 communes. Le projet de LGV SEA est composé de 302 km de ligne nouvelle entre Saint-Avertin (Tours) et Ambarès-et-Lagrave (Bordeaux) et 38 km de raccordement<sup>39</sup> (le tracé de la LGV SEA est présenté dans la figure ci-dessous).

---

<sup>39</sup> Au total, 8 raccordements (Monts-Sud, La-Celle-Saint-Avant, Migné-Auxances, Fontaine-le-Comte Nord, Fontaine-le-Comte Sud, Juillé, Villognon et La Couronne) desservant les gares existantes du Futuroscope, de Châtelleraut, Poitiers, La Rochelle, Angoulême et Libourne.

En accord avec les collectivités, il a été décidé de ne pas réaliser de gares nouvelles. Le système de raccordement permet en effet de relier les gares existantes des villes intermédiaires entre Paris et Bordeaux. Le projet de LGV SEA est dans le prolongement du projet de LGV Atlantique entre Paris et Tours. La distance totale en TGV avec le nouveau tracé est environ de 528 km entre Paris et Bordeaux au lieu de 579 km sur la ligne classique.



Responsable de l'axe : Elodie Manceau.

Retravaillé avec QGIS et Adobe Illustrator  
 Violaine Jurie, UMS RIATE 2414 / Observatoire socio-économique SEA, 2015

Figure 20 : le tracé de la LGV SEA (Source : l'OSE LGV SEA, réalisé par Violaine Jurie)

L'Etat et le gestionnaire d'infrastructures SNCF Réseau, ont retenu le système du partenariat public-privé sous la forme d'une concession. La société LISEA SAS<sup>40</sup> remporte l'appel d'offre du

<sup>40</sup> La société LISEA SAS est détenue par VINCI (33,4%), la Caisse des Dépôts et Consignations (25,4%), Meridiam (22%) et Ardian (19,2%),



projet de LGV SEA en 2010. Le contrat de concession confie le financement et la réalisation de la LGV SEA à la société LISEA, qui en assurera l'exploitation et la maintenance pendant 50 ans jusqu'en juillet 2061. Les prestations assurées par le concessionnaire sont rémunérées ensuite par les opérateurs ferroviaires à travers une redevance.

L'investissement global effectif du projet de LGV SEA s'élève à 7,7 M€<sub>2017</sub> dont 3,8 M€<sub>2017</sub> est apporté par LISEA. La participation publique se répartit entre l'Etat, les collectivités locales (dont 5 Conseils Régionaux, 19 Conseils Départementaux et 34 Etablissements Publics de Coopération Intercommunale) et le concédant SNCF Réseau. L'un des principaux avantages du modèle concessif reste la capacité des acteurs privés à lever des financements qui soulagent d'autant l'endettement public. Le modèle de concession a pour effets d'avoir limité la contribution publique à 50% du coût total du programme SEA.

Le regroupement des prestations par le concessionnaire présente aussi de nombreux avantages en termes de coûts et de performance du projet. Le concessionnaire a tout intérêt à bien maîtriser ses coûts et à respecter les délais de construction car ses recettes y sont directement associées. Le projet de LGV SEA a été livré avec près d'un mois d'avance sur un calendrier contractuel pourtant particulièrement contraint. En outre, le système de redevance implique un risque trafic supporté par le concessionnaire. Le transfert du risque trafic permet d'optimiser la performance de la ligne et de s'assurer de son utilisation optimale.

Les objectifs du projet de LGV SEA sont multiples :

- Améliorer la mobilité des voyageurs dans la région Sud-Ouest en plaçant Bordeaux à un peu plus de 2 heures de Paris.
- Améliorer l'accessibilité des territoires traversés en réduisant le temps de parcours entre les agglomérations concernées comme Tours, Poitiers, Angoulême, La Rochelle, Agen, Dax, Pau ou Tarbes.
- Favoriser l'utilisation du train au détriment de l'avion entre Paris et les métropoles de Bordeaux et Toulouse.
- Rééquilibrage modal en faveur du fer dans la région Sud-Ouest.
- Libérer des capacités sur la ligne classique et favoriser le développement du fret ferroviaire.

- Favoriser le développement des services régionaux TER et la complémentarité TGV – TER.
- La LGV SEA constitue un maillon clé du réseau européen à grande vitesse entre Paris et le Nord de l'Europe.

L'offre de transport ferroviaire s'améliore fortement grâce à la nouvelle infrastructure ferroviaire à grande vitesse. Il s'agit d'une réelle volonté politique pour favoriser la mobilité et l'accessibilité des territoires, et d'améliorer la compétitivité du mode ferroviaire par rapport à l'avion et à la voiture.

### 3.1.1.2 - La LGV SEA et l'évolution de l'offre ferroviaire

Avant la mise en exploitation commerciale de la LGV SEA, les rames de TGV circulaient à 160 km/h sur le réseau conventionnel. La nouvelle LGV est une double voie, réservée aux circulations commerciales à grande vitesse spécialisées « voyageurs ». Elle est capable d'accueillir les rames de la nouvelle génération de « TGV Océane » qui roulent à 320 km/h et les rames classiques de « TGV Atlantique » qui roulent à 300 km/h. Les effets de la vitesse de LGV permettent des gains de temps de parcours en train. Dans le tableau ci-dessous, nous montrons l'évolution du temps de parcours sur les principales liaisons concernées.

Tableau 7 : la comparaison du temps de parcours sur les principales liaisons radiales concernées

Paris <=>	Meilleurs temps de parcours			Temps de parcours moyen		
	2013 Min	2018 Min	Gains (Min)	2013 Moyen	2018 Moyen	Gains (Moyen)
Poitiers	1:38	1:18	0:20	1:48	1:34	0:14
La Rochelle	3:14	2:26	0:48	3:21	2:44	0:37
Angoulême	2:21	1:43	0:38	2:31	2:05	0:26
Bordeaux	3:14	2:03	1:11	3:28	2:23	1:05
Pau	5:25	4:10	1:15	5:33	4:18	1:14
Tarbes	6:18	5:03	1:15	6:25	5:13	1:11
Agen	4:21	3:13	1:08	4:22	3:15	1:07
Toulouse	5:29	4:11	1:18	5:29	4:17	1:12

Les gains de temps de parcours sont supérieurs à 1h lors que les trains effectuent un parcours complet sur la LGV SEA. Sur les O-D intermédiaires, les gains de temps de parcours sont moins importants, ils sont de l'ordre de 30 à 43 minutes Pour Paris – Angoulême et Paris – La Rochelle et 15 minutes pour Paris – Poitiers. Dans la figure ci-dessous, nous montrons que les gains de temps de parcours sont positivement corrélés avec la distance parcourue sur LGV SEA. Les gains de temps de bout en bout (Tours et Bordeaux) sur la LGV SEA sont les plus importants (50 minutes à une vitesse de 320 km/h).

Les gains de temps de parcours sont relativement moins importants lorsqu'on considère le temps de parcours moyen. Ces temps de trajet vont cependant progresser car il est prévu que toutes les rames TGV Atlantique soient remplacées avant 2021 par les nouvelles rames « Océane » capables de rouler à 320km/h (+20km/h). Sur les liaisons intersecteurs<sup>41</sup>, les gains de temps de parcours sont généralement inférieurs à 1h.

---

<sup>41</sup> Typologie des dessertes :

- Les liaisons radiales correspondent aux trains en provenance ou à direction d'une gare située en Île-de-France.
- Les liaisons intersecteurs sont les liaisons Province-Province qui ne passent pas Paris (contournement IDF par exemple).
- Les liaisons de cabotage sont les liaisons intrarégionales ou interrégionales (exemple : Bordeaux Angoulême ou Poitiers Tours).
- Les liaisons internationales sont en direction ou en provenance de l'étranger.

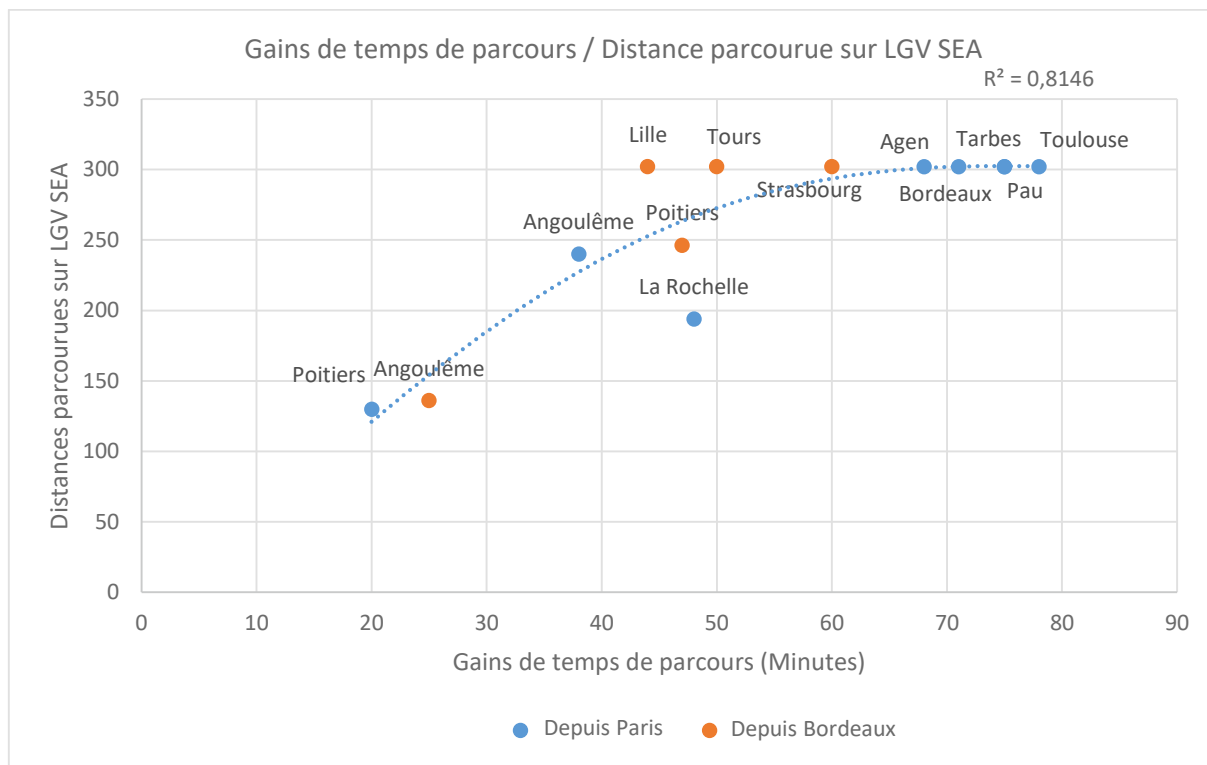


Figure 21 : la corrélation entre la distance parcourue sur la LGV SEA et les gains de temps de parcours (auteur, 2018).

En général, l'amélioration de la vitesse des trains s'accompagne d'une augmentation du tarif. Des tarifs réglementés de référence sont appliqués par les services commerciaux de SNCF Mobilités. Il s'agit d'un prix de base particulier homologué annuellement par l'Etat pour chaque relation. Cela s'intitule le Plein Tarif Loisir (PTL), il est publié chaque année dans les conditions de vente de SNCF Mobilités. Il s'agit d'un prix payé sans aucune réduction sur une origine-destination donnée. Le PTL s'est progressivement largement affranchi du barème kilométrique, il est spécifique à chaque axe en fonction de la situation de marché. Une étude de marché est réalisée au moment de la création d'une ligne afin de proposer un PTL adapté. Le PTL est généralement plus cher que le prix de base kilométrique<sup>42</sup> mais doit être inférieur au plafond réglementaire (qui correspond à 2,1 fois le prix de base).

<sup>42</sup> La formule et les paramètres pour le calcul du prix de base kilométrique sont présentés dans les conditions générales de vente de Voyages SNCF.

$$\text{Prix basic} = a * d + b$$

Avec

$d$  : la distance (les kilomètres parcourus entre une origine et une destination)

L'évolution du PTL en 2<sup>ème</sup> classe sur les quatre principales liaisons concernées par la LGV SEA est présentée dans la figure suivante.

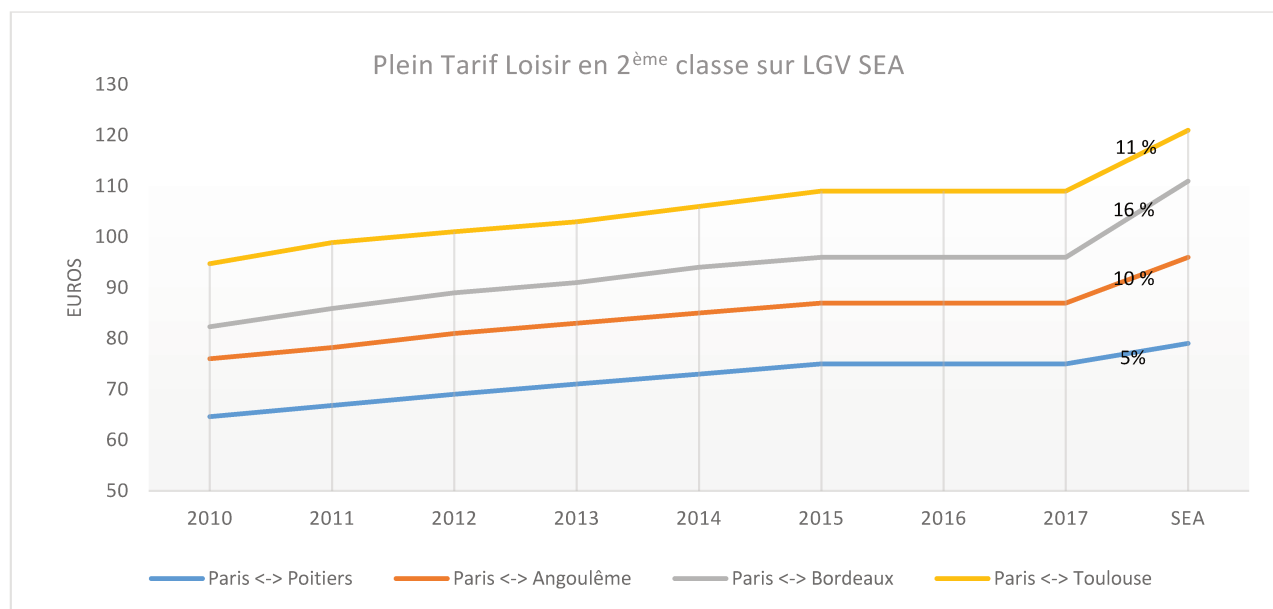


Figure 22 : l'évolution du PTL 2<sup>ème</sup> classe sur les principales liaisons concernées par la LGV SEA (sources : conditions de vente de SNCF Mobilités)

Sur ces quatre liaisons, les PTL en 2<sup>ème</sup> classe ont augmenté d'environ 15 % entre 2010 et 2015 en appliquant les principes des hausses annuelles générales. Puis, aucune augmentation n'a été observée entre 2015 et 2017. En effet, d'importants travaux sur ces liaisons ont eu lieu pendant cette période, le temps de parcours en moyenne sont rallongés, ce qui explique la stagnation du tarif.

L'augmentation du PTL est donc évidente après la mise en service de la LGV SEA. En 2<sup>ème</sup> classe, les prix augmentent de 5 % sur Paris-Poitiers, de 10 % sur Paris-Angoulême, de 16 % sur Paris-Bordeaux et de 11 % sur Paris-Toulouse. Les PTL en 1<sup>ère</sup> classe augmentent de manière plus forte :

---

*a et b : la constante et le paramètre qui varient en fonction de la distance.*

32 % sur Paris-Bordeaux, 6 % sur Paris-Poitiers, 10 % sur Paris-Angoulême et 22 % sur Paris-Toulouse.

Dans le tableau 8, nous comparons les gains de temps de parcours et la hausse des tarifs :

Tableau 8 : pourcentage des gains de temps de parcours et des hausses de PTL

Paris <=>	Meilleurs temps de parcours			Plein Tarif Loisir	
	2013 Min	2018 Min	Gains Min (%)	Hausse de PTL en 2ème classe (%)	Hausse de PTL en 1ère classe (%)
<b>Poitiers</b>	1:38	1:18	20%	5%	6%
<b>Angoulême</b>	2:21	1:43	27%	10%	10%
<b>Bordeaux</b>	3:14	2:03	37%	16%	32%
<b>Toulouse</b>	5:29	4:11	24%	11%	22%

On constate que sur la liaison Paris-Bordeaux, les gains relatifs de temps de parcours sont les plus importants, l'augmentation du PTL est la plus forte. On constate que les gains de temps de parcours sont proportionnellement plus importants que l'augmentation du PTL, il y a donc un surplus (gain) pour le voyageur-type ayant une valeur du temps moyenne.

Le nouveau service TGV fait aussi évoluer la qualité du service ferroviaire en termes de dessertes, de confort et de régularité avec les nouvelles grilles horaires, les nouvelles rames TGV et le nouveau gestionnaire de l'infrastructure. Les schémas de desserte élaborés par la SNCF au moment de la DUP prévoyaient des dessertes renforcées à la mise en service de LGV SEA. Pour les voyageurs, cela se traduit par une augmentation de la fréquence de service.

Deux scénarios ont été établis par la SNCF pour les prévisions de trafic :

- Le scénario « A » prévoit une augmentation de 5 fréquences radiales et le prolongement de missions existantes pour le projet de LGV SEA Angoulême-Bordeaux, 3 fréquences intersecteurs et 7 fréquences radiales supplémentaires (2 vers l'Espagne) pour le projet LGV SEA Tours-Angoulême.
- Le scénario « B » prévoit une augmentation de 3,5 fréquences radiales et de prolongements de missions existantes pour le projet LGV SEA Angoulême-Bordeaux, 3 fréquences

intersecteurs et 5 fréquences radiales (2 vers l'Espagne) pour ce qui concerne la LGV SEA Tours-Angoulême.

L'offre de desserte ferroviaire dans les régions traversées devait aussi être renforcée avec la mise en service de la LGV. Le cahier des charges de l'infrastructure de LGV SEA approuvé en 1996 par décision ministérielle prévoyait un renforcement des dessertes des principales villes régionales. Le projet devrait donner aux régions Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val-De-Loire un positionnement stratégique dans la géographie économique de l'Europe. Une convention relative à la desserte ferroviaire sur la LGV SEA a par ailleurs été signée en février 2011 dont l'objectif est de garantir la pérennité des dessertes TGV existantes de plusieurs villes sur l'axe Tours-Bordeaux.

Une comparaison *ex ante/ex post* du nombre de trains directs sur les principales liaisons radiales et intersecteurs contournant l'Ile-De-France (IDF) est présentée dans le tableau suivant. Les scénarios de Déclaration d'Utilité Publique (DUP) concernant les dessertes sont présentés dans les deux dernières colonnes.

Tableau 9 : l'évolution des dessertes ferroviaires sur les principales liaisons radiales concernées et la comparaison avec les scénarios A et B du dossier DUP

Paris <=>	Desserte ferroviaire			Scénarios DUP	
	2013	2018	+/- Desserte quotidienne	DUP Scénario "A"	DUP Scénario "B"
Poitiers	17,5	16,5	-1	-	-
La Rochelle	7	7	0	-	-
Angoulême	11	10	-1	-	-
Bordeaux	20,5	28	7,5	12	8,5
Pau	3	4,5	1,5	2	2
Tarbes	3	4,5	1,5	2	2
Agen	4	5,5	1,5	2	2
Toulouse	4	6	2	2	2

L'augmentation du nombre d'allers-retours sur la liaison Paris-Bordeaux est la plus importante avec 7,5 dessertes supplémentaires par jour<sup>43</sup>. Cependant, celle-ci est toujours inférieure à ce qui a

<sup>43</sup> Le nombre d'allers-retours dans les deux sens de circulation. Les 7,5 dessertes supplémentaires par jour correspondent aux 8 trains dans le sens de Bordeaux à Paris et 7 trains dans le sens de Paris à Bordeaux.

été prévu par les scénarios de DUP. Sur les liaisons intersecteurs Île-de-France, l'augmentation du nombre d'allers-retours est comprise entre 1,5 et 2 dessertes supplémentaires. Le nombre d'allers-retours n'a pas évolué sur la liaison Paris-La Rochelle. Sur les liaisons Paris-Poitiers et Paris-Angoulême, le nombre d'allers-retours quotidiens a, quant à lui, légèrement baissé par rapport à la situation avant la mise en service de la LGV SEA.

Sur les liaisons intersecteurs (depuis Bordeaux), le nombre de dessertes quotidiennes diminue par rapport à la situation avant la mise en service de la LGV SEA. La diminution du nombre d'allers-retours quotidiens est la plus importante pour Angoulême (3 allers-retours) et Tours (3,5 allers-retours).

L'évolution de la qualité des dessertes se reflète aussi sur l'intervalle de service et l'amplitude de service. Nous faisons une comparaison *ex ante / ex post* dans le tableau ci-dessous.

Tableau 10 : l'évolution de l'intervalle de service et l'amplitude de service sur les liaisons radiales concernées

Paris <=>	Intervalle de service			Amplitude		
	2013	2018	+/- Intervalle de service	2013	2018	+/- Amplitude
Poitiers	0:54	0:57	+ 0:03	14:04	14:55	+ 0:51
La Rochelle	2:08	2:10	+ 0:02	12:51	13:05	+ 0:14
Angoulême	1:24	1:36	+ 0:12	14:02	14:32	+ 0:30
Bordeaux	0:42	0:33	- 0:09	13:50	15:14	+ 1:24
Pau	2:59	2:51	- 0:08	5:59	10:00	+ 4:01
Tarbes	2:58	2:50	- 0:08	5:57	9:55	+ 3:58
Agen	4:00	2:39	- 1:21	12:00	11:57	- 0:02
Toulouse	4:00	2:24	- 1:36	12:00	12:01	+ 0:01

Grâce à la mise en service de la LGV SEA, l'intervalle de service s'améliore sur les liaisons radiales au-delà de Bordeaux, notamment sur les liaisons Paris-Agen et Paris-Toulouse. L'intervalle de service diminue fortement, soit de 1h21 et de 1h36 respectivement sur ces deux liaisons. Sur les liaisons intermédiaires entre Paris et Bordeaux, l'intervalle de service augmente légèrement par rapport à la situation *ex ante*.

L'allongement de l'amplitude de service a été respecté sur l'ensemble des liaisons radiales et intersecteurs IDF, à l'exception de Paris-Agen. Les effets de la LGV SEA sur l'amplitude de service sont importants sur les liaisons Paris-Bordeaux (1h24), Paris-Pau (4h01) et Paris-Tarbes



(3h58). Sur les liaisons intermédiaires entre Paris et Bordeaux, l'amplitude de service s'améliore également mais de façon moins importante.

Sur les liaisons intersecteurs (depuis Bordeaux), la qualité de desserte en termes d'intervalle de service s'est dégradée avec la nouvelle offre ferroviaire à grande vitesse. En ce qui concerne l'amplitude de service, l'offre s'améliore sur les liaisons Bordeaux-Angoulême, Bordeaux-Poitiers et Bordeaux-Tours. En revanche, la qualité de l'offre en termes de l'amplitude de service s'est dégradée par rapport à la situation *ex ante*.

Les changements apportés par le nouveau service ferroviaire se reflètent aussi sur d'autres aspects. La qualité de service en termes de régularité de service, confort et sécurité s'améliore grâce à la mise en service de la LGV SEA. Sur la première année d'exploitation, la régularité sur la ligne SEA atteint 94 %. La nouvelle ligne est plus performante, elle permet même aux trains de rattraper des retards. Les nouvelles rames du TGV Océane sont plus confortables. Elles offrent notamment une meilleure connectivité grâce au Wifi à bord pour tous les voyageurs. La ligne LGV SEA est aussi plus sécurisée grâce au nouveau système de gestion de la sécurité.

Dans les territoires concernés par la LGV SEA, le nouveau service TGV a bouleversé le contexte de la concurrence intermodale, notamment sur la liaison Paris-Bordeaux. L'évolution de l'offre ferroviaire concernant le temps de parcours, les tarifs et la qualité de service va certainement impacter la compétitivité du train et ensuite pousser les autres modes de transport à réagir pour conserver leurs parts de marché. L'évolution de l'offre est plus significative sur la liaison Paris-Bordeaux. Le niveau du trafic concerné est aussi plus important, on a enregistré 1,8 millions de voyageurs en train sur cette liaison en 2015 (SNCF Voyages, OSE LGV SEA).

Dans le périmètre de l'axe SEA, au total 13 aéroports de province disposent des liaisons aériennes avec la capitale du pays parmi lesquels 4 aéroports disposent de liaisons avec l'aéroport Paris Charles-De-Gaulle (CDG), 13 liaisons avec Paris Orly (ORY) (Les liaisons aériennes dans le périmètre d'étude sont présentées en annexe). Sur la liaison Paris-Bordeaux, le trafic aérien intérieur atteint près d'un million de voyageurs, qui sont tous concernés par la nouvelle offre de TGV. En plaçant Bordeaux à environ 2 h de Paris, la compétitivité du TGV s'améliore fortement sur cette liaison.

Dans la section suivante, nous présentons le contexte de la concurrence intermodale sur la liaison Paris-Bordeaux ainsi que les premiers effets observés sur les modes de transport en concurrence.

## Section 3.1.2 : L'offre et la demande de transport sur la liaison Paris-Bordeaux

### *3.1.2.1 - L'évolution de l'offre des modes de transport*

Cinq infrastructures de transport majeures concernant la relation Paris-Bordeaux : les aéroports de Paris Orly, Paris Roissy Charles de Gaulle (CDG) et Bordeaux Mérignac, la LGV Paris-Bordeaux et l'autoroute A10. Les voyageurs peuvent choisir entre l'avion, le TGV, la voiture (voiture personnelle ou covoiturage) et l'autocar. Le contexte de l'offre des transports sur la liaison Paris-Bordeaux est présenté dans la figure ci-dessous.

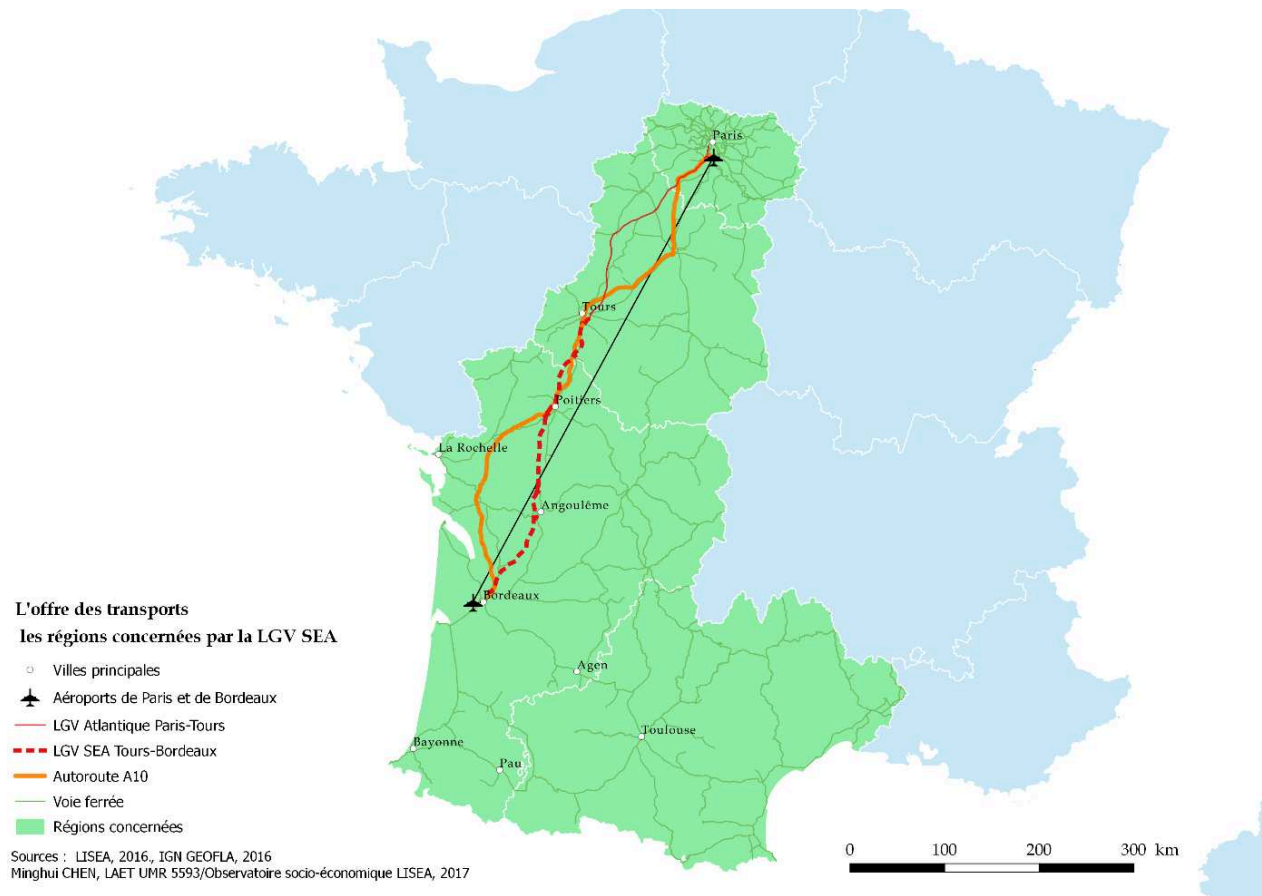


Figure 23 : l'offre des transports sur la liaison Paris-Bordeaux

Air France est la seule compagnie aérienne exploitant le service aérien entre Paris et Bordeaux, sous la marque « HOP ! ». En 2018, 10 allers-retours entre Paris Orly et Bordeaux Mérignac et 6 allers-retours entre Paris CDG et Bordeaux Mérignac sont assurés quotidiennement sur la liaison Paris-Bordeaux. Il est important de souligner que le nombre d'allers-retours était de 14 entre Paris Orly et Bordeaux Mérignac avant la mise en service de la LGV SEA, Air France a décidé de supprimer 4 allers-retours quotidiens depuis octobre 2017 pour faire face à la concurrence du TGV. Le temps de parcours en avion est compris entre 1h05 et 1h15.

SNCF Mobilités est l'opérateur ferroviaire qui détient le monopole de l'exploitation de la liaison Paris-Bordeaux avec le service commercial inOUI et le service low-cost OUIGO. La diminution du temps de parcours entre Paris et Bordeaux renforce fortement la compétitivité de ces services.

Le réseau routier en concurrence directe avec la LGV SEA est l'autoroute A10, qui relie Paris et Bordeaux en passant par Orléans, Tours, Poitiers, Niort et Saintes avec une distance totale de 585

km. L'autoroute A10 est aussi en concurrence avec la RN 10 entre Poitiers-Bordeaux via Angoulême, qui est gratuite, plus courte en termes de distance mais plus longue en termes de temps de parcours (au minimum 10 à 20 minutes supplémentaires). L'autoroute A10 est exploitée par 2 sociétés autoroutières : Cofiroute (détenue majoritairement par VINCI Autoroutes) sur le tronçon Paris-Poitiers et ASF (Autoroutes du Sud de la France, détenue intégralement par VINCI Autoroutes) sur le tronçon Poitiers-Bordeaux. Le péage d'un trajet complet Paris-Bordeaux pour les véhicules légers est de 55,1 €<sub>2017</sub>. En faisant une simulation pour un trajet entre Paris et Bordeaux, le prix moyen varie entre 90 €<sub>2017</sub> et 120 €<sub>2017</sub> par véhicule pour un aller simple selon le type de véhicule utilisé. Il s'agit du coût marginal d'utilisation de la voiture particulière qui prend en compte seulement les frais de carburant et le montant des péages autoroutiers.

Deux opérateurs d'autocars coexistent sur la liaison Paris-Bordeaux : ISILINES et OUIBUS (filiale du groupe SNCF). ISILINES domine le marché d'autocar sur la liaison Paris-Bordeaux en offrant 6,5 allers-retours dans la journée. OUIBUS propose seulement 2,5 allers-retours dans la journée entre Paris et Bordeaux. Le meilleur temps de trajet proposé est actuellement de 7h20.

L'Observatoire OSE LGV SEA a procédé à un suivi de l'offre des différents modes, avant et après la mise en service de la LGV SEA. On constate un gain significatif de sièges offerts par le TGV après l'ouverture de la ligne SEA (et la mise en service progressive des rames Océane plus capacitaires en remplacement des anciennes rames Atlantique, en complément de l'offre *low-cost* OUIGO elle aussi beaucoup plus capacitaire avec 1 268 sièges). L'offre aérienne en termes de sièges offerts a quant à elle reculé par rapport à la situation *ex ante*, la suppression de 4 allers-retours entre Paris ORY et Bordeaux en est la principale explication. La part de l'offre d'autocar et de covoiturage est marginale sur cette liaison.

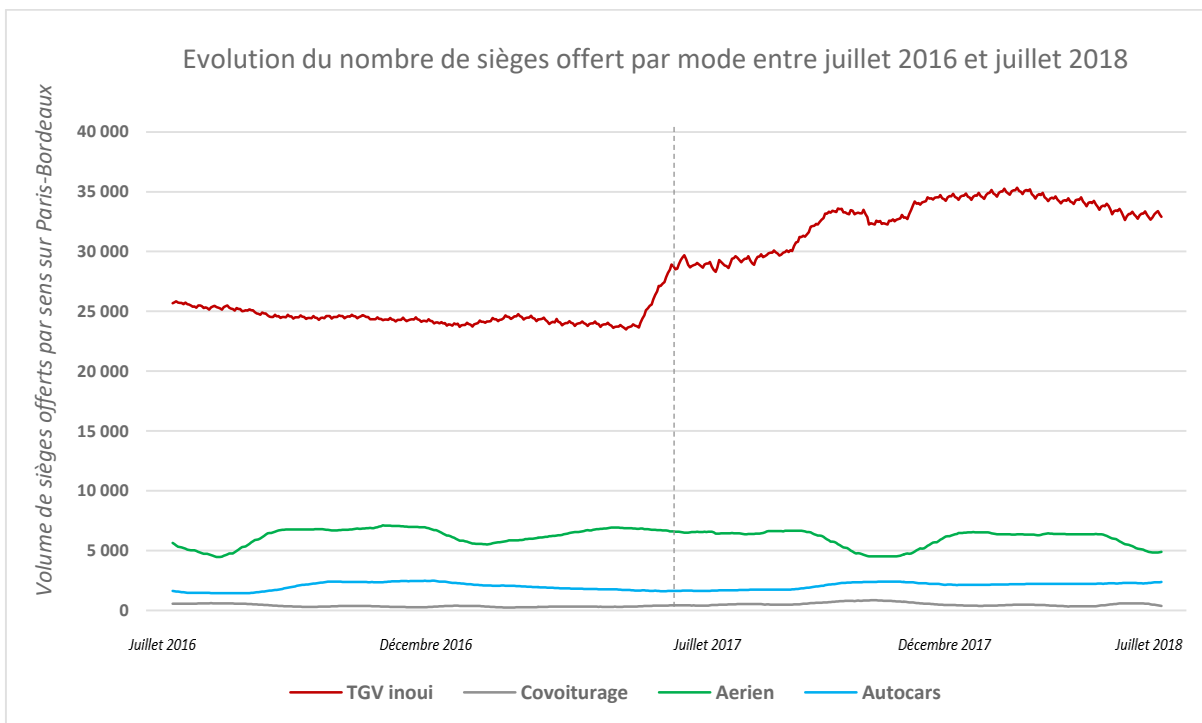


Figure 24 : l'évolution du nombre de sièges offert sur la liaison Paris-Bordeaux (Sources : OSE LGV SEA)

L'évolution *ex ante* / *ex post* des tarifs moyens par mode de transport entre Paris et Bordeaux est présentée dans la figure ci-dessous. Les différents types de tarifs en avion et en TGV ont été regroupés en fonction du tarif « Flex » et tarif « Non Flex », agrégeant pour le train 1<sup>ère</sup> et 2<sup>nde</sup> classe. Le tarif « Flex » correspondant aux offres Pro (échange et remboursement flexibles) et le tarif « no flex » correspondant aux offres Loisirs (échanges et remboursements moins flexibles).

