

Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement
Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques
Mission de la Recherche et de l'Innovation dans les Transports

Les modèles structurels de congestion : une étude expérimentale

Rapport final produit dans le cadre de la recherche portant sur les "**Éléments des politiques de transport : une approche par l'économie expérimentale – Application au choix d'itinéraire**" réalisée dans le cadre du programme PREDIT 1996-2000.
Décision de subvention n°00 MT 21.

Laurent Denant-Boémont
CREREG, Université de Rennes 1

Marc Willinger
*BETA, Université de
Strasbourg 1*

Jean-Louis Rullière
GATE, Université Lyon 2

Sabrina Hammiche
*LET, Université de Bretagne
Occidentale*

Anthony Ziegelmeyer
BETA

Mathieu Neveu
GATE

Romain Petiot
LET

Kene Boun My
BETA et LEES

Yannick Gabuthy
GATE, Université Lyon 2

Karine Delvert
LET

Juin 2002

BETA
**Bureau d'Économie
Théorique et Appliquée**



UMR CNRS n°7522
Université Strasbourg 1

UMR CNRS n°5824
Université Lyon 2

UMR CNRS n°5593
Université Lyon 2 - ENTPE

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble du groupe « évaluation – décision » du PREDIT 1996-2000 qui nous a permis de conduire cette recherche dans les conditions les plus favorables et qui a fait le pari d'une recherche exploratoire et théorique aussi fouillée. Un remerciement tout particulier à Gérard Brun, pour sa disponibilité, sa gentillesse et ses encouragements, et à Jean-Marc Offner, pour sa curiosité et son encadrement stimulant. Nous remercions aussi l'ensemble du personnel de la DRAST qui nous a permis d'organiser de fructueuses journées de travail dans les murs du Ministère de l'Équipement, des Transports, et du Logement.

**Chapitre préliminaire – Une
introduction : congestion
routière endogène et jeux
expérimentaux**

Préambule. Choix d'itinéraires des usagers d'infrastructures de transport et économie expérimentale : une histoire....

Il est utile de détailler quelque peu la chronologie des événements qui ont permis d'aboutir à un rapport qui, quoique insatisfaisant à certains égards pour ces auteurs, a été riche de nombreux enseignements liés, d'une part, à la difficulté méthodologique et au véritable défi scientifique de l'implémentation de l'expérimentation dans le domaine des transports, et d'autre part, à l'hétérogénéité des participants à ce programme. Qu'il nous soit permis ici de rappeler la composition de l'équipe :

- Marc Willinger, professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg et spécialiste d'économie expérimentale dans le domaine de la théorie des jeux et de la théorie de la décision individuelle
- Jean-Louis Rullière, professeur à l'Université Lumière Lyon 2, spécialiste de théorie des jeux appliquée à l'économie du travail et d'économie expérimentale
- Mathieu Neveu, ingénieur de recherche CNRS, informaticien et économiste spécialiste d'économie expérimentale
- Yannick Gabuthy, doctorant travaillant sur les jeux de coordination
- Anthony Ziegelmeyer, chercheur au BETA et post doctorant à ayant réalisé une thèse sur les cascades informationnelles, spécialiste de théorie des jeux et d'économie expérimentale
- Romain Petiot, docteur et chercheur au LET, spécialiste du transport urbain.
- Sabrina Hammiche, maître de conférences à l'Université de Bretagne Occidentale et chercheur au LET, spécialiste des transports de marchandises et de calcul économique public
- Karine Delvert, doctorante au LET, travaillant sur la congestion routière
- Laurent Denant-Boëmont, maître de conférences à l'Université de Rennes 1 et chercheur au CREREG (au début de cette recherche encore chercheur au LET),

spécialiste de théorie de la décision appliquée au choix de transport, d'économie expérimentale et de calcul économique public dans l'incertain.

La recherche s'étant déroulée de décembre 2001 à mai 2002, il n'est pas mauvais de resituer les étapes charnières de cette recherche, cette démarche permettant de resituer les nombreuses difficultés auxquelles elle s'est heurtée.

Etape 1 (de décembre 2001 à juillet 2001) : approfondissement et étude de la littérature fournie et variée sur les modèles de *bottleneck*, issus de l'article séminal de Vickrey en 1969 qui fonde un véritable champ disciplinaire de l'économie des transports fondé par Arnott, De Palma et Lindsey (dit ADPL par la suite) à partir de 1985 et dont la vivacité reste réelle encore aujourd'hui. Il faut noter que cette tradition est d'essence anglo-saxonne ce qui explique sans doute le fait qu'elle ait tardé à se diffuser dans la communauté académique française. La première difficulté a été d'identifier clairement les prédictions théoriques qui étaient susceptibles d'être testables dans une série d'expérimentations mais également les variables qui pouvaient influencer fortement la nature des équilibres de congestion dans les modèles théoriques. Quatre familles de variables ont donc été finalement retenues : le péage, la variété du choix individuel, l'information et les caractéristiques relatives des usagers. Ce choix méthodologique explique bien évidemment l'orientation d'une part de la modélisation théorique en choix discret et d'autre part le design des multiples jeux expérimentaux qui ont été implémentés.

Etape 2 : de juillet 2001 à septembre 2001 : détermination des valeurs des paramètres de valeurs du temps et de capacité/ débit à implémenter dans les *designs* expérimentaux.

Etape 3 (de septembre à décembre 2001) : conception des modèles de choix discret d'heure de départ dans le cas d'un itinéraire (BETA) et des modèles de choix dans le cas de 2 itinéraires avec usagers hétérogènes.

Etape 4 : de janvier 2001 à mars 2001 : conception des protocoles expérimentaux, réalisation des pilotes et traitement des données

Etape 5 : de mars 2001 à mai 2001 ; réalisation des jeux expérimentaux. Au total, plus de 304 sujets auront été testés et pour la première fois en France, des jeux expérimentaux de grande taille à 64 joueurs ont été réalisés.

Section 1. Introduction et présentation de la recherche

1. problématique et enjeux de la recherche

Il est tout d'abord nécessaire de rappeler que cette recherche fait suite à une première phase* durant laquelle les objectifs suivants ont été poursuivis :

- a) Evaluer en quoi le recours aux méthodes issues de l'économie expérimentale sont susceptibles d'aider à la décision des politiques de transport (notamment, montrer en quoi ces méthodes sont complémentaires des méthodes traditionnellement utilisées pour produire les données nécessaires au test des modèles théoriques, à savoir les méthodes de préférences révélées, les méthodes de préférences déclarées et les méthodes de simulation ;
- b) Réaliser un apprentissage par la pratique concernant l'économie expérimentale appliquée au transport en réalisant une série d'expériences sur le thème du choix individuel de transport routier en présence de congestion stochastique.

Le premier objectif n'a pas posé de réel problème et il a été atteint en mettant en œuvre, d'une part, un travail de définition conceptuel et méthodologique permettant de caractériser rigoureusement les méthodes issues de l'économie expérimentale. Ces méthodes ont ainsi été comparées avec d'autres outils plus habituels en économie des transports, comme la simulation, et distinguées de celles-ci. En substance, il a été montré en quoi l'économie expérimentale, de par ses spécificités, peut permettre de pallier les insuffisances des méthodes de préférences déclarées ou de préférences révélées qui limitent l'efficacité des modèles de prévision de trafic. Par ailleurs, la

* Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques, BETA, GATE, LET. (1999). *Éléments d'évaluation des politiques de transport : une approche par l'économie expérimentale*. 115 p.

possibilité de contrôler l'environnement dans les expérimentations économiques permet d'obtenir une grande variabilité des situations de choix tout en évitant les problèmes habituels des méthodes de choix hypothétiques, dans lesquelles les sujets n'ont pas à assumer la responsabilité de leur choix. Toutefois, l'application de cette définition rigoureuse de l'économie expérimentale au domaine de la recherche en transport n'a permis de recenser qu'un nombre extrêmement limité de travaux d'économie expérimentale appliquée au transport au sens strict du terme, ce qui était également une manière de montrer l'intérêt et la nécessité de notre recherche. C'est la raison pour laquelle, d'autre part, un survey exhaustif de ces travaux a été accompli. Il a montré la diversité des thèmes abordés (marchés de transport et déréglementation, enchères sur les licences de transport, valeur de l'information routière dans les choix de déplacements domicile-travail, *etc.*) et par conséquent les potentialités réelles du recours à l'économie expérimentale en termes d'aide à la décision publique ou privée.

Le second objectif impliquait de réaliser une expérimentation originale appliquée au transport. Le thème le plus récurrent dans le domaine des transports est celui de la congestion des infrastructures. Le parti qui a été pris d'un point de vue théorique a été de considérer que la congestion était un phénomène stochastique exogène que les usagers subissaient et ne pouvaient qu'anticiper pour réaliser leurs choix de déplacements. En clair, le problème était celui d'un choix en avenir incertain (théorie de la décision) et pas d'un choix stratégique (théorie des jeux). Le prototype expérimental a donc porté sur le thème de la valorisation de l'information sur le trafic routier par des usagers expérimentaux soumis à des choix d'itinéraires plus ou moins flexibles. Le modèle théorique qui a été développé est un modèle de quasi-valeur d'option à la Henry (1974) en incertitude bayésienne. Les résultats du prototype expérimental sont ambigus, les prédictions théoriques étant en partie infirmées par les observations expérimentales. Un phénomène relativement stable a toutefois été mis en lumière : les usagers expérimentaux ont eu tendance à valoriser trop fortement l'information routière ce qui allait dans le sens de certains résultats théoriques traditionnellement mis en évidence dans la littérature d'économie des transports.

Il n'en reste pas moins que cette dernière étape de la recherche a indiqué les pistes de recherche à poursuivre :

- Manifestement, il était nécessaire d'étudier des jeux expérimentaux en recourant à une congestion qui ne soit plus exogène aux joueurs mais endogène. A priori, la congestion d'une infrastructure est le produit des décisions des usagers et il est difficile de considérer que les usagers n'ont pas conscience de cela et ne l'utilisent pas dans un cadre stratégique pour déterminer leurs choix. Plutôt que d'appréhender la congestion comme un simple effet externe, il peut être pertinent d'assimiler la congestion des infrastructures comme le résultat d'interactions stratégiques et de considérer cette congestion comme un équilibre de Nash Pareto-dominé. En effet, les usagers sont amenés, afin de minimiser leur coût de transport, à choisir une heure de départ qui les conduira tous, s'ils sont suffisamment homogènes, à subir la congestion sans qu'il y ait d'incitation individuelle à ce qu'ils modifient leur décision. On est dans le cas d'un très classique dilemme du prisonnier (exemple typique du jeu de coordination) où les décisions individuelles insuffisamment coordonnées conduisent à une perte sociale du point de vue de la collectivité.
- A partir du moment où une représentation de la congestion en termes stratégiques est adoptée, et que l'accent est mis sur les problèmes de coordination des décisions des usagers, quelles variables sont susceptibles d'améliorer le niveau de coordination pour éviter des situations inefficaces pour la collectivité ? Cette recherche a choisi de mettre l'accent sur trois des variables qui, dans le domaine des choix d'usage routier, nous ont paru les plus fondamentales :

1. *le péage* : bien évidemment, cette dimension a toujours été vue comme une solution possible aux problèmes de régulation du trafic, au moins depuis les travaux de A. C. PIGOU. Ici, nous envisagerons la question du péage en modélisant un réseau à deux itinéraires de capacité différente, l'itinéraire de plus forte capacité étant assorti d'un péage qui « valorise » ce différentiel de qualité de service (voir chapitre 2, section 2)

2. *L'information routière* : compte tenu du développement spectaculaire des moyens technologiques d'aide à la conduite ou de guidage des véhicules, il est souhaitable de se poser la question de l'efficacité de la fourniture d'information routière sur la régulation de la congestion. Une vision angélique des choses conduit souvent à affirmer péremptoirement que l'information est susceptible d'améliorer la coordination des agents et d'étaler les flux de trafic au cours du temps. D'un point de vue théorique (voir chapitre 1), rien n'est moins sûr. Dès lors, l'aspect expérimental revêt un caractère essentiel pour observer dans quelle mesure l'information est utile individuellement et collectivement.

3. *L'hétérogénéité des usagers* : trop fréquemment, les modèles recourant à une représentation des préférences de l'utilisateur font appel au concept d'individu représentatif, ce qui suppose que tous les usagers ont des préférences semblables. C'est certes une hypothèse utile pour établir des prédictions théoriques claires et suffisamment simples, mais il est évident que cette hypothèse doit ensuite être levée pour intégrer plusieurs classes d'utilisateurs de la route. Nous verrons dans le chapitre 1 que la question de l'hétérogénéité peut se traiter de différente manière et que nous avons finalement retenu une hétérogénéité individuelle dans les valeurs du temps plutôt qu'une hétérogénéité dans les schémas d'activité.

Section 2. Déroulement de la recherche et étapes d'avancement

Compte tenu des objectifs de cette recherche et des questions nombreuses qui étaient posées, la méthode de travail a consisté à conduire plusieurs étapes, le déroulement de celles-ci n'étant pas forcément linéaire, mais induisant souvent des effets de feedback ou de lock in dans les choix méthodologiques. Ces étapes ont donc consisté à :

1. **Recenser** de la manière la plus complète plus possible la littérature sur les modèles structurels de congestion pour établir les faits stylisés dans le domaine de l'économie des transports, mais aussi **calibrer** les protocoles expérimentaux sur la base d'études empiriques sur les coûts du temps et sur la congestion des infrastructures routières. C'est l'objet du chapitre 1, la section 1 faisant le bilan de la littérature, tandis que la section 2 en tire les conclusions en termes de calibrage expérimental en recensant les études faites sur les coûts du temps de transport.
2. sur la base d'un modèle basique issu de ADPL (1985) mais défini via un continuum d'agents (choix continu d'heure de départ), **concevoir** un modèle discret (choix discret d'heure de départ) afin d'élaborer le référent (benchmark) théorique. En effet, nous nous sommes rendus compte qu'il n'était pas possible de tester directement le modèle de ADPL d'un point de vue théorique et il a fallu réaliser un détour de production pour construire un modèle théorique adapté au contexte expérimental. A cette étape, les problèmes suivants sont apparus :
 - il existe un seul équilibre dans le modèle ADPL, mais il y a une multiplicité d'équilibres (jeu de coordination) ou pas d'équilibres dans notre modèle expérimental,
 - Ce modèle s'est avéré extrêmement sensible à la valeur des paramètres de la fonction de coût, d'où l'importance de la phase de calibrage,
 - Il était possible d'adopter de multiples approches de la congestion, notamment sur la relation entre demande de trafic, débit théorique et nombre de périodes permettant de franchir le goulet. Dès lors, il nous a fallu discuter de la modélisation possible de la technologie de congestion (modèle type FIFO ou modèle physique dans lequel tous ceux qui partent à la même heure mettent le même temps pour arriver ?).

A l'issue de cette réflexion sur le modèle de base, 4 modèles théoriques ont été construits :

1 ou 2 itinéraires Usagers homogènes ou hétérogènes	1 itinéraire	2 itinéraires
Homogènes	<i>Modèle de base (1)</i> <u>Voir chapitre 2, section 1</u>	<i>Modèle (2)</i> <u>Voir chapitre 2, section 2</u>
Hétérogènes	<i>Modèle (3)</i> <u>Voir chapitre 3, section 2</u>	<i>Modèle (4)</i> <u>Voir chapitre 3, section 2</u>

Le chapitre 2 décrit les modèles de base théoriques qui ont été développés (ie les modèles (1) et (2)) dans la section 1, tandis que les modèles (3) et (4) sont présentés dans le chapitre 3.

3. Après avoir établi des prédictions théoriques claires sur la base de ces modèles, **tester expérimentalement** chacun de ces modèles, en tirer des conclusions par rapport aux prédictions théoriques et les comparer entre eux (par exemple, en quoi l'introduction d'une hétérogénéité des joueurs modifie la donne concernant le modèle à 2 itinéraires). Il faut noter également que, point important, le modèle (1) a été testé avec de grands groupes de joueurs (y-a-t-il un effet taille ?) et qu'il a été complété d'une variante expérimentale dans laquelle les joueurs disposaient pour faire leur choix d'une information statistique sur les choix passés du groupe de joueurs dans leur ensemble.

Le chapitre 2 et le chapitre 3, pour chacun des modèles qui les concernent, testent successivement ces modèles en recourant à des protocoles expérimentaux décrits de manière détaillée. En effet, nous avons préféré à chaque fois présenter le modèle théorique et la série de tests expérimentaux qui lui correspond, plutôt que de réaliser un chapitre uniquement théorique, qui aurait décrit les modèles, et un chapitre purement expérimental, qui aurait confronté ces modèles à l'observation dans un laboratoire.

Chapitre 1. Un bilan de la littérature sur les modèles structurels de congestion

Introduction du chapitre 1

L'objectif de ce chapitre est d'établir les faits stylisés concernant la littérature sur les modèles structurels de congestion pour isoler clairement les résultats théoriques récurrents et identifier des éléments de calibrage des modèles théoriques séquentiels et statiques pour alimenter les expériences à venir.

Glossaire

- ATC : Average Transport Cost (Coût moyen de transport) ;
MC : Marginal Cost (Coût marginal) ;
TC : Travel Cost (SDC+TTC) (Coût de déplacement) ;
SDC : Schedule Delay Cost (Coût d'avance / de retard) ;
TTC : Travel Time Cost (Coût du temps de déplacement) ;
C ou c : Coût individuel de déplacement ;
NTE : No-Toll Equilibrium (Equilibre sans tarification) (exposant « e » dans les équations) ;
SO : Social Optimum (Optimum social) (exposant « O ») ;
 α : Coût unitaire du temps de déplacement ;
 β : Coût unitaire du temps d'avance par rapport à t^* , heure objectif ;
 γ : Coût unitaire du temps de retard par rapport à t^* , heure objectif ;
ADPL : Arnott, De Palma, Lindsey ;
PD : Préférences Déclarées ;
PR : Préférences Révélées ;

Section 1. Les modèles structurels de congestion : une revue de la littérature

1. Introduction

Les modèles structurels de congestion ont la caractéristique de définir explicitement la technologie de congestion des infrastructures routières mais également de traiter des décisions individuelles et des réactions comportementales des usagers en qualifiant leurs préférences (cf. ADPL, 1998). A la différence des modèles dits « naïfs » de congestion, ils peuvent donc traiter la décision individuelle d'heure de départ (ADPL, 1990b). Cette tradition de représentation de la congestion routière dérive de l'article séminal de Vickrey en 1969 dans l'*American Economic Review*.

En général, cette littérature se concentre sur les déplacements quotidiens contraints (le plus souvent domicile-travail) et examine en conséquences les choix individuels d'usagers soumis à de multiples décisions, d'heure de départ et éventuellement d'itinéraire ou de mode compte tenu d'une origine et d'une destination et d'une heure d'arrivée fixée comme objectif (ou d'un intervalle d'arrivée), au moins dans le modèle de base, communes à tous les usagers. La particularité est alors de considérer l'écart par rapport à l'objectif dans la fonction de coût privé de l'utilisateur : au-delà du coût horaire lié au temps pris par le déplacement (coût d'opportunité du temps + péage d'infrastructure + coût privé lié au déplacement), un coût lié au retard ou à l'avance par rapport à l'objectif va être ajouté.

La représentation de la congestion dérive de la conception de Vickrey, qui décrit la congestion en termes de goulet d'étranglement (traduction littérale de *bottleneck*) : une infrastructure routière définit un débit maximum de passage compte tenu d'un taux d'arrivée aléatoire de véhicules. Si le taux devient supérieur au débit théorique, alors une file d'attente se forme et se répercute sur plusieurs périodes puisque le débit définit le nombre d'utilisateurs maximal pouvant passer à chaque période. En ce

sens, ces modèles de congestion sont dynamiques, le trafic d'une période de temps ultérieure étant directement lié au trafic des périodes précédentes autant qu'au taux de départ sur la période courante.

L'objectif de ces modèles est d'arriver à une qualification de l'équilibre de congestion sans péage (*no-toll equilibrium*), d'évaluer les coûts subis par l'utilisateur, donc par la collectivité et d'analyser en conséquence l'impact de différentes formes de péages d'infrastructure sur la régulation de la congestion afin d'aller vers l'optimum de premier ou de second rang. L'équilibre de congestion est clairement apparenté à un équilibre de Nash dans un jeu de coordination non-coopératif, et le problème est donc bien lié à un défaut de coordination en situation d'interaction stratégique des usagers (*cf.* de Palma, 1992). Partant au départ d'un modèle très restreint (1 mode, 1 itinéraire, 1 heure d'arrivée objectif commune à tous les usagers, valeurs du temps identiques, jeu statique, demande non-élastique, capacité de l'infrastructure fixée, *etc.*), la littérature s'est enrichie de différentes dimensions visant à tester la robustesse des résultats initiaux mais également à les enrichir : impact de l'information routière, d'une élasticité non-nulle de la demande au coût privé de transport, d'utilisateurs hétérogènes du point de vue de la fonction de coût, itinéraires multiples (réseaux), capacité et demande stochastiques, *etc.*

Les deux modèles de base qui vont être étudiés sont tirés respectivement de ADPL (1990b) qui décrit un modèle structurel de congestion routière dans le cas d'un réseau à deux itinéraires, et ADPL (1993b) qui présente le modèle le plus restreint (pas forcément le plus simple) qui décrit le modèle de *bottleneck* (1 itinéraire pour des utilisateurs effectuant des déplacements domicile-travail). Le modèle qui nous servira de référence est ADPL (1990b).

L'objectif qui préside dans cette revue de la littérature est simple :

- établir les faits stylisés c'est-à-dire les résultats théoriques ou empiriques qui ressortent de manière pérenne et qui semblent robustement établis concernant les modèles structurels de congestion (impact des péages d'infrastructure, rôle de l'information, *etc.*). La mise en lumière de ces faits stylisés permet en effet de tester la pertinence des prédictions théoriques

issues des modèles de jeux qui seront conçus *ad hoc* afin d'être testés expérimentalement (modèle statique et modèle séquentiel) ;

- déterminer les valeurs des paramètres à implémenter dans les modèles de jeux expérimentaux concernant les valeurs du temps notamment.

2. Présentation des modèles de base : *bottleneck* et réseau simple à deux itinéraires

A. Le modèle de *bottleneck* (Vickrey, 1969 ; ADPL, 1990b ; ADPL, 1993)

1°) Equilibre sans péage pour une quantité donnée d'usagers, demande inélastique

a) Hypothèses et définitions

Le modèle considère le choix de transport de N individus effectuant un déplacement domicile-travail entre une origine et une destination communes. Ils ont une heure objectif donnée. Le temps de déplacement est la somme d'un temps fixe de déplacement jusqu'au goulet d'étranglement et après le goulet d'étranglement et d'un temps variable dépendant de la demande de trafic à une période t et du débit théorique. On suppose que le temps fixe est nul et par conséquent le temps de déplacement est le temps d'attente dans la file d'attente. Par définition, on a :

$$T^v(t) = \frac{D(t)}{s} \quad (1)$$

$T^v(t)$ est le temps (variable) de déplacement pour l'heure de départ t , $D(t)$ est la longueur de la file d'attente (le nombre de véhicules) pour l'heure de départ t , et s la quantité de véhicules pouvant passer à chaque période de temps (capacité du goulet d'étranglement).

On peut écrire, si on pose que $r(t)$ est la fonction de taux de départ et \hat{t} l'heure la plus récente pour laquelle il n'y a pas de file d'attente (temps de déplacement nul), que :

$$D(t) = \int_{\hat{t}}^t r(u) du - s(t - \hat{t}) \quad (2)$$

Ce qui implique que :

$$\overset{\circ}{D}(t) = \frac{\partial D(t)}{\partial t} = r(t) - s \quad (3)$$

$\overset{\circ}{D}(t)$ étant la dérivée de $D(t)$ par rapport au temps soit la longueur instantanée de la file d'attente soit le nombre de véhicules qui viennent s'ajouter à la file d'attente au temps t .

Si on appelle t^* l'heure objectif d'arrivée et \tilde{t} l'heure de départ pour laquelle l'individu arrive en t^* , on a :

$$\tilde{t} = t^* - T^v(t) \quad (4)$$

Si un individu part en $t < t^*$, alors il arrive en avance à raison de $t^* - t - T^v(t)$, alors que s'il part en $t > t^*$, alors il arrive en retard de $t + T^v(t) - t^*$. On pose alors que :

$$C = \alpha(\text{travel time}) + \beta(\text{time early}) + \gamma(\text{time late}) + \text{toll} \quad (5)$$

α , β et γ sont des paramètres exogènes représentant les différents coûts unitaires du temps. Quant à la forme de cette fonction de coût de transport, on peut noter que des formes quadratiques ont été proposées et estimées (de Palma, Fontan, 2001).

b) Qualification de l'équilibre sans péage (demande inélastique)

Conformément à l'idée de Vickrey, l'équilibre du trafic est atteint quand aucun individu n'a d'incitation à modifier son heure de départ, c'est-à-dire qu'aucune modification de l'heure de départ ne peut réduire le temps de déplacement, soit le temps d'attente dans la file d'attente, si l'utilisateur considère les décisions d'heure de départ des autres usagers comme fixée (équilibre de Nash).

Si on pose que $\alpha > \beta$ (le coût unitaire du temps de déplacement est plus important que le coût unitaire du temps d'avance par rapport à t^*), il est alors possible de déterminer le taux de départ à l'équilibre :

$$r(t) = \begin{cases} s + \frac{\beta s}{\alpha - \beta} = \frac{\alpha s}{\alpha - \beta} & \text{pour } t \in [tq, \tilde{t}] \\ s - \frac{\gamma s}{\alpha + \gamma} = \frac{\alpha s}{\alpha + \gamma} & \text{pour } t \in [\tilde{t}, tq'] \end{cases} \quad (6.a.b)$$

où :

- tq est l'heure à laquelle la période de pointe commence (la file d'attente apparaît) ;
- tq' est l'heure à laquelle la période de pointe finit (la file d'attente disparaît).

L'intuition du résultat ci-dessus peut être donnée de la manière suivante. En cas de départ à une heure t inférieure à \tilde{t} , $r(t)$ doit être telle que le report de t d'une unité de temps occasionne un bénéfice marginal égal à son coût marginal. Dans ce cas, le bénéfice marginal est équivalent à la diminution du coût de l'avance soit

$\beta \left(1 + \frac{\overset{\circ}{D}}{s} \right)$, alors que le coût marginal est équivalent à la hausse du coût de trajet soit

$\alpha \frac{\overset{\circ}{D}}{s}$. A l'équilibre, on a donc :

$$\beta + \frac{\beta r(t) - \beta s}{s} = \frac{\alpha r(t) - \alpha s}{s} \quad (7)$$

d'où :

$$r(t) = \frac{\alpha s}{\alpha - \beta} \quad (8)$$

En cas de départ à une heure t supérieure à \tilde{t} , la démonstration est symétrique. La décision d'un t anticipé d'une unité de temps occasionne un bénéfice égal à la diminution du coût de retard mais occasionne un coût égal à l'augmentation du temps de trajet.

Si on cherche à déterminer tq , tq' et \tilde{t} , il suffit d'écrire que :

$$C(tq) = \beta(t^* - tq) \quad (9)$$

$$C(tq') = \gamma(tq' - t^*) \quad (10)$$

$$tq' - tq = \frac{N}{s} \quad (11)$$

$$C(tq) = C(tq') = c \quad (12)$$

L'équation (9) dit simplement que le premier individu à partir ne subit qu'un coût d'avance puisqu'il n'y a aucune congestion. L'équation (10) dit symétriquement que le dernier à partir ne subit qu'un coût de retard. L'équation (11) spécifie que la longueur de la période de congestion est simplement le nombre d'utilisateurs divisé par la capacité de l'infrastructure et l'équation (12) assure la condition de péréquation des prix du transport (ici uniquement des coûts). En combinant, ces quatre équations plus celle qui définit \tilde{t} : $\tilde{t} + T^v(t) = t^*$, on obtient :

$$tq = t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N}{s} \quad (13a)$$

$$tq' = t^* + \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N}{s} \quad (13b)$$

$$\tilde{t} = t^* - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \frac{N}{s} \quad (13c)$$

Par ailleurs, on a :

$$c = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N}{s} \quad (14)$$

On remarque d'ailleurs que le coût de transport ne dépend plus du temps de déplacement, mais uniquement des coûts d'avance et des coûts de retard.

Le schéma suivant peut résumer la démarche et les résultats obtenus :

Soit le coût de transport (14) multiplié par le nombre d'usagers. On peut alors calculer le coût marginal social d'un usager mais également la valeur de l'externalité de congestion, ATC étant le coût moyen :

$$MSC^e = \frac{\partial TC^e}{\partial N} = 2\delta \frac{N}{s} = 2ATC^e \quad (17)$$

$$CE^e = MSC^e - c = \delta \frac{N}{s} \quad (18)$$

$$ATC^e = TC^e / N = \delta \frac{N}{s} \quad (19)$$

Une remarque importante à faire est que le coût marginal d'un usager est indépendant de son choix d'heure de départ. Ceci s'explique par le fait que, en réponse à un usager marginal, les autres usagers ajustent leurs heures de départ de telle manière que la chronique temporelle des départ en incluant l'usager marginal soit indépendante du moment auquel part cet usager marginal.

Enfin, on peut remarquer que, compte tenu de la linéarité de la fonction de coût d'écart à l'objectif, on a :

$$TTC^e = SDC^e = \frac{\delta}{2} \left(\frac{N^2}{s} \right) \quad (20)$$

A l'équilibre, le coût total d'attente dans la file d'attente est égal au coût total des écarts par rapport à l'heure objectif.

c) L'optimum social

le raisonnement intuitif est le suivant :

- à l'optimum, l'infrastructure doit être utilisée à sa capacité tout au long de l'heure de pointe ; par conséquent $tq' - tq = N/s$;
- $r(t)$ ne doit pas dépasser s ;
- le SDC de la première et de la dernière personne doivent être équivalents puisque, dans le cas contraire, on pourrait transférer des usagers d'un bout à l'autre de l'heure de pointe pour réduire les coûts.

Par conséquent, à l'optimum social, le coût total de transport ne peut représenter que des coûts d'écart par rapport à l'objectif et ne peut être constitué de temps

d'attente dans la file d'attente. Par conséquent, à la différence de l'équilibre sans péage dans lequel le coût total est égal à la somme du SDC et du TTC, les deux étant égaux, le coût total à l'optimum est égal au SDC soit la moitié du coût total à l'équilibre sans péage :

$$TC^o = \frac{\delta}{2} \left(\frac{N^2}{s} \right) \quad (21)$$

2°) Demande élastique

D'après ADPL (1998) (p. 88) la considération d'une demande élastique ne change pas grand chose dans les considérations d'utilisation optimale de la capacité de transport mais devient particulièrement importante dans les considérations de choix de capacité optimale dans la mesure où la notion de demande latente de transport doit être considérée.

B. Le modèle de *bottleneck* à deux itinéraires (ADPL, 1990a)

L'idée simple de ce modèle est de dériver les résultats de l'équilibre dans le cas d'un réseau constitué de 2 itinéraires pour une même origine et une même destination. L'architecture reste celle du modèle structurel de congestion à la Vickrey (voir ci-dessus). On est donc toujours dans le cas d'un choix de N individus identiques ayant à faire deux décisions, l'une discrète d'itinéraire, l'autre continue d'heure de départ et l'arbitrage consiste à comparer le coût du temps dans le goulet et les coûts de l'écart par rapport à l'heure objectif d'arrivée. Equilibre non-stochastique ici : le coût total de déplacement dépend de la capacité des itinéraires, et non de l'affectation du trafic entre les 2 itinéraires. Bien sûr, l'équilibre de congestion est analysé ainsi que l'impact de différents types de péage. Le résultat remarquable est que le choix du régime de tarification n'influe pas sur le choix d'itinéraire (les usagers ne sont donc pas amenés à changer d'itinéraire en fonction du niveau ou du type de péage), mais joue par contre sur le choix d'heure de départ. Les gains d'efficacité liés à l'utilisation du péage viennent donc avant tout de la modification des heures de départ, plus étalées dans le temps.

1°) Hypothèses et définitions du modèle

Le raisonnement est très proche du modèle précédent, simplement, on introduit deux itinéraires $i = 1, 2$ de la manière suivante :

$$T_i(t) = T_i^f + \left(\frac{D_i(t + T_i^0)}{s_i} \right) \quad i = 1, 2 \quad (22)$$

Cette équation exprime simplement que le temps de transport total est la somme d'un temps « fixe » de transport qui représente le temps minimum de déplacement O-D (donc hors congestion) et d'un temps variable de transport T_i^v (terme de droite). $T_i(O)$ est le temps de déplacement de O à l'entrée du goulet ou de O au début de la file d'attente à l'entrée du goulet. La congestion arrive dès que le numérateur est strictement positif.

On suppose que $T_1^f < T_2^f$ (l'itinéraire 1 hors congestion est le plus intéressant en termes de temps de déplacement).

La fonction de coût est strictement identique à (5), simplement déclinée en fonction de l'itinéraire i . De la même manière, on utilisera l'expression de δ (voir 16) et :

$t_{q,i}$ l'heure de départ pour laquelle la congestion sur i commence ;

$t_{q',i}$ l'heure de départ pour laquelle la congestion sur i finit ;

$t_{n,i}$ l'heure de départ la plus précoce sur i pour une arrivée en t^* ;

$t_{n',i}$ l'heure de départ la plus tardive sur i pour une arrivée en t^* .

On a forcément :

$$t_{n,i} + T_i(t_{n,i}) = t^* - \Delta \quad (23)$$

et

$$t_{n',i} + T_i(t_{n',i}) = t^* + \Delta \quad (24)$$

¹ A vrai dire, l'heure d'arrivée est un créneau d'arrivée $[t^* - \Delta; t^* + \Delta]$

2°) L'équilibre sans péage

Proposition

- Pour $N \leq N^*$, seule la route 1 est utilisée et non congestionnée et :

$$N^* = 2\Delta s_1 \quad (25)$$

- Pour $N^* < N \leq N^{**}$, seule la route 1 est utilisée et congestionnée et :

$$N^{**} = 2\Delta s_1 + s_1 \frac{\alpha}{\delta} (T_2^f - T_1^f) \quad (26)$$

- Pour $N^{**} < N \leq N^{***}$, la route 1 est utilisée et congestionnée et la route 2 est utilisé et non congestionnée et :

$$N^{***} = 2\Delta(s_1 + s_2) + s_1 \frac{\alpha}{\delta} (T_2^f - T_1^f) \quad (27)$$

- Pour $N > N^{***}$, les 2 routes sont utilisées et congestionnées et l'utilisation de chaque route est donnée par :

$$N_1^e = \frac{(s_1 s_2)}{s_1 + s_2} \left[\frac{N}{s_2} + \frac{\alpha}{\delta} (T_2^f - T_1^f) \right] \quad (28a)$$

$$N_2^e = \frac{(s_1 s_2)}{s_1 + s_2} \left[\frac{N}{s_1} + \frac{\alpha}{\delta} (T_2^f - T_1^f) \right] \quad (28b)$$

Dans cette situation, le coût de déplacement individuel est :

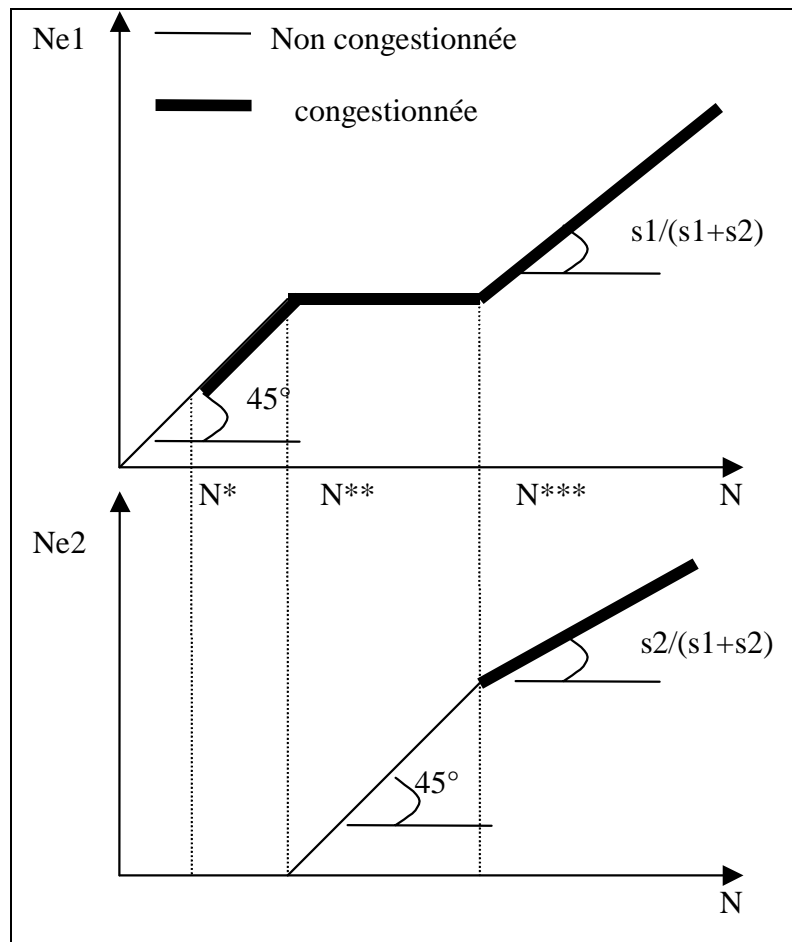
$$C^e = \alpha \left[\frac{s_1 T_1^f + s_2 T_2^f}{s_1 + s_2} \right] + \delta \left[\frac{N}{s_1 + s_2} - 2\Delta \right] \quad (29)$$

Par commodité, on pose :

$$\Gamma = \frac{s_1 T_1^f + s_2 T_2^f}{s_1 + s_2} \quad (30)$$

Un graphique figure ces résultats :

Figure 2 : Evolution de la congestion en fonction de N sur le modèle à deux itinéraires



La preuve intuitive de cette proposition peut être faite de la manière suivante :

- dans le cas où $N \leq N^*$, la route 1 sera non congestionnée même dans le cas où tous les usagers la prendraient car $N^* \leq 2\Delta s_1$, chaque usager subissant un coût de αT_1^f . Comme $T_2^f > T_1^f$, aucun usager ne changera pour la route 2 ;
- dans le cas où $N^* < N \leq N^{**}$: si tous les usagers choisissent la route 1, elle sera congestionnée car $N > 2\Delta s_1$. Chaque usager subit alors un coût égal à :

$$C^e = \alpha T_1^f + \delta \left[\frac{N}{s_1} - 2\Delta \right] \quad (31)$$

Comme $N \leq N^{**}$, $C_1^e \leq \alpha T_2^f$ et donc aucun usager ne choisira la route 2.

- Dans le cas où $N^{**} < N \leq N^{***}$: si N^{**} usagers choisissent la route 1 et $N - N^{**}$ usagers choisissent la route 2, la route 2 sera non congestionnée car $N - N^{**} < 2\Delta s_2$. Dans ce cas, chaque usager subit un coût égal à αT_2^f .
- Dans le cas où $N > N^{***}$, alors $N - N^{**} > 2\Delta s_2$ et la route 2 sera congestionnée. L'utilisation des itinéraires est déterminée par la condition d'équivalence des coûts $C_1^e = C_2^e$ où (cf. 28 et 29) :

$$\alpha T_1^f + \delta \left[\frac{N}{s_1} - 2\Delta \right] = \alpha T_2^f + \delta \left[\frac{N}{s_2} - 2\Delta \right] \quad (32)$$

Les coûts totaux dans chaque configuration sont équivalents à N fois le coût individuel, soit :

N	TC^e
$0 < N \leq N^*$	$\alpha T_1^f N$
$N^* < N \leq N^{**}$	$\alpha T_1^f N + \delta N \left[\frac{N}{s_1} - 2\Delta \right]$
$N^{**} < N \leq N^{**}$	$\alpha T_2^f N$
$N > N^{***}$	$\alpha T N + \delta N \left[\frac{N}{s_1 + s_2} - 2\Delta \right]$

Compte tenu de (32) dans le dernier cas où $N > N^{***}$, le temps d'attente maximum sur la route i est donné par :

$$Max T_i^v = \frac{\delta}{\alpha} \left[\frac{N_i^e}{s_i} - 2\Delta \right] \quad (33)$$

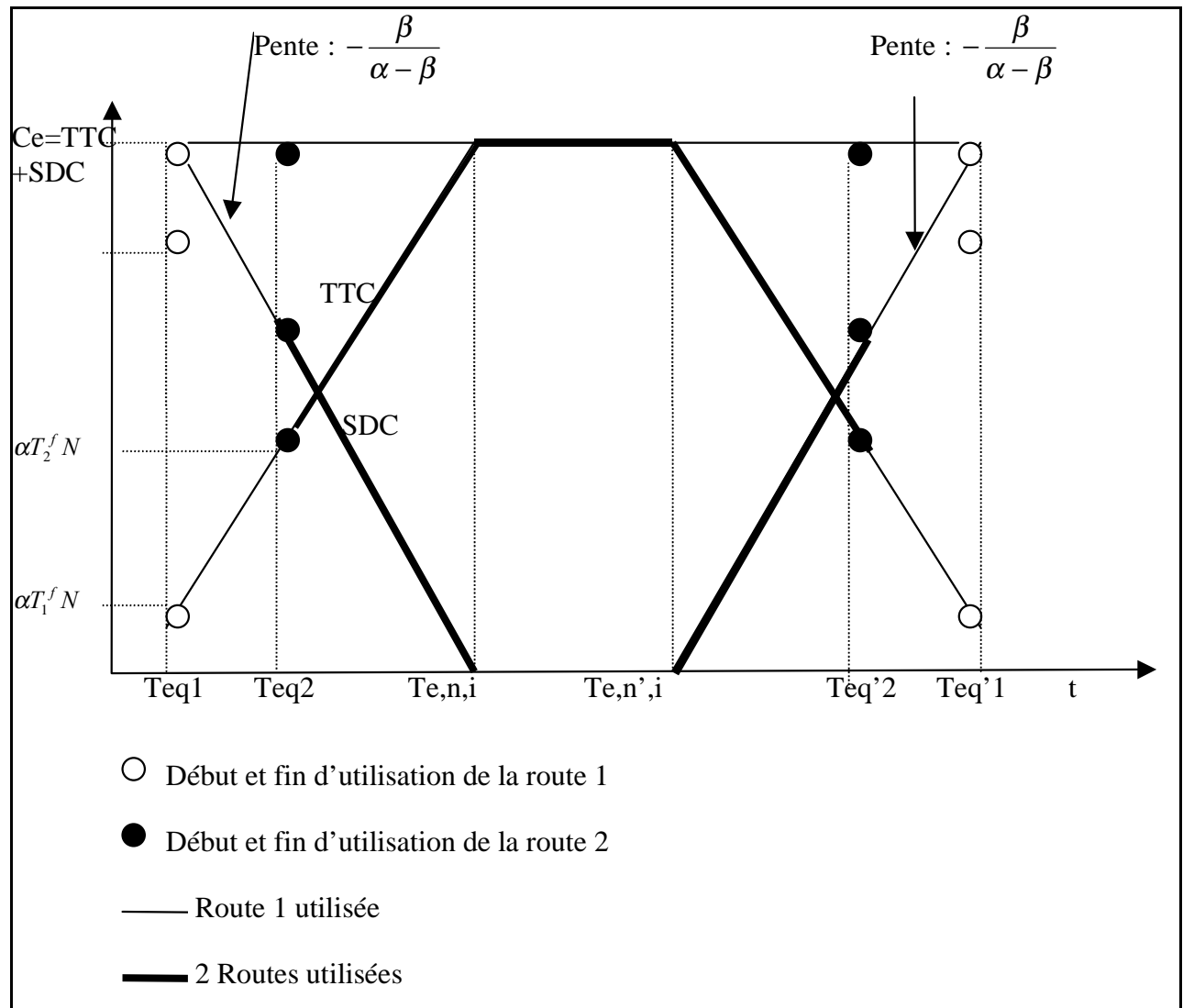
Cette expression est une fonction linéaire croissante de N_e/s , propriété observée empiriquement.

Les auteurs tirent de ces résultats un théorème qui fait le lien avec le premier principe de Wardrop.

THEOREME 1 : Dans le NTE, le principe de Wardrop (i.e. le temps de déplacement sur les routes utilisées sont inférieurs ou égaux aux temps de déplacement sur les routes non utilisées) tient à tout moment du temps.

Un graphique permet d'illustrer clairement le phénomène de l'hypercongestion (cas où $N > N^{***}$) :

Figure 3 : coût individuel pour $N > N^{***}$ dans le modèle à deux itinéraires



Au début, seule la route 1 est utilisée et le coût individuel est la somme du coût fixe pour rejoindre le goulet et du coût d'avance (SDC). Au fur et à mesure que l'heure de départ choisie avance, le temps de passage dans le goulet augmente tandis que le coût de l'avance diminue, et l'itinéraire 2 va être utilisé à son tour puisque que le temps de passage dans l'itinéraire 1 va devenir au moins équivalent au temps de

passage « hors congestion » dans l'itinéraire 2. Le temps de passage continue à s'accroître au fur et à mesure que l'heure de départ choisie est tardive, jusqu'à que l'on atteigne une heure à laquelle il n'y a plus de coût d'avance et l'utilisateur subit uniquement un coût de passage dans les goulets. Dès lors, le trafic s'écoulant, une heure de départ suffisamment tardive permettra un temps de passage plus faible dans le goulet mais sera compensé par un coût de retard. Compte tenu du principe de Wardrop, le coût individuel global restera constant quelle que soit l'heure de départ choisie.

Les expressions de $t_{q,i}^e$, $t_{q',i}$, $t_{n,i}$, $t_{n',i}$, heures de départ dites « critiques », sont conformes aux expressions déjà données par (11) et (13a.b.c.) dans le cas où $\Delta > 0$ et $T_i^f > 0$. Par ailleurs, comme on a un intervalle de réussite pour t^* , \tilde{t} , l'heure de départ pour laquelle l'individu arrive à l'heure fixée, se décompose en deux expressions selon le caractère précoce ou tardif du choix. On a donc :

$$t_{q,i}^e = t^* - \Delta - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \left(\frac{N_i^e}{s_i} - 2\Delta \right) - T_i^f \quad (34a)$$

$$t_{q',i}^e = t_{q,i}^e + \frac{N_i^e}{s_i} = t^* + \Delta - \frac{\beta}{\beta + \gamma} \left(\frac{N_i^e}{s_i} - 2\Delta \right) - T_i^f \quad (34b)$$

$$t_{n,i}^e = t^* - \Delta - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \left(\frac{N_i^e}{s_i} - 2\Delta \right) - T_i^f \quad (34c)$$

$$t_{n',i}^e = t^* + \Delta - \frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta + \gamma)} \left(\frac{N_i^e}{s_i} - 2\Delta \right) - T_i^f \quad (34d)$$

3°) L'optimum social (S0)

Le théorème 2 énonce que l'utilisation des itinéraires est identique pour le NTE et l'optimum social, et seul le coût total de déplacement est plus faible à l'optimum

Démonstration :

- dans le cas où $N < N^*$, tous les usagers utilisent la route 1, arrivent à l'heure objectif et subissent un coût de αT_1^f . Comme le coût marginal social et le coût

individuel d'un usager sur la route 2 sont plus importants, l'utilisation de la route 1 est la même qu'au NTE.

- dans le cas où $N^* < N \leq N^{**}$, les usagers utilisent la route 1 mais certains subissent un SDC. Si on suppose qu'un planificateur affecte des usagers à la route 2 quand N augmente tant que l'accroissement marginal du coût total lié à la route 1 est inférieur ou égal au coût individuel sur la route 2. Le principe est que le taux de départ $r(t)$ doit être égal à la capacité de l'itinéraire s durant la période de pointe. Comme l'heure de début de la pointe et l'heure de fin de la pointe sont déterminées de la même manière que dans le cas du NTE (Cf eqns 34a,b), les expressions de t_q^o et de t_q^* sont données respectivement par (34a) et (34b). C'est le correspondant du résultat mis en évidence par ADPL (1985) dans le cas du *bottleneck* simple.

En reprenant le même raisonnement que dans le cas d'un seul itinéraire (voir plus haut), il suffit de dire que le coût total à l'optimum n'est constitué que de coût d'écart par rapport à l'objectif et que le TTC est égal à 0 (hors temps fixe de transport). On

obtient alors pour l'itinéraire 1 :
$$TC_1^0 = \alpha T_1^f N_1^0 + \delta \frac{s_1}{2} \left[\frac{N_1^0}{s_1} - 2\Delta \right]^2 \quad (35a)$$

et, quand la route 2 commence à être utilisée, les usagers ne subissent pas de congestion et n'encourent que du coût fixe de déplacement, soit :

$$TC_2^0 = \alpha T_2^f N_2^0 \quad (35b)$$

Bien évidemment, du point de vue de l'optimum, le décideur public commencera à affecter des usagers à la route quand :

$$MC_1^0 / (N_1^0 = N) = MC_2^0 / (N_2^0 = 0) \quad (36)$$

La solution de cette équation est N^{**} donnée par (26). **L'utilisation des routes est identique pour le NTE et le SO tant que $N^* < N < N^{**}$, ce qui n'implique bien évidemment pas que les coûts soient les mêmes !**

- Dans le cas où $N^{**} < N < N^{***}$, N^{**} usagers utilisent la route 1 et $N - N^{**}$ utilisent la route 2 comme dans le NTE (il n'y a pas de SDC tant que $N - N^*$ inférieur ou égal à $2\Delta s_2$).
- Dans le cas où $N - N^{***}$, il y a du SDC sur la route 1 et la route 2 et donc :

$$MC_i^0 = \alpha T_i^f + \delta \left[\frac{N_i^0}{s_i} - 2\Delta \right] \quad i=1,2 \quad (37)$$

On a le même résultat : l'utilisation du réseau est identique à l'équilibre et à l'optimum.

Proposition 2 : Le taux de départ à l'optimum est simplement inférieur ou égal sur chaque itinéraire à la capacité de cet itinéraire dans le cas où le nombre d'usagers est inférieur ou égal à $2\Delta s_i$.

- Dans le cas où $N < N^{**}$, le TC à l'optimum est :

$$TC^0 = \alpha T_1^f N_1^0 + \alpha T_2^f N_2^0 + \delta \frac{s_1}{2} \left[\frac{N_1^0}{s_1} - 2\Delta \right]^2 + \delta \frac{s_2}{2} \left[\frac{N_2^0}{s_2} - 2\Delta \right]^2 \quad (38)$$

Sachant que l'usage des routes est identique à l'optimum et à l'équilibre, on peut remplacer la valeur ci-dessus par les expressions (28a,b). Au bout du compte on peut récapituler la valeur du coût total à l'optimum dans les différentes configurations :

Tableau : Récapitulatif des coûts totaux à l'optimum social

N	TC^0
$0 < N \leq N^*$	$\alpha T_1^f N$
$N^* < N \leq N^{**}$	$\alpha T_1^f N + \delta \frac{s_1}{2} \left[\frac{N}{s_1} - 2\Delta \right]^2$
$N^{**} < N \leq N^{***}$	$\alpha T_1^f N^{**} + \alpha T_2^f (N - N^{**}) + \delta \frac{s_1}{2} \left[\frac{N^{**}}{s_1} - 2\Delta \right]^2$
$N > N^{***}$	$\alpha T N - \frac{s_1 s_2}{2(s_1 + s_2)} \frac{\alpha^2}{\delta} (T_2^f - T_1^f)^2 + \frac{s_1 s_2}{2} \delta \left[\frac{N}{s_1 + s_2} - 2\Delta \right]^2$

L'économie de coût social est donc finalement, quand on passe de NTE à SO :

$$SS^0 = TC^e - TC^0 = \frac{N^2 \delta s}{2(s_1 + s_2)} \left[1 - \left(\frac{2\Delta(s_1 + s_2)}{N} \right) \right] + \frac{\alpha^2}{2\delta} \frac{s_1 s_2}{2(s_1 + s_2)} (T_2^f - T_1^f)^2 \quad (39)$$

Le premier terme du côté droit de l'équation représente l'économie de coût pour une seule route qui aurait une capacité $(s_1 + s_2)$, tandis que le second terme

représente l'effet de réseau qui donne un avantage supplémentaire à l'optimum par rapport à l'équilibre quand les temps de trajet fixes sur les deux itinéraires diffèrent.

3. Effets des différentes variables sur l'équilibre de congestion

A. Péage

1°) Péage variable en temps réel (décentralisation de l'optimum)

L'intuition concernant le niveau du péage optimal est assez simple : il suffit de fixer le niveau du péage en t de façon à ce qu'il soit égal au coût total de transport d'un usager arrivant en t . Dès lors, le péage est égal à la valeur de l'externalité de congestion à l'équilibre (voir 18) moins le SDC et éventuellement le temps fixe de transport. Le péage croît de manière uniforme de 0 en t_q jusqu'à un maximum en t^* , puis décroît linéairement jusqu'à 0 en $t_{q'}$. On a donc, en reprenant les notations du modèle à 2 itinéraires :

$$\tau_i^o(t) = \begin{cases} \delta \left[\frac{N_i^e}{s_i} - 2\Delta \right] - \beta(t^* - \Delta - t - T_i^f) & t \in [t_{q,i}, t^* - \Delta - t - T_i^f] \\ \delta \left[\frac{N_i^e}{s_i} - 2\Delta \right] - \gamma(t + T_i^f - t^* - \Delta) & t \in [t^* + \Delta - T_i^f, t_{q',i}] \end{cases} \quad (40a,b)$$

Bien évidemment, le gain d'efficacité sera d'autant plus faible que l'on s'éloignera du péage en temps réel.

2°) Péage par étape (step toll)

Le point commun des deux premiers types de péages est que le péage dissuade d'utiliser les itinéraires tarifés au profit des itinéraires plus longs, mais l'utilisation des itinéraires est peu affectée. Par ailleurs, les gains d'efficacité issus de ces péages sont très supérieurs aux gains issus d'un péage uniforme (dans le cas d'une demande inélastique).

On peut citer l'article de Laih (1994) qui établit qu'un péage optimal à n étapes peut diminuer au mieux de $n/(n+1)$ le coût total d'attente dans le *bottleneck* (un péage en une étape réduira d' $1/2$ le temps d'attente, un péage à deux étapes peut réduire

au plus de $2/3$ le temps d'attente, à 3 étapes de $3/4$, etc.). La valeur du péage optimal en 1 étape représente la moitié du montant maximum du péage continu.

B. Information routière

Les effets potentiellement positifs de l'information permettent le transfert des usagers vers des itinéraires (réallocation) ayant un coût de transport au moins inférieur à celui couramment utilisé (choix optimal, optimisation du trafic à l'échelle du réseau). Un certain nombre d'effets potentiellement négatifs de l'information sont soulignés dans la littérature (notamment Ben-Akiva *et al.*, 1991):

- phénomène de sursaturation (*oversaturation*) lié à trop d'information par rapport aux capacités cognitives des agents (abondance d'information ou trop faible connaissance du réseau pour pouvoir mettre à profit cette information).
- surréaction à l'information fournie (la congestion se déporte vers l'itinéraire conseillé). L'information peut en effet inciter les usagers à surréagir, en les conduisant à se reporter sur d'autres itinéraires trop fortement et à subir des coûts plus élevés par rapport à une situation où ils auraient emprunté l'itinéraire congestionné.
- concentration: l'information homogénéise les perceptions et donc les choix qui de fait se concentrent sur certains itinéraires

D'autre part, si la demande est élastique la demande latente conduit à un accroissement du nombre d'utilisateur (effet qui peut compenser l'effet réallocation) et conduire à un impact globalement négatif de l'information.

Il est nécessaire de distinguer clairement une tradition ADPL qui se fonde sur le modèle de *bottleneck* à 1 ou 2 itinéraires pour évaluer l'impact de l'information de la tradition Emmerink qui ne se fonde pas sur les modèles structurels de congestion et la fonction de coût à la Vickrey (à la ADPL).

1°) « Tradition ADPL »

Si ADPL (1991) est dans la lignée des ADPL sus-nommés (avec toutefois une capacité stochastique, soit une distribution de probabilité puis deux niveaux de capacité envisagés sur 2 itinéraires), en revanche, ADPL (1996b) présente une

approche assez différente en termes de surplus du consommateur et de comparaison de surplus selon les situations informationnelles. Les hypothèses sur la forme des fonctions de coût et de demande conditionnent les conclusions sur l'impact de l'information.

Dans ADPL (1991), le modèle est dérivé du modèle de Vickrey (1969) considérant donc toujours un choix de transport de N navetteurs, pour 1 déplacement identique entre 1 origine et 1 destination commune, avec 1 heure arrivée objectif. Le choix individuel porte sur le choix d'un itinéraire (parmi 2 itinéraires possibles) et d'une heure de départ. La fonction de coût de transport reste une fonction de coût « à la Vickrey ». Le modèle envisage l'existence d'un *bottleneck*. A l'équilibre, aucun automobiliste ne peut réduire son coût de transport en changeant d'itinéraire ou d'heure de départ. L'équilibre non-stochastique conclut que le coût total de déplacement dépend de la capacité des itinéraires, et non de l'affectation du trafic entre les 2 itinéraires. Le coût total de déplacement est indépendant du coefficient de temps de transport α mais dépend du coefficient du temps d'avance β et du coefficient du temps retard γ . En environnement stochastique, les agents sont supposés neutres au risque et minimisateurs de coût de transport espéré. Une probabilité π , constante dans le temps, porte sur le niveau de capacité d'un itinéraire ($\pi = 0$: forte capacité certaine). Le modèle est statique, c'est-à-dire que les agents sont informés suffisamment à l'avance pour pouvoir effectuer leur choix, ils sont informés définitivement (ce qui diffère d'une information en temps réel).

Sans information sur un itinéraire, l'augmentation de probabilité de capacité faible d'un itinéraire entraîne une probabilité croissante de déplacement longs et de temps de retard élevés. L'avance du temps de départ compense partiellement l'augmentation du coût de transport induit. Quand l'heure de départ est égale à l'heure d'arrivée objectif, le dernier navetteur assume la totalité de l'augmentation du coût de transport. Sans information sur deux itinéraires, l'affectation sur itinéraires ne dépend pas des capacités réelles des itinéraires, elle ne dépend donc pas de la corrélation des capacités des itinéraires. La valeur information est égale au coût espéré épargné pour l'agent informé par rapport au coût de transport des agents non informés. Plus il y a d'agents informés, plus l'avantage individuel tiré de

l'information décroît. Les agents informés tirent un avantage de l'augmentation du nombre d'agents non informés.

D'où le théorème suivant : en environnement stochastique, mais avec un nombre d'automobilistes déterminé, le coût total de déplacement en information parfaite est inférieur au coût total de déplacement sans information, donc, l'information publique accroît le bien-être.

Une information imparfaite correspond à un signal sur l'information probable. Les simulations montrent qu'un signal de mauvaise qualité qui n'apporte donc pas d'information plus fine, réduit l'efficacité. L'inefficacité de l'information de faible qualité sur un itinéraire est insensible à la qualité de l'information sur tout le réseau. Le signal de très bonne qualité est très difficile à produire.

Donc, si un automobiliste est informé, il peut profiter de l'information. Quand tous les automobilistes sont informés, l'information peut être contreproductive, surtout si l'information est imparfaite. Le résultat est plus fort si le coût de production de l'information est pris en compte. Il convient donc de faire attention, d'une part, à la distribution de l'information, d'autre part, à qui l'information est distribuée.

$$CM_{oyen} = \xi \left(\frac{N}{s} \right)^\eta \text{ (élasticité constante du coût) et demande isoélastique (} N = np^{-\varepsilon} \text{).}$$

Si on relâche l'hypothèse d'élasticité constante ou celle de demande isoélastique on peut parvenir à une situation où l'absence d'information est préférable à une information parfaite.

L'intérêt de l'approche ADPL est d'analyser le comportement d'usagers rationnels et utilitaristes répondant à de l'information (possibilité explorée par Khan, Rustichini (1993) qui étudient l'interaction entre des agents dans un environnement stochastiquement congestionné en termes d'équilibre de Cournot-Nash). Toutefois, dans l'article d'ADPL (1996b), l'approche est statique et non dynamique dans le sens où les modèles structurels de congestion à la Vickrey sont dynamiques (ils intègrent le choix d'itinéraire et d'heure d'utilisation). Dès lors, l'article d'ADPL (1999) examine l'effet de la fourniture d'information publique dans un cadre de modèle de *bottleneck* simple à 1 itinéraire. Dans ce modèle, la capacité et la demande sont

stochastiques dans le sens où elles peuvent varier d'un jour sur l'autre mais pas au cours d'une même journée. L'information porte donc sur les deux variables (demande et capacité). Par contre l'incertitude ne porte pas sur la technologie de congestion, qui est déterministe (s et $r(t)$). La demande est isoélastique au prix.

En résumé, l'information parfaite améliore le niveau de bien-être mais l'information imparfaite peut le dégrader de même que l'augmentation du nombre d'utilisateurs informés, l'efficacité étant mesurée par la réduction de l'espérance du coût total de transport.

Les régimes d'information possibles sont définis théoriquement conformément à la théorie des structures d'information (distribution de messages m conditionnelle aux états y de la nature), ce qui permet de distinguer la situation d'information nulle, d'information imparfaite et d'information parfaite. Chaque information peut donc être vue comme un raffinement de l'autre, conformément à la formalisation de Marshak et Misayawa (1968), les individus ayant une relation de préférence stricte au futur et à mesure que l'information « s'affine ».

Les résultats concernant le modèle simple de *bottleneck* sont les suivants :

- Théorème 1 : sous l'hypothèse que l'élasticité ETA du coût d'usage au ratio (N/s) est égale à 1 (autres hypothèses techniques importantes sur la forme des coûts), deux systèmes d'informations peuvent être totalement classés en termes d'efficacité. Si l'élasticité de la demande est strictement inférieure à 1, le système d'information le plus efficace génère un accroissement du surplus des consommateurs plus faible mais aussi une capacité optimale plus faible. Dans le cas où l'élasticité de la demande au prix est strictement supérieure à 1, le système d'information le plus efficace génère un plus fort accroissement du surplus et de la capacité optimale. Par contre, si ETA est supérieure à 1, ces résultats ne tiennent plus.
- Théorème 2 : a) L'information parfaite est plus efficace que l'information imparfaite (sous l'hypothèse que le coût d'usage soit une fonction croissante du temps passé dans la queue, et que l'on utilise une forme fonctionnelle puissance concernant le *schedule delay cost*) ; b) si l'élasticité de la demande est inférieure à 1 (resp. supérieure), alors la capacité optimale est plus faible dans le cas de

l'information parfaite que dans le cas de l'information imparfaite (sous l'hypothèse que le coût d'usage soit une fonction croissante du temps passé dans la queue et que le SDC soit linéaire par rapport à l'écart).

- Théorème 3 : a) un raffinement de l'information (à l'exception de l'information parfaite) n'améliore pas nécessairement l'efficacité (sous les mêmes hypothèses que le théorème 2) ; b) Si l'élasticité de la demande est strictement inférieure à 1 (resp. sup.), alors la capacité optimale n'est pas nécessairement plus faible (resp. plus forte) dans la situation d'information parfaite par rapport à la situation d'information imparfaite.

Le troisième théorème distingue l'approche statique de l'approche dynamique car, dans l'approche statique, un raffinement de l'information occasionne toujours un gain d'efficacité. Au contraire, dans l'approche dynamique, un raffinement d'une structure d'information imparfaite peut conduire à une perte sociale, soit accroître la congestion. Ceci les démarque de la tradition Emmerink, qui relève d'une approche statique selon ADPL, ce qui explique que, pour ces auteurs, la fourniture d'information soit toujours Pareto-améliorante.

2°) Tradition Emmerink

Dans le modèle d'Emmerink *et al* (1998), la demande est élastique et la capacité stochastique. Il y a connaissance commune de la distribution des coûts de transport en fonction des trafics, de la fonction de demande des autres usagers et de la probabilité de faible capacité (2 états : « 0 » avec haute capacité, probabilité (1-p) et « 1 » avec faible capacité, probabilité (p)). Il existe deux groupes d'usagers (Informés (I) et Non Informés (NI)).

Les résultats théoriques pour la fourniture de l'information dans le cas d'un itinéraire et d'une demande inverse linéaire sont les suivants :

- a) l'information ne change pas l'espérance d'usage de la route et ne dégrade pas le niveau de bien-être des usagers I ;
- b) l'info ne change pas l'espérance d'usage de la route pour les usagers NI et ne dégrade pas leur niveau de bien-être ;

- c) l'amélioration du bien-être social est positive ou nulle (n'excédant pas 40% du gain à l'optimum de premier rang atteint par un péage).

C. Hétérogénéité des usagers

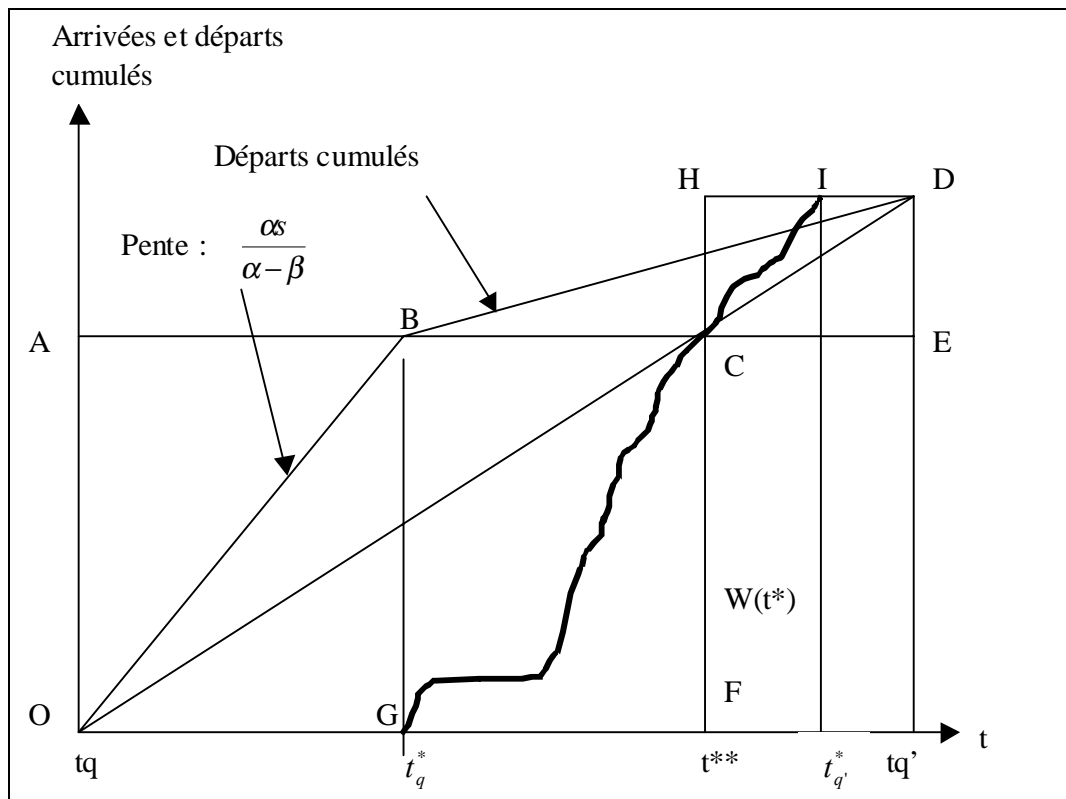
L'hétérogénéité des individus peut être introduite, dans le modèle de *bottleneck* simple, au travers des quatre variables exogènes du modèle : t^* , α (le coût unitaire du temps de transport), β (le coût unitaire de l'avance par rapport à t^*) et γ (le coût unitaire du retard par rapport à t^*).