### Évolution des tarifs par mode entre Paris et Bordeaux (Aller-Retour)

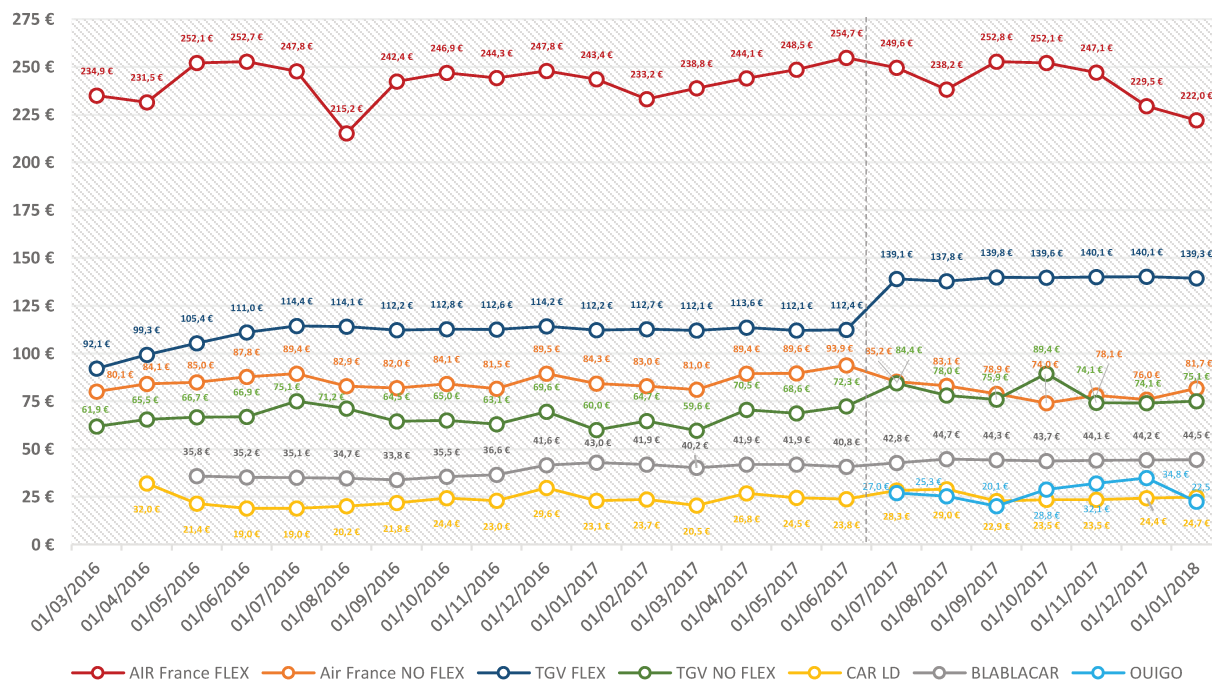


Figure 25 : l'évolution des tarifs par mode de transport sur la liaison Paris-Bordeaux (tarifs moyens aller simples entre 1 et 30 jours avant la circulation, sources : OSE LGV SEA 2018)

On constate l'évolution importante des tarifs en avion et en TGV après la mise en service de la LGV en juillet 2017. Les tarifs « Flex » moyens en TGV augmentent d'environ 25%. Les tarifs « No Flex » moyens en TGV augmentent aussi mais de manière moins importante. Les tarifs proposés en avion baissent après la mise en service de la LGV.

En moyenne, les tarifs « Flex » en avion sont les plus chers, suivis par les tarifs « Flex » en TGV. Les tarifs « No Flex » en avion, initialement plus cher que les tarifs « No Flex » en TGV, deviennent quasiment équivalents à ces derniers. Le covoiturage et l'autocar sont les modes de transport les moins chers avant l'arrivée du service OUIGO.

Les principales caractéristiques de l'offre des différents modes de transport sont recensées dans le tableau suivant :

Tableau 11 : les caractéristiques des différents modes de transport sur la liaison Paris-Bordeaux

Paris Bordeaux	<=>	Temps de parcours (min)	Temps de parcours (moyen)	Fréquence	Tarifs Non Flex	Tarifs Flex	moyens	moyens
<b>Avion</b>		1:05	1:07	16 (6 à CDG)	78,00 €	250,00 €		
<b>TGV</b>		2:03	2:23	28	75,00 €	140,00 €		
<b>Voiture</b>		5:27	5:35	-	109,00 €	-		
<b>Covoiturage</b>		5:27	5:35	-	47,00 €	-		
<b>Autocar</b>		7:20	8:23	10	28,00 €	-		
<b>OUIGO</b>		2:11	2:22	3 (1 à Massy)	25,00 €	40€ (+ options)		

### 3.1.2.2 - Les premiers effets sur la demande de transport

Le dossier DUP de 2005-2007 prévoyait, après mise en service de tous les tronçons de la LGV SEA en 2016, un trafic TGV sur l'axe SEA de 19,373 millions de voyageurs (soit un gain de 3,380 millions de voyageurs représentant +21,1% de trafic par rapport à la situation de référence). Les premiers chiffres communiqués par SNCF Mobilités après un an d'exploitation de la ligne confirment la fiabilité de cette prévision (Bilan LOTI Intermédiaire LGV SEA).

Les données du trafic sur la liaison Paris-Bordeaux ne sont pas disponibles. SNCF Mobilité considère ces données comme un secret commercial et refuse de les communiquer. A l'état actuel, nous ne sommes pas capables de connaître l'évolution du trafic ferroviaire sur la liaison Paris-Bordeaux en dehors de ce que SNCF communique.

Les données du trafic aérien sont par contre disponibles. Elles nous permettent de voir les premiers effets de la nouvelle LGV sur la demande de transport aérien. Nous présentons l'évolution *ex ante* / *ex post* du trafic aérien mensuel sur la liaison Paris-Bordeaux dans la figure ci-dessous.

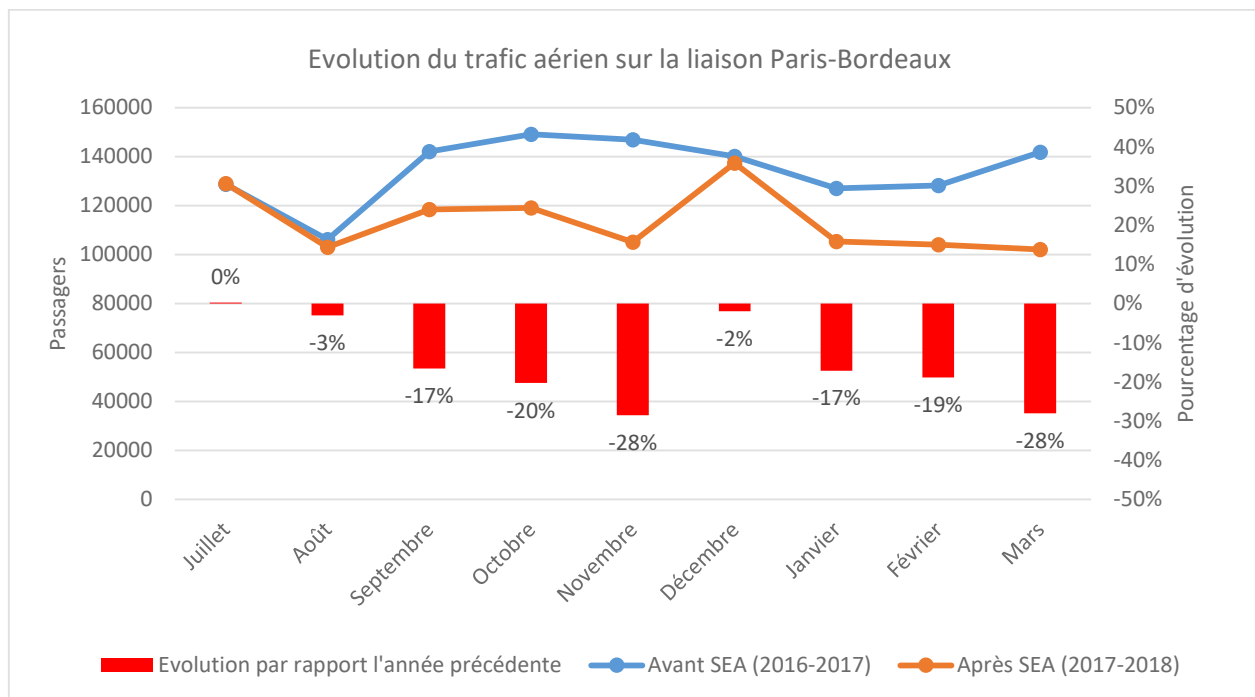


Figure 26 : l'évolution du trafic aérien sur la liaison Paris-Bordeaux (Sources : Eurostat, 2018)

Nous constatons une chute du trafic aérien après la mise en service de la LGV SEA. La diminution du trafic aérien est très significative pendant les périodes hors vacances. On a enregistré une baisse du 28 % du trafic aérien de novembre 2017 par rapport à novembre 2016 et de mars 2018 par rapport à mars 2017. Pendant les mois de septembre, octobre, janvier et février, la baisse du trafic aérien varie entre 17 % et 20 %.

Ces données *ex post* montrent le phénomène du transfert modal au détriment de l'avion sur la liaison Paris-Bordeaux. Nous pouvons effectuer une analyse de la relation concurrentielle des modes de transport grâce aux données recensées concernant l'offre de transport. Le principe de cette analyse est basique, nous supposons que les voyageurs préféreront toujours le mode de transport dont les coûts sont les plus faibles. Cette analyse, basée sur le principe de la méthode Prix-Temps (*Encadré 10*), permet de visualiser l'évolution de la compétitivité du train.



---

*Encadré 10 : le modèle Prix-Temps*

---

Le modèle Prix-Temps, fondé sur le concept de coût généralisé, est fréquemment appliqué en France. Nous faisons l'hypothèse que les voyageurs font le choix modal en fonction de leurs valeurs du temps et des coûts associés à chaque mode de transport. L'autre hypothèse du modèle consiste à supposer un « usager moyen » qui paie un tarif moyen pour les déplacements (Bonnel, 2001).

Nous supposons que « l'usager moyen »  $i$  fait son choix en fonction du coût généralisé de l'avion et du train. Les fonctions du coût généralisé sont présentées ci-dessous :

$$C_a^i = p_a + h_i * t_a$$

$$C_f^i = p_f + h_i * t_f$$

*Avec*

$C_a^i$  et  $C_f^i$  : les coûts généralisés de l'avion et du train pour un voyageur  $i$

$p_a$  et  $p_f$  : les prix de l'avion et du train

$t_a$  et  $t_f$  : le temps de transport de l'avion et du train

$h_i$  : la valeur du temps d'un voyageur  $i$

La détermination de la valeur du temps de basculement est l'étape essentielle du modèle Prix-Temps. Nous choisissons une valeur du temps  $h_0$  telle que  $C_a^i = C_f^i$ . Cette valeur de basculement nous aide à déterminer les parts de marché de l'avion et du train.

$$h_0 = \frac{p_a - p_f}{t_f - t_a}$$

Si le voyageur  $i$  décide de choisir le train, le coût généralisé du train va être inférieur à celui de l'avion :

$$C_f \leq C_a$$
$$= (p_f + h_i * t_f) - (p_a + h_i * t_a) \leq 0$$

*Alors*

$$h_i \leq h_0$$

En comparant la valeur du temps d'un voyageur et la valeur de basculement, nous sommes capables d'expliquer le choix du mode de transport.

La figure 27 ci-dessous montre l'évolution des coûts généralisés des différents modes de transport sur la liaison Paris-Bordeaux en fonction de la valeur du temps (le temps d'accès et d'embarquement ne sont pas pris en compte).

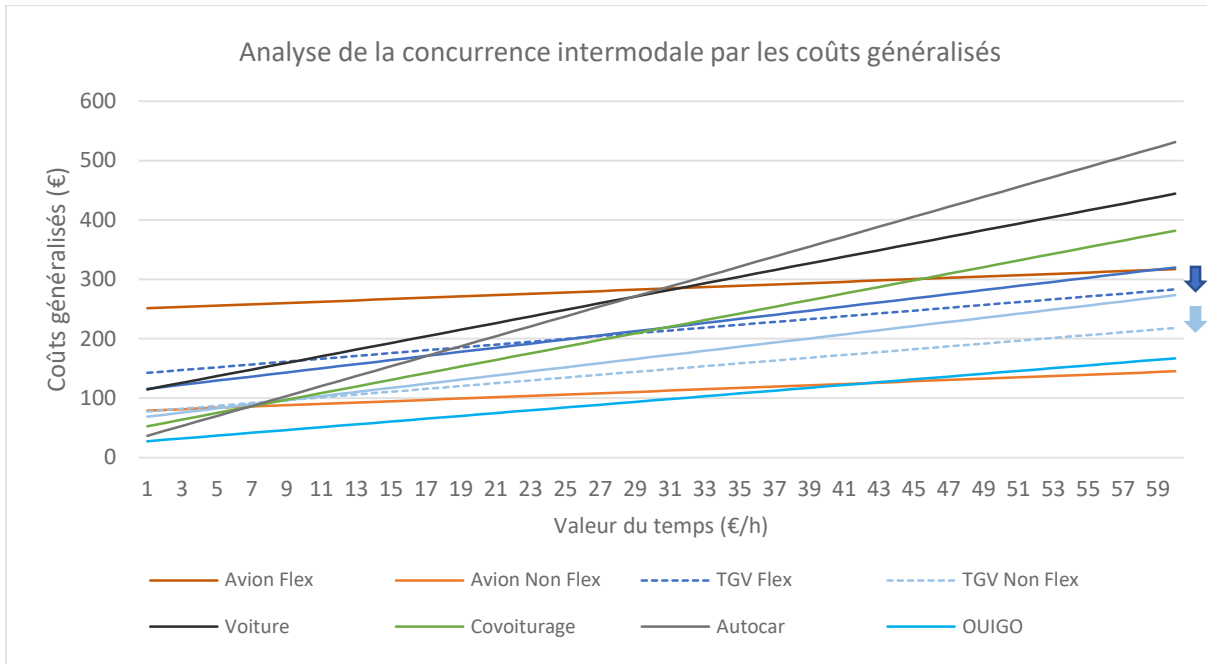


Figure 27 : les coûts généralisés des modes de transport en fonction de la valeur du temps sur la liaison Paris-Bordeaux.

Les coûts généralisés en TGV sont en baisse avec la nouvelle offre ferroviaire à grande vitesse pour les voyageurs qui ont une valeur du temps supérieur à 25 €<sub>2017</sub>/h (les flèches sur la figure ci-dessus). Globalement, le TGV est très compétitif par rapport à la voiture particulière, l'autocar et le covoiturage lorsque la valeur du temps des voyageurs est supérieure à 30 €<sub>2017</sub>/heure.

De manière générale, le service OUIGO est le plus compétitif par rapport aux autres modes de transport alternatifs. Le tarif non flexible en avion est aussi très compétitif si on ne prend en compte que le temps de parcours d'aéroport à aéroport (c'est-à-dire hors temps d'accès, de précaution et de diffusion). En pratique, les zones aéroportuaires étant situées hors des agglomérations, les temps d'accès et de diffusion sont souvent importants, ce qui conduit à anticiper d'autant les aléas sous la forme d'un temps dit de « précaution » qui peut varier selon les individus de quelques minutes à plusieurs heures. Tout ceci impacte le temps de trajet global et donne un avantage au train pour se connecter de centre-ville à centre-ville.

Pour les voyageurs dont la valeur du temps est très élevée (supérieure à 43 €<sub>2017</sub>/heure), le service aérien avec le tarif non flexible est toujours plus performant que le service OUIGO. Cela explique

la raison pour laquelle le service aérien est capable de résister à la concurrence de la nouvelle offre ferroviaire à grande vitesse, même si là encore, la non prise en compte des temps de précaution de l'aérien favorise ce mode dans les calculs.

L'analyse des coûts généralisés montre l'amélioration de la compétitivité du train avec la mise en service de la LGV SEA. Cependant, cette analyse est très agrégée et donne des résultats grossiers. Pour que l'analyse soit plus pertinente, il est plus pertinent de mobiliser un modèle désagrégé qui est plus adapté pour expliquer les comportements individuels du choix modal des voyageurs. Les données des enquêtes « voyageurs » sont nécessaires pour pouvoir caler ces modèles désagrégés.

## Conclusion du chapitre 3.1

Grâce à l'Observatoire Socio-Economique, nous avons pu récupérer les données concernant l'offre de transports entre la phase avant et après la mise en service de la LGV SEA. Ces données sont indispensables pour l'analyse de la concurrence intermodale.

Sur la liaison Paris-Bordeaux, les effets de la vitesse sont remarquables. Les gains de temps de parcours constituent l'élément essentiel pour expliquer l'évolution de la compétitivité. En même temps, nous nous apercevons que l'offre de transport évolue aussi en termes de nombre de sièges, de fréquence, d'intervalle de service, d'horaires et de prix payés. L'étude du choix modal consiste à expliquer les effets de ces différents facteurs de l'offre de transport sur la demande.

Un an après la mise en service de la LGV SEA, nous commençons à observer les premiers effets de la concurrence Air-Fer sur le trafic aérien. Les impacts de la nouvelle offre ferroviaire sont évidents sur le trafic aérien. Nous observons une forte baisse du trafic aérien après la mise en service de la LGV SEA. L'analyse avec la méthode Prix-Temps nous aide à expliquer les gains de compétitivité du train par rapport à l'avion par la notion de coûts généralisés. La forte amélioration de la vitesse et l'absence d'envolée des prix sont les principales explications du gain de compétitivité du train par rapport à l'avion.

Nous utiliserons les éléments que nous présentons dans ce chapitre pour constituer les scénarios de l'offre de transport sur la liaison Paris-Bordeaux. Les modèles du choix modal contribuent à

estimer les parts de marché Air-Fer pour les différents scénarios de l'offre. Il s'agit de faire une prévision de l'évolution des parts de marché du train et de l'avion avec la nouvelle offre de transport TAGV.

Dans le chapitre suivant, nous allons aussi présenter les données d'enquêtes « voyageurs » dont nous disposons pour expliquer les comportements de choix modal des voyageurs. Ces données sont indispensables pour une approche désagrégée du choix modal. Le questionnaire a été spécialement construit afin de collecter les informations liées aux horaires de déplacements et aux heures d'arrivées souhaitées des voyageurs.

# Chapitre 3.2 : Les enquêtes

## « voyageurs » et les données spécifiques

### « horaires »

## Introduction du chapitre 3.2

Nous proposons une approche désagrégée dans l'analyse de la concurrence Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux. Les enquêtes « voyageurs » constituent la solution la plus adaptée. Dans la mesure où des enquêtes « voyageurs » fournies des informations liées aux caractéristiques des modes de transport choisis et aux caractéristiques socioéconomiques et sociodémographiques des voyageurs.

En outre, nous avons besoin de données spécifiques pour modéliser le choix des horaires. Les informations détaillées concernant les heures de départ, les heures d'arrivée et les heures d'arrivée souhaitées sont nécessaires dans le cadre de cette méthodologie. Le questionnaire utilisé pour nos enquêtes « voyageurs » a été adapté pour pouvoir accéder à ces données.

Les informations liées aux horaires programmés par les opérateurs de transport sont aussi nécessaires. Nous avons aussi enregistré le changement des horaires dans la situation *ex ante* et *ex post* de LGV SEA afin d'évaluer l'évolution de la qualité des dessertes sur la liaison Paris-Bordeaux.

Ce chapitre est structuré de la manière à présenter les données par rapport aux modèles utilisés. Cela permet de mieux connaître les avantages et les inconvénients de notre base des données.

- Dans la section 3.2.1, nous présentons les caractéristiques générales des enquêtes « voyageurs » réalisées.

- Dans la section 3.2.2, nous montrons les caractéristiques des données utilisées pour les modèles de TAD et COP.
- Dans la section 3.2.3, nous présentons les caractéristiques des données utilisées pour le modèle combiné choix modal – choix d’horaires.

## Section 3.2.1 : Les données des enquêtes « voyageurs » spécifiques

L’observatoire OSE LGV SEA fournit des moyens pour réaliser des enquêtes « voyageurs ». Pour assurer la qualité des données collectées, nous avons fait le choix de solliciter un bureau d’étude. Nous décidons le périmètre d’étude, l’échantillonnage et le questionnaire. Le bureau d’étude va former les enquêteurs avant le déroulement des enquêtes et va programmer le questionnaire sur des tablettes. Le bureau d’étude va aussi surveiller sur place pour que les enquêtes se déroulent normalement.

La méthode d’enquête face-à-face CAPI (Computer Assisted Personal Interviewing) a été choisie, les personnes enquêtées répondent aux questionnaires numériques sur une tablette. Cette méthode permet d’éviter la saisie ultérieure des questionnaires, on évite les erreurs de saisie. Elle a aussi l’avantage de pouvoir filtrer les questions pour sélectionner les répondants, le temps nécessaire pour répondre au questionnaire est réduit.

La principale difficulté repose sur les autorisations d’enquêtes dans les gares et dans les aéroports. La distribution des questionnaires à bord du train était possible dans les années 90 pour le projet de la LGV Atlantique. Depuis, les enquêtes à bord sont interdites, la plupart des enquêtes sont réalisées sur les quais sous condition de l’obtention d’autorisation de la part de la SNCF. Bien que SNCF Mobilités connaisse le rôle indépendant de l’observatoire OSE LGV SEA, la situation est compliquée car les conflits d’intérêts existent entre SNCF Mobilités et LISEA. L’autorisation a été accordée finalement grâce aux nombreux échanges avec SNCF Mobilités, les autorités politiques

et les autres acteurs concernés. Les enquêteurs ont pu entrer dans les Halls de la gare de Bordeaux Saint-Jean, mais les enquêtes sur les quais ont été refusées.

Généralement les enquêtes « voyageurs » sont composées d'une phase *ex ante* et d'une phase *ex post*. Cette méthode d'enquêtes permet de capter la situation avant-après la mise en service de la LGV. La phase *ex ante* doit être faite à la date « avant » et suffisamment proche de la mise en service de la LGV. Par expérience, la phase *ex post* doit être faite au moins 5 ans après la mise en service pour que les caractéristiques de l'offre et les trafics soient stables. Deux enquêtes ont été réalisées, d'abord le jeudi 29 septembre 2016 et ensuite pendant les 14, 15 et 16 mars 2017, en couvrant l'ensemble de l'amplitude horaire du train et de l'avion. La LGV SEA a été mise en service le 2 juillet 2017, nous disposons donc de données des enquêtes *ex ante*. Au total, la base des données est composée de 1428 observations. Ce sont des voyageurs réguliers pendant les jours ouvrables de base entre Paris et Bordeaux en avion ou en train.

La période de ces deux enquêtes a été choisie spécifiquement pour éviter les vacances scolaires. Pendant les vacances scolaires, la composition des clientèles en train et en avion devient très différente. Sur la liaison Paris-Bordeaux, Air France propose moins de vols pendant les périodes des vacances, le trafic aérien est faible (DGAC). Pour la même raison, pendant les weekends, les déplacements sont essentiellement pour le motif loisir. Les voyageurs se déplacent principalement en voiture. Le volume du trafic ferroviaire et aérien est plus important pendant les jours ouvrables de base (JOB)<sup>44</sup>. Il est donc plus intéressant de réaliser les enquêtes pendant les JOB. Par ailleurs, sous contraintes des moyens disponibles, il fallait délimiter le périmètre d'étude. Avec cette hypothèse de travailler sur les JOB hors vacances, nous étudions les comportements des voyageurs réguliers entre Paris et Bordeaux.

Les données collectées sont du type « Choice-based sample », les voyageurs ont été enquêtés dans des lieux différents : l'aéroport de Bordeaux Mérignac et la gare de Bordeaux Saint-Jean. Le choix du lieu d'enquête est impacté par le manque de moyens et l'autorisation des enquêtes accordée par SNCF Mobilités. Cela constitue la principale limite de cette base des données, la proportion des voyageurs enquêtés en avion et en train pourrait être différente par rapport à la situation réelle.

---

<sup>44</sup> Dans un contexte d'étude du transport interurbain, le mardi, le mercredi et le jeudi sont considérés comme des JOB.

Dans l'échantillon, on compte 82 % sont des usagers de train et 18 % sont des usagers d'avion. En réel, les parts de marché du train et de l'avion sont respectivement 65 % et 35 % sur la liaison Paris-Bordeaux<sup>45</sup>. Nous constatons un problème de surreprésentation des usagers de train dans cette base des données. Ce problème est assez courant dans les données du type « Choice-based sample ». Dans le cadre des modèles de choix discrets, les coefficients estimés sont toujours des résultats du maximum de vraisemblance et la surreprésentation de l'échantillon n'impacte pas l'interprétation des résultats (Manski et Lerman, 1977, Ben-Akiva et Lerman, 1985). Néanmoins, dans l'étude de la prévision de trafic, les constantes du modèle doivent être réajustées avec des coefficients de redressement.

Nous demandons aux voyageurs de déclarer les informations concernant les caractéristiques des trajets qu'ils ont effectués et leurs caractéristiques personnelles. Notre questionnaire est spécifiquement construit afin d'adapter notre problématique de recherche, il dispose des questions sur les horaires de déplacement et les heures d'arrivée souhaitées. Nous présentons les principales caractéristiques de ce questionnaire ci-dessous. La version complète du questionnaire se trouve dans l'annexe.

Nous connaissons le mode de transport choisi d'une personne enquêtée en fonction du site d'enquête (la gare ou l'aéroport). Le questionnaire est configuré en fonction du mode de transport afin de faciliter la compréhension des questions. Nous demandons aux voyageurs d'informer la gare ou l'aéroport de montée et de descente, ainsi que l'heure de départ et d'arrivée du leur train ou de leur avion.

Grâce à ce questionnaire, nous collectons les informations concernant les trajets réalisés sur la liaison Paris-Bordeaux. Les principales caractéristiques des trajets sont les suivantes :

---

<sup>45</sup> Estimation basée sur la base des données de l'observatoire OSE LGV SEA (2017).



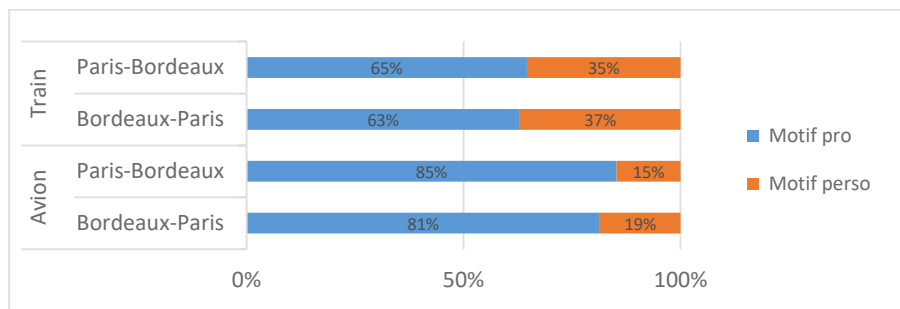


Figure 28 : les motifs des déplacements sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances)

Sur la liaison Paris-Bordeaux, avant la mise en service de la LGV SEA, plus de 60 % des usagers de train sont des voyageurs professionnels pendant les JOB et hors vacances scolaires. En avion, 80 % des personnes enquêtées voyagent pour motif professionnel. La répartition du motif de déplacement ne varie que très peu en fonction du sens de circulation.

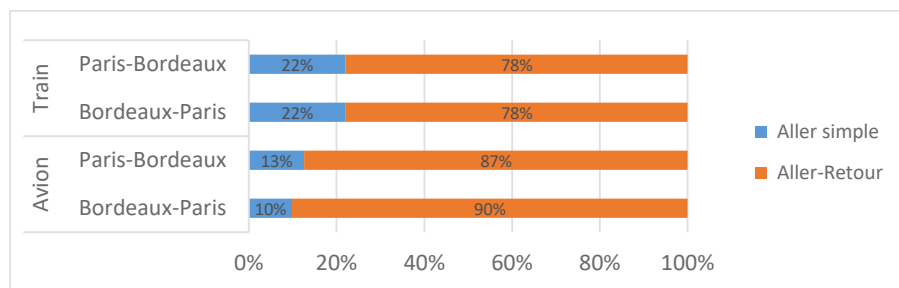


Figure 29 : la nature du trajet en avion et en TGV sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances)

Entre Paris et Bordeaux, avant la mise en service de la LGV SEA, les déplacements allers-retours sont majoritaires par rapport aux déplacements aller-simple. Environ 78 % des usagers ferroviaires et 89 % des usagers aériens font des allers-retours entre Paris et Bordeaux.

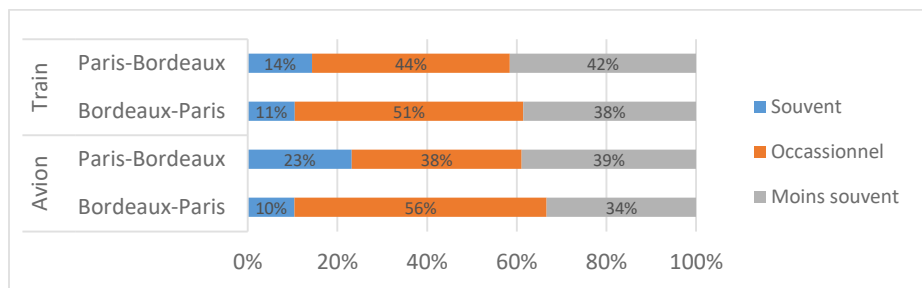


Figure 30 : la fréquence des déplacements sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances)

Avant la LGV SEA, sur les liaisons entre Paris et Bordeaux, la plupart des voyageurs sont des voyageurs réguliers, environ 60 % des voyageurs font des déplacements entre une fois par mois et une fois par trimestre.

Par ailleurs, nous disposons des informations détaillées liées aux origines et destination des déplacements. Nous demandons aux voyageurs de déclarer les communes de départ et d'arrivée ainsi que les modes qu'ils ont utilisés pour les trajets de rabattement et de diffusion (les figures ci-dessous). Les voyageurs ont également déclaré le temps de rabattement et de diffusion qu'ils ont réalisé pendant leurs trajets.

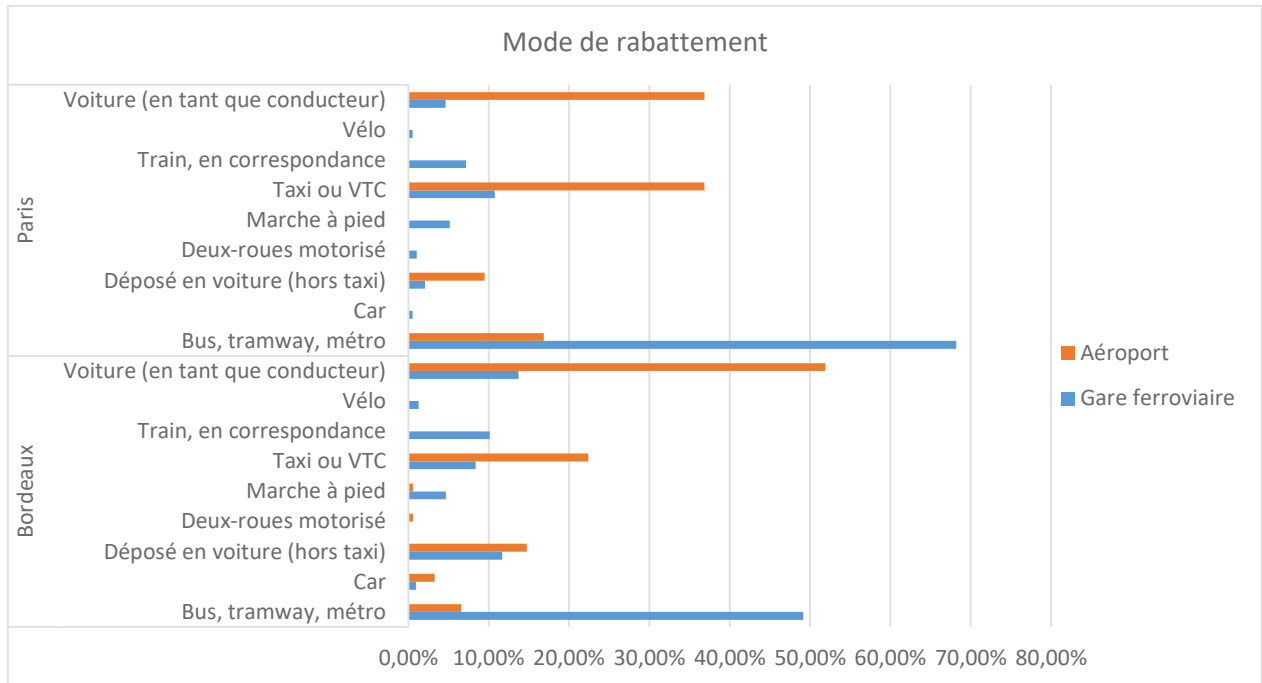


Figure 31 : les modes de rabattement utilisés à Paris et à Bordeaux (JOB, Hors vacances)

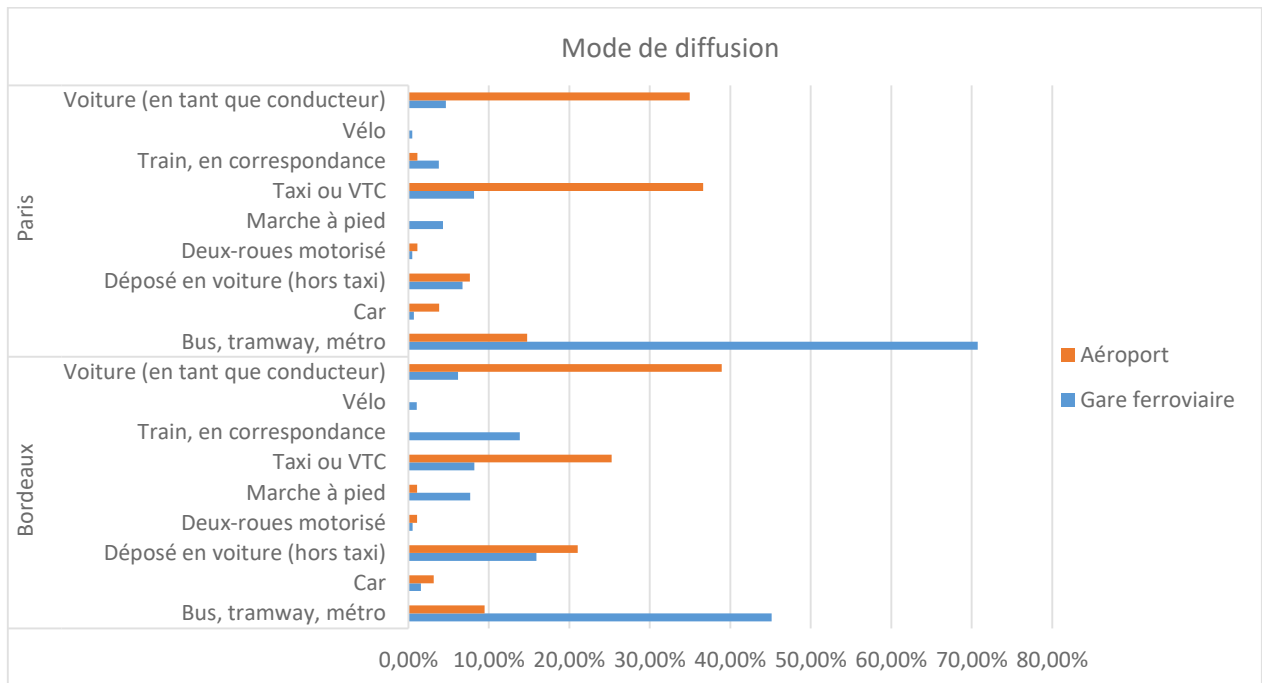


Figure 32 : les modes de diffusion utilisés à Paris et à Bordeaux (JOB, Hors vacances)

Nous nous apercevons que les gares ferroviaires sont mieux desservies en transports collectifs par rapport aux aéroports. Les usagers du train choisissent principalement les transports collectifs pour leurs trajets de rabattement et de diffusion. La gare de Paris Montparnasse est relativement mieux desservie en transports collectifs par rapport à la gare Saint-Jean à Bordeaux. 70 % des voyageurs ont utilisé les transports collectifs à la gare de Paris Montparnasse et 47 % à la gare de Bordeaux Saint Jean.

Alors que dans les aéroports de Paris et de Bordeaux, la voiture est le mode le plus souvent utilisé. Environ 70 % des voyageurs en avion ont choisi la voiture particulière, le Taxi ou le VTC pour les trajets de rabattement et de diffusion.

Dans la littérature, les données liées aux composantes d'horaires sont relativement rares. Notre questionnaire est conçu spécifiquement pour connaître les horaires des départs à l'origine et les horaires des arrivées à la destination.

Une question a été ajoutée dans le questionnaire afin de savoir à quelle heure la personne enquêtée souhaite arriver à la destination finale. En comparant les heures d'arrivée effectives et les heures d'arrivée souhaitées, nous sommes capables d'estimer les coûts de délais pour chaque voyage effectué. Les principales caractéristiques des composantes d'horaires des déplacements sont présentées dans la figure ci-dessous.

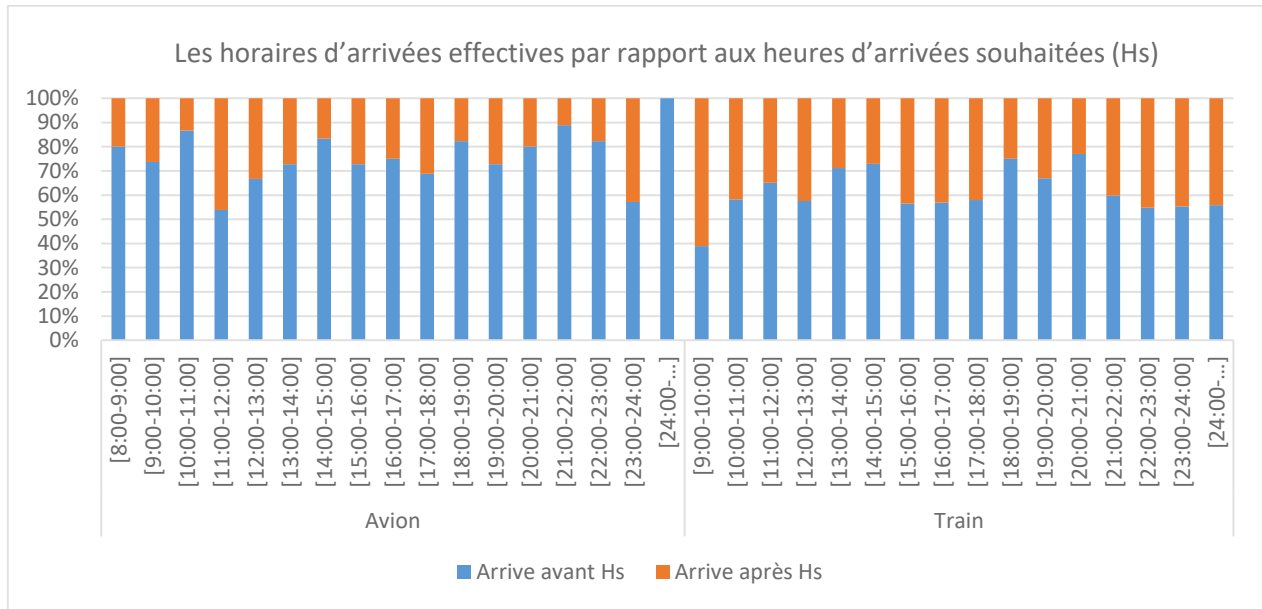


Figure 33 : le pourcentage des voyageurs arrivant avant ou après l'heure d'arrivée souhaitée (JOB, Hors vacances)

Nous résultats montrent que la plupart des voyageurs déclarent être arrivés avant les heures d'arrivée souhaitées. Un cas exceptionnel présent pour les voyageurs en train qui arrivent entre 9 : 00 et 10 : 00, environ 60 % des usagers de train déclarent être arrivés après les heures d'arrivée souhaitées. Les voyageurs considèrent que les premiers trains circulant entre Paris et Bordeaux arrivent trop tard à la destination. La principale explication est que le temps de trajet entre Paris et Bordeaux était supérieur à 3 h dans la situation *ex ante* du projet de LGV SEA. Dans la situation *ex post*, Le nouveau service TGV permettra aux voyageurs d'arriver plus tôt à la destination.

Si nous interprétons les écarts entre les heures d'arrivée effectives et les heures d'arrivée souhaitées comme des minutes perdues à la destination, nos données montrent des informations intéressantes (présentées dans la figure ci-dessous).

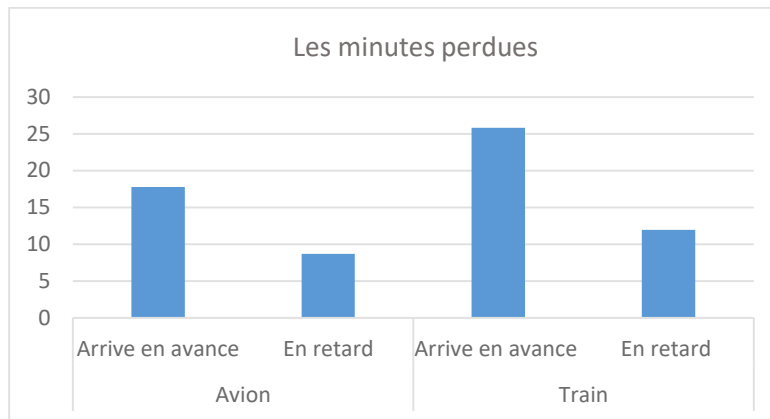


Figure 34 : les minutes perdues des voyageurs à la destination par rapport aux heures d'arrivée souhaitées (JOB, Hors vacances)

Nous constatons que les minutes perdues sont en moyenne plus importantes lorsque les voyageurs arrivent en avance par rapport au retard. Cela veut dire que les voyageurs préfèrent prendre plus de temps de précaution au lieu d'être en retard. Ces résultats confirment nos hypothèses concernant les coûts de délais, à savoir que les retards sont supposés plus coûteux que les arrivées en avance. Par ailleurs, les minutes perdues en moyenne déclarées par les voyageurs en train sont plus importantes. Cela montre que les voyageurs en train perdent en moyenne plus de temps à destination que les voyageurs en avion. Ce phénomène est expliqué par le fait que les enquêtes ont été réalisées avant la mise en service de la LGV SEA, le temps de parcours en train est relativement plus important.

Dans le questionnaire, nous demandons aux voyageurs les prix qu'ils ont payé pour leurs trajets. La distribution des heures d'arrivée souhaitées en fonction du mode de transport et du motif de déplacements et la distribution des tarifs moyens sont présentées dans les figures ci-dessous.

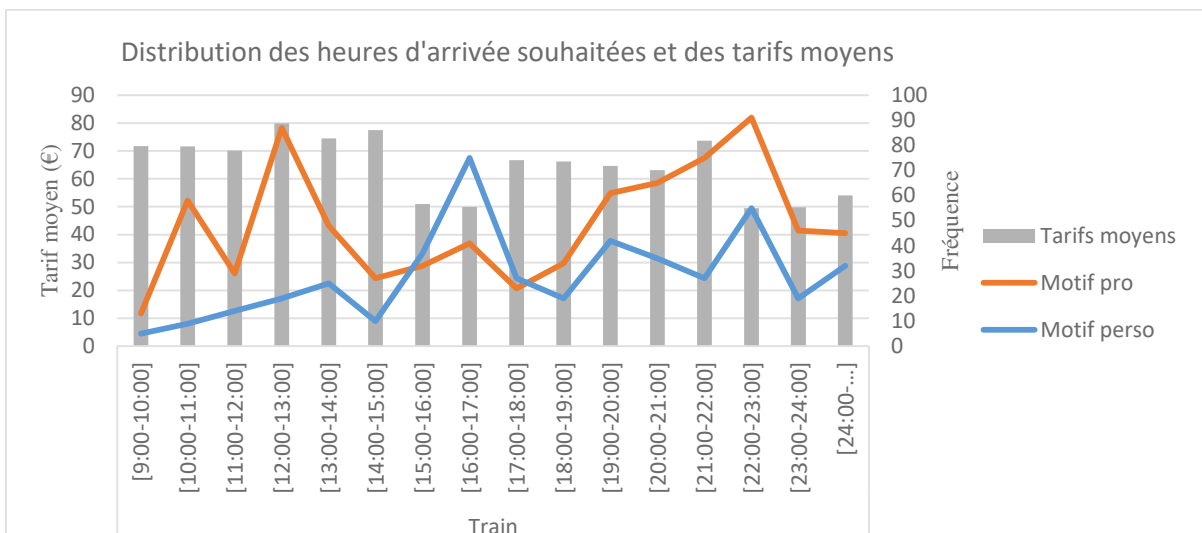


Figure 35 : la distribution des heures d'arrivée souhaitées et des tarifs moyens pour les voyageurs en train sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances)

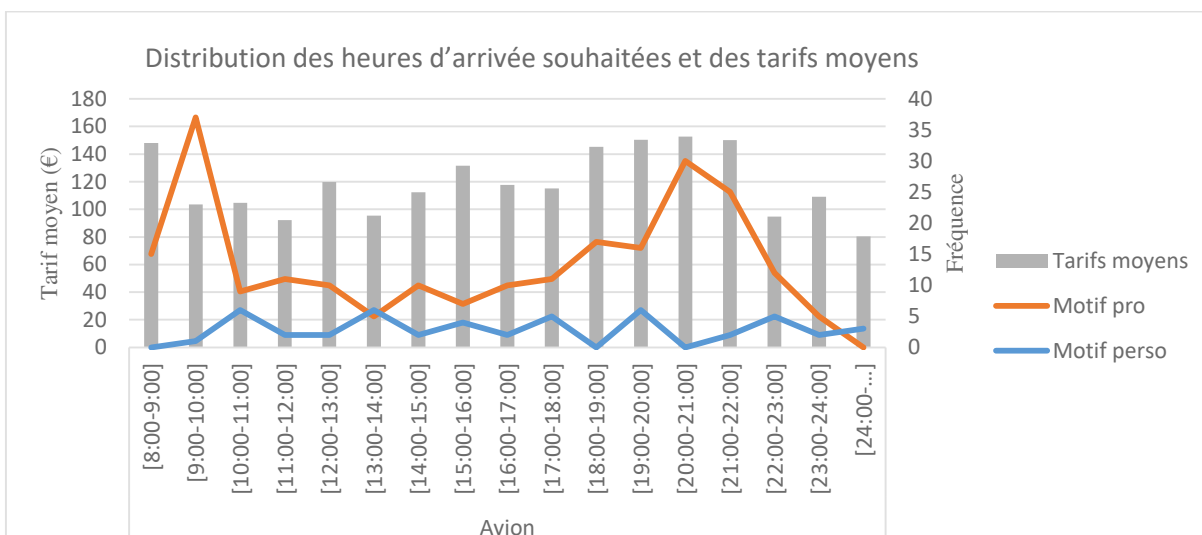


Figure 36 : la distribution des heures d'arrivée souhaitées et des tarifs moyens pour les voyageurs en avion sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances)

De manière générale, il apparaît que les voyageurs qui se déplacent pour motif professionnel souhaitent arriver aux heures de pointe, alors que les voyageurs qui se déplacent pour motif personnel arrivent aux heures creuses. Les heures d'arrivée souhaitées des voyageurs professionnels en train se concentrent dans les intervalles de 10 : 00 – 14 : 00 et 19 : 00 – 23 : 00. Les voyageurs en train pour motif personnel arrivent principalement entre 16 : 00 et 17 : 00.

Les voyageurs professionnels en avion arrivent principalement entre 9 : 00 – 10 : 00 et 20 : 00 – 22 : 00. L’avion attire des voyageurs professionnels qui souhaitent arriver tôt le matin grâce aux effets de la vitesse. Les voyageurs en avion pour motif personnel sont peu nombreux dans l’échantillon, nous n’observons pas de concentration des heures d’arrivée souhaitées dans la journée.

L’évolution des tarifs moyens dans la journée semble adaptée à la demande. Les tarifs proposés aux heures creuses sont relativement bas par rapport aux tarifs à l’heure de pointe. Les billets de train sont moins chers entre 15 : 00 et 17 : 00 et après 22 : 00. Pendant ces intervalles d’horaires, nous observons une concentration des déplacements pour motif personnel. Le niveau du tarif en avion est aussi élevé au moment de la concentration des heures d’arrivée souhaitées. Les opérateurs de transport ont adapté leurs stratégies de tarification à la demande de transport.

nous avons aussi ajouté dans le questionnaire des questions qui nous permettent de collecter les informations concernant les caractéristiques sociodémographiques et socioéconomiques des voyageurs. Les figures ci-dessous montrent les informations les plus importantes :

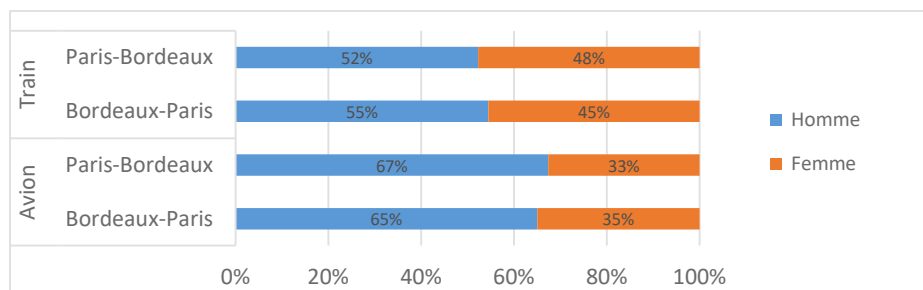


Figure 37 : le genre des voyageurs sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances)

Entre Paris et Bordeaux tous modes de transports confondus, la part des voyageurs masculins est plus importante. Avant la LGV SEA, environ 55 % des usagers de train sont des hommes, 45 % des femmes. Environ 65 % des voyageurs en avion sont des hommes et 35 % des femmes.



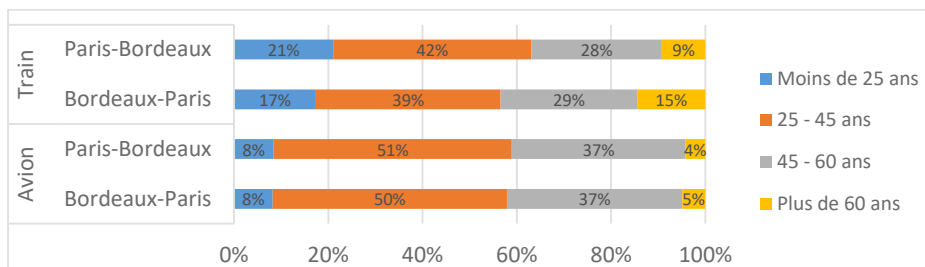


Figure 38 : l'âge des voyageurs sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances)

Avant la LGV SEA, sur la liaison Paris-Bordeaux, les jeunes qui ont moins de 25 ans et les personnes âgées de plus de 60 ans sont relativement plus présents en train (environ 30 %) qu'en avion (environ 12 %). La plupart des voyageurs ont entre 25 et 45 ans, on comptait environ 40 % des voyageurs qui ont entre 25 et 45 ans en train et environ 50 % parmi les voyageurs en avion. 28 % des voyageurs en train et 37 % des voyageurs en avion ont entre 45 et 60 ans.

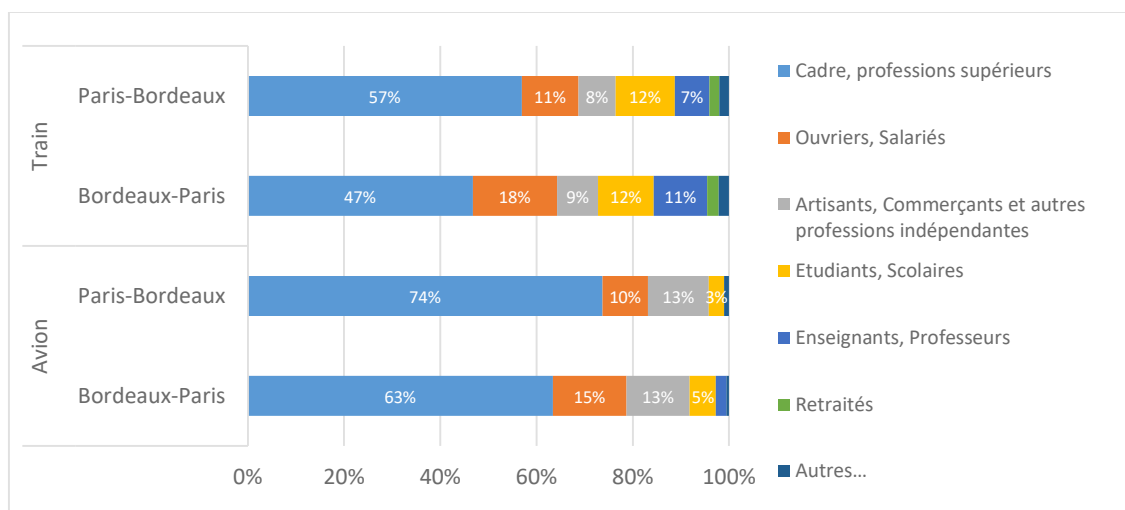


Figure 39 : les catégories socio-professionnelles des voyageurs sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances)

Avant la LGV SEA, la majorité des voyageurs sur la liaison Paris-Bordeaux sont cadres ou occupent des professions supérieures, on comptait environ 55 % des voyageurs en train et 68 % des voyageurs en avion dans cette Catégorie Socio Professionnelle (CSP). Les étudiants, les enseignants et les retraités sont relativement plus présents parmi les usagers du train. On comptait

un total d'environ 25% pour ces trois catégories parmi les voyageurs en train et un total d'environ 4 % parmi les voyageurs en avion.

Dans le questionnaire, nous ajoutons par ailleurs des questions afin de connaître les trois principales raisons pour lesquelles les voyageurs ont fait leur choix du mode de transport, leurs réponses contribuent à alimenter nos hypothèses sur les déterminants du choix modal.

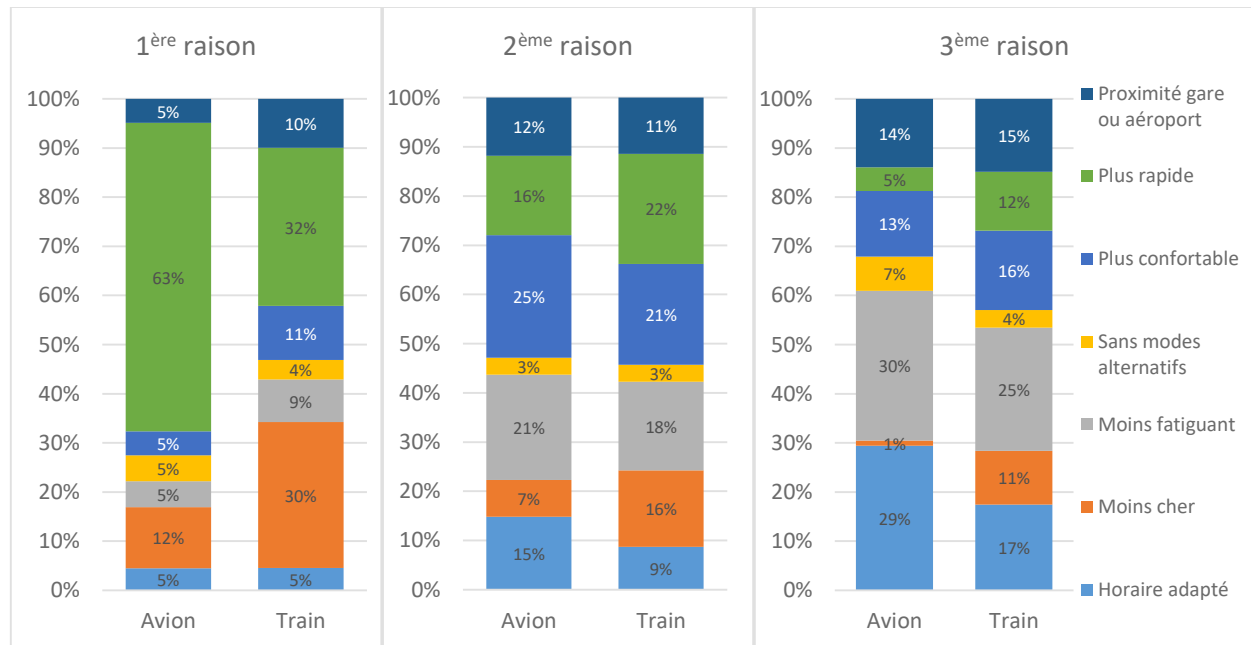


Figure 39 : les principales raisons du choix modal Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances)

Selon nos résultats, la rapidité et les prix payés sont les plus souvent évoqués comme la première raison du choix modal entre l'avion et le train. La majorité des voyageurs (63 %) ayant choisi de voyager en avion, le font pour sa rapidité. 32 % des voyageurs choisissent le train pour la rapidité et 30 % préfèrent le train pour son prix. Là encore, il faut noter qu'il s'agit d'une vision de la clientèle avant LGV (notamment pour motifs, rapidité, confort et prix qui sont susceptibles d'évoluer significativement).

La rapidité et le confort (plus confortable ou moins fatigant) sont les plus souvent évoqués comme deuxième raison du choix modal. Le confort et les horaires adaptés sont les plus souvent évoqués comme troisième raison du choix modal. Nous constatons que près de 30 % des voyageurs en avion

estiment que la qualité d'horaires fait partie de leurs critères du choix modal, ce qui montre le rôle important de la qualité des dessertes dans le processus du choix modal.

Dans le cadre des modèles de choix discrets, les détails des données vont être présentés dans des tables statistiques en fonction des alternatives de choix. Dans les deux sections suivantes, nous allons présenter les caractéristiques de la base de données pour chaque modèle appliqué.

## Section 3.2.2 : Les données utilisées pour le modèle TAD et le modèle COP

### *3.2.2.1 - Les données pour le modèle Temps utile A Destination (TAD)*

Dans le cadre du modèle TAD, nous utilisons principalement les données des enquêtes « voyageurs ». Par hypothèse, ce modèle ne prend en compte que des voyages avec des courtes durées de séjour (voir le chapitre 2.2). Dans notre base des données, nous nous apercevons qu'une partie importante des voyageurs déclarent avoir passé une seule nuitée à destination. Il s'agit principalement des voyageurs qui arrivent la veille du jour de rendez-vous.

Il nous fallait par ailleurs faire des hypothèses sur la plage d'horaires utiles pour éliminer le temps de sommeil. Dans le périmètre urbain où les déplacements domicile-travail sont fréquents, l'intervalle de temps entre l'heure d'embauche et l'heure de débauche est habituellement considéré comme la plage d'horaires utiles. Dans le périmètre interurbain, comme le temps de parcours est plus long, nous considérons généralement un intervalle de temps utile plus large. Dans la littérature, le choix de la plage d'horaires utile diffère d'une source à l'autre. Baptiste (2003) retient un intervalle de service entre 6 : 00 et 20 : 00. L'Hostis et Leysens (2011) choisissent de faire débuter la journée à 6 : 00 et de la faire terminer à 22 : 00. Dans notre modèle, la plage d'horaires utile est choisie entre 7 : 00 et 21 : 00. Ce choix est cohérent avec l'amplitude des horaires programmés du train et de l'avion.

Dans la base de données d'enquêtes « voyageurs », nous disposons uniquement des horaires choisis pour l'aller. Les données liées aux heures de départ pour les trajets de retour sont des données manquantes des enquêtes « voyageurs ». Dans le cadre des déplacements interurbains, comme le temps de parcours est relativement long, nous supposons que les voyageurs vont préférer rester plus longtemps à destination. L'hypothèse est que tous les voyageurs vont prendre le dernier train de retour ou le dernier vol de retour afin de maximiser leur temps à destination. Bien entendu, dans la structure du modèle, il est préférable de calculer le temps utile à destination uniquement basé sur les données déclarées mais pas sur des hypothèses.

Au total, ce sont ainsi 1195 voyageurs qui ont effectué des allers-retours dans la journée ou qui sont restés une nuitée à destination. Les principales caractéristiques de cette base de données sont présentées dans le tableau 12<sup>46</sup> ci-dessous.

---

<sup>46</sup> Les contenus des tableaux sont en anglais pour respecter le format des articles publiés en TRR. Nous donnerons la traduction de ces éléments et présenterons les informations retenues dans les paragraphes sous le tableau.

Tableau 12 : les principales caractéristiques des données utilisées dans le modèle TAD

Data characteristics		
Travel mode	Air	Train
Overall percentage	13%	87%
<b>Individual characteristics (%)</b>		
Trip purpose	Pro	91%
	Personal	9%
Overnight Stay	Daily	54%
	Stay one night	46%
Age	Age 1, 16-25	6%
	Age 2, 25-45	49%
	Age 3, 45-60	40%
	Age 4, 60+	5%
Gender	Male	67%
	Female	33%
<b>Trip characteristics (mean)</b>		
Cost (€)	161,3	66,3
Transit Time (hrs)	1,1	3,4
Access (mins)	46,7	28,5
Diffusion (mins)	51,8	35,3
Frequency (trips)	1,8	3,5
Headway (mins)	70,9	38,2
TAD (hrs)	16,8	13,8

Le tableau est structuré pour présenter les caractéristiques des données en fonction des alternatives de choix. L'étude concerne les comportements de choix entre l'avion et le train. Nous disposons dans cette base des données de 87 % des voyageurs en train et 17 % en avion.

Les parts de marché du ferroviaire nous semblent surreprésentées à cause de la nature de données « choice based sample ». De manière générale, les parts de marché ferroviaires sont proches de 65 % sur la liaison Paris-Bordeaux pour tous les voyageurs. Comme le temps de parcours en avion est plus court par rapport en train, même si nous ne sommes pas en mesure de connaître la participation des voyageurs en train pour les séjours de très courte durée, celles-ci ne devraient pas être supérieures à 65 %. Comme nous l'avons expliqué, les coefficients seront toujours des résultats du

maximum de vraisemblance. Le modèle explique le rapport de probabilité de choix de chaque voyageur entre l'avion et le train (Odds Ratio). La surreprésentation des usagers du train ne va pas impacter l'interprétation des coefficients des variables explicatives du modèle, les résultats d'estimation montrent correctement les effets des variables explicatives sur le choix modal.

Nous allons maintenant présenter les principales caractéristiques des données utilisées dans le modèle TAD. C'est un échantillon de 1195 voyageurs qui ont effectué des allers-retours dans la journée sur Paris-Bordeaux.

**Motif des déplacements (Trip purpose).** Nous constatons que la plupart des voyageurs enquêtés sont des voyageurs professionnels, on compte 91 % des voyageurs professionnels en avion et 65 % des voyageurs professionnels en train. La proportion des voyageurs pour motif personnel est plus importante en train (35 %).

**Age.** La plupart des voyageurs enquêtés ont entre 25 et 45 ans, cette catégorie d'âge représente 49 % des voyageurs en avion et 39 % des voyageurs en train. 89 % des voyageurs en avion et 69 % des voyageurs en train ont entre 25 et 60 ans. La proportion des voyageurs les plus jeunes (moins de 25 ans) et les plus âgés (plus de 60 ans) est plus importante en train qu'en avion.

**Sexe (Gender).** La plupart des voyageurs sont masculin, 67 % des voyageurs en avion et 54 % en train. La proportion des femmes est plus importante parmi les voyageurs en train.

**Durée de séjour (Overnight Stay).** 54 % des voyageurs en avion font des allers-retours dans la journée contre seulement 20 % des voyageurs en train. 80 % des voyageurs en train préfèrent rester une nuit à destination. Cela nous paraît logique puisque le temps de parcours est relativement plus important dans la situation *ex ante* du projet de LGV SEA. Le temps de parcours en avion est court, ce qui favorise les allers-retours dans la journée.

**Tarifs (Cost).** Nous disposons par ailleurs des données concernant les prix payés pour des trajets entre Paris et Bordeaux. Les voyageurs paient en moyenne 161 € pour un trajet simple en avion et 66 € pour un trajet simple en train.

**Temps de parcours (Transit Time).** La variable liée au temps de parcours n'est pas incluse dans le modèle puisqu'elle génère une séparation parfaite du modèle. Dans l'étude du choix binomial, le temps de parcours en train et en avion explique parfaitement les comportements de choix modal. Le modèle Logit binomial ne se converge pas lorsqu'il y a une séparation verticale.

**Le temps de rabattement (Access)** et **le temps de diffusion (Diffusion)** sont des informations déclarées par les voyageurs. Les voyageurs passent en moyenne 47 minutes dans les transports pour aller à l'aéroport depuis son origine et 52 minutes pour rejoindre la destination finale depuis l'aéroport. Les gares ferroviaires se situent au centre-ville, donc relativement plus accessibles par rapport aux aéroports. Les voyageurs passent en moyenne 29 minutes pour aller à la gare depuis son origine et 35 minutes pour rejoindre la destination finale depuis la gare.

Les données liées à **la fréquence de service (Frequency)**, **l'intervalle de service (Headway)** et **le TAD** sont des variables déduites grâce aux données recensées liées aux horaires de service de train et d'avion et les horaires choisies effectives des voyageurs. La fréquence de service utile correspond au nombre de trains ou d'avions proches de l'heure de départ choisie. Les voyageurs en avion et les voyageurs en train disposent respectivement en moyenne de 1,8 vols et 3,5 trains dans l'intervalle de la fréquence utile. Le temps d'attente pour le prochain service est en moyenne de 71 minutes pour l'avion et 38 minutes pour le train. Ce sont des indicateurs standard pour l'évaluation de la qualité des dessertes. Le TAD est calculé en fonction des horaires choisis des voyageurs et le dernier service de retour. Les voyageurs en avion disposent en moyenne de 17 h utile à destination, les voyageurs en train disposent en moyenne de 14 h utile à destination. Les horaires programmés des avions et les effets de la vitesse d'avion font que les voyageurs en avion sont capables de rester plus de temps à destination.

Dans cette base de données, nous disposons de 1195 personnes enquêtées, soit environ 84 % de la population totale de nos enquêtes réalisées en septembre 2016 et en mars 2017. Ce sont les voyageurs qui ont fait un aller-retour dans la journée ou qui ont choisi de rester une seule nuit à destination. Les caractéristiques de l'ensemble de la population sont présentées dans le tableau 23 en annexe. Nous nous apercevons que la part des voyageurs qui ont choisi l'avion et qui sont restés plus d'une nuit à destination est relativement importante (39%). Ce sont principalement les voyageurs qui se déplacent pour motif personnel. Globalement, en prenant en compte uniquement ceux qui ont effectué un séjour de courte durée, le pourcentage des voyageurs pour motif professionnel augmente pour l'avion et pour le train, les autres variables ne sont que très légèrement modifiées.

Ces données contribuent à caler le modèle Logit binomial pour expliquer le choix entre l'avion et le train sur la liaison Paris-Bordeaux. Le package « mlogit » de Croissant (2013) sur le logiciel R a été utilisé, les résultats d'estimation sont présentés dans le chapitre suivant.

### 3.2.2.2 - *Les données pour l'indicateur COmbinaisons Pertinentes (COP)*

Dans le cadre de l'indicateur COP, seuls les voyageurs qui font des allers-retours dans la journée peuvent être pris en compte (les hypothèses dans le chapitre 2.2). La comparaison du nombre de combinaisons pertinentes est effectuée sur les principales liaisons entre Paris et Bordeaux.

Les données concernant les horaires programmés de train et d'avion sont nécessaires pour le calcul du COP. Ces données ont été collectées sur le site web d'Oui. SNCF ([www.oui.sncf](http://www.oui.sncf)) et le site web d'Air France ([www.airfrance.fr](http://www.airfrance.fr)). Pour permettre l'étude de la comparaison *ex ante / ex post*, les horaires des trains ont été collectés pendant trois périodes consécutives : septembre 2015, septembre 2017 et mars 2018. Le choix de ces trois périodes a été fait afin de comparer la situation avant la mise en service de la LGV, la situation après la LGV et la situation après le changement des horaires en décembre 2018.

L'étude concerne les trafics intérieurs et réguliers entre Paris et Bordeaux. Les horaires programmés pour les principales liaisons radiales et intersecteurs entre Paris et Bordeaux pendant les jours JOB ont fait l'objet des requêtes de données. Ces requêtes ont été effectuées dans les deux sens de circulations : le sens impair de Paris vers les provinces et le sens pair de provinces vers Paris.

Pour le mode aérien, les horaires aériens ont été collectés pendant les mêmes périodes que les requêtes ferroviaires. Le changement des horaires s'est produit en octobre 2017. La comparaison de la qualité des dessertes avec l'indicateur COP ne concerne que les horaires de septembre 2017 et de mars 2018. Dans les requêtes des données, les horaires des vols entre Paris Orly et Bordeaux Mérignac ont uniquement été collectés puisque les trajets entre Paris Charles De Gaulle et Bordeaux Mérignac correspondent principalement des trajets en correspondance pour une destination à l'international.