1° Hétérogénéité des t^*

- si on suppose une distribution des t^* au cours du temps, le résultat notable, dans le cas où la distribution cumulée des heures d'arrivées souhaitées ne coupe qu'une seule fois la distribution des heures d'arrivées effectives, est que le coût total de l'avance est diminué, le coût total du retard est diminué, mais le coût total de temps de transport ne change pas par rapport au cas dans lequel tous les individus ont la même heure d'arrivée souhaitée t^* . Par conséquent, la congestion n'est pas affectée par un étalement des heures d'arrivées souhaitées, bien que cela permette de réduire les coûts d'écart par rapport à l'objectif (Hendrickson, Kocur, 1981). La figure 4 intègre $W(t^*)$, la distribution cumulée des heures d'arrivées souhaitées sur un intervalle $[tq^*, tq'^*]$ (voir figure 1). Le point d'intersection entre heures d'arrivées cumulées et heures de départ souhaitées cumulées est C, et le nombre d'usagers arrivant en avance et en retard est identique au modèle de base à t^* identique. Le coût du temps de transport est donc identique également, puisque t^{**} coïncide avec t^* dans le modèle de base (voir figure 1), mais le coût total de l'avance est réduit de l'aire GCFG et le coût total du retard de l'aire CHIC.
- Dans le cas où la distribution cumulée des t^* souhaitées coupe plus d'une fois la distribution des heures d'arrivées effectives, le coût total de transport est diminué, de même que le coût d'écart par rapport aux t^* souhaitées (ce qui est intuitif), et l'ampleur de la réduction dépend de la dispersion des t^* (ADPL, 1996b). Par conséquent, dans ce cas précis, il peut être souhaitable au niveau des politiques

publiques d'encourager la dispersion des heures de travail au niveau des employeurs si la congestion est sous-tarifée.

Figure 4 : Modèle de bottleneck simple dans le cas où t^* diffère



2°) Hétérogénéité des valeurs du temps

Dans le cas où t^* est identique et γ/β identique (α , γ et β diffèrent pour tous les individus), les usagers s'ordonnent spontanément (sans péage) en fonction du ratio α/β : ceux pour qui le ratio est le plus faible (plus haut coût *relatif* de l'écart) vont se déplacer à la période de pointe.

Dans le cas d'un péage optimal, les usagers s'ordonneront en raison du niveau *absolu* de β : ceux qui ont les plus fortes valeurs voyageront à la période de pointe.

3°) Hétérogénéité des revenus

Cet effet n'est pas considéré dans la littérature ADPL, sans doute parce que l'on considère habituellement que l'effet revenu est négligeable dans le choix modal, mais Jara-Diaz et Videla (1989) cherchent à estimer l'importance de cet effet. Sur la base d'une hiérarchie de revenus sur un échantillon, ils trouvent que le choix modal est deux fois plus sensible au revenu pour les « pauvres » que pour les « riches » (revenu

2 fois plus élevé) et 6 fois plus sensible au revenu que pour les « très riches » (3 fois le revenu des pauvres).

Section 2. Valeurs possibles pour les différents paramètres de la fonction de coût

1. Concernant la valeur du temps en termes absolus

On reprend ici les principales études sur la question de la valeur de α .

Valeurs du temps – sélection de diverses études

Auteur	Année	Base d'enquêtes	Méthode	Valeur	reques
Papon	1985	Alpes-Maritimes	Préférences révélées	160 Francs90 312 Francs90 53 Francs90 84 Francs90	Motif domicile-travail Motif affaires Motif privé Médiane
MVA	1987	GB	Préférences révélées et préférence déclarées	Entre 25 (trafic fluide) et 37 Francs85	Domicile-travail
Bradley	1985	GB			
INRETS	1988	IdF		60 Francs90 70 Francs90 185 Francs90	Motif personnel Motif domicile-travail Motif professionnel
MATISSE	1988	France		71 Francs90	Voiture particulière
Suzuki <i>et al</i>	1989	Japon	Prix de transfert et préférences déclarées	entre 115 et 135 Francs85 95 141 Francs85	Tous motifs Motif Domicile-travail et professionnel Personnel
NEI	1990	Pays-Bas	Préférences révélées Préférences déclarées Préférences révélées Préférences déclarées	97 Francs85 25 Francs85 52 Francs85 24 Francs85	Motif professionnel Motif non professionnel Motif professionnel Motif non professionnel
CETUR	1993	Marseille Grenoble		De 30 à 60 Francs90	Suivant motif
Henscher	1995	Australie		4,65 USD95 7,78 USD95 10,10 USD95	Voiture particulière motif domicile-travail Voiture particulière motif professionnel Urbain motif professionnel
Leurent	1997			60,2-70,3 Francs97/km	
Ségonne	1998	Urbain	Modèle prix-temps	Moyenne : 144,5 Francs98/km Médiane : 78,14 Francs98/km Moyenne : 113,1 Francs98/km Médiane : 58 Francs98/km Moyenne : 127,5 Francs98/km Médiane : 62,5 Francs98/km	Heure de pointe matin Heure moyenne Heure de point soir
			Modèle logit	Moyenne : 64,6 Francs98/km Médiane : 57,4 Francs98/km Moyenne : 64,2 Francs98/km Médiane : 47,1 Francs98/km Moyenne : 69,2 Francs98/km Médiane : 50,0 Francs98/km	Heure de pointe matin Heure moyenne Heure de point soir

Valeurs du temps : recommandations officielles

Institution	Date	Pays	Valeur	Méthodes de détermination	
Direction des Routes	1986	France	47F90	Valeur tutélaire	
			31	Valeurs révélées	
			49	Sans bonus Avec bonus	
Circ routes (1998)	1998	France	74F94 /h veh. 193F94	VL + malus incofort PL et autocars	
BOITEUX (2001)	1998	France	10,5 -13€	Prof (61%-85%)	
			Urbain	9,5 (France)-11,6€ (IdF)	Dom-travail (55% du coût salarial et 77% du salaire brut)
				5,2-6,4€	Autres (30%-42%)
				7,2-8,8€	Moyenne si pas de motifs (42%-59%)
			Interurbain	8,4€/h	d<50 km
		vdt = (d/10+50).1/6,56	50<d<400		
		13,7€	d>400		

2. Concernant la hiérarchie des valeurs du temps dans la fonction de coût à la Vickrey

Le travail de base sur la hiérarchie des valeurs du temps revient à Small (1982), qui estime de manière économétrique que $\gamma > \alpha > \beta$, avec $\gamma/\alpha > 1 > \beta/\alpha$.

Le tableau suivant résume les principales études recensées :

Principales études traitant de la mesure statistique de α , β et γ (coûts du temps de transport, de l'avance et du retard)

Auteurs	D ate	Méthode	Base d'enquêtes	Résultats
Small	1982	Préférences déclarées	San Francisco	$\beta/\alpha = 0,64$ $\gamma/\alpha = 1,03$
Fargier (83)	1983	Préférences déclarées et préférences révélées	Paris	$\beta/\alpha \in [0,1;0,2]$ et $\gamma/\alpha \in [0,17;0,3]$
De Palma, Roachat	1995	Préférences déclarées (n=651)	Genève	$\beta/\alpha = 0,327$ et $\gamma/\alpha = 2,69$
Noland, Small	1995	Survey/Logit	Los Angeles	$\beta/\alpha = 0,97$ et $\gamma/\alpha = 1,31$
De Palma, Khattak, Gupta	1997	Préférences déclarées et préférences révélées (n=1218)	Bruxelles	Sens domicile-travail Révélées : $\beta/\alpha = 0,38$ et $\gamma/\alpha = 1,03$ Déclarées : $\beta/\alpha = 0,41$ et $\gamma/\alpha = 1,23$ Sens travail-domicile Révélées : $\beta/\alpha = 0,42$ et $\gamma/\alpha = 0,98$ Déclarées : $\gamma/\alpha = 1$
De Palma, Fontan	2001			$\beta/\alpha = 0,5$ et $\gamma/\alpha = 2,5$

Choix de calibrage expérimental des jeux de congestion et éléments conclusifs

Les faits stylisés concernant les modèles structurels de congestion étant à présent clairement isolés, il convient de faire quelques recommandations quant au calibrage des expériences à venir.

- le coût fixe de transport doit être nul (Tf)
- $\gamma > \alpha > \beta$ avec $\frac{\gamma}{\alpha} \in [1;4]$ et $\frac{\beta}{\alpha} \in [1/4;1]$

1. Calibrage entre N et s le nombre d'usagers présents en période de pointe et la capacité de l'infrastructure

Concernant N/s :

- 1) compte tenu des simulations diverses faites (Ben-Akiva, *et al.*, 1986 ; ADPL, 1990a ; ADPL, 1993b)² ;
- 2) compte tenu du fait que, *de facto*, la période de pointe dure au plus 3 heures dans la plupart des grandes agglomérations pour les déplacements urbains majoritairement domicile-travail (par conséquent, empiriquement N/s environ égal à 3) ;
- 3) enfin, compte tenu du fait que l'on constate que la vitesse moyenne passe (CGP, 1994) de 50km/h en moyenne en milieu urbain quand le taux de saturation de la voirie est inférieur à 40% à 15 km/h quand le taux de saturation de la voirie est de 1, ceci suggère une multiplication par trois des temps de parcours quand la voirie est saturée totalement par rapport à un état fluide. Dès lors, il semble réaliste d'adopter un ratio de 0.25 concernant le rapport entre capacité et nombres d'usagers.

Le jeu de paramètres suivants correspond par conséquent au calibrage expérimental des jeux à venir dans le chapitre 2, quand cela est possible :

² ADPL (1993b) : 1 itinéraire : $Ne/s = 2.5$ (trafic à l'équilibre sur capacité) ; ADPL (1990a) : 2 itinéraires, $s1=8000$, $s2=3000$ et $N=22000$; Ben-Akiva *et al.* (1986) : 1 ou 2 itinéraires, $s1=8000$ ($s2=3000$), $N=27000$.

	Jeu de paramètres n°1	Jeu de paramètres n°2
N	4	16
S	1	4

2. Calibrage de la fonction de coût à la Vickrey

- Compte tenu des valeurs du temps retenues officiellement dans le rapport Boiteux (CGP, 2001), on recommande d'utiliser une plage pour α comprise entre 8 et 14 euros par heure³ (valeur du temps de transport) avec une valeur focale de **10 euros par heure** (la moyenne de la plage précédente est de 11 sur une distribution uniforme, mais cette valeur est proche des recommandations officielles concernant l'Ile-de-France en urbain, alors que pour la province, le rapport Boiteux recommande 9,5 euros par heure pour α). Notons toutefois que ces valeurs restent faibles par rapport aux valeurs de la plupart des grands pays européens, l'échelle variant de 10 euros à 17 euros.
- compte tenu des études diverses sur le coût du retard et le coût de l'avance, on recommande d'utiliser un ratio $\beta/\alpha = 0,5$ soit, compte tenu de la valeur focale de α une **valeur de β de 5 euros par heure d'avance** et un ratio $\gamma/\alpha = 2,5$ soit, une valeur de γ **de 25 euros par heure de retard**.

Concernant l'hétérogénéité des usagers, celle-ci se faisant d'après les travaux théoriques mentionnés *a priori* sur le ratio β/α , deux jeux de paramètres sont recommandés :

	Jeu de paramètres n°1	Jeu de paramètres n°2
β (euros par h)	3	7
α (euros par h)	10	10

³ On rappelle que α est interprété comme le coût de transport en temps pour des déplacements domicile-travail en milieu urbain. Si l'on cherchait à parler d'interurbain en domicile travail, α dépendrait des distances de déplacement et serait compris entre 8,4 euros par heure pour une distance $d < 50$ km jusqu'à 13,7 euros pour $d > 400$. Ces valeurs sont des moyennes quel que soit le motif de déplacement.

Conclusion du chapitre 1

Le modèle de base développé par ADPL a une prédiction théorique claire qui montre que la congestion se constitue linéairement et se dissipe de la même manière à une vitesse qui dépend du rapport entre coût de l'avance et coût du retard et de la capacité de l'infrastructure. Il existe donc bien un équilibre de congestion sous-optimal qui résulte d'un défaut de coordination des décisions des usagers. A ce titre, le péage est un moyen de pallier cette défaillance de coordination. Par ailleurs, l'information routière en temps réel est susceptible d'améliorer la situation si le niveau d'information est suffisant et si le nombre d'usagers informés n'est pas trop important. L'hétérogénéité des usagers est également susceptible de réduire la pression sociale sur l'utilisation des infrastructures de transport. Compte tenu des données disponibles actuellement sur les coûts du temps résultant de nombreuses études, nous choisissons alors de tester expérimentalement les modèles structurels de congestion en retenant deux jeux de paramètres des coûts du temps, mais également deux tailles de groupes respectant le même ratio entre capacité et nombre d'usagers susceptibles d'être en concurrence dans leurs choix d'infrastructure.

Chapitre 2. Les modèles de base : Un jeu de coordination à 1 ou 2 itinéraires

Introduction du chapitre 2

Ce chapitre a pour objectif de présenter les deux modèles théoriques de base qui décrivent la situation expérimentale testée en premier lieu. Tout d'abord, un modèle archétypal, dans lequel les individus choisissent leur heure de départ et utilisent un même itinéraire dans le cadre d'un trajet domicile –travail, est développé. Dans ce modèle, tous les usagers ont les mêmes préférences (ils sont homogènes) et ont donc la même fonction de coût du temps à la Vickrey. Les paramètres donnés à la fin du chapitre 1 ont été utilisés pour calibrer ces coûts. Ce modèle prédit que les décisions du groupe d'usagers sont très sensibles au rapport entre coût du temps d'avance et coût du temps de retard. En fonction de la valeur de ce rapport, deux types de configurations de jeux sont possibles : un jeu de coordination dans lequel il y a une multiplicité d'équilibres de Nash en stratégies pures, ces équilibres étant optimaux au sens de Pareto, et un jeu dans lequel il n'y a pas d'équilibre de Nash en stratégies pures et seulement des équilibres en stratégies mixtes, ces équilibres étant sous-optimaux. Ce jeu est ensuite testé expérimentalement. Les résultats tendent à confirmer les prédictions théoriques, bien que la congestion soit légèrement moins importante que celle prédite dans le modèle.

Dans un deuxième temps, un modèle comparable avec deux itinéraires est développé puis testé expérimentalement. L'équilibre du modèle dépend du niveau de péage du second itinéraire : plus le péage est élevé, plus la congestion sur l'itinéraire gratuit est forte, les usagers préférant risquer de subir des pertes de temps plutôt que de s'acquitter d'un péage. Ces prédictions ne sont pas totalement confirmées par les résultats expérimentaux. Le choix d'heures de départ n'est pas significativement modifié par l'ampleur du péage. Toutefois, le péage permet d'étaler la congestion au cours du temps et joue un rôle clairement dissuasif sur l'usage d'une infrastructure.

Section 1. Le jeu de coordination à n usagers homogènes utilisant 1 itinéraire

1. Présentation du modèle théorique

Nous proposons dans cette section un modèle discret sur la problématique des transports à n usagers homogènes utilisant un unique itinéraire sur lequel il y a un risque de congestion. Ce modèle nous permet, d'une part, d'étudier les comportements stratégiques des usagers et, d'autre part, de caractériser des prédictions théoriques aux comportements observés dans les expériences étudiées dans le point 2.

Notre modèle structurel de congestion analyse les déplacements domicile-travail quotidiens entre une origine et une destination communes. Nous supposons ici que l'heure d'arrivée fixée comme objectif est identique pour tous les usagers. Au-delà du coût horaire lié au temps pris par le déplacement, un coût lié au retard ou à l'avance par rapport à l'objectif va être ajouté au coût de transport total de chaque usager. Dans un tel cadre, l'objectif de chaque usager est de choisir une période de départ qui minimise son coût total de transport.

L'arbitrage des usagers entre les coûts liés au temps de transport, les coûts de retard et les coûts d'avance peut entraîner une congestion sur l'itinéraire, résultant d'un défaut de coordination. Dans le modèle présenté ici, la représentation de la congestion qui peut se développer sur l'itinéraire dérive de la conception de Vickrey (1969). Plus précisément, la congestion est décrite en terme de goulet d'étranglement : une infrastructure routière définit un débit maximum de passage de véhicules. Si le taux d'arrivée des véhicules sur l'itinéraire devient supérieur au débit théorique, alors une file d'attente se forme. Cette file d'attente va se répercuter sur plusieurs périodes puisque le débit définit le nombre d'usagers maximal pouvant passer à chaque période. En ce sens, notre modèle de congestion sera dynamique, le trafic d'une période étant directement lié au trafic des périodes précédentes autant qu'au

taux de départ sur la période courante. L'objectif du modèle est d'arriver à une qualification de l'équilibre de congestion sans péage et d'évaluer les coûts totaux subis par les usagers (coûts liés au temps de transport et pénalités d'avance ou de retard).

L'exposition du modèle et des résultats théoriques est organisée de la manière suivante. Dans le paragraphe suivant nous présentons le problème de congestion à n usagers homogènes utilisant un seul itinéraire en le modélisant en détail sous forme de jeu stratégique. Dans le paragraphe B, nous définissons les prédictions théoriques envisagées : les équilibres de Nash en stratégies pures, les équilibres de Nash en stratégies mixtes, et les optima sociaux. Le paragraphe C illustre ces prédictions théoriques au travers de quelques exemples. Enfin, les résultats théoriques obtenus avec les paramètres utilisés dans les différentes expériences étudiées dans le point 2 sont présentés dans le paragraphe D.

A. Description du jeu

Le modèle considère le choix de transport de n individus effectuant un déplacement domicile-travail entre une origine et une destination communes. Ils ont un objectif d'heure d'arrivée donné. Le temps de déplacement est un temps variable dépendant de la demande de trafic et de la capacité de la route (ou débit théorique). Le modèle théorique présenté ici est développé, contrairement aux modèles existants sur la problématique des transports, en temps discret. De plus, nous considérons un ensemble discret d'usagers afin de permettre l'analyse expérimentale.

Formellement, nous considérons un ensemble $N = \{1, \dots, n\}$ d'usagers (ou joueurs). Chaque usager $i \in N$ choisit une période de départ

$$t_i \in T = \{t_{\min}, \dots, t^* - 1, t^*, t^* + 1, \dots, t^{\max}\}, \quad (1)$$

Pour se rendre de son domicile à son lieu de travail, où t^* est la période d'arrivée objectif, commune à l'ensemble des usagers. Au plus tôt, chaque usager peut donc partir à la période t_{\min} , et au plus tard, chaque usager peut partir à la période t^{\max} . Les périodes de départ sont donc distribuées de manière discrète entre la période t_{\min} et la période t^{\max} . La période t_i choisie par l'usager i est également appelée stratégie pure de l'usager i . Un profil de stratégies pures, noté $\mathbf{t} = (t_1, \dots, t_n) \in T^n$, est un vecteur de stratégies pures, une pour chaque usager.

Afin de prendre en compte des choix éventuellement aléatoires des usagers, nous devons également définir les stratégies mixtes. De telles stratégies sont des distributions de probabilités sur l'ensemble des stratégies pures, c'est-à-dire, des distributions de probabilités sur l'ensemble des périodes de départ possibles. Ainsi, une stratégie mixte de l'utilisateur i est une distribution de probabilité $\sigma_i \in \Delta(T) = \{p \in \mathfrak{R}^m : \sum_j p_j = 1\}$, où $m = |T|$ est le nombre de périodes de départ possibles. La valeur $\sigma_i(t_i)$ est donc la probabilité que l'utilisateur i choisisse la période de départ $t_i \in T$. Notons également $\sigma(\mathbf{t}) = \prod_{i \in N} \sigma_i(t_i)$ la probabilité que le profil de stratégies pures $\mathbf{t} = (t_1, \dots, t_n)$ soit choisi par les usagers.

Le problème de décision des usagers caractérise un jeu dans le sens où leurs coûts vont dépendre non seulement de leur propre décision, mais également des décisions des autres usagers. Afin de caractériser précisément ces coûts en fonction de l'ensemble des décisions de période de départ de tous les usagers, nous définissons les variables suivantes :

Soit $r(t | \mathbf{t}) = |\{i \in N : t_i = t\}|$ le nombre de départs en période t étant donné le profil de stratégies pures $\mathbf{t} = (t_1, \dots, t_n)$. Ainsi, $r(t | \mathbf{t})$ est le nombre d'utilisateurs qui ont choisi la stratégie pure t . La congestion à la période t est alors définie récursivement de la manière suivante. La congestion à la période t_{\min} est égale à $D(t_{\min} | \mathbf{t}) = r(t_{\min} | \mathbf{t})$, et pour tout $t > t_{\min}$ la congestion à la période t est égale à :

$$D(t | \mathbf{t}) = \max\{0, D(t-1 | \mathbf{t}) - s\} + r(t | \mathbf{t}) \quad (2)$$

où $s \in \mathfrak{N}^*$ est la capacité d'absorption de la route par période, c'est-à-dire, le nombre de véhicules que le goulet peut supporter sans qu'une file d'attente se développe. La congestion à la période t dépend donc à la fois du taux de départ de la période t et des taux de départ des périodes avant la période t . La valeur de $\max\{0, D(t-1 | \mathbf{t}) - s\}$, aussi appelée reliquat sur la route en période t , est le nombre d'utilisateurs non absorbés par la route en période t .

Le temps de transport d'un utilisateur $i \in N$ partant en période t , étant données les périodes de départ $\mathbf{t}_i = (t_1, \dots, t_{i-1}, t_{i+1}, \dots, t_n)$ des autres usagers, est donné par :

$$T(t | \mathbf{t}_i) = \max\{1, D(t | t, \mathbf{t}_i)/s\} \quad (3)$$

A partir de ce temps de transport, il est possible d'associer le coût de transport de l'utilisateur $i \in N$ partant en période t , étant données les périodes de départ \mathbf{t}_i des autres usagers, de la manière suivante :

$$C(t | \mathbf{t}_i) = T(t | \mathbf{t}_i) + \beta \max\{0, t^* - (t + T(t | \mathbf{t}_i))\} + \gamma \max\{0, (t + T(t | \mathbf{t}_i)) - t^*\} \quad (4)$$

où $\gamma > 1 > \beta > 0$ sont des paramètres exogènes représentant les différents coûts individuels unitaires de temps. Le temps de transport de l'utilisateur, $T(t | t_i)$, est le coût horaire lié au temps pris par le déplacement (coût d'opportunité du temps et coût privé lié au déplacement). A ce coût s'ajoute un coût lié au temps d'avance de l'utilisateur et un coût lié au temps de retard de l'utilisateur : la valeur de $\max\{0, t^* - (t + T(t | t_i))\}$ représente le temps d'avance de l'utilisateur i et la valeur de $\max\{0, (t + T(t | t_i)) - t^*\}$ représente son temps de retard. Lorsque le paramètre β (respectivement, γ) augmente alors le coût lié au temps d'avance (respectivement, au temps de retard) augmente. Les inégalités $\gamma > 1 > \beta$ signifient que les coûts liés au temps de retard sont supérieurs aux coûts de transports qui sont eux mêmes supérieurs aux coûts liés au temps d'avance. Chaque usager sera donc confronté à un arbitrage entre le temps de trajet et la ponctualité.

Le jeu de congestion est ainsi entièrement défini par l'ensemble des usagers, N , l'ensemble des stratégies pures possibles de chaque usager, $T = \{t_{\min}, \dots, t^* - 1, t^*, t^* + 1, \dots, t^{\max}\}$, et la fonction du coût, C , elle même caractérisée par les paramètres β et γ . L'ensemble de ces données caractérisent un jeu sous forme normale (aussi appelé jeu sous forme stratégique). Dans le paragraphe suivant nous présentons les concepts standards de la théorie des jeux permettant de spécifier les stratégies individuellement et/ou collectivement optimales des usagers.

B. Equilibres de Nash et optima sociaux

Un équilibre de Nash en stratégies pures du jeu de congestion présenté dans le paragraphe précédent est un profil de stratégies pures, c'est-à-dire une décision de période de départ pour chaque usager, tel qu'aucun des usagers n'a intérêt à dévier unilatéralement de sa stratégie. En d'autres termes, aucun usager ne peut diminuer son coût total en choisissant une période de départ différente étant données les périodes de départ choisies par les autres usagers.

Formellement, un équilibre de Nash en stratégies pures est un profil de stratégies pures $\mathbf{t} \in T^n$ tel que pour tout usager $i \in N$ et toute stratégie pure $t' \in T$ de l'utilisateur i , l'inégalité suivante est vérifiée :

$$C(\mathbf{t} \mid \mathbf{t}_{-i}) \leq C(t' \mid \mathbf{t}_{-i}) \quad (5)$$

Un équilibre de Nash peut également être défini en termes de stratégies mixtes. Comme nous le verrons dans les paragraphes suivants, les équilibres de Nash en stratégies mixtes sont nécessaires à la détermination d'équilibres symétriques et à la caractérisation d'une prédiction théorique pour des paramètres où il n'existe aucun équilibre en stratégies pures. Par ailleurs, les résultats expérimentaux montreront que les sujets ne semblent pas déterminer leurs décisions de période de départ de manière déterministe.

Lorsque les usagers utilisent des stratégies non déterministes, leurs coûts seront également aléatoires. Plus précisément, étant donné un profil de stratégies mixtes $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_n) \in [\Delta(T)]^n$, le coût espéré de l'utilisateur i est égal à :

$$C(\sigma_i \mid \sigma_{-i}) = \sum_{t \in T} \sigma(t) C(t_i \mid \mathbf{t}_{-i}) \quad (6)$$

Un équilibre de Nash en stratégies mixtes est alors défini par un profil de stratégies mixtes $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ tel que pour tout usager $i \in N$ et toute stratégie $\sigma'_i \in \Delta(T)$, l'inégalité suivante soit vérifiée :

$$C(\sigma_i \mid \sigma_{-i}) \leq C(\sigma'_i \mid \sigma_{-i}). \quad (7)$$

Le coût espéré de l'utilisateur i partant à la date t , étant données les stratégies mixtes σ_{-i} des autres usagers, est donné par :

$$C(t \mid \sigma_{-i}) = \sum \sigma_{-i}(\mathbf{t}_{-i}) C(t \mid \mathbf{t}_{-i}), \quad (8)$$

$$t_j \in T$$

où $\sigma_{-i}(t_i) = \prod_{j \neq i} \sigma_j(t_j)$. Il est bien connu que, de manière équivalente, un profil de stratégies mixtes $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ constitue un équilibre de Nash si :

$$C(t | \sigma_{-i}) = C(t' | \sigma_{-i}), \quad \text{pour tout } t, t' \in \text{supp}(\sigma_i) \quad (9)$$

$$\text{et} \quad C(t | \sigma_{-i}) \leq C(t' | \sigma_{-i}), \quad \text{pour tout } t \in \text{supp}(\sigma_i) \text{ et } t' \notin \text{supp}(\sigma_i) \quad (10)$$

où $\text{supp}(\sigma_i) = \{t \in T : \sigma_i(t) > 0\}$ est le support de la stratégie mixte σ_i , c'est-à-dire, l'ensemble des périodes de départs choisies avec une probabilité strictement positive par l'utilisateur i lorsqu'il utilise la stratégie mixte σ_i .

Nous définissons maintenant les décisions collectivement optimales (ou optima sociaux), c'est à dire les profils de stratégies permettant de minimiser la somme des coûts subis par l'ensemble des usagers. Formellement, un profil de stratégies collectivement optimal est un profil de stratégies (pures) $t = (t_1, \dots, t_n) \in T^n$ tel que pour tout autre profil de stratégies pures $t' = (t'_1, \dots, t'_n) \in T^n$, l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\sum_{i \in N} C(t_i | t_{-i}) \leq \sum_{i \in N} C(t'_i | t'_{-i}) \quad (11)$$

Avant de présenter les équilibres de Nash et les profils de stratégies collectivement optimaux des jeux de congestion mis en application en laboratoire, nous présentons dans le prochain paragraphe des exemples de jeux de congestion et de profils de stratégies formant un équilibre de Nash et/ou un optimum collectif.

C. Exemples

Dans ce paragraphe nous étudions en détail les méthodes de résolution et les particularités des jeux de congestion au travers de quelques exemples : les jeux de congestion à deux usagers, et les jeux de congestion avec un nombre quelconque d'usagers mais en posant des restrictions supplémentaires sur les paramètres de la fonction de coût.

1°) Deux usagers

Les jeux de congestion étudiés ici sont essentiellement des jeux de coordination.

Commençons, à titre d'illustration, par considérer les jeux de congestion à deux usagers. De tels jeux permettent d'exposer les particularités principales des jeux de congestion plus généraux. Par ailleurs, les méthodes de résolution utilisées dans les jeux plus généraux et dans les jeux mis en application en laboratoire dans la section 312 sont les mêmes mais nécessitent, étant donnée la complexité

technique du problème, l'utilisation de valeurs numériques et de programmes informatiques de calculs.

Supposons que la capacité d'absorption de la route soit égale à $s = 1$ et que l'ensemble des périodes de départ possibles soit égal à $T = \{t^*-2, t^*-1\}$. Le jeu de congestion sous forme normale peut alors être représenté par le tableau suivant, où le premier usager choisit une ligne et le deuxième choisit une colonne. Dans ce tableau, chaque case correspond à une issue possible du jeu. Le nombre de gauche de chaque case donne le coût total subi par le premier usager, et le nombre de droite donne le coût total subi par le deuxième usager.

		Usager 2	
		t^*-2	t^*-1
Usager 1	2	$(2 ; 2)$	$(1 + \beta ; 1)$
	1	$(1 ; 1 + \beta)$	$(2 + \gamma ; 2 + \gamma)$

Étant données les restrictions sur les paramètres ($\gamma > 1 > \beta > 0$), nous constatons facilement qu'il existe exactement deux équilibres de Nash en stratégies pures : (t^*-2, t^*-1) et (t^*-1, t^*-2) avec des coûts respectifs $(1 + \beta ; 1)$ et $(1 ; 1 + \beta)$. En effet, dans ces deux configurations aucun usager ne peut diminuer son coût en changeant de période de départ étant donnée la période de départ choisie par l'autre usager. Ainsi, aux équilibres de Nash en stratégies pures, chaque usager choisit une période de départ différente.

Comme dans le jeu bien connu de la « bataille des sexes », il n'est pas facile d'expliquer comment les joueurs aboutissent à un équilibre de Nash. Au delà du problème de l'existence de plusieurs équilibres de Nash, il existe un conflit d'intérêt entre les joueurs sur le choix d'un équilibre de Nash puisque les coûts sont plus faibles à l'équilibre pour un usager partant à la période t^*-1 que pour un usager partant à la période t^*-2 . De plus, et contrairement au jeu de la « bataille des sexes », les équilibres en stratégies pures du jeu de congestion sont asymétriques, ce qui complique encore d'avantage le problème de coordination lorsque l'interaction entre les usagers n'est pas répétée (comme ceci sera le cas dans la mise en application du jeu en laboratoire, où les groupes d'usagers changeront à chaque répétition du jeu).

La discussion précédente nous amène donc à déterminer des équilibres symétriques, qui seront ici nécessairement en stratégies mixtes. Dans l'exemple simplifié à deux joueurs et deux périodes de départ possibles, il existe un seul équilibre de Nash en stratégies mixtes :

$$\sigma_1(t^*-2) = \sigma_2(t^*-2) = (1 + \gamma - \beta)/(2 + \gamma - \beta) \quad (12)$$

$$\text{et } \sigma_1(t^*-1) = \sigma_2(t^*-1) = 1/(2 + \gamma - \beta) \quad (13)$$

Cet équilibre est bien symétrique : chaque joueur part à la période t^-2 avec une probabilité égale à $(1 + \gamma - \beta)/(2 + \gamma - \beta)$ et part à la période t^*-1 avec une probabilité égale à $1/(2 + \gamma - \beta)$. En effet, étant données ces stratégies, chaque joueur a le même coût espéré quelle que soit sa période de départ :*

$$\begin{aligned} C(t^*-2 | \sigma_2) = C(t^*-2 | \sigma_1) &= 2(1 + \gamma - \beta)/(2 + \gamma - \beta) + (1 + \beta)/(2 + \gamma - \beta) \\ &= (3 + 2\gamma - \beta)/(2 + \gamma - \beta) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{et } C(t^*-1 | \sigma_2) = C(t^*-1 | \sigma_1) &= (1 + \gamma - \beta)/(2 + \gamma - \beta) + (2 + \gamma)/(2 + \gamma - \beta) \\ &= (3 + 2\gamma - \beta)/(2 + \gamma - \beta) \end{aligned} \quad (15)$$

Ces coûts sont toujours supérieurs aux coûts obtenus aux équilibres en stratégies pures puisque

$$\begin{aligned} 1 + \beta &< (3 + 2\gamma - \beta)/(2 + \gamma - \beta) & (16) \\ \Leftrightarrow 1 - 2\beta + \gamma + \beta^2 - \beta\gamma &> 0 \\ \Leftrightarrow (1 - \beta)(1 + \gamma - \beta) &> 0, \end{aligned}$$

et cette dernière inégalité est toujours satisfaite étant données les contraintes sur les paramètres.

Contrairement aux équilibres en stratégies pures, les équilibres en stratégies mixtes varient continûment avec les paramètres β et γ , et les usagers pourront, de plus, partir avec une probabilité strictement positive avant la période t^*-2 . Par exemple, on peut montrer sans difficulté que si $\beta = 0,5$ et $\gamma = 2$ alors l'unique équilibre de Nash en stratégies mixtes est celui présenté précédemment, c'est-à-dire :

$$\sigma_1(t^*-2) = \sigma_2(t^*-2) = 5/7 \quad (17)$$

$$\text{et } \sigma_1(t^*-1) = \sigma_2(t^*-1) = 2/7 \quad (18)$$

Quel que soit le nombre de périodes de départ possibles. Cependant, si $\beta = 0,25$, $\gamma = 2$ et si l'ensemble des périodes de départ possibles est étendu de manière à inclure les périodes de départ t^-3 , t^*-2 et t^*-1 , alors l'unique équilibre de Nash en stratégies mixtes symétriques est donné par :*

$$\sigma_1(t^*-3) = \sigma_2(t^*-3) = 2/9 \quad (19)$$

$$\sigma_1(t^*-2) = \sigma_2(t^*-2) = 5/9 \quad (20)$$

et
$$\sigma_1(t^*-1) = \sigma_2(t^*-1) = 2/9 \quad (21)$$

Notons qu'il existe également deux équilibres de Nash en stratégies mixtes asymétriques, qui sont donnés par les stratégies suivantes, pour $i, j \in \{1,2\}, i \neq j$:

$$\sigma_i(t^*-2) = 5/6 \quad (22)$$

$$\sigma_i(t^*-1) = 1/6 \quad (23)$$

$$\sigma_j(t^*-3) = 11/12 \quad (24)$$

et
$$\sigma_j(t^*-1) = 1/12 \quad (25)$$

Nous analysons maintenant, toujours dans l'exemple simple à deux usagers et deux périodes de départ possibles, les optima collectifs. Nous remarquons facilement que les équilibres de Nash en stratégies pures sont des optima collectifs : la somme des coûts totaux de transport subis par les usagers est minimisée lorsqu'un usager part à la période t^*-2 et que l'autre usager part à la période t^*-1 . La somme des coûts subis est donc $1 + \beta + 1 = 2 + \beta$, et aucune congestion ne se forme : chaque usager met une seule période de temps de transport pour arriver à son travail.

2°) Equilibres uniformes en stratégies pures

Bien qu'il ne soit pas possible de caractériser de manière générale (pour des valeurs quelconques des paramètres β et γ) l'ensemble de tous les équilibres lorsqu'il existe plus de deux usagers, nous présentons ici, avant de caractériser les prédictions théoriques pour les jeux étudiés en laboratoire, des classes de paramètres générant des équilibres de Nash en stratégies pures. A ces équilibres, les usagers se répartissent aux périodes qui précèdent immédiatement la période d'arrivée objectif.

Remarquons tout d'abord que si la capacité de la route est supérieure à la taille de la population, alors aucune congestion ne peut se former. L'ensemble des usagers partira donc nécessairement à la même date t^*-1 afin de ne pas subir de coût lié au retard ou à l'avance par rapport à l'objectif. Dans le cas où la taille de la population n'est qu'au plus deux fois égale à la capacité de la route, alors les usagers se répartissent entre les dates t^*-1 et t^*-2 en fonction du ratio β/γ . Plus précisément, nous pouvons facilement démontrer la proposition suivante, qui caractérise de

manière générique les équilibres de Nash en stratégies pures lorsque le ratio n/s est inférieur ou égal à 2.

Proposition 1. Si $n \leq s$ alors il existe un unique équilibre de Nash où les n usagers partent en date t^*-1 et ils subissent un coût de transport égal 1. Si $s < n \leq 2s$ et $(k+1)(1+\gamma)/s > \beta > k(1+\gamma)/s$, $k \in \mathfrak{N}^*$, alors les distributions de stratégies suivantes forment des équilibres de Nash en stratégies pures : $s+k$ usagers partent en date t^*-1 et subissent un coût de transport de $1+k(1+\gamma)/s$, et $n-s-k$ usagers partent en date t^*-2 et subissent un coût de transport de $1+\beta$.

La proposition suivante caractérise de manière générique les équilibres de Nash en stratégies pures lorsque le ratio n/s est strictement supérieur à 2 et lorsque le coût lié à l'avance diminue avec le nombre d'usagers. Comme pour la proposition précédente, la preuve est facile à construire en vérifiant qu'aucun des usagers ne peut diminuer son coût total en changeant de période de départ.

Proposition 2. Pour tout $k \in \mathfrak{N}^* \setminus \{1\}$, si $(k+1)s \geq n > ks$ et $\beta < 1/((k-1)s+1)$, alors les distributions de stratégies suivantes forment des équilibres de Nash en stratégies pures : s usagers partent en date t^*-1 et subissent un coût de transport de 1, pour tout $z \in \{2, \dots, k\}$, s usagers partent en date t^*-z et subissent un coût de transport de $1+(z-1)\beta$, et $n-ks$ usagers partent en date t^*-k-1 et subissent un coût de transport de $1+k\beta$.

Ainsi, si le coût lié à l'avance est suffisamment faible, alors les usagers s'étalent de manière régulière, s usagers par période, sur les périodes précédant la période objectif.⁴ Il n'y a donc pas de congestion, et comme chaque usager quitte son domicile avant la période objectif, certains usagers arrivent sur leur lieu de travail très en avance ! Cependant, la proposition précédente ne s'appliquera pas aux jeux implémentés en laboratoire. En effet, lorsque le nombre d'usagers augmente, il faut

⁴ Excepté éventuellement pour la période la plus éloignée de t^* .

considérer un coût lié à l'avance très faible, option que nous n'avons pas adoptée afin de conserver des paramètres en adéquation avec les estimations empiriques.

D. Prédications théoriques des jeux de congestion mis en application en laboratoire

Nous présentons dans ce paragraphe l'ensemble des prédictions théoriques exposées précédemment avec les paramètres utilisés dans les expériences analysées dans la section 312. Ces expériences ont été effectuées avec des groupes de $n = 4$ ou $n = 16$ individus. Dans chaque cas nous avons considéré un coût unitaire de retard égal à $\gamma = 2$, et un coût unitaire de d'avance égal à $\beta = 0,25$ ou $\beta = 0,5$. Nous avons considéré une capacité de la route de $s = 1$ quand $n = 4$ et de $s = 4$ quand $n = 16$. L'ensemble des périodes de départ possibles retenu dans les expériences a été :

$$T = \{t^* - 8, \dots, t^* - 1, t^*, t^* + 1, \dots, t^* + 8\} \quad (26)$$

Cet ensemble est suffisamment grand afin de contraindre au minimum le choix des sujets expérimentés. Les programmes informatiques de résolution utilisés afin de déterminer les différentes stratégies théoriques présentées ici sont disponibles sur demande aux auteurs.

1°) $n = 4$, $\beta = 0,25$ et $\gamma = 2$

L'ensemble des équilibres de Nash en stratégies pures consiste pour les joueurs à se répartir entre les périodes $t^* - 4$ et $t^* - 1$. En effet, la proposition 2 s'applique directement avec $k = 4$ puisque $\beta = 0,25 < 1/((k - 1)s + 1) = 1/3$. Ces équilibres de Nash sont également des optima sociaux et sont résumés dans le tableau ci-dessous. Le coût total subi par l'ensemble de tous les usagers est égal à 5,5.

Equilibres de Nash en stratégies pures et optima collectifs avec $n = 4$, $\beta = 0,25$ et $\gamma = 2$

Période	t^*-4	t^*-3	t^*-2	t^*-1
Nombre d'usagers	1	1	1	1
Coût supporté par chaque	$1 + 3\beta =$	$1 + 2\beta =$	$1 + \beta =$	1
Coût total	$4 + 6\beta = 5,5$			

L'unique équilibre de Nash symétrique (et donc en stratégies mixtes) est résumé par le tableau suivant.

Equilibre de Nash en stratégies mixtes symétriques avec $n = 4$, $\beta = 0,25$ et $\gamma = 2$

Période	t^*-6	t^*-5	t^*-4	t^*-3	t^*-2	t^*-1
Probabilité de départ	3,81%	14,77	23,93	28,84	20,01	8,64%

2°) $n = 4$, $\beta = 0,5$ et $\gamma = 2$

Avec ces paramètres il n'existe pas d'équilibre de Nash en stratégies pures. Intuitivement, cela résulte du fait que les conflits d'intérêt sont élevés en raison d'un coût d'avance β relativement élevé. En revanche, l'optimum collectif est le même que celui obtenu avec les paramètres précédents : les joueurs se répartissent entre les périodes t^*-4 et t^*-1 , et le coût total subi par l'ensemble de tous les usagers est égal à $4 + 6\beta = 7$. Cette situation n'est pas un équilibre car l'utilisateur qui part en période t^*-4 a intérêt à dévier pour partir à la période t^*-2 . Dans ce cas il subira un coût égal à 2 au lieu de $1 + 4\beta = 3 > 2$.

L'unique équilibre de Nash symétrique est résumé par le tableau suivant.

Equilibre de Nash en stratégies mixtes symétriques avec $n = 4$, $\beta = 0,5$ et $\gamma = 2$

Période	t^*-4	t^*-3	t^*-2	t^*-1
Probabilité de départ	26,22%	41,43%	21,87%	10,48%

3°) $n = 16$, $\beta = 0,25$ ou $\beta = 0,5$ et $\gamma = 2$

Lorsque $n = 16$, nous ne sommes pas en mesure de calculer les équilibres de Nash. Cependant, dans les deux cas ($\beta = 0,25$, $\gamma = 2$ et $\beta = 0,5$, $\gamma = 2$) l'optimum collectif est le même ; il est résumé par le tableau suivant.

Optimum collectif avec $n = 16$, $\beta = 0,25$ ou $\beta = 0,5$ et $\gamma = 2$

Période	t^*-4	t^*-3	t^*-2	t^*-1
Nombre d'usagers	4	4	4	4

Coût supporté par chaque	$1 + 3\beta$	$1 + 2\beta$	$1 + \beta$	1
Coût total	$4 + 6\beta$			

Les jeux de congestion et les résultats théoriques obtenus dans ce paragraphe sont maintenant étudiés et testés expérimentalement dans la section suivante.

2. Procédure et résultats expérimentaux

A. Protocole expérimental

Les instructions sont fondées sur un design de type "stranger" : au début d'une période chaque sujet est affecté aléatoirement à un groupe de taille fixe. La composition des groupes change de période en période. En choisissant un design de type "stranger", nous avons voulu éviter que les sujets cherchent à se coordonner grâce à la répétition du jeu. Deux raisons ont motivé ce choix pour un traitement de type "stranger" : l'une empirique, l'autre théorique. La raison empirique est que notre objectif était de tester des situations répétitives mais dans lesquelles les combinaisons d'utilisateurs sont fréquemment renouvelées, comme cela semble être le cas pour les trajets domicile-travail dans les grandes agglomérations. La raison théorique est que nous avons voulu explorer le pouvoir prédictif de l'équilibre en stratégies mixtes, qui prédit que les différents créneaux de départ sont choisis avec une certaine probabilité. En répétant un grand nombre de fois le jeu avec réassortiment périodique, on génère une distribution de fréquence des départs qui peut être comparée à l'équilibre en stratégies mixtes. Au contraire, en adoptant un cadre de groupes fixes, l'expérience aurait focalisé l'attention des sujets sur la coordination, et l'adoption de stratégies sur plusieurs périodes.

Nous étudions trois variables de traitement : la taille des groupes (4 ou 16), le coût d'avance par rapport au coût de retard et la disponibilité (ou non) de l'information historique sur la congestion. En réalité le traitement à 16 joueurs ne diffère du traitement à 4 joueurs qu'en termes d'échelle. En effet en passant de 4 à 16 joueurs la capacité du réseau est également multipliée par 4. Cela ne modifie donc pas intrinsèquement les équilibres du jeu, sauf qu'il y a davantage de permutations possibles entre joueurs pour un profil d'équilibre donné. Nous voulions

du même endroit". Les instructions complètes sont fournies en annexe pour le traitement à 4 joueurs sans information et pour le traitement à 16 joueurs avec information.

La décision de chaque joueur consiste à choisir un créneau de départ, parmi un ensemble de 17 créneaux de départ possibles {7h20 mn, 7h25 mn, 7h30 mn, ..., 8h30 mn, 8h35 mn, 8h40 mn},

Les coûts engendrés par les décisions des sujets, le coût de transport et le coût d'avance/retard, étaient ensuite expliqués aux sujets. Pour déterminer le coût de transport, les instructions décrivaient de façon détaillée la relation entre le temps de transport et le niveau de congestion. En particulier, les instructions rendaient attentifs les sujets au fait que même s'ils étaient seuls à partir à un temps de départ spécifique, ils pouvaient néanmoins être dans une situation de forte congestion (résultant par exemple d'une forte densité de départ à une heure antérieure). Une série d'exemples permettait aux sujets de comprendre le lien entre le niveau de congestion instantané, la fréquence des départs au sein d'un créneau horaire, et le niveau de congestion préexistant (voir annexe pour le détail des instructions).

Après avoir présenté le calcul du temps de transport en fonction de l'horaire de départ et du niveau de congestion, les instructions précisaient ensuite la perte associée à chacune des issues possibles du jeu. La " pénalité de retard » a été fixée à 2 et la pénalité d'avance à 0,5 ou 0,25. Pour éviter que les sujets ne cherchent à tester les situations extrêmes, les pertes minimales et maximales étaient explicitées dans les instructions (pénalité maximale fixée à 24 points).

Le calcul de la perte est égal à la perte en points de la période plus les points perdus en raison du retard (ou de l'avance).

B. Statistiques descriptives

1°) Principaux résultats à 4 joueurs (sans information)

Nous présentons les résultats du traitement sans information. Dans le chapitre 3, nous analyserons les façons dont la fourniture d'information sur l'état de la congestion modifie ces résultats. Rappelons que l'on compare dans chacun des cas un "coût d'avance faible" ($\beta = 0,25$) et un "coût d'avance élevé" ($\beta = 0,50$).

*) Fréquences relatives des départs

Le tableau 1 et les figures 2 et 3 comparent les fréquences moyennes (sur 40 périodes) de départ pour les deux valeurs de β , par rapport aux prédictions théoriques (équilibre de Nash en stratégies mixtes). Rappelons également que l'optimum social est atteint pour une fréquence de départ uniforme de 25% en t^*-4 , t^*-3 , t^*-2 et t^*-1 .

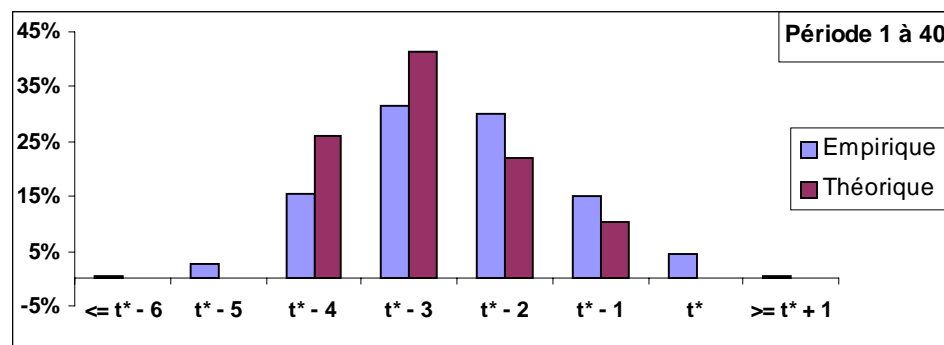


Figure 2 : Fréquences de départ moyennes pour $\beta = 0,50$

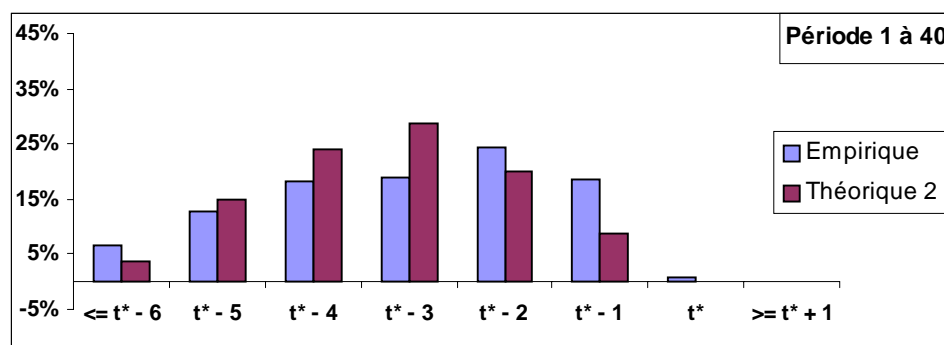


Figure 3 : Fréquences de départ moyennes pour $\beta = 0,25$

Tableau 1 : Fréquences théoriques et empiriques (moyennes) de départ en fonction du coût d'avance

	Fréquences	$\leq t^*$							$\geq t^*$
		- 6	$t^* - 5$	$t^* - 4$	$t^* - 3$	$t^* - 2$	$t^* - 1$	t^*	+ 1
0,50	Théorique	0,00	0,00	26,2	41,4	21,9	10,5	0,00	0,00
	Empirique	0,31	2,66	15,5	31,4	29,9	15,0	4,53	0,63
0,25	1 Théorique	0,00	0,00	25,0	25,0	25,0	25,0	0,00	0,00
	2 Théorique	3,80	14,8	24,0	28,8	20,0	8,60	0,00	0,00
	Empirique	6,56	12,8	18,2	18,8	24,3	18,4	0,63	0,16

Un rapide examen des figures 2 et 3 révèle que les distributions de fréquences empiriques ne sont pas très différentes des distributions théoriques. Ce résultat est très surprenant compte tenu de la difficulté de calcul des équilibres en stratégies mixtes. En effet, les équilibres en stratégies mixtes sont loin d'être intuitifs et leur calcul a nécessité le recours à Mathematica.

**) Efficience

Nous pouvons également comparer les distributions de fréquences de départ empiriques aux fréquences de départ optimales (figures 4 et 5). On constate également dans ce cas, que les deux distributions sont peu différentes dans le cas où $\beta = 0,50$. Dans le cas où $\beta = 0,25$, par contre les sujets ont tendance à anticiper trop les départs par rapport aux fréquences de départ socialement efficaces.

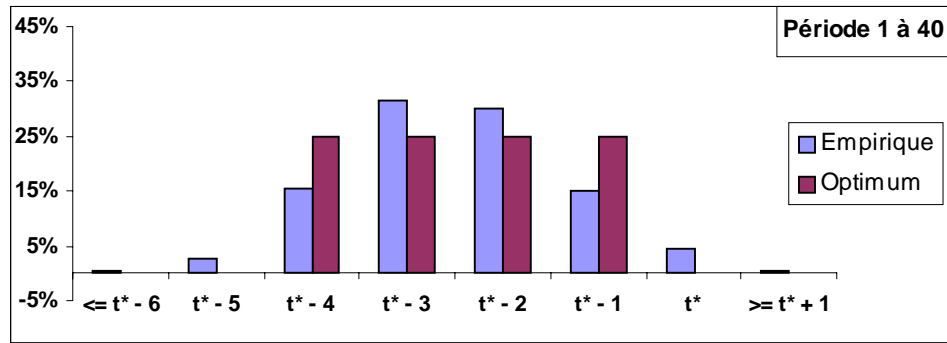


Figure 4 : Comparaison entre fréquences de départ observées et fréquences optimales ($\beta = 0,50$)

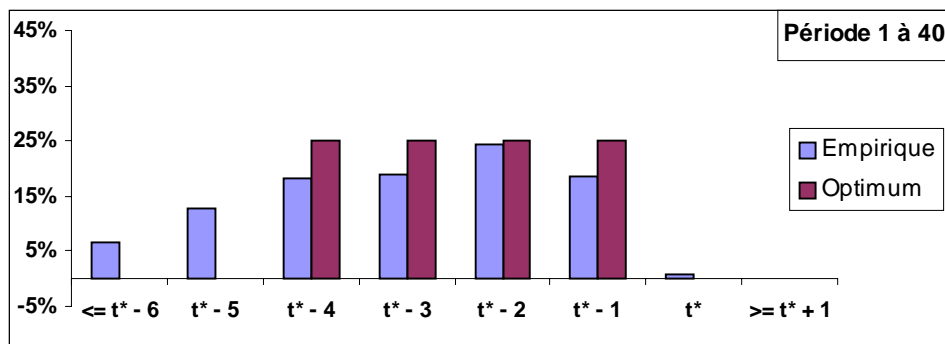


Figure 5 : Comparaison entre fréquences de départ observées et fréquences optimales ($\beta = 0,25$)

***) Proximité avec l'efficience

Une comparaison plus fine révèle cependant que la fréquence des profils optimaux est très faible et n'évolue guère avec la répétition (figure 6). Par contre, la fréquence des profils observés qui sont contenus dans le support du profil d'équilibre est très élevée : 92% en moyenne pour $\beta = 0,50$ et 80% en moyenne pour $\beta = 0,25$. De plus dans le cas $\beta = 0,50$, ce pourcentage a tendance à augmenter au cours du temps. Les sujets choisissent donc très fréquemment les "bons créneaux de départ", mais en raison de l'impossibilité qu'ils ont à se coordonner, la congestion devient inévitable.

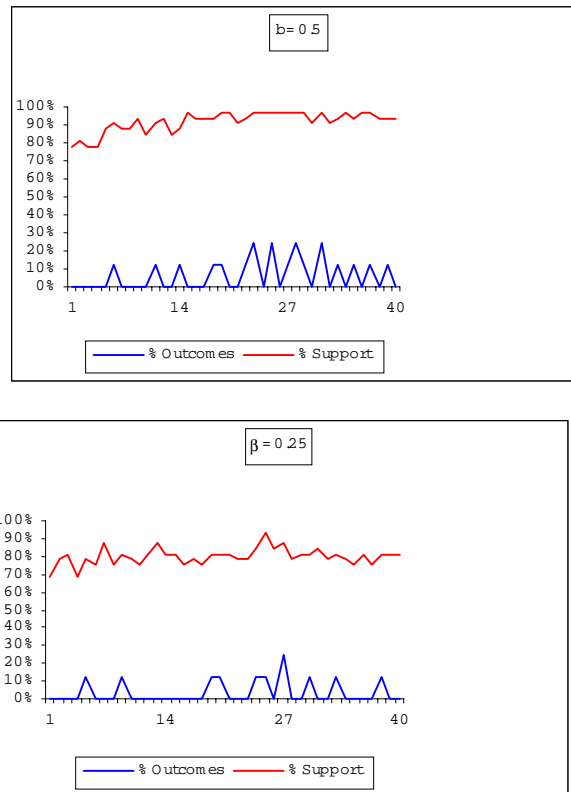


Figure 6 : Evolution du pourcentage de profils de stratégies d'équilibre et de profils de stratégies contenus dans le support de l'équilibre

En raison de la congestion provoquée par le défaut de coordination des sujets, le temps de transport moyen est supérieur à une période. Il est égal à 1,83 périodes lorsque le coût d'avance est élevé ($\beta = 0,50$) et de 1,56 périodes lorsque le coût d'avance est faible ($\beta = 0,25$). De plus on observe que ce temps de transport est relativement stable au cours du temps.

****) Niveaux moyens de congestion

Les niveaux moyen de congestion sont plus faibles lorsque le coût d'avance est faible (figure 7). Cela est dû au fait que les sujets choisissent des créneaux de départ plus précoces dans ce traitement, souvent en-dehors du support de l'optimum. Donc le temps de transport moyen est généralement plus faible car il y a moins de congestion. Ceci est dû principalement au fait que l'équilibre a un support plus important lorsque le coût est faible (entre t^*-6 et t^*-1) que lorsque le coût est élevé (entre t^*-4 et t^*-1).

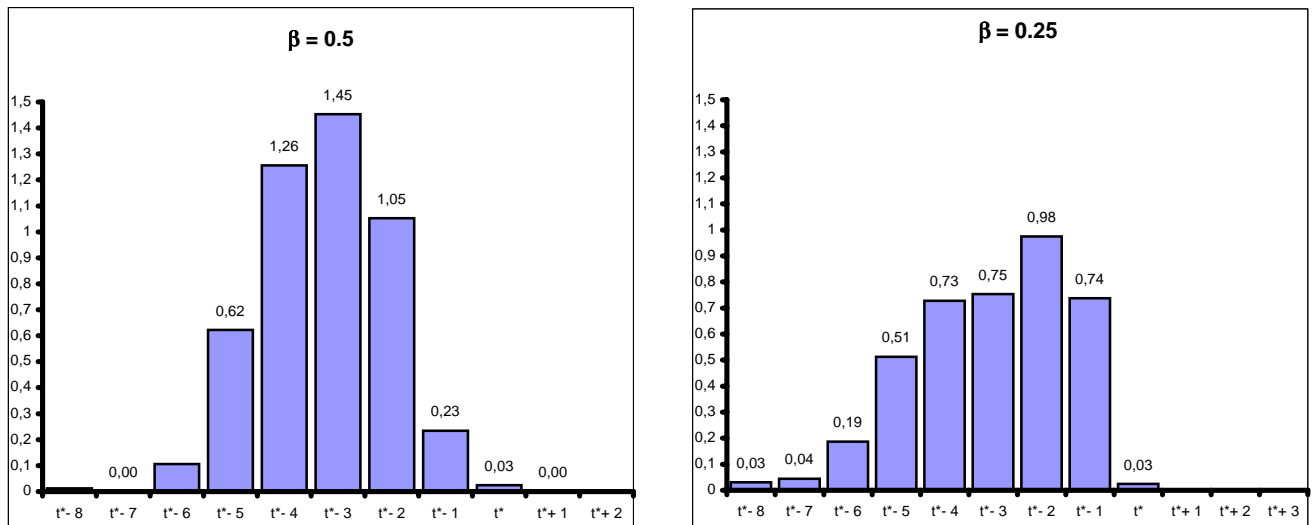


Figure 7 : Niveaux moyens de congestion en fonction du créneau de départ

3. Procédures et résultats empiriques (groupes de 16)

A) Protocole expérimental

Comme pour les groupes de 4, les instructions avec les groupes de 16 joueurs sont fondées sur un design de type "stranger". 64 sujets participent simultanément à l'expérience. Pour cette expérience nous n'avons pas pu utiliser la salle d'économie expérimentale du LEES, dont la capacité est actuellement limitée à 16 sujets. Nous avons utilisé 3 salles informatique en réseau, grâce à l'aide logistique de l'IECS (Université Robert Schuman, Strasbourg 3). En arrivant sur les lieux de l'expérience, les sujets étaient affectés aléatoirement à l'une des trois salles. Tous les sujets savaient qu'il y avait trois salles et qu'en tout 64 sujets participaient simultanément à l'expérience. Les instructions expliquaient ensuite qu'au début de chaque période chaque sujet était affecté aléatoirement à un groupe de 16 personnes choisies parmi les 64 personnes présentes. A la fin d'une période, les groupes étaient démantelés et de nouveaux groupes étaient formés. Pour des raisons pratiques le jeu de congestion n'a été répété que 25 fois. Comme pour les sessions avec des groupes de 4, chaque sujet était doté d'un **capital**

de 250 points en début d'expérience. Le taux de conversion appliqué aux points restant en fin d'expérience était également le même (1 Euro pour 10 points).

La capacité de la route a été fixée à 4, de sorte que le temps de transport à l'optimum est le même avec des groupes de 16 qu'avec des groupes de 4. Les instructions étaient similaires à celles distribuées dans les sessions avec des groupes de 4 sujets, sauf que les informations fournies sur les niveaux de congestion, les temps de transport et les pénalités d'avance et de retard étaient nécessairement plus détaillés. Par exemple, avec des groupes de 4, il y a seulement 4 durées de transport possibles (avec un minimum de 5 minutes et un maximum de 20 minutes). A 16 personnes, pour une même durée minimale et une même durée maximale, il y a 13 durées de transport distinctes, en fonction de l'état de la congestion. Toutes les informations sur les durées de transport, les pénalités d'avance et les pénalités de retard ont été présentées sous forme de tableaux.

Une seule session a été réalisée pour cette taille de groupe, en fixant $\beta = 0,5$ avec information historique sur les états de congestion passés.

B) Statistiques descriptives

1°) Principaux résultats à 16 joueurs

Contrairement à l'analyse que nous avons proposée précédemment dans le cas des groupes de 4 joueurs, nous ne pouvons pas établir de comparaison entre les données observées et la prédiction de l'équilibre de Nash. Tout d'abord il faut remarquer qu'il n'existe pas d'équilibre en stratégies pures, et d'autres part les équilibres en stratégies mixtes sont impossibles à calculer même en ayant recours à Mathematica. Nous nous contenterons de ce fait d'une comparaison entre les fréquences de départ observées et les fréquences de départ optimales. Les fréquences optimales correspondent à 4 départs en t^*-4 , 4 départs en t^*-3 , 4 départs en t^*-2 et 4 départs en t^*-1 . Nous commençons donc directement l'analyse en termes d'efficacité.

2°) Efficience

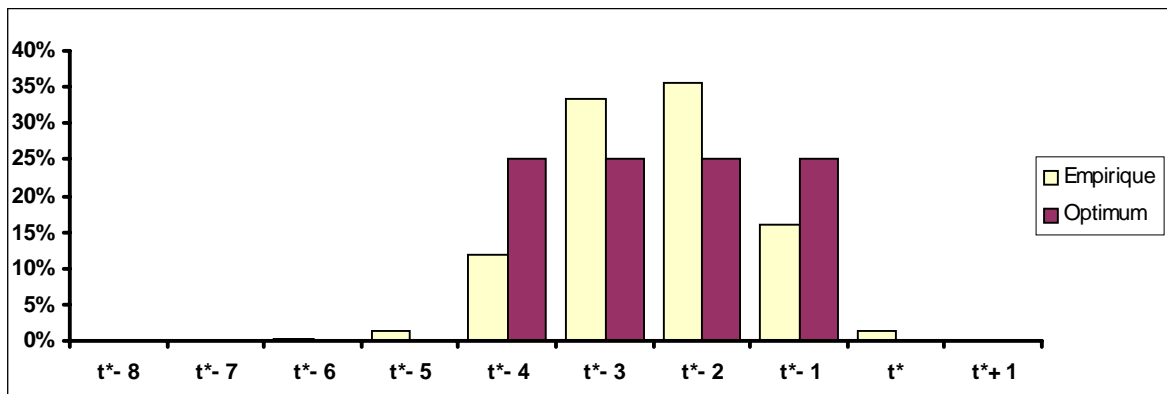


Figure 8 : Fréquences de départ moyennes ($\beta = 0,50$)

Tableau 2 : Fréquences optimales et empiriques (moyennes)

	Fréquences	$\leq t^*$	$t^* - 6$	$t^* - 5$	$t^* - 4$	$t^* - 3$	$t^* - 2$	$t^* - 1$	t^*	$\geq t^* + 1$
		0,50	Optimum	0%	0%	0,25	0,25	0,25	0,25	0%
	Empirique	0,44%	4%	11,9	33,2	35,6	15,8	1,3	0,06%	

Par rapport à l'optimum les départs sont trop concentrés sur les périodes t^*-3 et t^*-2 et insuffisamment sur les périodes t^*-1 et t^*-4 . Les fréquences de départ en-dehors de ces 4 créneaux sont très faibles. Les départs se font donc très largement dans le support de l'équilibre mais sont trop concentrés sur deux créneaux seulement, générant inévitablement de la congestion.

3°) Proximité avec l'efficacité

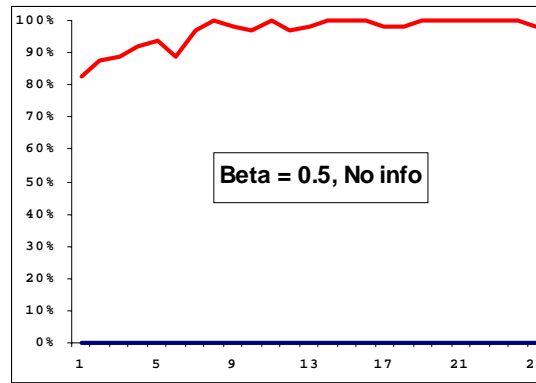


Figure 9 : Evolution du pourcentage de profils de stratégies contenus dans le support de l'équilibre

L'optimum n'a jamais été observé, par contre les créneaux de départ choisis sont presque tout le temps dans le support de l'optimum.

4°) Niveaux moyens de congestion

Comme on pouvait s'y attendre, compte tenu que les départs se concentrent essentiellement sur deux créneaux ($t^* - 3$ et $t^* - 2$), ces créneaux sont très congestionnés. On ne constate pas de grande différence avec les niveaux de congestion observés pour les autres traitements.

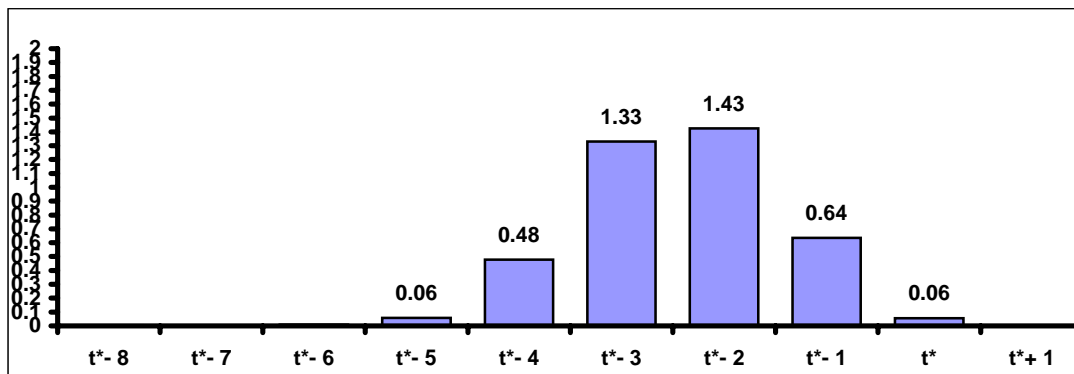


Figure 10 : Niveaux moyens de congestion en fonction du créneau de départ

Section 2. Le jeu de coordination à n usagers homogènes utilisant 2 itinéraires : le rôle du péage d'accès

Dans cette partie de l'étude, nous nous intéressons au comportement des individus, lorsque ceux-ci sont soumis à deux itinéraires possibles. Un itinéraire est gratuit et de faible capacité d'absorption tandis que l'autre est payant mais de plus forte capacité. Nous faisons également varier le prix du péage afin de comprendre dans quelle mesure le coût du péage est un élément déterminant du choix d'itinéraire. Dans cette partie sont présentés successivement le modèle de référence ainsi que ses solutions théoriques (point 1.), puis le protocole expérimental et les résultats issus des expérimentations (point 2.).