## Section 3.2.3 : Les caractéristiques des données d'enquêtes « voyageurs »

Nous disposons au total des 1428 voyageurs dans la base de données d'enquêtes « voyageurs ». Dans le tableau suivant, les caractéristiques des données ont été présentées en fonction des quatre alternatives de choix du modèle combiné choix modal – choix d'horaires : le train arrive en avance (EarlyTrain), le train arrive en retard (LateTrain), l'avion arrive en avance (EarlyAir) et l'avion arrive en retard (LateAir).

Nous allons présenter les caractéristiques des données utilisées pour le modèle combiné dans le tableau 13. La traduction des termes en anglais et les explications des variables sont données en dessous du tableau.

Tableau 13 : les caractéristiques des données utilisées pour le modèle combiné choix modal - choix d'horaires

Data characteristics					
Travel mode		EarlyTrain	LateTrain	EarlyAir	LateAir
Overall percentage		51%	31%	14%	4%
<b>Individual characteristics(%)</b>					
Age	Age Junior	15%	22%	8%	2%
	Age Adulte	69%	64%	87%	90%
	Age Senior	16%	14%	5%	8%
Gender	Male	55%	51%	63%	72%
	Female	45%	49%	37%	28%
SPC	Managerial staff	59%	57%	75%	69%
	Workers	19%	20%	11%	20%
	Artisan and Business man	9%	10%	13%	11%
	Pensioner	12%	13%	1%	0%
<b>Household characteristics (%)</b>					
Household size	Single	27%	29%	18%	21%
	Couple	31%	29%	28%	28%
	More than two persons	42%	42%	54%	51%
Cars ownership	No car	17%	18%	7%	5%
	One car	41%	42%	34%	41%
	More than one car	42%	40%	59%	54%
<b>Trip characteristics (%)</b>					
Trip purpose	Pro	64%	62%	82%	92%
	Personal	36%	38%	18%	8%
Trip frequency	Weekly	12%	11%	15%	16%
	Monthly	47%	52%	52%	53%
	Not often	41%	37%	33%	31%
Fellow passengers	Single	83%	82%	72%	79%
	Couple	14%	14%	16%	10%
	More than two passengers	3%	4%	12%	11%
Round trip	One-way trip	20%	25%	10%	10%
	Round trip	80%	75%	90%	90%
Payment	Third-party payment	47%	44%	42%	44%
	Payment by passengers	53%	56%	58%	56%

51 % des voyageurs ont choisi le train en étant arrivés avant l'heure d'arrivée souhaitée, 31 % des voyageurs ont choisi le train en étant arrivés après l'heure d'arrivée souhaitée. 14 % des voyageurs ont choisi l'avion et sont arrivés avant l'heure d'arrivée souhaitée. Seulement 4 % des voyageurs ont choisi l'avion et sont arrivés en retard.

**Age.** Nous choisissons de classer trois catégories d'âge : entre 16 et 25 ans (Age Junior), entre 25 et 45 (Age Adulte) et entre supérieur 45 (Age senior). Pour les quatre alternatives de choix, la plupart des voyageurs enquêtés ont entre 25 et 45 ans. Les juniors et les séniors préfèrent prendre

le train, ils représentent environ entre 30 % et 35 % parmi les voyageurs en train, tandis qu'ils représentent seulement entre 10 % et 13 % des voyageurs en avion.

**Sexe (Gender).** La plupart des voyageurs sont des hommes, entre 50 % et 55% des voyageurs en train et entre 63 % et 72 % des voyageurs en avion. La parité homme-femme est meilleure en train.

En ce qui concerne **la catégorie socio-professionnelle (SPC)**, environ entre 57 % et 59 % des voyageurs en train et entre 69 % et 75 % des voyageurs en avion sont des cadres ou des professions supérieures (Managerial staff). La proportion des retraités (Pensioner) voyagent en train est plus importante (entre 12 % et 13 %) par rapport en avion (1 %).

**La taille du ménage (Household size).** La plupart des voyageurs sont en couple ou en couple avec des enfants.

**La possession des véhicules (Cars ownership).** La plupart des voyageurs disposent d'au moins d'une voiture. Entre 54 % et 59 % des voyageurs en avion disposent d'au moins deux voitures et seulement entre 5 % et 7 % des voyageurs en avion ne disposent pas de voiture.

**Le motif des déplacements (Trip purpose).** La majorité des personnes enquêtées voyagent pour motif professionnel. La part des voyageurs professionnels en avion atteint 82 % et 92 %. La part des voyageurs professionnels est entre 62 % et 64 % parmi les voyageurs en train.

**La fréquence des déplacements (Trip frequency).** La plupart des voyageurs enquêtés déclarent qu'ils se déplacent au moins une fois par mois entre Paris et Bordeaux.

**Le nombre de covoyageurs (Fellow passengers).** La majorité des voyageurs enquêtés (près de 80 %) déclare avoir voyagé seul.

**Le type des trajets (Round trip).** Entre 75 % et 80 % des voyageurs en train font des allers-retours entre Paris et Bordeaux. 90 % des voyageurs en avion déclarent avoir fait des allers-retours entre Paris et Bordeaux.

**Le tiers payant (Payment).** Entre 53 % et 56 % des voyageurs en train et entre 56 % et 58 % des voyageurs en avion ont payé leurs billets sans tiers payant.

Ces données vont être utilisées pour estimer les modèles GEV et le modèle MMNL. Les résultats d'estimation de ces modèles vont être présentés dans le chapitre suivant.

## Conclusion du chapitre 3.2

Le contexte de recherche dans le domaine du transport ferroviaire devient de plus en plus difficile. Peu de données sont disponibles notamment celles qui concernant les voyageurs. L'opérateur de transport considère ces données comme des secrets commerciaux et refuse de les communiquer même s'il s'agit d'une demande pour les travaux de recherche. C'est le problème que nous avons rencontré. Malgré les interventions de l'Observatoire et les efforts des différents acteurs, les données que nous avons collectées disposent de limites évidentes.

Cela nous contraint à limiter le périmètre d'étude en nous concentrant uniquement sur l'avion et le train et de travailler sur une seule liaison Paris-Bordeaux. C'est aussi pour cette raison que l'indicateur COP n'a pas été appliqué dans la modélisation de la demande sur la liaison Paris-Bordeaux. On aurait pu estimer les impacts de l'évolution de la qualité des dessertes sur les liaisons intermédiaires entre Paris et Bordeaux et ses effets sur le choix entre le train, la voiture et l'autocar.

Certains biais dans l'estimation de nos modèles sont aussi liés à la construction de notre questionnaire. Les voyageurs pourraient sous-estimer ou surestimer légèrement l'heure d'arrivées souhaitées, le temps de rabattement et le temps de diffusion, car ce sont des informations déclarées par les voyageurs en fonction des trajets qu'ils ont réalisés. Ces données sont donc des valeurs approximatives.

Dans la base des données, nous disposons uniquement des données pour l'avion et le train. Les autres modes de transport : la voiture, l'autocar et le covoiturage ont donc été exclus. En même temps, nous avons été confrontés à des contraintes de ressources pour réaliser les enquêtes. Ces deux difficultés nous ont poussé vers un périmètre d'étude plus restreint : la concurrence entre l'avion et le train sur la liaison Paris-Bordeaux.

Pour des raisons politiques, l'aéroport a bloqué les enquêtes en mars 2017, ce qui fait que la part des voyageurs en avion est sous-estimée dans notre base des données. En outre, il est difficile d'accorder des coefficients de redressement dans le processus d'estimation des modèles puisque

les différentes sources ne sont pas d'accord sur les parts de marché Air-Fer. Nous décidons finalement d'utiliser les résultats de l'étude de trafic de LISEA<sup>47</sup>.

Dans le chapitre suivant, nous montrons le problème des données manquantes et ses impacts dans le processus d'estimation des modèles.

---

<sup>47</sup> Le bureau d'étude SETEC est le prestataire pour la réalisation de cette étude. La prévision de trafic a été faite avec la modélisation à quatre étapes et les hypothèses sur l'évolution de la conjoncture économique. Dans le bilan LOTI intermédiaire de LGV SEA, nous montrons que les résultats de cette étude de trafic est de très bonne qualité.

# Chapitre 3.3 : L'enjeu des indicateurs de la qualité des dessertes pour une meilleure analyse du choix modal

## Introduction du chapitre 3.3

Dans ce chapitre, nous allons présenter nos résultats de recherche sur la liaison Paris-Bordeaux. Nous allons interpréter et analyser les résultats afin d'expliquer le changement de comportements de choix modal des voyageurs.

L'objectif de cette partie d'application est de trouver le modèle qui s'adapte à notre étude de cas et qui permet une meilleure qualité d'estimation. A la fin de chaque modèle testé, nous discutons les avantages et les inconvénients. Ces éléments devraient guider les travaux futurs dans ce domaine.

- Dans la section 3.3.1, nous présentons les résultats d'estimation du modèle Temps utile A Destination (TAD) et la comparaison *ex ante* / *ex post* de la qualité des dessertes avec l'indicateur COmbinaisons Pertinentes (COP).
- Dans la section 3.3.2, nous exposons les résultats de la modélisation combinée choix modal – choix d'horaires ainsi que les résultats de la prévision de parts de marché Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux.

## Section 3.3.1 : L'utilité des indicateurs de temps utile à destination

### *3.3.1.1 - l'indicateur TAD contribue à expliquer le choix modal*

Nous présentons les résultats d'estimation des trois modèles Logit Binomial dans le tableau ci-dessous. Les modèles utilisés sont le modèle de l'intervalle de service (Headway model), le modèle de la fréquence de service (Frequency model) et le modèle de TAD (TAD model). Les fonctions d'utilité de ces modèles ont été présentées dans la partie méthodologique. Le train est choisi comme le mode de transport de référence dans ces modèles.

Ces modèles nous permettent de comprendre quelles sont les variables déterminantes pour expliquer les comportements de choix modal des voyageurs sur la liaison Paris-Bordeaux. Nous trouverons dans le tableau suivant les coefficients des variables explicatives, la constante du modèle ainsi que les résultats des tests statistiques. Les coefficients de ces variables nous indiquent les effets liés à ces variables lorsqu'elles sont significatives.

La sélection des variables a été effectuée à l'aide de la méthode d'AIC (Akaike Information Criterion) à double sens. Cette méthode proposée en 1973 par Akaike est souvent utilisée lorsque les modèles sont estimés par une méthode de maximum de vraisemblance. Les principes de cette méthode sont les suivants :

$$AIC = -2 \log L^* + 2k$$

*avec*

*L\* : la vraisemblance maximisée*

*k : le nombre de paramètres dans le modèle*

Le ratio AIC est pénalisé par le nombre de paramètres pris en compte dans le modèle. On préfère décrire les données avec le plus petit nombre de paramètres possibles (Ripley, 2003).

Nous présentons les résultats d'estimation de ces trois modèles dans le même tableau pour pouvoir les comparer. Dans le cadre du modèle TAD, nous supposons que la variable TAD permet d'aborder des informations complémentaires concernant la qualité des dessertes. Selon notre hypothèse, le modèle TAD sera le meilleur modèle pour expliquer le choix des voyageurs entre l'avion et le train.



Tableau 14 : les résultats d'estimation des modèles Logit Binomial

<b>Comparison of indicators</b>			
	<i>Dependent variable:</i>		
	(Headway model)	Travelmode (Frequency model)	(TAD model)
Train:(intercept)	-1.076** (0.429)	-2.419*** (0.559)	0.446 (0.797)
Cost	-0.026*** (0.003)	-0.028*** (0.003)	-0.024*** (0.003)
Access	-0.035*** (0.006)	-0.036*** (0.006)	-0.024*** (0.007)
Diffusion	-0.044*** (0.006)	-0.041*** (0.006)	-0.024*** (0.007)
Headway	-0.028*** (0.007)		
Frequency		0.177*** (0.030)	0.171*** (0.035)
TAD(hrs)			0.709*** (0.143)
Train:Trip purpose Pro	-2.058*** (0.356)	-2.094*** (0.372)	-1.921*** (0.389)
Train:Overnight Stay	1.340*** (0.230)	1.318*** (0.235)	1.350*** (0.245)
Observations	1,195	1,195	1,195
R <sup>2</sup>	0.429	0.451	0.485
Log Likelihood	-266.312	-256.092	-240.313
LR Test	400.864*** (df = 7)	421.304*** (df = 7)	452.861*** (df = 8)
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01		

Dans l'ensemble de ces trois modèles, les variables liées aux prix payés (Cost), au temps de rabattement (Access) et temps de diffusion (Diffusion) sont significatives à 99 % de degré de confiance. Conformément à nos attentes, les prix payés, les temps de rabattement et de diffusion sont des variables déterminantes pour expliquer les comportements de choix modal des voyageurs.

Les signes des coefficients de ces variables sont négatifs. Cela veut dire que ces variables ont des effets négatifs pour expliquer la probabilité de choix.

Les variables liées à la qualité des dessertes sont : l'intervalle de service (Headway), la fréquence de service (Frequency) et le TAD. Ces variables sont toutes significatives à 99 % de degré de confiance. Conformément à nos attentes, les signes de coefficients liés à ces variables sont corrects :

- L'intervalle de service a des effets négatifs sur la probabilité de choix, plus le temps d'attente pour le prochain service est long, plus faible sera la probabilité de choix.
- La fréquence de service est un facteur positif pour expliquer la probabilité de choix, plus la fréquence de service d'un mode de transport est élevée, plus la probabilité de choisir ce mode sera élevée.
- Le TAD est une variable positivement corrélée avec la probabilité de choix modal, les voyageurs préfèrent choisir un mode de transport qui leurs permet de rester plus longtemps à la destination.

Le motif de déplacement (Trip purpose Pro) contribue à expliquer la probabilité de choix des voyageurs entre le train et l'avion avec 99 % de degré de confiance. Lorsque les déplacements se font pour motif professionnel, la probabilité de choisir l'avion par rapport au train sera plus élevée.

La décision d'arriver la veille (Overnight Stay) est aussi une variable significative pour expliquer la probabilité de choix. Les enquêtes ont été effectuées avant la mise en service de la LGV SEA, Il fallait au moins 3 heures 15 minutes entre Paris et Bordeaux. Le temps de parcours relativement long explique la raison pour laquelle les voyageurs en train ont plus tendance à arriver la veille.

Le ratio de  $R^2$  McFadden nous montre la qualité d'estimation du modèle. Nous considérons en général que la qualité du modèle est excellente entre 20 % et 40 % (McFadden, 1973). La fonction de  $R^2$  McFadden s'écrit de manière suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{LL_m}{LL_0}$$

avec

$LL_m = \log$  de vraisemblance (*log likelihood*) du modèle étudié

$LL_0 = \log$  de vraisemblance (*log likelihood*) du modèle de référence

Si le  $R^2$  McFadden est égal à 0, alors le log de vraisemblance du modèle étudié est égal au log de vraisemblance du modèle de référence. Ici, le modèle de référence est le modèle qui ne contient que la constante. Le modèle étudié est parfait si le  $R^2$  s'approche de zéro.

Le ratio de  $R^2$  du modèle avec la fréquence de service est meilleur par rapport au modèle avec l'intervalle de service, le  $R^2$  de McFadden passe de 43 % à 45 %. En ajoutant la variable TAD dans le modèle, le  $R^2$  du modèle augmente encore d'environ 3 %. Nos résultats montrent que le modèle TAD offre une plus importante amélioration du log de vraisemblance par rapport au modèle de référence.

Le ratio  $R^2$  ne permet pas de comparer les modèles dont le nombre de variables est différent. Nous préférons le ratio d'AIC qui est capable de comparer la qualité d'estimation des modèles. Selon les principes d'AIC, nous choisissons le modèle dont l'AIC est le plus faible, car la déviance du modèle est au minimum lorsque l'AIC est le plus faible.

Les ratios d'AIC de nos trois modèles sont 546,62 pour le modèle avec l'intervalle de service et 526,18 pour le modèle avec la fréquence de service. Par rapport à l'intervalle de service, la fréquence de service permet de mieux expliquer la probabilité de choix. C'est pour cette raison que nous conservons la fréquence de service dans le modèle TAD. Le ratio d'AIC est 496,63 pour le modèle TAD. Le modèle TAD apparaît donc, à regard de ce titre, être le meilleur par rapport aux deux autres modèles. La variable TAD apporte des informations complémentaires utiles pour expliquer les comportements de choix modal.

Le motif des déplacements et la décision d'arriver la veille sont des variables significatives. Nous segmentons notre échantillon en fonction de ces deux variables afin d'éviter le problème d'hétérogénéité dans l'analyse. En effet, nous supposons qu'en fonction du motif de déplacements et de la décision d'arriver la veille, les effets des variables significatives sur la probabilité de choix seront différents. Les résultats d'estimation du modèle segmenté sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Par ailleurs, dans le même tableau, nous présentons la valeur monétaire des différentes variables explicatives. Cela montre le consentement à payer des voyageurs pour l'amélioration de l'offre de transport.

Tableau 15 : les résultats d'estimation du modèle TAD avec la segmentation des échantillons

Dependent variable:								
Travelmode								
	Trip purpose perso				Trip purpose pro			
	Daily	Monetary values	With Overnight	Monetary values	Daily	Monetary values	With Overnight	Monetary values
FER:(intercept)	-5.143 (5.022)		4.109 (5.334)		-2.887** (1.361)		-0.382 (1.087)	
Cost	-0.095** (0.045)	1	-0.146** (0.071)	1	-0.022*** (0.004)	1	-0.025*** (0.004)	1
Access	0.041 (0.030)	...	-0.086** (0.039)	0,59 (€/min)	-0.028** (0.013)	1,27 (€/min)	-0.023** (0.009)	0,92 (€/min)
Diffusion	-0.033 (0.038)	...	0.026 (0.078)	...	-0.021 (0.013)	...	-0.029*** (0.011)	1,16 (€/min)
Frequency	0.131 (0.141)	...	0.084 (0.248)	...	0.431*** (0.106)	-19,59 (€/service)	0.139*** (0.048)	-5,56 (€/service)
TAD	-0.048 (0.710)	...	2.107* (1.225)	-14,43 (€/hour)	1.237*** (0.305)	-56,23 (€/hour)	0.553*** (0.191)	-22,12 (€/hour)
Observations	39		336		258		562	
R <sup>2</sup>	0.538		0.690		0.488		0.410	
Log Likelihood	-9.740		-9.316		-80.482		-120.023	
LR Test (df = 6)	22.656***		41.564***		153.562***		166.605***	
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01							

Dans le segment des déplacements pour motif personnel, ce sont principalement les prix payés qui expliquent la probabilité de choix des voyageurs (à 95 % de degré de confiance). Lorsque les voyageurs qui se déplacent pour motif personnel décident d'arriver la veille, les prix payés et le temps de rabattement sont significatifs à 95 % degré de confiance. La variable TAD est significative à 90 % de degré de confiance.

Pour les voyageurs professionnels qui font des allers-retours dans la journée entre Paris et Bordeaux, les prix payés, la fréquence de service et le TAD sont significatifs à 99 % de degré de confiance. La variable liée au temps de rabattement est significative à 95 % de degré de confiance. Pour les

voyageurs professionnels qui arrivent la veille, les prix payés, le temps de diffusion, la fréquence de service et TAD sont significatives à 99 % de degré de confiance. Le temps de rabattement est significatif à 95 % de degré de confiance.

Les variables significatives ont toutes des signes cohérents avec nos hypothèses : les prix payés, le temps de rabattement et le temps de diffusion ont des effets négatifs sur la probabilité de choix modal, tandis que la fréquence de service et le TAD ont des effets positifs sur la probabilité de choix modal.

Les signes des coefficients sont importants dans l'interprétation des valeurs monétaires. Lorsque la valeur monétaire est positive, celle-ci indique que les prix que les voyageurs sont prêts à payer pour la réduction d'une unité de la variable étudiée. La valeur monétaire négative indique les prix que les voyageurs sont prêts à payer pour l'augmentation d'une unité de la variable étudiée.

Nous considérons que, même si le degré de significativité est faible, les voyageurs pour motif personnel arrivant la veille sont prêts à payer environ 14,43 € pour passer une heure supplémentaire à destination. Lorsqu'il s'agit des voyageurs professionnels qui arrivent la veille, ils sont prêts à payer environ 5,56 € pour un train supplémentaire ou un avion supplémentaire et environ 22,12 € pour passer une heure supplémentaire à destination.

Les voyageurs professionnels qui font des allers-retours dans la journée sont prêts à payer environ 19,59 € pour un train supplémentaire ou un avion supplémentaire et environ 56,23 € pour passer une heure supplémentaire à destination. Cette valeur monétaire du TAD nous semble élevée, pourtant elle est logique pour expliquer les comportements des voyageurs. Pour les allers-retours dans la journée, elle s'agit non seulement d'un consentement à payer pour une heure supplémentaire à destination, mais aussi d'un consentement à payer pour éviter une nuitée supplémentaire à la destination.

Conformément à nos attentes, la valeur monétaire des variables liées à la qualité des dessertes sont relativement importantes lorsqu'il s'agit des déplacements professionnels et lorsque les voyageurs font des allers-retours dans la journée.

Cet exercice de modélisation confirme notre hypothèse sur l'utilité de la variable TAD. Nous montrons que le temps utile à destination est une information complémentaire permettant d'améliorer la qualité d'estimation du modèle. Le premier avantage de ce modèle repose sur le fait

qu'il tient compte des besoins de temps pour les activités principales à destination. L'autre avantage est qu'il a besoin de peu de données pour fonctionner.

Notre analyse subit toutefois l'inconvénient du manque des données. Nous ne considérons ici que deux modes de transport. Par conséquent le temps de parcours ne peut pas être intégré dans les modèles pour éviter le problème de séparation parfaite. En outre, les données liées aux horaires choisis pour les trajets de retour sont absentes de notre base de données. Notre solution consiste à supposer que les voyageurs choisissent toujours le retour le plus tardif possible. Sous cette hypothèse, la valeur de TAD calculée montre le temps que les voyageurs restent à destination, mais elle peut aussi être corrélée avec l'amplitude de service programmé. C'est pour cette raison que la constante du modèle TAD devient non significative. Par conséquent, les effets liés au temps utile à destination pourraient être biaisés. La meilleure application de ce modèle TAD nécessite des données désagrégées concernant l'heure de départ depuis l'origine et l'heure de retour depuis la destination.

### *3.3.1.2 - L'indicateur COP montre l'évolution ex ante / ex post de la qualité des dessertes sur la LGV SEA*

L'indicateur COP est d'un outil d'évaluation de qualité des dessertes. En ce qui concerne la LGV SEA, nous avons besoin de savoir si les territoires concernés bénéficient des effets de la vitesse de la LGV. Les études ont été effectuées sur la liaison Paris – Bordeaux ainsi que sur les liaisons intermédiaires entre Paris et Bordeaux.

A l'aide des données que nous avons collectées, nous faisons une comparaison entre la situation 2015 (la situation *ex ante*), la situation 2017 (la situation *ex post*) et la situation 2018 (le changement d'horaires en décembre 2017 est pris en compte). L'objectif est de montrer l'évolution de la qualité des dessertes après la mise en service de la LGV SEA et les effets du changement d'horaires sur la qualité des dessertes.

Le calcul a été effectué pour les trajets dans les deux sens de circulation : le sens impair de Paris vers les provinces et le sens pair des provinces vers Paris. Par ailleurs, nos calculs distinguent les

liaisons radiales et les liaisons intersecteurs. Nous supposons que selon le sens de circulation et le type de liaison, la qualité des dessertes va évoluer de manière différente.

La figure ci-dessous résume les résultats du nombre de combinaisons pertinentes sur les principales liaisons radiales entre Paris et Bordeaux.

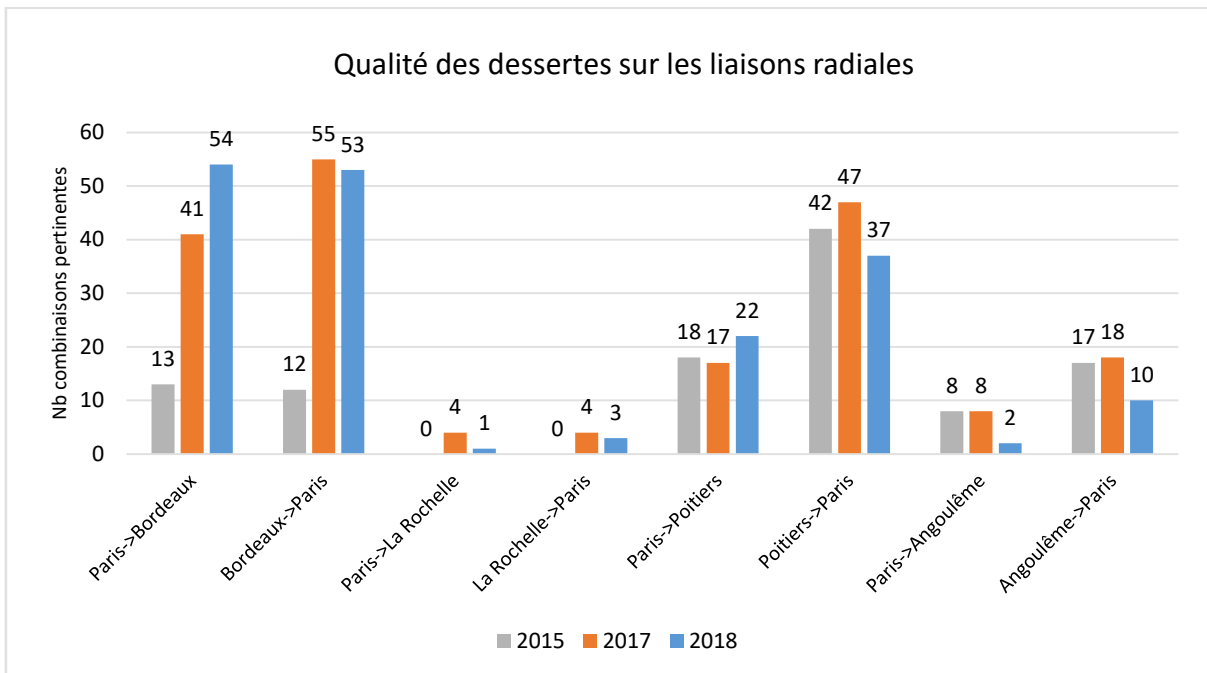


Figure 40 : l'évolution du nombre de combinaisons pertinentes sur les liaisons radiales entre Paris et Bordeaux

Nous constatons une amélioration remarquable de la qualité des dessertes sur la liaison Paris-Bordeaux après la mise en service de la LGV SEA, comme on pouvait s'y attendre. L'amélioration de la vitesse est la principale explication, le nouveau service TGV permet aux voyageurs de partir plus tard et d'arriver plutôt, donc de gagner du temps à destination.

Pour la ville de La Rochelle, nous observons aussi une légère amélioration de la qualité des dessertes grâce au service TGV. Le même phénomène ne se produit pas pour les autres villes intermédiaires comme Poitiers et Angoulême : le nombre de combinaisons pertinentes n'évolue que très peu. Toutes les villes intermédiaires ne bénéficient pas ou très peu des effets de vitesse après la mise en service de la LGV.

Le changement d'horaires en décembre 2017 par SNCF Mobilités a des effets très significatifs sur le nombre de combinaisons pertinentes. Nous nous apercevons qu'une amélioration de la qualité des dessertes dans le sens impair pour un trajet de Paris à Bordeaux et de Paris à Poitiers, les nouveaux horaires favorisent les visites dans le sens de Paris vers les provinces. Au contraire, dans le sens pair, le nombre de combinaisons pertinentes est en baisse avec les nouveaux horaires 2018. SNCF Mobilités a annoncé que le changement d'horaires a pour objectif de favoriser les trajets loisirs. Nos résultats avec l'indicateur COP montrent les effets de cette stratégie du changement d'horaires.

A l'exception de la ville d'Angoulême où la qualité des dessertes n'évolue pas après la mise en service de la LGV SEA, nous constatons par ailleurs une dégradation de la qualité des dessertes après le changement d'horaires sur les liaisons radiales dans les deux sens de circulation.

Une autre remarque intéressante pour les villes intermédiaires est le déséquilibre de la qualité des dessertes en fonction du sens de circulation. Les horaires proposés sont de meilleure qualité dans le sens pair que dans le sens impair. Selon nos résultats, les horaires actuels favorisent les déplacements depuis Poitiers, Angoulême et La Rochelle vers Paris par rapport au sens de circulation inverse.

Le changement d'horaires en décembre 2017 a suscité des mécontentements notamment à Angoulême. Les collectivités indiquent que les nouveaux horaires ne correspondent pas aux besoins des voyageurs dans leurs villes. Il est intéressant de montrer l'évolution de la qualité des dessertes après cette phase de changement d'horaires pour les villes intermédiaires. Dans la figure ci-dessous, nous présentons la comparaison *ex ante* / *ex post* de la qualité des dessertes sur les principales liaisons intersecteurs entre Paris et Bordeaux.



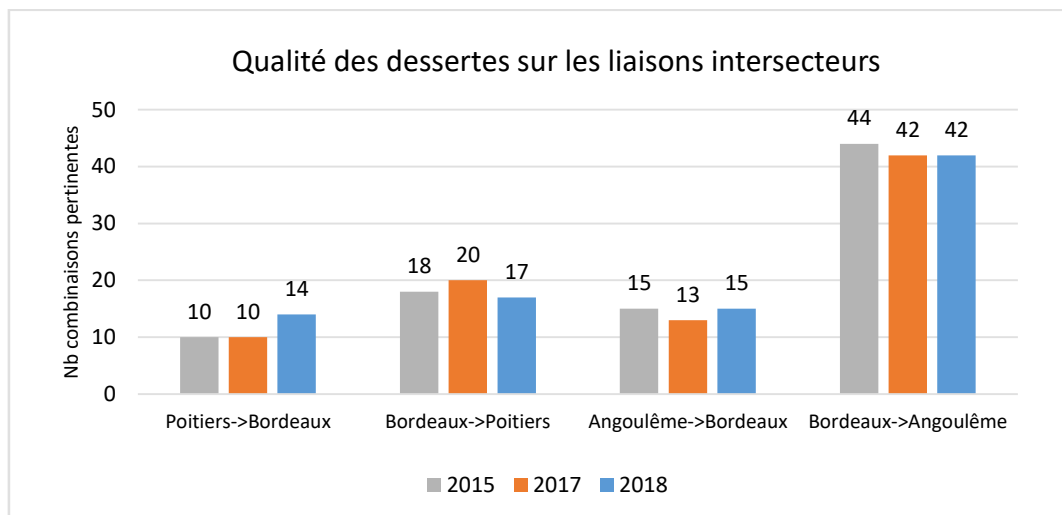


Figure 41 : L'évolution du nombre de combinaisons pertinentes sur les liaisons intersecteurs

Pour la ville d'Angoulême, contrairement à ce que nous attendions, la qualité des dessertes en termes de TAD n'évolue que très légèrement par rapport à la situation 2017. En effet, les horaires programmés dans le sens Angoulême-Bordeaux sont étalés dans la journée pour favoriser les déplacements loisirs. Si nous regardons le graphique « sillons-horaires » (Figure 52 en annexe), nous constatons effectivement qu'un train qui permettait d'arriver avant 10 h à Bordeaux depuis Angoulême a été supprimé. Pour les voyageurs d'Angoulême qui souhaitent rester 4 heures à Bordeaux, la qualité des dessertes ne se dégrade pas, alors que cette situation est difficile pour les déplacements quotidiens domicile-travail.

Par ailleurs, nous observons un déséquilibre important de la qualité des dessertes à Angoulême en fonction du sens de circulation. Les combinaisons pertinentes sont trois fois plus élevées dans le sens Bordeaux-Angoulême que dans le sens Angoulême-Bordeaux.

Nous faisons la même analyse pour la ville de Poitiers, les résultats montrent que la qualité des dessertes s'améliore légèrement dans le sens Poitiers-Bordeaux et qu'elle se dégrade légèrement dans le sens Bordeaux-Poitiers. La qualité des dessertes dans les sens de circulation Bordeaux-Poitiers et Poitiers-Bordeaux devient mieux équilibrée.

L'indicateur TAD permet aussi d'alimenter notre étude sur la concurrence entre le train et l'avion. Nous faisons un exercice de comparaison *ex ante / ex post* pour le service ferroviaire et le service aérien entre Paris et Bordeaux. Les trafics aériens en correspondance sont exclus de l'étude. Cela

revient à ne prendre en compte que la liaison aérienne entre Paris Orly et Bordeaux Mérignac. Par ailleurs, nous évaluons les effets liés à la suppression de 4 allers-retours aériens (soit 8 vols par jour) sur la qualité des dessertes de cette liaison aérienne, tout en sachant que les horaires maintenus sur la liaison Paris Orly – Bordeaux Mérignac ont aussi été réaménagés.

Les résultats de la comparaison Air-Fer de qualité des dessertes sont présentés dans la figure ci-dessous.

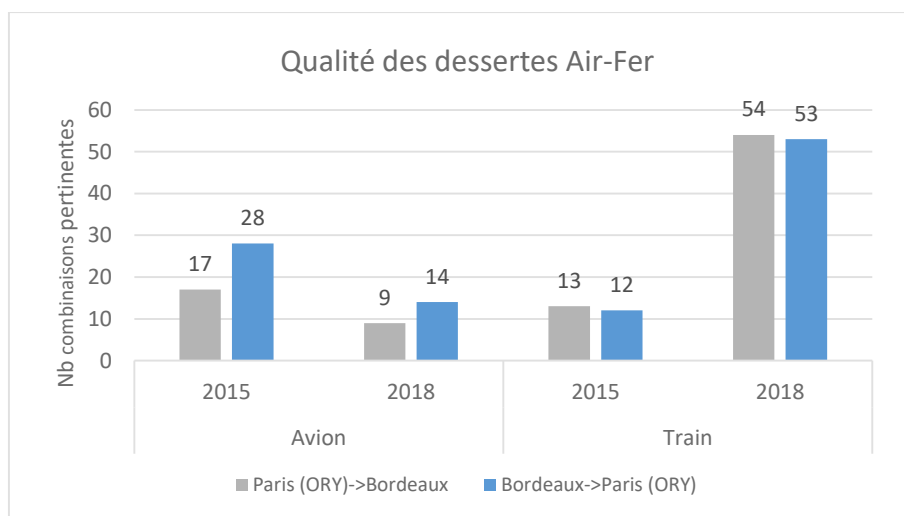


Figure 42 : l'évolution du nombre de combinaisons pertinentes Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux

Dans la situation *ex ante*, le nombre de combinaisons pertinentes en avion était plus important par rapport à celui que proposait en train. Dans le sens de Paris à Bordeaux, les voyageurs disposent de 17 combinaisons pertinentes en avion et de 13 combinaisons pertinentes en train. 28 en avion et 12 en train dans l'autre sens de circulation. Dans la situation *ex post*, le nombre de combinaisons pertinentes en train devient quatre fois plus important par rapport à la situation *ex ante*. Alors que le nombre de combinaisons pertinentes en avion est divisé par deux après la suppression de 4 allers-retours quotidiens. Actuellement sur la liaison Paris-Bordeaux, la qualité des dessertes en train est meilleure qu'en avion

Cet indicateur COP nous donne des résultats cohérents avec nos observations réelles. C'est un outil pratique permettant de suivre l'évolution de la qualité des dessertes dans le nouveau contexte de l'offre de transport. Il permet également de comparer la qualité des dessertes des différents modes

de transport concurrents. Les données nécessaires sont facilement accessibles, ce qui apporte des avantages en termes de la mesurabilité.