1. Présentation du modèle théorique

Le modèle de base⁵ a été simplifié afin de rendre possible l'introduction de deux itinéraires dans le choix des individus. De ce fait, dans cette section, le nouveau modèle de référence à un itinéraire est présenté préalablement à l'introduction du deuxième itinéraire et au développement des résultats théoriques.

A. Le modèle à 1 itinéraire

Pour élaborer ce modèle, nous considérons toujours une population de N usagers ($N \geq 2$) effectuant un trajet domicile-travail, le lieu de destination est commun entre tous les usagers. Pour se rendre sur leur lieu de travail, les individus disposent, dans un premier temps, d'un itinéraire unique. Ils ont une période objectif donnée notée $t^* \in \{T_q, \dots, T_{q'}\}$, commune à l'ensemble de la population. Chaque individu $i = 1, \dots, N$ doit donc choisir une période de départ $t_i \in \{T_q, \dots, T_{q'}\}$. Notons que l'ensemble des périodes de départ est un ensemble discret et fini.

⁵ Cf. section 1, chapitre 2.

Le temps de trajet d'un individu i est la somme d'un temps fixe de déplacement, noté T_f^6 , et d'un temps variable, noté T^v , dépendant du trafic à la période t et de la capacité de la route, notée s . La capacité de la route est le nombre maximum d'usagers par période pouvant emprunter l'itinéraire sans qu'une congestion ne se développe. Dans ces conditions, le temps variable de transport est égal à l'unité ($T^v = 1$). Au contraire, si le nombre d'usagers qui décident de partir en t , noté $N(t)$, excède la capacité s , une congestion apparaît et le temps variable de transport est strictement supérieur à 1.

Afin de rendre le modèle réaliste, nous considérons que la congestion est un phénomène dynamique. Ainsi, certains usagers peuvent subir les conséquences d'une congestion développée dans le passé. Si une congestion se développe à une période t , tous les usagers partis à cette période ($N(t)$) ne peuvent emprunter l'itinéraire. Un certain nombre d'individus ($N(t)-s$) doivent attendre la période suivante ($t+1$) pour emprunter l'itinéraire ; ces usagers s'ajoutent alors aux individus qui ont décidé de partir au cours de cette période $t+1$, à savoir $N(t+1)$. Ainsi, en $t+1$, $N(t)-s+N(t+1)$ individus sont sur la route, « pris dans les embouteillages ». Ce raisonnement nous permet de définir le concept de « Reliquat sur la route en t », noté :

$$R(t) = \text{Max}\{0, N(t-1)-s\} \quad (27)$$

Le Reliquat est le nombre d'individus non absorbés par la route et ne peut donc être négatif (il est au minimum égal à 0).

Il est alors possible de définir le nombre d'individus qui empruntent l'itinéraire en t , noté $D(t)$, comme la somme du Reliquat en t et des individus qui choisissent de partir à cette période ($N(t)$) :

$$D(t) = R(t) + N(t) \quad (28)$$

Nous pouvons à présent définir le temps variable de transport nécessaire à un individu pour arriver à destination. Ce temps variable de transport est noté :

⁶ Le temps fixe de transport correspond au temps incompressible de trajet nécessaire à l'individu pour se rendre à destination quel que soit le niveau de congestion.

$$T^v(t) = \text{Arrondi.Supérieur}\left(\frac{D(t)}{s}\right) \quad (29)$$

Puisque un nombre $D(t)$ d'individus sont sur la route en t , et que la capacité d'absorption est de s individus par période, le nombre de périodes nécessaires pour que tous les individus empruntent l'itinéraire⁷ est noté $D(t)/s$. Toutefois, dans notre modèle, le temps est considéré comme une variable discrète, par conséquent $T^v(t)$ est exprimé en unité de temps et appartient à l'ensemble des entiers naturels. Ainsi, si de 1 à s individus prennent la route en t , la période est comptée intégralement. Par exemple, si $D(t) = 5$ usagers et que la capacité d'absorption est de 2, les usagers ne mettront pas 2,5 périodes, mais 3 périodes pour « passer » la congestion. En effet, deux individus « passent » en première période, deux individus « passent » en deuxième période, et le dernier usager « passe » en troisième période. Soient 3 périodes pour faire passer les 5 usagers et non pas 2,5 périodes. Ainsi, si $D(t) = 0$, alors $T^v(t) = 0$, si $0 < D(t) \leq s$, alors $T^v(t) = 1$, si $s < D(t) \leq 2s$, alors $T^v(t) = 2$, ...

A présent que sont définis la capacité de l'itinéraire et le mode de calcul du temps de transport pour chaque individu compte tenu du niveau de congestion, nous pouvons introduire la définition du coût total de transport subi par un usager i . Soit $C_i(t)$, le coût total de transport de l'individu i , supposé linéaire en t :

$$C_i(t) = \alpha^*(T_f + T^v(t)) + \beta^*(\text{temps d'avance}) + \gamma^*(\text{temps de retard}) + p \quad (30)$$

⁷ Par exemple, si nous supposons que $D(t)=2$ et $s=1$, le temps de trajet de chaque individu est alors de deux périodes ($T^v(t)=2$). Une approche plus intuitive serait de définir une probabilité de passage de l'usager égale à $S/D(t)$, dépendant d'éléments exogènes (tel que son emplacement dans la file d'attente). Par exemple, pour $D(t)=2$ et $s=1$, chaque usager a une probabilité égale à $1/2$ de passer immédiatement et une probabilité identique de passer une période plus tard. Chaque individu subit donc un temps de trajet « moyen » égal à une période et demi ($T^v(t)=1,5$). Ce raisonnement n'est pas pris en compte ici car l'analyse devient très complexe lorsque nous considérons N individus ($N>2$) et deux itinéraires possibles.

où α , β et γ sont des paramètres exogènes⁸ positifs représentant les différents coûts individuels unitaires du temps. Plus précisément, α correspond au coût associé au temps passé sur la route (i.e. coût de déplacement), β au coût associé à l'avance par rapport à l'objectif (i.e. coût d'avance) et γ au coût associé au retard sur l'objectif (i.e. coût de retard). Le paramètre p représente le péage d'infrastructure que nous normalisons à 0 sans perte de généralité puisque nous développons dans cette section le modèle à un itinéraire.

Nous pouvons calculer la ponctualité d'un individu (i.e. l'écart par rapport à la période objectif). La valeur $t^* - T_f - T^v(t) - t$ correspond à l'écart par rapport à t^* d'un individu qui part en t . Ainsi, le coût individuel total de transport est donné par l'expression suivante:

$$C_i(t) = \alpha(T_f + T^v(t)) + \beta \cdot \text{Max}\{0, t^* - T_f - T^v(t) - t\} + \gamma \cdot \text{Max}\{0, T^v(t) + t + T_f - t^*\} \quad (31)$$

Chaque individu, dans le choix de sa période de départ, est ainsi confronté à un arbitrage entre le temps de trajet et la ponctualité.

B. Détermination de l'équilibre du modèle.

Un équilibre de Nash en stratégies pures⁹ est défini lorsqu'un usager ne peut diminuer son coût total de transport en changeant unilatéralement sa période de départ. En d'autres termes, un équilibre de Nash est une situation stable : si chaque usager a choisi une période de départ, un usager de référence ne peut diminuer son coût en changeant lui seul de période de départ (a contrario, si deux usagers ou plus choisissent de changer de période de départ simultanément, un autre équilibre de Nash peut apparaître).

La proposition suivante présente l'équilibre de notre modèle et ses conditions de détermination.

⁸ La relation d'ordre entre α , β et γ sera détaillée dans la section consacrée à la détermination de l'équilibre.

⁹ Selon Arnott et al. (1993, p.164) « In this context, pure strategies appear to be more realistic than mixed strategies, since most individuals prefer a routine – to leave home at the same time every day ».

Proposition 3. *A l'équilibre, les usagers prennent la route par groupe de s sur l'intervalle de départ $\{t^*-Tf-K, \dots, t^*-Tf-1\}$, si et seulement si $(K-1)\beta < \alpha < (K)\beta < \gamma$, avec $K = \text{arrondi supérieur}(N/s)$.*

Preuve. Afin de déterminer cet équilibre, nous envisageons quatre cas possibles :

- *Cas 1 : la taille de la population est inférieure à la capacité de l'itinéraire ($N \leq s$). Dans ce cas, tous les usagers peuvent emprunter l'itinéraire à la même période de départ sans subir de congestion. Chaque individu choisit la période \tilde{t} qui minimise son coût de transport :*

$$C_i(\tilde{t}) = \text{Min}(c(t)) = \alpha(Tf+1) + \beta \cdot \text{Max}\{0, t^*-Tf-1-\tilde{t}\} + \gamma \cdot \text{Max}\{0, 1+\tilde{t}+Tf-t^*\} \quad (32)$$

Puisque $R(t) = 0$ (il ne peut y avoir de congestion car $N \leq s$) et $N(t) \leq s$, alors $T^v(t) = 1$. Le coût $C_i(\tilde{t})$ est donc minimisé si et seulement si $t^*-Tf-1-\tilde{t} = 0$, soit $\tilde{t} = t^*-Tf-1$ et tous les usagers partent en \tilde{t} . Dans ce cas, le coût total individuel de transport est : $C_i(\tilde{t}) = \alpha(Tf+1)$.

- *Cas 2 : la taille de la population est supérieure à la capacité de l'itinéraire mais inférieure à 2 fois la capacité de l'itinéraire ($s < N \leq 2s$). A l'équilibre, s usagers choisissent de partir en t^*-Tf-1 et $N-s$ usagers en t^*-Tf-2 . En effet, si les $N-s$ usagers choisissent une période de départ antérieure à t^*-Tf-2 , leur coût augmente de β par période d'avance. Par exemple, si ils choisissent la période t^*-Tf-3 , leur coût est alors $C_i(t^*-Tf-3) = \alpha(Tf+1) + 2\beta$. Ce coût est supérieur au coût obtenu en partant en t^*-Tf-2 . De la même façon, si ces joueurs choisissent une période de départ postérieure à t^*-Tf-1 , alors ils subissent un coût de retard prohibitif. Par exemple, si les individus partent en t^*-Tf , leur coût de transport est $C_i(t^*-Tf) = \alpha(Tf+1) + \gamma$, montant supérieur à $C_i(t^*-Tf-2)$ si $\beta < \gamma^{10}$. Compte tenu de ces conditions, les $N-s$ individus choisissent de partir en t^*-Tf-2 plutôt qu'en t^*-Tf-1 si et seulement si $C_i(t^*-Tf-2) < C_i(t^*-Tf-1)$, avec $N(t^*-Tf-1) > s$ et $N(t^*-Tf-2) \leq s$, si $\beta < \alpha + \gamma$.*

¹⁰ Les études expérimentales montrent que cette relation d'ordre est respectée empiriquement (Small 1982).

- *Cas 3 : la taille de la population est supérieure à 2 fois la capacité de l'itinéraire ($N > 2s$). A l'équilibre, s usagers partent en t^*-Tf-1 , puis s usagers partent en t^*-Tf-2 , puis s en t^*-Tf-3 , ..., jusqu'à ce que la totalité des individus aient pris la route. Si nous définissons $K = \text{arrondi supérieur}(N/s)$, alors, à l'équilibre, K périodes sont nécessaires pour permettre aux usagers d'emprunter l'itinéraire. La dernière période de départ est donc t^*-Tf-K . Cet équilibre est validé uniquement si aucun usager ne peut diminuer son coût de transport en changeant unilatéralement de période de départ. Cette condition se traduit par les deux assertions suivantes:*

1. Le coût de transport le plus élevé à l'équilibre (i.e. $C_i(t^*-Tf-K)$) est inférieur à tous les coûts de transport hors équilibre, lorsque $N(t) \leq s$. Soient,

$$C_i(t^*-Tf-K) < C_i(t^*-Tf-K-1) \Leftrightarrow \alpha(Tf+1) + (K-1)\beta < \alpha(Tf+1) + (K)\beta$$

$$\Leftrightarrow \text{Toujours vrai} \quad (33)$$

et

$$C_i(t^*-Tf-K) < C_i(t^*-Tf) \Leftrightarrow \alpha(Tf+1) + (K-1)\beta < \alpha(Tf+1) + \gamma$$

$$\Leftrightarrow (K-1)\beta < \gamma \quad (34)$$

2. Le coût de transport le plus élevé à l'équilibre (i.e. $C_i(t^*-Tf-K)$) est inférieur au coût le plus faible, lorsque $N(t) > s$ (par exemple $C_i(t^*-Tf-2)$ avec $N(t^*-Tf-2) \geq s+1$). Soit,

$$C_i(t^*-Tf-K | N(t^*-Tf-K) \leq s) < C_i(t^*-Tf-2 | N(t^*-Tf-2) > s)$$

$$\Leftrightarrow \alpha(Tf+1) + (K-1)\beta < \alpha(Tf+2)$$

$$\Leftrightarrow (K-1)\beta < \alpha \quad (35)$$

3. Les situations hors équilibre s'ordonnent de la façon suivante :

$$C_i(t^*-Tf-2 | N(t^*-Tf-2) > s) < C_i(t^*-Tf-K-1 | N(t^*-Tf-K) \leq s) < C_i(t^*-Tf)$$

$$\Leftrightarrow \alpha(Tf+2) < \alpha(Tf+1) + (K)\beta < \alpha(Tf+1) + \gamma$$

$$\Leftrightarrow \alpha < (K)\beta < \gamma \quad (36)$$

Compte tenu des équations (35) et (36), les équations (33) et (34) sont toujours vérifiées.

Le tableau 3 résume les différents coûts totaux individuels suivant le nombre d'individus présents sur la route et la période de départ choisie.

Tableau 3 : Coûts totaux de transport selon l'encombrement et la période de départ

Période de départ	$N(t) \leq s$	$N(t) = s + 1$
$t^* - Tf - K - 1$	$\alpha(Tf + 1) + (K)\beta$	$\alpha(Tf + 2) + (K-1)\beta$
$t^* - Tf - K$	$\alpha(Tf + 1) + (K-1)\beta$	$\alpha(Tf + 2) + (K-2)\beta$
$t^* - Tf - K + 1$	$\alpha(Tf + 1) + (K-2)\beta$	$\alpha(Tf + 2) + (K-3)\beta$
...
$t^* - Tf - 3$	$\alpha(Tf + 1) + 2\beta$	$\alpha(Tf + 2) + \beta$
$t^* - Tf - 2$	$\alpha(Tf + 1) + \beta$	$\alpha(Tf + 2)$
$t^* - Tf - 1$	$\alpha(Tf + 1)$	$\alpha(Tf + 2) + \gamma$
$t^* - Tf$	$\alpha(Tf + 1) + \gamma$	$\alpha(Tf + 2) + 2\gamma$
$t^* - Tf + 1$	$\alpha(Tf + 1) + 2\gamma$	$\alpha(Tf + 2) + 3\gamma$

Remarque 1. En supposant une relation différente entre α , β et γ , et selon certaines conditions sur cette relation, l'intervalle de départ d'équilibre peut être modifié tel que certains usagers arrivent en retard, suivant le corollaire 1.

Corollaire 1. A l'équilibre, les usagers prennent la route par groupe de s sur l'intervalle de départ $\{t^* - Tf - K + X, \dots, t^* - Tf - 1 + X\}$ si et seulement si $(K-1+X)\beta < X\gamma < \alpha < (K+X)\beta$, avec $K = \text{arrondi supérieur}(N/s)$ et $X > 0$.

Preuve. Voir Annexe n°XXX

De façon générale, si $K < \text{arrondi supérieur}(N/s)$ ou si l'une des conditions précédemment présentées n'est pas vérifiée, le modèle ne comporte pas d'équilibre de Nash et les individus choisissent des périodes de départ telle qu'une congestion est systématiquement générée sur l'itinéraire (la solution n'est pas stable).

La solution théorique du modèle à un itinéraire étant caractérisée, nous pouvons développer, dans la section suivante, le modèle à deux itinéraires.

C. Le modèle à 2 itinéraires

Considérons deux itinéraires, notés A et B , tels que $Tf_A \geq Tf_B \geq 0$, $p_B > p_A = 0$, et $s_B > s_A$. En d'autres termes, l'itinéraire B est plus rapide que l'itinéraire A , si nous considérons le temps incompressible de transport et la capacité d'absorption, mais également plus coûteux, selon le péage d'infrastructure.

Chaque usager, dans le choix de sa période de départ et de son itinéraire, est ainsi confronté à un arbitrage entre le temps de transport et le coût de passage sur chaque itinéraire.

Les conditions d'équilibre définies précédemment étant valables pour chaque itinéraire, il nous faut déterminer les conditions qui conduisent un usager à changer d'itinéraire alors qu'il se trouve localement à l'équilibre.

Proposition 4. *A l'équilibre, un usager choisit l'itinéraire B si et seulement si les conditions suivantes sont respectées : $\alpha(Tf_A - Tf_B + 1) - (X-1)\beta > p_B$ et $\alpha(Tf_A - Tf_B) + \beta(t_A - t_B) > p_B$ avec $X \in \{1, \dots, K_B\}$.*

L'intuition derrière cette proposition est la suivante : l'itinéraire B est préféré à l'itinéraire A si et seulement si le différentiel de coût en terme de temps de transport est supérieur au montant du péage d'infrastructure et si chacune des périodes de départ à l'équilibre sur l'itinéraire B est préférable à une situation de congestion sur l'itinéraire A .

Preuve. Afin de déterminer les conditions générales d'équilibre, nous considérons les coûts respectifs de chaque période de départ pour chaque itinéraire :

$$C_i^A(t) = \alpha(Tf_A + T_A^\gamma(t)) + \beta(t^* - Tf_A - T_A^\gamma(t) - t) = \alpha(Tf_A + 1) + \beta(t^* - Tf_A - 1 - t) \quad (37)$$

$$C_i^B(t) = \alpha(Tf_B + T_B^\gamma(t)) + \beta(t^* - Tf_B - T_B^\gamma(t) - t) + p_B = \alpha(Tf_B + 1) + \beta(t^* - Tf_B - 1 - t) + p_B \quad (38)$$

Puisque les conditions d'équilibre précédentes sont valables pour chaque itinéraire, nous obtenons $T_A^v(t) = T_B^v(t) = 1$.

De plus, afin de déterminer les conditions d'équilibre sur les deux itinéraires considérés conjointement, nous devons nous assurer que le coût le plus défavorable

sur B à l'équilibre local est inférieur au coût le plus favorable hors équilibre sur A . Soient,

$$\begin{aligned} C^A(t^*-Tf_A-K_A-1) > C^B(t^*-Tf_B-K_B) &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A + 1) + (K_A)\beta > \alpha(Tf_B + 1) + (K_B-1)\beta + p_B \\ &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A - Tf_B) + (K_A-K_B+1)\beta > p_B \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} C^A(t^*-Tf_A) > C^B(t^*-Tf_B-K_B) &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A + 1) + \gamma > \alpha(Tf_B + 1) + (K_B-1)\beta + p_B \\ &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A - Tf_B) + \gamma - (K_B-1)\beta > p_B \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} C^A(t^*-Tf_A-2|N(t^*-Tf_A-2)>s_A) > C^B(t^*-Tf_B-X|N(t^*-Tf_B-X) \leq s_B) &\text{ avec } X \in \{1, \dots, K_B\} \\ &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A + 2) > \alpha(Tf_B + 1) + (X-1)\beta + p_B \\ &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A - Tf_B + 1) - (X-1)\beta > p_B \end{aligned} \quad (41)$$

Les équations (39) et (40) précisent qu'il est plus intéressant pour un usager de choisir la période la plus défavorable sur l'itinéraire B dans les conditions d'équilibre qu'une période de départ sur A hors équilibre.

L'équation (41) précise que toute période à l'équilibre sur l'itinéraire B est moins coûteuse qu'une situation de congestion sur l'itinéraire A , quelle que soit la période considérée.

Il nous reste ensuite à déterminer la différence des périodes de départ qui conduira un usager à préférer l'itinéraire B à l'itinéraire A lorsque cet usager se trouve dans une situation d'équilibre sur les deux itinéraires. Si on note t_j , la période de départ précédent t^*-Tf_j sur l'itinéraire j , on a $t' = t^*-Tf_A - t_A$ et $t'' = t^*-Tf_B - t_B$, avec t' et t'' deux périodes de départ d'équilibre sur l'itinéraire A et l'itinéraire B respectivement. Nous obtenons donc la condition supplémentaire suivante :

$$\begin{aligned} C_i^A(t') > C_i^B(t'') &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A + 1) + (t_A-1)\beta > \alpha(Tf_B + 1) + (t_B-1)\beta + p_B \\ &\Leftrightarrow \alpha(Tf_A - Tf_B) + \beta(t_A - t_B) > p_B \end{aligned} \quad (42)$$

Grâce à l'équation (42) nous connaissons l'écart minimum de période de départ entre les itinéraires qui justifie le passage sur l'itinéraire payant. Cet écart minimum est donnée par l'équation suivante : $t_A - t_B > [p_B - \alpha(Tf_A - Tf_B)]/\beta$.

Selon les équations précédentes, les conditions (39) et (40) se déduisent des conditions (38) et (41). De plus, si $t_A - t_B \geq K_A - K_B + 1$, alors la relation suivante est vérifiée:

$$\alpha (Tf_A - Tf_B) + \beta (t_A - t_B) > \alpha(Tf_A - Tf_B + 1) - (K_B - 1)\beta > p_B \quad (43)$$

Précisons que le cas « arriver en retard appartient à une situation d'équilibre », n'est pas traité dans le mode deux itinéraires. En effet, nous considérons qu'introduire un deuxième itinéraire a pour objectif d'éviter que certains usagers arrivent en retard lorsque les conditions d'équilibre sont respectées.

D. Comment se répartissent les usagers sur les deux itinéraires ?

Les usagers comparent les meilleures heures de départ possibles sur chaque itinéraire et déterminent si cet écart entre ces périodes de départ justifie le choix de l'itinéraire payant et son coût de péage.

Conformément à l'équation (43), cela se traduit de la façon suivante : dès lors que l'itinéraire B est payant ($p_B > 0$), « s » usagers choisissent l'itinéraire A à la première période de l'équilibre ($t^* - Tf_A - 1$). Le « s+1^{ème} » usager choisit l'itinéraire B en $t^* - Tf_A - 2$ si l'équation suivante est vérifiée : $t_A - t_B > [p_B - \alpha (Tf_A - Tf_B)] / \beta$ c'est à dire $2 - 1 > [p_B - \alpha (Tf_A - Tf_B)] / \beta$; dans le cas contraire, il choisit l'itinéraire A. Il en va de même pour tous les individus jusqu'à ce que les N usagers aient choisis une période de départ et un itinéraire.

2. Procédure et résultats expérimentaux

Nous proposons de réfuter expérimentalement les prédictions théoriques présentées précédemment. L'objectif de cette analyse est double. Il s'agit d'une part de comprendre comment l'introduction d'un deuxième itinéraire améliore la coordination des usagers et permet de parvenir plus aisément à une situation d'équilibre. D'autre part, nous analysons l'impact du prix de péage sur le comportement décisionnel des usagers en introduisant des prix de péage différents d'une expérience à l'autre.

Nous présentons successivement le protocole expérimental, les équilibres chiffrés et la population testée (point A), puis une analyse des résultats expérimentaux comprenant une analyse descriptive et une analyse économétrique (point B).

A. Protocole expérimental

Pour tester le modèle théorique présenté précédemment, nous avons organisé une série d'expériences. La première étape a été de fixer des valeurs pour chacun des paramètres de notre modèle et de calculer les différentes solutions qui lui sont associées. Ce paramétrage a été réalisé au moyen de simulations mathématiques.

Nous définissons les valeurs retenues pour les paramètres suivants : N (le nombre total d'utilisateurs), s_A et s_B (les capacités d'absorption des deux itinéraires), K_A et K_B (le nombre de périodes de départ à l'équilibre pour chaque itinéraire), les valeurs de α , β , γ , et enfin les différentes valeurs du prix de péage (p_A et p_B). Au cours de l'expérience, les utilisateurs disposent de 15 périodes de départ possibles sur chaque itinéraire. Ces périodes de départ appartiennent à l'ensemble $\{t^-9, \dots, t^*+4\}$.*

Nous considérons un total de $N = 8$ utilisateurs. La capacité d'absorption de chaque itinéraire est $s_A = 1$ pour l'itinéraire A et $s_B = 2$ pour l'itinéraire B. De plus, sans perte de généralité et par souci de simplicité, nous considérons que les temps fixes de transport sur chaque itinéraire sont nuls ($Tf_A = Tf_B$). Nous retenons également $K_A = 4$ et $K_B = 2$. Concernant les coûts unitaires de transport, les valeurs retenues sont $\alpha = 16$, $\beta = 5$ et $\gamma = 40$. Les rapports entre ces paramètres sont les suivants $\alpha/\beta = 3,2$ et $\gamma/\beta = 8$. Enfin, les prix de péages testés expérimentalement prennent les valeurs 4 et 8.

Nous avons retenu ces valeurs pour les raisons suivantes : chaque expérience a réuni 8 participants, ce qui permet, étant données les capacités d'absorption de chaque itinéraire, de définir des situations d'équilibre simples à mettre en œuvre mais aussi des situations de congestion coûteuses pour les participants et probables quant à leur apparition. En se référant aux caractéristiques routières réelles, le rapport entre la population des utilisateurs (N) et la capacité de l'itinéraire (s) doit être au minimum égal à 4. Par conséquent, la capacité d'absorption de l'itinéraire payant doit respecter cette valeur ($K_B = N/s_B = 4$, donc $s_B = 2$). La capacité de l'itinéraire A, inférieure à celle de B, est égale à 1. Pour respecter les conditions d'équilibre, l'ensemble des périodes de départ retenu prend en compte le rapport N/s le plus élevé entre les deux itinéraires (c'est à dire 8). De ce fait, nous définissons 9 périodes avant la date objectif (t^). La coordination des utilisateurs à l'équilibre est possible et l'ajout d'une neuvième période permet de déceler d'éventuelles erreurs de décision. Pour cette dernière raison, nous définissons 4 périodes de départ au-delà de la période objectif. Notons que la période objectif a été fixée à 0 par souci de simplicité, la compréhension des instructions de l'expérience par les participants étant un élément déterminant de sa réussite. Afin de déterminer les*

valeurs de α , β et γ , nous nous sommes référés aux études réalisées¹¹ qui définissent un rapport β/α compris entre $1/3$ et $1/2$ et un rapport γ/α compris entre 2,5 et 3. Compte tenu de ces définitions et des simulations réalisées, nous avons retenu les valeurs suivantes $\alpha = 16$, $\beta = 5$ et $\gamma = 40$. Enfin, deux niveaux de péage sont introduits : un premier égal à 4 et un deuxième égal à 8. Ce choix se justifie comme suit : compte tenu de l'équation (13), pour que l'itinéraire B soit attractif, il faut que $(t_A - t_B) > p_B/\beta$. Le tableau suivant présente la répartition des 8 usagers sur chaque itinéraire en fonction des prix de péage :

¹¹ De Palma (2001), De Palma et Rochat (1995) et chapitre 1 de cette étude.

Tableau 4 : Répartition des usagers à l'équilibre selon la valeur du péage

Valeurs de P_B	Nombre d'usagers sur A (nombre de périodes de départ)	Nombre d'usagers sur B (nombre de périodes de départ)
De 1 à 4	3 usagers et 3 périodes nécessaires	5 usagers et 3 périodes nécessaires
De 6 à 9	4 usagers et 4 périodes nécessaires	4 usagers et 2 périodes nécessaires
De 11 à 14	4 usagers et 4 périodes nécessaires	4 usagers et 2 périodes nécessaires
De 16 à 19	5 usagers et 5 périodes nécessaires	3 usagers et 2 périodes nécessaires
De 21 à 24	6 usagers et 6 périodes nécessaires	2 usagers et une période nécessaire
De 26 à 29	7 usagers et 7 périodes nécessaires	1 usager et une période nécessaire
A partir de 31	8 usagers et 8 périodes	Aucun usager

Tout d'abord, nous rejetons les valeurs de péage multiples de β (multiple de 5) afin d'éviter les problèmes d'indécision sur le choix de l'itinéraire. Compte tenu de ces données d'équilibre, un premier prix de péage est fixé à 4 afin de majorer le nombre d'usagers empruntant l'itinéraire B. En effet, une telle configuration permet, à l'équilibre, d'améliorer la coordination des usagers sur l'itinéraire A en le rendant plus fluide. A partir de là, le deuxième prix de péage doit permettre une répartition symétrique des usagers entre les deux itinéraires. Les prix de péages possibles varient entre 6 et 14, nous choisissons arbitrairement de doubler le premier prix de péage et de retenir ainsi la valeur 8.

Nous pouvons à présent définir les valeurs des différents paramètres dans les conditions de l'équilibre.

Tout d'abord, lorsque le prix du péage est de 4. Comme le montre le tableau 3, trois usagers choisissent de partir sur l'itinéraire A et cinq usagers choisissent de partir sur l'itinéraire B. A l'équilibre, les usagers choisissent des périodes de départ appartenant aux intervalles $\{t^*-1, \dots, t^*-3\}$ sur l'itinéraire A et de $\{t^*-1, \dots, t^*-3\}$ sur l'itinéraire B.

Tableau 5 : Coûts individuels de transport à l'équilibre avec un péage de 4

Heure de départ	Coût subi par l'utilisateur sur l'itinéraire A (nombre d'utilisateurs concernés)	Coût subi par l'utilisateur sur l'itinéraire B (nombre d'utilisateurs concernés)
t^{*-1}	$Coût = \alpha = 16$ 1 usager	$Coût = \alpha + p_B = 20$ 2 usagers
t^{*-2}	$Coût = \alpha + \beta = 21$ 1 usager	$Coût = \alpha + \beta + p_B = 25$ 2 usagers
t^{*-3}	$Coût = \alpha + 2\beta = 26$ 1 usager	$Coût = \alpha + 2\beta + p_B = 30$ 1 usager

Ensuite, lorsque le prix du péage est de 8. Comme nous pouvons le constater dans le tableau 6, quatre usagers choisissent de partir sur l'itinéraire A et quatre usagers choisissent de partir sur l'itinéraire B. A l'équilibre, ces usagers choisissent des périodes de départ appartenant aux intervalles $\{t^{*-1}, \dots, t^{*-4}\}$ sur l'itinéraire A et de $\{t^{*-1}, \dots, t^{*-2}\}$ sur l'itinéraire B.

Tableau 6 : Coûts individuels de transport à l'équilibre avec un péage de 8

Heure de départ	Coût subi par l'utilisateur sur l'itinéraire A (nombre d'utilisateurs concernés)	Coût subi par l'utilisateur sur l'itinéraire B (nombre d'utilisateurs concernés)
t^{*-1}	$Coût = \alpha = 16$ 1 usager	$Coût = \alpha + p_B = 24$ 2 usagers
t^{*-2}	$Coût = \alpha + \beta = 21$ 1 usager	$Coût = \alpha + \beta + p_B = 29$ 2 usagers
t^{*-3}	$Coût = \alpha + 2\beta = 26$ 1 usager	
t^{*-4}	$Coût = \alpha + 3\beta = 31$ 1 usager	

Cette répartition des usagers à l'équilibre permet de déterminer le coût social associé à chaque valeur du péage. Pour calculer ce coût, nous additionnons les coûts

individuels de transport présentés dans les tableaux 5 et 6. Ainsi le coût social associé au péage de valeur 4 est égal à 183 tandis que celui associé au péage de valeur 8 est de 200.

Les conditions de l'expérience

Les expériences ont été réalisées au moyen du logiciel REGATE¹² au laboratoire GATE. Les 96 participants¹³ sont des étudiants des universités Lyon1, Lyon2, Lyon3, de l'EM (Ecole de Management de Lyon) et de l'ITECH (Institut TExtile et CHimie de Lyon). Ces étudiants n'ont jamais participé à une expérience auparavant et ne connaissent pas l'objectif de l'expérience au moment de leur convocation. Dans chaque traitement expérimental (péage à 4 et péage à 8, notés ensuite HO-P4 et HO-P8¹⁴), six groupes de huit personnes sont testés afin d'obtenir un nombre suffisant de données indépendantes au vu des tests statistiques et économétriques réalisés. Compte tenu de la dimension de la salle d'économie expérimentale du laboratoire, 16 participants sont convoqués en même temps. Ainsi, chaque personne participant à l'expérience ne pouvait à aucun moment savoir avec quelles autres personnes elle était en interaction.

A leur arrivée au laboratoire, les participants sont conduits dans la salle d'économie expérimentale et prennent place devant des ordinateurs, séparés les uns des autres par des cloisons. Ainsi, aucune communication entre les individus n'est possible. Les instructions¹⁵ de l'expérience sont distribuées à chaque sujet et lues à

¹² Le logiciel est disponible gratuitement à l'adresse suivante <http://www.gate.cnrs.fr/> ou sur demande auprès des auteurs.

¹³ Ces deux traitements (péage à 4 et péage à 8) ont réunis 96 personnes. Les traitements de la section 2 (hétéro) ont réunis 96 autres personnes. Nous avons ainsi testé un total de 192 personnes.

¹⁴ HO-P4 et HO-P8 : HO en référence à des usagers homogènes (à la différence de la section 2 du chapitre 3 et P4 ou P8 pour le prix du péage retenu.

¹⁵ Les instructions sont disponibles en annexe .

haute voix. Après une relecture, un questionnaire de compréhension est distribué aux sujets et les expérimentateurs répondent aux questions de façon privée. Chaque participant prend 15 décisions successives de choix de période de départ et d'itinéraire (i.e. l'expérience est répétée 15 fois). A chaque répétition, les sujets prennent leurs décisions¹⁶ (par décision nous entendons un choix d'une période de départ et d'un itinéraire) et une fois que les sept autres membres du groupe ont pris leur décision, le serveur rassemble ces choix, et calcule le temps de transport et le gain de chaque participant. Après chaque répétition, les informations suivantes sont renvoyées à chaque participant : l'itinéraire et la période de départ choisis, le temps de transport, la période d'arrivée, le nombre de participants ayant choisi la même période de départ sur le même itinéraire, et le gain du participant¹⁷.

Au terme de l'expérience, nous faisons la moyenne des points gagnés à chaque répétition. Cette moyenne est convertie en Euro sur la base de 500 points = 12 €. A cette somme s'ajoute un forfait de participation de 4 €. Les sujets se rendent successivement dans un bureau, remplissent un reçu et reçoivent leurs gains. Cette procédure de paiement individuel permet d'assurer l'anonymat des sujets et la confidentialité des gains.

Comme le montre la figure 11, au cours du déroulement d'une session expérimentale, les sujets disposent des trois zones suivantes sur leurs écrans d'ordinateur :

¹⁶ Les écrans de saisie des décisions et de renvoi des informations présentés dans la figure 11 permettent de se rendre compte de la manière dont les participants faisaient leurs choix.

¹⁷ Chaque sujet dispose d'une dotation initiale de 500 points au début de chaque répétition. A cette dotation se soustrait le coût total individuel de transport. Dans certains cas, ce gain peut être négatif. Cependant, étant donnée la somme forfaitaire versée aux participants, le gain net ne peut être négatif.

- Afin d'aider les sujets à prendre leurs décisions, une première zone leur permet de tester les différentes heures de départ sur chaque itinéraire pour connaître le gain associé en fonction des temps de transport possibles (et donc du niveau de congestion). Cette zone de test est présente en permanence à l'écran. Les sujets peuvent ainsi y avoir recours à n'importe quel moment de l'expérience.
- Une deuxième zone leur permet de saisir leurs décisions (choix d'itinéraire et de période de départ).
- Une troisième zone informe chaque sujet des éléments liés à sa décision pour chacune des répétitions de l'expérience.

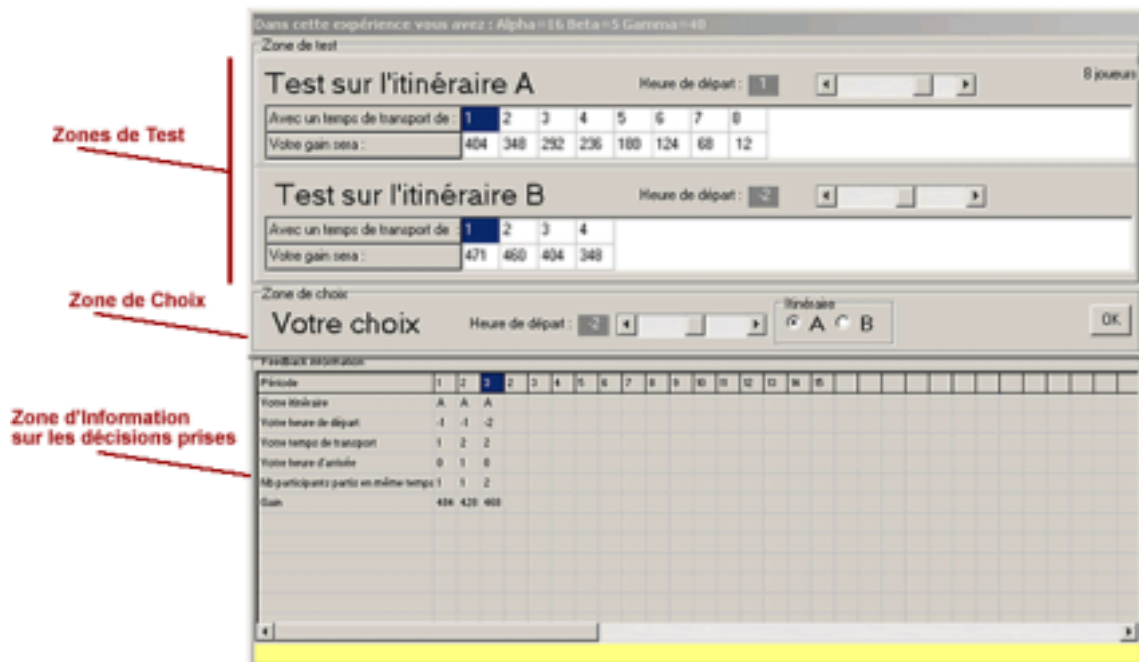


Figure 11 : Ecran de saisie des décisions et de renvoi des informations

B. statistiques descriptives et analyse économétrique

Dans cette section, l'objectif est double. D'une part, il s'agit d'analyser l'impact du prix de péage (péage à 4 ou péage à 8) sur les décisions individuelles (choix d'heure de départ et d'itinéraire) et sur la congestion (temps de transport et heures d'arrivée). D'autre part, il s'agit d'étudier l'influence de la congestion (temps de transport et heures d'arrivée) sur les décisions individuelles (choix d'heure de départ et

d'itinéraire) toujours selon le niveau de péage retenu. Ainsi, nous déterminerons si les réactions individuelles à la congestion sont influencées par la valeur du péage.

- **Les choix d'heure de départ**

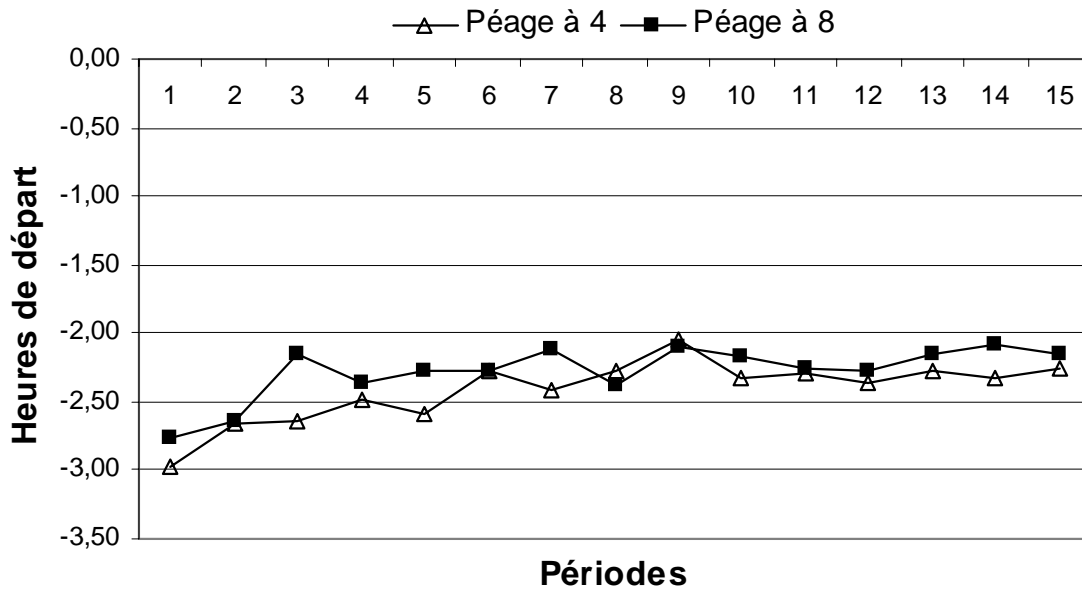
Considérons tout d'abord les heures de départ moyenne survenues dans chaque traitement (HO-P4 et HO-P8) sur l'ensemble des 15 répétitions de l'expérience. Les moyennes et les écarts-type des heures de départ sont calculés pour chaque groupe et dans chaque traitement, à la fois pour chacune des 15 répétitions mais également sur l'expérience dans son ensemble¹⁸. Le graphique 1 présente l'évolution des moyenne des Heures de Départ (HD par la suite) à chaque répétition pour chacun des deux traitements.

Observation 1. Sans distinction d'itinéraire, que le péage soit fort ou faible, les usagers choisissent les mêmes heures de départ.

Preuve de l'observation 1.

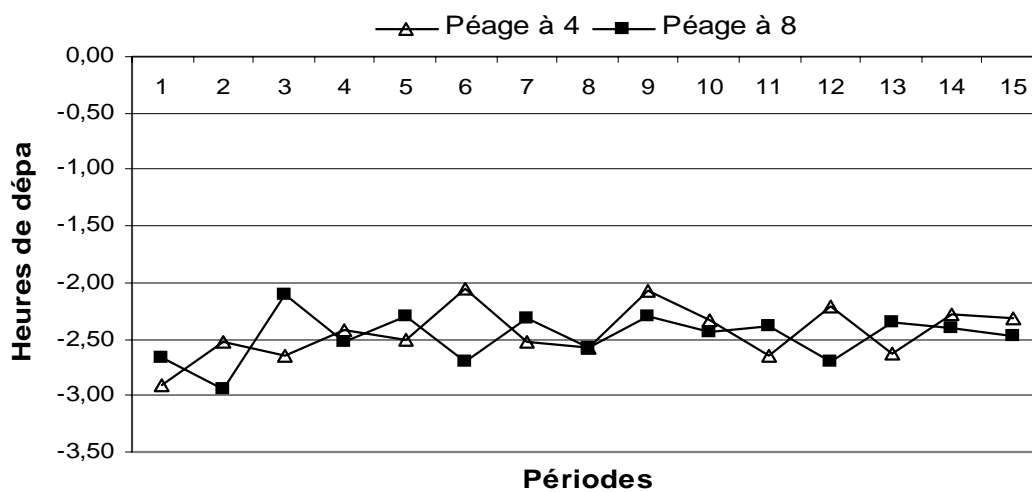
Une première analyse nous indique que la moyenne des HD s'établit à $-2,41$ (écart type $1,40$) et $-2,28$ (écart type $1,19$) pour les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que les HD sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que tout itinéraire confondu, les usagers choisissent en moyenne les mêmes heures de départ quel que soit le coût du péage.

¹⁸ Les tableaux de données sont disponibles en Annexe

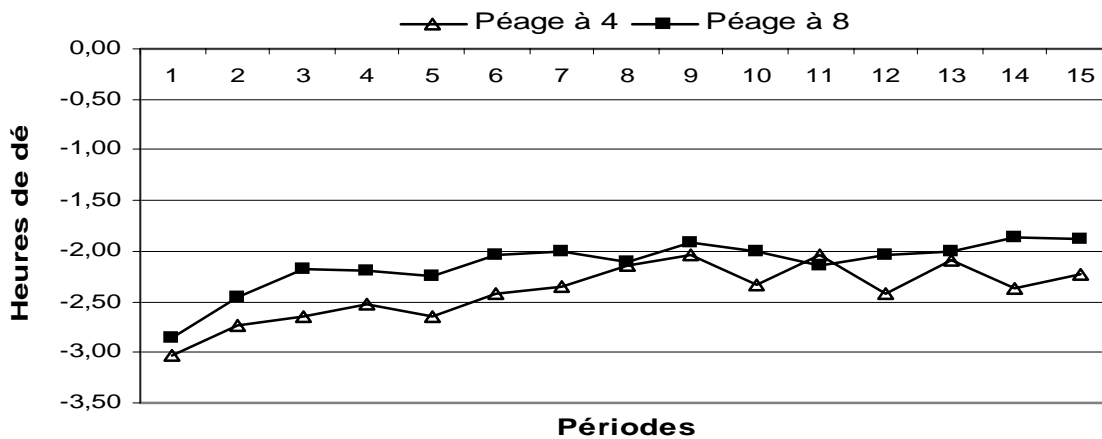


Graphique 1 : Evolution des Heures de Départ au cours de l'expérience

Nous pouvons à présent affiner notre étude et analyser itinéraire par itinéraire le choix des HD de nos usagers. Pour cela, nous calculons à nouveau les moyennes (et écart types) des HD mais en distinguant l'itinéraire retenu. Sur l'ensemble de l'expérience, l'itinéraire A a été choisi 255 fois dans le traitement HO-P4 alors qu'il a été choisi 312 dans le traitement HO-P8. L'itinéraire B a été choisi 465 fois dans le traitement HO-P4 et 408 dans le traitement HO-P8. Les graphiques suivants (Graphiques 2 et 3) représentent l'évolution des heures de départ dans chaque traitement en fonction de l'itinéraire étudié.



Graphique 2 : Evolution des HD sur l'itinéraire A



Graphique 3 : Evolution des HD sur l'itinéraire B

Observation 2. En empruntant l'itinéraire gratuit, et quel que soit le niveau du péage de l'itinéraire payant, les usagers choisissent les mêmes heures de départ.

Observation 3. En empruntant l'itinéraire payant, les usagers partent plus tôt lorsque le péage est faible que lorsque le péage est fort.

Preuve de l'observation 2.

L'analyse de l'itinéraire A, nous indique que la moyenne (l'écart type) des HD est de $-2,45$ (1,60) pour HO-P4 et de $-2,47$ (1,29) pour HO-P8. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur les moyennes de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que les HD sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que sur l'itinéraire A, les usagers choisissent en moyenne les mêmes heures de départ quel que soit le coût du péage de l'itinéraire B.

Preuve de l'observation 3.

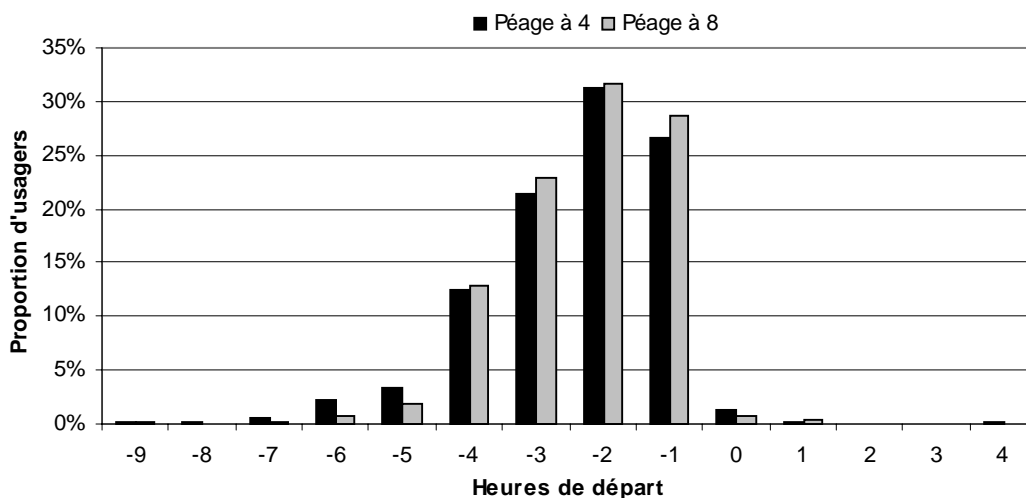
L'analyse de l'itinéraire B, nous indique que la moyenne (l'écart type) des HD est de $-2,39$ (1,28) pour HO-P4 et de $-2,13$ (1,08) pour HO-P8. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur les moyennes de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que les HD sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse est rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en

conclure que sur l'itinéraire B, les usagers qui ont un coût de péage de 4 points choisissent en moyenne des mêmes heures de départ plus éloignées de l'heure objectif les usagers qui ont un coût de péage de 8 points.

Il existe donc bien une différence de comportement en matière de choix d'heure de départ mais uniquement sur l'itinéraire payant.

Toujours sur l'analyse des HD, nous nous intéressons à présent à la distribution des choix d'heure de départ faits par les usagers au cours de l'expérience. Pour ce faire, nous considérons la distribution des choix d'HD dans chaque traitement sur l'ensemble de l'expérience. Comme précédemment, nous analysons dans un premier temps ces distributions tout itinéraire confondu puis chaque itinéraire pris séparément.

Le graphique 4 présente les distributions des HD dans chaque traitement tout itinéraire confondu.



Graphique 4 : Distribution des HD selon le traitement

Ce graphique met en relation les distributions des choix individuels d'HD dans chaque traitement sur l'ensemble de l'expérience (i.e. les 15 répétitions confondues). Dans le traitement HO-P4, nous observons une distribution avec un mode à -2. De

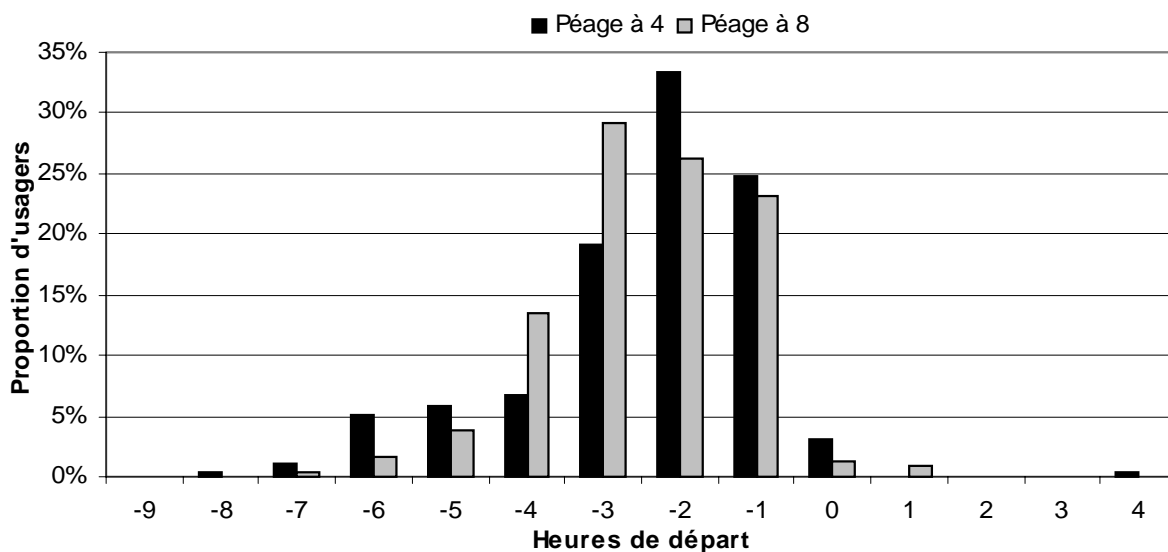
plus, 91,81% des décisions de départ sont comprise sur l'intervalle d'équilibre, [-4 ; -1]. Dans le traitement HO-P8, l'heure de départ modale est également de -2 et la proportion de choix sur l'intervalle d'équilibre [-4 ; -1] est légèrement plus importante avec 95,97% des décisions.

Observation 4. Sans distinction d'itinéraire, la distribution des choix d'heures de départ des usagers sont les mêmes, quel que soit le coût de péage.

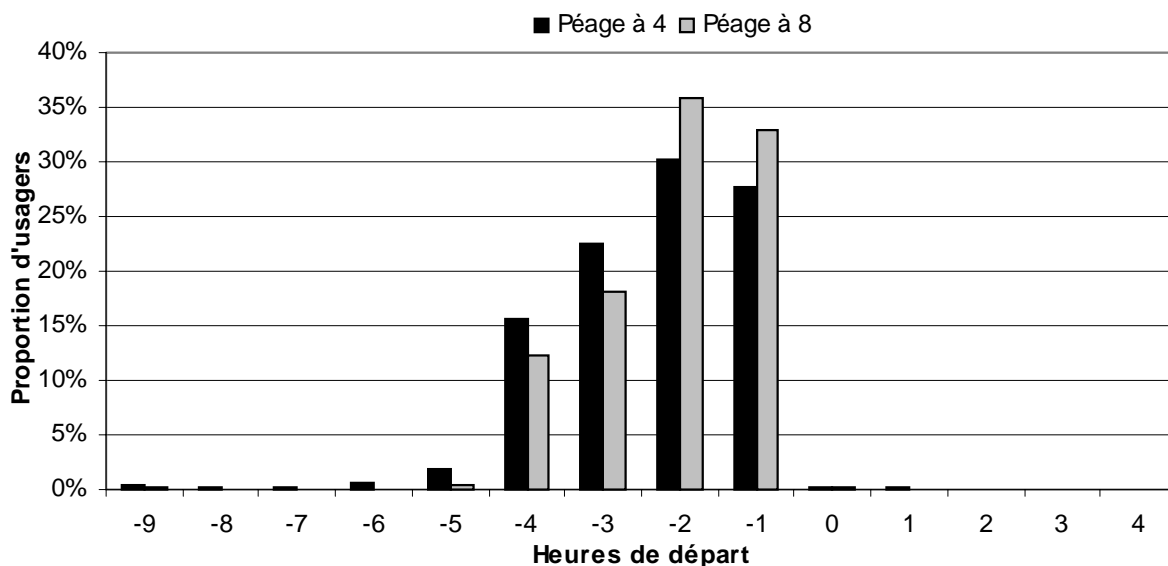
Preuve de l'observation 4.

Pour comparer ces deux distributions, nous réalisons un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov considérant l'hypothèse nulle que les heures de départ sont identiquement distribuées entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 10%, nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle. Nous concluons que les usagers ont réalisés les mêmes choix d'heure de départ entre le traitement HO-P4 et HO-P8.

Nous nous intéressons à présent à la distribution des choix de HD dans chaque traitement, mais en distinguant l'itinéraire retenu par les usagers. Les graphiques 5a et 5b présentent les distributions des HD dans chaque traitement, pour l'itinéraire A et l'itinéraire B respectivement.



Graphique 5a : Distribution des HD selon le traitement sur l'itinéraire A



Graphique 5b : Distribution des HD selon le traitement sur l'itinéraire B

Ces graphiques mettent en relation, pour chaque itinéraire, les distributions des choix individuels d'HD dans chaque traitement sur l'ensemble des 15 répétitions.

Sur l'itinéraire A, pour le traitement HO-P4, nous observons une distribution avec un mode à -2. De plus, 83,92% des décisions de départ sont comprise sur l'intervalle

d'équilibre $[-4 ; -1]$. Pour le traitement HO-P8, l'heure de départ modale est de -3 et la proportion de choix sur l'intervalle d'équilibre $[-4 ; -1]$ est plus importante avec 92% des décisions.

Sur l'itinéraire B, pour le traitement HO-P4, nous observons une distribution avec un mode à -2 . De plus, 96,13% des décisions de départ sont comprise sur l'intervalle d'équilibre $[-4 ; -1]$. Pour le traitement HO-P8, l'heure de départ modale est également de -2 et la proportion de choix sur l'intervalle d'équilibre $[-4 ; -1]$ est plus importante avec 99% des décisions.

Observation5. Sur l'itinéraire A, la distribution des choix d'heures de départ des usagers avec un péage élevé est plus regroupée autour du mode que celle des usagers avec un péage faible.

Observation 6. Sur l'itinéraire B, la distribution des choix d'heures de départ des usagers avec un péage élevé est plus regroupée autour du mode que celle des usagers avec un péage faible.

Preuve de l'observation 5.

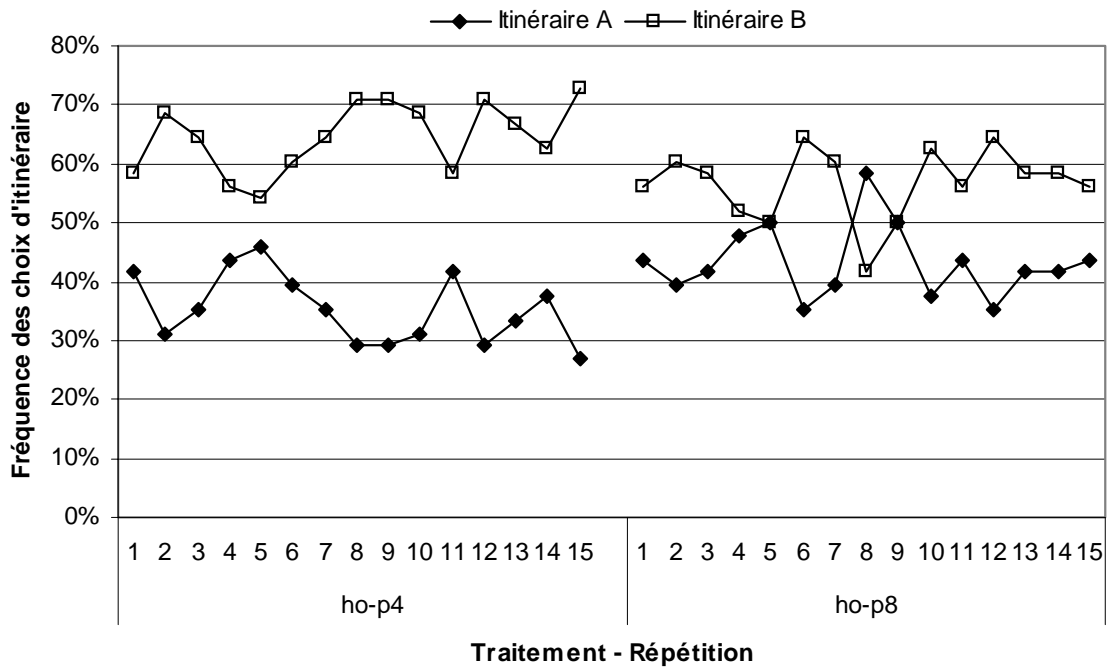
Pour comparer ces deux distributions, en ne retenant que les usagers qui ont choisi l'itinéraire A, nous réalisons un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov considérant l'hypothèse nulle que les heures de départ sont identiquement distribuées entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 10%, nous rejetons l'hypothèse nulle. Nous concluons que les usagers du traitement HO-P8 ont des choix d'heure de départ plus regroupés autour du mode que ceux des usagers du traitement HO-P4.

Preuve de l'observation 6.

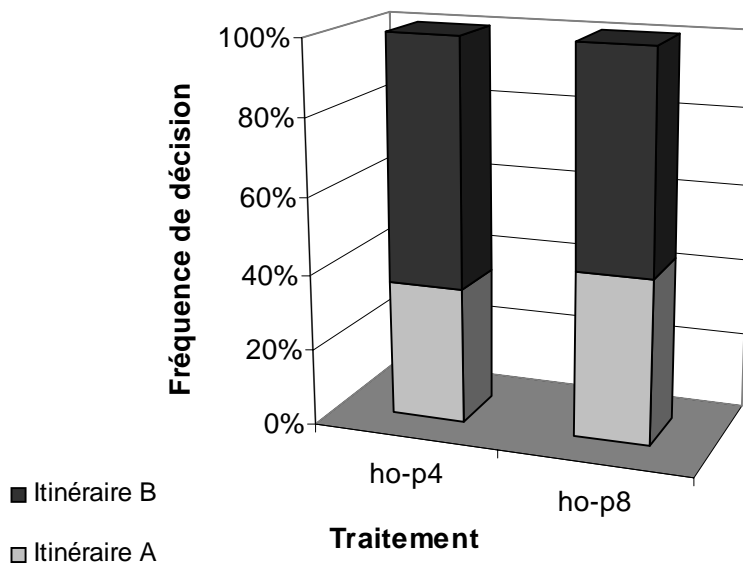
Pour comparer ces deux distributions, en ne retenant que les usagers qui ont choisi l'itinéraire B, nous réalisons un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov considérant l'hypothèse nulle que les heures de départ sont identiquement distribuées entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 1%, nous rejetons l'hypothèse nulle. Nous concluons que les usagers du traitement HO-P8 ont des choix d'heure de départ plus regroupés autour du mode que ceux des usagers du traitement HO-P4.

• **Les choix d'itinéraire**

L'analyse suivante s'intéresse au choix d'itinéraire, tout heure de départ confondu lorsque les usagers sont soumis à des coûts de péage différents. Nous considérons les choix d'itinéraire des usagers sur les 15 répétitions de l'expérience, dans chacun des 2 traitements. Les graphiques suivants (6 et 7) présentent, pour HO-P4 et HO-P8, d'une part, l'évolution des fréquences de choix d'itinéraire sur les 15 répétitions de l'expérience et d'autre part, la distribution des choix d'itinéraire sur l'ensemble de l'expérience.



Graphique 6 : Fréquence de choix des itinéraires. Comparaison des traitements



Graphique 7 : Distribution des choix d'itinéraire selon le traitement

L'analyse des données met en avant que l'itinéraire B est l'itinéraire le plus solliciter dans chacun des deux traitements. Pour le traitement HO-P4, 64,58% des décisions des usagers se sont portées sur l'itinéraire B alors qu'elles ne représentent que 56,67% dans le traitement HO-P8. Le choix de l'itinéraire B oscille entre 54,17% et

72,92% des décisions dans le traitement HO-P4 ; ce même choix oscille entre 41,57% et 64,58% des décisions dans le traitement HO-P8.

Observation 7. Lorsque le péage est faible, les usagers choisissent majoritairement l'itinéraire payant.

Observation 8. Lorsque le péage est fort, les usagers choisissent majoritairement l'itinéraire payant.

Observation 9.

Le coût du péage influence le choix d'itinéraire des usagers. Plus le péage est important, moins les usagers auront recours à l'itinéraire payant.

Preuve de l'observation 7.

Afin de savoir si les usagers choisissent plus ou moins un itinéraire par rapport à l'autre, lorsque le péage est de 4, nous soumettons les données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle est qu'il existe une équivalence entre les proportions de choix des itinéraires. Au taux d'erreur de 1% nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que les usagers soumis à un péage à 4 (HO-P4) choisissent plus souvent l'itinéraire B que l'itinéraire A.

Preuve de l'observation 8.

Dans le même but que précédemment, nous soumettons les données pour le traitement HO-P8, à un test bilatéral du χ^2 suivant l'hypothèse nulle d'une équivalence entre les proportions de choix des itinéraires. Au taux d'erreur de 5% nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que les usagers soumis à un péage à 8 choisissent plus souvent l'itinéraire B que l'itinéraire A.

Preuve de l'observation 9.

Afin de savoir si le coût du péage influence le choix de l'itinéraire, nous appliquons sur les données des deux traitements un test bilatéral du χ^2 suivant l'hypothèse nulle d'une équivalence des proportions de choix des itinéraires entre les

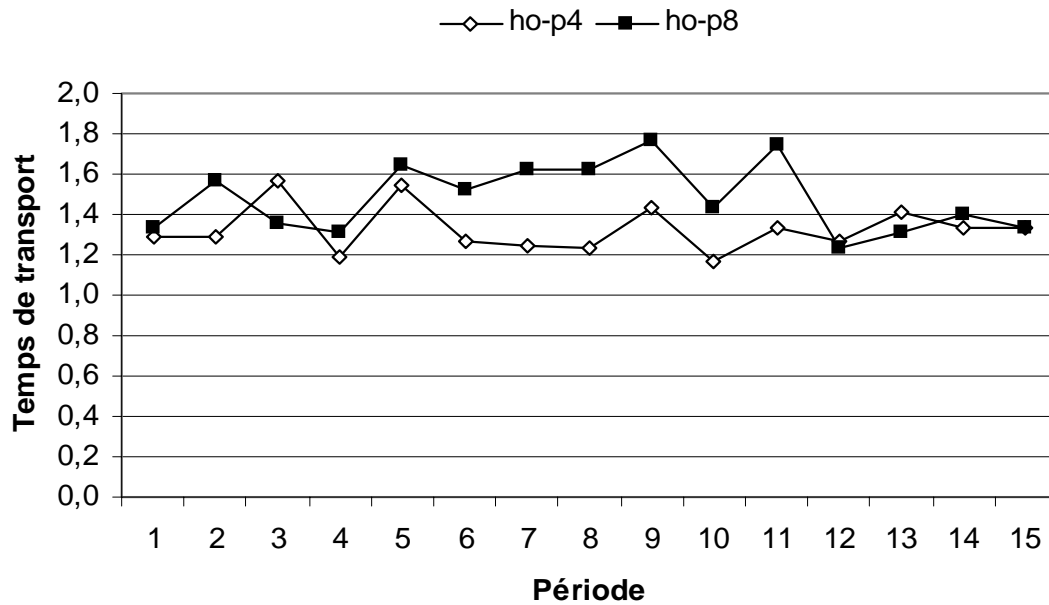
deux traitements. Au taux d'erreur de 1% nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que les usagers soumis à un péage à 4 choisissent plus souvent l'itinéraire B que les usagers soumis à un péage à 8.

L'analyse des variables de décisions des sujets nous a montré qu'il existait des différences de comportement tant en matière d'heure de départ qu'en matière de choix d'itinéraire. Nous portons à présent notre étude sur les conséquences de ces décisions, tout d'abord en analysant les niveaux de congestions apparus dans les expériences et ensuite en analysant les heures d'arrivée des usagers. Dans chacune de ces analyses, nous étudions l'impact de ces données sur la modification des choix des usagers pour déterminer comment la congestion et l'heure d'arrivée influence le comportement des sujets.

- **Rôle du Temps de Transport sur le processus de décision.**

La première conséquence des décisions individuelles étudiée est le niveau de congestion subit par les usagers. Ce niveau de congestion est représenté par la variable Temps de Transport (TT par la suite). Cette variable peut prendre 4 valeurs : 1, 2, 3 ou 4. Un temps de transport de 1 signifie que les usagers n'ont pas connu de congestion (itinéraire fluide). Un temps de transport de 4 signifie que les usagers ont connu un niveau de congestion maximal. Notre analyse porte dans un premier temps sur la distribution et l'évolution de TT, en fonction de l'itinéraire et en fonction du prix du péage.

Considérons tout d'abord les temps de transport moyens dans chaque traitement (HO-P4 et HO-P8) sur l'ensemble des 15 répétitions de l'expérience. Les moyennes et les écarts-type des temps de transport ont été calculés pour chacun des 6 groupes et dans chaque traitement, à la fois pour chacune des répétitions mais également sur l'expérience dans son ensemble. Le graphique 8 présente l'évolution des moyennes des temps de transport à chaque répétition pour chacun des deux traitements.



Graphique 8 : Evolution des Temps de Transport Moyens, tout itinéraire confondu

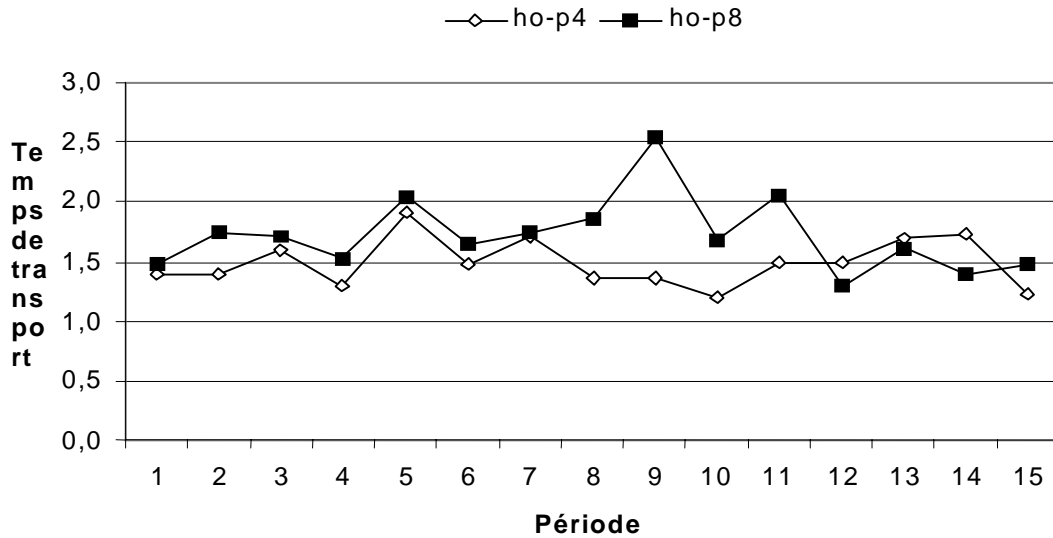
Observation 10. Tout itinéraire confondu, le niveau de congestion est plus faible lorsque le coût du péage est faible.

Preuve de l'observation 10.

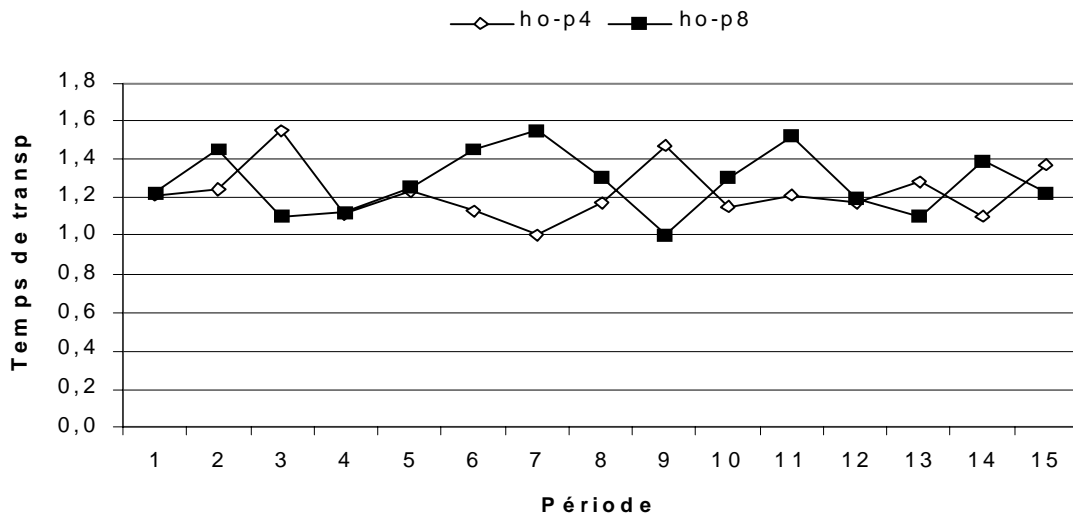
La moyenne des TT est de 1,32 (écart type 0,57) et 1,48 (écart type 0,69) pour les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des TT de chaque groupe d'utilisateurs considérant l'hypothèse nulle que les TT sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse est rejetée au taux d'erreur de 5%. Nous pouvons en conclure que les temps de transport des usagers, tout itinéraire confondu, plus faibles lorsque le coût du péage est de 4 que lorsqu'il est de 8.

Pour affiner nos conclusions, nous pratiquons une autre analyse sur les mêmes données mais en différenciant les itinéraires. Nous calculons à nouveau les moyennes et écart types des TT mais en distinguant l'itinéraire retenu. Sur l'ensemble des 15 répétitions de l'expérience, l'itinéraire A a été choisi 255 fois dans le traitement HO-

P4 alors qu'il a été choisi 312 dans le traitement HO-P8. L'itinéraire B a été choisi 465 fois dans le traitement HO-P4 et 408 dans le traitement HO-P8. Les graphiques suivants (Graphiques 9 et 10) représentent l'évolution des temps de transport dans chaque traitement en fonction de l'itinéraire étudié.



Graphique 9 Evolution des Temps de Transport moyen sur l'itinéraire A



Graphique 10 : Evolution des Temps de Transport moyen sur l'itinéraire B

Observation 11. Sur l'itinéraire A, la congestion est plus faible lorsque le coût du péage est faible.

Observation 12. Sur l'itinéraire B, la congestion est plus faible lorsque le coût du péage est faible.

Preuve de l'observation 11.

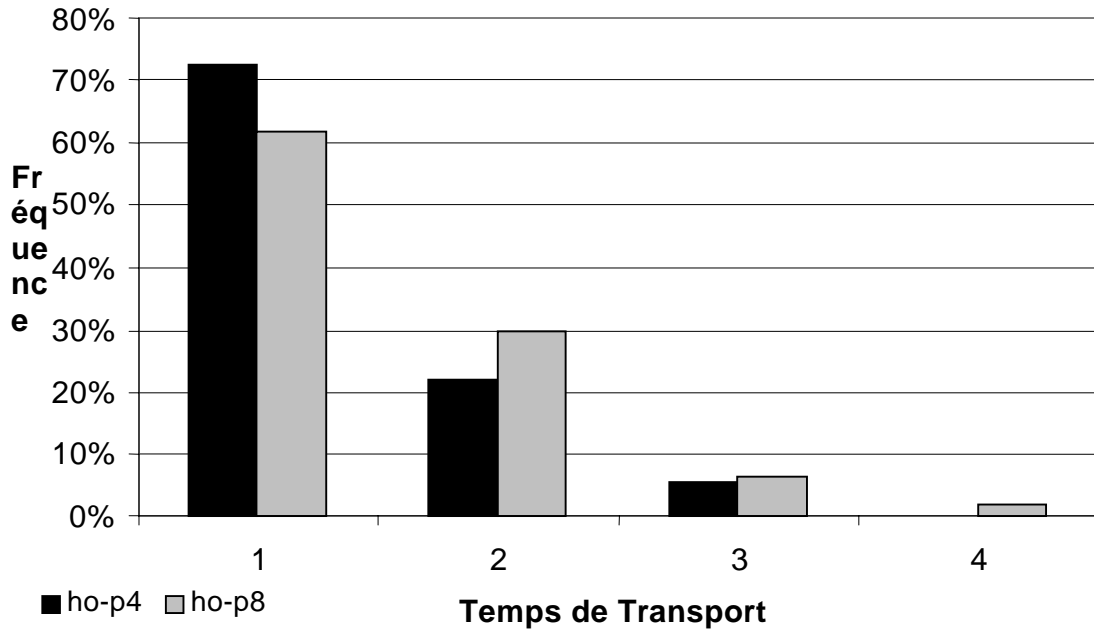
L'analyse de l'itinéraire A, nous indique que la moyenne (l'écart type) des TT est de 1,5 (0,66) pour HO-P4 et de 1,73 (0,83) pour HO-P8. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé considérant l'hypothèse nulle que les TT sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse est rejetée au taux d'erreur de 5%. Nous pouvons en conclure que lorsque le coût de péage est de 4, les usagers connaissent un temps de transport moyen sur l'itinéraire A plus faible que celui des usagers de l'itinéraire A lorsque le coût de péage est de 8.

Preuve de l'observation 12.

L'analyse de l'itinéraire B, nous indique que la moyenne (l'écart type) des TT est de 1,23 (0,49) pour HO-P4 et de 1,28 (0,48) pour HO-P8. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé considérant l'hypothèse nulle que les TT sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse est rejetée au taux d'erreur de 5%. Nous pouvons en conclure que lorsque le coût de péage est de 4, les usagers connaissent un temps de transport moyen sur l'itinéraire B plus faible que celui des usagers de l'itinéraire B lorsque le coût de péage est de 8.

Ces résultats sur l'évolution des temps de transport confirment les précédents résultats sur le choix des heures de départ. Nous avons conclu sur l'analyse de HD qu'il existait une différence de distribution selon l'itinéraire retenu. Ce résultat se retrouve par l'entremise des temps de transport, avec toutefois un raffinement : quels que soient l'itinéraire et le traitement retenus, les usagers connaissent une congestion. L'analyse suivante va permettre de confirmer cette intuition.

Nous poursuivons l'analyse des temps de transport mais en nous intéressant à leur distribution au cours de l'expérience. Les données étudiées regroupent les différents temps de transport sur l'ensemble des 15 répétitions du jeu et dans chaque traitement. Nous analysons dans un premier temps ces distributions tout itinéraire confondu puis chaque itinéraire pris séparément. Le graphique 11 présente les distributions des TT dans chaque traitement tout itinéraire confondu.



Graphique 11 : distribution des temps de transport tout itinéraire confondu

Ce graphique met en relation les distributions des TT dans chaque traitement sur l'ensemble des 15 répétitions. Pour chacun des deux traitements, nous observons une distribution avec un mode à 1. Pour le traitement HO-P4, 72,6% des temps de transport sont égaux à 1, ce qui signifie que dans 72,6% des cas, les usagers n'ont pas connu de congestion. Pour le traitement HO-P8, ce pourcentage n'est que de 61,8% des observations.

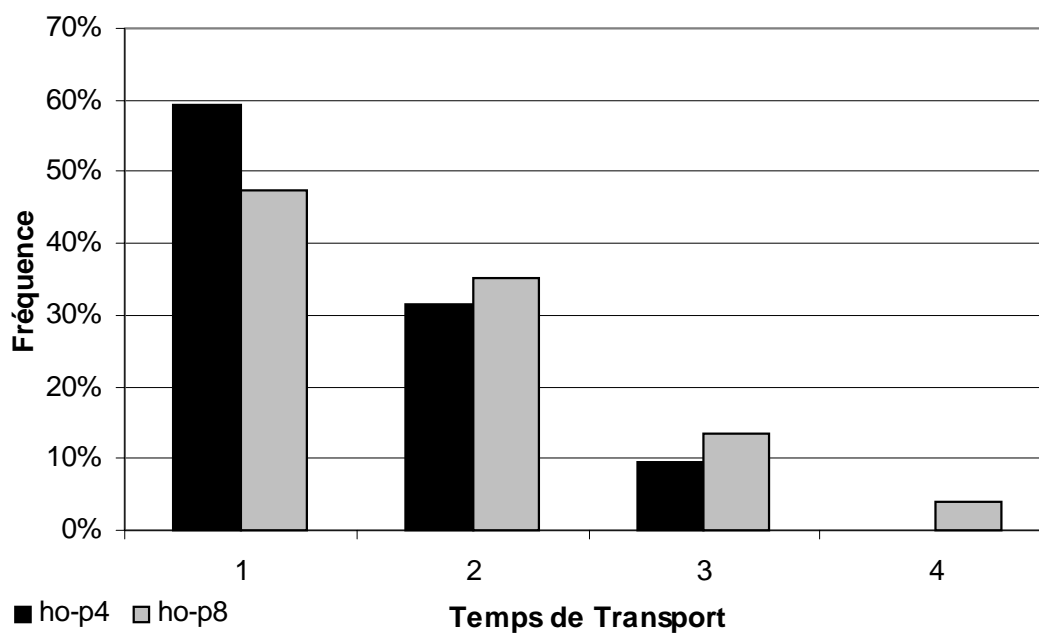
Observation 13. Tout itinéraire confondu, la congestion est moins dispersée lorsque le prix de péage est faible.

Preuve de l'observation 13.

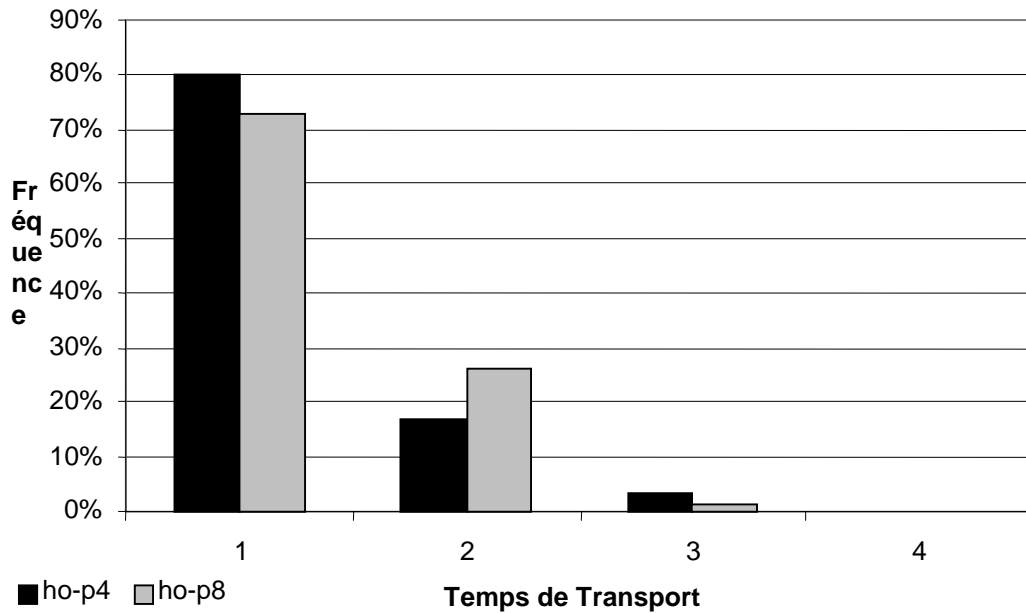
Afin de savoir si l'un des deux traitements favorise l'absence de congestion, nous appliquons sur les données un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov. L'hypothèse nulle testée considère que les temps de transport sont identiquement distribués entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 1%, nous rejetons l'hypothèse nulle et nous concluons que les temps de transport ne sont pas identiquement

distribués entre les traitements HO-P4 et HO-P8 : ils sont plus proches de 1 dans le traitement HO-P4.

Nous pratiquons à présent un raffinement de l'étude du niveau de congestion itinéraire par itinéraire. Pour ce faire, nous considérons, itinéraire par itinéraire, la distribution des TT dans chaque traitement. Les graphiques 12 et 13 présentent les distributions des TT dans chaque traitement, pour l'itinéraire A et l'itinéraire B respectivement.



Graphique 12 : Distribution des Temps de Transport sur l'itinéraire A



Graphique 13 : Distribution des Temps de Transport sur l'itinéraire B

Sur l'itinéraire A, la valeur modale est de 1 quel que soit le traitement considéré. Cette absence de congestion concerne 59,2% cas pour le traitement HO-P4. Cette proportion diminue dans le traitement HO-P8 à 47,4% des observations.

Sur l'itinéraire B, les traitements HO-P4 et HO-P8 ont le même mode qui est égal à 1. Par contre, contrairement à l'itinéraire A, l'absence de congestion concerne 80% et 72,8% des observations dans les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Nous pouvons également noter que sur cet itinéraire, les usagers n'ont jamais connu de congestion maximal, de niveau 4.

Observation 14. Sur l'itinéraire gratuit, la congestion est moins dispersée lorsque le prix de péage faible.

Observation 15. Sur l'itinéraire payant, les niveaux de congestion sont identiquement dispersés quel que soit le coût du péage.

Preuve de l'observation 14.

Afin de savoir si le coût du péage favorise plus ou moins l'apparition d'un niveau de congestion, nous procédons sur les données relative à l'itinéraire A à un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov. L'hypothèse nulle testée considère que les temps de transport sont identiquement distribuées entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 5%, nous rejetons l'hypothèse nulle et nous concluons que les temps de transport ne sont pas identiquement distribuer entre les traitements HO-P4 et HO-P8 : ils sont plus proche de 1 dans le traitement HO-P4.

Preuve de l'observation 15.

Pour l'itinéraire B, nous procédons aux mêmes calculs et test que dans la preuve 14. Le test bilatéral de Kolmogorov Smirnov suivant l'hypothèse nulle que les temps de transport sont identiquement distribuées entre les deux traitements ne peut être rejeté au taux d'erreur de 10%¹⁹. Nous concluons que les temps de transport sont identiquement distribués entre les deux traitements sur l'itinéraire B.

Compte tenu des conclusions établies sur l'apparition des temps de transport pendant l'expérience, nous procédons à présent à l'étude des conséquences du temps de transport sur le changement de décision des usagers. Nous analysons successivement le changement d'itinéraire et le changement d'heure de départ.

Considérons dans un premier temps les changements d'itinéraire. Pour des niveaux de congestion allant de 1 à 3²⁰ (i.e. des TT allant de 1 à 3), nous analysons les

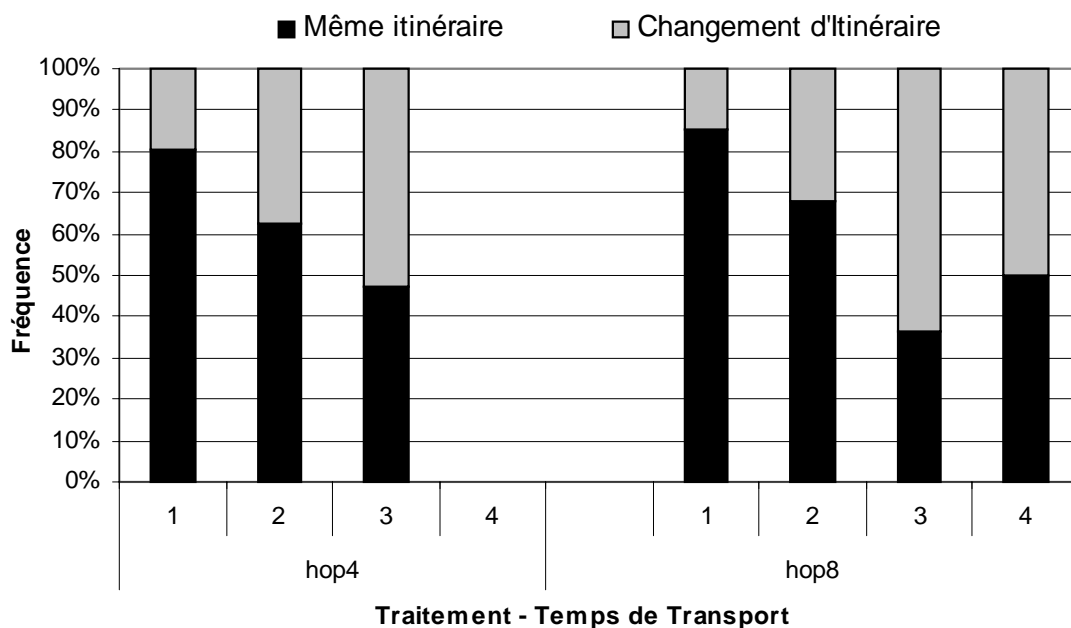
¹⁹ Nous tenons à souligner dans cette remarque la proximité du rejet de l'hypothèse nulle. La valeur du taux d'erreur calculée est de 10,46%. Puisque cette valeur est supérieur à 10%, nous retenons l'hypothèse nulle.

²⁰ Les données relatives à un temps de transport de 4 ne sont pas en nombre suffisant (ou sont absentes dans certains cas) pour permettre la réalisation de tests statistiques.

changements d'itinéraire décidés par les usagers entre deux répétitions du jeu. Les données présentées ont été recueillies de la façon suivante : pour une répétition du jeu, nous relevons l'itinéraire choisi et le temps de transport calculé, puis nous regardons le choix d'itinéraire de l'utilisateur à la répétition suivante. Pour chaque temps de transport, 4 observations sont possibles : AA, AB, BA, BB. Dans le premier et le dernier cas (AA et BB), les usagers ont choisis de rester sur le même itinéraire. Dans les deux cas intermédiaires (AB et BA), les usagers ont choisis de changer d'itinéraire.

Pour les analyses qui suivent, nous avons regroupé les observations selon la direction du changement d'itinéraire. Ainsi, nous comparons dans chaque traitement, la proportion d'utilisateurs qui ont choisi de rester sur le même itinéraire (noté « même itinéraire » et qui regroupe les décisions AA et BB) et les utilisateurs qui ont changé d'itinéraire (noté « changement d'itinéraire » et qui regroupe les décisions AB et BA).

Le graphique 14 présente dans chaque traitement et pour chaque temps de transport, la répartition des décisions de changement d'itinéraire des usagers.



Graphique 14 : Répartition des décisions de changement d'itinéraire des usagers

Lorsque TT est égal à 1, les usagers des deux traitements ont choisi majoritairement de rester sur le même itinéraire. Pour HO-P4 et TT=1 (soit 486 observations), cette décision représente 80,66% des cas (avec 20,68% pour AA et 60,08% pour BB) et 85,67% des cas dans le traitement HO-P8 (avec un total de 899 observations, il y a 28,33% pour AA et 57,14% pour BB).

Observation 16. Dans une situation sans congestion, les usagers soumis à un péage fort restent plus volontiers sur le même itinéraire que les usagers soumis à un péage faible.

Preuve de l'observation 16.

Afin de savoir si le coût du péage influence le changement d'itinéraire, nous comparons les décisions de changement d'itinéraire des usagers entre les traitements HO-P4 et HO-P8 en ne retenant que les observations justifiant d'un temps de transport de 1. Nous soumettons ces données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle testée est qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement d'itinéraires. Nous comparons donc le nombre données de type de « même itinéraire » au nombre de « changement d'itinéraire » dans chacun des 2 traitements lorsque le temps de transport est égal à 1. Au taux d'erreur de 10% nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, lorsque le temps de transport est de 1, les usagers soumis à un péage à 8 (HO-P8) choisissent plus souvent de rester sur le même itinéraire que les usagers du péage à 4 (HO-P4).

Nous reprenons l'analyse précédente mais en ne considérant que les changements d'itinéraire lorsque le temps de transport est égal à 2. Dans ce cas de figure, les usagers des 2 traitements ont à nouveau choisi de rester majoritairement sur le même itinéraire mais dans une moindre proportion que dans le cas TT=1. Pour HO-P4 et TT= 2 (soit 152 observations), cette décision représente 62,5% des cas (avec 28,3%

pour AA et 34,2% pour BB) et 68% des cas dans le traitement HO-P8 (avec un total de 200 observations, il y a 37% pour AA et 31% pour BB).

Observation 17. Dans une situation de faible congestion, les usagers soumis à un péage fort restent aussi fréquemment sur le même itinéraire que les usagers soumis à un péage faible.

Preuve de l'observation 17.

Comme présenté dans la preuve 16, nous appliquons sur ces données un test du χ^2 suivant l'hypothèse nulle qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement d'itinéraires entre les traitements lorsque le temps de transport est égal à 2. Au taux d'erreur de 10% nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, lorsque le temps de transport est de 2, les décisions de changement d'itinéraire ont la même répartition entre les deux traitements (HO-P4 et HO-P8).

Enfin, nous considérons les cas de changements d'itinéraire lorsque le temps de transport est égal à 3. Contrairement aux précédentes données, les usagers des 2 traitements choisissent majoritairement de changer d'itinéraire. Pour HO-P4 et TT = 3 (soit 34 observations), cette décision représente 52,94% des cas (avec 38,24% pour AB et 14,71% pour BA) et 63,83% des cas dans le traitement HO-P8 (avec un total de 47 observations, il y a 59,57% pour AB et 4,26% pour BA).

Observation 18. Dans une situation de congestion moyenne, les usagers soumis à un péage fort restent aussi fréquemment sur le même itinéraire que les usagers soumis à un péage faible.

Preuve de l'observation 18.

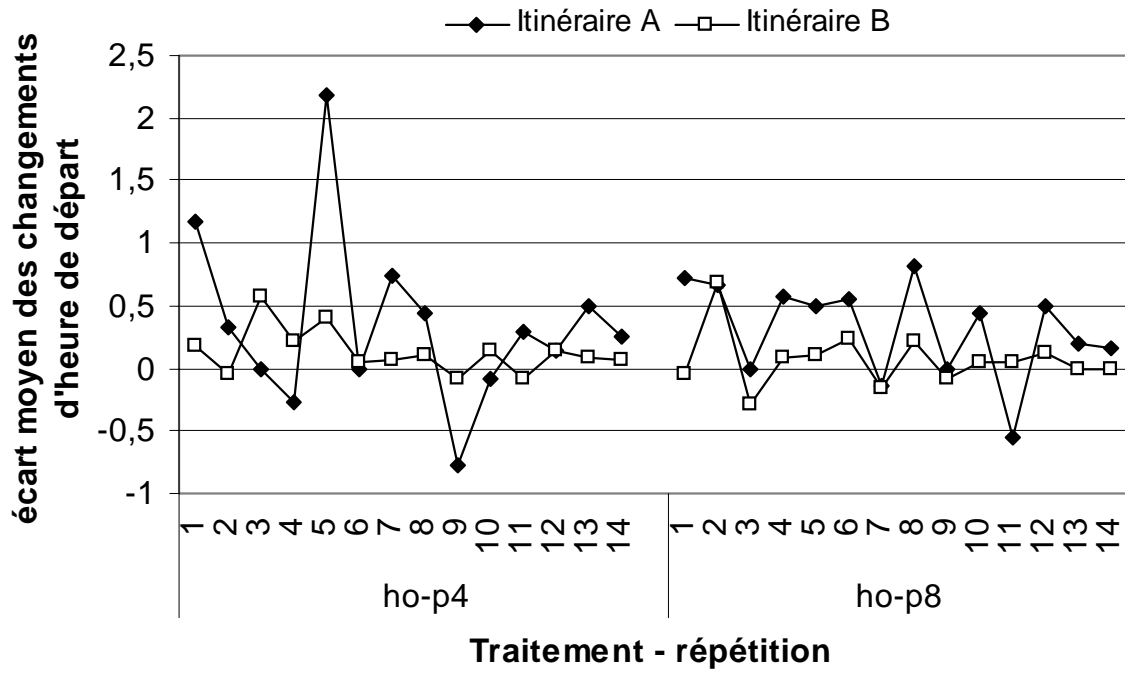
Nous appliquons une nouvelle fois le test bilatéral du χ^2 suivant l'hypothèse nulle qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement d'itinéraires entre les traitements lorsque le temps de transport est égal à 3. Au taux d'erreur de 10% nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, lorsque le temps de

transport est de 3, les décisions de changement d'itinéraire ont la même répartition entre les deux traitements (HO-P4 et HO-P8).

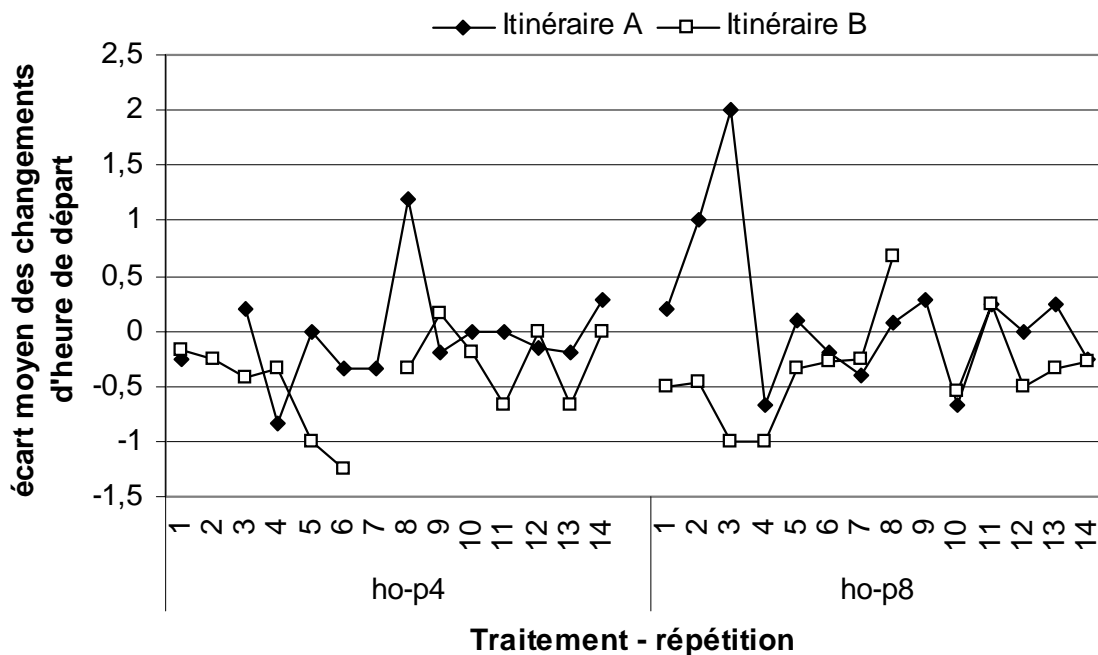
Considérons à présent l'influence du temps de transport sur les changements d'heure de départ pour des niveaux de congestion de 1 et de 2²¹ (i.e. TT = 1 ou 2). Pour chacun de ces temps de transport, nous étudions les variations des heures de départ des usagers entre deux répétitions du jeu. Les données présentées ont été recueillies de la façon suivante : pour une répétition du jeu, nous relevons l'heure de départ choisi et le temps de transport calculé, puis nous soustrayons l'heure de départ choisi par l'utilisateur à la répétition suivante. Nous obtenons ainsi l'« écart d'heure de départ ». Pour chaque temps de transport, nous calculons les moyennes de ces écarts sur chaque itinéraire. Les résultats qui suivent sont présentés par ordre croissant de temps de transport et tout itinéraire confondu, sauf lorsque les tests statistiques ont révélé une différence entre l'itinéraire A et l'itinéraire B.

Les graphiques 15 et 16 présentent pour les temps de transport de 1 et de 2, la moyenne des écarts des heures de départ sur chaque itinéraire et dans chaque traitement.

²¹ Les données relatives à un temps de transport de 3 et de 4 ne sont pas en nombre suffisant (ou sont absentes dans certains cas) pour permettre la réalisation de tests statistiques.



Graphique 15 : Evolution des écarts moyens des changements d'heure de départ, TT=1



Graphique 16 : Evolution des écarts moyens des changements d'heure de départ, TT=2

Observation 19. Lorsque les usagers n'ont pas connu de congestion, ils changent faiblement leur heure de départ et le font de la même façon quel que soit le niveau du péage.

Preuve de l'observation 19.

Dans le cas d'un niveau de congestion de 1, les moyennes (et les écarts-type) des écarts des changements des heures de départ sont calculés pour chaque groupe et dans chaque traitement. La moyenne des écarts des changements des HD s'établit à 0,19 (écart type 1,22) et 0,15 (écart type 1,14) pour les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que tout itinéraire confondu, pour un temps de transport de 1,

les usagers changent en moyenne de la même façon d'heure de départ quel que soit le coût du péage²².

Observation 20. Après avoir connu une faible congestion sur l'itinéraire gratuit, les usagers qui ont un coût de péage faible changent moins leur heure départ les usagers qui ont connu un péage fort.

Observation 21. Après avoir connu une faible congestion sur l'itinéraire payant, les usagers changent leur heure départ de la même façon que le péage soit fort ou que le péage soit faible.

Preuve de l'observation 20.

Nous considérons les observations concernant l'itinéraire A. Comme dans le cas de l'observation 19, mais pour un niveau de congestion de 2, nous calculons les moyennes (et les écarts-type) des écarts des changements des heures de départ. La moyenne des écarts des changements des HD sur l'itinéraire A s'établit à $-0,04$ (écart type 0,99) et $0,15$ (écart type 1,1) pour les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Nous rejetons cette hypothèse avec un taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que sur l'itinéraire A, pour un temps de transport de 2, les usagers du traitement HO-P4 changent en moyenne plus faiblement d'heure de départ que ceux du traitement HO-P8.

Preuve de l'observation 21.

Nous considérons les observations concernant l'itinéraire B. Comme précédemment pour un temps de transport de 2, nous calculons les moyennes (et les écarts-type) des écarts des changements des heures de départ. La moyenne des écarts

²² L'analyse itinéraire par itinéraire propose les mêmes conclusions. Les tests réalisés sont disponibles en annexe.

des changements des HD sur l'itinéraire B s'établit à $-0,4$ (écart type 1,01) et $0,32$ (écart type 1,02) pour les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Nous ne pouvons rejeter cette hypothèse avec un taux d'erreur de 10%. Nous en concluons que sur l'itinéraire B, pour un temps de transport de 2, les usagers des deux traitements changent en moyenne d'heure de départ de la même façon.

L'influence du niveau de congestion (i.e. du temps de transport) se révèle importante quant au changement de décision des usagers entre deux répétitions du jeu. Si au cours de l'expérience, les sujets ont réussi à bien se coordonner pour éviter des temps de transport trop important, les tests statistiques ont montré que le temps de transport des usagers est un facteur explicatif de leur choix. Le temps de transport influence sensiblement le changement d'itinéraire, même si le coût du péage conduit les usagers à adopter des attitudes de changement d'itinéraire différentes. Le temps de transport influence également le changement des heures de départ. Mais nous avons pu constater que cet influence s'exerçait dans une moindre proportion.

L'analyse qui suit s'intéresse aux heures d'arrivée des usagers et l'impact de cet heure d'arrivée sur la modification de leurs décisions.

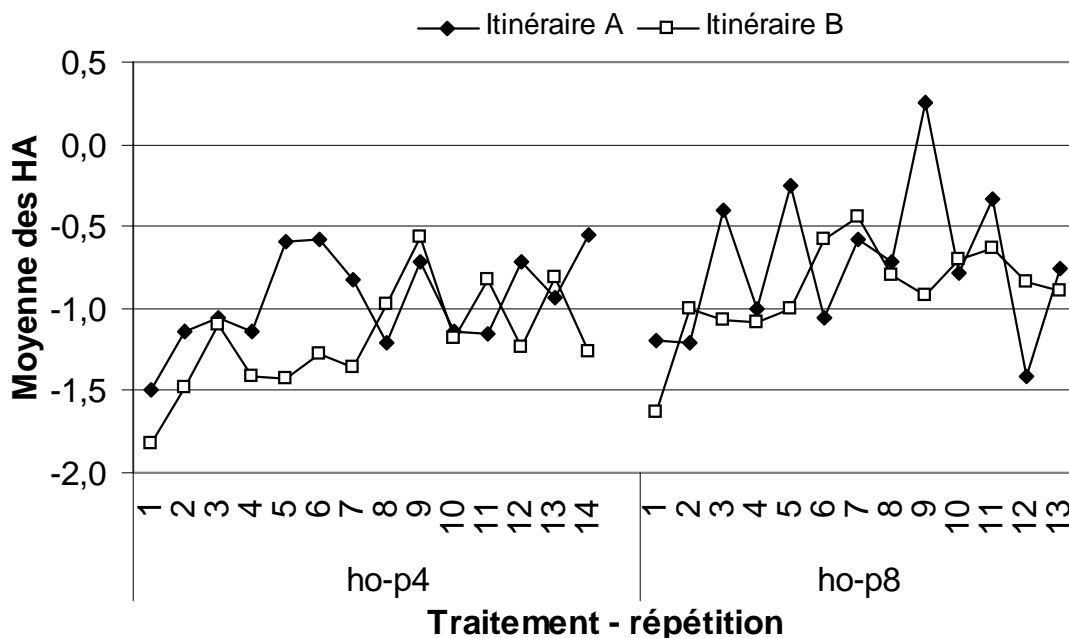
- **Rôle de l'Heure d'Arrivée sur le processus de décision.**

Comme le temps de transport, l'heure d'arrivée des usagers (HA par la suite) est une variable de conséquence. Par variable de conséquence, il faut comprendre que ce ne sont pas les usagers qui en fixe la valeur (comme pour HD ou l'itinéraire) mais que ce sont les conséquences des choix d'itinéraire et d'heure de départ de tout le groupe qui vont en fixer la valeur. L'heure d'arrivée se calcule par la somme de l'heure de départ et du temps de transport d'un individu ($HA = HD + TT$).

L'analyse qui suit présente successivement l'évolution et la distribution des HA au cours de l'expérience dans un premier temps, puis l'impact de HA sur les changements de HD et d'itinéraire entre deux répétitions du jeu. Notons enfin que

nous avons lors de certaines analyses regroupé les valeurs de HA dans 3 ensembles de valeur. Ainsi lorsque les usagers sont arrivés strictement avant l'heure objectif, nous avons regroupé les décisions de ces sujets sous la dénomination « Av » (« Av » pour « Avance » par rapport à l'heure objectif). Lorsqu'ils sont arrivés exactement à l'heure objectif nous avons codé leur décision par « Ho » (« Ho » pour « Heure Objectif ») et enfin, lorsqu'ils sont arrivés après l'heure objectif nous avons codé leurs décisions par « Ret » (« Ret » pour « Retard »).

Nous analysons tout d'abord les heures d'arrivée moyennes dans chaque traitement (HO-P4 et HO-P8) sur l'ensemble des 15 répétitions de l'expérience. Les moyennes (écarts-type) des heures d'arrivée ont été calculés pour chacun des 6 groupes et dans chaque traitement. Le graphique 17 présente l'évolution des moyennes des heures d'arrivée à chaque répétition pour chacun des deux traitements et sur chaque itinéraire.



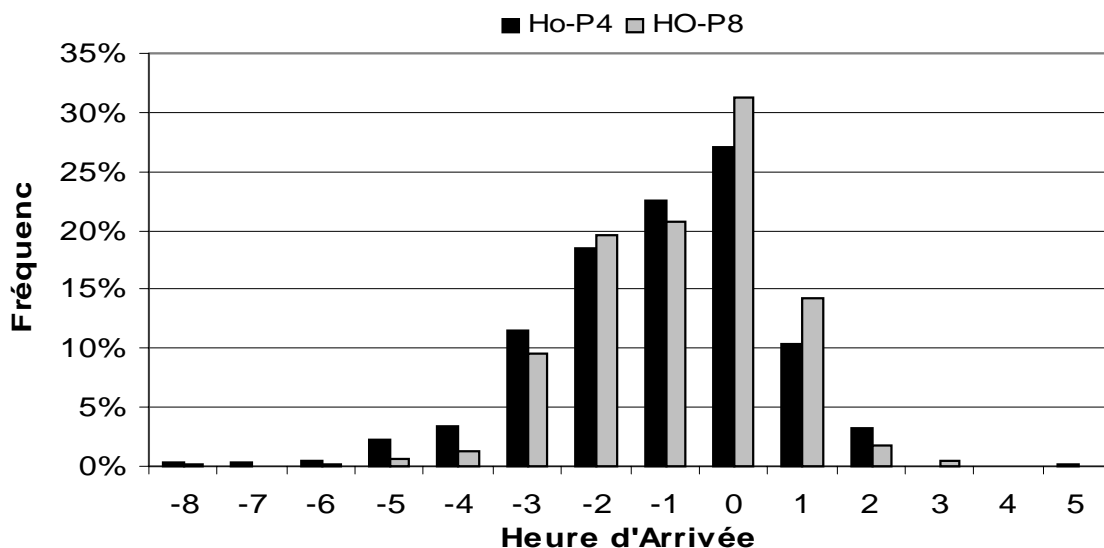
Graphique 17: Evolution des moyennes des Heures d'arrivée

Observation 22. Tant sur l'itinéraire gratuit que sur l'itinéraire payant, les usagers arrivent en moyenne aux mêmes heures, quel que soit le coût du péage retenu.

Preuve de l'observation 22.

La moyenne des HA est de $-1,09$ (écart type 1,62) et $-0,79$ (écart type 1,43) pour les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des HA de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que les HA sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que la moyenne des heures d'arrivée des usagers, tout itinéraire confondu, est la même que le coût du péage soit de 4 ou qu'il soit de 8²³.

Nous poursuivons l'analyse des heures d'arrivée mais en nous intéressant à leur distribution au cours de l'expérience. Les données présentées regroupent les différentes heures d'arrivée sur l'ensemble des 15 répétitions du jeu et dans chaque traitement. Le graphique 18 présente les distributions des HA dans chaque traitement tout itinéraire confondu.



Graphique 18 : Distribution des heures d'arrivée - tout itinéraire confondu

Pour chacun des deux traitements, nous observons une distribution avec un mode à 0 (i.e. l'heure objectif). Pour le traitement HO-P4, 27,1% des heures d'arrivée sont égales à 0 c'est à dire à l'heure objectif, les « avances » représentent 59,2% des heures d'arrivée et les « retard » 13,7% des cas. Pour le traitement HO-P8, la part des arrivées à l'heure objectif représentent 31,3% des cas, les « avances » représentent 52,1% des heures d'arrivée et les « retard » 16,6% des observations.

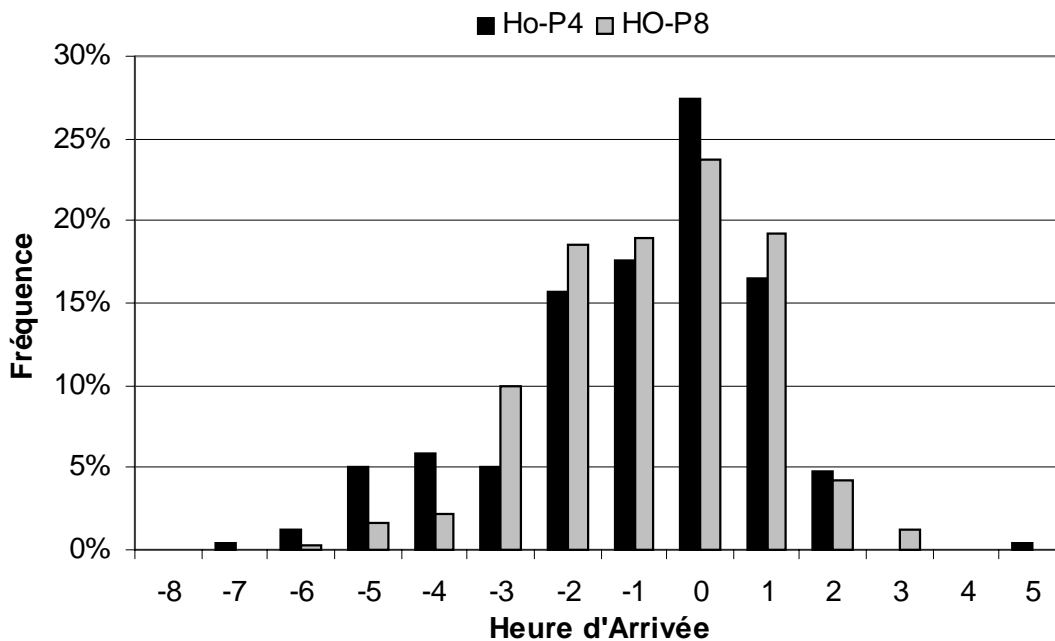
Observation 23. Tout itinéraire confondu, lorsque le péage est fort, les heures d'arrivée des usagers sont plus concentrées autour du mode que lorsque le péage est faible.

Preuve de l'observation 23.

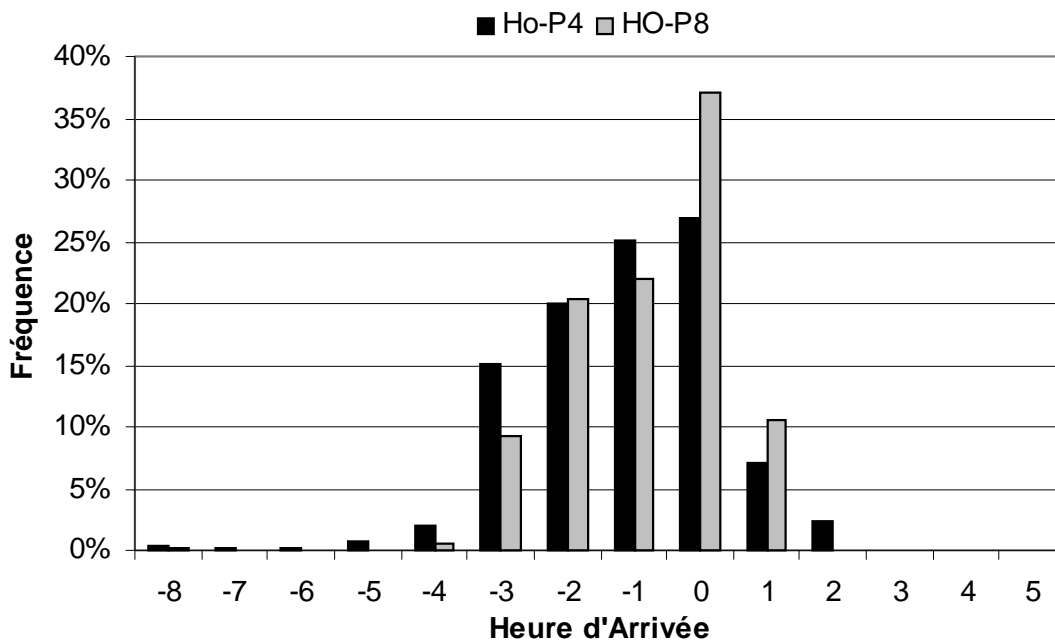
Afin de savoir si les distributions des heures d'arrivée sont les mêmes pour les deux traitements, nous appliquons sur les données un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov. L'hypothèse nulle testée considère que les heures d'arrivée sont identiquement distribuées entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 5%, nous rejetons l'hypothèse nulle et nous concluons que les heures d'arrivée ne sont pas identiquement distribuées entre les traitements HO-P4 et HO-P8 : elles sont plus regroupées autour du mode (« 0 ») dans le traitement HO-P8.

Nous pratiquons à présent un raffinement de l'étude itinéraire par itinéraire. Pour ce faire, nous considérons, pour chaque itinéraire, la distribution des heures d'arrivée dans chaque traitement. Les graphiques 19 et 20 présentent les distributions des HA dans chaque traitement, pour l'itinéraire A et l'itinéraire B respectivement.

²³ Le même test a été pratiqué itinéraire par itinéraire. Nous parvenons aux mêmes conclusions. Ces tests sont disponibles en Annexe.



Graphique 19 : Distribution des heures d'arrivée - itinéraire A



Graphique 20 : Distribution des heures d'arrivée - itinéraire B

Sur l'itinéraire A, la valeur modale est de 0 (i.e. l'heure objectif) pour les deux traitements. Pour le traitement HO-P4, 27,5% des heures d'arrivée sont égaux à 0 c'est à dire à l'heure objectif, les « avances » représentent 51% des heures d'arrivée et les « retard » 21,5% des cas. Pour le traitement HO-P8, la part des arrivées à l'heure objectif représentent 23,7% des cas, les « avances » représentent 51,6% des heures d'arrivée et les « retard » 24,7% des observations.

Observation 24. Sur l'itinéraire gratuit, les heures d'arrivée des usagers sont identiquement distribuées quel que soit le coût du péage.

Preuve de l'observation 24.

Nous appliquons sur les données un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov aux données de l'itinéraire A. L'hypothèse nulle testée considère que les heures d'arrivée sont identiquement distribuées entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 10%, nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que les heures d'arrivée sont identiquement distribuées entre les traitements HO-P4 et HO-P8.

Sur l'itinéraire B, la valeur modale à 0 (i.e. l'heure objectif) pour les deux traitements. Pour le traitement HO-P4, 26,9% des heures d'arrivée sont égaux à 0 c'est à dire à l'heure objectif, les « avances » représentent 63,7% des heures d'arrivée et les « retard » 9,4% des cas. Pour le traitement HO-P8, la part des arrivées à l'heure objectif représentent 37% des cas, les « avances » représentent 52,5% des heures d'arrivée et les « retard » 10,5% des observations.

Observation 25. Sur l'itinéraire payant, les heures d'arrivée des usagers dont le péage est élevé sont plus regroupées autour de l'heure objectif que lorsque le péage est faible.

Preuve de l'observation 25.

Nous appliquons sur les données un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov aux données de l'itinéraire B. L'hypothèse nulle testée considère que les heures d'arrivée sont identiquement distribuées entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de

1%, nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que les heures d'arrivée sont plus concentrées dans le traitement HO-P8 que dans le traitement HO-P4.

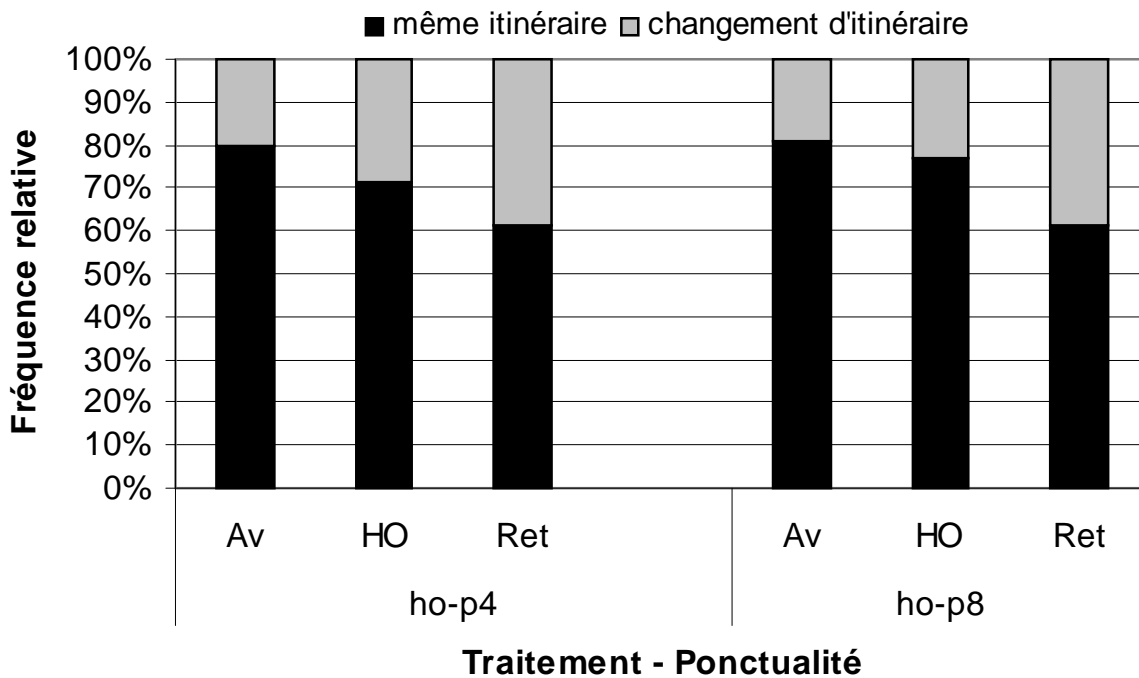
Compte tenu de ces conclusions sur les heures d'arrivée, nous procédons à l'analyse des conséquences de l'heure d'arrivée sur le changement de décision des usagers. Nous analysons successivement le changement d'itinéraire et le changement d'heure de départ.

Afin de simplifier les analyses et sans perte de généralité, nous regroupons les heures d'arrivée selon la ponctualité (PONCTU par la suite) des usagers. Ainsi, lorsque l'heure d'arrivée est strictement inférieure à l'heure objectif (i.e. $HA < 0$) nous regroupons les données sous la dénomination « Av » (Avance), lorsque les heures d'arrivée sont égales à l'heure objectif ($HA = 0$) nous regroupons ces données sous « Ho » (Heure Objectif) et enfin lorsque les heures d'arrivées sont supérieures à l'heure objectif, nous regroupons les données sous la dénomination « Ret » (Retard).

Considérons tout d'abord les changements d'itinéraire. Pour chaque valeur de la ponctualité {Av, Ho, Ret}, nous analysons les changements d'itinéraire décidés par les usagers entre deux répétitions du jeu. Les données présentées ont été recueillies de la façon suivante : pour une répétition du jeu, nous relevons l'itinéraire choisi et l'heure d'arrivée calculée, puis nous regardons le choix d'itinéraire de l'utilisateur à la répétition suivante. Pour chaque heure d'arrivée, 4 observations sont possibles : AA, AB, BA, BB²⁴.

Le graphique 21 présente dans chaque traitement et pour chaque type d'arrivée, la répartition des décisions de changement d'itinéraire des usagers.

²⁴ Cf. section sur l'analyse de l'impact du temps de transport pour une définition.



Graphique 21 : Répartition des décisions de changement d'itinéraire des usagers

Lorsque la ponctualité est de type « Av », les usagers des deux traitements ont choisi majoritairement de rester sur le même itinéraire. Pour HO-P4 (401 observations), cette décision représente 79,6% des cas (avec 21,7% pour AA et 57,9% pour BB) et 80,8% des cas dans le traitement HO-P8 (349 observations, avec 32,4% pour AA et 48,4% pour BB).

Observation 26. Lorsque les usagers arrivent en avance, le coût du péage n'influence pas les décisions de changement d'itinéraire.

Preuve de l'observation 26.

Afin de savoir si le coût du péage influence le changement d'itinéraire, nous comparons les décisions de changement d'itinéraire des usagers entre les traitements HO-P4 et HO-P8 en ne retenant que les observations justifiant d'une ponctualité « Av ». Nous soumettons ces données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle testée est qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement

d'itinéraires. Nous comparons donc le nombre données de type de « même itinéraire » au nombre de « changement d'itinéraire » dans chacun des 2 traitements lorsque la ponctualité est de type « Av ». Au taux d'erreur de 10% nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, lorsque les usagers arrivent en avance, les proportions de changement d'itinéraire sont les mêmes quel que soit le coût du péage.

Nous reprenons l'analyse précédente mais en ne considérant que les changements d'itinéraire lorsque les usagers arrivent à l'heure objectif (PONCTU = HO). Dans ce cas, les usagers des 2 traitements ont à nouveau choisi de rester majoritairement sur le même itinéraire mais dans une moindre proportion que dans le cas PONCTU=Av. Pour HO-P4 (soit 178 observations), cette décision représente 71,3% des cas (avec 20,2% pour AA et 51,1% pour BB) et 77,1% des cas dans le traitement HO-P8 (205 observations, avec 25,9% pour AA et 51,2% pour BB). La réalisation des tests nous indique qu'il existe une différence de comportement des usagers selon l'itinéraire de départ. Les observations suivantes sont faites pour l'itinéraire A et l'itinéraire B respectivement.

Observation 27. Lorsque les usagers partent sur l'itinéraire gratuit et arrivent à l'heure, ceux qui subissent un coût de péage fort choisissent plus de rester sur cet itinéraire que les usagers dont le coût de péage est faible.

Observation 28. Lorsque les usagers partent sur l'itinéraire payant et arrivent à l'heure, le coût de péage n'influence pas la décision de changer d'itinéraire à la prochaine décision.

Preuve de l'observation 27.

Nous analysons ici les usagers qui partent de l'itinéraire A et nous analysons leurs décisions de changement d'itinéraire (AB ou AA) à la répétition suivante lorsqu'ils sont arrivés à l'heure objectif (i.e. ponct = ho). Nous soumettons ces données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle testée est qu'il existe une équivalence entre les

proportions de changement d'itinéraires. Nous comparons donc le nombre données de type de « même itinéraire » (i.e. AA) au nombre de « changement d'itinéraire » (i.e. AB) dans chacun des 2 traitements lorsque la ponctualité est de type « Ho ». Au taux d'erreur de 5% nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, sur l'itinéraire A, lorsque les usagers arrivent à l'heure objectif, les usagers qui subissent un coût de péage de 8 choisissent plus de rester sur l'itinéraire A que les usagers qui subissent un coût de péage de 4.

Preuve de l'observation 28.

Nous analysons ici les usagers qui partent de l'itinéraire B et nous analysons leurs décisions de changement d'itinéraire (BA ou BB) à la répétition suivante lorsqu'ils sont arrivés à l'heure objectif (i.e. ponct = ho). Nous soumettons ces données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle testée est qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement d'itinéraires. Nous comparons donc le nombre données de type de « même itinéraire » (i.e. BB) au nombre de « changement d'itinéraire » (i.e. BA) dans chacun des 2 traitements lorsque la ponctualité est de type « Ho ». Au taux d'erreur de 10% nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, sur l'itinéraire B, lorsque les usagers arrivent à l'heure objectif, les proportions de changement d'itinéraire sont les mêmes quel que soit le coût du péage.

Enfin, nous considérons les cas de changements d'itinéraire lorsque les usagers arrivent en retard (ponct = ret). Comme précédemment, les usagers des 2 traitements choisissent majoritairement de rester sur le même itinéraire mais dans une proportion nettement inférieure. Pour HO-P4 (soit 93 observations), cette décision représente 61,3% des cas (avec 33,3% pour AA et 28% pour BB) et 61% des cas dans le traitement HO-P8 (118 observations, avec 38,1% pour AA et 22,9% pour BB).

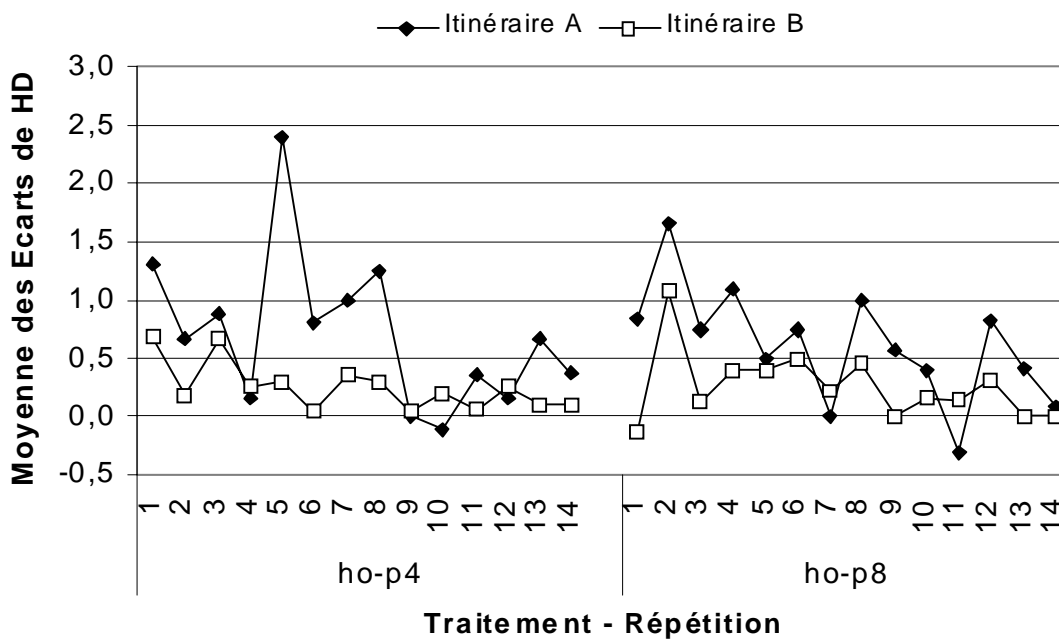
Observation 29. Lorsque les usagers arrivent en retard, le coût du péage n'influence pas les décisions de changement d'itinéraire.

Preuve de l'observation 29.

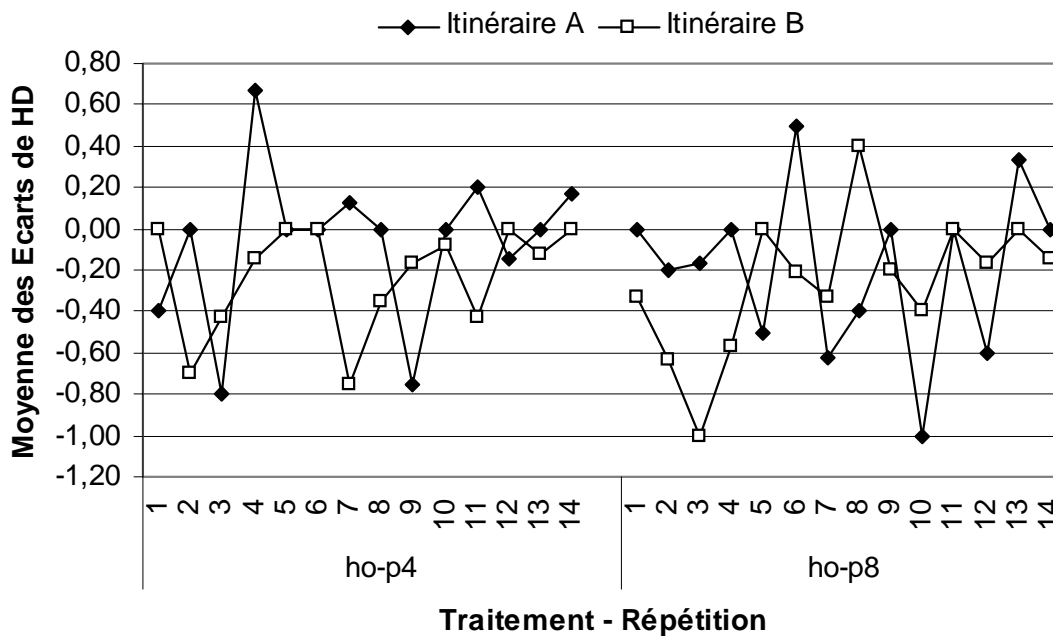
Nous comparons les décisions de changement d'itinéraire des usagers entre les traitements HO-P4 et HO-P8 en ne retenant que les observations justifiant d'une ponctualité « Ret ». Nous soumettons ces données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle testée est qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement d'itinéraires. Nous comparons donc le nombre données de type de « même itinéraire » au nombre de « changement d'itinéraire » dans chacun des 2 traitements lorsque la ponctualité est de type « Ret ». Au taux d'erreur de 10% nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, lorsque les usagers arrivent en retard, les proportions de changement d'itinéraire sont les mêmes quel que soit le coût du péage.

Considérons à présent l'influence de la ponctualité sur les changements d'heure de départ. Pour chacune des ponctualités possibles (Av, Ho et Ret), nous étudions les variations des heures de départ des usagers entre deux répétitions du jeu. Les données présentées ont été recueillies de la façon suivante : pour une répétition du jeu, nous relevons l'heure de départ choisi et la ponctualité de l'utilisateur, puis nous soustrayons l'heure de départ choisi par l'utilisateur à la répétition suivante. Nous obtenons ainsi l'« écart d'heure de départ ». Pour chaque ponctualité, nous calculons les moyennes de ces écarts sur chaque itinéraire. Les résultats qui suivent sont présentés tout itinéraire confondu, sauf lorsque les tests statistiques ont révélé une différence entre l'itinéraire A et l'itinéraire B.

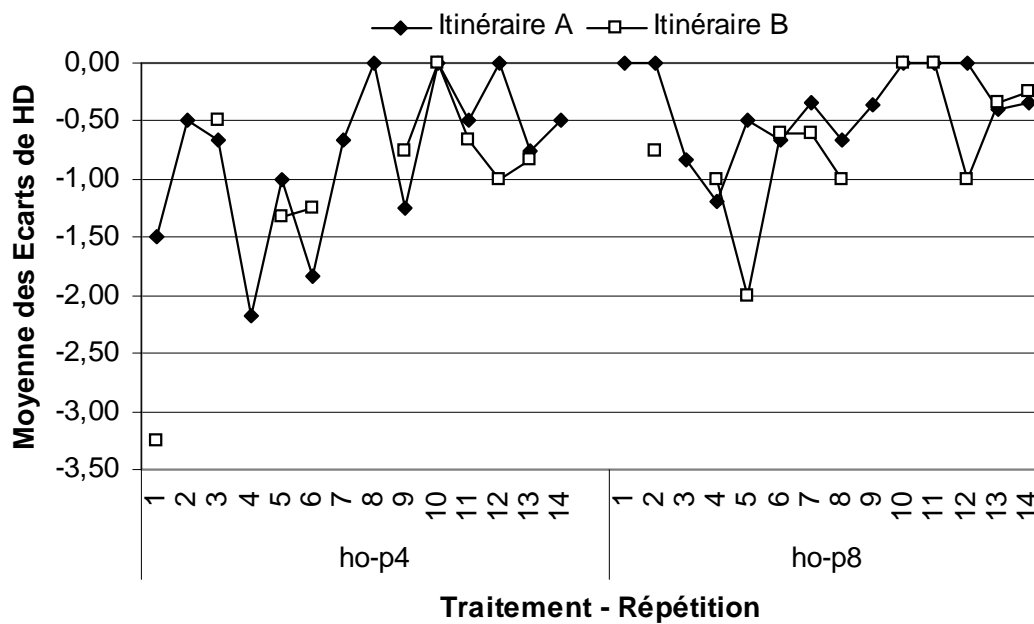
Les graphiques 22, 23 et 24 présentent pour chaque ponctualité, la moyenne des écarts des heures de départ sur chaque itinéraire et dans chaque traitement.



Graphique 22 : Evolution des écarts moyens des changements HD, PONCTU = Av



Graphique 23 : Evolution des écarts moyens des changements HD, PONCTU = Ho



Graphique 24 : Evolution des écarts moyens des changements HD, PONCTU = Ret

Observation 30. Quel que soit le coût du péage, lorsque les usagers arrivent en avance, les usagers changent d'heure de départ de la même façon.

Preuve de l'observation 30.

Lorsque les usagers arrivent en avance, les moyennes et les écarts-type des écarts des changements des heures de départ sont calculés pour chaque groupe et dans chaque traitement. La moyenne des écarts des changements des HD s'établit à 0,41 (écart type 1,03) et 0,40 (écart type 1,17) pour les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que tout itinéraire confondu, lorsque les usagers arrivent en

avance, les changements moyens d'heure de départ sont les mêmes quel que soit le coût du péage²⁵.

Observation 31. Quel que soit le coût du péage, lorsque les usagers arrivent à l'heure, les usagers changent d'heure de départ de la même façon.

Preuve de l'observation 31.

Nous procédons aux mêmes calculs que précédemment mais en considérant les usagers qui arrivent à l'heure. La moyenne des écarts des changements des HD s'établit à $-0,19$ (écart type $0,79$) et $-0,25$ (écart type $0,91$) pour les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que tout itinéraire confondu, lorsque les usagers arrivent à l'heure, les changements moyens d'heure de départ sont les mêmes quel que soit le coût du péage²¹.

Pour l'analyse des usagers qui sont arrivés en retard, les tests ont conclu à une différence entre les deux itinéraires. Nous présentons successivement les conclusions pour l'itinéraire A puis pour l'itinéraire B.

Observation 32. Sur l'itinéraire gratuit, lorsque les usagers arrivent en retard, les usagers dont le coût de péage est faible partent, à la répétition suivante, plus tôt que les usagers dont le coût de péage est fort.

Observation 33. Sur l'itinéraire payant, quel que soit le coût du péage, lorsque les usagers arrivent en retard, les usagers changent d'heure de départ de la même façon.

²⁵ L'analyse itinéraire par itinéraire propose les mêmes conclusions. Les tests réalisés sont disponibles en annexe .

Preuve de l'observation 32.