L'inconvénient majeur de cet indicateur est la contrainte du périmètre d'étude. Seuls les allers-retours dans la journée peuvent être pris en compte dans l'analyse. Pour cette raison, nous n'avons pas pu l'appliquer dans la modélisation du choix modal sur la liaison Paris-Bordeaux. Par ailleurs, il s'agit d'un indicateur agrégé fondé sur les hypothèses des contraintes de temps minimum à destination. Pour les motifs de déplacements dont les contraintes horaires sont flexibles, la pertinence des hypothèses sera mise en cause.

## Section 3.3.2 : L'utilité du modèle combiné choix modal – choix d'horaires

Dans cette section, nous présentons d'abord les résultats d'estimation des différents modèles Logit. Ensuite, nous effectuons une segmentation des échantillons qui nous permet de calculer la valeur du temps par motif de déplacement. Enfin, le modèle segmenté par motif est utilisé pour réaliser une prévision des parts de marché Air-Fer.

La méthode d'AIC est utilisée pour la sélection des variables explicatives. Cette méthode sélectionne les variables qui permettent de réduire la déviation de prévision en préférant le modèle avec peu de variables explicatives identifiées.

Les variables explicatives déterminantes des comportements de choix modal des voyageurs sont :

- les prix payés (Cost),
- le temps de parcours (Transit time),
- le temps de rabattement (Access),
- le temps de diffusion (Diffusion),

- les coûts de délais (Delay). Cette variable est choisie comme une variable spécifique aux alternatives afin d'estimer les effets différents liés aux arrivées en avance et aux arrivées en retard.

Ces variables regroupent les informations liées aux caractéristiques du trajet. Ce sont les principales variables pour expliquer les comportements de choix modal, l'augmentation du log de vraisemblance est significative. Pour des raisons pratiques, nous présentons uniquement les coefficients de ces variables dans les tables de résultats ci-dessous.

En outre, le modèle d'AIC identifie des variables liées aux caractéristiques des voyageurs :

- le motif de déplacement (Trip purpose Pro pour le motif professionnel),
- le nombre de covoyageurs (Single Passenger pour le voyageur seul ; Couple Passengers pour les personnes qui voyagent en couple),
- les variables CSP (Managerial staff pour les cadres et les professions supérieures ; Workers pour les ouvriers ; Artisan and Business man pour les artisans et commerçants ; Pensioner pour les retraités)

Après avoir comparé les différents modèles utilisés sur la base de l'exemple LGV SEA, les coefficients des variables du modèle sélectionnées seront présentés et interprétés.

### *3.3.2.1 - Les résultats des modèles GEV*

Le cadre théorique des modèles GEV a été présenté dans la section 2.1.2.1. Nous présentons les résultats d'estimation des modèles MNL, NL et CNL de notre travail dans le tableau 16 ci-dessous. Deux structures de modèle existent pour les modèles NL. Nous distinguons le modèle « NL Mode » qui a le choix modal au niveau supérieur du modèle et le modèle « NL Schedule » qui a le choix d'horaire au niveau supérieur. Les résultats du modèle MNL et CNL sont présentés dans la première et la dernière colonne de ce tableau.

Nous allons comparer ces différents modèles afin de trouver le meilleur modèle parmi eux pour expliquer les comportements de choix modal – choix d'horaires des voyageurs.

Tableau 16 : les résultats des modèles GEV

	Comparison MNL NL CNL			
	Dependent variable:			
	Travelmode			
	(MNL)	(NL Mode)	(NL Schedule)	(CNL)
Cost	-0.025*** (0.002)	-0.026*** (0.002)	-0.023*** (0.003)	-0.021*** (0.002)
Transit time	-0.015*** (0.002)	-0.016*** (0.002)	-0.014*** (0.002)	-0.013*** (0.002)
Access	-0.034*** (0.005)	-0.034*** (0.005)	-0.030*** (0.005)	-0.028*** (0.005)
Diffusion	-0.044*** (0.005)	-0.044*** (0.006)	-0.040*** (0.006)	-0.037*** (0.005)
Delay:EarlyTrain	-0.039*** (0.003)	-0.039*** (0.006)	-0.037*** (0.003)	-0.024*** (0.003)
Delay:EarlyAir	-0.059*** (0.006)	-0.062*** (0.008)	-0.053*** (0.007)	-0.048*** (0.006)
Delay:LateTrain	-0.078*** (0.005)	-0.078*** (0.012)	-0.076*** (0.005)	-0.052*** (0.005)
Delay:LateAir	-0.136*** (0.015)	-0.147*** (0.024)	-0.136*** (0.017)	-0.130*** (0.016)
$\mu$ .Train		1.006*** (0.150)		0.160*** (0.030)
$\mu$ .Air		1.189*** (0.269)		1.000
$\mu$ .Early			0.841*** (0.109)	0.505*** (0.067)
$\mu$ .Late			1.013*** (0.153)	0.893*** (0.028)
Observations	1,428	1,428	1,428	1,428
R <sup>2</sup> McFadden	0,553	0,553	0,553	0,555
Log Likelihood	-885.496	-885.184	-884.159	-881.157
Note:	* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01			

Dans l'ensemble des méthodes MNL, NL et CNL, les variables liées aux prix payés, le temps de parcours, le temps de rabattement et le temps de diffusion sont significatives à 99 % de degré de confiance. Conforme à l'intuition, les effets de ces variables sont négatifs pour expliquer la probabilité de choix des voyageurs.

Dans ce modèle, nous ne disposons que de deux modes de transport. La variable du temps de parcours va générer des problèmes de séparation parfaite. Pour résoudre ce problème, nous avons choisi d'estimer un modèle sans constante. De ce fait, nous supposons que si toutes les variables déterminantes du modèle sont identiques, les voyageurs sont indifférents entre le train et l'avion. Le test de la qualité prédictive entre le modèle standard sans la variable du temps de parcours et le modèle sans constante montre des résultats très proches.

Par ailleurs, nous nous apercevons que les effets du temps de diffusion sur la probabilité de choix sont relativement importants par rapport au temps de parcours et au temps de rabattement. Le temps pour rejoindre la destination finale est donc perçu comme plus important dans le processus de choix des voyageurs.

Les variables de coûts de délais sont significatives à 99 % de degré de confiance. Les signes de ces variables sont cohérents avec nos hypothèses : les coûts de délais ont des effets négatifs sur la probabilité de choix des voyageurs. Par rapport aux coûts de délais liés à l'arrivée en avance, les effets liés à l'arrivée en retard sont relativement plus importants.

En comparant le ratio de log de vraisemblance du modèle MNL et les deux modèles NL, nous constatons que les modèles NL n'améliorent pas la qualité d'estimation du modèle pour expliquer les comportements de choix des voyageurs. Le ratio de log de vraisemblance n'évolue que très peu. Le ratio d'AIC du modèle MNL est 1787 et celui des modèles NL sont 1789 pour le « NL Mode » et 1788 pour le « NL Schedule ».

Le taux de succès de prévision du modèle MNL est 64,24 %, celui du modèle « NL Mode » et « NL Schedule » sont respectivement de 64,21 % et 64,11 %. Statistiquement, les modèles NL ne sont pas significativement plus performants que le modèle MNL. Par ailleurs, nous constatons la présence des paramètres d'échelle  $\mu$  supérieurs à 1 dans les modèles NL, ce qui indique l'éventuelle présence de la corrélation intragroupe.

Dans le modèle CNL, nous constatons que les paramètres d'échelle du groupe « Train », « Early » et « Late » sont significatifs. Le paramètre d'échelle du groupe « Train » est relativement faible, ce qui indique une forte corrélation entre « EarlyTrain » et « LateTrain ». Les coefficients des variables explicatives du modèle CNL sont moins élevés par rapport aux modèles MNL et NL. La qualité du modèle CNL en termes de log de vraisemblance est meilleure par rapport aux modèles MNL et NL, mais l'amélioration est modeste. Le ratio d'AIC du modèle CNL est 1786, très légèrement amélioré par rapport au modèle MNL. Le nombre de paramètre plus élevé a pénalisé le ratio d'AIC du modèle CNL. Le taux de succès de prévision s'est légèrement amélioré avec le modèle CNL en atteignant 64,53 %.

Même si la qualité d'estimation des modèles GEV est très proche, nous préférons le modèle CNL puisque théoriquement il est plus solide en relâchant les hypothèses IID. Nous préférons donc le modèle CNL que les modèles MNL et NL pour analyser les effets de la qualité des dessertes sur le choix modal sur la liaison Paris-Bordeaux.

### *3.3.2.2 - Résultats du modèle MMNL*

Les résultats du modèle MMNL sont présentés dans le tableau suivant. En étant capable de gérer le problème de corrélation entre les alternatives, le modèle MMNL pourrait apporter des améliorations de qualité d'estimation à notre modèle.

Dans notre modèle, les variables liées aux coûts de délais sont des variables spécifiques aux alternatives. Nous supposons que les coefficients de ces variables sont aléatoires afin de gérer l'hétérogénéité et la corrélation entre les alternatives. Nous faisons l'hypothèse que les coefficients aléatoires du modèle suivent la loi de distribution normale.

Les coefficients « Delay: EarlyTrain », « Delay: EarlyAir », « Delay: LateTrain » et « Delay: LateAir » correspondent à la moyenne des coefficients aléatoires des variables de coûts de délais. Les coefficients « sd.Delay: EarlyTrain », « sd.Delay: EarlyAir », « sd.Delay: LateTrain » et « sd.Delay: LateAir » correspondent aux écarts types des coefficients aléatoires. La moyenne, la médiane et la variation par quantile des coefficients aléatoires se trouvent en bas de tableau.

Tableau 17 : les résultats d'estimation du modèle MMNL

Estimation Results of the MMNL Model						
Dependent variable:						
Travelmode						
	Estimate	Std.Error	T-value	Pr(> t )		
Cost	-0.026	0.002	-11.809	< 2.200e-16	***	
Transit time	-0.015	0.002	-7.992	1.332e-15	***	
Access	-0.034	0.005	-6.801	1.041e-11	***	
Diffusion	-0.044	0.006	-7.872	3.553e-15	***	
Delay:EarlyTrain	-0.042	0.006	-7.499	6.439e-14	***	
Delay:EarlyAir	-0.060	0.009	-6.326	2.521e-10	***	
Delay:LateTrain	-0.083	0.011	-7.470	8.016e-14	***	
Delay:LateAir	-0.137	0.024	-5.660	1.513e-08	***	
sd.Delay:EarlyTrain	0.012	0.012	1.031	0.302		
sd.Delay:EarlyAir	-0.001	1.011	-0.001	1.000		
sd.Delay:LateTrain	-0.019	0.019	-0.975	0.330		
sd.Delay:LateAir	-0.001	2.704	-0.001	1.000		
Observations				1,428		
Log-Likelihood:				-885.01		
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01					
Random coefficients						
	Min.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Max.
Delay:EarlyTrain	- Inf	-0.051	-0.042	-0.042	-0.034	Inf
Delay:EarlyAir	- Inf	-0.060	-0.060	-0.060	-0.060	Inf
Delay:LateTrain	- Inf	-0.096	-0.083	-0.083	-0.071	Inf
Delay:LateAir	- Inf	-0.137	-0.137	-0.137	-0.137	Inf

Nous nous apercevons que les variables liées aux prix payés, au temps de parcours, au temps de rabattement et au temps de diffusion sont significatives à 99 % de degré de confiance. Conformément à nos hypothèses, les signes de ces variables explicatives sont corrects. Les effets des prix payés et des temps de transport sont négatifs pour expliquer les comportements de choix des voyageurs.

Les coefficients liés à la moyenne des coefficients aléatoires de coûts de délais sont significatifs et avec des signes corrects. Nous constatons qu'avec le modèle MMNL, les effets liés aux arrivées en retards sont plus importants par rapport aux effets liés aux arrivées en avance. Ces résultats sont cohérents avec les résultats des modèles GEV.



Néanmoins, les écarts types des coefficients aléatoires ne sont pas significatifs. Cela veut dire que les coefficients de ces variables ne sont pas aléatoires. Par conséquent, le modèle MMNL ne contribuera pas à améliorer la qualité d'estimation du modèle. Le test du ratio de vraisemblance confirme ces résultats. Le ratio de log de vraisemblance du modèle MMNL n'améliore pas significativement par rapport aux modèles GEV. Le ratio d'AIC du modèle MMNL est même plus élevé en atteignant 1794. Le taux de succès du modèle MMNL est de 64,24 %, plus faible que le modèle CNL. De manière générale, nous considérons que le modèle MMNL n'apporte pas d'améliorations à la qualité d'estimation par rapport aux modèles GEV.

La règle générale du choix de modèle est que nous préférons le modèle dont la qualité d'estimation est la meilleure et celui dont la structure du modèle est le plus simple. Dans le cadre de notre étude de cas, le modèle CNL est le plus adapté pour expliquer les comportements de choix combiné du choix modal – choix d'horaires. Les résultats d'estimation du modèle CNL concernant les variables liées aux caractéristiques des voyageurs sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 18 : les résultats d'estimation des variables liées aux caractéristiques des voyageurs

Estimation Results of the CNL Model						
Dependent variable:						
Travelmode						
LateTrain		EarlyAir		LateAir		
Parameter	t-statistic	Parameter	t-statistic	Parameter	t-statistic	
<b>Trip characteristics</b>						
Trip purpose pro	0.081	0.465	0.671	2.197 *	1.448	2.894 **
Single passenger	0.482	2.114 *	-1.5466	-3.631 ***	-2.856	-4.648 ***
Couple passengers	0.836	2.784 **	-1.1361	-2.189 *	-2.248	-2.782 **
<b>Individual characteristics</b>						
Managerial staff	-0.296	-1.349	1.471	3.336 ***	2.029	2.672 **
Workers	-0.433	-1.707	0.613	1.202	1.694	2.187 *
Artisan and Business man	-0.235	-0.683	1.612	2.921 **	2.730	3.076 **
Pensioner	-0.479	-1.587	-0.912	-1.062	-16.306	-0.007
Note:			* p<0.1; ** p<0.05; *** p<0.01			

Nous nous apercevons que la probabilité de choisir l'avion est plus importante lorsqu'il s'agit d'un déplacement professionnel. Toutes choses égales par ailleurs, par rapport aux voyageurs en groupe,

les personnes lorsqu'elles voyagent seuls ou en couple ont moins de chance de prendre l'avion que le train. Toutes choses égales par ailleurs, les cadres, les artisans et les commerçants ont plus de chance de choisir l'avion que le train par rapport aux autres catégories socioprofessionnelles.

### *3.3.2.3 - Résultats de la segmentation par motif*

La segmentation par motifs est généralement considérée comme pertinente pour éviter le problème d'hétérogénéité dans la base des données. Pour le motif professionnel et le motif personnel, les voyageurs n'auront pas la même sensibilité au temps passés dans le transport et aux prix payés. Les résultats du modèle CNL avec une segmentation par motif sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 19 : les résultats d'estimation du modèle segmenté par motif des déplacements

Segmentation by travel purpose		
	<i>Dependent variable:</i>	
	Travelmode Purpose Pro	Purpose Pers
Cost	-0.025 <sup>***</sup> (0.002)	-0.065 <sup>***</sup> (0.011)
Transit time	-0.019 <sup>***</sup> (0.002)	-0.016 <sup>***</sup> (0.004)
Access	-0.035 <sup>***</sup> (0.006)	-0.025 <sup>***</sup> (0.009)
Diffusion	-0.045 <sup>***</sup> (0.007)	-0.037 <sup>***</sup> (0.011)
Delay:EarlyTrain	-0.047 <sup>***</sup> (0.004)	-0.029 <sup>***</sup> (0.004)
Delay:EarlyAir	-0.073 <sup>***</sup> (0.008)	-0.025 <sup>***</sup> (0.009)
Delay:LateTrain	-0.087 <sup>***</sup> (0.006)	-0.064 <sup>***</sup> (0.007)
Delay:LateAir	-0.141 <sup>***</sup> (0.017)	-0.138 <sup>***</sup> (0.034)
Observations	958	470
R <sup>2</sup>	0.503	0.366
Log Likelihood	-560.411	-279.441
Note:	*p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01	

Les variables explicatives liées aux coûts et au temps de transport sont significatives avec les signes conformes à nos attentes. Nous constatons que les coefficients des prix payés sont relativement plus élevés pour les personnes qui voyagent pour motif personnel. Conformément à l'intuition, les effets marginaux liés aux prix payés sont plus importants pour ceux qui voyagent pour motif personnel.

Les coefficients estimés de ce modèle segmenté nous permettent de calculer la valeur du temps et les ratios de coûts de délais. Ces ratios sont très utiles pour bien comprendre les caractéristiques des voyageurs pour des motifs de déplacements différents ainsi que les différents effets des coûts de délais liés aux arrivées en avance et en retard.

### *3.3.2.4 - Détermination des valeurs du temps par mode et par motif*

Selon la théorie de l'allocation du temps, la valeur d'une économie de temps pour les déplacements correspond au rapport des coefficients du temps et des prix payés. Généralement, nous supposons que la valeur du temps sera différente en fonction du motif des déplacements. Lorsque les déplacements se font pour motif personnel, la valeur du temps sera relativement faible.

Selon les résultats d'estimation du modèle segmenté par motif des déplacements, nous considérons que la valeur du temps des voyageurs entre Paris et Bordeaux est de 36 €/h. Celle-ci est raisonnable par rapport aux valeurs du temps normalisées en interurbain présentées dans le rapport de Boiteux 2 et le rapport Quinet (2013)<sup>48</sup> qui donne les valeurs officielles pour la France. Conforme à notre hypothèse, la valeur du temps pour les déplacements professionnels est relativement élevée à 45,6 €/h et le motif personnel est relativement faible à 14,77 €/h. Les voyageurs pour le motif professionnel sont prêts à payer plus cher pour un temps de parcours plus court.

---

<sup>48</sup> Dans le rapport Boiteux 2, la valeur du temps pour les distances supérieures à 400 km est de 18,9 €/h pour le train et de 51,5 €/h pour l'avion (INRETS, 1998). Dans le rapport Quinet (2013), la valeur du temps pour les distances supérieures à 400 km est de 26,2 €<sub>2010</sub>/h et de 53,2 €<sub>2010</sub>/h pour l'avion.

Tableau 20 : la valeur du temps et les ratios de coûts de délais sur Paris-Bordeaux

	Tous motifs	Motif pro	Motif perso
VOT (€/h)	36,00	45,60	14,77
EarlyTrain/Transit time	2,60	2,47	1,81
LateTrain/Transit time	4,58	4,58	4
EarlyAir/Transit time	3,93	3,84	1,56
LateAir/Transit time	9,07	7,42	8,625
LateTrain/EarlyTrain	2,00	1,85	2,21
LateAir/EarlyAir	2,31	1,93	5,52

Deux conclusions concernant les ratios de coûts de délais ressortent du tableau. Premièrement, les coûts de délais sont plus importants pour les usagers de l'avion. Lorsque les horaires ne s'adaptent pas aux besoins des déplacements, les délais sont relativement plus coûteux pour les usagers de l'avion. Deuxièmement, les coûts de délais sont plus importants pour les déplacements professionnels. Les voyageurs disposent en général des contraintes plus strictes en termes d'horaires pour les déplacements professionnels. Nous n'observons pas ces effets pour le motif personnel en « LateAir », l'explication est que la part des usagers de l'avion pour les déplacements personnels était très faible, lorsque les horaires ne leurs permettent plus d'arriver avant l'heure d'arrivée souhaitée, ils se reportent plus facilement vers le train.

Conformément à nos hypothèses, les retards sont plus coûteux dans le processus de choix des déplacements. Les coûts de délais liés aux retards sont deux fois plus importants par rapport aux arrivées en avance.

Le temps perdu lié aux arrivées en avance est relativement plus coûteux lorsqu'il s'agit des déplacements professionnels. C'est la raison pour laquelle l'arbitrage entre les retards et les arrivées

en avance est relativement faible pour les déplacements professionnels. Autrement dit, les délais liés aux arrivées en avance sont considérés comme moins coûteux pour les déplacements personnels.

Nos résultats sont assez proches de ceux de Cascetta et Papola (2003, 2016). Les ratios de coût de délais sont 2,83 pour les arrivées en avance par rapport au temps de parcours et 4,68 pour les arrivées en retard par rapport au temps de parcours. Dans leurs travaux, le rapport entre les coûts de délais liés à l'arrivée en avance et les coûts de délais liés au retard est 2,41.

Dans notre étude de cas, nous allons réaliser une prévision des parts de marché sur la liaison Paris-Bordeaux avec des différents scénarios de l'offre de transport.

### 3.3.2.5 - *Estimation des parts de marché Air-Fer*

Nous effectuons ici un travail de prévision des parts de marché Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux. Quatre scénarios différents sont établis pour visualiser l'évolution des parts de marché après la mise en service de la LGV SEA. Ces scénarios ne sont pas des situations hypothétiques mais des observations réelles de l'offre de transport sur la liaison Paris-Bordeaux.

La situation avant la mise en service commerciale de la LGV SEA est considérée comme la situation de référence. Les données matrice région-région de la SNCF, trafics aériens publiés par la DGAC<sup>49</sup> et la base des données de l'observatoire socio-économique sur la tarification ont été utilisées pour construire les parts de marché de la situation de référence. Dans le scénario 1, nous prenons en compte l'évolution des différents facteurs de l'offre de transport concernant le prix payés et le temps de parcours. Dans le scénario 2, les nouveaux horaires sur la liaison Paris-Bordeaux après la mise en service de la LGV sont pris en compte. Dans le scénario 3, nous cherchons à évaluer les effets liés à la suppression de 8 vols quotidiens entre Paris Orly et Bordeaux Mérignac sur les parts de marché. Dans le scénario 4, nous prenons en compte le changement d'horaires des trains en décembre 2017 dans l'étude de la prévision des parts de marché.

Les contenus des scénarios sont présentés dans le tableau suivant :

---

<sup>49</sup> Direction Générale de l'Aviation Civile

Tableau 21 : les scénarios concernant l'évolution de l'offre de transport Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux (base des données de l'OSE LGV SEA, site web Oui.SNCF)

Les descriptions des scénarios	
<b>Référence</b>	La situation avant la mise en service de la LGV SEA.
<b>Scénario 1</b>	La diminution du temps de parcours de 37 % en train.
	L'évolution des tarifs ferroviaires: tarif pro 1er classe + 29 %, tarif pro 2e classe + 19 %, tarif loisir 1er classe + 10 % et tarif loisir 2e classe + 15 %.
	L'évolution des tarifs aériens : tarif pro inchangé, le tarif loisir - 10 %.
<b>Scénario 2</b>	Le changement d'horaires des trains à partir de juillet 2017.
<b>Scénario 3</b>	Air France décide de supprimer 4 allers-retours entre Paris Orly et Bordeaux Mérignac, les horaires restants ont aussi été réaménagés.
<b>Scénario 4</b>	Le changement d'horaires des trains en décembre 2017.

Les résultats de la prévision des parts de marché Air-Fer sont présentés dans la figure ci-dessous. Les graphiques montrent l'évolution des parts de marché par rapport à la situation de référence. Les résultats détaillés sont présentés dans l'annexe.

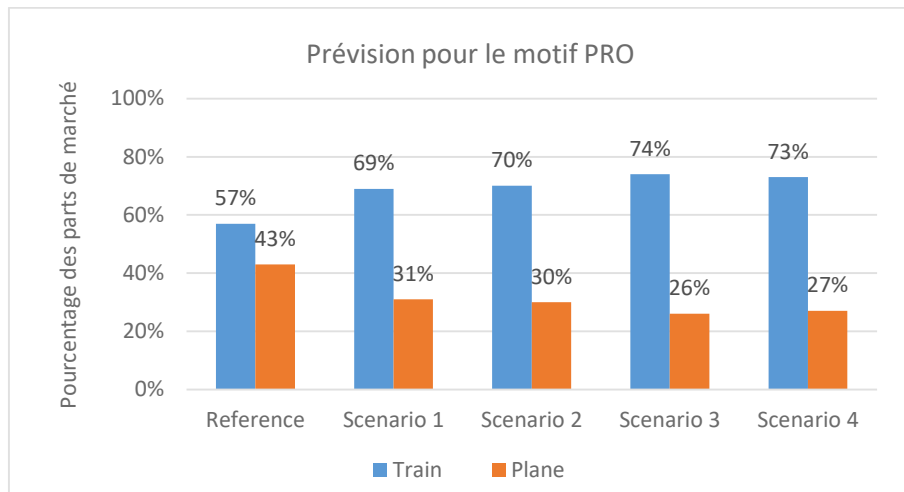


Figure 43 : les résultats de la prévision des parts de marché Air-Fer pour les déplacements professionnels

Pour les déplacements professionnels sur la liaison Paris-Bordeaux, nous constatons que la nouvelle offre TGV attire des nouveaux voyageurs au détriment de l’avion. Dans tous nos scénarios, l’avion perd des parts de marché. En prenant en compte tous les scénarios de l’offre de transport, les parts de marché du ferroviaire augmentent de 57% à 73%.

L’intérêt majeur de notre modèle repose sur sa capacité à prendre en compte les changements d’horaires. Dans les scénarios 2, 3 et 4, nous constatons des évolutions des parts de marché par rapport au modèle standard. Dans le cas où les horaires d’un mode alternatif sont de meilleures qualités, la probabilité de choix modal des voyageurs va évoluer. Sur la liaison Paris-Bordeaux, les horaires de train adaptent mieux aux besoins des déplacements des voyageurs après la mise en service de la LGV SEA.

Dans le scénario 3, nous considérons que la suppression des 4 allers-retours (soit 8 vols quotidiens entre Paris Orly et Bordeaux Mérignac) a des effets significatifs sur les parts de marché. La qualité des horaires d’avion se dégrade après cette suppression des dessertes.

En comparant les résultats du scénario 3 et le scénario 4, nous constatons que le changement d’horaires des trains en décembre 2017 sur Paris-Bordeaux a peu d’effets sur les parts de marché pour les déplacements professionnels.



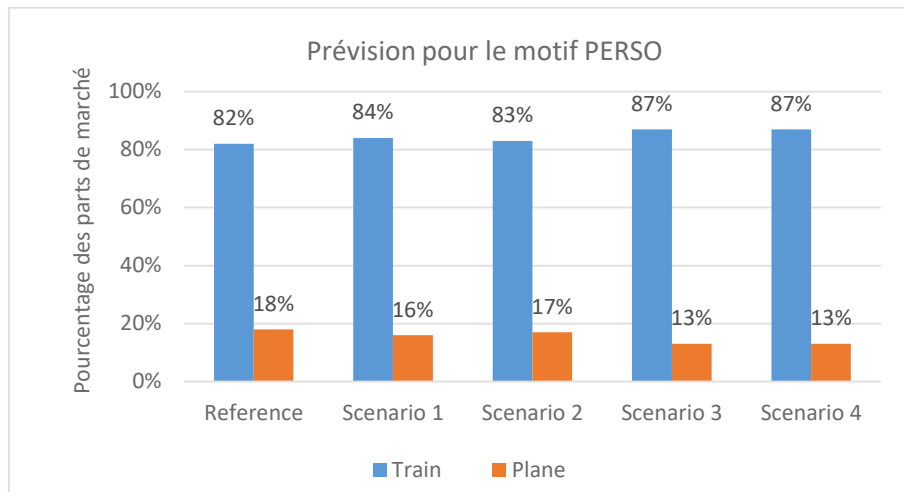


Figure 44 : les résultats de la prévision des parts de marché Air-Fer pour le motif personnel

Le train est un mode de transport dominant pour les déplacements personnels. Avant la mise en service de la LGV SEA, le train a atteint déjà 82 % des parts de marché pour les déplacements personnels sur la liaison Paris-Bordeaux. Dans cette étude de la prévision, les parts de marché des trains continuent à augmenter de 82 % à 87 %.

Dans le scénario 3, nous observons une évolution importante des parts de marché liée à la suppression des 4 allers-retours par Air France. L'avion perd de 4 % des parts de marché par rapport au scénario 2.

Dans le scénario 4, le changement d'horaires des trains en décembre 2017 n'a quasiment pas d'effets sur les parts de marché des trains ou des avions pour les déplacements personnels.

Les deux motifs de transport confondus, nous constatons que le TGV gagne des parts de marché vis-à-vis de l'avion sur la liaison Paris-Bordeaux après la mise en service de la LGV SEA.

L'avantage du modèle combiné repose d'abord sur son fondement théoriquement sur la notion de coûts de délais qui explique que conjointement le choix modal et le choix d'horaires est plus pertinent. En effet, les besoins des déplacements dans le programme d'activités et les caractéristiques des opportunités à destination sont pris en compte dans l'analyse. La dimension de choix d'horaires permet d'estimer les effets différents des arrivées en avance et arrivées en retard sur les comportements des voyageurs.

Ensuite, du point de vue pratique, l'avantage du modèle réside sur le fait qu'il permet d'évaluer la qualité des horaires programmés par les opérateurs de transports. Dans le cadre de la mise en service d'une nouvelle offre de transport ou en cas de changement des horaires, nous sommes capables de prendre en compte les nouveaux horaires dans les travaux de modélisation afin d'évaluer les effets liés à ces changements sur la demande.

Le principal inconvénient de notre modèle réside dans le fait que seuls deux modes de transport ont fait l'objet d'études. Les données que nous disposons ne nous permettent pas de travailler sur le choix multinomial en prenant en compte notamment la voiture particulière. Les modèles estimés sont des modèles sans constantes afin de pouvoir estimer les effets liés au temps de parcours. Néanmoins, les hypothèses associées aux modèles sans constantes sont fortes. Celles-ci consistent à supposer que les voyageurs sont indifférents entre l'avion et le train si toutes les variables déterminantes sont identiques. Dans notre étude de cas, les modèles sans constantes ne vont pas fortement biaiser les résultats d'estimation car le périmètre d'étude est restreint aux voyageurs réguliers, principalement pour le motif professionnel et sur la seule liaison Paris-Bordeaux. Les préférences des déplacements, les goûts des voyageurs sont relativement proches. Mais, pour les futurs travaux, il est conseillé d'appliquer ce modèle avec au moins trois modes de transport alternatifs.

Un autre inconvénient tient à la structure du modèle. La probabilité de choix des voyageurs a été estimée uniquement entre les arrivées en avance et les arrivées en retard, mais pas sur l'ensemble des horaires disponibles. Dans notre base de données, les variables de coûts de délais sont des variables déduites. Nous nous apercevons que les voyageurs ont choisi les heures d'arrivée les plus proches de leurs heures d'arrivée souhaitées. L'explication possible est que les voyageurs pourraient anticiper leurs trajets pour adapter les contraintes temporelles à la destination aux horaires qu'ils ont choisis. Ce sont des informations manquantes dans notre analyse. Les variables liées aux coûts de délais pourraient être des variables endogènes. Pour résoudre ce problème, il nous faut plus de données sur leurs contraintes temporelles à la destination ou alors retourner vers une enquête de préférences déclarées.

## Conclusion du chapitre 3.3

A travers notre analyse, nous montrons que les indicateurs de temps utile à destination pourraient être intégrés dans la modélisation du choix modal. La variable TAD est complémentaire aux indicateurs classiques de la fréquence de service. Elle améliore la qualité d'estimation du modèle de choix modal. Pourtant, notre modèle subit plusieurs inconvénients. Cet indicateur ne peut être appliqué que pour les trajets de courte durée. Par ailleurs, les données manquantes liées aux horaires choisis pour le trajet de retour ont généré des problèmes de surestimation.

L'indicateur COP contribue à comparer l'évolution de la qualité des dessertes entre la phase avant et après la mise en service de la LGV SEA. Nous constatons que sur la liaison Paris-Bordeaux, la qualité des dessertes s'améliore fortement, alors que la qualité des dessertes se dégrade par rapport à la situation avant la mise en service de la LGV SEA sur les liaisons intermédiaires. Ces résultats montrent l'intérêt de l'approche basée sur le programme d'activité pour étudier les comportements de choix modal des voyageurs. L'inconvénient de cet indicateur est qu'il ne pourra être appliqué que pour les allers-retours dans la journée.

Le modèle combiné choix modal-choix d'horaires permet de prendre en compte les besoins des voyageurs en termes d'horaires d'arrivée souhaités. Les variables de coûts de délais sont toutes significatives pour expliquer les comportements de choix des voyageurs. Les limites du modèle proviennent essentiellement du manque des données. Nous ne disposons que deux modes de transport dans la structure du modèle : le train et l'avion. Il est souhaitable d'appliquer ce modèle dans l'analyse du choix multinomial entre plusieurs modes de transport.

Nous montrons que ce modèle est capable de mesurer les effets du changement d'horaires sur les parts de marché Air-Fer. Les résultats de la prévision de la demande montrent l'évolution des parts de marché lorsque le changement des horaires est pris en compte.

## Conclusion de la partie 3

L'offre ferroviaire s'améliore fortement avec la mise en service de la LGV SEA, le temps de parcours entre Paris et Bordeaux a diminué de 3h15 à 2h04. Nous constatons déjà les premiers effets de cette nouvelle infrastructure ferroviaire sur le trafic aérien. Pendant les périodes hors vacances, la forte concurrence Air-Fer a fait chuter le trafic aérien entre 17 % et 28 % sur la liaison Paris Orly - Bordeaux Mérignac par rapport à l'année qui précède la mise en service de la LGV SEA. Face à cette forte concurrence, Air France a réagi en diminuant le nombre de vols.

La forte évolution de l'offre ferroviaire et les effets sur la demande montrent l'intérêt d'une analyse de la concurrence Air-Fer. Cela est aussi l'un des principaux objectifs indiqués lors de la conception du projet de LGV SEA. Compte tenu des caractéristiques de ce projet, la qualité des dessertes compte parmi les questions qui reviennent le plus souvent dans l'évaluation de l'offre de transport. Au-delà d'une simple comparaison du nombre de dessertes, nous présentons les résultats d'évaluation avec des indicateurs plus pertinents qui peuvent aussi être intégrés dans l'étude des comportements de choix modal des voyageurs.

Nous disposons d'un observatoire qui nous fournit des moyens pour collecter les données. Nos études sont réalisées grâce aux données liées aux horaires programmés et aux données des enquêtes « voyageurs ». Ces données sont précieuses notamment dans un contexte difficile pour les études de transport ferroviaire. Nous organisons la présentation de nos données en fonction des besoins de chaque méthode utilisée. Pour chaque base de données présentée, nous discutons ses caractéristiques et ses limites.

Les résultats du modèle de choix modal et du modèle combiné choix modal – choix d'horaires montrent que la qualité des dessertes est une variable significative pour expliquer les comportements de choix des voyageurs. L'utilisation des indicateurs de temps utile à destination et de la méthode basée sur la notion de coûts de délais permet d'améliorer la qualité d'estimation des modèles.