En ne retenant que les usagers qui ont choisi l'itinéraire A, nous procédons aux mêmes calculs que précédemment en considérant les usagers qui arrivent en retard. La moyenne des écarts des changements des HD s'établit à $-1,04$ (écart type $1,64$) et $-0,44$ (écart type $0,88$) pour les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse peut être rejetée au taux d'erreur de 1%. Nous concluons que sur l'itinéraire A, lorsque les usagers arrivent en retard, les usagers dont le péage est de 4 partent plus tôt que les usagers dont le coût de péage est de 8.

Preuve de l'observation 33.

Nous réalisons la même analyse que pour la preuve précédente mais en considérant l'itinéraire B uniquement. La moyenne des écarts des changements des HD s'établit à $-1,05$ (écart type $1,78$) et $-0,58$ (écart type $0,95$) pour les traitements HO-P4 et HO-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quel que soit le niveau de péage. Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que sur l'itinéraire B, lorsque les usagers arrivent en retard, les changements moyens d'heure de départ sont les mêmes quel que soit le coût du péage.

Conclusion du chapitre 2

L'objectif de ce chapitre était d'établir clairement les prédictions théoriques du modèle de choix expérimental d'usagers de transport confronté à une infrastructure de capacité limitée, ce modèle s'inspirant de Arnott, De Palma, Lindsey (1990). Toutefois, la nature même de ce modèle est profondément différente et s'assimile, dans le cas le plus simple, à un jeu de coordination dont l'issue en termes d'équilibres est indéterminée. Dans le cas le plus complexe, il est nécessaire de recourir à la notion de stratégies mixtes, aucun équilibre n'étant possible. L'issue théorique dépend profondément de l'asymétrie entre coût du temps d'avance et coût du temps de retard, alors que, dans le modèle séminal d'ADPL, il y a toujours un équilibre simple de congestion ! Dès lors, le modèle est testé dans un cadre expérimental en fonction de deux hiérarchies possibles de coûts du temps, les deux hiérarchies donnant lieu théoriquement à des équilibres de nature différente, sans qu'il soit possible de savoir quel équilibre de choix va être retenu par le groupe d'usagers. Les observations expérimentales montrent comment la congestion se constitue et valide dans une certaine mesure les prédictions théoriques, surtout dans le cas d'un rapport coût d'avance / coût du retard faible. Les joueurs ne se coordonnent pas suffisamment pour éviter les situations inefficaces et la congestion de l'infrastructure. Dans le modèle à 2 itinéraires, on s'attendait à une modification radicale des décisions des joueurs en fonction du niveau du péage. Or, on constate une forte inertie des comportements, bien que le péage dissuade d'utiliser l'itinéraire payant et permet l'étalement des trafics sur l'ensemble des heures de départ, bien que la congestion ne soit pas évitée.

Si les modèles théoriques de base sont plutôt validés par l'expérimentation, la question qui se pose maintenant est celle de leur robustesse. Dès lors, il est intéressant de savoir en quoi les prédictions théoriques et les résultats expérimentaux sont modifiés par l'introduction, d'une part, de l'information routière et, d'autre part, d'une situation dans laquelle les joueurs sont répartis en différentes catégories en fonction de coûts du temps différents d'une catégorie à l'autre.

Chapitre 3. Information des usagers et hétérogénéité des préférences

Introduction du chapitre 3

L'objectif de ce chapitre est de tester l'impact de deux variables additionnelles par rapport aux jeux expérimentaux mis en place dans le chapitre 2. D'une part, quel est le rôle de l'information sur la coordination des décisions ? d'autre part, en quoi une situation d'hétérogénéité des usagers est-elle susceptible de diminuer ou d'accroître les problèmes de congestion par rapport à une situation d'usagers homogènes ? Ce chapitre ne se comprend donc véritablement que si on fait référence au chapitre 2, dans la mesure où la méthode expérimentale consiste précisément à comparer les résultats de jeux expérimentaux identiques à une variable près. Par conséquent, la première section sur l'information renvoie directement au modèle de base et à ses tests expérimentaux développés dans la première section du chapitre 2. La seconde section sur l'hétérogénéité renvoie directement à la section 2 du chapitre 2, et les résultats n'ont de signification que par rapport à ceux du chapitre 2.

Section 1. L'information routière permet-elle d'améliorer la coordination dans les choix des usagers ?

Dans le traitement *avec information* les sujets disposaient, au début de chaque période, d'une information sur les fréquences de départ passées (depuis le début de l'expérience) pour chaque créneau de départ. Ils avaient également accès (en appuyant sur le bouton "Historique") à l'information détaillée des fréquences de départ pour chaque période passée.

1. Fréquences relatives des départs

Le tableau 2 et les figures 8 et 9 comparent les fréquences moyennes (sur 40 périodes) de départ pour les deux valeurs de β lorsque l'information est communiquée aux agents, par rapport aux prédictions théoriques (équilibre de Nash), et par rapport aux fréquences observées dans le traitement sans information.

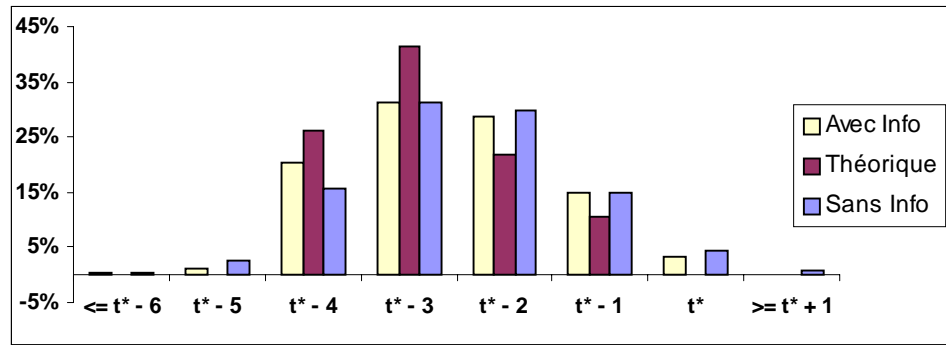


Figure 1 : Fréquences de départ moyennes pour $\beta = 0,50$

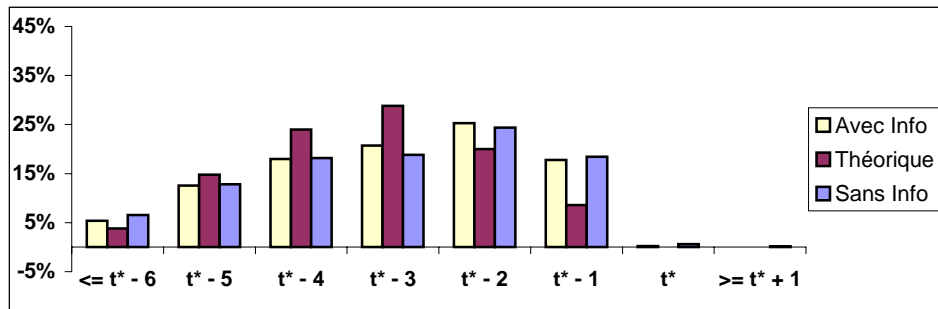


Figure 2 : Fréquences de départ moyennes pour $\beta = 0,25$

Tableau 1 : Fréquences théoriques et empiriques (moyennes) de départ en fonction du coût d'avance

Fréquences	Théorique	Empirique	$\leq t^* - 6$	$t^* - 5$	$t^* - 4$	$t^* - 3$	$t^* - 2$	$t^* - 1$	t^*	$\geq t^* + 1$
			%	%	%	%	%	%	%	%
0,50	Théorique		0,00	0,00	26,2	41,4	21,9	10,5	0,00	0,00
	Empirique		0,31	1,25	20,2	31,4	28,5	15,0	3,20	0,08
0,25	Théorique		0,00	0,00	25,0	25,0	25,0	25,0	0,00	0,00
	Théorique		3,80	14,8	24,0	28,8	20,0	8,60	0,00	0,00
	Empirique		5,39	12,5	17,9	20,7	25,3	17,8	0,23	0,00

Les figures 1 et 2 révèlent très clairement que l'information historique sur les fréquences de départ passées, n'affecte en rien les choix de créneaux de départ. Les distributions de fréquences avec et sans information sont presque

confondues avec les fréquences observées dans le traitement sans information, pour les deux coûts d'avance considérés. Nous avons déjà mis en évidence l'absence de différence entre les fréquences d'équilibre et les fréquences empiriques pour le traitement sans information. Cette conclusion reste donc également valable pour le traitement avec information. Le fait que les sujets disposent d'une information précise sur les fréquences de congestion passées n'affecte pas leurs choix de créneaux de départ. Ce résultat est d'ailleurs parfaitement compatible avec la prédiction de l'équilibre en stratégies mixtes. On aurait pu penser que ce type d'information permet à l'ensemble de la population de mieux coordonner leurs choix de créneaux de départ, et donc d'atteindre un niveau d'efficacité plus élevé. Mais ceci n'est visiblement pas le cas.

2. Efficience

Les figures 3 et 4 comparent les fréquences moyennes de départ empiriques avec les fréquences de départ optimales. Pour $\beta = 0,50$ plus de 92% des départs s'effectuent dans le support de l'optimum. Ce taux tombe à moins de 82% pour $\beta = 0,25$.

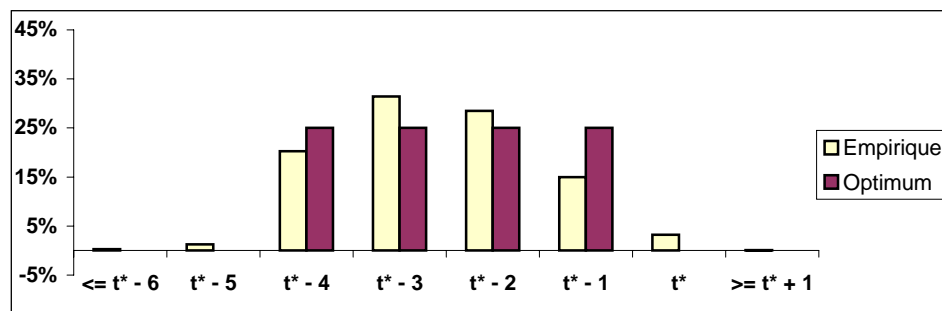


Figure 3 : Comparaison entre fréquences de départ observées et fréquences optimales ($\beta = 0,50$)

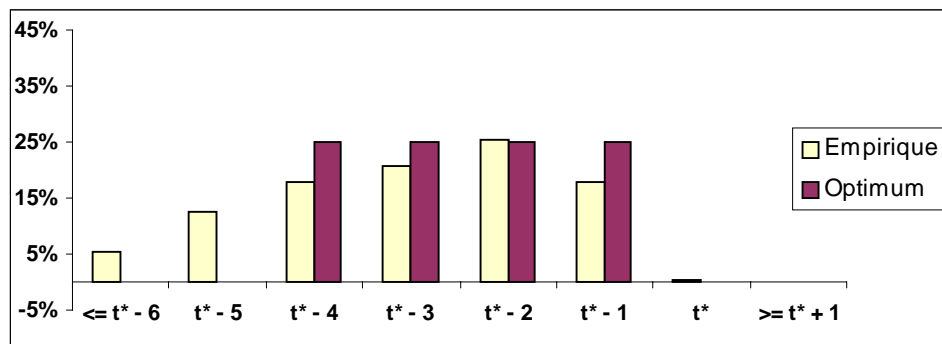


Figure 4 : Comparaison entre fréquences de départ observées et fréquences optimales ($\beta = 0,25$)

3. Proximité avec l'efficacité

Comme dans les traitements sans information, on constate que les fréquences des profils optimaux sont faibles et n'évoluent guère avec la répétition (figure 5). Bien que la fréquence des profils observés contenus dans le support d'équilibre soit toujours très élevée, on peut remarquer que ce pourcentage ne se distingue pas de celui obtenu sans information.

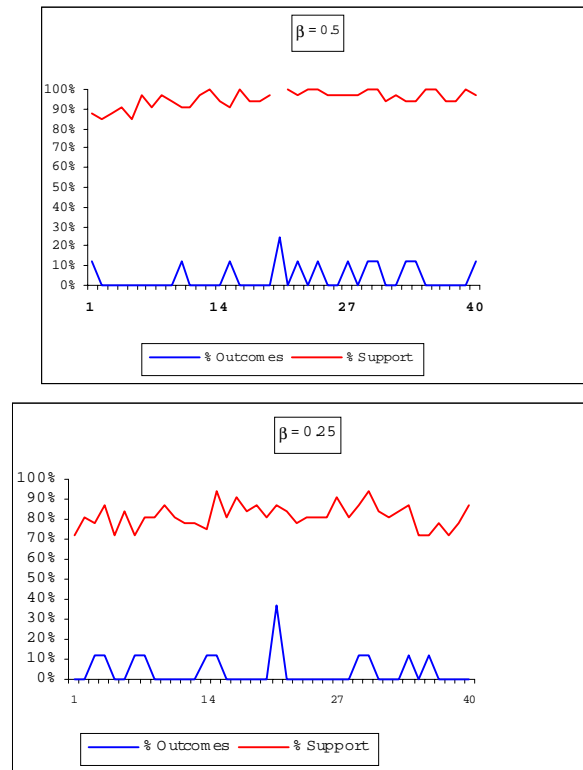


Figure 5 : Evolution du pourcentage de profils de stratégies d'équilibre et de profils de stratégies contenus dans le support de l'équilibre

En raison de la congestion provoquée par le défaut de coordination des sujets, le temps de transport moyen est supérieur à une période. Il est égal à 1,94 périodes lorsque le coût d'avance est élevé et de 1,61 périodes lorsque le coût d'avance est faible. Ces temps moyens sont supérieurs à ceux qui avaient été observés dans le traitement sans information. De même que dans ce traitement, on n'observe pas de tendance à l'allongement ou au raccourcissement du temps de transport moyen au cours du temps.

4. Niveaux moyens de congestion

Comme pour le traitement sans information on observe des niveaux moyens de congestion plus faible lorsque le coût d'avance est faible ($\beta = 0,25$). Le niveau de congestion est en général inférieur à 1, c'est-à-dire absence de congestion. Ce résultat s'explique comme pour le traitement sans information par le fait que les choix des sujets se sont répartis sur un support de créneaux de départ plus étendu, en partant plus tôt en moyenne que dans le traitement à coût d'avance élevé ($\beta = 0,50$).

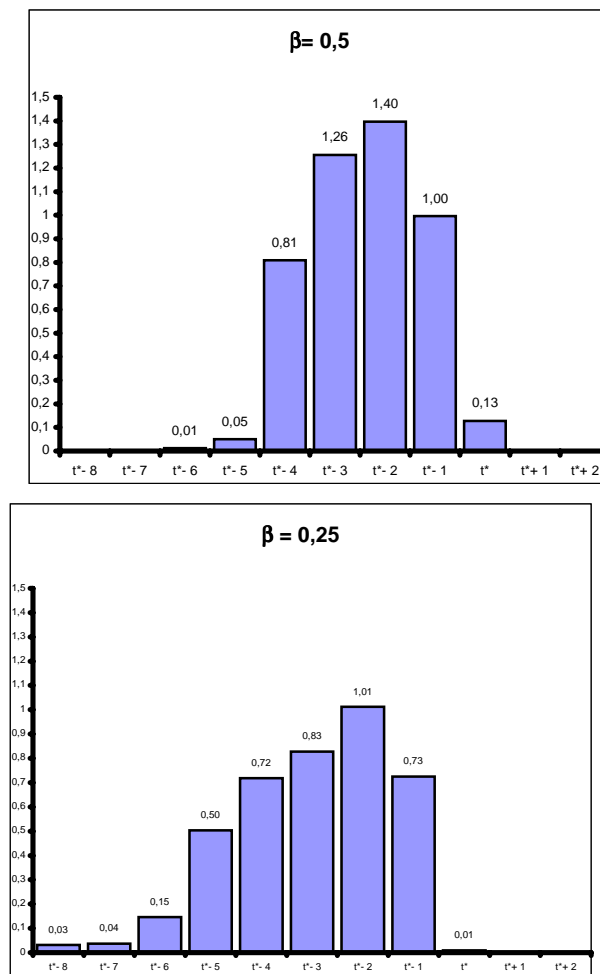


Figure 6 : Niveaux moyens de congestion en fonction du créneau de départ

Section 2. L'hétérogénéité des usagers permet-elle d'améliorer la coordination ?

Dans cette partie de l'étude, nous nous intéressons au comportement des individus, lorsque ceux-ci sont soumis à un ou deux itinéraires possibles mais qu'il existe une différence (une hétérogénéité) entre les coûts unitaires de transport d'un usager à l'autre. Comme dans la section précédente, un itinéraire est considéré comme gratuit et de faible capacité d'absorption, l'autre est payant mais de plus forte capacité. Le prix de péage de l'itinéraire payant conserve les mêmes valeurs que dans la section 2 du chapitre 2 afin de pouvoir procéder à des comparaisons statistiques.

Dans cette partie sont présentés successivement les extensions du modèle de référence permettant d'intégrer l'hétérogénéité des usagers ainsi que les solutions théoriques (point 1), puis le protocole expérimental et les résultats issus des expérimentations (point 2).

1. Présentation du modèle théorique

Notons que le modèle présenté dans la section précédente et ses hypothèses sont utilisées dans cette partie de l'étude. Nous introduisons un raffinement en supposant que les usagers sont hétérogènes du point de vue de leurs coûts unitaires individuels de transport. Plus précisément, nous considérons que notre population de N usagers se compose de j groupes d'usagers, notés $j = 1, \dots, G$. Soient N_j le nombre d'individus dans le groupe j et $N = \sum_{j=1}^G N_j$ le nombre total d'individus. Chaque groupe diffère selon le coût relatif α_j/β_j mais nous supposons que les usagers ont un coût relatif de retard identique²⁶, noté $\eta = \gamma/\beta$, et une période d'arrivée objectif commune t^* . De plus, les G

²⁶ Notons qu'Arnott et al. (1989) considèrent deux autres cas possibles (dans un modèle en temps continu) : d'une part, les individus diffèrent selon leur coût relatif de retard η et, d'autre part, selon leur période d'arrivée objectif t^* . Dans notre cas, nous considérons que les usagers se différencient principalement par rapport à leur

groupes d'utilisateurs sont indexés dans un ordre décroissant du coût relatif de transport, a/β , tel que $a_1/\beta_1 > a_2/\beta_2 > \dots > a_G/\beta_G$.

A. Détermination de l'équilibre à un itinéraire

L'hypothèse d'hétérogénéité introduit une hiérarchie dans la répartition des usagers entre les différentes périodes de départ d'équilibre. Les usagers les plus averses à la congestion sont prêts à partir plus tôt.

Cette hiérarchie étant la suivante $a_1/\beta_1 > a_2/\beta_2 > \dots > a_G/\beta_G$, la Proposition 1 présente les conditions d'équilibre assurant la répartition des individus selon leur hétérogénéité par rapport au reste de la population.

Proposition 1. *A l'équilibre, les usagers prennent la route par groupe de « s » sur l'intervalle de départ $\{t^*-Tf-K, \dots, t^*-Tf-1\}$ si et seulement si $\eta > (K-1)$ et $a_1/\beta_1 > a_2/\beta_2 > \dots > a_G/\beta_G > (K-1)$, les groupes dont le ratio est le plus élevé se situent au début de l'intervalle (i.e. t^*-Tf-K).*

Remarque 1. *Si $\eta > (K-1)$ et $a_1/\beta_1 > a_2/\beta_2 > \dots > (K-1) > a_G/\beta_G > (K-2)$, alors les individus appartenant au groupe G se répartissent sur l'intervalle de départ $\{t^*-Tf-K+1, \dots, t^*-Tf-1\}$ tandis que les individus restant se répartissent sur l'intervalle $\{t^*-Tf-K, \dots, t^*-Tf-1\}$.*

Preuve. Conformément à l'approche homogène (section 2, ch. 2), les conditions d'équilibre sont les suivantes : $\eta > (K-1)$ et $a/\beta > (K-1)$ (voir équations (34) et (35) du chapitre 2). L'introduction de l'hypothèse d'hétérogénéité permet d'obtenir aisément les conditions décrites dans la Proposition 1.

Deux cas sont à distinguer :

aversion respective à la congestion (leur paramètre α) ; leurs coûts unitaires d'avance et de retard peuvent être supposés identiques.

- *Cas 1* (si $\eta > (K-1)$ et $a_1/\beta_1 > a_2/\beta_2 > \dots > a_G/\beta_G > (K-1)$). Les usagers du groupe $j=1$ dont le ratio a_1/β_1 est élevé sont relativement plus averses au phénomène de congestion, puisque il a pour conséquence un coût du temps d'attente sur l'itinéraire plus important. Par conséquent, ces même individus sont plus enclins à partir plus tôt dans l'intervalle de départ afin d'éviter de subir une congestion. Ainsi, chaque groupe d'usagers se répartit de manière régulière selon un ordre indiqué par la hiérarchie des coûts relatifs de transport.
- *Cas 2* (si $\eta > (K-1)$ et $a_1/\beta_1 > a_2/\beta_2 > \dots > (K-1) > a_G/\beta_G > (K-2)$). Les individus appartenant au groupe G refusent de partir avant $t^*-Tf-K+1$, du fait d'un coût de transport prohibitif eu égard au paramètre a_G/β_G . Leur intervalle de départ à l'équilibre est donc $\{t^*-Tf-K+1, \dots, t^*-Tf-1\}$. De plus, afin de conserver des conditions d'équilibre, le nombre d'usagers du groupe j doit être inférieur ou égal à la capacité d'absorption de l'itinéraire sur l'ensemble des périodes de départ d'équilibre. Les usagers des autres groupes peuvent se répartir sur l'ensemble des périodes de départ $\{t^*-Tf-K, \dots, t^*-Tf-1\}$ et vont choisir des périodes de départ en fonction des règles présentées dans le cas 1.

Tableau 2 : Répartition des périodes de départ à l'équilibre pour des usagers hétérogènes

Périodes de départ	Si $N_j = s$
	Groupe et nombre d'usagers
t^*-Tf-1	Groupe α_4/β_4 , N_4 usagers
t^*-Tf-2	Groupe α_3/β_3 , N_3 usagers
t^*-Tf-3	Groupe α_2/β_2 , N_2 usagers
t^*-Tf-4	Groupe α_1/β_1 , N_1 usagers

B. Détermination de l'équilibre à deux itinéraires et repartition des usagers sur le réseau

Nous considérons à présent l'ajout d'un deuxième itinéraire, payant. Dans une situation à deux itinéraires, les conclusions présentées au point précédent restent

valables sur chaque itinéraire pris séparément. Les usagers se répartissent sur un itinéraire en fonction décroissante de leur valeur de a/β .

L'hypothèse d'hétérogénéité introduit une hiérarchie dans la répartition des usagers entre les différentes périodes de départ d'équilibre et les deux itinéraires. Selon le prix du péage, les usagers les plus averses à la congestion sont plus enclins à choisir l'itinéraire payant.

Plus précisément, les usagers abandonnent l'itinéraire gratuit pour l'itinéraire payant si et seulement si leurs caractéristiques individuelles vérifient les équations (41) et (42) présentées en section 2 du chapitre 2.

Si nous considérons deux groupes d'usagers différents, notés j et j' (avec $j > j'$), les caractéristiques de chaque groupe doivent satisfaire les conditions (41) et (42). Le groupe le plus enclin à choisir l'itinéraire payant est celui dont la valeur $\alpha (Tf_A - Tf_B) + \beta (t_A - t_B)$ (i.e. équation (42)) est la plus importante. En cas d'égalité sur cette équation, on se réfère au groupe qui possède la plus forte valeur $\alpha(Tf_A - Tf_B + 1) - (X - 1)\beta$ (équation (41)).

A l'équilibre, les usagers de chaque groupe se répartissent de la manière suivante. Les usagers du groupe avec le plus faible rapport α/β (i.e. α_4/β_4) choisissent les périodes de départ sur A à partir de $t^* - Tf_A - 1$, et tant que l'équation $\alpha_4 (Tf_A - Tf_B) + \beta_4 (t_A - t_B) < p_B$ est vérifiée, les usagers partent à la période suivante sur l'itinéraire A plutôt qu'en $t^* - Tf_B - 1$ sur l'itinéraire B. Lorsque cette équation n'est plus vérifiée, les usagers du groupe 4 choisissent l'itinéraire B, à partir de $t^* - Tf_B - 1$. Ensuite, les usagers du groupe 3 comparent les périodes de départ possibles sur A et celles possibles sur B grâce à l'équation précédente et choisissent également leur période de départ et leur itinéraire. Il en va de même jusqu'au groupe au plus fort rapport α/β (i.e. α_1/β_1) qui part le plus tôt sur chaque itinéraire, c'est à dire sur les périodes de départ laissées libres par les autres groupes.

2. Procédure et résultats expérimentaux

Ces prédictions théoriques ont été réfutées expérimentalement. Les objectifs de cette analyse sont, tout d'abord, de comprendre comment l'introduction d'un deuxième itinéraire améliore la coordination des usagers hétérogènes et permet de

parvenir plus aisément à une situation d'équilibre. Ensuite, nous comparons les situations obtenus dans la section 2 du chapitre 2 (usagers homogènes) pour comprendre dans quelle mesure l'hétérogénéité des usagers est un facteur explicatif des décisions routières. Enfin, nous analysons l'impact du prix de péage sur le comportement des usagers hétérogènes en introduisant des prix de péage différents d'une expérience à l'autre.

Nous présentons successivement dans cette section le protocole expérimental, les équilibres chiffrés et la population testée (point A), puis une analyse des résultats expérimentaux comprenant une analyse descriptive et économétrique (point B).

A. Protocole expérimental

Pour tester le modèle théorique présenté précédemment, nous avons organisé une série d'expériences. La première étape a été de fixer des valeurs pour chacun des paramètres de notre modèle et de calculer les différentes solutions qui lui sont associées. Des simulations mathématiques ont encore une fois été effectuées.

Afin de pouvoir comparer les résultats expérimentaux avec ceux présentés dans la section 2 du chapitre 2 (usagers homogènes), nous attribuons des valeurs identiques aux paramètres du modèle. A savoir, $N=8$ (le nombre total d'usagers), $s_A=1$ et $s_B=2$ (les capacités d'absorption des deux itinéraires), $\beta = 5$ et enfin les valeurs différentes du prix de péage ($p_B=4$ ou 8).

Au cours de cette expérience, seules les paramètres α et γ changent entre les usagers. Nous définissons 4 groupes hétérogènes différents $j=1, \dots, 4$; et nous attribuons les valeurs suivantes $\gamma = 45$, et $\alpha_j = 11, 13, 16, 19$. Ainsi, dans notre population de 8 usagers, deux usagers ont un coût unitaire du temps de transport égal à 11, deux usagers ont un coût unitaire de 13, deux usagers ont un coût de 16 et deux usagers ont un coût de 19.

Le choix de ces valeurs se justifie de la façon suivante. Tout d'abord, nous souhaitons intégrer des intervalles de départ à l'équilibre différents entre les groupes hétérogènes pour « forcer » la répartition des usagers. Ensuite, nous souhaitons que les écarts entre les différentes valeurs de

α soient relativement importants. Enfin, afin de justifier de la présence d'un itinéraire payant, ces valeurs ont été définies de manière à éviter l'émergence d'un équilibre uniquement sur l'itinéraire A. Les usagers disposent de 15 périodes de départ possibles sur chaque itinéraire. Ces périodes de départ appartiennent à l'ensemble $\{t^*-9, \dots, t^*+4\}$.

Tout d'abord, déterminons la répartition des usagers entre les différentes périodes de départ et les deux itinéraires. Pour cela, nous considérons les éléments suivants :

Numéro du groupe	Valeur de α
Groupe 1	$\alpha=19$
Groupe 2	$\alpha=16$
Groupe 3	$\alpha=13$
Groupe 4	$\alpha=11$

Lorsque le prix du péage est de 4. Comme le montre le tableau 3, trois usagers choisissent de partir sur l'itinéraire A et cinq usagers choisissent de partir sur l'itinéraire B. A l'équilibre, les usagers choisissent des périodes de départ appartenant aux intervalles $\{t^*-1, \dots, t^*-3\}$ sur l'itinéraire A et de $\{t^*-1, \dots, t^*-3\}$ sur l'itinéraire B.

Tableau 3 : Coûts individuels de transport à l'équilibre avec un péage de 4

Heure de départ	Coût subi par l'utilisateur sur l'itinéraire A (nombre d'utilisateurs concernés)	Coût subi par l'utilisateur sur l'itinéraire B (nombre d'utilisateurs concernés)
t^*-1	$Coût = \alpha = 11$ 1 usager du groupe 4	$Coût = \alpha + p_B = 15$ (1 usager du groupe 4) $Coût = \alpha + p_B = 17$ (1 usager du groupe 3)
t^*-2	$Coût = \alpha + \beta = 18$ 1 usager du groupe 3	$Coût = \alpha + \beta + p_B = 25$ 2 usagers du groupe 2
t^*-3	$Coût = \alpha + 2\beta = 29$ 1 usager du groupe 1	$Coût = \alpha + 2\beta + p_B = 33$ 1 usager du groupe 1

Ensuite, lorsque le prix du péage est de 8. 4 usagers choisissent de partir sur l'itinéraire A et 4 usagers choisissent de partir sur l'itinéraire B. A l'équilibre, les

usagers choisissent des périodes de départ appartenant aux intervalles $\{t^*-1, \dots, t^*-4\}$ sur l'itinéraire A et de $\{t^*-1, \dots, t^*-2\}$ sur l'itinéraire B.

Tableau 4 : Coûts individuels de transport à l'équilibre avec un péage de 8

Heure de départ	Coût subi par l'utilisateur sur l'itinéraire A (nombre d'utilisateurs concernés)	Coût subi par l'utilisateur sur l'itinéraire B (nombre d'utilisateurs concernés)
t^*-1	Coût = $\alpha = 11$ 1 usager du groupe 4	Coût = $\alpha + p_B = 21$ 2 usagers du groupe 3
t^*-2	Coût = $\alpha + \beta = 16$ 1 usager du groupe 4	Coût = $\alpha + p_B = 29$ (1 usager du groupe 2) Coût = $\alpha + p_B = 32$ (1 usager du groupe 1)
t^*-3	Coût = $\alpha + 2\beta = 26$ 1 usager du groupe 2	
t^*-4	Coût = $\alpha + 3\beta = 34$ 1 usager du groupe 1	

Cette répartition des usagers à l'équilibre permet de déterminer le coût social associé à chaque valeur du péage. Pour calculer ce coût, nous additionnons les coûts individuels de transport présentés dans les tableaux 8 et 9. Ainsi le coût social associé au péage de valeur 4 est égal à 173 tandis que celui associé au péage de valeur 8 est de 190.

Les conditions de l'expérience

Toujours afin de comparer les résultats de cette expérience à ceux de l'expérience présentée à la section 2, chap. 2, nous avons conservé les mêmes conditions de réalisation. Ainsi, les expériences ont été réalisées au moyen du logiciel REGATE au laboratoire GATE. Un total de 96 participants, toujours issus du milieu universitaire lyonnais, a été testé.

Dans chaque traitement expérimental (péage à 4 et péage à 8, notés ensuite HE-P4 et HE-P8²⁷), six groupes de huit personnes sont testés afin d'obtenir un nombre suffisant de données indépendantes au vu des tests statistiques et économétriques réalisés.

²⁷ HE-P4 et HE-P8 : HE en référence à des usagers Hétérogènes (à la différence de la section 2) et P4 ou P8 pour le prix du péage retenu.

Les participants ont été accueillis dans les mêmes conditions que celles de l'expérience présentée à la section 2, ch. 2. Les instructions de la session expérimentale sont disponibles en annexe n°XXX. La différence d'instructions porte sur les valeurs de α . En effet, dans cette expérience, les sujets sont informés via les instructions des différentes valeurs de α possibles, ils savent qu'une de ces valeurs leur sera attribuée au cours de la session et que les autres valeurs seront attribuées aux autres membres du groupe considéré. Cependant, à aucun moment de l'expérience, ils ne connaissent les participants auxquels sont attribuées les différentes valeurs de α . Au cours de l'expérience, chaque participant prend 15 décisions successives de choix de période de départ et d'itinéraire (i.e. l'expérience est répétée 15 fois). A chaque répétition, les sujets prennent leurs décisions (choix d'une période de départ et d'un itinéraire) et une fois que les sept autres membres du groupe ont pris leur décision, le serveur rassemble les choix, et calcule le temps de transport et le gain de chaque participant. Les informations suivantes sont renvoyées à chaque sujet : l'itinéraire et la période de départ choisis, le temps de transport, la période d'arrivée, le nombre de participants ayant choisi la même période de départ sur le même itinéraire, et le gain du participant²⁸.

Au terme de l'expérience, nous faisons la moyenne des points gagnés à chaque répétition. Cette moyenne est convertie en Euro sur la base de 500 points = 12 €. A cette somme s'ajoute un forfait de participation de 4 €. Les sujets se rendent successivement dans un bureau, remplissent un reçu et reçoivent leurs gains. Cette procédure de paiement individuel permet d'assurer l'anonymat des sujets et la confidentialité des gains.

Au cours du déroulement d'une session expérimentale, les sujets disposent des trois zones suivantes sur leurs écrans d'ordinateur :

²⁸ Chaque sujet dispose d'une dotation initiale de 500 points au début de chaque répétition. A cette dotation se soustrait le coût total de transport. Dans certains cas, ce gain peut être négatif. Cependant, étant donnée la somme forfaitaire versée aux participants, le gain net ne peut être négatif.

- Afin d'aider les sujets à prendre leurs décisions, une première zone leur permet de tester les différentes heures de départ sur chaque itinéraire pour connaître le gain associé en fonction des temps de transport possibles (et donc du niveau de congestion). Cette zone de test est présente en permanence à l'écran. Les sujets peuvent ainsi y avoir recours à n'importe quel moment de l'expérience.
- Une deuxième zone leur permet de saisir leurs décisions (choix d'itinéraire et période de départ).
- Une troisième zone informe chaque sujet des éléments liés à sa décision pour chacune des répétitions de l'expérience.

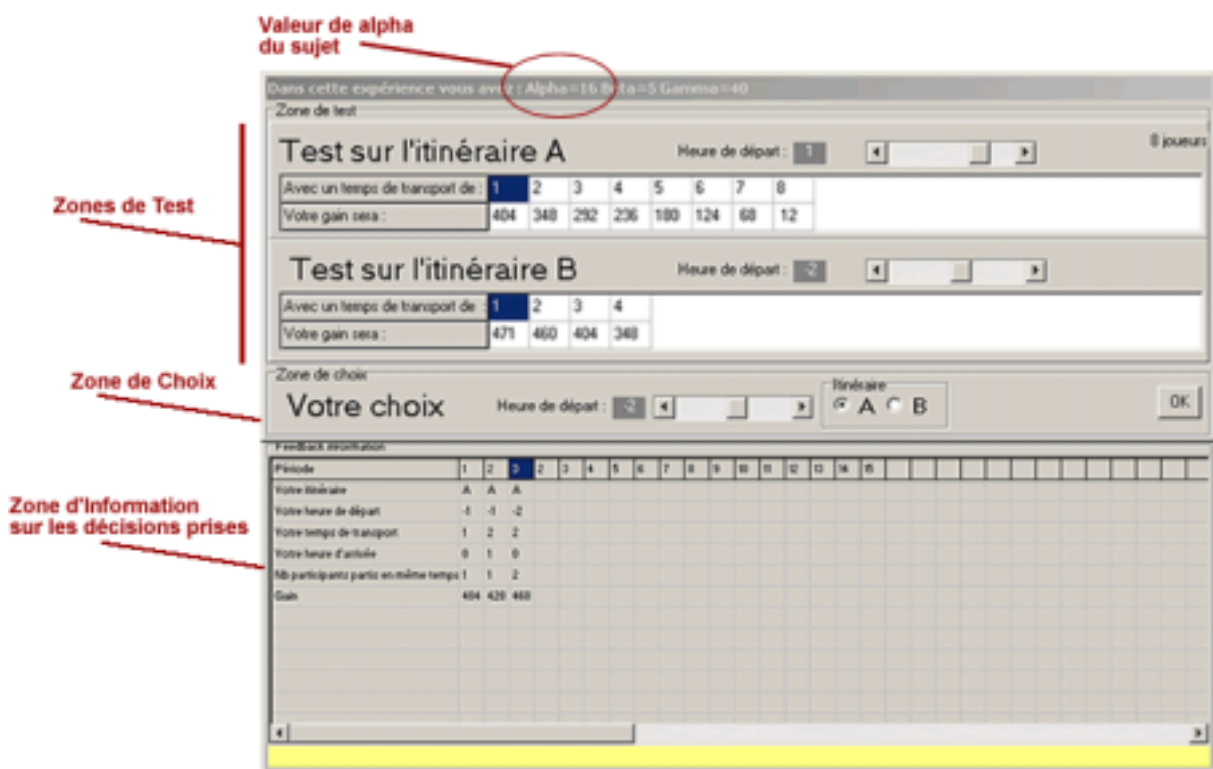


Figure 7 : Ecran de saisie des décisions et de renvoi des informations

B. statistiques descriptives et analyse économétrique

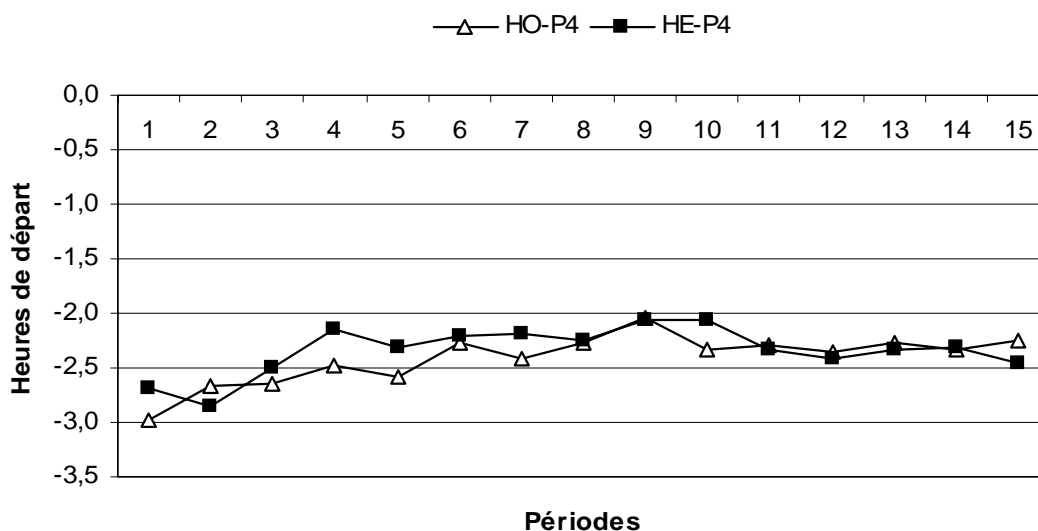
Dans cette section, l'objectif est double. D'une part, il s'agit d'analyser l'impact de l'hétérogénéité sur les décisions individuelles (choix d'heure de départ et d'itinéraire) et sur la congestion (temps de transport et heures d'arrivée). L'hétérogénéité modifie t'elle la coordination des usagers dans l'intervalle de départ et leur répartition sur les

deux itinéraires ? D'autre part, il s'agit d'étudier l'influence de la congestion et de la ponctualité (temps de transport et heures d'arrivée) sur les décisions individuelles (choix d'heure de départ et d'itinéraire) dans les cadres homogène et hétérogène. L'hétérogénéité a-t-elle un impact sur l'influence de la congestion et de la ponctualité ? Pour cela nous allons comparer successivement les deux traitements suivants : HO-P4 à HE-P4 et HO-P8 à HE-P8, afin de savoir si les conclusions restent valables pour les deux niveaux de péage retenus.

1°) Importance de l'hétérogénéité sur les décisions individuelles

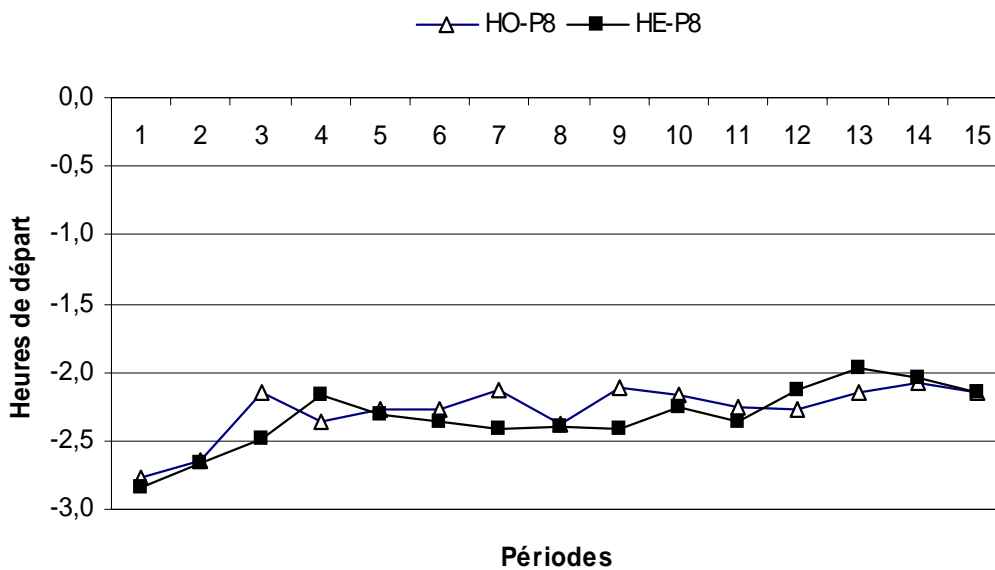
Considérons tout d'abord les heures de départ moyenne dans chaque traitement (HO-P4 et HE-P4 puis HO-P8 et HE-P8) sur l'ensemble des 15 répétitions de l'expérience. Les moyennes (et les écarts-type) des heures de départ sont calculés pour chaque groupe et dans chaque traitement, à la fois pour chacune des répétitions mais également sur l'expérience dans son ensemble²⁹.

Le graphique 1 présente l'évolution des moyenne des HD à chaque répétition pour chacun des traitements HO-P4 et HE-P4. Le graphique 2 présente cette évolution pour les traitements HO-P8 et HE-P8.



Graphique 1 : Evolution des Heures de Départ (HO-P4 et HE-P4)

²⁹ Les tableaux de données sont disponibles en Annexe



Graphique 2 : Evolution des Heures de Départ (HO-P8 et HE-P8)

Observation 1. Sans distinction d'itinéraire et quel que soit le niveau du péage, les usagers homogènes choisissent les mêmes heures de départ que les usagers hétérogènes.

Preuve de l'observation 1.

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : la moyenne des HD s'établit à $-2,41$ (écart type 1,40) et $-2,34$ (écart type 1,23) pour les traitements HO-P4 et HE-P4 respectivement.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : la moyenne des HD s'établit à $-2,28$ (écart type 1,19) et $-2,33$ (écart type 1,29) pour les traitements HO-P8 et HE-P8 respectivement.

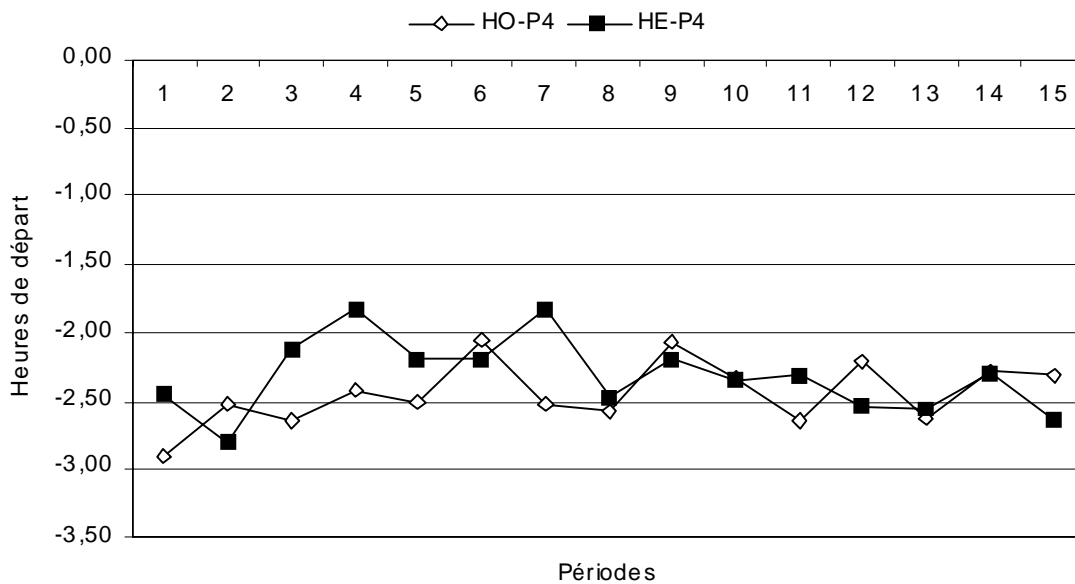
Pour chaque niveau de péage retenu, un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des HD de chaque groupe d'utilisateurs considérant l'hypothèse nulle que les HD sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population (population homogène ou population hétérogène). Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que tout

itinéraire confondu et pour chaque niveau de péage, les usagers homogènes choisissent en moyenne les mêmes heures de départ que les usagers hétérogènes.

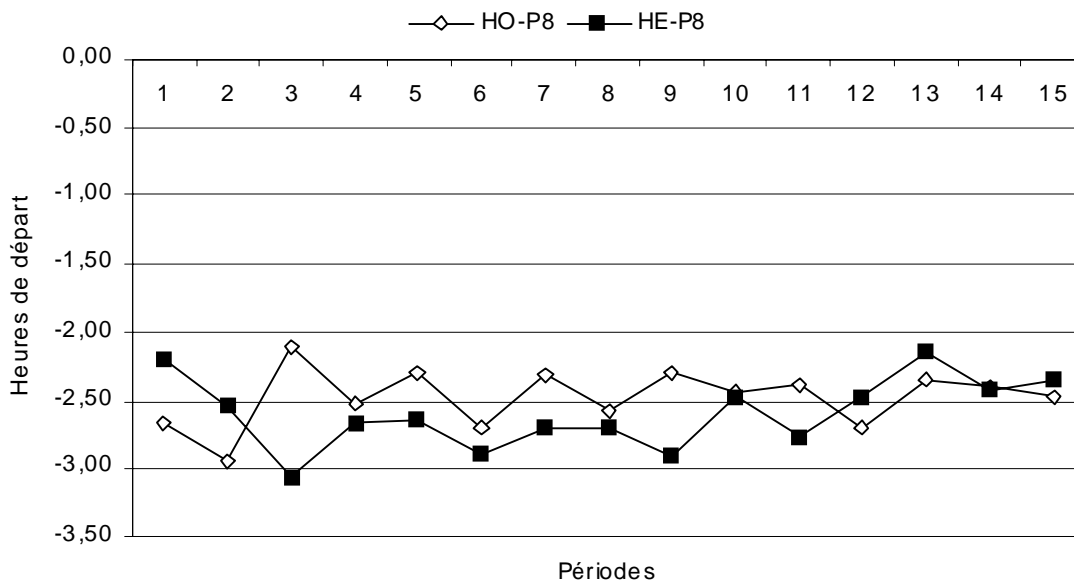
Nous pouvons à présent affiner notre étude et analyser le choix des HD des usagers sur chaque itinéraire. Pour cela, nous calculons à nouveau les moyennes (et écart types) des HD mais en distinguant les itinéraires retenus.

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : l'itinéraire A a été choisi 255 fois dans le traitement HO-P4 alors qu'il a été choisi 257 dans le traitement HE-P4. L'itinéraire B a été choisi 465 fois dans le traitement HO-P4 et 463 dans le traitement HE-P4.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : l'itinéraire A a été choisi 312 fois dans le traitement HO-P8 alors qu'il a été choisi 301 dans le traitement HE-P8. L'itinéraire B a été choisi 408 fois dans le traitement HO-P8 et 419 dans le traitement HE-P8.

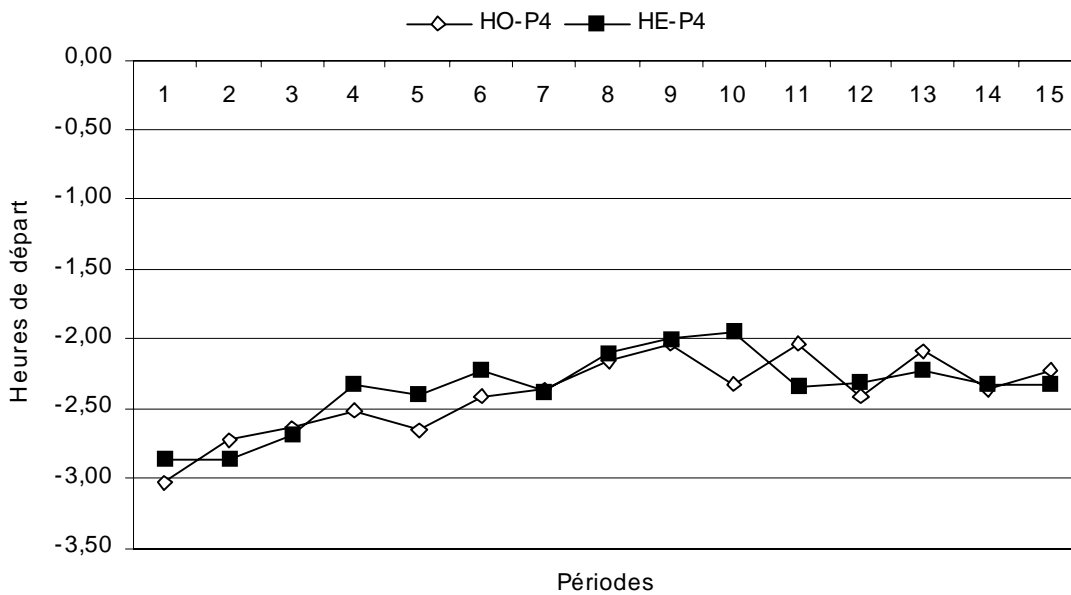
Les graphiques suivants (Graphiques 3, 4, 5 et 6) représentent l'évolution des heures de départ dans chaque traitement en fonction de l'itinéraire étudié.



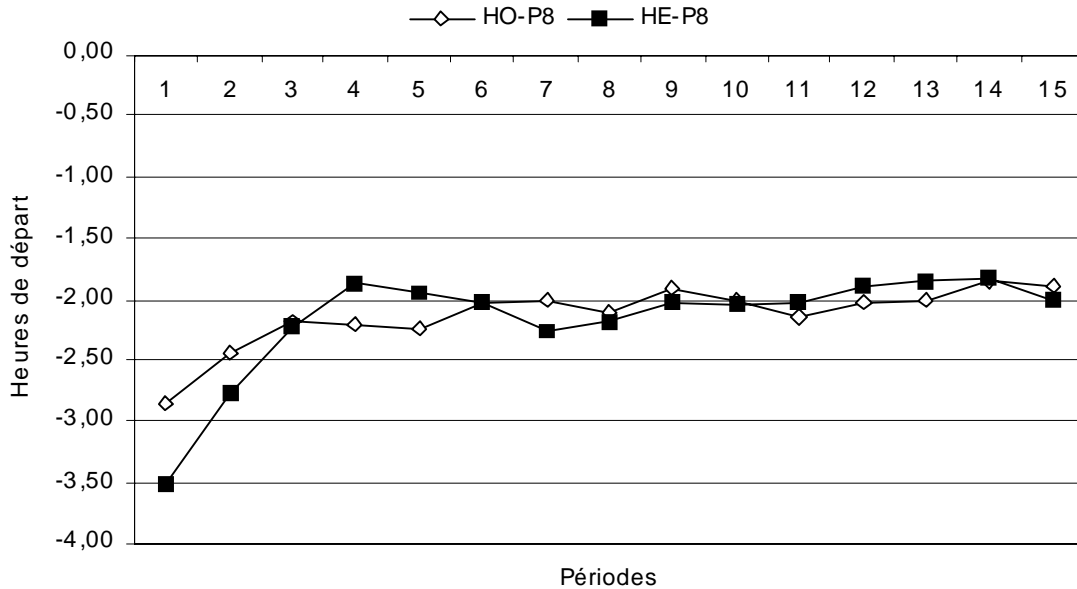
Graphique 3 : Evolution des Heures de Départ sur l'itinéraire A (HO-P4 et HE-P4)



Graphique 4 : Evolution des Heures de Départ sur l'itinéraire A (HO-P8 et HE-P8)



Graphique 5 : Evolution des Heures de Départ sur l'itinéraire B (HO-P4 et HE-P4)



Graphique 6 : Evolution des Heures de Départ sur l'itinéraire B (HO-P8 et HE-P8)

Observation 2. Sur chaque itinéraire et quel que soit le niveau du péage, les usagers homogènes choisissent les mêmes heures de départ que les usagers hétérogènes.

Preuve de l'observation 2.

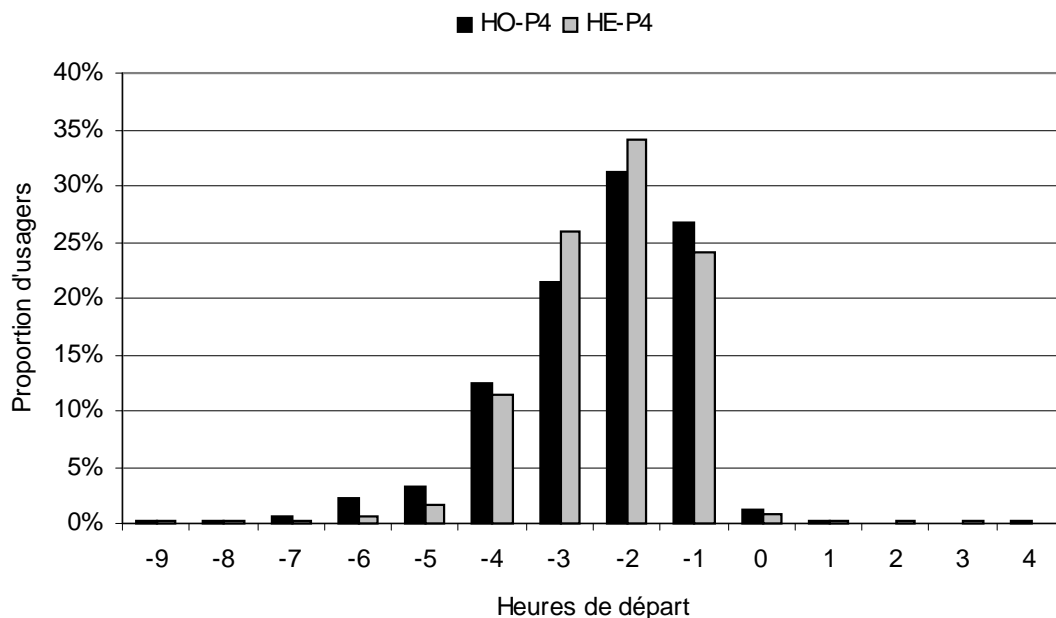
- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : sur l'itinéraire A, la moyenne des HD s'établit à $-2,45$ (écart type 1,60) et $-2,32$ (écart type 1,39) pour les traitements HO-P4 et HE-P4 respectivement. Sur l'itinéraire B, la moyenne des HD s'établit à $-2,39$ (écart type 1,28) et $-2,36$ (écart type 1,13) pour les traitements HO-P4 et HE-P4 respectivement.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : sur l'itinéraire A, la moyenne des HD s'établit à $-2,47$ (écart type 1,29) et $-2,58$ (écart type 1,40) pour les traitements HO-P8 et HE-P8 respectivement. Sur l'itinéraire B, la moyenne des HD s'établit à $-2,13$ (écart type 1,08) et $-2,15$ (écart type 1,17) pour les traitements HO-P8 et HE-P8 respectivement.

Pour chaque niveau de péage retenu, un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé pour chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que les HD

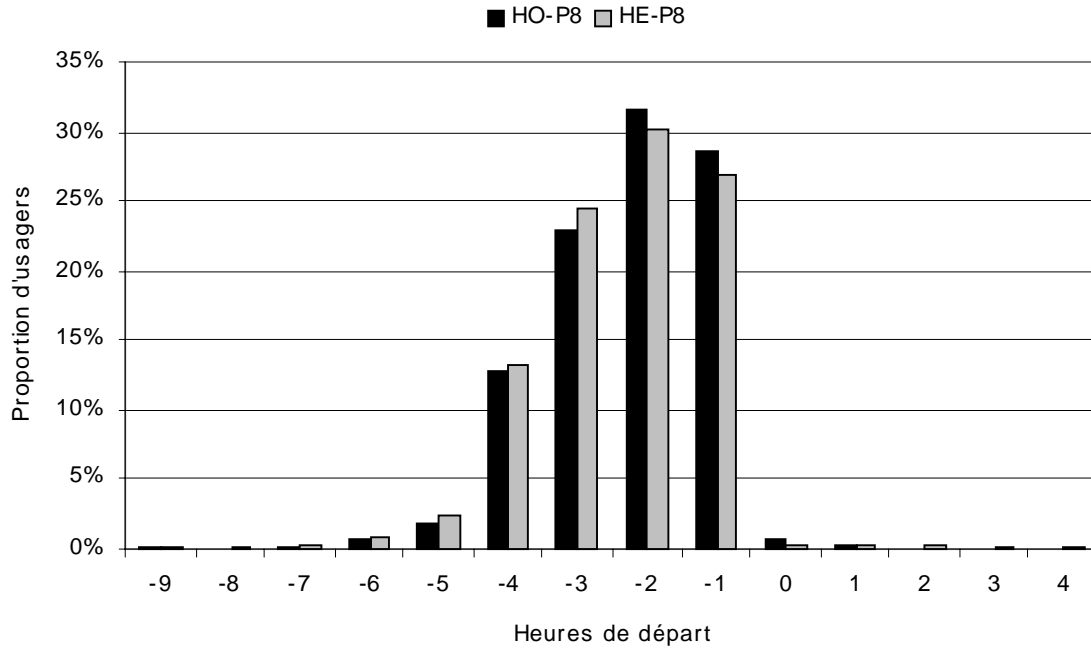
sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population. Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que sur les deux itinéraires et pour chaque niveau de péage, les usagers homogènes choisissent en moyenne les mêmes heures de départ que les usagers hétérogènes.

Toujours dans l'analyse des HD, nous nous intéressons à présent à la distribution des choix d'heure de départ faits par les usagers au cours de l'expérience. Pour ce faire, nous considérons la distribution des choix d'HD dans chaque traitement sur l'ensemble des décisions prises au cours d'un traitement. Comme précédemment, nous analysons dans un premier temps ces distributions tout itinéraire confondu puis chaque itinéraire pris séparément.

Les graphiques 7 et 8 présentent les distributions des HD dans chaque traitement tout itinéraire confondu selon le niveau de péage considéré.



Graphique 7: Distribution des HD, tout itinéraire (HO-P4 et HE-P4)



Graphique 8 : Distribution des HD, tout itinéraire (HO-P8 et HE-P8)

Ce graphique met en relation les distributions des choix individuels d'HD dans chaque traitement sur l'ensemble des 15 répétitions.

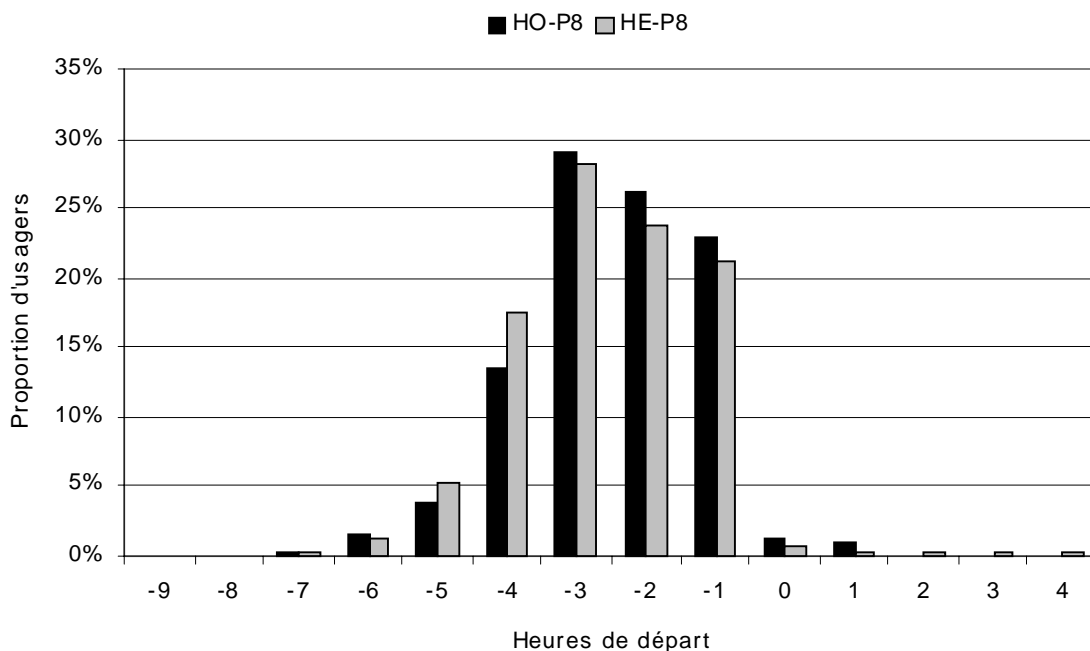
- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : pour les deux traitements, nous observons une distribution avec un mode à -2. Pour le traitement HO-P4, 91,81% des décisions de départ appartiennent à l'intervalle d'équilibre $\{-4 ; -1\}$ tandis que, pour le traitement HE-P4, cette proportion est légèrement plus importante avec 95,56% des décisions.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : pour les deux traitements, nous observons une distribution avec un mode à -2. Pour le traitement HO-P8, 95,98% des décisions de départ appartiennent à l'intervalle d'équilibre $\{-4 ; -1\}$ tandis que, pour le traitement HE-P8, cette proportion est encore une fois plus importante avec 94,86% des décisions.

Observation 3. Sans distinction d'itinéraire et quel que soit le niveau du péage, la distribution des choix d'heures de départ des usagers homogènes et hétérogènes sont identiques.

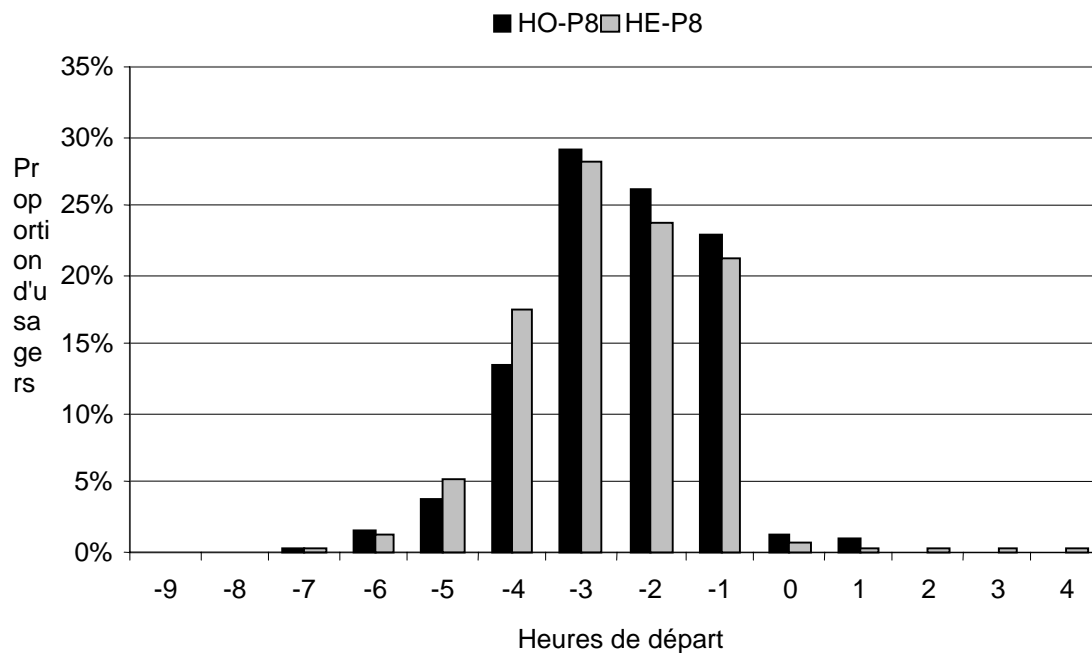
Preuve de l'observation 3.

Pour comparer ces deux distributions, nous réalisons un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov considérant l'hypothèse nulle que les heures de départ sont identiquement distribuées entre les deux traitements HO-P4 et HE-P4 puis HO-P8 et HE-P8. Avec un taux d'erreur de 10%, nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle. Nous concluons que les usagers homogènes ont réalisés les mêmes choix d'heure de départ que les usagers hétérogènes, quel que soit le niveau de péage.

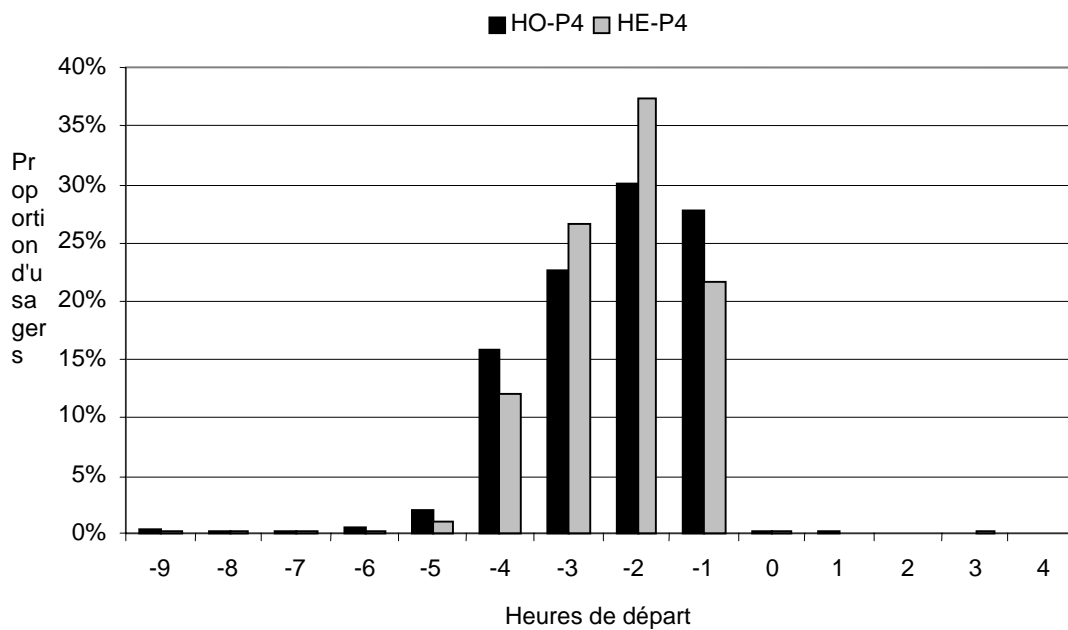
Nous nous intéressons à présent à la distribution des choix de HD dans chaque traitement, mais en distinguant l'itinéraire retenu par les usagers. Les graphiques 9 à 12 présentent les distributions des HD dans chaque traitement, sur l'itinéraire A et l'itinéraire B respectivement.