L'indicateur de temps utile à destination montre qu'une amélioration de qualité des dessertes ferroviaires sur la liaison Paris-Bordeaux. Mais pour les villes intermédiaires comme Angoulême, la mise en service de la LGV SEA n'a fait que dégrader la qualité des dessertes. La qualité des dessertes aériennes s'est dégradée après la mise en service de la LGV SEA.

Sur la liaison Paris-Bordeaux, la prise en compte des horaires dans la modélisation a des impacts sur la prévision des parts de marché. Nos résultats montrent une chute des parts de marché du transport aérien, ceci est cohérent avec ce que nous constatons réellement. Le niveau du trafic aérien a beaucoup baissé à cause de la qualité des dessertes aériennes qui s'est dégradée.

Nous conseillons aux futurs travaux sur le choix modal d'utiliser l'approche basée sur le programme d'activités et sur la modélisation des horaires. Les indicateurs temps utile à destination demandent moins de données mais ils disposent de contraintes d'utilisation (ils concernent uniquement les trajets de courts durées). Le modèle combiné choix modal – choix d'horaires est plus pertinent mais les contraintes des données sont plus importantes. Nous suggérons aux futurs travaux sur le choix modal d'ajouter systématiquement des questions spécifiques sur les différents composants d'horaires et sur l'heure d'arrivée souhaitée des voyageurs dans les enquêtes « voyageurs ». Ces questions ne vont pas alourdir le questionnaire, elles permettent toutefois de fournir des informations précieuses pour la modélisation des horaires.

# Conclusion générale

La question des dessertes était au centre des débats pendant la période de pré inauguration du projet de LGV SEA. Tous les acteurs ferroviaires, les gestionnaires de l'infrastructure, les opérateurs de transport et les collectivités locales ont participé à la discussion autour de ce sujet. Un accord a été trouvé quelques mois avant la mise en service de la LGV SEA, le nombre d'aller-retour sans arrêt a augmenté de 13,5 à 18,5 quotidiennement entre Paris et Bordeaux.

Si ce résultat est plutôt satisfaisant pour Bordeaux, il est moins convaincant pour les villes intermédiaires. Ayant participé au financement du projet, les villes intermédiaires entre Paris et Bordeaux réclament un nombre d'arrêt au moins équivalent à son niveau avant la mise en service de la LGV. C'est d'ailleurs l'objectif envisagé dans les dossiers DUP du projet. Pourtant, lorsqu'on fait une comparaison *ex ante / ex post* du nombre de dessertes directs des villes intermédiaires vers Paris ou Bordeaux, on constate souvent un plus faible niveau de dessertes pour les villes intermédiaires en situation *ex post*.

Nous sommes aujourd'hui 18 mois après la mise en service de la LGV SEA, les dessertes ferroviaires sont toujours un sujet d'actualité. Le changement d'horaires en décembre 2018 sur les liaisons concernées par la LGV SEA a suscité des mécontentements dans les villes intermédiaires. Même si le nombre de train reste le même, les voyageurs subissent une qualité de service dégradée. Nous sommes confrontés à la question suivante : avec le même nombre du train proposé, lorsque les horaires changent, de quelle manière pouvons-nous évaluer la qualité des dessertes ?

Ce qui s'est passé pour la LGV SEA n'est pas un cas isolé. Lorsqu'il y a une nouvelle offre de transport ou un changement des dessertes, la qualité des dessertes devient un sujet central. Les différents acteurs ont tous conscience de l'importance de la qualité des dessertes sur la compétitivité des modes de transport. Face à la concurrence du TAGV, les compagnies aériennes préfèrent maintenir le niveau de fréquence et proposer des appareils de plus petite taille que la diminution du nombre de vols. Les études de suivi ont montré que la mise en service d'une nouvelle LGV est plutôt corrélée au nombre de sièges offerts, qu'à la fréquence de service.

Notre analyse de la concurrence intermodale est basée sur l'approche désagrégée qui consiste à expliquer l'évolution des parts de marché par la probabilité de choix pour chaque mode de transport. La littérature sur le choix modal nous montre les déterminants qui expliquent l'évolution de la probabilité de choix des différents modes de transport. La qualité des dessertes a été identifiée comme un facteur important pour expliquer le choix modal des voyageurs. Pourtant, la pertinence des indicateurs utilisés pour estimer les effets de la qualité des dessertes est problématique.

Les indicateurs standard dans l'étude de la qualité de desserte sont basés uniquement sur la fréquence de service. La littérature nous a montré que l'utilisation de ces indicateurs standard génère des biais d'estimation dans les études du choix modal. Ces indicateurs s'inscrivent dans l'approche basée uniquement sur l'offre de transport et ne sont pas suffisamment pertinents pour évaluer les effets liés à la qualité des dessertes. L'indicateur pertinent doit se baser sur le programme d'activités. Il doit aussi tenir compte des caractéristiques spatio-temporelles des opportunités à destination. Dans cette perspective, nous avons proposé deux méthodes dans le cadre de cette thèse : le temps utile à destination et le modèle combiné choix modal – choix d'horaires.

Le temps utile à destination est basé sur la théorie de l'accessibilité spatio-temporelle. Cet indicateur peut être utilisé comme un outil d'évaluation de la qualité des dessertes. En faisant des hypothèses sur le temps minimum nécessaire à destination, nous sommes capables de compter le nombre de combinaison d'allers – retours sur une journée. Nous pouvons comparer entre la situation avant et après la mise en service de la LGV, ce qui va nous montrer l'évolution de la qualité des dessertes. Parmi les différentes liaisons concernées par la LGV SEA, nous nous apercevons que la qualité des dessertes s'améliore fortement sur la liaison Paris – Bordeaux grâce aux effets de la vitesse. Néanmoins, les villes intermédiaires ne bénéficient pas des effets de la vitesse, le nombre de combinaisons pour les villes comme Poitiers et Angoulême, ne s'améliore pas et même parfois se dégrade après la mise en service de la LGV SEA.

L'indicateur de temps utile à destination peut aussi être intégré dans l'étude du choix modal comme une variable explicative. Il apporte des informations complémentaires aux indicateurs standard. Notre étude montre que la variable TAD est significative et positivement corrélée pour expliquer le choix modal. Lorsqu'un mode de transport permet aux voyageurs de rester plus longtemps à destination, la probabilité de choix de ce mode est plus élevée.

La limite « intrinsèque » de cette méthode est reliée à l'absence dans l'analyse des caractéristiques des opportunités à destination. Nous faisons l'hypothèse que les voyageurs cherchent à rester le plus longtemps possible à destination. Tout comme l'hypothèse de rationalité, cette hypothèse de maximisation de TAD est une hypothèse assez forte. Par ailleurs, le cadre conceptuel fait que celle-ci n'est pas applicable dans le cas des déplacements avec des longs séjours à destination.

Malgré ces limites, les indicateurs de temps utile à destination sont utiles, pertinents et faciles à appliquer pour apporter plus de compréhension aux questions liées aux effets de la qualité des dessertes. En particulier, nous n'avons besoin que des données liées aux horaires programmés et aux horaires choisis par les voyageurs pour pouvoir faire fonctionner cette méthode.

Plusieurs limites « extrinsèques » concernent notre étude de cas. Le manque de données concernant les autres modes de transport et le manque des données liées aux horaires choisis pour le trajet de retour sont une limite de notre analyse du choix modal sur la liaison de Paris – Bordeaux. Nous sommes contraints de faire des hypothèses pour bien préciser la particularité de notre étude et pour évoquer les conditions de validité de nos résultats.

Nous poursuivons notre problématique de recherche avec une analyse approfondie sur la question des caractéristiques des opportunités à destination. Nous avons choisi d'adopter la notion de coûts de délais de Vickrey (1969) et la structure du modèle de Cascetta et Papola (2003) dans notre étude de cas de la concurrence Air – Fer sur la liaison Paris – Bordeaux. Du point de vue conceptuel, cette méthode est plus pertinente avec un modèle qui explique à la fois le choix du mode de transport et le choix d'horaires. Les horaires programmés et les heures d'arrivée souhaitées ont contribué à la constitution de la structure du modèle avec les modes de transport et les arrivées en avance ou en retard comme des alternatives de choix.

Nos résultats montrent que le modèle combiné est pertinent et est meilleur pour l'analyse de la concurrence Air-Fer. Notamment, il est capable d'intégrer les horaires programmés des services de transport dans le modèle comme une information de type input. Nous montrons que sur la liaison Paris-Bordeaux, les parts de marché évoluent lorsqu'on prend en compte les nouveaux horaires de service. Les décisions concernant la qualité des dessertes peuvent générer des impacts importants sur l'évolution des parts de marché. C'est l'exemple d'Air France sur la liaison Paris Orly – Bordeaux, pour laquelle, ses parts de marché sont négativement impactés par les nouveaux horaires de service.



La limite majeure de cette méthode réside sur le manque des données dans les enquêtes « voyageurs » spécifiques. Les alternatives étudiées sont limitées à l'avion et au train, ce qui nous oblige à estimer un modèle sans contrainte. Le manque des données liées à la flexibilité des heures d'arrivée souhaitées nous fait aussi perdre des informations pour bien expliquer les décisions des voyageurs.

Les limites majeures de cette thèse provenant essentiellement de la qualité de notre base des données, malgré le fait de pouvoir bénéficier d'un Observatoire Socio-Economique qui s'occupe de la collecte des données. Le contexte d'une recherche en matière des données est difficile dans le secteur du transport ferroviaire. C'est aussi pour cette raison que nous souhaitons proposer deux méthodes qui peuvent être appliquées en fonction des données à disposition.

Nous considérons que les données liées aux horaires choisies des voyageurs pour le trajet d'aller et pour le trajet de retour sont des informations importantes que nous devons systématiquement intégrer dans les enquêtes « voyageurs ».

Pour progresser encore dans la recherche sur ce sujet, il est préférable d'avoir des informations concernant les heures d'arrivée souhaitées et la flexibilité des heures d'arrivée. Ces données pourraient être collectées à l'aide des enquêtes de préférences révélées ou de préférences déclarées.

Dans les études de prévision de la demande de transport interurbain, il est suggéré de ne pas se contenter d'utiliser les indicateurs standard de la fréquence de service. Les méthodes proposées dans cette thèse pourront être appliquées afin d'améliorer la qualité des résultats de la modélisation.

Dans la poursuite de ce sujet de thèse, il serait souhaitable d'adopter ces méthodes en les appliquant à un choix multinomial. Le fait d'ajouter des modes de transport qui ne sont pas sous contraintes d'horaires permet de mieux estimer les effets d'un changement d'horaires sur les parts de marché.

Nous pouvons aussi réfléchir à la possibilité d'appliquer ces méthodes dans des périmètres d'étude plus larges et à caler les modèles avec les données *ex post*.

# Bibliographie :

Abkowitz, M. D. The impact of service reliability on work travel behavior. *Massachusetts Institute of Technology*. 1980. pp. 63-95.

Adams, H. C. Relation of the State to Industrial Action. *Publications of the American Economic Association*, 1887. 1-6: 7-85.

Allais, M. Les Théories de l'équilibre économique général et de l'efficacité maximale. *Revue d'économie politique*, 1971. Mai. pp. 331-409.

Albalade, D., et G. Bel. High-Speed Rail: Lessons for Policy Makers from Experiences Abroad. *Public Administration Review*, 2012. 72-3: 336-49.

Albalade, D., G. Bel, et X. Fageda. Competition and Cooperation between High-Speed Rail and Air Transportation Services in Europe. *Journal of Transport Geography*, 2015. 42:166-174.

Álvarez-SanJaime, Ó., P. Sánchez, R. Colonques, et J. Sempere-Monerris. A model of internal and external competition in a High Speed Rail line. *Economics of Transportation*, 2015. 4: 178-187.

Arbués, P., J. F. Baños, M. Mayor, et P. Suárez. Determinants of ground transport modal choice in long-distance trips in Spain. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, Practical Applications of Novel Methodologies to Real Cases: Selected Papers from the XIII Pan-American Conference on Traffic and Transportation Engineering*, 2016. 84: 131-43.

Arrow, K. J., et G. Debreu. Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy. *Econometrica*, 1954. 22-3: 265-90.

Arnott, R., A. De Palma, et R. Lindsey. Economics of a Bottleneck. *Journal of Urban Economics*, 1990. 27 :111-130.

Augustin, K., R. Gerike, M. J. Martinez Sanchez, et C. Ayala. Analysis of intercity bus markets on long distances in an established and a young market: The example of the U.S. and Germany. *Research in Transportation Economics*, 2014. 48: 245-254.

Baptiste, H. Évaluer la qualité d'un service de transport collectif interurbain. Sixièmes rencontres de théo quant–nouvelles approches en géographie théorique et quantitative. *Tours : École Polytechnique de l'Université de Tours*. 2003. pp. 5-9.

Baumol, W. J., J. C. Panzar, et R. D. Willig. Contestable Markets: An Uprising in the Theory of Industry Structure: Reply. *The American Economic Review*, 1983. 73-3: 491-96.

Baumstark, L., et A. Bonnafous. Calcul économique et politique de transport : de Jules Dupuit à Maurice Allais. [Post-Print halshs-00958373](#), HAL, 2010. pp. 10-25.

Becker, G. S. A Theory of the Allocation of Time. *The Economic Journal*, 1965. 75-299: 493-517.

Beesley, M. E. The Value of Time Spent in Travelling: Some New Evidence. *Economica*, 1965. 32-126: 174-185.

Behrens, C., et E. Pels. Intermodal Competition in the London-Paris Passenger Market: High-Speed Rail and Air Transport. *Journal of Urban Economics*, 2012. 71:178-188.

Ben-Akiva, M., et M. Abou-Zeid. Methodological Issues in Modelling Time-of-Travel Preferences. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2013. 9: 846–859.

Ben-Akiva, M., et M. Bierlaire. Discrete Choice Methods and Their Applications to Short-Term Travel Decisions. In *Handbook of Transportation Science* (R. W. Hall. ed.), Cambridge, Mass: Kluwer, 1999. pp. 5-34.

Ben-Akiva, M., et J. L. Bowman. Activity-based Disaggregate Travel Demand Model System with Activity Schedules. *Transportation Research A*, 2001. 35-1: 1-28.

Ben-Akiva, M., et S. R. Lerman. Discrete Choice Analysis. Theory and Application to Travel Demand. In *MIT Press Series in Transportation Studies*, Cambridge, Mass: M.I.T. Press, 1985. pp. 12-35.

Bertrand, J. Review of “Theorie mathématique de la richesse sociale” and “Recherche sur les principes mathématiques de la théorie des richesses”. *Journal des Savants*, 1883. pp. 499-508.

Bhat, C. R. A Heteroscedastic Extreme Value Model of Intercity Mode Choice. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1995. 29-6: 471-483.

Bhat, C. R. An Analysis of Travel Mode and Departure Time Choice for Urban Shopping Trips. *Transportation Research Part B*, 1998. 32: 361-371.

Bhat, C. R., et F. S. Koppelman, Activity-Based Modeling of Travel Demand. *In Handbook of Transportation Science (R. W. Hall. ed.)*, Boston: Kluwer, 2003. pp. 35-61.

Bhat, C. R., et J. L. Steed. A Continuous-Time Model of Departure Time Choice for Urban Shopping Trips. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2002. 36-3: 207-224.

Bhat, C. R., et R. Sardesai. The impact of stop-making and travel time reliability on commute mode choice. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006. 40-9: 709-30.

Bierlaire, M. A Theoretical Analysis of the Cross-Nested Logit Model. *Annals of Operations Research Part B*, 2006. 144-1: 287-300.

Blayac, T., et A. Causse. Value of travel time: a theoretical legitimization of some nonlinear representative utility in discrete choice models. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2001. 35-4: 391-400.

Boiteux, M. Transports : choix des investissements et coût des nuisances, *Commissariat Général du Plan*, 2001. pp. 35-49.

Bonnafous, A., M. H. Chen, P. Joho, et E. Manceau-Antoniuzzi. LGV Tours-Bordeaux : Temps disponible à destination et effet vitesse. *Transports (ISSN 0564-1373), N° spécial Vitesse*, 2016. pp. 43-50.

Bowman, J. L, et M. E. Ben-Akiva. Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2001. 35-1: 1-28.

Bresson, G., J. Dargay, J-L. Madre, et A. Pirotte. The main determinants of the demand for public transport: a comparative analysis of England and France using shrinkage estimators. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2003. 37-7: 605-27.

Brisbois, X. Le processus de décision dans le choix modal : importance des déterminants individuels, symboliques et cognitifs. *Phdthesis, Université Pierre Mendès-France - Grenoble II*. 2010. pp. 145-179.

Brown, B. B., C. M. Werner, et N. Kim. Personal and Contextual Factors Supporting the Switch to Transit Use: Evaluating a Natural Transit Intervention. *Analyses of Social Issues and Public Policy*, 2003. 3-1: 139-60.

Burns, L. D. Transportation, Temporal and Spatial Components of Accessibility. *Lexington, Mass.: Lexington Books*. 1979.

Camagni, R., M. C. Gibelli, et P. Rigamonti. Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics*, 2002. 40-2: 199-216.

Cascetta, E., et A. Papola. A Joint Mode-Transit Service Choice Model Incorporating the Effect of Regional Transport Service Timetables. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2003. 37-7: 595-614.

Cascetta, E., et P. Coppola. An Elastic Demand Schedule-Based Multimodal Assignment Model for the Simulation of High Speed Rail (HSR) Systems. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2012. 1: 3-27.

Cascetta, E., et P. Coppola. Assessment of Schedule-Based and Frequency-Based Assignment Models for Strategic and Operational Planning of High-Speed Rail Services. *Transportation Research Part A*, 2016. 84 :93-108.

Cayla, D. La théorie de la concurrence monopolistique: une perspective pour un approfondissement des théories de la firme, *alshs-00110494, HAL*, 2003. pp. 10-20.

CERTU. Le covoiturage en France et en Europe-Etat des lieux et perspectives. *Ministère de l'écologie du développement et de l'aménagement durables*. 2007. pp. 22-45.

Chadwick, E. Results of Different Principles of Legislation and Administration in Europe; of Competition for the Field, as Compared with Competition within the Field, of Service. *Journal of the Statistical Society of London*, 1859. 22-3: 360-381.

Chamberlin, E. The Theory of Monopolistic Competition. *First Trade Edition, Cambridge Harvard University Press*, 1933. 7: 177-204.

Chapelon, L. Évaluation des chaînes intermodales de transport : L'agrégation des mesures dans l'espace et dans le temps. *Proceedings of the International Conference Technological Innovation for Land Transportation (TILT)*, 2003. 2-4: 167-178.

Chen, M. H., et S. Souche Le Corvec. On the Usefulness of a Combined Mode Choice-Schedule Choice Model: Case of the Paris-Bordeaux Rail Line (France). *Transportation Research Record*, 2019. 2673-4: 697-707.

Chen, M. H., A. Bonnafous, et S. Souche Le Corvec. Time Available at Destination: Tool to Evaluate the Quality of Public Transport Service and a Determinant of Mode Choice. *Transportation Research Record*, 2019. 2673-4: 733-742.

Chen, Y. L., S. Ravulaparthi, K. Deutsch, P. Dalal, S. Y. Yoon, T. Lei, K. G. Goulias, R. M. Pendyala, C. R. Bhat, et H-H. Hu. Development of Indicators of Opportunity-Based Accessibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2011. 2255-1: 58-68.

Cirillo, C., et K. W. Axhausen. Evidence on the distribution of values of travel time savings from a six-week diary. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2006. 40-5: 444-57.

Cour des comptes. La grande vitesse ferroviaire : un modèle porté au-delà de sa pertinence. Rapport public thématique. Available at: [https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/20141023\\_rapport\\_grande\\_vitesse\\_ferroviaire.pdf](https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/EzPublish/20141023_rapport_grande_vitesse_ferroviaire.pdf). 2014.

Cournot, A. Recherches sur les principes mathématiques de la théorie des richesses. *Chez L. Hachette, Librairie de l'Université Royale de France*, 1838. pp. 88-101.

Dalvi, M. Q., et K. M. Martin. The Measurement of Accessibility: Some Preliminary Results. *Transportation*, 1976. 5-1: 17-42.

Daly, A., et M. Bierlaire. A General and Operational Representation of Generalised Extreme Value Models. *Transportation Research Part B*, 2006. 410: 285-305.

Davidson, W., R. Donnelly, P. Vovsha, J. Freedman, S. Ruegg, J. Hicks, J. Castiglione, et R. Picado. Synthesis of first practices and operational research approaches in activity-based travel

demand modeling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, Bridging Research and Practice: A Synthesis of Best Practices in Travel Demand Modeling*, 2007. 41-5: 464-88.

De Jong, G., A. Daly, M. Pieters, C. Vellay, M. Bradley, et F. Hofman. A Model for Time of Day and Mode Choice Using Error Components Logit. *Transportation Research Part E*, 2003. 39: 245-268.

Demsetz, H. Do Competition and Monopolistic Competition Differ. *Journal of Political Economy*, 1968. 76-1: 146-48.

Demsetz, H. Economic, Legal and Political Dimensions of Competition. *N.Y: Elsevier Science Ltd*, 1982. pp. 18-29.

De Serpa, A. C. Microeconomic theory and the valuation of travel time: Some clarification. *Regional and Urban Economics*, 1973. 2-4: 401-410.

Ding, C., S. Mishra, Y.Y. Lin, et B. L. Xie. Cross-Nested Joint Model of Travel Mode and Departure Time Choice for Urban Commuting Trips: Case Study in Maryland-Washington, DC Region. *Journal of Urban Planning and Development*, 2015. 141-4: 6-11.

Ding, N., et S. Bagchi-Sen. An Analysis of Commuting Distance and Job Accessibility for Residents in a U.S. Legacy City. *Annals of the American Association of Geographers*, 2019. pp. 1-23.

Dobruszkes, F., C. Dehon, et M. Givoni. Does European High-Speed Rail Affect the Current Level of Air Services? An EU-Wide Analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014. 69: 461-475.

Edgeworth, F-Y. Mathematical Psychics; an Essay on the Application of Mathematics to the Moral Sciences. *London C.K. Paul*, 1881. pp. 98-116.

Exel, N. J. A. V., et P. Rietveld. Perceptions of public transport travel time and their effect on choice-sets among car drivers. *Journal of Transport and Land Use*, 2010. 2-3/4: 75-86.

Fotheringham, A., et M. E. O'Kelly. Spatial Interaction Models: Formulations and Applications. *Springer*. 1989. pp. 105-153.

Fu, X. W., A. M. Zhang, et Z. Lei. Will China's airline industry survive the entry of high-speed rail? *Research in Transportation Economics, Transport Development in China*, 2012. 35-1: 13-25.

García-Ferrer, A., M. Bujosa, A. De-Juan, et P. Poncela. Demand Forecast and Elasticities Estimation of Public Transport. *Journal of Transport Economics and Policy*, 2006. 40-1: 45-67.

Garmendia, M., J. M. Ureña, et J. M. Coronado. Long-distance trips in a sparsely populated region: The impact of high-speed infrastructures. *Journal of Transport Geography*, 2011. 19-4: 537-551.

Geurs, K. T., A. De Montis, et A. Reggiani. Recent advances and applications in accessibility modelling. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015. 49: 82-85.

Geurs, K. T., et J. R. Ritsema Van Eck. Accessibility Measures: Review and Applications. Evaluation of Accessibility Impacts of Land-Use Transport Scenarios, and Related Social and Economic Impact. *Bilthoven: RVIM*. 2001.

Geurs, K. T., et B. Van Wee. Accessibility Evaluation of Land-Use and Transport Strategies: Review and Research Directions. *Journal of Transport Geography*, 2004. 12-2: 127-140.

Givoni, M., et F. Dobruszkes. A Review of Ex-Post Evidence for Mode Substitution and Induced Demand Following the Introduction of High-Speed Rail. *Transport Reviews*, 2013. 33: 720-742.

Gomez-Ibanez, J. A., et G. De Rus. Competition in the Railway Industry: An International Comparative Analysis. *Cheltenham, UK ; Northampton, MA: Edward Elgar Pub*, 2006. pp. 45-83.

González-Savignat, M. Competition in Air Transport: The Case of the High-Speed Train. *Journal of Transport Economics and Policy*, 2004. 38: 77-107.

Goodwin, P., J. Dargay, et M. Hanly. Elasticities of Road Traffic and Fuel Consumption with Respect to Price and Income: A Review. *Transport Reviews*, 2004. 24-3: 275-92.

Gronau, R. Value of Time. *In The New Palgrave Dictionary of Economics*, 2017. pp. 1-3.

Hägerstrand, T. What About People in Regional Science? *Papers in Regional Science*, 1970. 24-1: 7-24.



Hansen, W. G. How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of Planners*, 1959. 25-2: 73-76.

Hayek, F. K. The Meaning of Competition. *Text. Mises Institute*, 2010. <https://mises.org/library/meaning-competition>

Hess, S., et J. W. Polak. Exploring the Potential for Cross-Nesting Structures in Airport-Choice Analysis: A Case-Study of the Greater London Area. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2006. 42-2: 63-81.

Hensher, D. A. A Practical Approach to Identifying the Market Potential for High Speed Rail: A Case Study in the Sydney-Canberra Corridor. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1997. 31: 431–446.

Hensher, D. A. Assessing Systematic Sources of Variation in Public Transport Elasticities: Some Comparative Warnings. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2008. 42-7: 1031–1042.

Hensher, D. A., et J. M. Rose. Development of commuter and non-commuter mode choice models for the assessment of new public transport infrastructure projects: A case study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, Bridging Research and Practice: A Synthesis of Best Practices in Travel Demand Modeling*, 2007. 41-5: 428-43.

Ivaldi, M., et C. Vibes. Price Competition in the Intercity Passenger Transport Market: A Simulation Model. *Journal of Transport Economics and Policy*, 2008. 42-2: 225-54.

Janic, M. A Model of Competition between High Speed Rail and Air Transport. *Transportation Planning and Technology*, 1993. 17-1: 1-23.

Jara-Diaz, S. R., et C. A. Guevara. Behind the Subjective Value of Travel Time Savings: The Perception of Work Leisure and Travel from a Joint Mode Choice-Activity Model. *Journal of Transport Economics and Policy*, 2003. 37-1: 29-46.

Jevons, W. S. The Theory Of Political Economy. *Sentry Press, N. Y*, 1871. pp. 38-75.

Joho P. Suivi de l'évolution de l'offre de transport liée à l'arrivée de la LGV SEA Tours-Bordeaux. *Mémoire de Master « Transport, Espace, Réseaux »*, LAET, University of Lyon, 2013. pp. 90-96.

Jones, R. H., et Y. M. Zhang. Models for Continuous Stationary Space-Time Processes. *In Modelling Longitudinal and Spatially Correlated Data*, édité par Timothy G. Gregoire, David R. Brillinger, Peter J. Diggle, Estelle Russek-Cohen, William G. Warren, et Russell D. Wolfinger, 1997. pp. 289-98.

Kaufmann, V. Temps et pratiques modales. Le plus court est-il le mieux ? The rationality of perception and modal choice. Is quickest best? *Recherche Transports Sécurité*, 2002. 75: 131-43.

Kellerman, A. Daily Spatial Mobilities: Physical and Virtual. *Farnham: Ashgate Publishing Limited*. 2012.

Kim, H. M., et M. P. Kwan. Space-Time Accessibility Measures: A Geocomputational Algorithm with a Focus on the Feasible Opportunity Set and Possible Activity Duration. *Journal of Geographical Systems*, 2003. 5-1: 71-91.

Kim, S. Y., et G. F. Ulfarsson. Curbing Automobile Use for Sustainable Transportation: Analysis of Mode Choice on Short Home-Based Trips. *Transportation*, 2008. 35-6: 723-37.

Koenig, G. Théorie économique de l'accessibilité urbaine. *Revue économique*, 1974. 25-2: 275-97.

Koppelman, F. S., et C. Bhat. A Self Instructing Course in Mode Choice Modeling: Multinomial and Nested Logit Models. *U.S. Department of Transportation Federal Transit Administration*. 2016. pp. 26-58.

Kroes, E. Air-Rail Substitution in the Netherlands. *Hague Consulting Group*. 2000. pp. 15-33.

Kroes, E., et Savelberg, F. Substitution from Air to High-Speed Rail: The Case of Amsterdam Airport. *Transportation Research Record*, 2019 : 2673-5, 166–174.

Kryvobokov, M., J. B. Chesneau., A. Bonnafous., J. Delons. et V. Piron. Comparison of static and dynamic land use-transport interaction models: Pirandello and urbansim applications. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2013. 2344: 49-58.

Kuhnimhof, T., R. Buehler, M. Wirtz, et D. Kalinowska. Travel Trends among Young Adults in Germany: Increasing Multimodality and Declining Car Use for Men. *Journal of Transport Geography*, 2012. 24: 443-50.

Kwan, M-P. Interactive geovisualization of activity-travel patterns using three-dimensional geographical information systems: a methodological exploration with a large data set. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2000. 8-1/6: 185-203.

Kwan, M-P, et J. Weber. Scale and Accessibility: Implications for the Analysis of Land Use–Travel Interaction. *Applied Geography*, 2008. 28-2: 110-23.

Lesourne, J. Le calcul économique. *Dunod*. 1964. pp. 55-73.

L'Hostis, A. Analyse de l'évolution du potentiel de contact des villes avec l'ouverture de la ligne ferroviaire à grande vitesse Tours-Bordeaux. *Paris : Université Paris-Est LVMT*, 2013.

L'Hostis, A., et A. Conesa. Définir l'accessibilité intermodale. *Systèmes de Transport*, 2010. pp. 2-15.

L'Hostis, A, et C. Decoupinny. Scheduled accessibility in the multimodal transport network of the Nord-Pas-de-Calais region: measures of the transport service for the assessment of the spatial planning policy. *Communication to the Helsinki NECTAR conference*. 2001. pp. 1-24.

L'Hostis, A., et T. Leysens. Les méthodes de mesure et de représentation de l'accessibilité dans les méthodes d'évaluation des projets de transport interurbains et périurbains de voyageurs, [〈hal-00734212〉](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00734212). Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00734212/document>, 2011.

Limtanakool, N., M. Dijst, et T. Schwanen. The influence of socioeconomic characteristics, land use and travel time considerations on mode choice for medium- and longer-distance trips. *Journal of Transport Geography*, 2006a. 14-5: 327-41.

Limtanakool, N, M. Dijst, et T. Schwanen. On the Participation in Medium- and Long-Distance Travel: A Decomposition Analysis for the Uk and the Netherlands. *Tijdschrift Voor Economische En Sociale Geografie*, 2006b. 97-4: 389-404.

Litman, Todd. 2018. Evaluating Public Transit Benefits and Costs. Victoria Transport Policy Institute, 141.

Litman, T. Transit Price Elasticities and Cross-Elasticities. *Journal of Public Transportation*, 2004. 7-2: 37-58.

López-Pita, A., et F. R. Anton. The Effects of High-Speed Rail on the Reduction of Air Traffic Congestion. *Journal of Public Transportation*, 2003. 6-1: 37-52.

Mallett, W. J. Long-Distance travel by low-income households. *In Transportation Research Circular*. 2001. pp. 169-175.

Manski, C. F., et S. R. Lerman. The Estimation of Choice Probabilities from Choice Based Samples. *Econometrica*, 1977. 45-8: 1977-88.

Manski, C. F., et D. McFadden. Structural Analysis of Discrete Data with Econometric Applications. *The MIT Press*. 1981. pp. 105-127.

Martín, J. C., et G. Nombela. Microeconomic Impacts of Investments in High Speed Trains in Spain. *The Annals of Regional Science*, 2007. 41-3: 715-33. <https://doi.org/10.1007/s00168-007-0116-8>.

Mason, E. S. Price and Production Policies of Large-Scale Enterprise. *The American Economic Review*, 1939. 29-1: 61-74.

Massot, M-H., et J-P. Orfeuil. La mobilité au quotidien, entre choix individuel et production sociale. *Cahiers internationaux de sociologie*, 2005. 118-1: 81-100.

Mattsson, L-G., J. W. Weibull, et P. O. Lindberg. Extreme Values, Invariance and Choice Probabilities. *Transportation Research Part B*, 2014. 59: 81-95.

Mercier, A. Accessibilité et évaluation des politiques de transport en milieu urbain : le cas du Tramway Strasbourgeois. *Université de Lyon*, 2008. pp. 55-73.

McFadden, D. Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior. *In Frontiers in Econometrics*, (P. Zarembka, ed.), New York: Wiley. 1973. pp. 105-122.

McFadden, D. Econometric Models of Probabilistic Choice. *In Structural Analysis of Discrete Data with Econometric Applications* (McFadden, D., and C. F. Manski, ed.), Cambridge, Mass.: MIT Press. 1981. pp. 198-272.

Mill, J. S. Principes d'économie politique. *Léon Roquet*. 1894. pp. 108-180.

Miller, E. J., J. Vaughan, D. King, et M. Austin. Implementation of a 'Next Generation' Activity-Based Travel Demand Model: The Toronto Case. *Paper presented at the Travel Demand Modelling and Traffic Simulation Session of the 2015 Conference of the Transportation Association of Canada*, Charlottetown, PEI, Canada. 2015. pp. 3-15.

Miller, H. J. Measuring Space-Time Accessibility Benefits within Transportation Networks: Basic Theory and Computational Procedures. *Geographical Analysis*, 1999. 31-1: 1-26.

Miller, H. J. Activities in space and time. *In Handbook of Transportation Research 5: Transport Geography and Spatial Systems*, Pergamon/Elsevier Science, 2004. pp. 647–660.

Miller, H. J. Necessary Space-Time Conditions for Human Interaction. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2005. 32-3: 381-401.

Moeckel, R., F. Rhett, et D. Rick. Mode choice modeling for long-distance travel. *Transportation Letters*, 2014. 7-1: 35-46.

Morris, J. M., P. L. Dumble, et M. R. Wigan. Accessibility indicators for transport planning. *Transportation Research Part A: General*, 1979-13(2): 91-109.

Mougeot, M., et F. Naegelen. La concurrence pour le marché. *Revue d'économie politique*, 2005. 115-6: 739-78.

Munizaga, M., S. R. Jara-Diaz, P. Greeven, et C. Bhat. Econometric Calibration of the Joint Time Assignment-Mode Choice Model. *Transportation science*, 2008. 42-2: 208-219.

Nash, C. Competition and Regulation in Rail Transport. *A Handbook of Transport Economics, chapter 33*. Edward Elgar Publishing. 2011. pp. 115-132.

Nickell, S. J. Competition and Corporate Performance. *Journal of Political Economy*, 1996. 104-4: 724-46.

Nuzzolo, A., U. Crisalli, A. Comi, et F. Sciangula. A Schedule-Based Mode–Service Choice Model for the Assessment of the Competition between Air Transport and High–Speed Services. *Proceedings of 11th World Conference on Transport Research, Berkeley, CA, June, 2007*. pp. 24-28.

Nurul-Habib, K. M., N. Day, et E. J. Miller. An Investigation of Commuting Trip Timing and Mode Choice in the Greater Toronto Area: Application of a Joint Discrete-Continuous Model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2009. 43-7: 639–653.