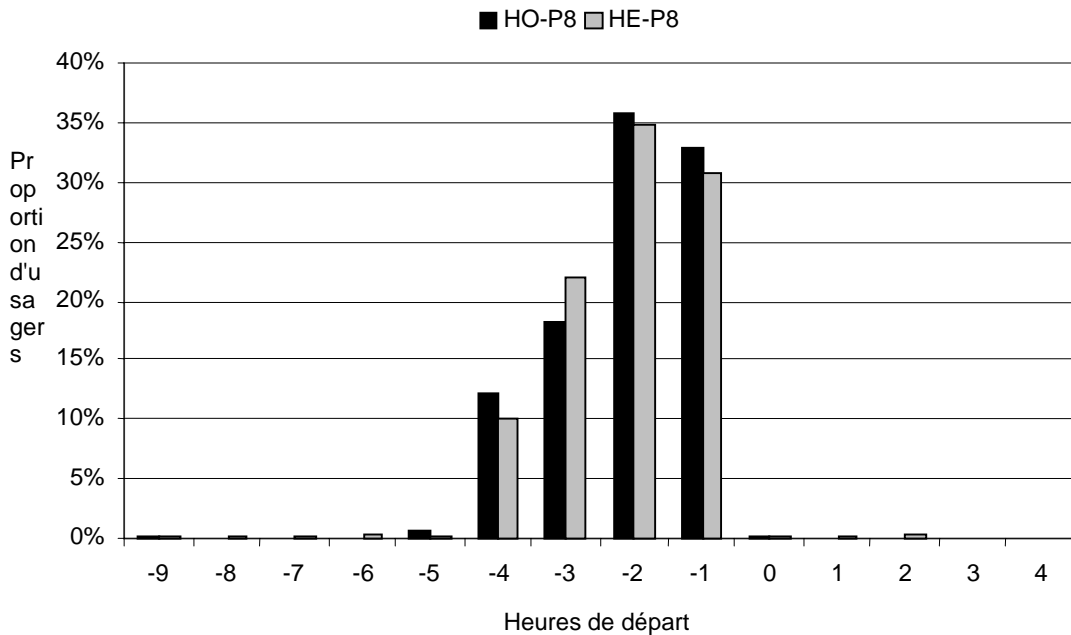
Graphique 9 : Distribution des HD, itinéraire A (HO-P8 et HE-P8)



Graphique 10 : Distribution des HD, itinéraire A (HO-P8 et HE-



Graphique 11 : Distribution des HD, itinéraire B (HO-P4 et HE-P4)



Graphique 12 : Distribution des HD, itinéraire B (HO-P8 et HE-P8)

Ces graphiques mettent en relation, pour chaque itinéraire, les distributions des choix individuels d'HD dans chaque traitement sur l'ensemble des 15 répétitions.

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : sur l'itinéraire A, pour les deux traitements, nous observons une distribution avec un mode à -2. Pour le traitement HO-P4, 83,93% des décisions de départ appartiennent à l'intervalle d'équilibre $\{-4 ; -1\}$. Pour le traitement HE-P4, cette proportion est plus importante avec 91,82% des décisions. Sur l'itinéraire B, pour les deux traitements, le mode de la distribution est également à -2. Pour le traitement HO-P4, 96,13% des décisions de départ appartiennent à l'intervalle d'équilibre $\{-4 ; -1\}$. Pour le traitement HE-P4, cette proportion correspond à 97,64% des décisions.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : sur l'itinéraire A, pour les deux traitements, nous observons une distribution avec un mode à -3. Pour le traitement HO-P8, 91,99% des décisions de départ appartiennent à l'intervalle d'équilibre $\{-4 ; -1\}$. Pour le traitement HE-P8, cette proportion est légèrement moins importante avec 91,03% des décisions. Sur l'itinéraire B, pour les deux traitements, le mode de la distribution est égal à -2. Pour le traitement HO-P8,

99,01% des décisions de départ appartiennent à l'intervalle d'équilibre $\{-4 ; -1\}$.

Pour le traitement HE-P8, cette proportion correspond à 97,61% des décisions.

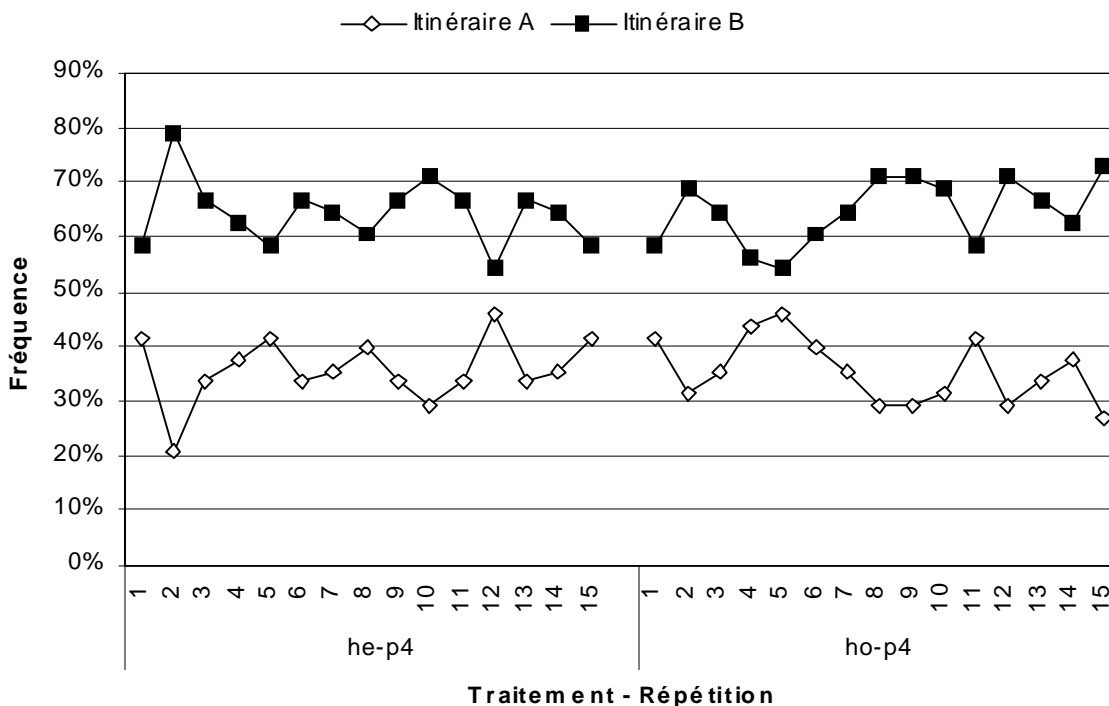
Observation 4. Sur chaque itinéraire et quel que soit le niveau du péage, la distribution des choix d'heures de départ des usagers homogènes et hétérogènes sont identiques.

Preuve de l'observation 4.

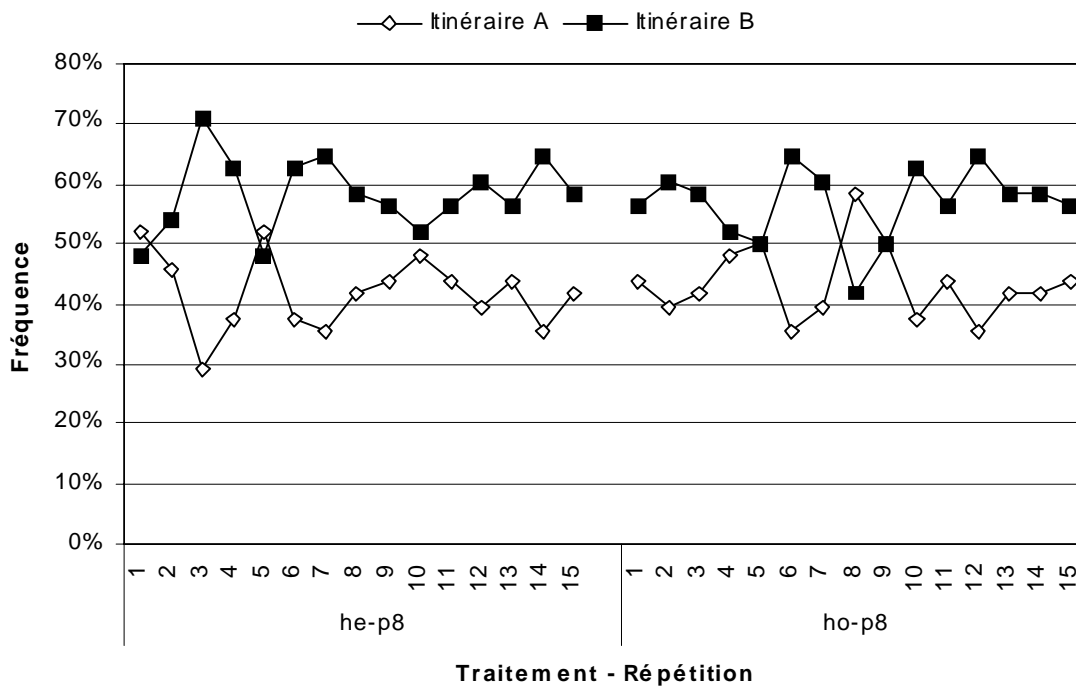
Pour comparer ces deux distributions, pour chaque itinéraire, nous réalisons un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov considérant l'hypothèse nulle que les heures de départ sont identiquement distribuées entre les deux traitements HO-P4 et HE-P4 puis HO-P8 et HE-P8. Avec un taux d'erreur de 10%, nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle. Nous concluons que les usagers hétérogènes prennent les mêmes décisions d'heure de départ que les usagers homogènes, quel que soit le niveau de péage.

2°) Le choix d'itinéraire

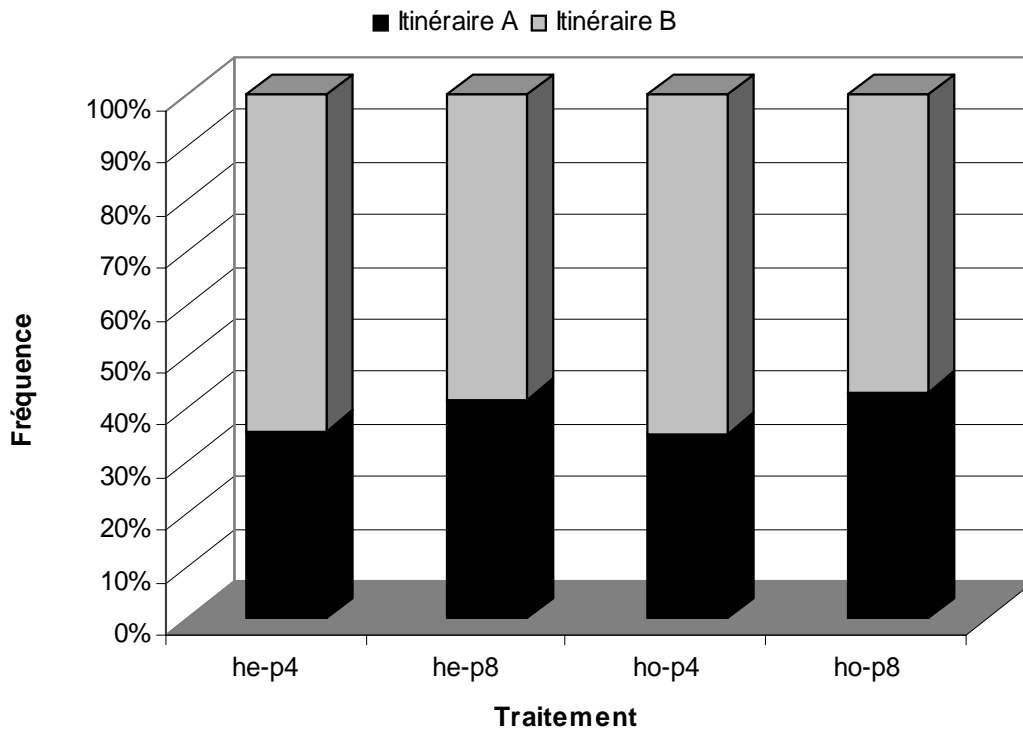
L'analyse suivante s'intéresse au choix d'itinéraire, tout heure de départ confondu, selon la caractéristique de la population. Nous considérons les choix d'itinéraire des usagers sur les 15 répétitions de l'expérience, pour chacun des quatre traitements. Les graphiques suivants présentent l'évolution des fréquences de choix d'itinéraire sur les 15 répétitions de l'expérience et la distribution des choix d'itinéraire sur l'ensemble de l'expérience, pour les traitements HO-P4 et HE-P4 puis pour les traitements HO-P8 et HE-P8.



Graphique 13 : Fréquence de choix des itinéraires. Comparaison HE-P4 et HO-P4



Graphique 14 : Fréquence de choix des itinéraires. Comparaison HE-P8 et HO-P8



Graphique 15 : Distribution des choix d'itinéraire selon le traitement

L'analyse des données met en avant que l'itinéraire B est le plus sollicité dans chacun des quatre traitements. La répartition choisie par les usagers hétérogènes est très proche de celle choisie par les usagers homogènes.

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : dans le traitement HO-P4 (resp. HE-P4), 65% (resp. 64%) des décisions des usagers se sont portées sur l'itinéraire B.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : dans le traitement HO-P8 (resp. HE-P8), 57% (resp. 58%) des décisions des usagers se sont portées sur l'itinéraire B.

Observation 5. Quel que soit le niveau du péage, les usagers homogènes choisissent majoritairement l'itinéraire payant.

Observation 6. Quel que soit le niveau du péage, les usagers hétérogènes choisissent majoritairement l'itinéraire payant.

Observation 7. Quel que soit le niveau du péage, la caractéristique de la population n'influence pas le choix d'itinéraire des usagers. Les usagers hétérogènes se répartissent entre les deux itinéraires de la même manière que les usagers homogènes.

Preuve de l'observation 5.

Afin de savoir si les usagers homogènes choisissent plus ou moins un itinéraire par rapport à l'autre, pour les deux niveaux de péage, nous soumettons les données des traitements HO-P4 et HO-P8 à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle est qu'il existe une équivalence entre les proportions de choix des itinéraires. Lorsque le coût de péage est faible, nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle au taux d'erreur de 1%. Lorsque le coût de péage est élevé, nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle au taux d'erreur de 5%. Nous concluons que les usagers homogènes choisissent plus souvent l'itinéraire B que l'itinéraire A, quel que soit le niveau de péage.

Preuve de l'observation 6.

Dans le même objectif que précédemment, nous soumettons les données des traitements HE-P4 et HE-P8, à un test bilatéral du χ^2 suivant l'hypothèse nulle d'une équivalence entre les proportions de choix des itinéraires. Au taux d'erreur de 1% , nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que les usagers hétérogènes choisissent plus souvent l'itinéraire B que l'itinéraire A, quel que soit le niveau de péage.

Preuve de l'observation 7.

Afin de savoir si la caractéristique de la population influence le choix de l'itinéraire, nous appliquons sur les données des quatre traitements un test bilatéral du χ^2 suivant l'hypothèse nulle d'une équivalence des proportions de choix des itinéraires entre les traitements HO-P4 et HE-P4 puis entre les traitements HO-P8 et HE-P8. Au taux d'erreur de 10%, nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous

concluons que les usagers hétérogènes choisissent aussi souvent l'itinéraire B que les usagers homogènes.

L'analyse des variables de décision des sujets (choix d'heure de départ et d'itinéraire) nous permet de conclure que l'hétérogénéité de la population ne modifie pas significativement le comportement des usagers. Il est donc intéressant d'étudier les conséquences de ces décisions. Dans ce cadre, nous analysons successivement les niveaux de congestion apparus dans les expériences et les heures d'arrivée des usagers. Ensuite, nous étudions l'impact de ces données sur la modification des choix des usagers afin de savoir comment la congestion et l'heure d'arrivée influence le comportement des sujets.

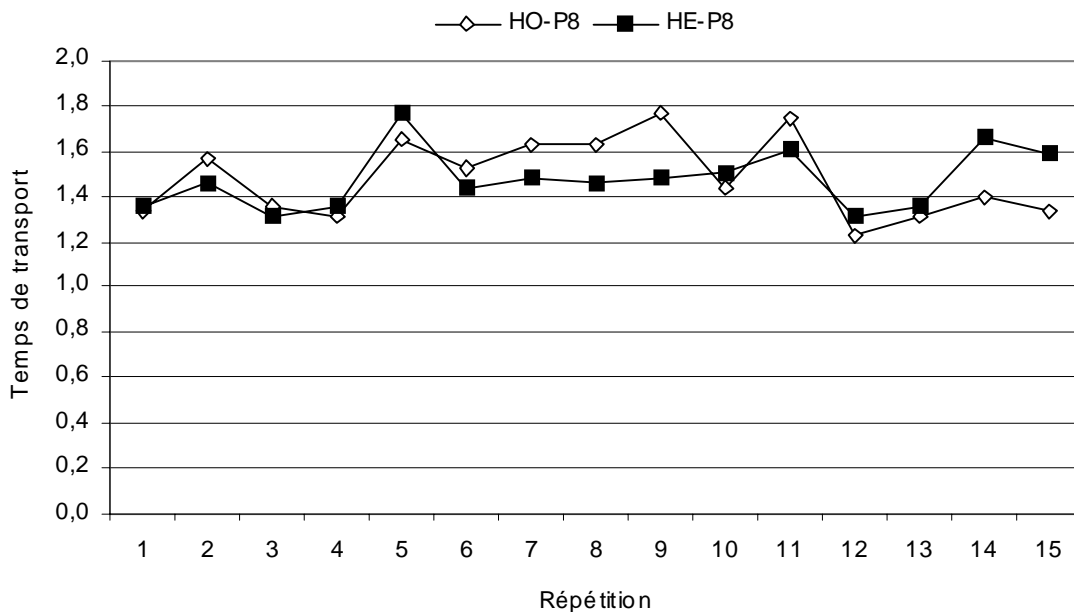
3°) Le rôle du Temps de Transport sur le processus de décision.

La première conséquence des décisions individuelles étudiées est le niveau de congestion subi par les usagers. Comme il a été dit dans la section 2, ch. 2, ce niveau de congestion est représenté par la variable Temps de Transport (TT par la suite). Cette variable peut prendre quatre valeurs : 1, 2, 3 ou 4. Un temps de transport de 1 signifie que les usagers n'ont pas connu de congestion (itinéraire fluide). Un temps de transport de 4 signifie que les usagers ont connu un niveau de congestion maximal. Selon la caractéristique de la population, comment les usagers réagissent-ils suite à une congestion et au supplément de coût engendré (représenté par le paramètre α) ?

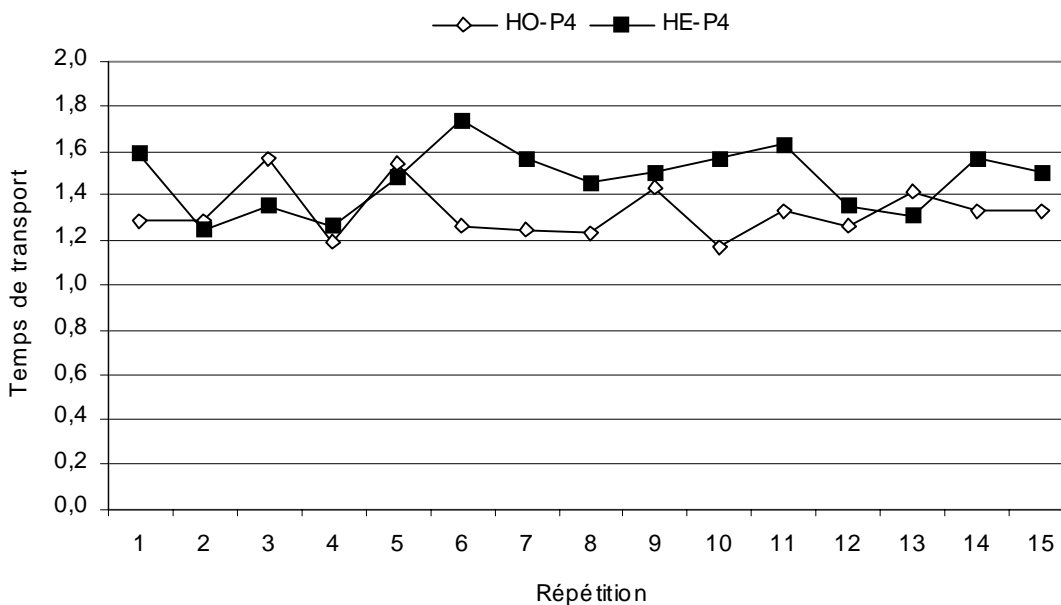
Notre analyse porte dans un premier temps sur la distribution et l'évolution de TT, selon l'itinéraire considéré et en fonction de la caractéristique de la population.

Considérons tout d'abord les temps de transport moyens dans chaque traitement (HO-P4 et HE-P4, puis HO-P8 et HE-P8) sur l'ensemble des 15 répétitions de l'expérience. Les moyennes (et les écarts-type) des temps de transport ont été calculés pour chacun des 6 groupes et dans chaque traitement, à la fois pour chacune des répétitions mais également sur l'expérience dans son ensemble. Les graphiques 15 et

16 présentent l'évolution des moyennes des temps de transport à chaque répétition pour chacun des deux traitements et tout itinéraire confondu.



Graphique 16 : Evolution des Temps de Transport Moyens, HO-P8 et HE-P8



Graphique 17 : Evolution des Temps de Transport Moyens, HO-P4 et HE-P4

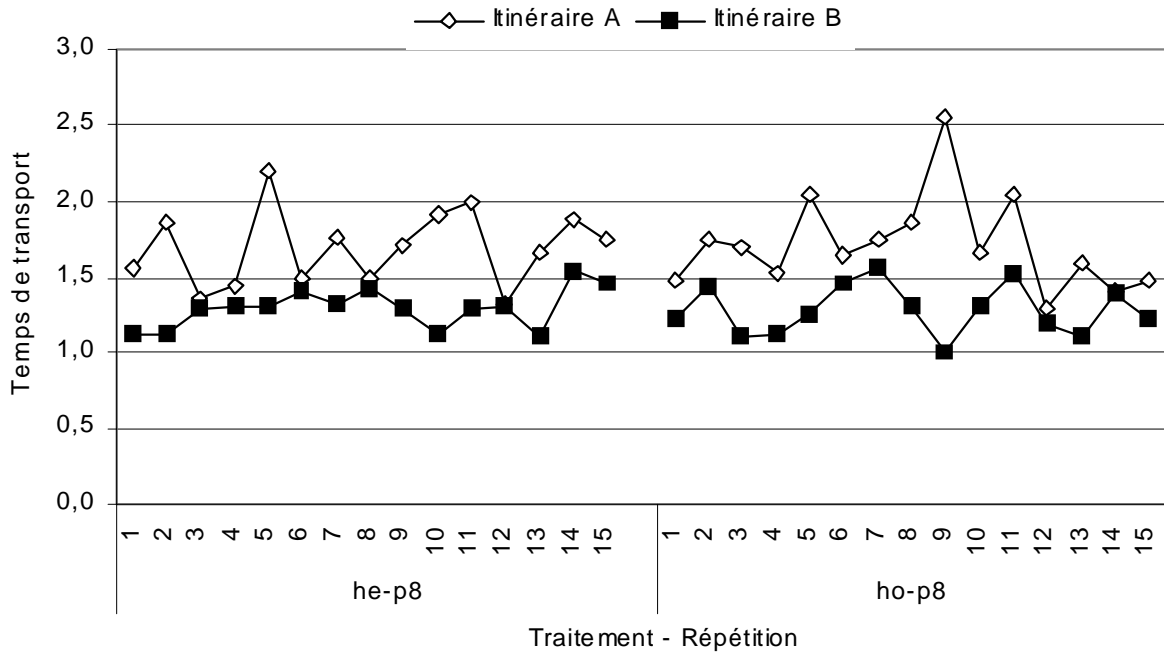
Observation 8. Lorsque le coût du péage est faible, sans distinction d'itinéraire, le niveau de congestion est plus élevé lorsque les usagers sont hétérogènes.

Preuve de l'observation 8.

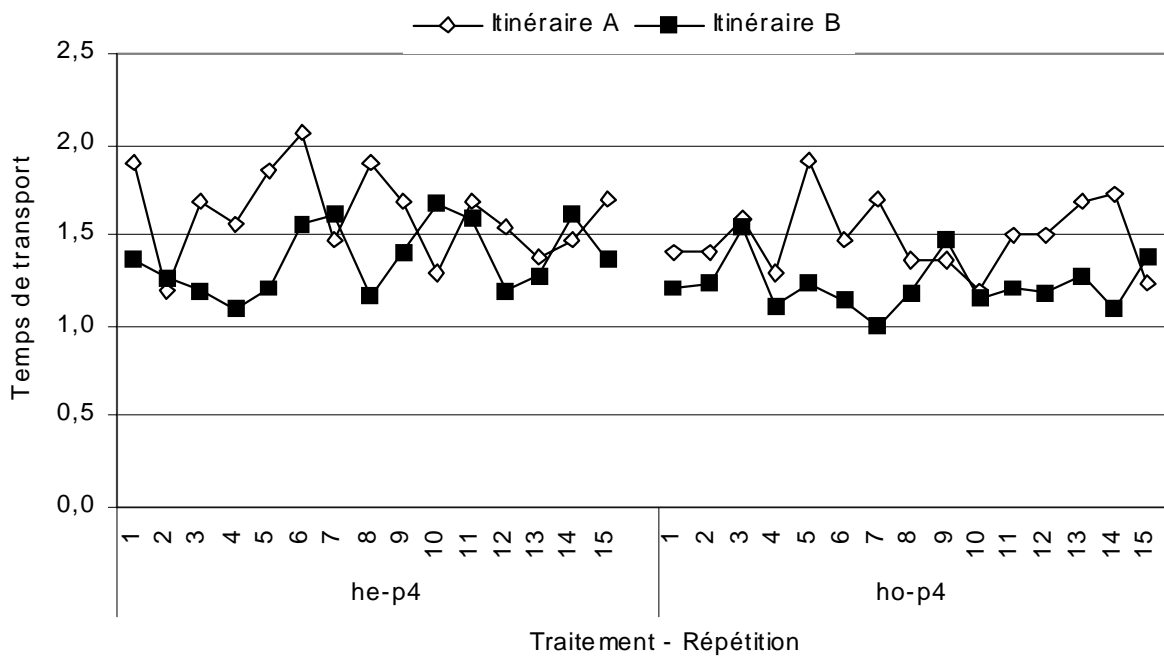
- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : La moyenne des TT est de 1,33 (écart type 0,57) et 1,47 (écart type 0,65) pour les traitements HO-P4 et HE-P4 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des TT de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que les TT sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population. Cette hypothèse est rejetée au taux d'erreur de 1%. Nous pouvons en conclure que, lorsque le coût du péage est de 4 et tout itinéraire confondu, les temps de transport des usagers hétérogènes sont plus élevés.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : La moyenne des TT est de 1,48 pour ces deux traitements tandis que les écart-types sont de 0,69 et 0,68 pour HO-P8 et HE-P8 respectivement. L'hypothèse nulle selon laquelle les TT sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que, lorsque le coût du péage est de 8 et tout itinéraire confondu, les temps de transport des usagers hétérogènes et homogènes sont identiques.

Pour affiner nos conclusions, nous calculons à nouveau les moyennes (et écart types) des TT mais en distinguant l'itinéraire retenu.

Les graphiques suivants (Graphiques 18 et 19) représentent l'évolution des temps de transport dans chaque traitement en fonction de l'itinéraire étudié.



Graphique 18: Evolution des Temps de Transport moyen (HE-P8 et HO-P8)



Graphique 19: Evolution des Temps de Transport moyen (HE-P4 et HO-P4)

Observation 9. Sur l'itinéraire payant, lorsque le coût du péage est faible, le niveau de congestion est plus élevé lorsque les usagers sont hétérogènes.

Observation 10. Sur chaque itinéraire, lorsque le coût du péage est élevé, le niveau de congestion est équivalent entre les usagers homogènes et hétérogènes.

Preuve de l'observation 9.

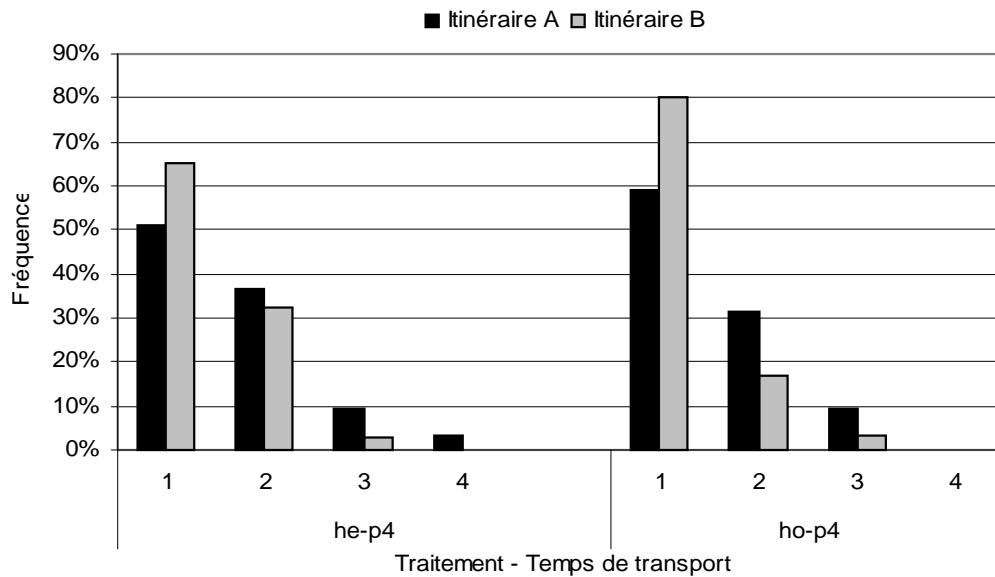
L'analyse de l'itinéraire B nous indique que la moyenne (l'écart type) des TT est de 1,23 (0,49) pour HO-P4 et de 1,38 (0,54) pour HE-P4. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé considérant l'hypothèse nulle que les TT sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population. Cette hypothèse est rejetée au taux d'erreur de 10%. Concernant l'itinéraire B, nous pouvons en conclure que, lorsque le coût de péage est de 4, les usagers hétérogènes subissent un temps de transport moyen supérieur à celui subi par les usagers homogènes.

Preuve de l'observation 10.

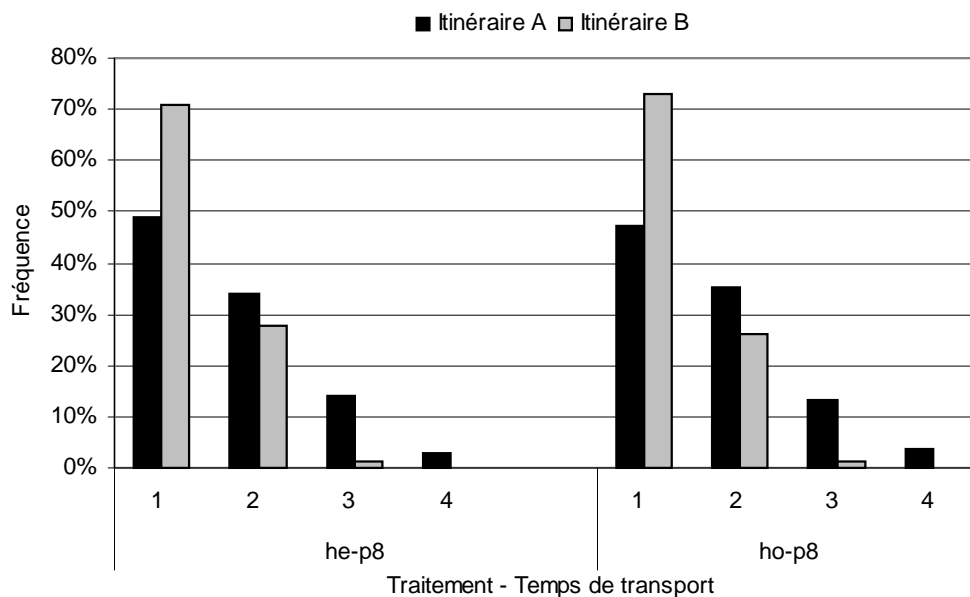
L'analyse de l'itinéraire A, nous indique que la moyenne (l'écart type) des TT est de 1,74 (0,83) pour HO-P8 et de 1,71 (0,82) pour HE-P8. Concernant l'itinéraire B, la moyenne (l'écart type) des TT est de 1,28 (0,48) pour HO-P8 et de 1,30 (0,48) pour HE-P8. Pour chaque itinéraire, un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé considérant l'hypothèse nulle que les TT sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population. Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Concernant les deux itinéraires, nous pouvons en conclure que, lorsque le coût de péage est de 8, les usagers homogènes et hétérogènes subissent un temps de transport moyen équivalent.

Nous poursuivons l'analyse des temps de transport mais en nous intéressant à leur distribution au cours de l'expérience. Les données étudiées regroupent les différents temps de transport sur l'ensemble des 15 répétitions du jeu et dans chaque traitement (HO-P4 et HE-P4, puis HO-P8 et HE-P8). Nous analysons dans un premier temps ces distributions tout itinéraire confondu puis chaque itinéraire pris séparément.

Les graphiques 20 et 21 présentent les distributions des TT dans chaque traitement tout itinéraire confondu.



Graphique 20 : Distribution des Temps de Transport (HE-P4 et HO-P4)



Graphique 21 : Distribution des Temps de Transport (HE-P8 et HO-P8)

Ces graphiques mettent en relation les distributions des TT dans chaque traitement sur l'ensemble des 15 répétitions.

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : pour chacun de ces deux traitements, nous observons une distribution avec un mode à 1. Pour le traitement HO-P4,

73% des temps de transport sont égaux à 1, ce qui signifie que 73% des usagers homogènes n'ont pas subi de congestion. Pour le traitement HE-P4, cette proportion n'est que de 60%. En d'autres termes, 60% des usagers hétérogènes n'ont pas subi de congestion.

- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : pour chacun de ces deux traitements, le mode de la distribution est aussi égal à 1. Dans les deux traitements, 62% des usagers n'ont pas subi de congestion.

Observation 11. Sans distinction d'itinéraire et lorsque le coût du péage est faible, la congestion est plus dispersée lorsque les usagers sont hétérogènes.

Observation 12. Sans distinction d'itinéraire et lorsque le coût du péage est élevé, la dispersion de la congestion est équivalente entre les usagers homogènes et hétérogènes.

Preuve de l'observation 11.

Afin de savoir si l'un des deux traitements HO-P4 et HE-P4 favorise la dispersion de la congestion, nous appliquons sur les données un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov. L'hypothèse nulle testée considère que les temps de transport sont identiquement distribués entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 1%, nous rejetons l'hypothèse nulle et nous concluons que les temps de transport ne sont pas identiquement distribués entre les traitements HO-P4 et HE-P4 : ils sont plus proches du mode dans le traitement HO-P4.

Preuve de l'observation 12.

Afin de savoir si l'un des deux traitements HO-P8 et HE-P8 favorise la dispersion de la congestion, nous appliquons sur les données un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov. L'hypothèse nulle testée considère que les temps de transport sont identiquement distribués entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 10%, nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que les temps de transport sont identiquement distribués entre les traitements HO-P8 et HE-P8.

Nous effectuons à présent un raffinement de l'étude du niveau de congestion en discriminant selon l'itinéraire. Nous considérons la distribution des TT dans chaque traitement et chaque itinéraire.

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : sur l'itinéraire A, la valeur modale est de 1 quel que soit le traitement considéré. Cette absence de congestion concerne 59% (resp. 51%) des usagers dans le traitement HO-P4 (resp. HE-P4). Sur l'itinéraire B, les deux traitements ont également un mode à 1 avec des proportions de 80% dans le cas hétérogène et 65% dans le cas homogène.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : sur l'itinéraire A, la valeur modale est également de 1 quel que soit le traitement considéré, avec des proportions respectives de 47% et 49%. Sur l'itinéraire B, le mode reste le même, avec des proportions de 73% dans le cas hétérogène et 71% dans le cas homogène.

Observation 13. Sur l'itinéraire payant et lorsque le coût du péage est faible, la congestion est plus dispersée lorsque les usagers sont hétérogènes.

Observation 14. Sur chaque itinéraire et lorsque le coût du péage est élevé, la dispersion de la congestion est équivalente entre les usagers homogènes et hétérogènes.

Preuve de l'observation 13.

Afin de savoir si l'hétérogénéité de la population favorise l'apparition d'un niveau de congestion plus élevé ou plus faible, nous procédons à un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov sur les données relatives à l'itinéraire B. L'hypothèse nulle testée considère que les temps de transport sont identiquement distribués entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 1%, nous rejetons l'hypothèse nulle et nous concluons que les temps de transport ne sont pas identiquement distribués entre les traitements HO-P4 et HE-P4 : ils sont plus proches de 1 dans le traitement HO-P4.

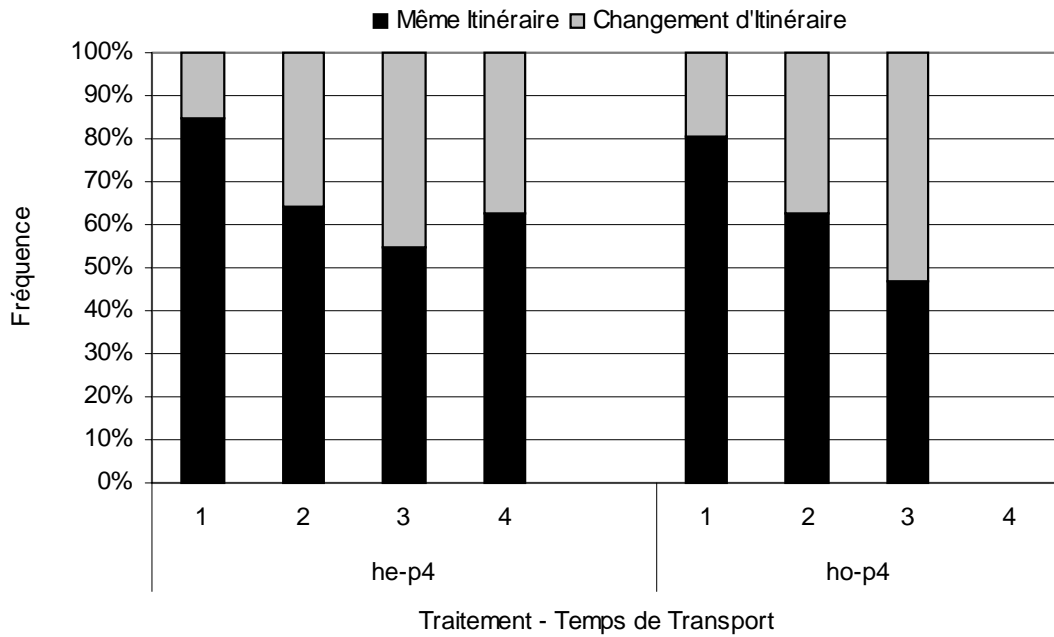
Preuve de l'observation 14.

Concernant les traitements HO-P8 et HE-P8 et sur chaque itinéraire, nous procédons aux mêmes calculs et tests que dans la preuve 13. Le test bilatéral de Kolmogorov Smirnov suivant l'hypothèse nulle que les temps de transport sont identiquement distribués entre les deux traitements ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous concluons que les temps de transport sont identiquement distribués entre les deux traitements sur chaque itinéraire.

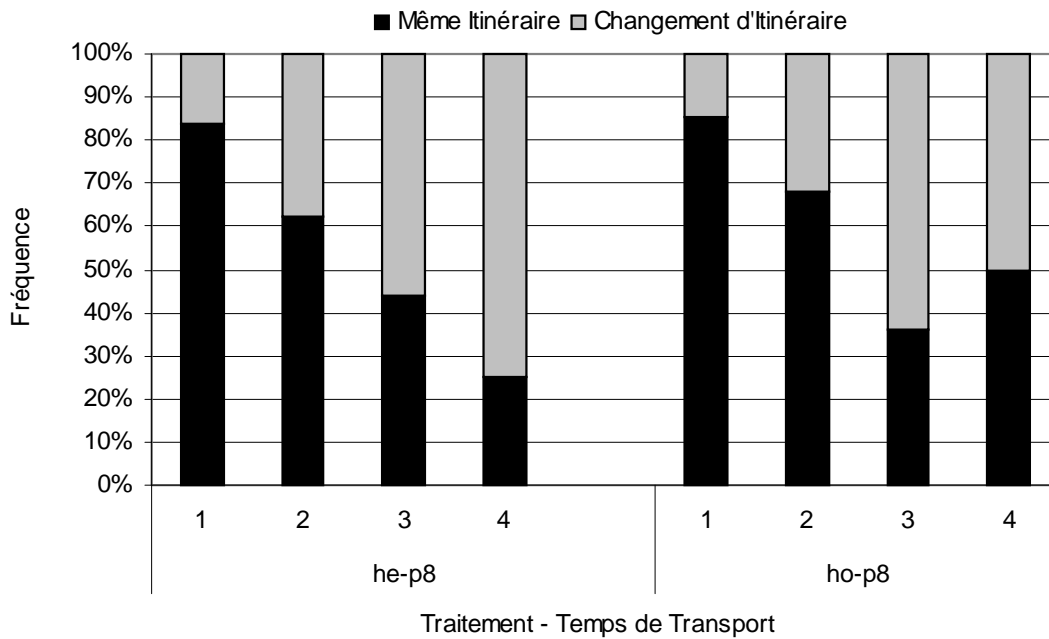
Compte tenu des conclusions établies sur le temps de transport, nous procédons à présent à l'étude des conséquences du temps de transport sur le changement de décision des usagers. Nous analysons successivement le changement d'itinéraire et le changement d'heure de départ.

Considérons dans un premier temps les changements d'itinéraire. Pour des niveaux de congestion allant de 1 à 3 (i.e. des TT allant de 1 à 3), nous analysons les changements d'itinéraire décidés par les usagers entre deux répétitions de l'expérience. Conformément aux analyses effectuées dans la section 2 du ch. 2, pour une répétition du jeu, nous relevons l'itinéraire choisi et le temps de transport calculé, puis nous observons le choix d'itinéraire de l'utilisateur à la répétition suivante. De plus, nous comparons dans chaque traitement (HO-P4 et HE-P4, puis HO-P8 puis HE-P8), la proportion d'utilisateurs qui ont choisi de rester sur le même itinéraire et les utilisateurs qui ont changé d'itinéraire.

Les graphiques 22 et 23 présentent dans chaque traitement et pour chaque temps de transport, la répartition des décisions de changement d'itinéraire des utilisateurs.



Graphique 22 : Répartition des changements d'itinéraire (HE-P4 et HO-P4)



Graphique 23 Répartition des changements d'itinéraire (HE-P8 et HO-P8)

La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : les usagers des deux traitements ont choisi majoritairement de rester sur le même itinéraire. Pour HO-P4, cette décision

représente 80,66% des cas (avec 20,58% pour AA et 60,08% pour BB) et 84,9% des cas dans le traitement HE-P4 (avec 24,75% pour AA et 60,15% pour BB).

- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : les usagers des deux traitements ont également choisi majoritairement de rester sur le même itinéraire. Pour HO-P8, cette décision représente 85,47% des cas (avec 28,33% pour AA et 57,14% pour BB) et 83,81% des cas dans le traitement HE-P8 (avec 26,57% pour AA et 57,25% pour BB).

Observation 15. Dans une situation sans congestion et quel que soit le niveau du péage, les usagers hétérogènes changent d'itinéraire dans les mêmes proportions que les usagers homogènes.

Preuve de l'observation 15.

Afin de savoir si l'hétérogénéité des usagers influence le changement d'itinéraire, nous comparons les décisions de changement d'itinéraire des usagers entre les traitements HO-P4 et HE-P4, puis entre les traitements HO-P8 et HE-P8 en ne retenant que les observations justifiant d'un temps de transport de 1. Nous soumettons ces données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle testée est qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement d'itinéraire. Nous comparons donc le nombre données de type de « même itinéraire » au nombre de données de type « changement d'itinéraire », dans chacun des quatre traitements lorsque le temps de transport est égal à 1. Au taux d'erreur de 10% nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle. Nous concluons que, lorsque le temps de transport est de 1, les usagers homogènes et hétérogènes ont des proportions identiques de changement d'itinéraire.

Nous reprenons l'analyse précédente mais en considérant les changements d'itinéraire lorsque le temps de transport est égal à 2 puis à 3.

Lorsque le temps de transport est égal à 2 :

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : les usagers des deux traitements ont choisi majoritairement de rester sur le même itinéraire. Pour HO-P4, cette décision représente 62,5% des cas (avec 28,29% pour AA et 34,21% pour BB) et

64,31% des cas dans le traitement HE-P4 (avec 19,82% pour AA et 44,49% pour BB).

- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : les usagers des deux traitements ont encore une fois choisi majoritairement de rester sur le même itinéraire. Pour HO-P8, cette décision représente 68,7% des cas (avec 37% pour AA et 31% pour BB) et 62,14% des cas dans le traitement HE-P8 (avec 29,13% pour AA et 33% pour BB).

Lorsque le temps de transport est égal à 3 :

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : les usagers homogènes ont choisi majoritairement de changer d'itinéraire après avoir subi une telle congestion. Pour HO-P4, cette décision représente 52,94% des cas (avec 32,35% pour AA et 14,7% pour BB). Les usagers hétérogènes sont restés en majorité sur le même itinéraire. Cette décision représente 54,54% des cas dans le traitement HE-P4 (avec 21,21% pour AA et 33,33% pour BB).
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : les usagers des deux traitements ont décidé de changer d'itinéraire. Pour HO-P8, cette décision représente 63,83% des cas (avec 29,79% pour AA et 6,38% pour BB) et 56,25% des cas dans le traitement HE-P8 (avec 41,67% pour AA et 2,1% pour BB).

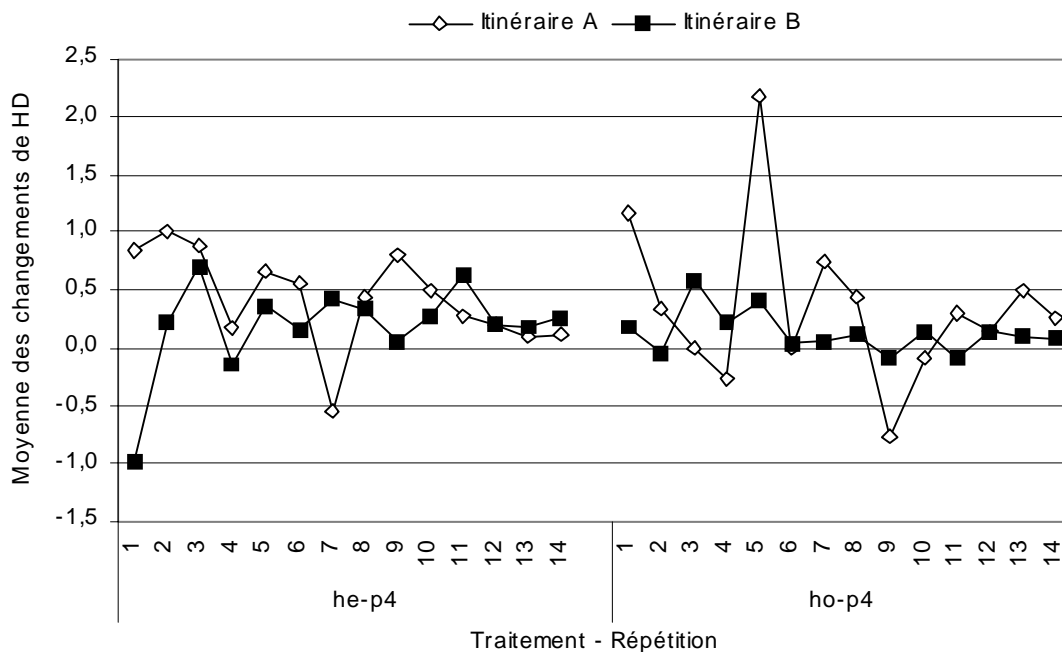
Observation 16. Dans une situation de faible ou moyenne congestion et quel que soit le niveau du péage, les usagers hétérogènes changent d'itinéraire dans les mêmes proportions que les usagers homogènes.

Preuve de l'observation 16.

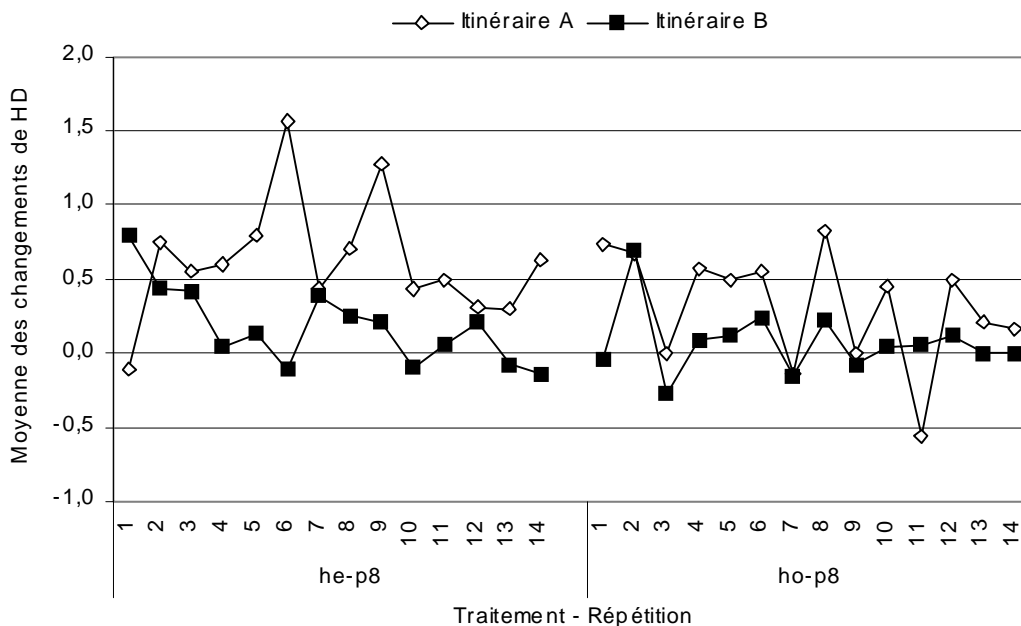
Comme présenté dans la preuve 15, nous appliquons sur ces données un test du χ^2 suivant l'hypothèse nulle qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement d'itinéraires entre les traitements lorsque le temps de transport est égal à 2. Au taux d'erreur de 10% nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, lorsque le temps de transport est de 2 ou 3, les décisions de changement d'itinéraire ont la même répartition entre les traitements homogènes et hétérogènes, quel que soit le niveau du péage.

Considérons à présent l'influence du temps de transport sur les changements d'heure de départ pour des niveaux de congestion de 1 et de 2 (i.e. $TT = 1$ ou 2). Pour chacun de ces temps de transport, nous étudions les variations des heures de départ des usagers entre deux répétitions du jeu. Comme nous l'avons fait dans la section 2 du chapitre 2, pour une répétition du jeu, nous relevons l'heure de départ choisi et le temps de transport calculé, puis nous soustrayons l'heure de départ choisi par l'utilisateur à la répétition suivante. Nous obtenons ainsi l'« écart d'heure de départ ». Pour chaque temps de transport, nous calculons les moyennes de ces écarts sur chaque itinéraire. Les résultats qui suivent sont présentés par ordre croissant de temps de transport et tout itinéraire confondu, sauf lorsque les tests statistiques ont révélé une différence entre l'itinéraire A et l'itinéraire B.

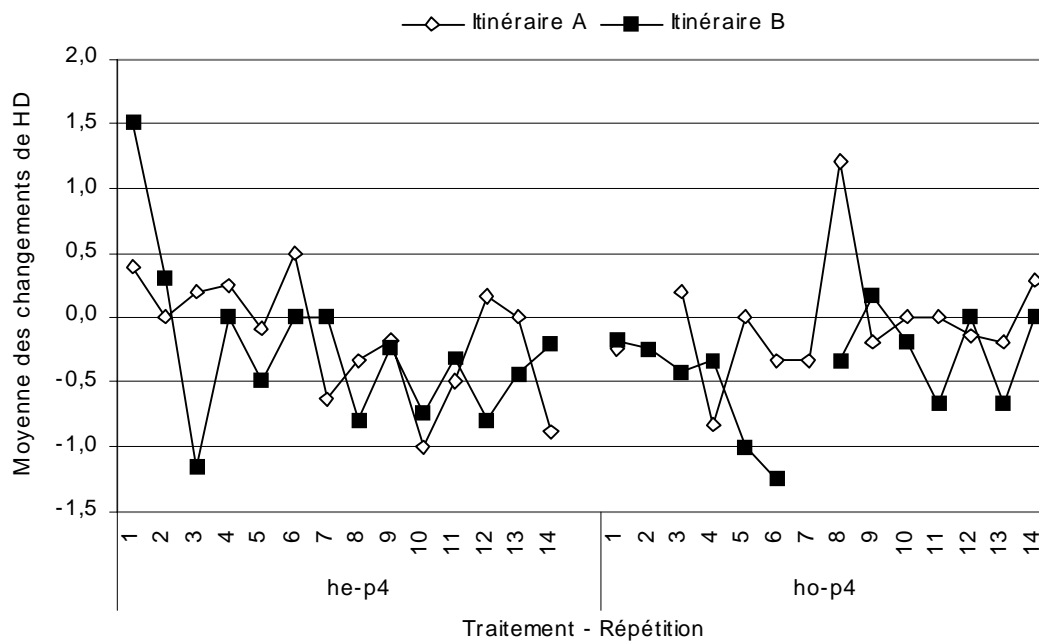
Les graphiques 24 à 27 présentent pour les temps de transport de 1 et de 2, la moyenne des écarts des heures de départ sur chaque itinéraire et dans chaque traitement.



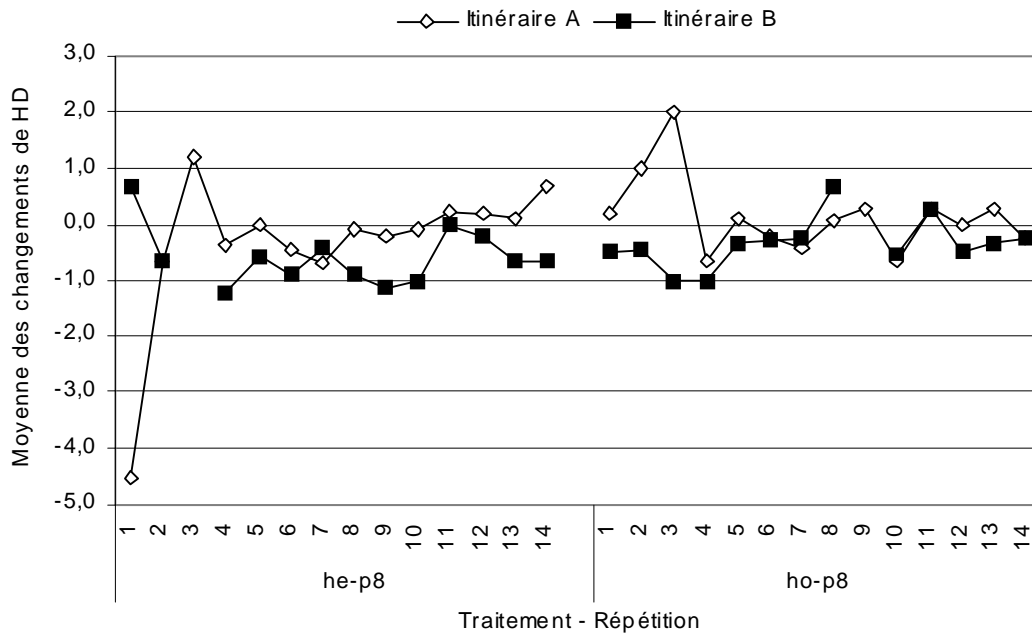
Graphique 24 : Evolution des écarts moyens des changements HD (HE-P4 et HO-P4), $TT=1$



Graphique 25 : Evolution des écarts moyens des changements HD (HE-P8 et HO-P8), TT=1



Graphique 26 : Evolution des écarts moyens des changements HD (HE-P4 et HO-P4), TT=2



Graphique 27 : Evolution des écarts moyens des changements HD (HE-P8 et HO-P8), TT=2

Observation 17. Sans distinction d'itinéraire, dans une situation de congestion moyenne ou nulle, et lorsque le niveau du péage est élevé, les usagers hétérogènes modifient plus fortement leurs heures de départ que les usagers homogènes.

Preuve de l'observation 17.

Dans les cas d'un niveau de congestion de 1 et 2, les moyennes (et les écarts-type) des écarts des changements des heures de départ sont réalisés pour chaque groupe et dans chaque traitement. Dans le cas d'un temps de transport de 1, la moyenne des écarts des changements des HD s'établit à 0,15 (écart type 1,14) et 0,31 (écart type 1,20) pour les traitements HO-P8 et HE-P8 respectivement. Dans le cas d'un temps de transport de 2, la moyenne des écarts des changements des HD s'établit à -0,14 (écart type 1,08) et -0,42 (écart type 1,36) pour les traitements HO-P8 et HE-P8 respectivement. Pour chacun des deux temps de transport, un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population. Cette hypothèse est rejetée au taux d'erreur de 5%. Nous pouvons en conclure que tout itinéraire confondu,

pour un temps de transport de 1 ou 2, les usagers hétérogènes modifient plus fortement leurs heures de départ que les usagers homogènes.

Observation 18.

Sur chaque itinéraire, quels que soient les niveaux de péage et de congestion, les usagers homogènes et hétérogènes modifient leurs heures de départ de la même façon.

Preuve de l'observation 18.

Nous considérons les observations concernant chaque itinéraire. Comme dans le cas de l'observation 17, nous calculons les moyennes (et les écarts-type) des écarts de changements d'heures de départ pour chaque niveau de congestion et itinéraire. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population. Nous ne pouvons rejeter cette hypothèse avec un taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que les usagers homogènes et hétérogènes modifient leurs heures de départ de la même façon, sur chaque itinéraire et quels que soient les niveaux de péage et de congestion

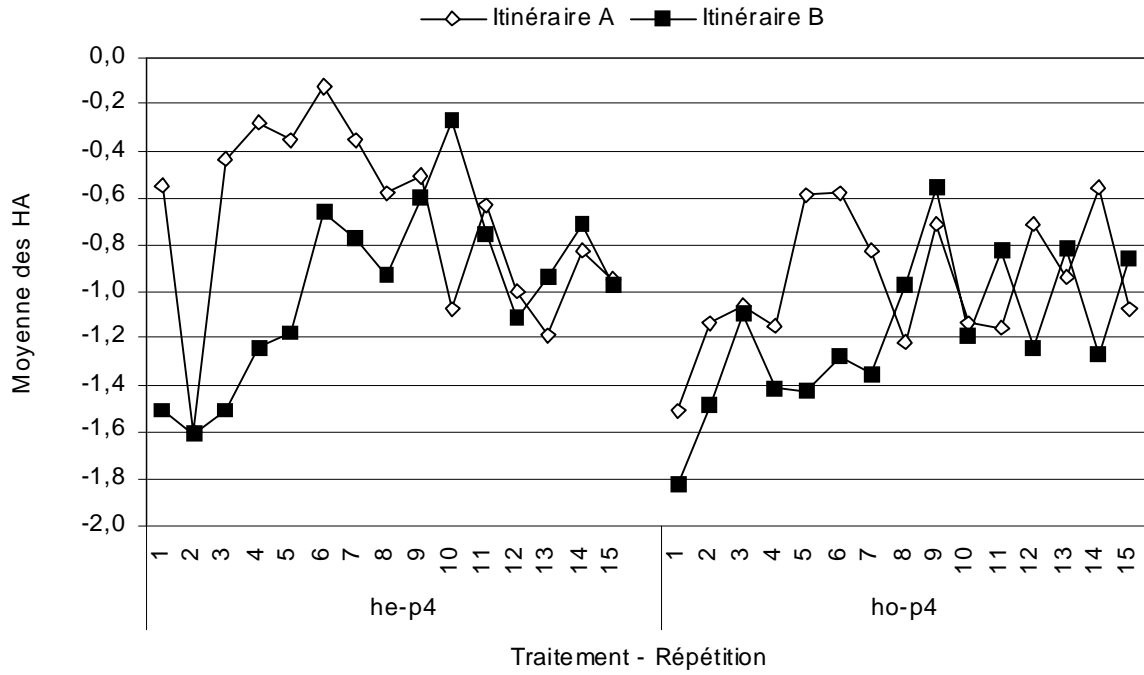
Les tests statistiques nous permettent de conclure que le niveau de congestion (i.e. du temps de transport) est, sous certaines conditions, un élément explicatif du changement de décision des usagers entre deux répétitions de l'expérience. Au cours de l'expérience, nous devons tout de même noter que les sujets ont réussi à se coordonner de manière relativement efficace pour éviter de subir une congestion importante.

Nous analysons maintenant les heures d'arrivée des usagers, ce qui va nous permettre de comprendre l'influence de l'heure d'arrivée (plus précisément, de la ponctualité) sur les décisions des usagers en termes de choix d'heure de départ et d'itinéraire.

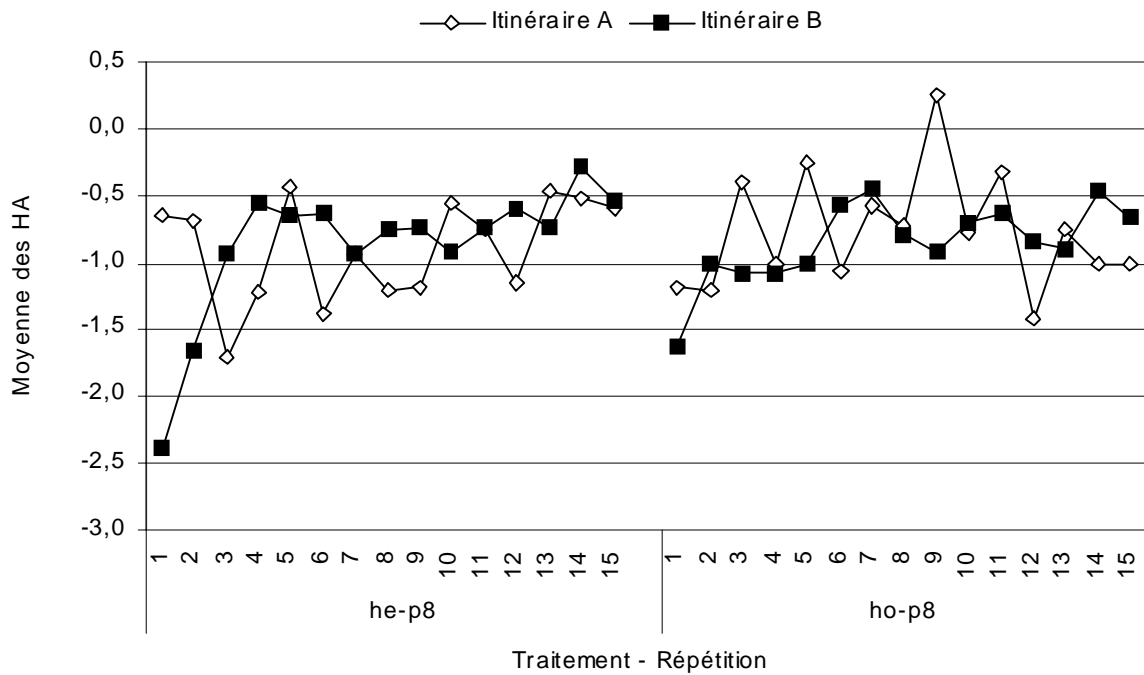
4°) Le rôle de l'heure d'arrivée sur le processus de décision.

L'analyse qui suit présente successivement l'évolution et la distribution des HA au cours de l'expérience dans un premier temps, puis l'impact de HA sur les changements de HD et d'itinéraire entre deux répétitions de l'expérience. Notons enfin que nous avons regroupé les valeurs de HA dans trois ensembles de valeur. Ainsi lorsque les usagers sont arrivés strictement avant l'heure objectif, nous avons regroupé les décisions de ces sujets sous la dénomination « Av » (« Av » pour « Avance » par rapport à l'heure objectif). Lorsqu'ils sont arrivés exactement à l'heure objectif nous avons codé leur décision par « Ho » (« Ho » pour « Heure Objectif ») et enfin, lorsqu'ils sont arrivés après l'heure objectif, nous avons codé leurs décisions par « Ret » (« Ret » pour « Retard » par rapport à l'heure objectif).

Nous analysons tout d'abord les heures d'arrivée moyennes dans chaque traitement (HO-P4 et HE-P4, puis HO-P8 et HE-P8) sur l'ensemble des 15 répétitions de l'expérience. Les moyennes (écarts-type) des heures d'arrivée ont été calculés pour chacun des 6 groupes et dans chaque traitement. Les graphiques 28 et 29 présentent l'évolution des moyennes des heures d'arrivée à chaque répétition pour chacun des deux traitements et sur chaque itinéraire.



Graphique 28 : Evolution des moyennes des Heures d'arrivée (HE-P4 et HO-P4)



Graphique 29 : Evolution des moyennes des Heures d'arrivée (HE-P8 et HO-P8)

Observation 19. Sur chaque itinéraire et quel que soit le niveau du péage, les usagers homogènes et hétérogènes ont en moyenne les mêmes heures d'arrivée.

Preuve de l'observation 19.

Pour chaque couple de traitements (HO-P4 et HE-P4, puis HO-P8 et HE-P8) et pour chaque itinéraire, un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des HA de chaque groupe d'utilisateurs considérant l'hypothèse nulle que les HA sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population. Cette hypothèse ne peut être rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que la moyenne des heures d'arrivée des usagers homogènes et hétérogènes, sur chaque itinéraire, est la même.

Nous poursuivons l'analyse des heures d'arrivée mais en nous intéressant à leur distribution au cours de l'expérience. Les données présentées regroupent les différentes heures d'arrivée sur l'ensemble des 15 répétitions du jeu et dans chaque traitement.

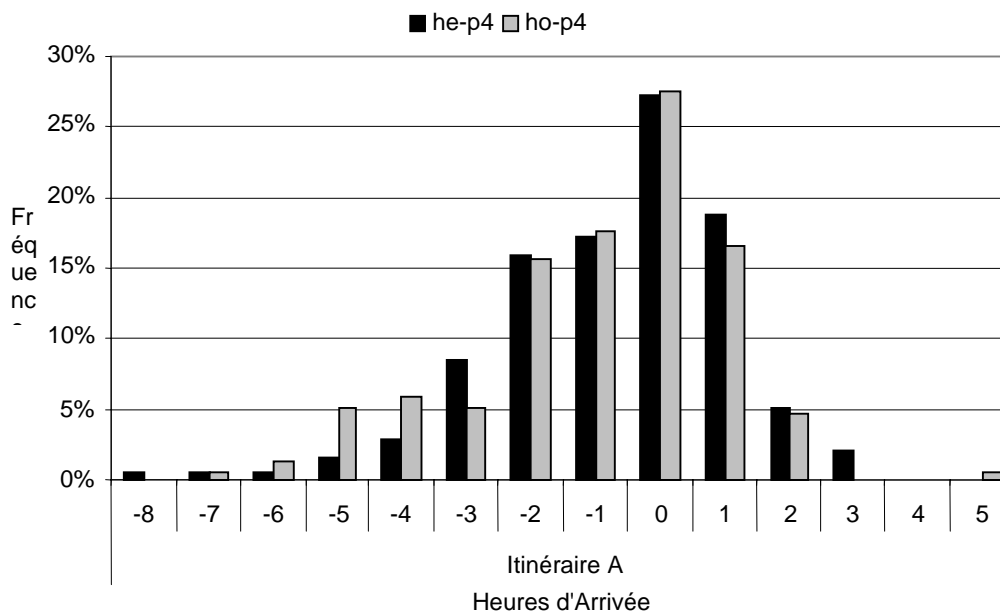
- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : pour chacun des deux traitements, nous observons une distribution avec un mode à 0 (i.e. l'heure objectif). Pour le traitement HO-P4, 27,1% des heures d'arrivée sont égaux à 0 c'est à dire à l'heure objectif, les « avances » représentent 59,2% des heures d'arrivée et les « retard » 13,7% des cas. Pour le traitement HE-P4, la part des arrivées à l'heure objectif représentent 31,5% des cas, les « avances » représentent 52,9% des heures d'arrivée et les « retard » 15,6% des observations.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : pour chacun des deux traitements, nous observons également une distribution avec un mode à 0 (i.e. l'heure objectif). Pour le traitement HO-P8, 31,3% des heures d'arrivée sont égaux à 0 c'est à dire à l'heure objectif, les « avances » représentent 52,1% des heures d'arrivée et les « retard » 16,7% des cas. Pour le traitement HE-P8, la part des arrivées à l'heure objectif représentent 29,9% des cas, les « avances » représentent 53,9% des heures d'arrivée et les « retard » 16,3% des observations.

Observation 20. Sans distinction d'itinéraire et lorsque le péage est faible, les heures d'arrivée des usagers homogènes sont plus concentrées autour du mode que celles des usagers hétérogènes.

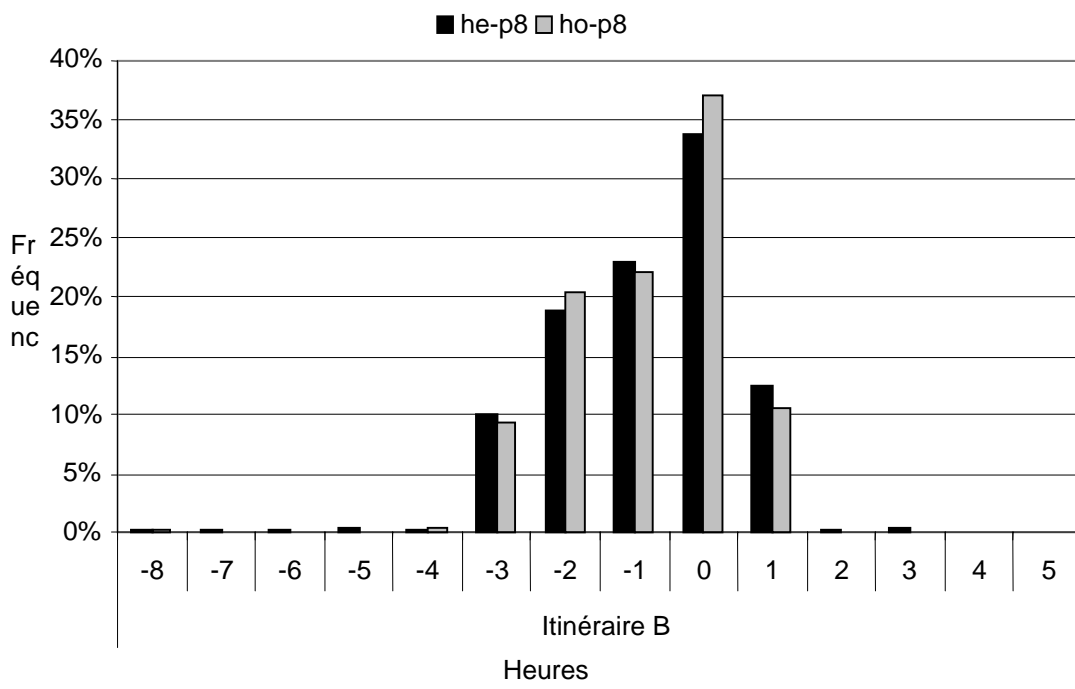
Preuve de l'observation 20.

Afin de savoir si les distributions des heures d'arrivée sont les mêmes pour les deux traitements HO-P4 et HE-P4, nous appliquons sur les données un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov. L'hypothèse nulle testée considère que les heures d'arrivée sont identiquement distribuées entre les deux traitements. Avec un taux d'erreur de 10%, nous rejetons l'hypothèse nulle et nous concluons que les heures d'arrivée ne sont pas identiquement distribuées entre les traitements HO-P4 et HE-P4 : elles sont plus regroupées autour du mode (« 0 ») dans le traitement HO-P4.

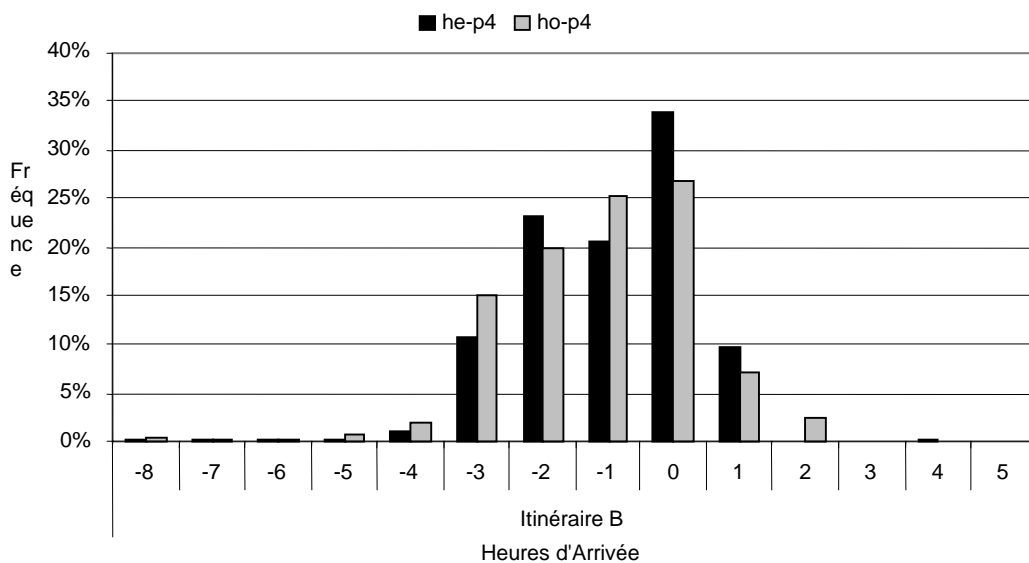
Nous pratiquons à présent un raffinement de l'étude itinéraire par itinéraire. Pour ce faire, nous considérons, pour chaque itinéraire, la distribution des heures d'arrivée dans chaque traitement. Les graphiques 30 à 33 présentent les distributions des HA dans chaque traitement, pour l'itinéraire A et l'itinéraire B respectivement.



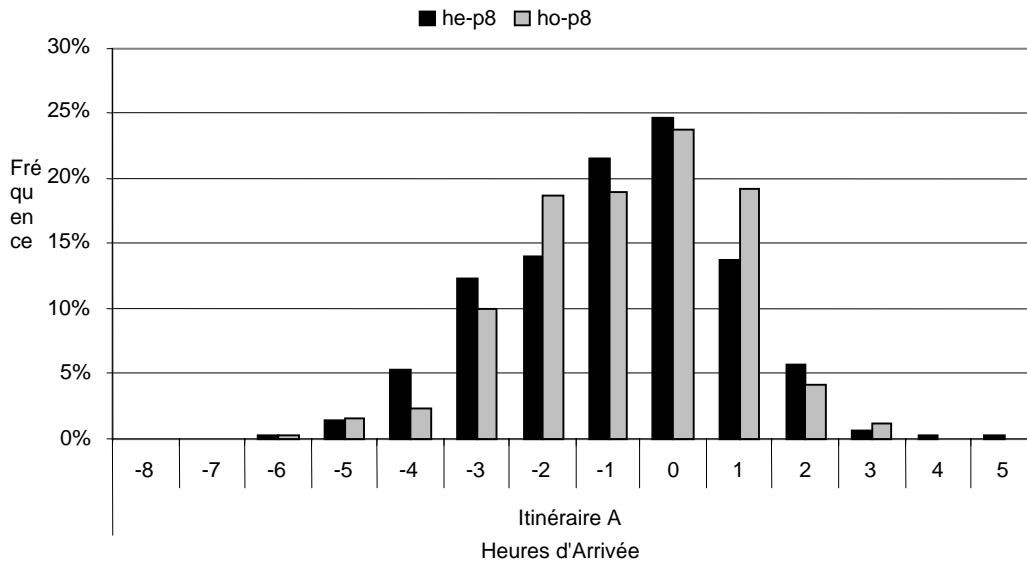
Graphique 30 : Distribution des HA – itinéraire A (HE-P4 et HO-P4)



Graphique 31 : Distribution des HA - itinéraire B (HE-P8 et HO-P8)



Graphique 32 : Distribution des HA - itinéraire B (HE-P4 et HO-P4)



Graphique 33 : Distribution des HA - itinéraire A (HE-P8 et HO-P8)

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : sur l'itinéraire A, la valeur modale est à 0 (i.e. l'heure objectif) pour les deux traitements. Pour le traitement HO-P4, 27,5% des heures d'arrivée sont égaux à 0 c'est à dire à l'heure objectif, les « avances » représentent 51% des heures d'arrivée et les « retard » 21,5% des cas. Pour le traitement HE-P4, la part des arrivées à l'heure objectif représentent 27,2% des cas, les « avances » représentent 47% des heures d'arrivée et les « retard » 26% des observations.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : sur l'itinéraire A, la valeur modale est à 0 (i.e. l'heure objectif) pour les deux traitements. Pour le traitement HO-P8, 23,7% des heures d'arrivée sont égaux à 0 c'est à dire à l'heure objectif, les « avances » représentent 52% des heures d'arrivée et les « retard » 25% des cas. Pour le traitement HE-P8, la part des arrivées à l'heure objectif représentent 24,6% des cas, les « avances » représentent 55% des heures d'arrivée et les « retard » 21% des observations.

Observation 21. Sur l'itinéraire gratuit et quel que soit le niveau de péage, les heures d'arrivée des usagers homogènes et hétérogènes sont identiquement distribuées.

Preuve de l'observation 21.

Nous appliquons, sur les données de l'itinéraire A, un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov. L'hypothèse nulle testée considère que les heures d'arrivée sont identiquement distribuées entre les deux traitements HO-P4 et HE-P4, puis entre HO-P8 et HE-P8. Avec un taux d'erreur de 10%, nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que les heures d'arrivée sont identiquement distribuées entre les traitements HO-P4 et HE-P4.

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : sur l'itinéraire B, la valeur modale est à 0 (i.e. l'heure objectif) pour les deux traitements. Pour le traitement HO-P4, 26,9% des heures d'arrivée sont égaux à 0 c'est à dire à l'heure objectif, les « avances » représentent 64% des heures d'arrivée et les « retard » 9% des cas. Pour le traitement HE-P4, la part des arrivées à l'heure objectif représentent 33,9% des cas, les « avances » représentent 56% des heures d'arrivée et les « retard » 10% des observations.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : sur l'itinéraire B, la valeur modale est à 0 (i.e. l'heure objectif) pour les deux traitements. Pour le traitement HO-P8, 37% des heures d'arrivée sont égaux à 0 c'est à dire à l'heure objectif, les « avances » représentent 52% des heures d'arrivée et les « retard » 11% des cas. Pour le traitement HE-P8, la part des arrivées à l'heure objectif représentent 33,7% des cas, les « avances » représentent 53% des heures d'arrivée et les « retard » 13% des observations..

Observation 22. Sur l'itinéraire payant et lorsque le péage est faible, les heures d'arrivée des usagers homogènes sont plus concentrées autour du mode que celles des usagers hétérogènes.

Preuve de l'observation 22.

Nous appliquons, sur les données de l'itinéraire B, un test bilatéral de Kolmogorov Smirnov. L'hypothèse nulle testée considère que les heures d'arrivée sont

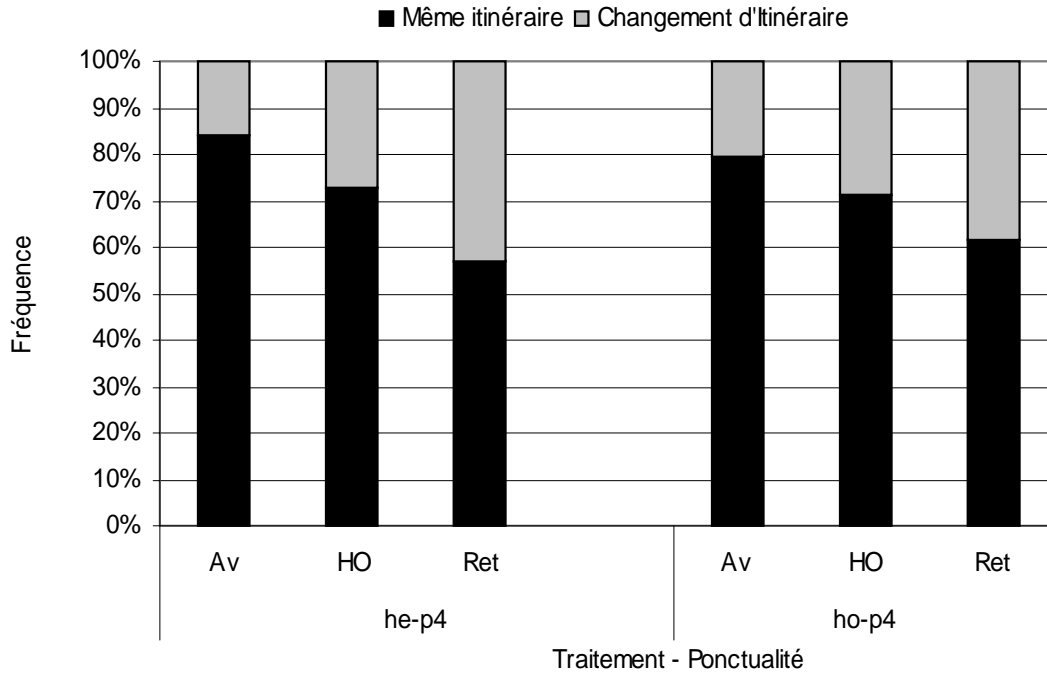
identiquement distribuées entre les deux traitements HO-P4 et HE-P4. Avec un taux d'erreur de 10%, nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que les heures d'arrivée sont plus concentrées dans le traitement HO-P4 que dans le traitement HE-P4.

Compte tenu de ces conclusions sur les heures d'arrivée, nous procédons à l'analyse des conséquences de l'heure d'arrivée sur le changement de décision des usagers. Nous analysons successivement le changement d'itinéraire et le changement d'heure de départ.

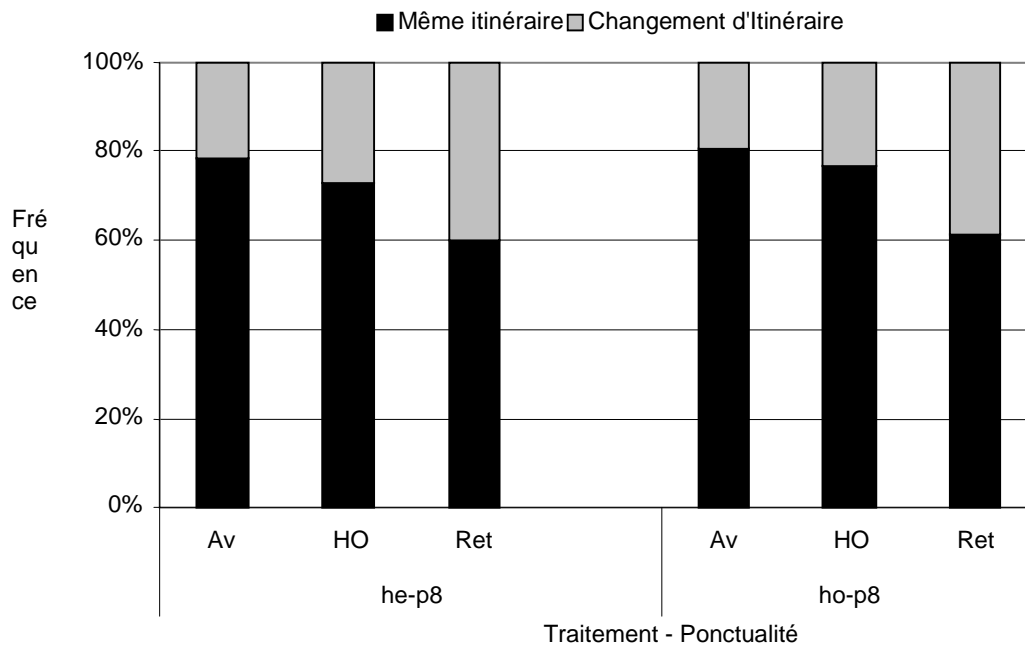
Conformément à la section 2 (ch. 2), afin de simplifier les analyses et sans perte de généralité, nous regroupons les heures d'arrivée selon la ponctualité (PONCTU par la suite) des usagers. Ainsi, lorsque l'heure d'arrivée est strictement inférieure à l'heure objectif (i.e. $HA < 0$) nous regroupons les données sous la dénomination « Av » (Avance), lorsque les heures d'arrivée sont égales à l'heure objectif ($HA = 0$) nous regroupons ces données sous « Ho » (Heure Objectif) et enfin, lorsque les heures d'arrivées sont supérieures à l'heure objectif, nous regroupons les données sous la dénomination « Ret » (Retard).

Considérons tout d'abord les changements d'itinéraire. Pour chaque valeur de la ponctualité des usagers {Av, Ho, Ret}, nous analysons les changements d'itinéraire décidés par les usagers entre deux répétitions de l'expérience.

Les graphiques 34 et 35 présentent dans chaque traitement et pour chaque type d'arrivée, la répartition des décisions de changement d'itinéraire des usagers.



Graphique 34 : Répartition des décisions de changement d'itinéraire (HE-P4 et HO-P4)



Graphique 35 : Répartition des décisions de changement d'itinéraire (HE-P8 et HO-P8)

Lorsque la ponctualité est de type « Av », les usagers des quatre traitements ont choisi majoritairement de rester sur le même itinéraire.

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : pour HO-P4 (401 observations), cette décision représente 79,6% des cas (avec 21,7% pour AA et 57,9% pour BB) et 84% des cas dans le traitement HE-P4 (357 observations, avec 23,5% pour AA et 60,5% pour BB).
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : pour HO-P8 (349 observations), cette décision représente 80,8% des cas (avec 32,4% pour AA et 48,4% pour BB) et 78,5% des cas dans le traitement HE-P8 (367 observations, avec 30,8% pour AA et 47,7% pour BB).

Observation 23. Lorsque les usagers arrivent en avance et quel que soit le niveau du péage, la caractéristique de la population n'influence pas la décision de changement d'itinéraire à la répétition suivante.

Preuve de l'observation 23.

Afin de savoir si la caractéristique de la population influence le changement d'itinéraire, nous comparons les décisions de changement d'itinéraire des usagers entre les traitements HO-P4 et HE-P4, puis entre HO-P8 et HE-P8 en ne retenant que les observations justifiant d'une ponctualité « Av ». Nous soumettons ces données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle testée est qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement d'itinéraires. Nous comparons donc le nombre de données de type de « même itinéraire » au nombre de « changement d'itinéraire » dans chacun des couples de traitements lorsque la ponctualité est de type « Av ». Au taux d'erreur de 10% nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, lorsque les usagers arrivent en avance, les proportions de changement d'itinéraire sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population.

Nous reprenons l'analyse précédente mais en ne considérant que les changements d'itinéraire lorsque les usagers arrivent à l'heure objectif (PONCTU = HO). Dans ce cas, les usagers des quatre traitements ont à nouveau choisi de rester majoritairement sur le même itinéraire, mais dans une moindre proportion.

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : pour HO-P4 (soit 178 observations), cette décision représente 71,3% des cas (avec 20,2% pour AA et 51,1% pour BB) et 72,8% des cas dans le traitement HE-P4 (206 observations), avec 21,8% pour AA et 51% pour BB.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : pour HO-P8 (soit 205 observations), cette décision représente 77,1% des cas (avec 25,9% pour AA et 51,2% pour BB) et 73,1% des cas dans le traitement HE-P8 (197 observations, avec 23,4% pour AA et 49,7% pour BB).

Observation 24. Lorsque les usagers arrivent à l'heure et quel que soit le niveau du péage, la caractéristique de la population n'influence pas la décision de changement d'itinéraire à la répétition suivante.

Preuve de l'observation 24.

Nous comparons les décisions de changement d'itinéraire des usagers entre les traitements HO-P4 et HE-P4, puis entre HO-P8 et HE-P8 en ne retenant que les observations justifiant d'une ponctualité « Ho ». Nous soumettons ces données à un test bilatéral du χ^2 . L'hypothèse nulle testée est qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement d'itinéraires. Au taux d'erreur de 10% nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, lorsque les usagers arrivent à l'heure objectif, les proportions de changement d'itinéraire sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population.

Enfin, nous considérons les cas de changements d'itinéraire lorsque les usagers arrivent en retard (PONCTU = Ret). Comme précédemment, les usagers des quatre traitements choisissent majoritairement de rester sur le même itinéraire mais dans une proportion nettement inférieure.

- La comparaison entre HO-P4 et HE-P4 : pour HO-P4 (soit 93 observations), cette décision représente 61,3% des cas (avec 28% pour AA et 33,3% pour BB) et 56,9% des cas dans le traitement HE-P4 (109 observations), avec 25,7% pour AA et 31,2% pour BB.
- La comparaison entre HO-P8 et HE-P8 : pour HO-P8 (soit 118 observations), cette décision représente 61% des cas (avec 38,1% pour AA et 22,9% pour BB) et 60,2% des cas dans le traitement HE-P8 (108 observations, avec 29,6% pour AA et 30,1% pour BB).

Observation 25.

Lorsque les usagers arrivent en retard et quel que soit le niveau de péage, la caractéristique de la population n'influence pas la décision de changement d'itinéraire à la répétition suivante.

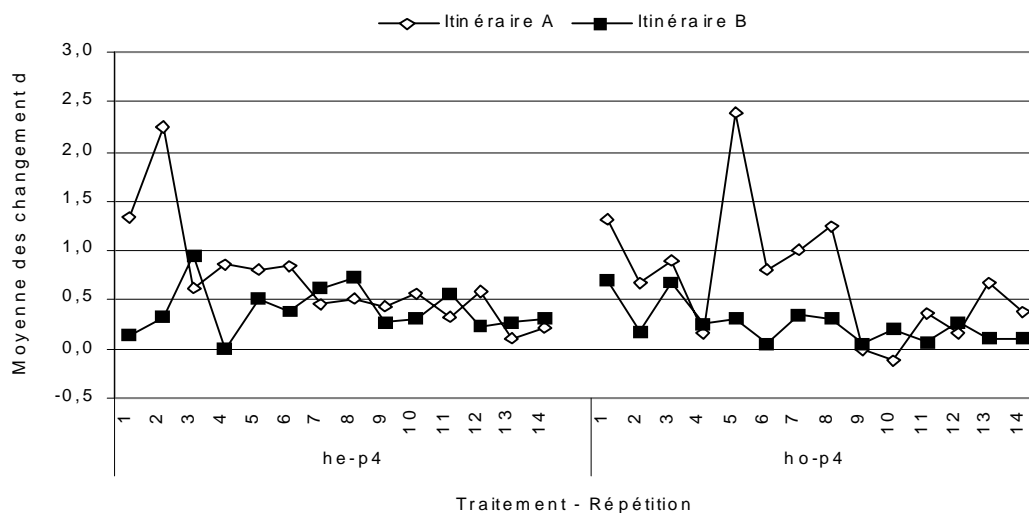
Preuve de l'observation 25.

Nous comparons les décisions de changement d'itinéraire des usagers entre les deux couples de traitements en ne retenant que les observations justifiant d'une ponctualité « Ret ». Nous soumettons ces données à un test bilatéral du χ^2 .

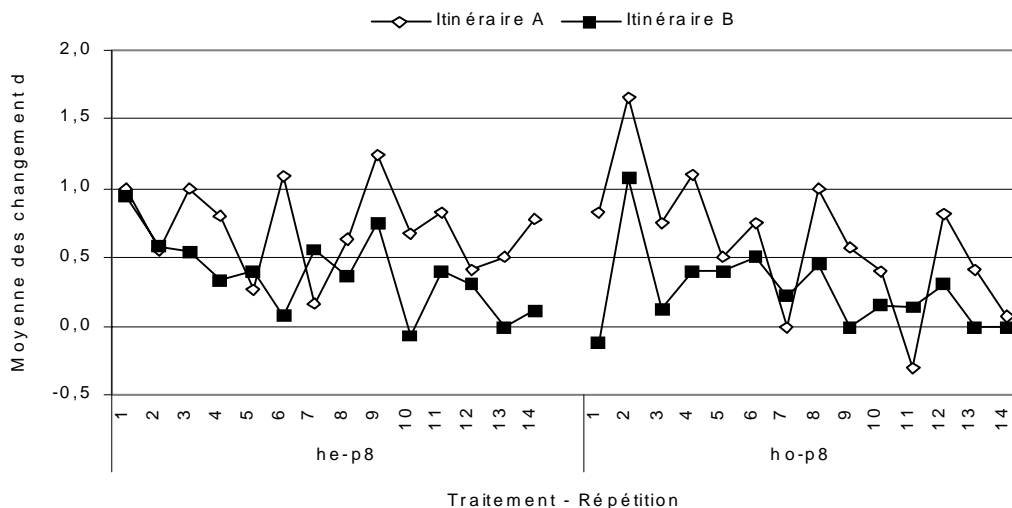
L'hypothèse nulle testée est qu'il existe une équivalence entre les proportions de changement d'itinéraires. Au taux d'erreur de 10% nous ne pouvons rejeter l'hypothèse nulle et nous concluons que, lorsque les usagers arrivent en retard, les proportions de changement d'itinéraire sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population.

Considérons à présent l'impact de la ponctualité sur les changements d'heure de départ. Pour chacune des ponctualités possibles (Av, Ho et Ret), nous étudions les variations des heures de départ des usagers entre deux répétitions du jeu. Les données présentées ont été recueillies de la façon suivante : pour une répétition du jeu, nous relevons l'heure de départ choisi et la ponctualité de l'utilisateur, puis nous soustrayons l'heure de départ choisi par l'utilisateur à la répétition suivante. Nous obtenons ainsi l'« écart d'heure de départ ». Pour chaque ponctualité, nous calculons les moyennes de ces écarts sur chaque itinéraire. Les résultats qui suivent sont présentés sans distinction, sauf lorsque les tests statistiques ont révélé une différence entre les itinéraires gratuit et payant.

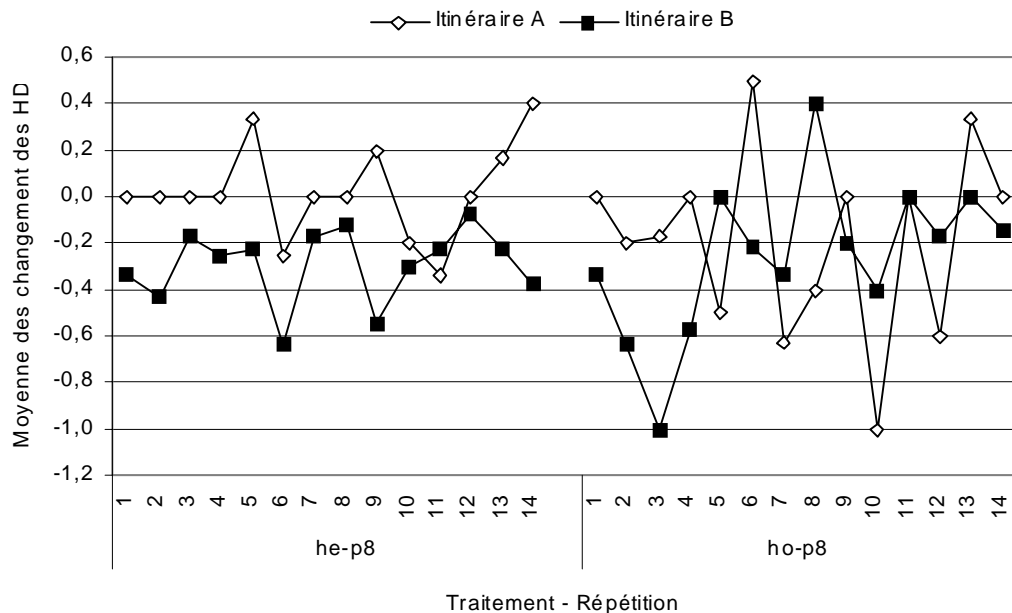
Les graphiques 36 à 41 présentent pour chaque ponctualité, la moyenne des écarts des heures de départ sur chaque itinéraire et dans chaque traitement.



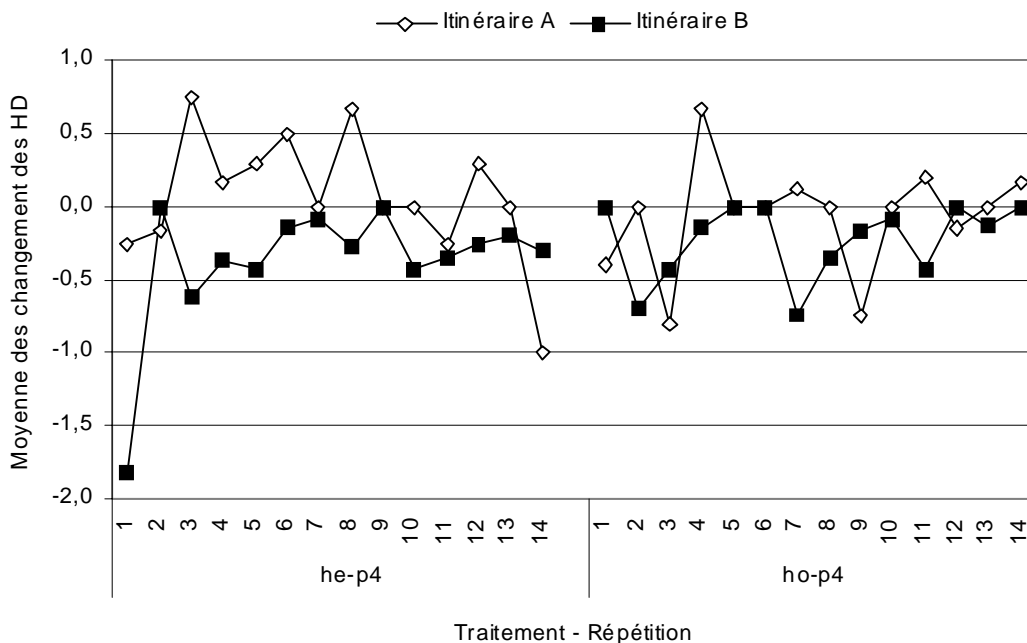
Graphique 36 : Evolution des écarts moyens des changements HD, PONCTU = Av (HE-P4 et HO-P4)



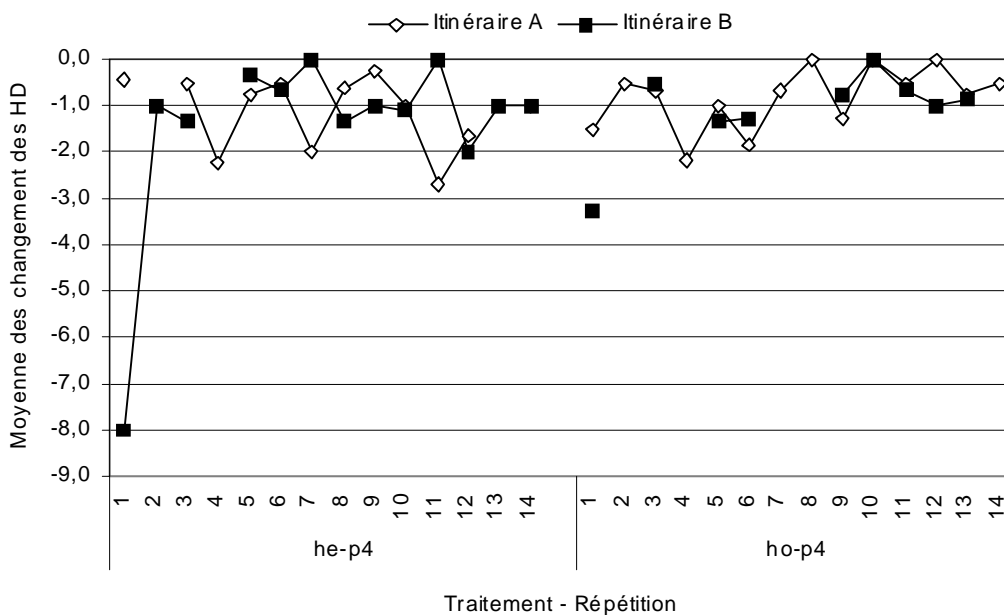
Graphique 37 : Evolution des écarts moyens des changements HD, PONCTU = Av (HE-P8 et HO-P8)



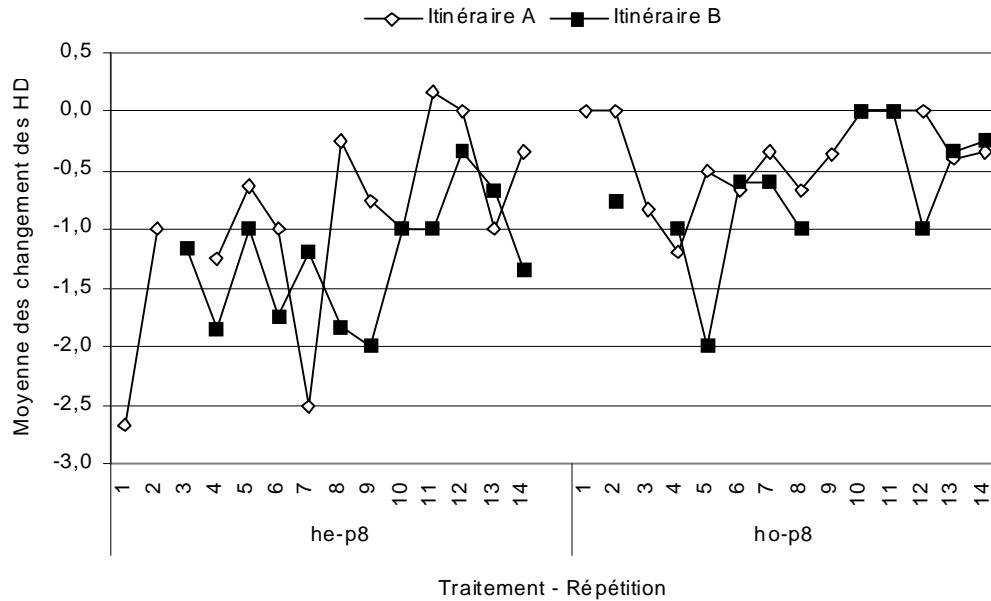
Graphique 38 : Evolution des écarts moyens des changements HD, PONCTU = Ho (HE-P8 et HO-P8)



Graphique 39 : Evolution des écarts moyens des changements HD, PONCTU = Ho (HE-P4 et HO-P4)



Graphique 40 : Evolution des écarts moyens des changements HD, PONCTU = Ret (HE-P4 et HO-P4)



Graphique 41 : Evolution des écarts moyens des changements HD, PONCTU = Ret (HE-P8 et HO-P8)

Observation 26. En cas d'arrivée en avance, sans distinction d'itinéraire et lorsque le coût de péage est élevé, les usagers hétérogènes partent, à la répétition suivante, plus tard que les usagers homogènes.

Preuve de l'observation 26.

Lorsque les usagers arrivent en avance, les moyennes (et les écarts-type) des écarts des changements des heures de départ sont réalisées pour chaque groupe et pour chaque couple de traitements. La moyenne des écarts des changements des HD s'établit à 0,40 (écart type 1,17) et 0,54 (écart type 1,17) pour les traitements HO-P8 et HE-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population. Cette hypothèse est rejetée au taux d'erreur de 10%. Par conséquent, en cas d'avance, tout itinéraire confondu et lorsque le niveau de péage est élevé, les usagers hétérogènes partent, à la répétition suivante, plus tard que les usagers homogènes.

Observation 27. En cas d'arrivée à l'heure objectif, sur l'itinéraire gratuit et lorsque le coût de péage est faible, les usagers hétérogènes partent, à la répétition suivante, plus tard que les usagers homogènes.

Preuve de l'observation 27.

Nous procédons aux mêmes calculs que précédemment mais en considérant les usagers qui arrivent à l'heure. La moyenne des écarts des changements des HD s'établit à $-0,19$ (écart type $0,79$) et $-0,20$ (écart type $0,82$) pour les traitements HO-P4 et HE-P4 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population. Cette hypothèse est rejetée au taux d'erreur de 10%. Nous pouvons en conclure que, sur l'itinéraire gratuit, lorsque les usagers arrivent à l'heure, les changements moyens d'heure de départ sont différents selon la caractéristique de la population.

Observation 28. En cas d'arrivée en retard, sur chaque itinéraire et lorsque le coût de péage est élevé, les usagers hétérogènes partent, à la répétition suivante, plus tôt que les usagers homogènes.

Preuve de l'observation 28.

Pour chaque itinéraire, nous procédons aux mêmes calculs que précédemment en considérant les usagers qui arrivent en retard. Sur l'itinéraire A, la moyenne des écarts des changements des HD s'établit à $-0,44$ (écart type $0,88$) et $-1,04$ (écart type $1,53$) pour les traitements HO-P8 et HE-P8 respectivement. Sur l'itinéraire B, la moyenne des écarts des changements des HD s'établit à $-0,58$ (écart type $0,95$) et $-1,37$ (écart type $1,39$) pour les traitements HO-P8 et HE-P8 respectivement. Un test bilatéral de Wilcoxon Mann Whitney est réalisé sur la moyenne des écarts des changements des HD de chaque groupe d'usagers considérant l'hypothèse nulle que ces écarts sont les mêmes quelle que soit la caractéristique de la population. Concernant l'itinéraire A, cette hypothèse peut être rejetée au taux d'erreur de 5%.

Concernant l'itinéraire B, cette hypothèse peut être rejetée au taux d'erreur de 1%. Nous concluons que sur chaque itinéraire, lorsque les usagers arrivent en retard, les usagers hétérogènes partent plus tôt que les usagers homogènes, à la répétition suivante.

Nous pouvons constater, grâce aux tests effectués dans cette section, que l'ampleur du changement d'heure de départ liée à la ponctualité est influencée de manière significative par la caractéristique de la population. En effet, les usagers hétérogènes ne modifient pas leurs décisions d'heure de départ (suite à une arrivée en avance ou en retard) de la même façon que les usagers homogènes. Cette distinction ne peut être faite lorsque nous considérons le changement d'itinéraire lié à la ponctualité. En effet, les tests effectués révèlent que la caractéristique de la population n'influence pas la décision de changement d'itinéraire.

Conclusion du chapitre 3

Dans ce chapitre, nous avons essayé dans un premier temps de mesurer en quoi l'information pouvait améliorer la coordination des décisions des joueurs et limiter l'importance de la congestion par rapport à une situation dans laquelle les individus ne disposent d'aucune forme d'information agrégée sur le comportement du groupe.

Il faut bien avouer que les résultats n'ont pas été conformes aux attentes : l'information n'a pas permis d'améliorer la coordination des décisions et la congestion n'a pas été diminuée. Sans doute est-ce dû à la nature de l'information fournie, une information sur le comportement agrégé du groupe dans le passé donnée à chaque individu avant de prendre sa décision pour la période courante. Cette information n'est pas susceptible de modifier profondément les comportements des joueurs si l'incitation à partir au même moment que les autres est suffisamment forte, ce qui est le cas dans les modèles structurels compte tenu de l'importance du coût de retard relativement aux autres coûts du temps. Dans une certaine mesure, ce résultat confirme certaines prédictions théoriques de la littérature (voir le bilan de la

littérature dans le chapitre 1), qui soutient que l'information n'est pas toujours efficace pour la collectivité et ne permet pas forcément de diminuer le coût social des pertes de temps dues à la congestion.

Dans un second temps, nous avons voulu savoir si une situation dans laquelle les usagers sont homogènes en termes de valeurs du temps pouvait se traduire par une meilleure coordination des décisions individuelles, ce dans le cas du choix d'un itinéraire puis dans le cas de deux itinéraires. Là encore, les prédictions théoriques n'ont pas été confirmées par les observations expérimentales : la coordination n'est pas meilleure dans le cas d'usagers expérimentaux hétérogènes, alors que les conclusions du modèle allaient dans le sens d'un plus grand étalement des départs et aboutissaient donc à une congestion de ou des infrastructures moins prononcée.

Conclusion générale

Au terme de cette recherche, il est utile de mettre en lumière ses faiblesses, ses forces et sa profonde originalité. L'objectif doit être rappelé, car il était ambitieux : il s'agissait pour la première fois sans doute d'appliquer les méthodes de l'économie expérimentale à un modèle théorique connu et précis dans le domaine de l'économie des transports. Notre choix s'est porté sur le modèle structurel de congestion, un des plus connus des experts en matière de choix des usagers et de régulation économique de la demande de trafic, pour une raison évidente : la simplicité de sa logique et le caractère peu ambigu de ses prédictions théoriques. La congestion est vue comme le résultat de l'interaction stratégique entre les usagers et le produit d'un défaut de coordination des décisions quotidiennes de déplacements. Il nous faut toutefois souligner la difficulté méthodologique à laquelle nous avons été confrontés : comment faire des modèles théoriques des modèles expérimentaux au sens rigoureux du terme ? Cette difficulté nous a amené à faire le choix, le seul qui était rigoureux à notre sens d'un point de vue expérimental, de construire de nouveaux modèles directement testables en s'inspirant des modèles théoriques issus de la littérature. La difficulté et l'innovation a donc été double, théorique et expérimentale. A ce titre, cette difficulté est particulièrement révélatrice de ce que peut apporter l'économie expérimentale appliquée dans le cadre de l'aide à la décision ou à l'évaluation des politiques de transport. Les jeux expérimentaux sont un test sans pitié des conclusions théorique d'un modèle, et peuvent de plus apporter de nouvelles grilles de lecture pour les comportements des agents. Mais il ne faut pas oublier de se poser une question simple : que teste-t-on ? Trop souvent, les situations théoriques sont transposées dans un cadre de jeu expérimental, sans qu'il y ait de réflexion approfondie sur le nécessaire processus de transformation du modèle théorique. Dès lors, pour que l'économie expérimentale appliquée aux politiques de transport ne soit pas un leurre, elle doit adopter la même rigueur que l'économie expérimentale théorique. En conséquence, toute initiative dans le domaine de l'expérimentation appliquée nous semble devoir être par nature transdisciplinaire,

impliquant des compétences de psychologie expérimentale, d'économie expérimentale et de socio-économie des transports.

De ce point de vue, et bien que l'observation expérimentale ne puisse donc être considérée comme un test popperien strict du modèle en question, il faut observer que les jeux expérimentaux ont confirmé le problème de coordination entre les sujets dans un cadre théorique proche du modèle basique d'Arnott, De Palma et Lindsey. La congestion apparaît nettement dans tous les jeux expérimentaux développés pour cette recherche. Par ailleurs, ce résultat expérimental possède une certaine robustesse, compte tenu du nombre élevé de sujets testés (plus de 300 joueurs, dont des jeux à plus de 60). Un résultat important également est que le manque de coordination entre les joueurs ne trouve que peu de remèdes : l'information (ici très imparfaite) n'améliore guère la situation de congestion et le cas d'utilisateurs hétérogènes ne conduit pas à plus d'efficacité. Seul le péage semble posséder quelques vertus incitatives, encore qu'elles ne soient pas aussi fortes que prévues dans les modèles théoriques. A l'issue de cette réflexion sur la congestion vue comme un phénomène endogène et testée expérimentalement comme tel, il nous semble utile de développer une nouvelle réflexion sur l'impact d'une information au cours d'une séquence de décisions mais aussi de l'impact de natures de péage différentes. A tout le moins, l'économie expérimentale nous semble avoir fait la preuve de son utilité dans le domaine de l'aide aux politiques de transport : elle a confirmé dans une large mesure les modèles théoriques sur lesquels elles peuvent s'adosser, mais elle a permis de montrer également que ces mêmes modèles sous-estimaient dans une certaine mesure l'inertie des comportements et le poids des défaillances de marché. Ce résultat fort, en demi-teinte (pour les modèles théoriques testés !), ne peut que conduire à l'exploration de nouvelles hypothèses de comportements et à la mise en œuvre de nouveaux tests expérimentaux.

Annexes

Annexe 1 : éléments de démonstration

Annexes du paragraphe B, section 2, chapitre 2

Supposons que les individus ne puissent choisir une période de départ antérieure à $t^*-Tf-K+X$, avec $X > 0$. Pour conserver les K périodes de départ nécessaires au passage des N usagers, ces X périodes doivent se reporter après la période t^*-Tf-1 et le coût associé doit satisfaire les conditions d'équilibre précédemment évoquées :

1. A l'équilibre, les usagers ont intérêt à choisir une période de départ qui leur permet d'arriver en avance plutôt qu'en retard :

$$\begin{aligned} C_i(t^*-Tf-K+X) < C_i(t^*-Tf-1+X) &\Leftrightarrow \alpha(Tf+1) + (K-1+X)\beta + px < \alpha(Tf+1) + (X)\gamma \\ &\Leftrightarrow \gamma > [(K-1+X)/X]\beta \end{aligned}$$

(A1)

2. Le coût de transport le plus élevé à l'équilibre (i.e. $C_i(t^*-Tf-1+X)$) est inférieur à tous les coûts de transport hors équilibre, lorsque $N(t) \leq s$. Soient,

$$\begin{aligned} C_i(t^*-Tf-1+X) < C_i(t^*-Tf-K+X-1) &\Leftrightarrow \alpha(Tf+1) + (X)\gamma < \alpha(Tf+1) + (K+X)\beta \\ &\Leftrightarrow \gamma < [(K+X)/X]\beta \end{aligned}$$

(A2)

et

$$\begin{aligned} C_i(t^*-Tf-1+X) < C_i(t^*-Tf+X) &\Leftrightarrow \alpha(Tf+1) + (X)\gamma < \alpha(Tf+1) + (X+1)\gamma \\ &\Leftrightarrow \text{Toujours vrai} \end{aligned}$$

(A3)

3. Le coût de transport le plus élevé à l'équilibre (i.e. $C_i(t^*-Tf-1+X)$) est inférieur au coût le plus faible en situation de congestion, lorsque $N(t) > s$ (par exemple $C_i(t^*-Tf-2)$ avec $N(t^*-Tf-2) \geq s+1$).

$$\begin{aligned}
& C_i(t^*-Tf-1+X | N(t^*-Tf-1+X) \leq s) < C_i(t^*-Tf-2 | N(t^*-Tf-2) > s) \\
& \Leftrightarrow \alpha(Tf+1) + (X)\gamma < \alpha(Tf+2) \\
& \Leftrightarrow (X)\gamma < \alpha
\end{aligned} \tag{A4}$$

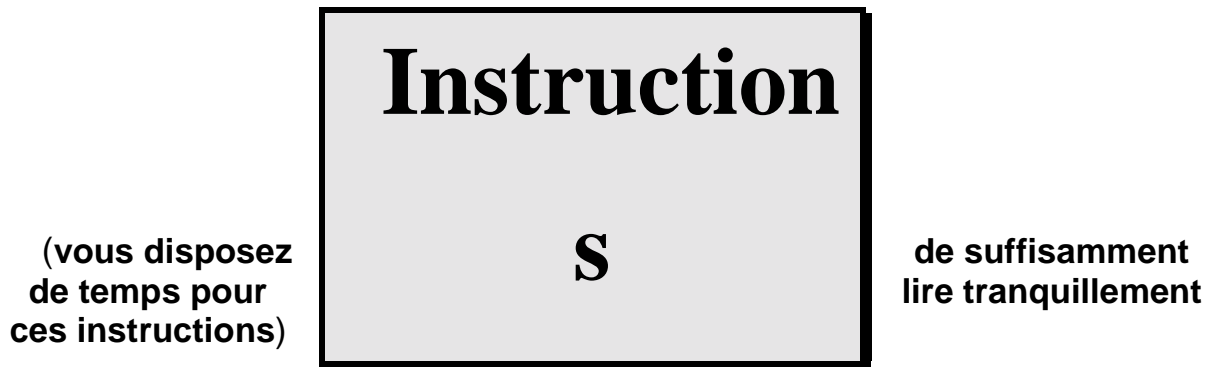
4. Les situations hors équilibre s'ordonnent de la manière suivante : le coût généré par un départ en situation de congestion est plus faible que le coût généré par un départ en avance hors équilibre, lui même inférieur au coût de partir en retard hors équilibre.

$$\begin{aligned}
& C_i(t^*-Tf-2 | N(t^*-Tf-2) > s) < C_i(t^*-Tf-K+X-1 | N(t^*-Tf-K+X-1) \leq s) < C_i(t^*-Tf+X | N(t^*-Tf+X) \leq s) \\
& \Leftrightarrow \alpha(Tf+2) < \alpha(Tf+1) + (K+X)\beta < \alpha(Tf+1) + (X+1)\gamma \\
& \Leftrightarrow \alpha < [K+X]\beta < [X+1]\gamma
\end{aligned} \tag{A5}$$

Compte tenu des équations (A5), (A4) et (A1), les équations (A2) et (A3) sont toujours vérifiées.

Annexe 2 : Règles des expériences

- instructions pour groupes de 16 joueurs homogènes
- instructions pour groupes de 4 joueurs homogènes
- instructions pour groupes de 8 joueurs homogènes, 2 itinéraires, péage = 8
- instructions pour groupes de 8 joueurs homogènes, 2 itinéraires, péage = 4
- instructions pour groupes de 8 joueurs hétérogènes, 2 itinéraires, péage = 8
- instructions pour groupes de 8 joueurs hétérogènes, 2 itinéraires, péage = 4



Bienvenue

L'expérience à laquelle vous allez participer est destinée à l'étude des choix de transport. Vous devrez choisir une heure de départ afin de vous rendre à un rendez-vous en empruntant une route sur laquelle il y a un risque de bouchon. Si vous suivez scrupuleusement les instructions et que vous prenez de bonnes décisions, vous pourrez gagner une somme d'argent non négligeable. Toutes vos réponses seront traitées de façon anonyme et elles seront recueillies au travers d'un réseau informatique. Vous indiquerez vos choix à l'ordinateur devant lequel vous êtes assis et celui-ci vous communiquera l'évolution de vos gains au fur et à mesure du déroulement de l'expérience.

La somme totale d'argent gagnée pendant l'expérience vous sera versée, en liquide, à la fin de celle-ci.

Cadre général de l'expérience

64 personnes participent à cette expérience. L'expérience comporte **40 périodes**. **A chacune des 40 périodes**, 4 groupes de 16 personnes seront constitués. A chaque période, vous serez donc **membre d'un groupe constitué de 16 personnes** choisies au hasard parmi les 64 personnes présentes dans les quatre salles d'expérimentation. **La composition de votre groupe changera d'une période à l'autre de l'expérience** et vous ne pourrez pas connaître l'identité des personnes faisant partie de votre groupe parmi les 64 personnes présentes dans les quatre salles.

Au début de l'expérience, vous disposez d'un **capital de 250 points**. A chacune des 40 périodes de l'expérience, vous allez subir une perte en points. La perte que vous subirez à chaque période dépendra à la fois de la décision que vous prendrez et des décisions prises par les 15 autres membres de votre groupe pour la période en cours. La part restante de votre capital à la fin de l'expérience sera convertie en

euros. La procédure de conversion des points en euros est détaillée à la fin des instructions.

Le rendez-vous

A chacune des 40 périodes de l'expérience, chaque membre de votre groupe doit choisir une heure de départ afin de se rendre à un rendez-vous. Tous les membres de votre groupe (vous y compris) ont **rendez-vous à 8 heures au même endroit**. De plus, tous les membres de votre groupe (vous y compris) doivent emprunter **la même route** afin de se rendre sur le lieu du rendez-vous. Enfin, tous les membres de votre groupe (vous y compris) partent du même endroit.

Le choix d'une heure de départ

Vous avez la possibilité de choisir votre heure de départ parmi les 17 horaires indiqués ci-dessous :

7h	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8h
2	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	40



Heure du rendez-vous

Au plus tôt, vous pouvez partir à 7 heures et 20 minutes. Au plus tard, vous pouvez partir à 8 heures et 40 minutes. Les horaires de départ sont donc distribués entre 7 heures et 20 minutes et 8 heures et 40 minutes, et ce de 5 en 5 minutes. Nous vous rappelons que vous avez rendez-vous, vous ainsi que chaque autre membre de votre groupe, à 8 heures.

Comme tous les membres de votre groupe (vous y compris) empruntent la même route, partent du même lieu et se rendent à une même destination, il peut arriver qu'un bouchon se crée sur la route empruntée ; dans ce cas, on dit que la route est très congestionnée.

Congestion de la route et temps de transport

Si l'horaire que vous choisissez comme heure de départ est tel que **au plus 3 autres membres** de votre groupe circulent sur la route commune à cette heure là alors **votre temps de transport est de 5 minutes**. Par contre, si **strictement plus de 3 autres membres** de votre groupe choisissent le même horaire de départ que vous alors **votre temps de transport sera strictement supérieur à 5 minutes**. Par ailleurs, il se peut que vous soyez le seul membre de votre groupe à choisir un certain horaire de départ et que néanmoins vous circuliez sur une route très congestionnée du fait d'un bouchon qui n'est pas encore résorbé. En effet, la congestion évolue de manière dynamique en fonction des heures de départ choisies par tous les membres de votre groupe. Nous détaillons ci-dessous les différents niveaux possibles de congestion pour une heure de départ quelconque.

Par la suite, nous désignons par la lettre « t » l'un des 17 horaires évoqués précédemment. L'horaire t est donc supérieur ou égal à 7 heures et 20 minutes et il est inférieur ou égal à 8 heures et 40 minutes.

Nous définissons tout d'abord la notion de fréquence de départ pour un horaire quelconque.

La fréquence de départ de l'horaire t est égale au nombre de membres de votre groupe qui choisissent l'horaire t comme heure de départ. Si, par exemple, deux membres de votre groupe choisissent l'horaire t alors la fréquence de départ de l'horaire t est égale à 2. Bien entendu, si aucun membre de votre groupe (vous y compris) ne choisit l'horaire t comme heure de départ alors la fréquence de départ de l'horaire t est nulle.

Le niveau de congestion d'un horaire quelconque dépend à la fois des niveaux de congestion des horaires précédents et de la fréquence de départ de l'horaire en question. Voyons tout d'abord comment se définit la congestion du premier horaire, à savoir l'horaire 7 heures et 20 minutes.

La congestion de l'horaire 7 heures et 20 minutes est égale à la fréquence de départ de l'horaire 7 heures et 20 minutes. Si, par exemple, vous êtes le seul membre de votre groupe à choisir l'horaire 7 heures et 20 minutes comme heure de départ alors la congestion de l'horaire 7 heures et 20 minutes est égale à 1.

Nous expliquons maintenant la manière dont la congestion est calculée pour les horaires au-delà de l'horaire 7 heures et 20 minutes. Ainsi, l'horaire t désigne dans la suite un horaire supérieur ou égal à 7 heures et 25 minutes et inférieur ou égal à 8 heures et 40 minutes. Nous désignons par « $t - 5$ » l'horaire précédant l'horaire t . Si, par exemple, l'horaire t est égal à 7 heures et 55 minutes alors l'horaire $t - 5$ est égal à 7 heures et 50 minutes.

Si la congestion de l'horaire $t - 5$ est inférieure ou égale à 4 alors la congestion de l'horaire t est égale à la fréquence de départ de l'horaire t .

Si la congestion de l'horaire $t - 5$ est strictement supérieure à 4 alors la congestion de l'horaire t est égale à la congestion de l'horaire $t - 5$, moins 4, plus la fréquence de départ de l'horaire t . Si, par exemple, la congestion de l'horaire $t - 5$ est égale à 7 alors la congestion de l'horaire t est égale à 3 (7-4) plus la fréquence de départ de l'horaire t .

Votre temps de transport dépend du niveau de congestion de l'horaire que vous choisissez comme heure de départ. Le tableau ci-dessous indique votre temps de transport étant donné le niveau de congestion de votre heure de départ :

Niveau de congestion de votre heure de départ	Votre temps de transport
1, 2, 3 ou 4	5 minutes
5	6 minutes et 15 secondes
6	7 minutes et 30 secondes
7	8 minutes et 45 secondes
8	10 minutes
9	11 minutes et 15 secondes
10	12 minutes et 30 secondes
11	13 minutes et 45 secondes
12	15 minutes
13	16 minutes et 15 secondes
14	17 minutes et 30 secondes
15	18 minutes et 45 secondes
16	20 minutes

Nous illustrons la relation qui existe entre les choix d'heure de départ des membres de votre groupe et votre temps de transport au moyen de deux exemples.

Exemple 1 : Admettons que les 15 autres membres de votre groupe décident de partir à 7 heures et 30 minutes. Dans ce cas, la congestion existante à 7 heures et 30 minutes et qui est due aux 15 autres membres de votre groupe est égale à 15.

1. Si vous décidez de partir à 7 heures et 20 minutes ou à 7 heures et 25 minutes alors votre temps de transport est de 5 minutes puisque la congestion est égale à 1 à l'heure de départ choisie (vous êtes seul à circuler sur la route à l'heure de départ choisie).
2. Si vous décidez de partir à 7 heures et 30 minutes alors votre temps de transport est de 20 minutes puisque la congestion est égale à 16 à l'heure de départ choisie (les 15 autres membres de votre groupe circulent en même temps que vous).
3. Si vous décidez de partir à 7 heures et 35 minutes alors votre temps de transport est de 15 minutes puisque la congestion est égale à 12 à l'heure de départ choisie ($15-4+1=12$).
4. Si vous décidez de partir à 7 heures et 40 minutes alors votre temps de transport est de 10 minutes puisque la congestion est égale à 8 à l'heure de départ choisie ($15-4-4+1=8$).
5. Enfin, si vous décidez de partir à 7 heures et 45 minutes, ou plus tard, alors votre temps de transport est de 5 minutes puisque la congestion est inférieure ou égale à 4 à l'heure de départ choisie (au moment où vous décidez de partir le bouchon a été totalement résorbé).

Exemple 2 : Admettons que 10 membres de votre groupe décident de partir à 8 heures et 15 minutes et que les cinq autres membres de votre groupe décident de partir à 8 heures et 20 minutes.

1. Si vous décidez de partir à 8 heures et 10 minutes, ou avant, alors votre temps de transport est de 5 minutes puisque la congestion est égale à 1 à l'heure de départ choisie (vous êtes seul à circuler sur la route à l'heure de départ choisie).
2. Si vous décidez de partir à 8 heures et 15 minutes alors votre temps de transport est de 13 minutes et 45 secondes puisque la congestion est égale à 11 à l'heure de départ choisie (10 autres membres de votre groupe ont choisi le même horaire de départ).
3. Si vous décidez de partir à 8 heures et 20 minutes alors votre temps de transport est de 15 minutes puisque la congestion est égale à 12 à l'heure de départ choisie ($10-4+5+1=12$).
4. Si vous décidez de partir à 8 heures et 25 minutes alors votre temps de transport est de 10 minutes puisque la congestion est égale à 8 à l'heure de départ choisie ($10-4+5-4+1=8$).
5. Enfin, si vous décidez de partir à 8 heures et 30 minutes, ou plus tard, alors votre temps de transport est de 5 minutes puisque la congestion est inférieure ou égale à 4 à l'heure de départ choisie (au moment où vous décidez de partir le bouchon a été totalement résorbé).

Détermination de votre gain

Au début de l'expérience, vous disposez d'un **capital de 250 points**. A chacune des 40 périodes de l'expérience, vous allez subir une perte en points. Autrement dit, votre capital de départ de 250 points va diminuer de période en période. Vous disposerez donc au début de chaque période d'un capital en points inférieur à celui de la période précédente. La perte que vous subirez à chaque période est déterminée de la manière suivante.

A chaque période, chaque membre de votre groupe choisit une heure de départ. **Le choix de votre heure de départ se fera sans que vous ne connaissiez les choix d'heure de départ des 15 autres membres de votre groupe.** Une fois que les 16 choix d'heure de départ auront été effectués, l'ordinateur devant lequel vous êtes assis déterminera votre temps de transport en fonction du niveau de congestion de votre heure de départ. A partir du choix de votre heure de départ et de votre temps de transport, l'ordinateur déterminera votre heure d'arrivée. **Votre perte pour la période en cours dépend à la fois de votre temps de transport et de votre heure d'arrivée.** Voyons cela plus en détails.

A chaque période, une fois votre temps de transport établi, l'ordinateur retranche à votre capital de début de période une « pénalité de temps de transport ». On peut remarquer que, quels que soient les choix d'heure de départ des membres de votre groupe, votre temps de transport ne peut être inférieur à 5 minutes et il ne peut être supérieur à 20 minutes. Vous pouvez apprécier l'importance de la pénalité de temps de transport en fonction du temps de transport grâce au tableau ci-dessous :

Temps de transport	Pénalité de temps de transport
5 minutes	1 point
6 minutes et 15 secondes	1,25 points
7 minutes et 30 secondes	1,5 points
8 minutes et 45 secondes	1,75 points
10 minutes	2 points
11 minutes et 15 secondes	2,25 points
12 minutes et 30 secondes	2,5 points
13 minutes et 45 secondes	2,75 points
15 minutes	3 points
16 minutes et 15 secondes	3,25 points
17 minutes et 30 secondes	3,5 points
18 minutes et 45 secondes	3,75 points
20 minutes	4 points

De plus, dans le cas où vous n'arrivez pas à l'heure exacte à votre rendez-vous (nous vous rappelons que vous avez rendez-vous à 8 heures), vous subissez une pénalité.

Si vous arrivez en avance alors vous subissez une « pénalité d'avance ».

On peut remarquer que, quels que soient les choix d'heure de départ des membres de votre groupe, votre heure d'arrivée ne peut être inférieure à 7 heures et 25 minutes. Vous pouvez apprécier l'importance de la pénalité d'avance en fonction du nombre de minutes d'avance grâce au tableau ci-dessous :

Heure d'arrivée	Nombre de minutes d'avance	Pénalité d'avance
7 heures et 25 minutes	35 minutes	3,5 points
7 heures 26 minutes et 15	33 minutes et 45 secondes	3,375 points
7 heures 27 minutes et 30	32 minutes et 30 secondes	3,25 points
7 heures 28 minutes et 45	31 minutes et 15 secondes	3,125 points
7 heures et 30 minutes	30 minutes	3 points
7 heures 31 minutes et 15	28 minutes et 45 secondes	2,875 points
7 heures 32 minutes et 30	27 minutes et 30 secondes	2,75 points
7 heures 33 minutes et 45	26 minutes et 15 secondes	2,625 points
7 heures et 35 minutes	25 minutes	2,5 points
7 heures 36 minutes et 15	23 minutes et 45 secondes	2,375 points
7 heures 37 minutes et 30	22 minutes et 30 secondes	2,25 points
7 heures 38 minutes et 45	21 minutes et 15 secondes	2,125 points
7 heures et 40 minutes	20 minutes	2 points
7 heures 41 minutes et 15	18 minutes et 45 secondes	1,875 points
7 heures 42 minutes et 30	17 minutes et 30 secondes	1,75 points
7 heures 43 minutes et 45	16 minutes et 15 secondes	1,625 points

7 heures et 45 minutes	15 minutes	1,5 points
7 heures 46 minutes et 15	13 minutes et 45 secondes	1,375 points
7 heures 47 minutes et 30	12 minutes et 30 secondes	1,25 points
7 heures 48 minutes et 45	11 minutes et 15 secondes	1,125 points
7 heures et 50 minutes	10 minutes	1 point
7 heures 51 minutes et 15	8 minutes et 45 secondes	0,875 point
7 heures 52 minutes et 30	7 minutes et 30 secondes	0,75 point
7 heures 53 minutes et 45	6 minutes et 15 secondes	0,625 point
7 heures et 55 minutes	5 minutes	0,5 point
7 heures 56 minutes et 15	3 minutes et 45 secondes	0,375 point
7 heures 57 minutes et 30	2 minutes et 30 secondes	0,25 point
7 heures 58 minutes et 45	1 minute et 15 secondes	0,125 point
8 heures	0 minute	0 point

Si, au contraire, vous arrivez à votre rendez-vous en retard alors vous subissez une « pénalité de retard ». On peut remarquer que, quels que soient les choix d'heure de départ des membres de votre groupe, votre heure d'arrivée ne peut être supérieure à 9 heures. Vous pouvez apprécier l'importance de la pénalité de retard en fonction du nombre de minutes de retard grâce au tableau ci-dessous :

Heure d'arrivée	Nombre de minutes de retard	Pénalité de retard
8 heures	0 minute	0 point
8 heures 1 minute et 15 secondes	1 minute et 15 secondes	0,5 point
8 heures 2 minutes et 30 secondes	2 minutes et 30 secondes	1 point
8 heures 3 minutes et 45 secondes	3 minutes et 45 secondes	1,5 points
8 heures et 5 minutes	5 minutes	2 points
8 heures 6 minutes et 15 secondes	6 minutes et 15 secondes	2,5 points
8 heures 7 minutes et 30 secondes	7 minutes et 30 secondes	3 points
8 heures 8 minutes et 45 secondes	8 minutes et 45 secondes	3,5 points
8 heures et 10 minutes	10 minutes	4 points
8 heures 11 minutes et 15	11 minutes et 15 secondes	4,5 points
8 heures 12 minutes et 30	12 minutes et 30 secondes	5 points
8 heures 13 minutes et 45	13 minutes et 45 secondes	5,5 points
8 heures et 15 minutes	15 minutes	6 points
8 heures 16 minutes et 15	16 minutes et 15 secondes	6,5 points
8 heures 17 minutes et 30	17 minutes et 30 secondes	7 points
8 heures 18 minutes et 45	18 minutes et 45 secondes	7,5 points
8 heures et 20 minutes	20 minutes	8 points
8 heures 21 minutes et 15	21 minutes et 15 secondes	8,5 points
8 heures 22 minutes et 30	22 minutes et 30 secondes	9 points
8 heures 23 minutes et 45	23 minutes et 45 secondes	9,5 points
8 heures et 25 minutes	25 minutes	10 points

....
....
8 heures et 55 minutes	55 minutes	22 points
8 heures 56 minutes et 15	56 minutes et 15 secondes	22,5 points
8 heures 57 minutes et 30	57 minutes et 30 secondes	23 points
8 heures 58 minutes et 45	58 minutes et 45 secondes	23,5 points
9 heures	60 minutes	24 points

En résumé, **si vous arrivez en avance à votre rendez-vous** alors votre **perte en points** pour la période en cours est égale à **pénalité de temps de transport + pénalité d'avance**.

Si votre heure d'arrivée est 8 heures, c'est-à-dire que **vous êtes à l'heure exacte au rendez-vous**, alors votre **perte en points** pour la période en cours est égale à **pénalité de temps de transport**.

Si vous arrivez en retard à votre rendez-vous alors votre **perte en points** pour la période en cours est égale à **pénalité de temps de transport + pénalité de retard**.