O’Fallon, C., C. Sullivan, et D. A. Hensher. Constraints affecting mode choices by morning car commuters. *Transport Policy*, 2004. 11-1: 17-29.

Ollivro, J. Essor de la rapidité différenciée et recomposition des territoires. *L’information géographique*, 2000. 64-4: 329-46.

Ortúzar, J. D-D., et L. G. Willumsen. Modelling Transport. *Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons*. 2011. pp. 2-15.

Pagliara, F., J. M. Vassallo, et C. Román. High-Speed Rail versus Air Transportation. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2012. 2289: 10–17.

Pareto, V. Manual of Political Economy. *Tr. by Ann S. Schwier. Macmillan, London*. 1927. pp. 335-351.

Park, Y. H., et H-K. Ha. Analysis of the impact of high-speed railroad service on air transport demand. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Selected papers from the 8th ATRS Conference*, 2006. 42-2: 95-104.

Patterson, J., et A. Perl. The TGV effect : a potential opportunity for reconciling sustainability with aviation. *World Transport Policy & Practice*, 1999. 5-1: 39-46.

Petit, J. Cinq logiques de mobilité et leurs conséquences sur la planification des déplacements urbains. *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, 2003. 43: 35-58.

Pinjari, A. R., C. R. Bhat. Activity-based travel demand analysis. *A Handbook of Transport Economics*, 2011. 10: 213–248.

Polak, J. W., et P. M. Jones. A Tour-Based Model of Journey Scheduling under Road Pricing. *Paper Presented at the 73rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.*, 1994.

Ponti, M. Competition, Regulation and Public Service Obligations. *A Handbook of Transport Economics, Chapter 28*, Edward Elgar Publishing. 2011. pp. 98-105.

Porter, M. E. *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors. New edition edition. Free Press. 2004. pp. 43-62.*

Porter, M. E. The Five Competitive Forces That Shape Strategy. *Special Issue on HBS Centennial. Harvard Business Review, 2008. 86-1: 78–93.*

Preston, J, G. Whelan, et M. Wardman. An analysis of the potential for on-track competition in the British passenger rail industry. *Journal of transport economics and policy, 1999: 33-01: 77–94.*

Quinet, E. *Principes d'économie des transports. Paris: Economica. 1998. pp. 73-85.*

Quinet, E., et R. W. Vickerman. *Principles Of Transport Economics. New edition. Cheltenham ; Northampton, MA: Edward Elgar Publishing Ltd. 2005. pp. 78-93.*

Raux, C., A. Mercier, et N. Ovtracht. La pertinence des mesures d'accessibilité gravitaire aux aménités urbaines. *SAGEO, 2007. pp. 1-19.*

Reggiani, A., P. Bucci, et G. Russo. Accessibility and Impedance Forms: Empirical Applications to the German Commuting Network. *International Regional Science Review, 2011. 34-2: 230-52.*

Ricardo, D. *On the Principles of Political Economy, and Taxation. J. Murray. 1817. pp. 63-75.*

Richer, C., et P. Palmier. Mesurer l'accessibilité territoriale par les transports collectifs. Proposition méthodologique appliquée aux pôles d'excellence de Lille Métropole. *11ème colloque du groupe de travail "Mobilités Spatiales et Fluidité Sociale" de l'AISLF, halshs-00639264, HAL. 2012. pp. 5-26.*

R. Faulhaber, G. Cross-Subsidization: Pricing in Public Enterprises. *American Economic Review, 1975. 65: 966-77.*

Román, C., R. Espino, et J. C. Martín. Analyzing Competition between the High-Speed Train and Alternative Modes. The Case of the Madrid-Zaragoza-Barcelona Corridor. *Journal of Choice Modelling, 2010. 3: 84-108.*

Robinson, J. *The Economics of Imperfect Competition. London: Macmillan and Co., Ltd. 1933. pp. 93-108.*

Roth, G. J., et Y. Zahavi. Travel time “budgets” in developing countries. *Transportation Research Part A: General*, 1981. 15-1: 87-95.

Samuelson, P. A. A Note on the Pure Theory of Consumer’s Behaviour. *Economica*, 1938. 5-17: 50-61.

Schafer, A., et D. G. Victor. The future mobility of the world population. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2000. 34-3: 171-205.

Scheiner, J. Interrelations between travel mode choice and trip distance: trends in Germany 1976–2002. *Journal of Transport Geography*, 2010. 18-1: 75-84.

Scheiner, J., et C. Holz-Rau. Travel Mode Choice: Affected by Objective or Subjective Determinants? *Transportation*, 2007. 34-4: 487-511.

Scherer, F. M., et D. R. Ross. Industrial Market Structure and Economic Performance. *Houghton Mifflin Company*. 1990. pp. 60-75.

Schumpeter, J. A. The Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle. *Harvard Economic Studies*. 1934. pp. 65-73.

Sen, A. Development as capability expansion, *in. University of Oxford*, 1990. pp. 1-11.

Sharkey, William W. 1982. The Theory of Natural Monopoly. Cambridge University Press.

Souche Le Corvec, S., A. Mercier, et N. Ovtracht. The Impacts of Urban Pricing on Social and Spatial Inequalities: The Case Study of Lyon (France). *Urban Studies*, 2016. 53-2: 373-99.

Southern California Association of Governments. *Year 2000 Post Census Regional Travel Survey: Final Report of Survey Results*, Austin, 2003.

Small, K. A. The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips. *The American Economic Review*, 1982. 72-3: 467–479.

Small, K. A. Valuation of Travel-Time Savings and Predictability in Congested Conditions for Highway User-Cost Estimation. *Transportation Research Board*. 1999. pp. 1-15.

Small, K. A. A Discrete Choice Model for Ordered Alternatives. *Econometrica*, 1987. 55-2: 409-424.



Smith, A. An Inquiry Into the Nature and Causes of the Wealth of Nations. *Strahan*. 1776. pp. 45-63.

Smith, A., C. Nash, et P. Wheat. Passenger rail franchising in Britain: has it been a success? *International Journal of Transport Economics*, 2009. 36-1: 33-62.

Stackelberg, H. V. The theory of the market economy. *Oxford University Press*. 1952. pp. 113-145.

Stackelberg, H. V., D. Bazin, L. Urch, et R. Hill. Market Structure and Equilibrium. *Heidelberg: Springer*. 2011. pp. 11-26.

Steer Davies Gleave. High speed rail: international comparisons. London. 2004. pp. 15-35.

Steg, L., C. Vlek, et G. Slotegraaf. Instrumental-reasoned and symbolic-affective motives for using a motor car. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2001. 4-3: 151-69.

Stigler, G. J. Competition. In *The New Palgrave Dictionary of Economics*, édité par *Palgrave Macmillan*, 2008. pp. 1-9.

Stigler, G. J. The Theory of Price. *Macmillan*. 1987. pp. 147-190.

Tisdell, C. A. 2013. Competition, Diversity and Economic Performance. Edward Elgar Publishing.

Tversky, A. Intransitivity of Preferences. *Psychological Review*, 1969. 76-1: 31-48.

Wardman, M. Inter-Urban Rail Demand, Elasticities and Competition in Great Britain: Evidence from Direct Demand Models. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 1997. 33: 15-28.

Wardman, M., A. Bristow, J. Toner, et G. Tweddle. Review of Research Relevant to Rail Competition for Short Haul Air Routes. *Transport Policy* 2, 2002. 3: 153-158.

Wen, C., et F. S. Koppelman. The Generalized Nested Logit Model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2001. 35: 627-641.

White, P. Competition in Public Transport in Great Britain. *European Transport \ Trasporti Europei*, 2006. 33: 2-14.

Wilken, D. Areas and limits of competition between high speed Rail and Air. *Paper presented at the Think-Up Project Workshop*, 2000. pp. 2-15.

Wilson, N. H. M., et A. Nuzzolo. Schedule-Based Modeling of Transportation Networks: Theory and applications. *New York: Springer*. 2009. pp. 20-55.

Van Acker, V., B. Van Wee, et F. Witlox. When Transport Geography Meets Social Psychology: Toward a Conceptual Model of Travel Behaviour. *Transport Reviews*, 2010. 30-2: 219-40

Van de Velde, D. Long-distance coach services in Europe. *In Regulating Transport in Europe*, Edward Elgar Publishing, 2013. pp. 115-139

Van de Velde, D., C. Nash, A. Smith, F. Mizutani, M. Lijesen, et F. Zschoche. EVES-Rail Economic effects of Vertical Separation in the railway sector. *Rapport technique. Community of European Railway and Infrastructure Companies*. 2012. pp. 22-45.

Van de Walle, S., et T. Steenberghen. Space and time related determinants of public transport use in trip chains. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2006. 40-2: 151-62.

Vickerman, R. High-Speed Rail in Europe: Experience and Issues for Future Development. *The Annals of Regional Science*, 1997. 31-1: 21-38.

Vickers, J. Concepts of Competition. *Oxford Economic Papers*, 1995. 47-1: 1-23.

Vickrey, W. S. Congestion Theory and Transport Investment. *The American Economic Review*, 1969. 59-2: 251-260.

Vovsha, P., et M. Bradley. A Hybrid Discrete Choice Departure Time and Duration Model for Scheduling Travel Tours. *Paper presented at the 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C. 2004. pp. 11-19.

Wang, Y., A. Monzon, et F. Di-Ciommo. Assessing the Accessibility Impact of Transport Policy by a Land-Use and Transport Interaction Model – The Case of Madrid. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015. 49: 126-35.

Wardman, M. Interactions between Rail and Car in the Inter-Urban Leisure Travel Market in Great Britain. *Journal of Transport Economics and Policy*, *Journal of transport economics and policy*, 1997. 31-2: 163-181.

Wardman, M. Public transport values of time. *Working Paper. University of Leeds UK: Institute of Transport Studies*. 2001. pp. 67-99.

Wee, B. V. Accessible accessibility research challenges. *Journal of Transport Geography*, 2016. 51: 9-16.

Wilson, N. H. M., et A. Nuzzolo. Schedule-Based Modeling of Transportation Networks: Theory and Applications. *Springer Science & Business Media*. 2008. pp. 15-33.

Yang, C. W., et C. C. Chang. Applying price and time differentiation to modeling cabin choice in high-speed rail. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2011. 47-1: 73-84.

Ye, X., R. M. Pendyala, et G. Gottardi. An exploration of the relationship between mode choice and complexity of trip chaining patterns. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2007. 41-1: 96-113.

Zahavi, Y. The TT-relationship: A unified approach to transportation planning. *Traffic Engineering and Control*, 1973. pp. 205-512.

Zevounou, L. Le concept de concurrence en droit. Paris Ouest Nanterre la Défense. 2010. pp. 73-95.

Zhang, F. N, D. J. Graham, et M. S. C. Wong. Quantifying the substitutability and complementarity between high-speed rail and air transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018. 118: 191-215.

Zondag, B., M. De-Bok, K. T. Geurs, et E. Molenwijk. Accessibility modeling and evaluation: The TIGRIS XL land-use and transport interaction model for the Netherlands. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2015. 49: 115-25.

# Annexe :

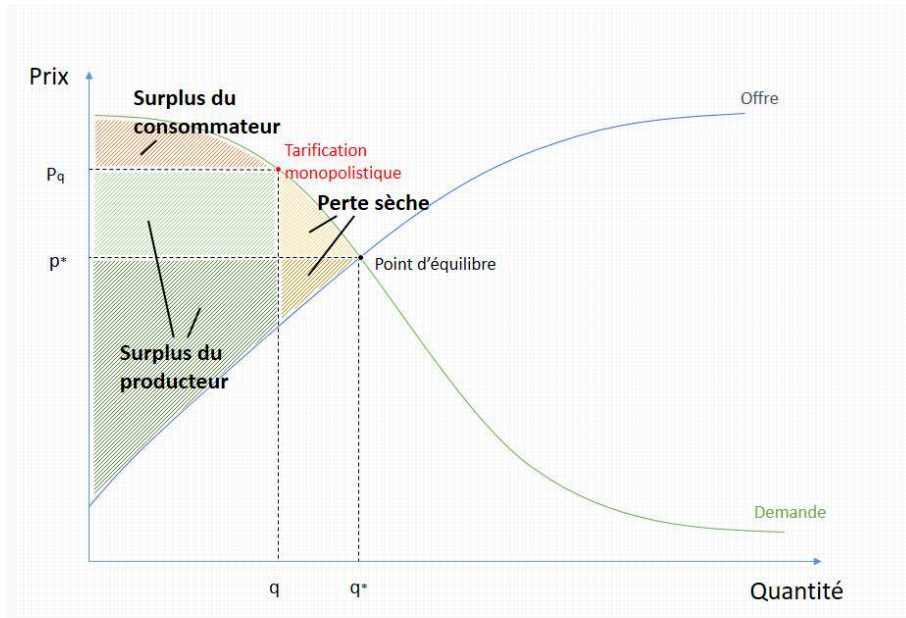


Figure 45 : Tarification monopolistique et la perte sèche (réalisé : auteur, 2019)

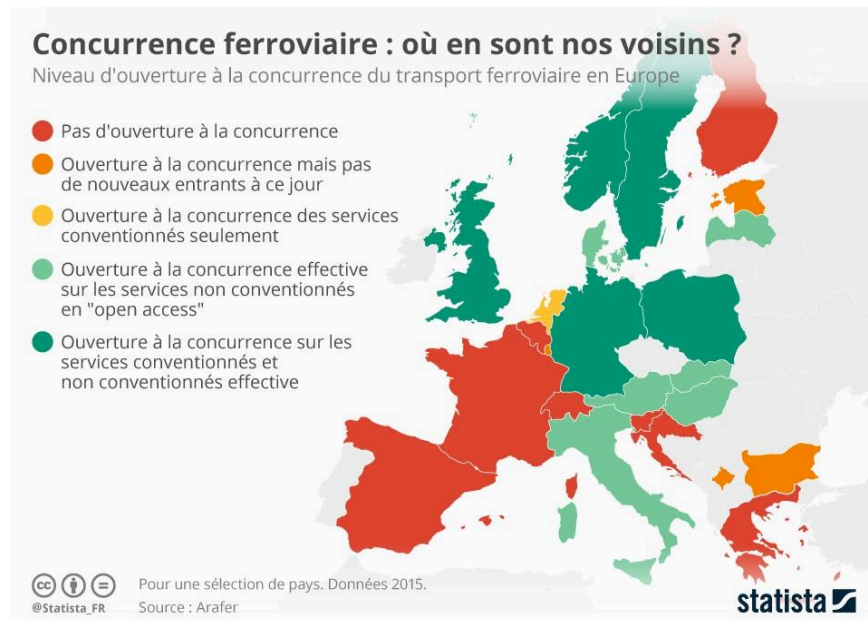


Figure 46 : Panorama de l'ouverture à la concurrence en Europe (Données ARAFER 2015, Réalisé par STATISTA)

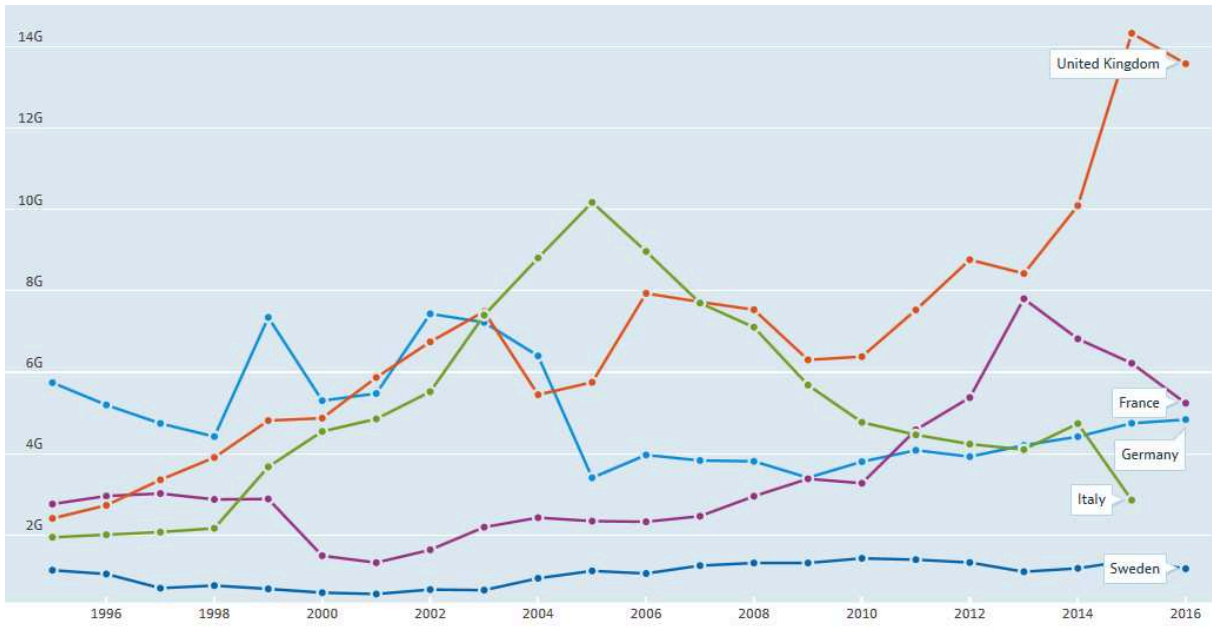


Figure 47 : Investissement en infrastructure ferroviaire : la construction des nouvelles infrastructures et le renouvellement des réseaux existants (milliards d'euros)

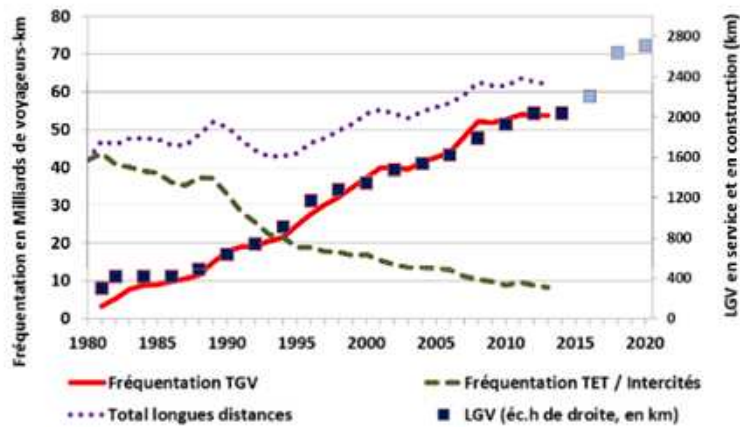


Figure 48 : Evolution de la fréquentation TGV et TET en voyageurs.km depuis 1980 - Notes : les carrés grisés correspondent aux LGV SEA et LGV BPL (Cours des comptes, 2014, SOeS et les bulletins mensuels des transports)

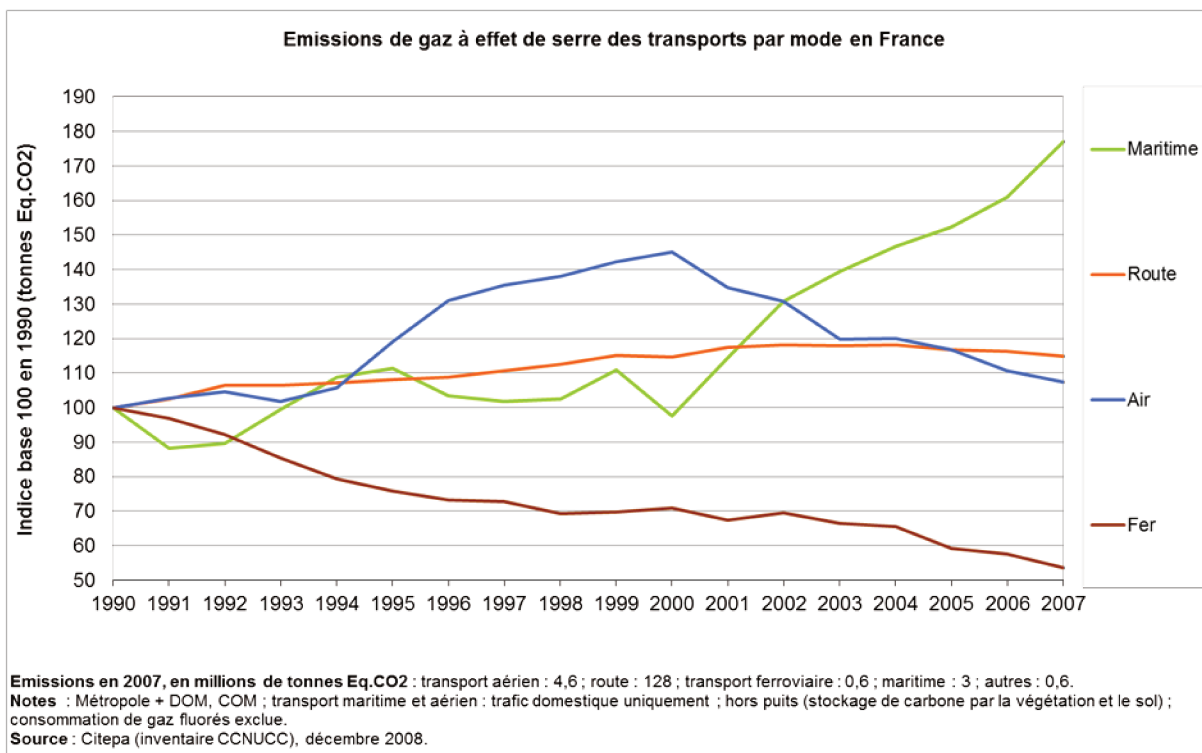


Figure 49 : Evolution des émissions de GES des différents modes de transport en France depuis 1990

Tableau 22 : les principaux jalons du projet de LGV SEA (Source : Bilan LOTI intermédiaire LGV SEA)

Date	Faits marquants
<b>Septembre 1990</b>	Mise en service de la branche sud-ouest de la LGV Atlantique et le début de la concertation du projet de LGV SEA
<b>1er Avril 1992</b>	Schéma directeur des LGV de Tours à Bordeaux
<b>1994-1995</b>	Débat public sur le projet de LGV Tours-Bordeaux
<b>1997-1998</b>	Etudes préliminaires sur la section Tours-Bordeaux
<b>2001-2003</b>	Etudes d'avant-projet sommaire (APS) de la section Angoulême-Bordeaux
<b>2004-2005</b>	Etudes d'APS de la section Tours-Angoulême
<b>Octobre 2005</b>	Décision du Comité interministériel d'aménagement et de développement du territoire (CIACT) de concéder la LGV Tours-Bordeaux
<b>Décembre 2005</b>	Dossier DUP de la section Angoulême-Bordeaux
<b>Juillet 2006</b>	DUP et urgente des travaux de construction de la section d'Angoulême (Villognon) à Bordeaux (Ambarès-et-Lagrave)

<b>Décembre 2007</b>	Dossier DUP de la section Tours-Angoulême
<b>Avril 2007</b>	Approbation de l'avant-projet de la section Tours-Angoulême par le ministère des transports
<b>Mars-Mai 2007</b>	Lancement de la procédure d'appel d'offres de la concession
<b>10 Juin 2009</b>	Déclaration d'Utilité Publique (DUP) et urgente des travaux de la section Tours (Saint-Avertin) - Angoulême (Villognon)
<b>30 Mars 2010</b>	Appel d'offres remporté par LISEA
<b>Juin 2011</b>	Contrat de concession signé entre SNCF Réseau et la société LISEA
<b>Début 2012</b>	Début des travaux
<b>2012-2014</b>	Travaux de terrassement et de génie civil
<b>2014-2016</b>	Travaux d'équipements ferroviaires
<b>Juillet 2016</b>	Fin des travaux de génie civil
<b>25 Juillet 2016</b>	Premiers essais de circulation d'une rame TGV à 160 km/h sur le tronçon entre Nouâtre (Sud de Tours) et Villognon (Angoulême)
<b>Août 2016</b>	Essais d'une rame TGV à 320 km/h entre Nouâtre et Villognon
<b>28 Février 2017</b>	Inauguration de la LGV SEA en présence du Président de la République
<b>2 Juillet 2017</b>	Mise en exploitation commerciale de la LGV SEA.

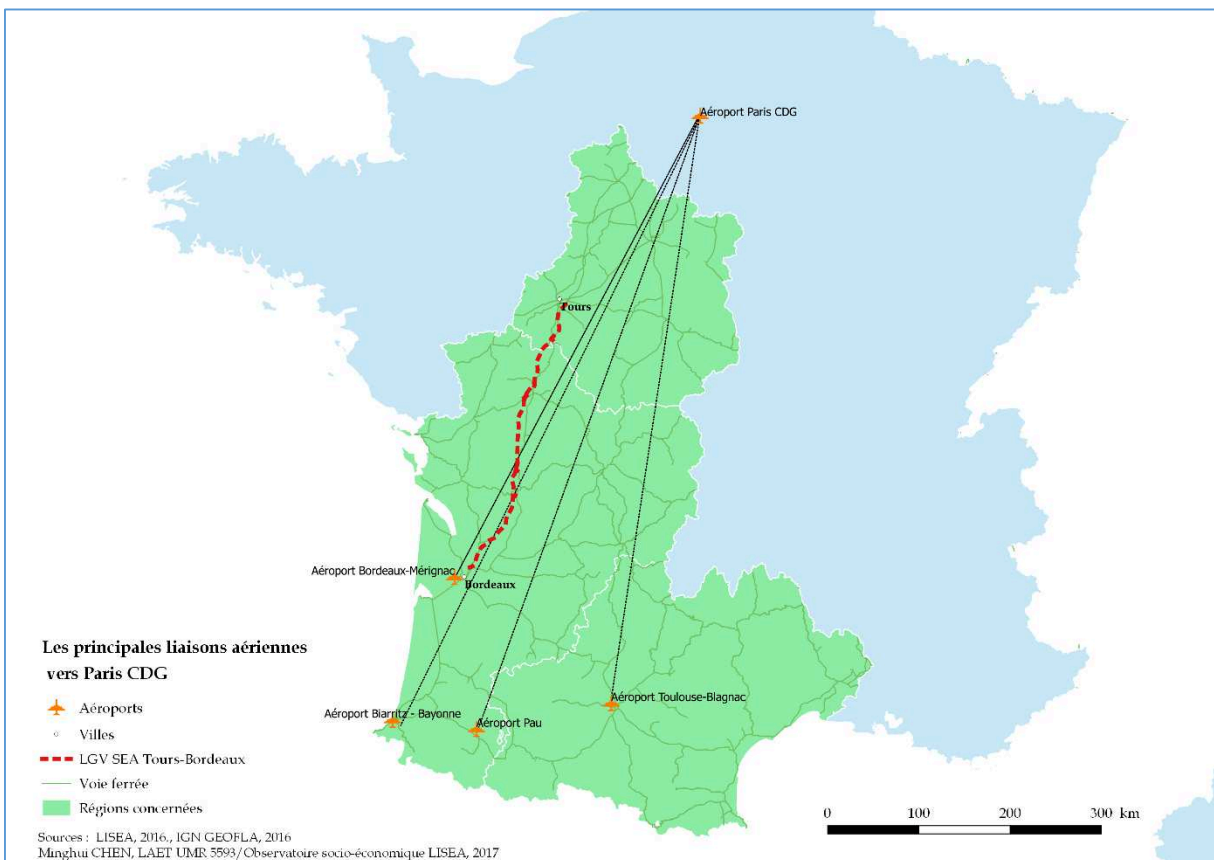


Figure 50 : liaisons aériennes vers Paris CDG

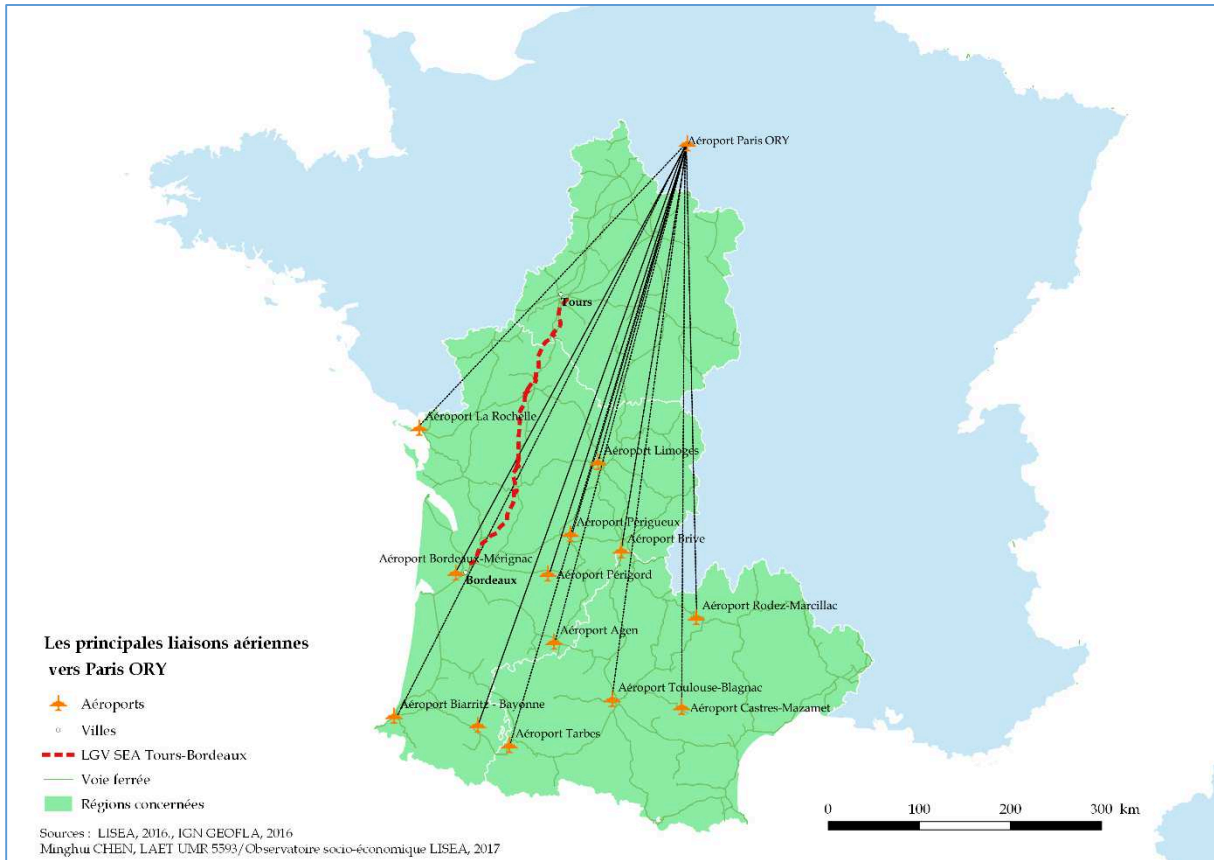


Figure 51 : liaisons aériennes vers Paris ORY



---

*Encadré 11 : Questionnaire*

---

Bonjour Madame, Monsieur,

Nous réalisons actuellement une enquête auprès des voyageurs qui empruntent la ligne Paris-Bordeaux. LISEA, concessionnaire de la Ligne ferroviaire à Grande Vitesse entre Tours et Bordeaux nous a confié la réalisation de cette enquête pour mieux connaître la mobilité des usagers actuels du train, et de l'avion.

Auriez-vous s'il vous plaît 3-4 minutes pour répondre à quelques questions (sur vos pratiques et habitudes de déplacement...)?

**AF0a – Site et lieu d'enquête :**

1. Gare de Bordeaux Saint-Jean – PARVIS ➔ **Détermine toutes les questions du tronc commun ou posées exclusivement au Ferroviaire**
2. Aéroport de Bordeaux Mérignac – HALL DES DEPARTS ➔ **Détermine toutes les questions du tronc commun ou posées exclusivement à l'Aérien**
3. Aéroport de Bordeaux Mérignac – HALL DES ARRIVEES ➔ **Détermine toutes les questions du tronc commun ou posées exclusivement à l'Aérien**
4. Aéroport de Bordeaux Mérignac – AUTRE LIEU (A PRECISER) ➔ **Détermine toutes les questions du tronc commun ou posées exclusivement à l'Aérien**

IE : NE PAS POSER - Sélectionner le lieu où vous enquêtez

**AF0b : Auriez-vous s'il vous plaît 4-5 minutes pour répondre à quelques questions (sur vos pratiques et habitudes de déplacement...)? ?**

1. Oui ➔ **Passer à F0c ou A0c selon la réponse à AF0a**
2. Non ➔ **Passer à AF0c**

**AF0c : Acceptez-vous que je prenne vos coordonnées pour que vous puissiez répondre en ligne d'ici le XX/XX/2017 ?**

3. Oui ➔ **Passer à F0c ou A0c selon la réponse à AF0a**
4. Non ➔ **STOP INTERVIEW ET REMERCIEMENT**

**F0c – Validation axe-cible : Allez-vous prendre un TGV vers Paris-Montparnasse (même si vous descendez avant Paris) ou descendez-vous d'un TGV qui vient de Paris-Montparnasse à l'origine (même si vous êtes monté après Paris) ?**

1. Partant TGV vers Paris-Montparnasse (même si le voyageur descend avant Paris ou s'il prend une correspondance après son arrivée à la gare Paris-Montparnasse)
2. Arrivant d'un TGV venant de Paris-Montparnasse (même si le voyageur est monté après Paris ou s'il a pris ce train en correspondance à la gare Paris-Montparnasse)
3. Autre ➔ **STOP INTERVIEW ET REMERCIEMENT**

**A0c – Validation axe-cible : Allez-vous prendre un vol vers Paris (CDG ou Orly) ou arrivez-vous d'un vol venant de Paris (CDG ou Orly) ?**

1. Partant d'un vol vers Paris – CDG
2. Partant d'un vol vers Paris – ORLY
3. Arrivant d'un vol venant de Paris – CDG
4. Arrivant d'un vol venant de Paris – ORLY
5. Autre ➡ **STOP INTERVIEW ET REMERCIEMENT**

Une seule réponse possible

**F1a – Gare de descente : A quelle gare allez-vous descendre de ce train entre Bordeaux et Paris-Montparnasse ?**

1. Libourne
2. Angoulême
3. Ruffec
4. Poitiers
5. Futuroscope
6. Châtelleraut
7. Saint-Pierre-des-Corps
8. Vendôme—Villiers-sur-Loir
9. Massy TGV
10. Paris-Montparnasse
11. Autre ➡ **STOP INTERVIEW ET REMERCIEMENT**

**Poser si F0c = 1 (Partant d'un train vers Paris)**

Si vous avez pris un TGV vers Paris-Montparnasse, répondez à la question F1a, à cette question

**F1b – Gare de montée : A quelle gare êtes-vous monté dans ce train entre Paris-Montparnasse et Bordeaux ?**

1. Paris-Montparnasse
2. Massy TGV
3. Vendôme—Villiers-sur-Loir
4. Saint-Pierre-des-Corps
5. Châtelleraut
6. Futuroscope
7. Poitiers
8. Ruffec
9. Angoulême
10. Libourne
11. Autre ➡ **STOP INTERVIEW ET REMERCIEMENT**

**Poser si F0c = 2 (Arrivant d'un train venant de Paris)**

Si vous êtes arrivé d'un TGV venant de Paris-Montparnasse, répondez à la question F1b, à cette question

**XX – Connaissez-vous quel est le prix de votre billet pour ce trajet ?**

1. Oui : (saisir combien)
2. Non

**XX- -suite – De quel abonnement ou quelle carte de réduction disposez-vous ?**

1. Carte Jeune
2. Carte Week-end
3. Carte Senior +
4. Carte enfant +
5. Abonnement Fréquence 25
6. Abonnement Fréquence 50
7. Abonnement Élèves, Étudiants et Apprentis
8. Forfait voyageurs quotidiens
9. Forfait mensuel
10. Forfait annuel
11. Optiforfait
12. Ne sait pas
13. Autre : précisez

**XX-suite – A quel tarif correspond votre billet ?**

1. Tarif Prem's
2. TGV max
3. Offre Duo
4. TGV Pop
5. Offre Aller-retour
6. Tarif loisir
7. Tarif pro
8. Billet prime
9. Billet IDTGV
10. Billet congé annuel
11. Tarif découverte
12. Abonnement (voir plus loin)
13. Ne sait pas
14. Autre (précisez)

**AF2a – Heure de départ : A quelle heure part votre train / vol [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire/aérien] ? Poser si F0c = 1 (Partant vers Paris) ou A0c = 1 ou 2**

**AF2b – Heure de départ : A quelle heure votre train / vol [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire/aérien] est-il parti ? Poser si F0c = 2 (Arrivant depuis Paris) ou A0c = 3 ou 4**

I \_ I \_ I h I \_ I \_ I min

Si vous avez vécu une situation perturbée (retard...), notez l'heure théorique de départ de votre train / vol

**AF3a – Heure d’arrivée : A quelle heure votre train / vol [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire/aérien] arrive-t-il à destination ? Poser si F0c = 1 (Partant vers Paris) ou A0c = 1 ou 2**

**AF3b – Heure d’arrivée : A quelle heure votre train / vol [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire/aérien] est-il arrivé à Bordeaux ? Poser si F0c = 2 (Arrivant depuis Paris) ou A0c = 3 ou 4**

I \_ I \_ I h I \_ I \_ I min

Si vous avez vécu une situation perturbée (retard...), notez l’heure théorique d’arrivée de votre train / vol

**AF3 suite – Heure d’arrivée à destination : A quelle heure souhaitez-vous arriver à votre destination finale ?**

I \_ I \_ I h I \_ I \_ I min

**AF3 suite – Flexibilité d’horaire : de quelle souplesse d’ajustement de votre horaire d’arrivée à destination disposez-vous ?**

1. Nulle (l’horaire m’est imposé)
2. Partielle (un ajustement léger est possible)
3. Totale (je peux ajuster mon horaire d’arrivée à mes contraintes de transport)

**AF4 – Motif : Quel est le motif principal du voyage que vous allez / venez d’effectuer [affichage conditionnel selon le type de déplacement : partant ou arrivant] ?**

1. Trajet de votre domicile à votre lieu de travail / lieu d’études (ALLER)
2. Trajet de votre lieu de travail / lieu d’études à votre domicile (RETOUR)
3. Trajet professionnel affaire ALLER (RDV, mission particulière, prospection...)
4. Trajet professionnel affaire RETOUR (RDV, mission particulière, prospection...)
5. Trajet tourisme d’affaire ALLER (colloque, séminaire de société, ...)
6. Trajet tourisme d’affaire RETOUR (colloque, séminaire de société...)
7. Trajet personnel hors vacances ALLER (visite famille/entourage...)
8. Trajet personnel hors vacances RETOUR (visite famille/entourage...)
9. Vacances ALLER
10. Vacances RETOUR
11. Autre ALLER ➡ Préciser : \_\_\_\_\_
12. Autre RETOUR ➡ Préciser : \_\_\_\_\_

Une seule réponse possible

**AF5a – Mode rabattement : Par quel moyen de transport principal êtes-vous arrivé à la gare Bordeaux St-Jean / l’aéroport de Bordeaux Mérignac [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire/aérien] ? Poser si F0c = 1 ou A0c = 1 ou 2 (Partant vers Paris)**

**AF5b – Mode rabattement : Par quel moyen de transport principal êtes-vous arrivé à la gare de / l'aéroport de [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire / aérien et la gare ou l'aéroport répondus en A0c ou F1b] ? Poser si F0c = 2 ou A0c = 3 ou 4 (Arrivant de Paris)**

1. Marche à pied
2. Bus, tramway, métro
3. Car
4. Voiture (en tant que conducteur)
5. Voiture de location
6. Déposé en voiture (hors taxi)
7. Taxi ou Voiture de Transport avec Chauffeur (Uber ou autre...)
8. Vélo
9. Deux-roues motorisé (moto, scooter,)
10. Train, en correspondance
11. Avion, en correspondance
12. Autre ➡ Préciser : \_\_\_\_\_

Une seule réponse possible

**AF6a – Origine : De quelle commune êtes-vous parti à l'origine (au tout début de votre voyage) ?**

1. Base des communes
2. Autre ➡ Préciser : \_\_\_\_\_

Notez en clair le pays, la commune et le code postal

**AF6b – Origine : Est-ce votre commune de résidence ?**

1. Oui
2. Non

**AF7a – Temps rabattement : En combien de temps êtes-vous arrivé à la gare Bordeaux St-Jean / l'aéroport de Bordeaux Mérignac [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire / aérien] depuis la commune d'où vous êtes parti à l'origine ? Poser si F0c = 1 ou A0c = 1 ou 2 (Partant vers Paris)**

**AF7b – Temps rabattement : En combien de temps êtes-vous arrivé à la gare de / l'aéroport de [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire / aérien et la gare ou l'aéroport répondus en A0c ou F1b] depuis la commune d'où vous êtes parti à l'origine ? Poser si F0c = 2 ou A0c = 3 ou 4 (Arrivant de Paris)**

I \_ I \_ I h I \_ I \_ I min

**AF8a – Mode diffusion : Par quel moyen de transport principal allez-vous quitter la gare de / l'aéroport de [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire / aérien et la gare ou l'aéroport répondus en A0c ou F1a] ? Poser si F0c = 1 ou A0c = 1 ou 2 (Partant vers Paris)**

**AF8b – Mode diffusion : Par quel moyen de transport principal allez-vous quitter la gare de Bordeaux St-Jean / l'aéroport de Bordeaux Mérignac [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire / aérien] ? Poser si F0c = 2 ou A0c = 3 ou 4 (Arrivant depuis Paris)**

1. Marche à pied
2. Bus, tramway, métro
3. Car
4. Voiture (en tant que conducteur)
5. Voiture de location
6. Déposé en voiture (hors taxi)
7. Taxi ou Voiture de Transport avec Chauffeur (Uber ou autre...)
8. Vélo
9. Deux-roues motorisé (moto, scooter,...)
10. Train, en correspondance
11. Avion, en correspondance
12. Autre ➡ Préciser : \_\_\_\_\_

Une seule réponse possible

**AF9a – Destination : Quelle votre commune de destination (à la toute fin de votre voyage) ?**

1. Base des communes
2. Autre ➡ Préciser : \_\_\_\_\_

Notez en clair le pays, la commune et le code postal

**AF9b – Destination : Est-ce votre commune de résidence ?**

1. Oui
2. Non

Poser si AF6b = 2

**AF10a – Temps diffusion : En combien de temps allez-vous arriver à votre commune de destination depuis la gare de / l'aéroport de [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire / aérien et la gare ou l'aéroport répondus en A0c ou F1a] ? Poser si F0c = 1 ou A0c = 1 ou 2 (Partant vers Paris)**

**AF10b – Temps diffusion : En combien de temps allez-vous arriver à votre commune de destination depuis la gare de Bordeaux St-Jean / l'aéroport de Bordeaux Mérignac [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire / aérien] ? Poser si F0c = 2 ou A0c = 3 ou 4 (Arrivant depuis Paris)**

I \_ I \_ I h I \_ I \_ I min

**AF11 – Fréquence déplacement : A quelle fréquence effectuez-vous ce déplacement [affichage conditionnel de l'origine-destination sur l'axe Paris-Bordeaux] ?**

**Précision sur l'affichage conditionnel :**

- Si AF0a = 1 et F0c = 1 => afficher « Bordeaux – [gare de descente en F1a] »
- Si AF0a = 1 et F0c = 2 => afficher « Paris – [gare de montée en F1b] »
- Si A0c = 1 ou 2 => afficher « Bordeaux - Paris ] »
- Si A0c = 3 ou 4 => afficher « Paris - Bordeaux ] »

1. Tous les jours ou presque
2. Au moins 1 fois par semaine
3. Au moins 1 fois par mois
4. Au moins 1 par trimestre
5. Moins souvent
6. C'est la première fois

Une seule réponse possible

Si 1 à 4 : question suivante

**XX – Avez-vous déjà réalisé le présent déplacement avec un autre mode de transport ?**

1. Avion
2. Train
3. Voiture
4. Autocar
5. Co-voiturage

Une seule réponse possible

Si 3 : question suivante

**XX – Quand vous prenez la voiture, c'est pour quelle raison ?**

1. Plusieurs personnes
2. Bagages
3. Besoin de voiture sur place
4. Combinaison de plusieurs cas précédents
5. Flexibilité / Contraintes d'horaires
6. Autres

Une seule réponse possible

Si 3 : question suivante

Arrivant d'un vol venant de Paris – ORLY ➡ Si AF0c = Oui Passer directement au bloc

**AF12 – Raison mode déplacement : Pour quelle(s) raison(s) choisissez-vous le train / l'avion [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire / aérien] pour effectuer ce déplacement ?**

**EN PREMIER / EN DEUXIEME / EN TROISIEME**

1. Moins cher
2. Plus rapide
3. Plus confortable
4. Moins fatiguant
5. Proximité gare ou aéroport
6. Horaire adapté
7. Pas d'autres modes à disposition
8. Autre ➔ Préciser : \_\_\_\_\_

**PROG : 3 réponses maximum**

**AF13a – Nombre de personnes : Dans ce train / vol, vous allez voyager / vous avez voyagé [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire / aérien et selon le type de voyageur Partant ou Arrivant] ?**

1. Seul
2. En famille ou avec des amis
3. Entre collègues ou avec des relations de travail

Une seule réponse possible

**AF13b – Nombre de personnes : Avec combien de personnes allez-vous voyager / avez-vous voyagé [affichage conditionnel selon le type de voyageur Partant ou Arrivant] ?**

I \_ I \_ I

**PROG : Poser si AF13a = 2 ou 3 (voyage à plusieurs)**

Si vous allez ou avez voyagé à plusieurs, répondez à cette question.

**AF14 – Durée de séjour : Combien de temps a duré / va durer votre séjour à [affichage conditionnel selon les réponses en AF4 et le lieu d'origine ou de destination / Si voyage ALLER => durée de séjour sur le lieu de destination / Si voyage RETOUR => durée de séjour sur le lieu d'origine] ?**

**Précision sur affichage conditionnel :**

**-Si AF4 = 1 ou 3 ou 5 ou 7 ou 9 (Voyage ALLER) => afficher « Combien de temps va durer votre séjour à [Commune de destination en AF9a] »**

**-Si AF4 = 2 ou 4 ou 6 ou 8 ou 10 (Voyage RETOUR) => afficher « Combien de temps a duré votre séjour à [Commune d'origine en AF6a] »**

1. De quelques heures à une journée sans nuitée
2. 2 jours avec une nuitée
3. De 3 jours à moins d'une semaine
4. De 1 à 4 semaines
5. Plus d'un mois

Une seule réponse possible



**AF15 – Type de billet : Quel type de billet avez-vous pris pour effectuer ce déplacement ?**

1. Aller simple
2. Aller – retour

**AF16 – Classe de voyage : En quelle classe voyagez-vous / avez-vous voyagé [affichage conditionnel selon le mode ferroviaire / aérien et selon le type de voyageur Partant ou Arrivant] ?**

1. Seconde classe [ferroviaire]
2. Economique [aérien]
3. Premium économique (« Comfort Economy » ou « Deluxe Economy ») [aérien]
4. Classe affaires [aérien]
5. Première classe [ferroviaire et aérien]

Une seule réponse possible

**AF17 – Prise en charge : Bénéficiez-vous d'une prise en charge du coût du déplacement (qu'elle soit totale ou partielle) ?**

1. Oui, prise en charge totale par un tiers (employeur...)
2. Oui, prise en charge partielle par un tiers (employeur...)
3. Non

**AF18 – Sexe interviewé : Vous êtes ?**

1. Un homme
2. Une femme

**AF19a – Age répondant : Quel âge avez-vous ?**

I \_ I \_ I

Si vous souhaitez ne pas répondre, passer à la question suivante

**AF19b – Tranche d'âge répondant : Dans quelle tranche d'âge vous situez-vous ?**

1. Moins de 20 ans
2. 21-29 ans
3. 30-39 ans
4. 40-49 ans
5. 50-59 ans
6. 60-69 ans
7. 70 ans et plus

**AF20 – Taille foyer : De combien de personnes se composent votre foyer, vous inclus ?**

I \_ I \_ I

**AF21 – Nombre de voitures : De combien de voitures disposez-vous dans votre foyer ?**

I \_ I \_ I

**AF22 – CSP : Quelle est votre catégorie socio-professionnelle ?**

1. Agriculteur, exploitant agricole
2. Artisan, Commerçant, Chef d'entreprise TPE
3. Cadre, Profession libérale ou intellectuelle, Chef d'entreprise > 10 salariés
4. Enseignant, professeur
5. Technicien, agent de maîtrise
6. Ouvrier, employé
7. Militaire
8. Etudiant (après le bac)
9. Scolaire (avant le bac)
10. Retraité
11. Autres inactifs (femme au foyer...)

**POUR MIEUX VOUS CONTACTER DANS LE CADRE DU JEU CONCOURS, MERCI DE NOTER VOS COORDONNEES**

<b>Nom</b>	
<b>Prénom</b>	
<b>Adresse</b>	
<b>Code postal</b>	_ _ _ _ _
<b>Ville</b>	
<b>Email</b>	
<b>Téléphone</b>	_ _ _ _ _ _ _ _ _

Mon questionnaire est maintenant terminé, je vous remercie de votre participation. Nous vous tiendrons informé du résultat du jeu concours. Bonne journée / bonne soirée.

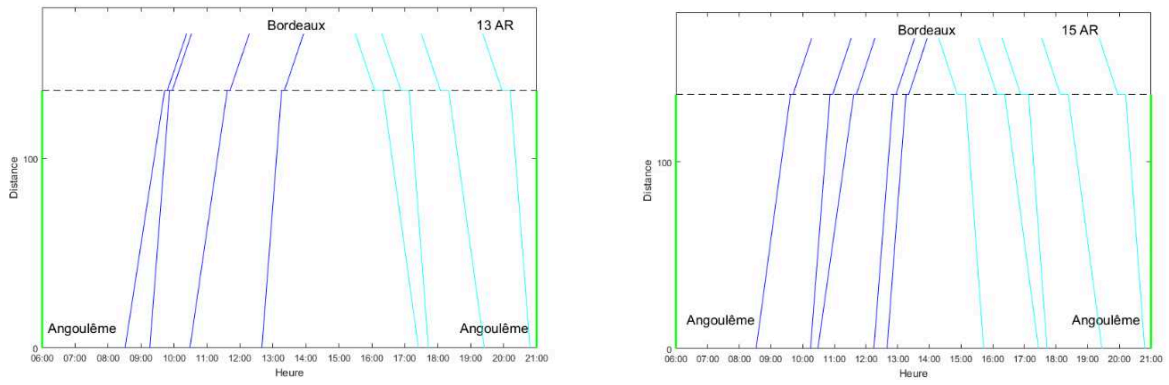


Figure 52 : les effets du changement d'horaires pour un trajet d'Angoulême à Bordeaux (A gauche : la situation 2017; A droite : la situation 2018)

Tableau 23 : les caractéristiques des données d'enquêtes "voyageurs"

<b>Data characteristics (full data)</b>			
Travel mode		Air	Train
Overall percentage		18%	82%
<b>Individual characteristics (%)</b>			
Trip purpose	Pro	84%	63%
	Personal	16%	37%
Overnight Stay	Daily	33%	22%
	Stay one night	28%	67%
	More than one night	39%	11%
Age	Age 1, 16-25	7%	18%
	Age 2, 25-45	54%	40%
	Age 3, 45-60	33%	29%
	Age 4, 60+	6%	13%
Gender	Male	65%	54%
	Female	35%	46%
<b>Trip characteristics (mean)</b>			
Cost (€)		160,0	67,9
Transit Time (hrs)		1,1	3,4
Access (mins)		45,9	28,0
Diffusion (mins)		51,0	34,9
Frequency (trips)		1,7	3,6
Headway (mins)		71,0	38,3

Tableau 24 : les résultats de prévision des parts de marché pour les déplacements professionnels

	EarlyTra in	LateTrai n	Sub total Train	EarlyAir	LateAir	Sub total Air	Total
Reference	37%	20%	57%	31%	12%	43%	100%
Scenario 1	44%	25%	69%	23%	8%	31%	100%
Scenario 2	42%	28%	70%	22%	8%	30%	100%

<b>Scenario 3</b>	44%	30%	74%	16%	10%	26%	100%
<b>Scenario 4</b>	41%	32%	73%	17%	10%	27%	100%

*Tableau 25 : les résultats de prévision des parts de marché des déplacements personnels*

	EarlyTra in	LateTrai n	Sub total Train	EarlyAir	LateAir	Sub total Air	Total
<b>Reference</b>	51%	31%	82%	16%	2%	18%	100%
<b>Scenario 1</b>	52%	32%	84%	14%	2%	16%	100%
<b>Scenario 2</b>	54%	29%	83%	15%	2%	17%	100%
<b>Scenario 3</b>	57%	30%	87%	11%	2%	13%	100%
<b>Scenario 4</b>	56%	31%	87%	11%	2%	13%	100%



# Table des illustrations - Encadrés

Encadré 1 : La concurrence pure et parfaite et l'équilibre de Pareto .....	30
Encadré 2 : la théorie de Cournot (1838) et de Bertrand (1883).....	33
Encadré 3 : La tarification de monopole et les pertes sèches.....	42
Encadré 4 : « Paquets ferroviaires » de la Commission Européenne (CE) .....	55
Encadré 5 : La concurrence technique .....	66
Encadré 6 : Le modèle d'Ivaldi et Vibes (2008) .....	77
Encadré 7 : La notion d'élasticité de la demande.....	111
Encadré 8 : La fonction de résistance de l'accessibilité gravitaire.....	116
Encadré 9 : L'Observatoire Socio-Economique (OSE) de LGV SEA.....	192
Encadré 10 : le modèle Prix-Temps .....	214
Encadré 11 : Questionnaire .....	302

# Table des illustrations - Figures

Figure 1 : les déterminants du choix modal et les principales variables identifiées (auteur, 2018) .....	12
Figure 2 : le schéma conceptuel pour l'évaluation de la qualité des dessertes dans le cadre d'un travail de choix modal (auteur, 2018) .....	16
Figure 3 : Organisation du groupe SNCF (Réalisé : Auteur, 2019).....	50
Figure 4 : les étapes pour réaliser un projet de ligne ferroviaire à grande vitesse (Auteur, 2018).	53
Figure 5 : la part modale du train dans le total intérieur de voyageurs.km entre 1995 et 2015 (Eurostat, 2018).....	63
Figure 6 : le processus de décision du choix modal (Auteur, 2018) .....	82
Figure 7 : les catégories des variables déterminantes de choix modal selon la notion de "Motilité". (Auteur, 2018 sources : Kaufmann, 2002) .....	90
Figure 8 : la représentation de la zone PPA (Miller, 2004).....	121
Figure 9 : la démonstration des FOS dans une zone PPA (Réalisé par Auteur, 2018) .....	128
Figure 10 : les coûts de délais pour un aller-retour interurbain entre l'origine et la destination .	131
Figure 11 : le temps disponible à destination pour un aller-retour dans la journée entre Paris et Bordeaux (données : www.oui.sncf) .....	168
Figure 12 : la chaîne des déplacements d'aller-retour pour le calcul du TAD .....	170
Figure 13 : le nombre de combinaisons pertinentes sous l'hypothèse de 4 h minimum à destination. .....	177
Figure 14 : le nombre de combinaisons pertinentes sous les contraintes d'heure d'arrivée et de retour .....	177



Figure 15 : l'évolution du nombre de COP pour un aller-retour Bordeaux-Paris sous l'hypothèse de 4 h minimum à destination (la situation ex ante à gauche et la situation ex post à droite, inspiré travaux P.Joho, 2013).....	178
Figure 16 : la structure du modèle MNL.....	183
Figure 17 : la structure du modèle NL avec au niveau supérieur le choix modal .....	184
Figure 18 : la structure du modèle NL avec au niveau supérieur le choix d'horaires .....	184
Figure 19 : la structure du modèle CNL de notre étude de cas .....	185
Figure 20 : le tracé de la LGV SEA (Source : l'OSE LGV SEA, réalisé par Violaine Jurie) .....	197
Figure 21 : la corrélation entre la distance parcourue sur la LGV SEA et les gains de temps de parcours. ....	201
Figure 22 : l'évolution du PTL 2 <sup>ème</sup> classe sur les principales liaisons concernées par la LGV SEA (sources : conditions de vente de SNCF Mobilités).....	202
Figure 23 : l'offre des transports sur la liaison Paris-Bordeaux .....	208
Figure 24 : l'évolution du nombre de sièges offert sur la liaison Paris-Bordeaux (Sources : OSE LGV SEA).....	210
Figure 25 : l'évolution des tarifs par mode de transport sur la liaison Paris-Bordeaux (tarifs moyens aller simples entre 1 et 30 jours avant la circulation, sources : OSE LGV SEA 2018) .....	211
Figure 26 : l'évolution du trafic aérien sur la liaison Paris-Bordeaux (Sources : Eurostat, 2018) .....	213
Figure 27 : les coûts généralisés des modes de transport en fonction de la valeur du temps sur la liaison Paris-Bordeaux. ....	215
Figure 28 : les motifs des déplacements sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances) ...	222
Figure 29 : la nature du trajet en avion et en TGV sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances) .....	222
Figure 30 : la fréquence des déplacements sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances)	223
Figure 31 : les modes de rabattement utilisés à Paris et à Bordeaux (JOB, Hors vacances).....	224

Figure 32 : les modes de diffusion utilisés à Paris et à Bordeaux (JOB, Hors vacances).....	224
Figure 33 : le pourcentage des voyageurs arrivant avant ou après l'heure d'arrivée souhaitée (JOB, Hors vacances) .....	226
Figure 34 : les minutes perdues des voyageurs à la destination (JOB, Hors vacances).....	227
Figure 35 : la distribution des heures d'arrivée souhaitées et des tarifs moyens pour les voyageurs en train sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances).....	228
Figure 36 : la distribution des heures d'arrivée souhaitées et des tarifs moyens pour les voyageurs en avion sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances).....	228
Figure 37 : le genre des voyageurs sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances).....	229
Figure 38 : l'âge des voyageurs sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances) .....	230
Figure 39 : les catégories socio-professionnelles des voyageurs sur la liaison Paris-Bordeaux (JOB, Hors vacances) .....	230
Figure 40 : l'évolution du nombre de combinaisons pertinentes sur les liaisons radiales entre Paris et Bordeaux .....	252
Figure 41 : l'évolution du nombre de combinaisons pertinentes sur les liaisons intersecteurs ....	254
Figure 42 : l'évolution du nombre de combinaisons pertinentes Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux .....	255
Figure 43 : les résultats de la prévision des parts de marché Air-Fer pour les déplacements professionnels.....	269
Figure 44 : les résultats de la prévision des parts de marché Air-Fer pour le motif personnel ....	270
Figure 45 : Tarification monopolistique et la perte sèche (réalisé : auteur, 2019).....	297
Figure 46 : Panorama de l'ouverture à la concurrence en Europe (Données ARAFER 2015, Réalisé par STATISTA).....	297
Figure 47 : Investissement en infrastructure ferroviaire : la construction des nouvelles infrastructures et le renouvellement des réseaux existants (milliards d'euros) .....	298

Figure 48 : Evolution de la fréquentation TGV et TET en voyageurs.km depuis 1980 - Notes : les carrés grisés correspondent aux LGV SEA et LGV BPL (Cours des comptes, 2014, SOeS et les bulletins mensuels des transports).....	298
Figure 49 : Evolution des émissions de GES des différents modes de transport en France depuis 1990.....	299
Figure 50 : liaisons aériennes vers Paris CDG.....	300
Figure 51 : liaisons aériennes vers Paris ORY.....	301
Figure 52 : les effets du changement d'horaires pour un trajet d'Angoulême à Bordeaux (A gauche : la situation 2017; A droite : la situation 2018).....	312

# Table des illustrations - Tableaux

Tableau 1 : la typologie de structure de marché de Stackelberg (Stackelberg, 1952) .....	40
Tableau 2 : les politiques d'intervention, leurs objectifs et leurs champs d'application (Ponti, 2011) .....	46
Tableau 3 : les différents marchés dans le secteur du transport ferroviaire (Quinet, 1998).....	49
Tableau 4 : les impacts de la nouvelle LGV sur les parts de marché Air-Fer.....	75
Tableau 5 : la typologie de mobilité spatiale (Kaufmann, 1999) .....	89
Tableau 6 : les alternatives du choix du modèle combiné choix modal - choix d'horaires.....	182
Tableau 7 : la comparaison du temps de parcours sur les principales liaisons radiales concernées .....	199
Tableau 8 : pourcentage des grains de temps de parcours et des hausses de PTL .....	203
Tableau 9 : l'évolution des dessertes ferroviaires sur les principales liaisons radiales concernées et la comparaison avec les scénarios A et B du dossier DUP .....	204
Tableau 10 : l'évolution de l'intervalle de service et l'amplitude de service sur les liaisons radiales concernées .....	205
Tableau 11 : les caractéristiques des différents modes de transport sur la liaison Paris-Bordeaux .....	212
Tableau 12 : les principales caractéristiques des données utilisées dans le modèle TAD .....	234
Tableau 13 : les caractéristiques des données utilisées pour le modèle combiné choix modal - choix d'horaires .....	239
Tableau 14 : les résultats d'estimation des modèles Logit Binomial.....	246
Tableau 15 : les résultats d'estimation du modèle TAD avec la segmentation des échantillons..	249

Tableau 16 : les résultats des modèles GEV .....	258
Tableau 17 : les résultats d'estimation du modèle MMNL.....	261
Tableau 18 : les résultats d'estimation des variables liées aux caractéristiques des voyageurs ...	262
Tableau 19 : les résultats d'estimation du modèle segmenté par motif des déplacements .....	264
Tableau 20 : la valeur du temps et les ratios de coûts de délais sur Paris-Bordeaux .....	266
Tableau 21 : les scénarios concernant l'évolution de l'offre de transport Air-Fer sur la liaison Paris-Bordeaux (base des données de l'OSE LGV SEA, site web Oui.SNCF) .....	268
Tableau 22 : les principaux jalons du projet de LGV SEA (Source : Bilan LOTI intermédiaire LGV SEA) .....	299
Tableau 23 : les caractéristiques des données d'enquêtes "voyageurs" .....	313
Tableau 24 : les résultats de prévision des parts de marché pour les déplacements professionnels .....	313
Tableau 25 : les résultats de prévision des parts de marché des déplacements personnels.....	314

# Table des matières

<b>Remerciements.....</b>	<b>5</b>
<b>Sommaire.....</b>	<b>6</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>9</b>
1. Contexte .....	9
2. La concurrence dans le transport ferroviaire.....	10
3. L'analyse du choix modal.....	11
4. Problématique .....	13
5. Vers une meilleure prise en compte de la qualité des dessertes.....	14
6. L'étude de cas sur la LGV SEA.....	18
7. Plan de la thèse.....	19
<i>Première partie :.....</i>	<i>21</i>
<i>La concurrence dans le marché des transports.....</i>	<i>21</i>
<i>Introduction de la partie 1 .....</i>	<i>22</i>
<i>Chapitre 1.1 : Le concept de concurrence dans le secteur des transports.....</i>	<i>24</i>
Introduction du chapitre 1.1 .....	24
Section 1.1.1 : La concurrence et l'efficacité économique .....	25
1.1.1.1 - La définition du concept de concurrence.....	25
1.1.1.2 - Le concept de concurrence dans l'histoire des pensées économiques.....	27
1.1.1.3 - De l'équilibre général à l'équilibre du monopole.....	35
1.1.1.4 - Les structures du marché et le monopole naturel.....	39
Section 1.1.2 : La concurrence dans le transport ferroviaire.....	48
1.1.2.1 - La concurrence pour l'accès au marché de l'infrastructure : l'Open Access.....	51

1.1.2.2 - La concurrence entre les opérateurs du transport ferroviaire : la concurrence intramodale.....	55
1.1.2.3 - La concurrence entre les différents modes de transport : la concurrence intermodale.....	61
Section 1.1.3 : La concurrence Air-Fer dans le contexte d'une nouvelle LGV .....	68
1.1.3.1 - L'impact d'une nouvelle LGV .....	68
1.1.3.2 - La zone de compétitivité du TAGV .....	70
Conclusion du chapitre 1.1 .....	78
<i>Chapitre 1.2 : Cadre théorique de l'analyse de la concurrence intermodale .....</i>	<i>80</i>
Introduction du chapitre 1.2 .....	80
Section 1.2.1 : Le concept de choix modal .....	81
1.2.1.1 - Le lien entre la notion de mobilité et le choix modal.....	87
Section 1.2.2 : Les variables déterminantes du choix modal .....	91
1.2.2.1 - Les variables des déplacements .....	91
1.2.2.2 - Les variables spatio-temporelles.....	93
1.2.2.3 - Les caractères personnels des voyageurs .....	95
1.2.2.4 - Les variables socio-psychologiques.....	97
1.2.2.5 - La notion des coûts généralisés et la valeur du temps .....	98
Conclusion du chapitre 1.2.....	102
<i>Chapitre 1.3 : La qualité des dessertes comme attribut de l'accessibilité.....</i>	<i>104</i>
Introduction du chapitre 1.3 .....	104
Section 1.3.1 : Les limites des indicateurs standard pour étudier la qualité des dessertes...107	
Section 1.3.2 : Des indicateurs pertinents basés sur la théorie de l'accessibilité.....	112
1.3.2.1 - Les mesures d'accessibilité.....	112
1.3.2.2 - L'analyse des dessertes dans la dimension spatio-temporelle .....	119
Section 1.3.3 : Les caractéristiques des opportunités dans une approche microéconomique .....	127
Conclusion du chapitre 1.3.....	137
<i>Conclusion de la partie 1 .....</i>	<i>140</i>
<i>Deuxième partie : .....</i>	<i>143</i>

<i>De la mesure de l'accessibilité à l'analyse des effets de la qualité des dessertes</i> .....	143
<i>Introduction de la partie 2 :.....</i>	144
<i>Chapitre 2.1 : Les principes des modèles de choix discrets.....</i>	146
Introduction du chapitre 2.1 .....	146
Section 2.1.1 : Les modèles de choix discrets standard : le modèle Probit et le modèle Logit .....	148
2.1.1.1 - Le modèle Logit.....	148
2.1.1.2 - Le modèle Probit.....	151
2.1.1.3 - La méthode du maximum de vraisemblance.....	153
Section 2.1.2 : Les modèles dérivés pour relâcher les hypothèses IID .....	154
2.1.2.1 - Les modèles GEV (Generalized Extreme Value) .....	155
2.1.2.2 - Les principes du modèle MMNL (Mixed Multinomial Logit).....	160
Conclusion du chapitre 2.1 .....	162
<i>Chapitre 2.2 : L'analyse du choix modal basée sur le programme d'activités et les opportunités à destination .....</i>	165
Introduction du chapitre 2.2 .....	165
Section 2.2.1 : Les indicateurs de temps utile à destination.....	166
2.2.1.1 - L'indicateur TAD (Temps utile A Destination).....	169
2.2.1.2 - L'indicateur COP (COmbinaisons Pertinentes).....	174
Section 2.2.2 : Modèle combiné choix modal – choix d'horaires.....	180
Conclusion du chapitre 2.2.....	186
<i>Conclusion de la partie 2.....</i>	188
<i>Troisième partie :.....</i>	190
<i>Les effets de la qualité des dessertes sur le choix modal.....</i>	190
<i>Introduction de la partie 3 .....</i>	191



*Chapitre 3.1 : Les offres Air-Fer en concurrence dans le périmètre SEA ..... 194*

Introduction du chapitre 3.1 .....	194
Section 3.1.1 : Le projet de LGV Sud Europe Atlantique (SEA) .....	195
3.1.1.1 - Les caractéristiques et les objectifs du projet de LGV SEA .....	195
3.1.1.2 - La LGV SEA et l'évolution de l'offre ferroviaire .....	199
Section 3.1.2 : L'offre et la demande de transport sur la liaison Paris-Bordeaux.....	207
3.1.2.1 - L'évolution de l'offre des modes de transport .....	207
3.1.2.2 - Les premiers effets sur la demande de transport.....	212
Conclusion du chapitre 3.1 .....	216

*Chapitre 3.2 : Les enquêtes « voyageurs » et les données spécifiques « horaires »*

..... 218

Introduction du chapitre 3.2 .....	218
Section 3.2.1 : Les données des enquêtes « voyageurs » spécifiques .....	219
Section 3.2.2 : Les données utilisées pour le modèle TAD et le modèle COP .....	232
3.2.2.1 - Les données pour le modèle Temps utile A Destination (TAD).....	232
3.2.2.2 - Les données pour l'indicateur COMbinaisons Pertinantes (COP) .....	237
Section 3.2.3 : Les caractéristiques des données d'enquêtes « voyageurs ».....	238
Conclusion du chapitre 3.2.....	241

*Chapitre 3.3 : L'enjeu des indicateurs de la qualité des dessertes pour une meilleure analyse du choix modal ..... 243*

Introduction du chapitre 3.3 .....	243
Section 3.3.1 : L'utilité des indicateurs de temps utile à destination .....	244
3.3.1.1 - l'indicateur TAD contribue à expliquer le choix modal .....	244
3.3.1.2 - L'indicateur COP montre l'évolution ex ante / ex post de la qualité des dessertes sur la LGV SEA .....	251
Section 3.3.2 : L'utilité du modèle combiné choix modal – choix d'horaires .....	256
3.3.2.1 - Les résultats des modèles GEV.....	257

3.3.2.2 - Résultats du modèle MMNL.....	260
3.3.2.3 - Résultats de la segmentation par motif .....	263
3.3.2.4 - Détermination des valeurs du temps par mode et par motif.....	265
3.3.2.5 - Estimation des parts de marché Air-Fer.....	267
Conclusion du chapitre 3.3.....	272
<i>Conclusion de la partie 3.....</i>	<i>273</i>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>275</b>
<b>Bibliographie : .....</b>	<b>279</b>
<b>Annexe :.....</b>	<b>297</b>
<b>Table des illustrations - Encadrés.....</b>	<b>316</b>
<b>Table des illustrations - Figures.....</b>	<b>317</b>
<b>Table des illustrations - Tableaux.....</b>	<b>321</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>323</b>