Récapitulatif

Vous allez prendre part à une expérience qui comporte 40 périodes. A chacune des 40 périodes de l'expérience, vous serez membre d'un groupe de 16 joueurs et la composition de votre groupe changera d'une période à l'autre de l'expérience. Au début de l'expérience, vous disposez d'un capital de 250 points. A chaque période de l'expérience, chaque membre de votre groupe doit choisir une heure de départ afin de se rendre à un rendez-vous. Les choix d'heure de départ se font de manière simultanée et tous les membres de votre groupe ont rendez-vous à 8 heures. Afin de vous aider dans votre choix, l'ordinateur vous indiquera, **au début de chaque période, les fréquences relatives moyennes de départ des 64 personnes participant à l'expérience (vous y compris) sur les périodes passées**. Ainsi, en première période vous ne disposerez d'aucune information concernant les fréquences de départ choisies par l'ensemble des 64 personnes participant à l'expérience puisque aucun choix n'aura été fait. Au début de la seconde période, vous connaîtrez pour chaque horaire de départ le pourcentage des 64 personnes ayant choisi cet horaire en première période. Au début de la troisième période, vous connaîtrez pour chaque horaire de départ le pourcentage moyen des 64 personnes ayant choisi cet horaire sur les deux premières périodes. Et ainsi de suite.

Une fois que les 16 choix d'heure de départ ont été effectués, l'ordinateur devant lequel vous êtes assis détermine votre temps de transport, votre heure d'arrivée et donc votre perte en points pour la période. A la fin de chaque période, l'ordinateur vous indique le capital dont vous disposiez au début de la période, l'heure de départ que vous avez choisie, votre heure d'arrivée, les choix d'heure de départ des 16 membres de votre groupe (vous y compris), la perte que vous avez subie pour la période en cours et le capital dont vous disposez à la fin de la période. La période suivante peut alors démarrer. A chaque nouvelle période, votre capital de début de période vous est rappelé.

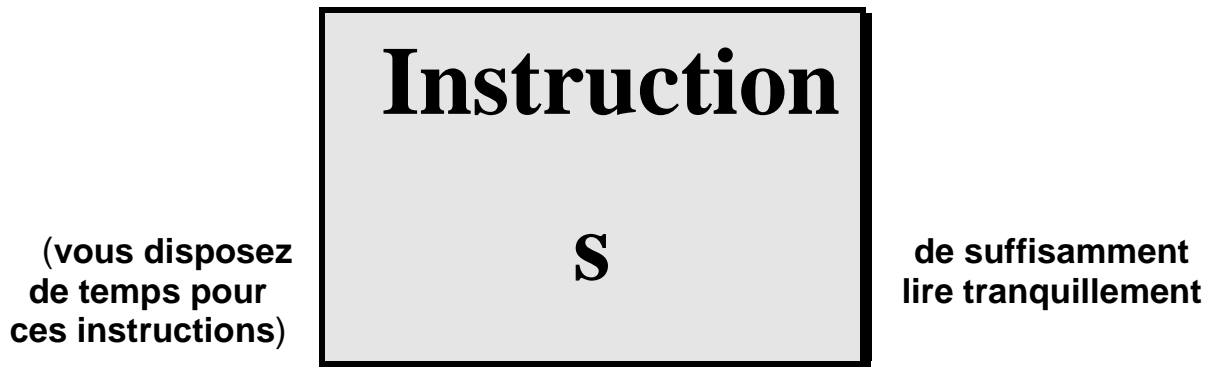
Lorsque la 40^{ème} période est achevée, l'ordinateur vous communique votre capital en points de la fin de la période 40. Ce capital constitue votre gain en points pour

l'expérience et il est converti en euros selon un facteur de conversion de 10 euros pour 100 points. Si vos gains sur l'ensemble de l'expérience s'élèvent, par exemple, à 150 points alors vous percevrez 15 euros en liquide.

Dans le coin supérieur gauche de l'écran apparaît un bouton nommé « **Historique** ». Si vous cliquez sur ce bouton, vous verrez apparaître pour **chaque période passée les fréquences de départ de tous les horaires établies sur la base des choix d'heure de départ des 64 personnes participant à l'expérience (vous y compris)**.

Avant de démarrer l'expérience, nous allons procéder à une lecture à voix haute des instructions puis vous devrez répondre à un questionnaire afin de vérifier votre bonne compréhension des instructions. Si à l'issue du questionnaire vous avez trop de mauvaises réponses alors vous ne pourrez pas prendre part à l'expérience.

Bonne chance !



Bienvenue

L'expérience à laquelle vous allez participer est destinée à l'étude des choix de transport. Vous devrez choisir une heure de départ afin de vous rendre à un rendez-vous en empruntant une route sur laquelle il y a un risque de bouchon. Les instructions sont simples. Si vous les suivez scrupuleusement et que vous prenez de bonnes décisions, vous pourrez gagner une somme d'argent non négligeable. Toutes vos réponses seront traitées de façon anonyme et elles seront recueillies au travers d'un réseau informatique. Vous indiquerez vos choix à l'ordinateur devant lequel vous êtes assis et celui-ci vous communiquera l'évolution de vos gains au fur et à mesure du déroulement de l'expérience.

La somme totale d'argent gagnée pendant l'expérience vous sera versée, en liquide, à la fin de celle-ci.

Cadre général de l'expérience

16 personnes participent à cette expérience. L'expérience comporte **40 périodes**. **A chacune des 40 périodes**, 4 groupes de 4 personnes seront constitués. A chaque période, vous serez donc **membre d'un groupe constitué de 4 personnes** choisies au hasard parmi les 16 personnes présentes dans la salle. **La composition de votre groupe changera d'une période à l'autre de l'expérience** et vous ne pourrez pas connaître l'identité des personnes faisant partie de votre groupe parmi les 16 personnes présentes dans la salle.

Au début de l'expérience, vous disposez d'un **capital de 250 points**. A chacune des 40 périodes de l'expérience, vous allez subir une perte en points. La perte que vous subirez à chaque période dépendra à la fois de la décision que vous prendrez et des décisions prises par les 3 autres membres de votre groupe pour la période en cours. La part restante de votre capital à la fin de l'expérience sera convertie en

euros. La procédure de conversion des points en euros est détaillée à la fin des instructions.

Le rendez-vous

A chacune des 40 périodes de l'expérience, chaque membre de votre groupe doit choisir une heure de départ afin de se rendre à un rendez-vous. Tous les membres de votre groupe (vous y compris) ont **rendez-vous à 8 heures au même endroit**. De plus, tous les membres de votre groupe (vous y compris) doivent emprunter **la même route** afin de se rendre sur le lieu du rendez-vous. Enfin, tous les membres de votre groupe (vous y compris) partent du même endroit.

Le choix d'une heure de départ

Vous avez la possibilité de choisir votre heure de départ parmi les 17 horaires indiqués ci-dessous :

7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8
h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h	h

↓
Heure du rendez-

Au plus tôt, vous pouvez partir à 7 heures et 20 minutes. Au plus tard, vous pouvez partir à 8 heures et 40 minutes. Les horaires de départ sont donc distribués entre 7 heures et 20 minutes et 8 heures et 40 minutes, et ce de 5 en 5 minutes. Nous vous rappelons que vous avez rendez-vous, vous ainsi que chaque autre membre de votre groupe, à 8 heures.

Comme tous les membres de votre groupe (vous y compris) empruntent la même route, partent du même lieu et se rendent à une même destination, il peut arriver qu'un bouchon se crée sur la route empruntée ; dans ce cas, on dit que la route est très congestionnée.

Congestion de la route et temps de transport

Si l'horaire que vous choisissez comme heure de départ est tel que vous êtes le seul membre de votre groupe à circuler sur la route commune à cette heure là alors votre temps de transport est de 5 minutes. Par contre, si un autre membre de votre groupe choisit le même horaire de départ que vous alors votre temps de transport est doublé, c'est-à-dire que votre temps de transport est de 10 minutes. Si deux autres membres de votre groupe choisissent le même horaire de départ que vous alors votre temps de transport est triplé, c'est-à-dire que votre temps de transport est de 15 minutes. Si les trois autres membres de votre groupe choisissent le même horaire de départ que vous alors votre temps de transport est quadruplé, c'est-à-dire que votre temps de transport est de 20 minutes.

Par ailleurs, il se peut que vous soyez le seul membre de votre groupe à choisir un certain horaire de départ et que vous circulez sur une route très congestionnée, ce qui augmente votre temps de transport. En effet, il se peut que les

autres membres de votre groupe aient choisi des horaires de départ tels qu'un bouchon se crée et que au moment où vous décidez de partir le bouchon n'ait pas encore été résorbé. En effet, la congestion évolue de manière dynamique en fonction des heures de départ choisies par tous les membres de votre groupe. Nous détaillons ci-dessous les différents niveaux possibles de congestion pour une heure de départ quelconque.

Par la suite, nous désignons par la lettre « t » l'un des 17 horaires évoqués précédemment. L'heure t est donc supérieur ou égal à 7 heures et 20 minutes et il est inférieur ou égal à 8 heures et 40 minutes.

Nous définissons tout d'abord la notion de fréquence de départ pour un horaire quelconque.

La fréquence de départ de l'heure t est égale au nombre de membres de votre groupe qui choisissent l'heure t comme heure de départ. Si, par exemple, deux membres de votre groupe choisissent l'heure t alors la fréquence de départ de l'heure t est égale à 2. Bien entendu, si aucun membre de votre groupe (vous y compris) ne choisit l'heure t comme heure de départ alors la fréquence de départ de l'heure t est nulle.

Le niveau de congestion d'un horaire quelconque dépend à la fois des niveaux de congestion des horaires précédents et de la fréquence de départ de l'heure en question. Voyons tout d'abord comment se définit la congestion du premier horaire, à savoir l'heure 7 heures et 20 minutes.

La congestion de l'heure 7 heures et 20 minutes est égale à la fréquence de départ de l'heure 7 heures et 20 minutes. Si, par exemple, vous êtes le seul membre de votre groupe à choisir l'heure 7 heures et 20 minutes comme heure de départ alors la congestion de l'heure 7 heures et 20 minutes est égale à 1.

Nous expliquons maintenant la manière dont la congestion est calculée pour les horaires au-delà de l'heure 7 heures et 20 minutes. Ainsi, l'heure t désigne dans la suite un horaire supérieur ou égal à 7 heures et 25 minutes et inférieur ou égal à 8 heures et 40 minutes. Nous désignons par « $t - 5$ » l'heure précédant l'heure t . Autrement dit, si l'heure t est égal à 7 heures et 55 minutes alors l'heure $t - 5$ est égal à 7 heures et 50 minutes.

Si la congestion de l'heure $t - 5$ est nulle alors la congestion de l'heure t est égale à la fréquence de départ de l'heure t .

De même, si la congestion de l'heure $t - 5$ est égale à 1 alors la congestion de l'heure t est égale à la fréquence de départ de l'heure t .

Si la congestion de l'heure $t - 5$ est égale à 2 alors la congestion de l'heure t est égale à la fréquence de départ de l'heure t plus 1.

Si la congestion de l'heure $t - 5$ est égale à 3 alors la congestion de l'heure t est égale à la fréquence de départ de l'heure t plus 2.

Si la congestion de l'horaire $t - 5$ est égale à 4 alors la congestion de l'horaire t est égale à la fréquence de départ de l'horaire t plus 3.

Votre temps de transport dépend du niveau de congestion de l'horaire que vous choisissez comme heure de départ. Plus exactement, **votre temps de transport en minutes est égal à 5 fois le niveau de congestion de votre heure de départ.** Nous illustrons cela au moyen de deux exemples.

Exemple 1 : Admettons que les trois autres membres de votre groupe décident de partir à 7 heures et 30 minutes. Dans ce cas, la congestion existante à 7 heures et 30 minutes et qui est due aux trois autres membres de votre groupe est égale à 3.

6. Si vous décidez de partir à 7 heures et 20 minutes ou à 7 heures et 25 minutes alors votre temps de transport est de 5 minutes puisque la congestion est égale à 1 à l'heure de départ choisie (vous êtes seul à circuler sur la route à l'heure de départ choisie).
7. Si vous décidez de partir à 7 heures et 30 minutes alors votre temps de transport est de 20 minutes puisque la congestion est égale à 4 à l'heure de départ choisie (les trois autres membres de votre groupe circulent en même temps que vous).
8. Si vous décidez de partir à 7 heures et 35 minutes alors votre temps de transport est de 15 minutes puisque la congestion est égale à 3 à l'heure de départ choisie.
9. Si vous décidez de partir à 7 heures et 40 minutes alors votre temps de transport est de 10 minutes puisque la congestion est égale à 2 à l'heure de départ choisie.
10. Enfin, si vous décidez de partir à 7 heures et 45 minutes, ou plus tard, alors votre temps de transport est de 5 minutes puisque la congestion est égale à 1 à l'heure de départ choisie (au moment où vous décidez de partir le bouchon a été totalement résorbé).

Exemple 2 : Admettons que deux membres de votre groupe décident de partir à 8 heures et 15 minutes et que le troisième membre de votre groupe décide de partir à 8 heures et 20 minutes.

6. Si vous décidez de partir à 8 heures et 10 minutes, ou avant, alors votre temps de transport est de 5 minutes puisque la congestion est égale à 1 à l'heure de départ choisie (vous êtes seul à circuler sur la route à l'heure de départ choisie).
7. Si vous décidez de partir à 8 heures et 15 minutes alors votre temps de transport est de 15 minutes puisque la congestion est égale à 3 à l'heure de départ choisie (deux autres membres de votre groupe ont choisis le même horaire de départ).
8. Si vous décidez de partir à 8 heures et 20 minutes alors votre temps de transport est de 15 minutes puisque la congestion est égale à 3 à l'heure de départ choisie.
9. Si vous décidez de partir à 8 heures et 25 minutes alors votre temps de transport est de 10 minutes puisque la congestion est égale à 2 à l'heure de départ choisie.
10. Enfin, si vous décidez de partir à 8 heures et 30 minutes, ou plus tard, alors votre temps de transport est de 5 minutes puisque la congestion est égale à 1

à l'heure de départ choisie (vous êtes seul à circuler sur la route à l'heure de départ choisie).

Détermination de votre gain

Au début de l'expérience, vous disposez d'un **capital de 250 points**. A chacune des 40 périodes de l'expérience, vous allez subir une perte en points. Autrement dit, votre capital de départ de 250 points va diminuer de période en période. Vous disposerez donc au début de chaque période d'un capital en points inférieur à celui de la période précédente. La perte que vous subirez à chaque période est déterminée de la manière suivante.

A chaque période, chaque membre de votre groupe choisit une heure de départ. **Le choix de votre heure de départ se fera sans que vous ne connaissiez les choix d'heure de départ des trois autres membres de votre groupe.** Une fois que les 4 choix d'heure de départ auront été effectués, l'ordinateur devant lequel vous êtes assis déterminera votre temps de transport en fonction du niveau de congestion de votre heure de départ. A partir de votre temps de transport et du choix de votre heure de départ, l'ordinateur déterminera votre heure d'arrivée. **Votre perte pour la période en cours dépend à la fois de votre temps de transport et de votre heure d'arrivée.** Voyons cela plus en détails.

A chaque période, une fois votre temps de transport établi, l'ordinateur retranche à votre capital de début de période une « pénalité de temps de transport ». On peut remarquer que, quels que soient les choix d'heure de départ des membres de votre groupe, votre temps de transport ne peut être inférieur à 5 minutes et il ne peut être supérieur à 20 minutes. Vous pouvez apprécier l'importance de la pénalité de temps de transport en fonction du nombre de minutes de temps de transport grâce au tableau ci-dessous :

Nombre de minutes de temps de transport	Pénalité de temps de transport (nombre de minutes de temps de transport / 5)
5 minutes	1 point
10 minutes	2 points
15 minutes	3 points
20 minutes	4 points

De plus, dans le cas où vous n'arrivez pas à l'heure exacte à votre rendez-vous (nous vous rappelons que vous avez rendez-vous à 8 heures), vous subissez une pénalité.

Si vous arrivez en avance alors vous subissez une « pénalité d'avance ». On peut remarquer que, quels que soient les choix d'heure de départ des membres de votre groupe, votre heure d'arrivée ne peut être inférieure à 7 heures et 25 minutes. Vous pouvez apprécier l'importance de la pénalité d'avance en fonction du nombre de minutes d'avance grâce au tableau ci-dessous :

Heure d'arrivée	Nombre de minutes d'avance	Pénalité d'avance (nombre de minutes d'avance/10)
7 heures et 25	35 minutes	3,5 points
7 heures et 30	30 minutes	3 points

7 heures et 35	25 minutes	2,5 points
7 heures et 40	20 minutes	2 points
7 heures et 45	15 minutes	1,5 points
7 heures et 50	10 minutes	1 point
7 heures et 55	5 minutes	0,5 point
8 heures	0 minute	0 point

Si, au contraire, vous arrivez à votre rendez-vous en retard alors vous subissez une « pénalité de retard ». On peut remarquer que, quels que soient les choix d'heure de départ des membres de votre groupe, votre heure d'arrivée ne peut être supérieure à 9 heures. Vous pouvez apprécier l'importance de la pénalité de retard en fonction du nombre de minutes de retard grâce au tableau ci-dessous :

Heure d'arrivée	Nombre de minutes de retard	Pénalité de retard (nombre de minutes de retard/2,5)
8 heures	0 minute	0 point
8 heures et 05	5 minutes	2 points
8 heures et 10	10 minutes	4 points
8 heures et 15	15 minutes	6 points
8 heures et 20	20 minutes	8 points
8 heures et 25	25 minutes	10 points
8 heures et 30	30 minutes	12 points
8 heures et 35	35 minutes	14 points
8 heures et 40	40 minutes	16 points
8 heures et 45	45 minutes	18 points
8 heures et 50	50 minutes	20 points
8 heures et 55	55 minutes	22 points
9 heures	60 minutes	24 points

En résumé, **si vous arrivez en avance à votre rendez-vous** alors votre **perte en points** pour la période en cours est égale à **pénalité de temps de transport + pénalité d'avance**.

Si votre heure d'arrivée est 8 heures, c'est-à-dire que **vous êtes à l'heure exacte au rendez-vous**, alors votre **perte en points** pour la période en cours est égale à **pénalité de temps de transport**.

Si vous arrivez en retard à votre rendez-vous alors votre **perte en points** pour la période en cours est égale à **pénalité de temps de transport + pénalité de retard**.

Récapitulatif

Vous allez prendre part à une expérience qui comporte 40 périodes. A chacune des 40 périodes de l'expérience, vous serez membre d'un groupe de 4 joueurs et la composition de votre groupe changera d'une période à l'autre de l'expérience. Au

début de l'expérience, vous disposez d'un capital de 250 points. A chaque période de l'expérience, chaque membre de votre groupe doit choisir une heure de départ afin de se rendre à un rendez-vous. Les choix d'heure de départ se font de manière simultanée et tous les membres de votre groupe ont rendez-vous à 8 heures. Une fois que les 4 choix d'heure de départ ont été effectués, l'ordinateur devant lequel vous êtes assis détermine votre temps de transport, votre heure d'arrivée et donc votre perte en points pour la période. A la fin de chaque période, l'ordinateur vous indique le capital dont vous disposiez au début de la période, l'heure de départ que vous avez choisie, votre heure d'arrivée, la perte que vous avez subie pour la période en cours et le capital dont vous disposez à la fin de la période. La période suivante peut alors démarrer. A chaque nouvelle période, votre capital de début de période vous est rappelé.

Lorsque la 40^{ème} période est achevée, l'ordinateur vous communique votre capital en points de la fin de la période 40. Ce capital constitue votre gain en points pour l'expérience et il est converti en euros selon un facteur de conversion de 10 euros pour 100 points. Si vos gains sur l'ensemble de l'expérience s'élèvent, par exemple, à 150 points alors vous percevrez 15 euros en liquide.

Avant de démarrer l'expérience, nous allons procéder à une lecture à voix haute des instructions puis vous devrez répondre à un questionnaire afin de vérifier votre bonne compréhension des instructions. Si à l'issue du questionnaire vous avez trop de mauvaises réponses alors vous ne pourrez pas prendre part à l'expérience.

Bonne chance !

1 Règles de l'expérience (homo p8)

Vous participez à une expérience dans laquelle vous pouvez gagner de l'argent. La somme d'argent que vous gagnerez dépendra de vos décisions ainsi que des décisions des autres participants de votre groupe. Toutes les décisions que vous aurez à prendre et toutes les informations dont vous disposerez se feront par le terminal informatique qui vous a été attribué. Des groupes de 8 personnes (vous et 7 autres participants) sont constitués au hasard au début de l'expérience. Cette expérience se déroule sur 15 périodes et vous serez en interaction avec les mêmes personnes tout au long de ces 15 périodes. Les conditions sont les mêmes pour tous les participants.

- **L'EXPERIENCE.**

Au cours de cette expérience, vous devez choisir un itinéraire routier (parmi deux itinéraires possibles, notés A et B) et une heure de départ pour vous rendre d'un lieu à un autre. Vous devez arriver à destination à une heure objectif précise (notée heure 0). Les heures de départ possibles sont les suivantes :

-9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, **0 (heure objectif)**, 1, 2, 3, 4.

Vous disposez à chacune des 15 périodes d'une dotation de 500 points. A ces 500 points vont se soustraire un coût de transport qui dépend des éléments suivants :

- 1- **Votre temps de transport** (c'est à dire le temps nécessaire pour vous rendre à destination) : chaque heure passée sur la route vous coûte $\alpha = 16$ points. Vous conserverez cette valeur tout au long de l'expérience.
- 2- Votre heure d'arrivée (c'est à dire votre heure de départ + votre temps de transport) :
 - ✓ **Si vous arrivez en avance (avant l'heure 0)**, vous subissez un coût de $\beta = 5$ points par heure d'avance.
 - ✓ **Si vous arrivez en retard (après l'heure 0)**, vous subissez un coût de $\gamma = 40$ points par heure de retard.

3- **Le péage** : le péage de l'itinéraire A est nul tandis que le péage de l'itinéraire B vous coûte 8 points.

• **COMMENT EST CALCULE VOTRE TEMPS DE TRANSPORT ?**

Votre temps de transport dépend de deux paramètres : le nombre de participants présents sur la route à l'heure où vous partez et le temps nécessaire à l'itinéraire pour absorber ces participants. Le nombre de participants présents sur l'itinéraire est le nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous plus le nombre de participants déjà sur l'itinéraire au moment où vous partez.

Chaque itinéraire a une capacité d'absorption différente qui détermine le nombre de participants qui peuvent emprunter l'itinéraire par heure sans qu'un embouteillage ne se forme. Plus le nombre de participants présents sur un itinéraire est important, plus le temps de transport augmente. La capacité de l'itinéraire A est de 1 participant par heure et la capacité de l'itinéraire B est de 2 participants par heure. Chaque itinéraire conserve la même capacité d'absorption au cours des 15 périodes de l'expérience.

Dans les tableaux suivants, est présenté le temps de transport en fonction du nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous et du nombre de participants déjà sur l'itinéraire au moment où vous partez.

Tableau A

Votre temps de transport sur l'itinéraire A		Nb de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous (vous y compris)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de participants déjà présents sur l'itinéraire au moment où vous partez	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	2	3	4	5	6	7	8		
	3	4	5	6	7	8			
	4	5	6	7	8				
	5	6	7	8					
	6	7	8						
	7	8							

Tableau B

Votre temps de transport sur l'itinéraire B		Nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous (vous y compris)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de participants déjà présents sur l'itinéraire au moment où vous partez	0	1	1	2	2	3	3	4	4
	1	1	2	2	3	3	4	4	
	2	2	2	3	3	4	4		
	3	2	3	3	4	4			
	4	3	3	4	4				
	5	3	4	4					
	6	4	4						
	7	4							

Exemples : les exemples suivants vous permettent de comprendre comment votre gain est calculé. Au cours de l'expérience, l'ordinateur effectuera ces calculs à votre place et vous informera des gains associés aux différentes heures de départ et aux deux itinéraires.

1^{ère} exemple.

Parmi les 8 participants, supposons que vous seul choisissiez de partir à l'heure « -2 » sur l'itinéraire A et que le nombre de participants déjà sur l'itinéraire à l'heure « -2 » est nul :

Votre temps de transport est : **1 heure (voir le tableau A)**

Votre heure d'arrivée est : « -1 » (heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 1 »), vous arrivez donc à destination avec 1 heure d'avance.

Votre gain est : **479 = 500 - (1*16) - (1*5)**

$$\text{gain} = \text{dotation} - (\text{temps de transport} * \alpha) - (\text{temps d'avance} * \beta)$$

2^{ème} exemple.

Parmi les 8 participants, supposons que vous seul choisissiez de partir à l'heure « -2 » sur l'itinéraire B et que le nombre de participants déjà sur l'itinéraire à l'heure « -2 » est nul :

Votre temps de transport est : **1 heure (voir le tableau B)**

Votre heure d'arrivée est : « -1 » (heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 1 »), vous arrivez donc à destination avec 1 heure d'avance.

Votre gain est : **471 = 500 - (1*16) - (1*5) - 8**

$$\text{gain} = \text{dotation} - (\text{tps de transport} * \alpha) - (\text{tps d'avance} * \beta) - \text{péage}$$

3^{ème} exemple.

Parmi les 8 participants, supposons que 4 participants (y compris vous même) choisissent de partir à l'heure « -2 » sur l'itinéraire A et que le nombre de participants déjà sur l'itinéraire à l'heure « -2 » est 2 :

Votre temps de transport est : **6 heures (voir le tableau A)**

Votre heure d'arrivée est : **« 4 »**

(heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 6 »), vous arrivez donc à destination avec 4 heures de retard.

Votre gain est : **244 = 500 - (6*16) - (4*40)**

gain = dotation - (temps de transport * α) - (temps de retard * γ)

- **COMMENT PRENDREZ-VOUS VOS DECISIONS ?**

Sur votre écran d'ordinateur, trois zones seront présentes :

La première vous permet de tester différentes heures de départ sur chaque itinéraire pour connaître le gain associé en fonction des temps de transport possibles. Cette zone de test est présente en permanence à l'écran, et vous pouvez y avoir recours à n'importe quel moment de l'expérience.

La deuxième vous permet de saisir l'itinéraire et l'heure de départ choisis. C'est ce choix qui déterminera votre gain pour la période en cours. Pour valider votre choix, cliquez sur le bouton OK. Attention, une fois votre choix validé vous ne pouvez plus le modifier pour la période en cours.

La troisième vous informera **à chaque période** des éléments suivants :

- **L'itinéraire que vous avez choisi, L'Heure de départ que vous avez choisi, Votre temps de transport, Votre heure d'arrivée, Le nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous sur votre itinéraire (vous même y compris), Votre gain**

Ces informations sont en permanence disponibles à l'écran.

- **LE PAIEMENT DE VOS GAINS**

A la fin de l'expérience, nous calculerons la moyenne de vos points gagnés à chacune des périodes. Cette moyenne sera convertie en Euro sur la base de 500 points

= 12 €. Cette somme vous sera payée en espèce de façon privée à la fin de l'expérience.

A cette somme sera ajoutée un forfait de 4 €. Si la moyenne de vos gains était négative (c'est à dire si vous avez perdu des points au cours de l'expérience), vos points négatifs seront retranchés à ce forfait suivant le même taux de conversion. Quels que soient vos gains, vous ne pouvez pas perdre d'argent.

Si vous avez à poser des questions, levez la main, une personne viendra y répondre. Il vous est demandé de ne pas parler au cours de cette expérience. Toute communication entraînera votre exclusion sans paiement des gains éventuels. Merci de suivre ces consignes.

2 Règles de l'expérience (homo p4)

Vous participez à une expérience dans laquelle vous pouvez gagner de l'argent. La somme d'argent que vous gagnerez dépendra de vos décisions ainsi que des décisions des autres participants de votre groupe. Toutes les décisions que vous aurez à prendre et toutes les informations dont vous disposerez se feront par le terminal informatique qui vous a été attribué. Des groupes de 8 personnes (vous et 7 autres participants) sont constitués au hasard au début de l'expérience. Cette expérience se déroule sur 15 périodes et vous serez en interaction avec les mêmes personnes tout au long de ces 15 périodes. Les conditions sont les mêmes pour tous les participants.

- **L'EXPERIENCE.**

Au cours de cette expérience, vous devez choisir un itinéraire routier (parmi deux itinéraires possibles, notés A et B) et une heure de départ pour vous rendre d'un lieu à un autre. Vous devez arriver à destination à une heure objectif précise (notée heure 0). Les heures de départ possibles sont les suivantes :

-9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, **0 (heure objectif)**, 1, 2, 3, 4.

Vous disposez à chacune des 15 périodes d'une dotation de 500 points. A ces 500 points vont se soustraire un coût de transport qui dépend des éléments suivants :

- 1- **Votre temps de transport** (c'est à dire le temps nécessaire pour vous rendre à destination) : chaque heure passée sur la route vous coûte $\alpha = 16$ points. Vous conserverez cette valeur tout au long de l'expérience.
- 2- Votre heure d'arrivée (c'est à dire votre heure de départ + votre temps de transport) :
 - ✓ **Si vous arrivez en avance (avant l'heure 0)**, vous subissez un coût de $\beta = 5$ points par heure d'avance.
 - ✓ **Si vous arrivez en retard (après l'heure 0)**, vous subissez un coût de $\gamma = 40$ points par heure de retard.
- 3- **Le péage** : le péage de l'itinéraire A est nul tandis que le péage de l'itinéraire B vous coûte 4 points.

- **COMMENT EST CALCULE VOTRE TEMPS DE TRANSPORT ?**

Votre temps de transport dépend de deux paramètres : le nombre de participants présents sur la route à l'heure où vous partez et le temps nécessaire à l'itinéraire pour absorber ces participants. Le nombre de participants présents sur l'itinéraire est le nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous plus le nombre de participants déjà sur l'itinéraire au moment où vous partez.

Chaque itinéraire a une capacité d'absorption différente qui détermine le nombre de participants qui peuvent emprunter l'itinéraire par heure sans qu'un embouteillage ne se forme. Plus le nombre de participants présents sur un itinéraire est important, plus le temps de transport augmente. La capacité de l'itinéraire A est de 1 participant par heure et la capacité de l'itinéraire B est de 2 participants par heure. Chaque itinéraire conserve la même capacité d'absorption au cours des 15 périodes de l'expérience.

Dans les tableaux suivants, est présenté le temps de transport en fonction du nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous et du nombre de participants déjà sur l'itinéraire au moment où vous partez.

Tableau A

Votre temps de transport sur l'itinéraire A	Nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous (vous y compris)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Nombre de participants déjà présents sur l'itinéraire au moment où vous partez	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	2	3	4	5	6	7	8		
	3	4	5	6	7	8			
	4	5	6	7	8				
	5	6	7	8					
	6	7	8						
	7	8							

Tableau B

Votre temps de transport sur l'itinéraire B	Nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous (vous y compris)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Nombre de participants déjà présents sur l'itinéraire au moment où vous partez	0	1	1	2	2	3	3	4	4
	1	1	2	2	3	3	4	4	
	2	2	2	3	3	4	4		
	3	2	3	3	4	4			
	4	3	3	4	4				
	5	3	4	4					
	6	4	4						
	7	4							

Exemples : les exemples suivants vous permettent de comprendre comment votre gain est calculé. Au cours de l'expérience, l'ordinateur effectuera ces calculs à votre place et vous informera des gains associés aux différentes heures de départ et aux deux itinéraires.

1^{er} exemple.

Parmi les 8 participants, supposons que vous seul choisissiez de partir à l'heure « -2 » sur l'itinéraire A et que le nombre de participants déjà sur l'itinéraire à l'heure « -2 » est nul :

Votre temps de transport est : **1 heure (voir le tableau A)**

Votre heure d'arrivée est : « -1 »

(heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 1 »), vous arrivez donc à destination avec 1 heure d'avance.

Votre gain est : $479 = 500 - (1*16) - (1*5)$
gain = dotation –(temps de transport * α) – (temps d’avance * β)

2^{ème} exemple.

Parmi les 8 participants, supposons que vous seul choisissiez de partir à l’heure « -2 » sur l’itinéraire B et que le nombre de participants déjà sur l’itinéraire à l’heure « -2 » est nul :

Votre temps de transport est : **1 heure (voir le tableau B)**
 Votre heure d’arrivée est : « -1 »
 (heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 1 »), vous arrivez donc à destination avec 1 heure d’avance.

Votre gain est : $475 = 500 - (1*16) - (1*5) - 4$
gain = dotation –(temps de transport * α) – (temps d’avance * β) – péage

3^{ème} exemple.

Parmi les 8 participants, supposons que 4 participants (y compris vous même) choisissent de partir à l’heure « -2 » sur l’itinéraire A et que le nombre de participants déjà sur l’itinéraire à l’heure « -2 » est 2 :

Votre temps de transport est : **6 heures (voir le tableau A)**
 Votre heure d’arrivée est : « 4 »
 (heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 6 »), vous arrivez donc à destination avec 4 heures de retard.

Votre gain est : $244 = 500 - (6*16) - (4*40)$
gain = dotation –(temps de transport * α) – (temps de retard* γ)

• COMMENT PRENDREZ-VOUS VOS DECISIONS ?

Sur votre écran d’ordinateur, trois zones seront présentes :

La première vous permet de tester différentes heures de départ sur chaque itinéraire pour connaître le gain associé en fonction des temps de transport possibles. Cette zone de test est présente en permanence à l’écran, et vous pouvez y avoir recours à n’importe quel moment de l’expérience.

La deuxième vous permet de saisir l’itinéraire et l’heure de départ choisis. C’est ce choix qui déterminera votre gain pour la période en cours. Pour valider votre choix, cliquez sur le bouton OK. Attention, une fois votre choix validé vous ne pouvez plus le modifier pour la période en cours.

La troisième vous informera **à chaque période** des éléments suivants :

- **L'itinéraire que vous avez choisi, L'Heure de départ que vous avez choisi, Votre temps de transport, Votre heure d'arrivée, Le nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous sur votre itinéraire (vous même y compris), Votre gain.**

Ces informations sont en permanence disponibles à l'écran.

- **LE PAIEMENT DE VOS GAINS**

A la fin de l'expérience, nous calculerons la moyenne de vos points gagnés à chacune des périodes. Cette moyenne sera convertie en Euro sur la base de 500 points = 12 €. Cette somme vous sera payée en espèce de façon privée à la fin de l'expérience.

A cette somme sera ajoutée un forfait de 4 €. Si la moyenne de vos gains était négative (c'est à dire si vous avez perdu des points au cours de l'expérience), vos points négatifs seront retranchés à ce forfait suivant le même taux de conversion. Quels que soient vos gains, vous ne pouvez pas perdre d'argent.

Si vous avez à poser des questions, levez la main, une personne viendra y répondre. Il vous est demandé de ne pas parler au cours de cette expérience. Toute communication entraînera votre exclusion sans paiement des gains éventuels. Merci de suivre ces consignes.

3 Règles de l'expérience (hetero p8)

Vous participez à une expérience dans laquelle vous pouvez gagner de l'argent. La somme d'argent que vous gagnerez dépendra de vos décisions ainsi que des décisions des autres participants de votre groupe. Toutes les décisions que vous aurez à prendre et toutes les informations dont vous disposerez se feront par le terminal informatique qui vous a été attribué. Des groupes de 8 personnes (vous et 7 autres participants) sont constitués au hasard au début de l'expérience. Cette expérience se déroule sur 15 périodes et vous serez en interaction avec les mêmes

personnes tout au long de ces 15 périodes. Les conditions sont les mêmes pour tous les participants.

- **L'EXPERIENCE.**

Au cours de cette expérience, vous devez choisir un itinéraire routier (parmi deux itinéraires possibles, notés A et B) et une heure de départ pour vous rendre d'un lieu à un autre. Vous devez arriver à destination à une heure objectif précise (notée heure 0). Les heures de départ possibles sont les suivantes :

-9, -8, -7, -6,-5, -4, -3, -2, -1, **0 (heure objectif)**, 1, 2, 3, 4

Vous disposez à chacune des 15 périodes d'une dotation de 500 points. A ces 500 points vont se soustraire un coût de transport qui dépend des éléments suivants :

- 1- **Votre temps de transport** (c'est à dire le temps nécessaire pour vous rendre à destination) : chaque heure passée sur la route vous coûte α points. α peut prendre l'une des valeurs suivantes : {11, 13, 16, 19}. L'ordinateur vous informera de la valeur qui vous est attribuée, les autres valeurs seront attribuées aux autres membres de votre groupe. Vous conserverez cette valeur tout au long de l'expérience.
- 2- Votre heure d'arrivée (c'est à dire votre heure de départ + votre temps de transport) :
 - ✓ **Si vous arrivez en avance (avant l'heure 0)**, vous subissez un coût de $\beta = 5$ points par heure d'avance.
 - ✓ **Si vous arrivez en retard (après l'heure 0)**, vous subissez un coût de $\gamma = 45$ points par heure de retard.
- 3- **Le péage** : le péage de l'itinéraire A est nul tandis que le péage de l'itinéraire B vous coûte 8 points.

- **COMMENT EST CALCULE VOTRE TEMPS DE TRANSPORT ?**

Votre temps de transport dépend de deux paramètres : le nombre de participants présents sur la route à l'heure où vous partez et le temps nécessaire à l'itinéraire pour absorber ces participants. Le nombre de participants présents sur l'itinéraire est le

nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous plus le nombre de participants déjà sur l'itinéraire au moment où vous partez.

Chaque itinéraire a une capacité d'absorption différente qui détermine le nombre de participants qui peuvent emprunter l'itinéraire par heure sans qu'un embouteillage ne se forme. Plus le nombre de participants présents sur un itinéraire est important, plus le temps de transport augmente. La capacité de l'itinéraire A est de 1 participant par heure et la capacité de l'itinéraire B est de 2 participants par heure. Chaque itinéraire conserve la même capacité d'absorption au cours des 15 périodes de l'expérience. Dans les tableaux suivants, est présenté le temps de transport en fonction du nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous et du nombre de participants déjà sur l'itinéraire au moment où vous partez.

Tableau A

Votre temps de transport sur l'itinéraire A		Nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous (vous y compris)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de participants déjà présents sur l'itinéraire au moment où vous partez	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	2	3	4	5	6	7	8		
	3	4	5	6	7	8			
	4	5	6	7	8				
	5	6	7	8					
	6	7	8						
	7	8							

Tableau B

Votre temps de transport sur l'itinéraire B		Nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous (vous y compris)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de participants déjà présents sur l'itinéraire au moment où vous partez	0	1	1	2	2	3	3	4	4
	1	1	2	2	3	3	4	4	
	2	2	2	3	3	4	4		
	3	2	3	3	4	4			
	4	3	3	4	4				

partez	5	3	4	4
	6	4	4	
	7	4		

Exemples : les exemples suivants vous permettent de comprendre comment votre gain est calculé. Au cours de l'expérience, l'ordinateur effectuera ces calculs à votre place et vous informera des gains associés aux différentes heures de départ et aux deux itinéraires.

1^{ère} exemple si votre coût unitaire de temps de transport (α) est 16.

Parmi les 8 participants, supposons que vous seul choisissiez de partir à l'heure « -2 » sur l'itinéraire A et que le nombre de participants déjà sur l'itinéraire à l'heure « -2 » est nul :

Votre temps de transport est : **1 heure (voir le tableau A)**

Votre heure d'arrivée est : « -1 »

(heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 1 »), vous arrivez donc à destination avec 1 heure d'avance.

Votre gain est : **479 = 500 - (1*16) - (1*5)**

$$\text{gain} = \text{dotation} - (\text{temps de transport} * \alpha) - (\text{temps d'avance} * \beta)$$

2^{ème} exemple si votre coût unitaire de temps de transport (α) est 16.

Parmi les 8 participants, supposons que vous seul choisissiez de partir à l'heure « -2 » sur l'itinéraire B et que le nombre de participants déjà sur l'itinéraire à l'heure « -2 » est nul :

Votre temps de transport est : **1 heure (voir le tableau B)**

Votre heure d'arrivée est : « -1 »

(heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 1 »), vous arrivez donc à destination avec 1 heure d'avance.

Votre gain est : **471 = 500 - (1*16) - (1*5) - 8**

$$\text{gain} = \text{dotation} - (\text{temps de transport} * \alpha) - (\text{temps d'avance} * \beta) - \text{péage}$$

3^{ème} exemple si votre coût unitaire de temps de transport (α) est 16.

Parmi les 8 participants, supposons que 4 participants (y compris vous même) choisissent de partir à l'heure « -2 » sur l'itinéraire A et que le nombre de participants déjà sur l'itinéraire à l'heure « -2 » est 2 :

Votre temps de transport est : **6 heures (voir le tableau A)**

Votre heure d'arrivée est : « 4 »

(heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 6 »), vous arrivez donc à destination avec 4 heures de retard.

Votre gain est : **224 = 500 - (6*16) - (4*45)**

$$\text{gain} = \text{dotation} - (\text{temps de transport} * \alpha) - (\text{temps de retard} * \gamma)$$

• COMMENT PRENDREZ-VOUS VOS DECISIONS ?

Sur votre écran d'ordinateur, trois zones seront présentes :

La première vous permet de tester différentes heures de départ sur chaque itinéraire pour connaître le gain associé en fonction des temps de transport possibles. Cette zone de test est présente en permanence à l'écran, et vous pouvez y avoir recours à n'importe quel moment de l'expérience.

La deuxième vous permet de saisir l'itinéraire et l'heure de départ choisis. C'est ce choix qui déterminera votre gain pour la période en cours. Pour valider votre choix, cliquez sur le bouton OK. Attention, une fois votre choix validé vous ne pouvez plus le modifier pour la période en cours.

La troisième vous informera **à chaque période** des éléments suivants :

- **L'itinéraire que vous avez choisi, L'Heure de départ que vous avez choisi, Votre temps de transport, Votre heure d'arrivée, Le nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous sur votre itinéraire (vous même y compris), Votre gain.**

Ces informations sont en permanence disponibles à l'écran.

• LE PAIEMENT DE VOS GAINS

A la fin de l'expérience, nous calculerons la moyenne de vos points gagnés à chacune des périodes. Cette moyenne sera convertie en Euro sur la base de 500 points = 12 €. Cette somme vous sera payée en espèce de façon privée à la fin de l'expérience.

A cette somme sera ajoutée un forfait de 4 €. Si la moyenne de vos gains était négative (c'est à dire si vous avez perdu des points au cours de l'expérience), vos points négatifs seront retranchés à ce forfait suivant le même taux de conversion. Quels que soient vos gains, vous ne pouvez pas perdre d'argent.

Si vous avez à poser des questions, levez la main, une personne viendra y répondre. Il vous est demandé de ne pas parler au cours de cette expérience. Toute communication entraînera votre exclusion sans paiement des gains éventuels. Merci de suivre ces consignes.

4 Règles de l'expérience (hetero P4)

Vous participez à une expérience dans laquelle vous pouvez gagner de l'argent. La somme d'argent que vous gagnerez dépendra de vos décisions ainsi que des décisions des autres participants de votre groupe. Toutes les décisions que vous aurez à prendre et toutes les informations dont vous disposerez se feront par le terminal informatique qui vous a été attribué. Des groupes de 8 personnes (vous et 7 autres participants) sont constitués au hasard au début de l'expérience. Cette expérience se déroule sur 15 périodes et vous serez en interaction avec les mêmes personnes tout au long de ces 15 périodes. Les conditions sont les mêmes pour tous les participants.

- **L'EXPERIENCE.**

Au cours de cette expérience, vous devez choisir un itinéraire routier (parmi deux itinéraires possibles, notés A et B) et une heure de départ pour vous rendre d'un lieu à un autre. Vous devez arriver à destination à une heure objectif précise (notée heure 0). Les heures de départ possibles sont les suivantes :

-9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, **0 (heure objectif)**, 1, 2, 3, 4

Vous disposez à chacune des 15 périodes d'une dotation de 500 points. A ces 500 points vont se soustraire un coût de transport qui dépend des éléments suivants :

- 1- **Votre temps de transport** (c'est à dire le temps nécessaire pour vous rendre à destination) : chaque heure passée sur la route vous coûte α points. α peut prendre l'une des valeurs suivantes : {11, 13, 16, 19}. L'ordinateur vous informera de la valeur qui vous est attribuée, les autres valeurs seront attribuées aux autres membres de votre groupe. Vous conserverez cette valeur tout au long de l'expérience.
- 2- Votre heure d'arrivée (c'est à dire votre heure de départ + votre temps de transport) :
 - ✓ **Si vous arrivez en avance (avant l'heure 0)**, vous subissez un coût de $\beta = 5$ points par heure d'avance.
 - ✓ **Si vous arrivez en retard (après l'heure 0)**, vous subissez un coût de $\gamma = 45$ points par heure de retard.

3- **Le péage** : le péage de l'itinéraire A est nul tandis que le péage de l'itinéraire B vous coûte 4 points.

• **COMMENT EST CALCULE VOTRE TEMPS DE TRANSPORT ?**

Votre temps de transport dépend de deux paramètres : le nombre de participants présents sur la route à l'heure où vous partez et le temps nécessaire à l'itinéraire pour absorber ces participants. Le nombre de participants présents sur l'itinéraire est le nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous plus le nombre de participants déjà sur l'itinéraire au moment où vous partez.

Chaque itinéraire a une capacité d'absorption différente qui détermine le nombre de participants qui peuvent emprunter l'itinéraire par heure sans qu'un embouteillage ne se forme. Plus le nombre de participants présents sur un itinéraire est important, plus le temps de transport augmente. La capacité de l'itinéraire A est de 1 participant par heure et la capacité de l'itinéraire B est de 2 participants par heure. Chaque itinéraire conserve la même capacité d'absorption au cours des 15 périodes de l'expérience.

Dans les tableaux suivants, est présenté le temps de transport en fonction du nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous et du nombre de participants déjà sur l'itinéraire au moment où vous partez.

Tableau A

Votre temps de transport sur l'itinéraire A		Nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous (vous y compris)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Nombre de participants déjà présents sur l'itinéraire au moment où vous partez	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	1	2	3	4	5	6	7	8	
	2	3	4	5	6	7	8		
	3	4	5	6	7	8			
	4	5	6	7	8				
	5	6	7	8					
	6	7	8						
	7	8							

Tableau B

Votre temps de transport sur l'itinéraire B	Nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous (vous y compris)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Nombre de participants déjà présents sur l'itinéraire au moment où vous partez	0	1	1	2	2	3	3	4	4
	1	1	2	2	3	3	4	4	
	2	2	2	3	3	4	4		
	3	2	3	3	4	4			
	4	3	3	4	4				
	5	3	4	4					
	6	4	4						
	7	4							

Exemples : les exemples suivants vous permettent de comprendre comment votre gain est calculé. Au cours de l'expérience, l'ordinateur effectuera ces calculs à votre place et vous informera des gains associés aux différentes heures de départ et aux deux itinéraires.

1^{ère} exemple si votre coût unitaire de temps de transport (α) est 16.

Parmi les 8 participants, supposons que vous seul choisissiez de partir à l'heure « -2 » sur l'itinéraire A et que le nombre de participants déjà sur l'itinéraire à l'heure « -2 » est nul :

Votre temps de transport est : **1 heure (voir le tableau A)**

Votre heure d'arrivée est : « -1 »

(heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 1 »), vous arrivez donc à destination avec 1 heure d'avance.

Votre gain est : **479 = 500 - (1*16) - (1*5)**

gain = dotation - (temps de transport * α) - (temps d'avance * β)

2^{ème} exemple si votre coût unitaire de temps de transport (α) est 16.

Parmi les 8 participants, supposons que vous seul choisissiez de partir à l'heure « -2 » sur l'itinéraire B et que le nombre de participants déjà sur l'itinéraire à l'heure « -2 » est nul :

Votre temps de transport est : **1 heure (voir le tableau B)**

Votre heure d'arrivée est : « -1 »

(heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 1 »), vous arrivez donc à destination avec 1 heure d'avance.

Votre gain est : **475 = 500 - (1*16) - (1*5) - 4**

gain = dotation - (temps de transport * α) - (temps d'avance * β) -

péage

3^{ème} exemple si votre coût unitaire de temps de transport (α) est 16.

Parmi les 8 participants, supposons que 4 participants (y compris vous même) choisissent de partir à l'heure « -2 » sur l'itinéraire A et que le nombre de participants déjà sur l'itinéraire à l'heure « -2 » est 2 :

Votre temps de transport est : **6 heures (voir le tableau A)**

Votre heure d'arrivée est : **« 4 »**

(heure de départ + temps de transport = « -2 » + « 6 »), vous arrivez donc à destination avec 4 heures de retard.

Votre gain est : **224 = 500 - (6*16) - (4*45)**

gain = dotation - (temps de transport * α) - (temps de retard * γ)

• **COMMENT PRENDREZ-VOUS VOS DECISIONS ?**

Sur votre écran d'ordinateur, trois zones seront présentes :

La première vous permet de tester différentes heures de départ sur chaque itinéraire pour connaître le gain associé en fonction des temps de transport possibles. Cette zone de test est présente en permanence à l'écran, et vous pouvez y avoir recours à n'importe quel moment de l'expérience.

La deuxième vous permet de saisir l'itinéraire et l'heure de départ choisis. C'est ce choix qui déterminera votre gain pour la période en cours. Pour valider votre choix, cliquez sur le bouton OK. Attention, une fois votre choix validé vous ne pouvez plus le modifier pour la période en cours.

La troisième vous informera **à chaque période** des éléments suivants :

- **L'itinéraire que vous avez choisi, L'Heure de départ que vous avez choisi, Votre temps de transport, Votre heure d'arrivée, Le nombre de participants qui ont choisi la même heure de départ que vous sur votre itinéraire (vous même y compris), Votre gain.**

Ces informations sont en permanence disponibles à l'écran.

• **LE PAIEMENT DE VOS GAINS**

A la fin de l'expérience, nous calculerons la moyenne de vos points gagnés à chacune des périodes. Cette moyenne sera convertie en Euro sur la base de 500 points

= 12 €. Cette somme vous sera payée en espèce de façon privée à la fin de l'expérience.

A cette somme sera ajoutée un forfait de 4 €. Si la moyenne de vos gains était négative (c'est à dire si vous avez perdu des points au cours de l'expérience), vos points négatifs seront retranchés à ce forfait suivant le même taux de conversion. Quels que soient vos gains, vous ne pouvez pas perdre d'argent.

Si vous avez à poser des questions, levez la main, une personne viendra y répondre. Il vous est demandé de ne pas parler au cours de cette expérience. Toute communication entraînera votre exclusion sans paiement des gains éventuels. Merci de suivre ces consignes.

Annexe 3 : Résultats de l'expérience

5 Evolution des Heures de Départ pendant l'expérience. Calcul des Moyennes et des Ecart Types.

Moyenne choix_h	id xp		choix_i		Moyenne hétéro-P4	hétéro-P8		Moyenne hétéro-P8	homo-P4		Moyenne homo-P4	homo-P8		Moyenne homo-P8
	hétéro-P4													
	A	B	A	B		A	B		A	B				
période														
	1	-2,45	-2,86	-2,69	-2,20	-3,52	-2,83	-2,90	-3,04	-2,98	-2,67	-2,85	-2,77	
	2	-2,80	-2,87	-2,85	-2,55	-2,77	-2,67	-2,53	-2,73	-2,67	-2,95	-2,45	-2,65	
	3	-2,13	-2,69	-2,50	-3,07	-2,24	-2,48	-2,65	-2,65	-2,65	-2,10	-2,18	-2,15	
	4	-1,83	-2,33	-2,15	-2,67	-1,87	-2,17	-2,43	-2,52	-2,48	-2,52	-2,20	-2,35	
	5	-2,20	-2,39	-2,31	-2,64	-1,96	-2,31	-2,50	-2,65	-2,58	-2,29	-2,25	-2,27	
	6	-2,19	-2,22	-2,21	-2,89	-2,03	-2,35	-2,05	-2,41	-2,27	-2,71	-2,03	-2,27	
	7	-1,82	-2,39	-2,19	-2,71	-2,26	-2,42	-2,53	-2,35	-2,42	-2,32	-2,00	-2,13	
	8	-2,47	-2,10	-2,25	-2,70	-2,18	-2,40	-2,57	-2,15	-2,27	-2,57	-2,10	-2,38	
	9	-2,19	-2,00	-2,06	-2,90	-2,04	-2,42	-2,07	-2,03	-2,04	-2,29	-1,92	-2,10	
	10	-2,36	-1,94	-2,06	-2,48	-2,04	-2,25	-2,33	-2,33	-2,33	-2,44	-2,00	-2,17	
	11	-2,31	-2,34	-2,33	-2,76	-2,04	-2,35	-2,65	-2,04	-2,29	-2,38	-2,15	-2,25	
	12	-2,55	-2,31	-2,42	-2,47	-1,90	-2,13	-2,21	-2,41	-2,35	-2,71	-2,03	-2,27	
	13	-2,56	-2,22	-2,33	-2,14	-1,85	-1,98	-2,63	-2,09	-2,27	-2,35	-2,00	-2,15	
	14	-2,29	-2,32	-2,31	-2,41	-1,84	-2,04	-2,28	-2,37	-2,33	-2,40	-1,86	-2,08	
	15	-2,65	-2,32	-2,46	-2,35	-2,00	-2,15	-2,31	-2,23	-2,25	-2,48	-1,89	-2,15	
Total		-2,32	-2,36	-2,34	-2,58	-2,15	-2,33	-2,45	-2,39	-2,41	-2,47	-2,13	-2,28	

Ecartypep choix_h	id xp		choix_i		Moyenne hétéro-P4	hétéro-P8		Moyenne hétéro-P8	homo-P4		Moyenne homo-P4	homo-P8		Moyenne homo-P8
	hétéro-P4													
	A	B	A	B		A	B		A	B				
période														
	1	1,43	1,48	-2,69	2,37	1,79	-2,83	1,51	1,45	-2,98	1,70	1,04	-2,77	
	2	2,36	1,13	-2,85	1,75	1,45	-2,67	1,50	1,48	-2,67	1,85	1,63	-2,65	
	3	1,11	1,83	-2,50	1,33	1,06	-2,48	1,75	1,21	-2,65	1,30	1,07	-2,15	
	4	1,26	1,14	-2,15	1,56	1,23	-2,17	1,68	1,00	-2,48	1,69	1,17	-2,35	
	5	1,33	1,29	-2,31	0,97	1,00	-2,31	1,83	1,21	-2,58	1,06	1,16	-2,27	
	6	1,42	1,05	-2,21	1,45	1,17	-2,35	2,11	1,22	-2,27	1,36	1,00	-2,27	
	7	1,38	0,94	-2,19	1,18	1,05	-2,42	1,46	1,06	-2,42	0,98	0,87	-2,13	
	8	1,14	1,12	-2,25	1,38	0,97	-2,40	1,45	1,00	-2,27	1,40	1,04	-2,38	
	9	1,13	0,87	-2,06	1,31	1,32	-2,42	1,58	1,04	-2,04	0,84	0,91	-2,10	
	10	1,29	0,80	-2,06	1,10	1,00	-2,25	1,19	1,20	-2,33	0,83	0,93	-2,17	
	11	1,16	0,77	-2,33	1,06	0,96	-2,35	1,71	1,12	-2,29	0,95	0,93	-2,25	
	12	1,16	0,91	-2,42	0,99	0,80	-2,13	0,94	1,40	-2,35	1,40	1,06	-2,27	
	13	1,27	0,86	-2,33	0,99	0,89	-1,98	1,73	1,01	-2,27	0,96	0,93	-2,15	
	14	1,71	0,74	-2,31	0,84	0,77	-2,04	1,24	1,47	-2,33	1,07	0,91	-2,08	
	15	1,42	0,97	-2,46	1,24	0,80	-2,15	1,20	1,57	-2,25	1,10	0,79	-2,15	
Total		1,39	1,13	-2,34	1,40	1,17	-2,33	1,60	1,28	-2,41	1,29	1,08	-2,28	

6 Distribution des Heures de Départ pendant l'expérience. Analyse : par itinéraire et par traitement. Calcul des

fréquences par itinéraire.

choix_h	hétéro-P4		Somme hétéro-P4	hétéro-P8		Somme hétéro-P8	homo-P4		Somme homo-P4	homo-P8		Somme homo-P8
	A	B		A	B		A	B		A	B	
-9	0,39%	0,22%	0,28%	0,00%	0,24%	0,14%	0,00%	0,43%	0,28%	0,00%	0,25%	0,14%
-8	0,39%	0,22%	0,28%	0,00%	0,24%	0,14%	0,39%	0,22%	0,28%	0,00%	0,00%	0,00%
-7	0,39%	0,22%	0,28%	0,33%	0,24%	0,28%	1,18%	0,22%	0,56%	0,32%	0,00%	0,14%
-6	1,56%	0,22%	0,69%	1,33%	0,48%	0,83%	5,10%	0,65%	2,22%	1,60%	0,00%	0,69%
-5	2,72%	1,08%	1,67%	5,32%	0,24%	2,36%	5,88%	1,94%	3,33%	3,85%	0,49%	1,94%
-4	10,12%	12,10%	11,39%	17,61%	10,02%	13,19%	6,67%	15,70%	12,50%	13,46%	12,25%	12,78%
-3	24,90%	26,57%	25,97%	28,24%	21,96%	24,58%	19,22%	22,58%	21,39%	29,17%	18,14%	22,92%
-2	28,40%	37,37%	34,17%	23,92%	34,84%	30,28%	33,33%	30,11%	31,25%	26,28%	35,78%	31,67%
-1	28,40%	21,60%	24,03%	21,26%	30,79%	26,81%	24,71%	27,74%	26,67%	23,08%	32,84%	28,61%
0	1,95%	0,22%	0,83%	0,66%	0,24%	0,42%	3,14%	0,22%	1,25%	1,28%	0,25%	0,69%
1	0,39%	0,00%	0,14%	0,33%	0,24%	0,28%	0,00%	0,22%	0,14%	0,96%	0,00%	0,42%
2	0,39%	0,00%	0,14%	0,33%	0,48%	0,42%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
3	0,00%	0,22%	0,14%	0,33%	0,00%	0,14%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
4	0,00%	0,00%	0,00%	0,33%	0,00%	0,14%	0,39%	0,00%	0,14%	0,00%	0,00%	0,00%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

7 Distribution des Choix d'Itinéraire pendant l'expérience. Analyse par traitement. Calcul des fréquences par

répétition.

période	homo-P8			Total	homo-P8			Total	hétéro-P4			Total	hétéro-P8			Total
	A	B			A	B			A	B			A	B		
1	43,75%	56,25%	100,00%	43,75%	56,25%	100,00%	41,67%	58,33%	100,00%	52,08%	47,92%	100,00%				
2	39,58%	60,42%	100,00%	39,58%	60,42%	100,00%	20,83%	79,17%	100,00%	45,83%	54,17%	100,00%				
3	41,67%	58,33%	100,00%	41,67%	58,33%	100,00%	33,33%	66,67%	100,00%	29,17%	70,83%	100,00%				
4	47,92%	52,08%	100,00%	47,92%	52,08%	100,00%	37,50%	62,50%	100,00%	37,50%	62,50%	100,00%				
5	50,00%	50,00%	100,00%	50,00%	50,00%	100,00%	41,67%	58,33%	100,00%	52,08%	47,92%	100,00%				
6	35,42%	64,58%	100,00%	35,42%	64,58%	100,00%	33,33%	66,67%	100,00%	37,50%	62,50%	100,00%				
7	39,58%	60,42%	100,00%	39,58%	60,42%	100,00%	35,42%	64,58%	100,00%	35,42%	64,58%	100,00%				
8	58,33%	41,67%	100,00%	58,33%	41,67%	100,00%	39,58%	60,42%	100,00%	41,67%	58,33%	100,00%				
9	50,00%	50,00%	100,00%	50,00%	50,00%	100,00%	33,33%	66,67%	100,00%	43,75%	56,25%	100,00%				
10	37,50%	62,50%	100,00%	37,50%	62,50%	100,00%	29,17%	70,83%	100,00%	47,92%	52,08%	100,00%				
11	43,75%	56,25%	100,00%	43,75%	56,25%	100,00%	33,33%	66,67%	100,00%	43,75%	56,25%	100,00%				
12	35,42%	64,58%	100,00%	35,42%	64,58%	100,00%	45,83%	54,17%	100,00%	39,58%	60,42%	100,00%				
13	41,67%	58,33%	100,00%	41,67%	58,33%	100,00%	33,33%	66,67%	100,00%	43,75%	56,25%	100,00%				
14	41,67%	58,33%	100,00%	41,67%	58,33%	100,00%	35,42%	64,58%	100,00%	35,42%	64,58%	100,00%				
15	43,75%	56,25%	100,00%	43,75%	56,25%	100,00%	41,67%	58,33%	100,00%	41,67%	58,33%	100,00%				
Total	43,33%	56,67%	100,00%	43,33%	56,67%	100,00%	35,69%	64,31%	100,00%	41,81%	58,19%	100,00%				

PREDIT 1996-2000

8 Evolution des Temps de Transport pendant l'expérience. Calcul des Moyennes et des Ecart Types.

Moyenne TT	id xp choix_i		Moyenne hétéro-P4	hétéro-P8		Moyenne hétéro-P8	homo-P4		Moyenne homo-P4	homo-P8		Moyenne homo-P8
	hétéro-P4			A B			A B			A B		
période	A	B		A	B		A	B		A	B	
1	1,90	1,36	1,58	1,56	1,13	1,35	1,40	1,21	1,29	1,48	1,22	1,33
2	1,20	1,26	1,25	1,86	1,12	1,46	1,40	1,24	1,29	1,74	1,45	1,56
3	1,69	1,19	1,35	1,36	1,29	1,31	1,59	1,55	1,56	1,70	1,11	1,35
4	1,56	1,10	1,27	1,44	1,30	1,35	1,29	1,11	1,19	1,52	1,12	1,31
5	1,85	1,21	1,48	2,20	1,30	1,77	1,91	1,23	1,54	2,04	1,25	1,65
6	2,06	1,56	1,73	1,50	1,40	1,44	1,47	1,14	1,27	1,65	1,45	1,52
7	1,47	1,61	1,56	1,76	1,32	1,48	1,71	1,00	1,25	1,74	1,55	1,63
8	1,89	1,17	1,46	1,50	1,43	1,46	1,36	1,18	1,23	1,86	1,30	1,63
9	1,69	1,41	1,50	1,71	1,30	1,48	1,36	1,47	1,44	2,54	1,00	1,77
10	1,29	1,68	1,56	1,91	1,12	1,50	1,20	1,15	1,17	1,67	1,30	1,44
11	1,69	1,59	1,63	2,00	1,30	1,60	1,50	1,21	1,33	2,05	1,52	1,75
12	1,55	1,19	1,35	1,32	1,31	1,31	1,50	1,18	1,27	1,29	1,19	1,23
13	1,38	1,28	1,31	1,67	1,11	1,35	1,69	1,28	1,42	1,60	1,11	1,31
14	1,47	1,61	1,56	1,88	1,55	1,67	1,72	1,10	1,33	1,40	1,39	1,40
15	1,70	1,36	1,50	1,75	1,46	1,58	1,23	1,37	1,33	1,48	1,22	1,33
Total	1,65	1,38	1,47	1,71	1,30	1,48	1,50	1,23	1,33	1,74	1,28	1,48

Ecartypep TT	id xp choix_i		Ecartypep hétéro-P4	hétéro-P8		Ecartypep hétéro-P8	homo-P4		Ecartypep homo-P4	homo-P8		Ecartypep homo-P8
	hétéro-P4			A B			A B			A B		
période	A	B		A	B		A	B		A	B	
1	0,70	0,67	0,73	0,85	0,34	0,69	0,49	0,41	0,45	0,50	0,42	0,47
2	0,40	0,44	0,43	0,76	0,32	0,68	0,80	0,43	0,58	0,78	0,50	0,64
3	0,77	0,39	0,59	0,48	0,71	0,65	0,49	0,76	0,67	0,90	0,31	0,69
4	0,76	0,30	0,57	0,50	0,46	0,48	0,45	0,31	0,39	0,71	0,32	0,58
5	0,65	0,41	0,61	0,75	0,46	0,77	0,95	0,42	0,79	0,73	0,43	0,72
6	1,34	0,75	1,02	0,50	0,49	0,50	0,75	0,34	0,57	0,76	0,50	0,61
7	0,50	0,75	0,67	0,73	0,47	0,61	0,75	0,00	0,56	0,64	0,50	0,56
8	0,91	0,38	0,73	0,50	0,49	0,50	0,48	0,38	0,42	0,87	0,46	0,78
9	0,46	0,49	0,50	0,82	0,46	0,68	0,48	0,74	0,67	1,19	0,00	1,14
10	0,45	0,47	0,50	0,72	0,32	0,68	0,40	0,36	0,37	0,75	0,46	0,61
PREDIT 1996-2000	0,49	0,49	0,78	1,07	0,46	0,86	0,50	0,41	0,47	1,05	0,79	0,95
12	0,50	0,39	0,48	0,46	0,46	0,46	0,50	0,38	0,44	0,46	0,40	0,42
13	0,48	0,45	0,46	0,71	0,31	0,59	0,77	0,45	0,61	0,66	0,31	0,55
14	0,50	0,49	0,50	0,90	0,50	0,60	0,72	0,20	0,50	0,40	0,40	0,40

9 Distribution des Temps de Transport pendant l'expérience. Calcul des fréquences par Temps de Transport.

NB TT	id xp choix_i		Somme hétéro-P4	hétéro-P8		Somme hétéro-P8	homo-P4		Somme homo-P4	homo-P8		Somme homo-P8
	hétéro-P4			A	B		A	B		A	B	
TT	A	B		A	B		A	B		A	B	
1	50,97%	65,01%	60,00%	48,84%	70,88%	61,67%	59,22%	80,00%	72,64%	47,44%	72,79%	61,81%
2	36,58%	32,18%	33,75%	33,89%	27,92%	30,42%	31,37%	16,77%	21,94%	35,26%	25,98%	30,00%
3	9,34%	2,81%	5,14%	14,29%	1,19%	6,67%	9,41%	3,23%	5,42%	13,46%	1,23%	6,53%
4	3,11%	0,00%	1,11%	2,99%	0,00%	1,25%	0,00%	0,00%	0,00%	3,85%	0,00%	1,67%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

10 Impact du Temps de Transport sur le changement d'itinéraire pendant l'expérience. Calcul des fréquences par type de changement pour chaque temps de transport.

NB Sens chgt lti		Sens chgt lti				
id xp	TT	AA	AB	BA	BB	Total
hétéro-P4	1	24,75%	5,20%	9,90%	60,15%	100,00%
	2	19,82%	18,94%	16,74%	44,49%	100,00%
	3	21,21%	39,39%	6,06%	33,33%	100,00%
	4	62,50%	37,50%	0,00%	0,00%	100,00%
Somme hétéro-P4		23,36%	11,90%	11,90%	52,83%	100,00%
hétéro-P8	1	26,57%	5,31%	10,87%	57,25%	100,00%
	2	29,13%	20,39%	17,48%	33,01%	100,00%
	3	41,67%	47,92%	8,33%	2,08%	100,00%
	4	25,00%	75,00%	0,00%	0,00%	100,00%
Somme hétéro-P8		28,42%	13,39%	12,65%	45,54%	100,00%
homo-P4	1	20,58%	8,44%	10,91%	60,08%	100,00%
	2	28,29%	22,37%	15,13%	34,21%	100,00%
	3	32,35%	38,24%	14,71%	14,71%	100,00%
Somme homo-P4		22,92%	13,10%	12,05%	51,93%	100,00%
homo-P8	1	28,33%	4,84%	9,69%	57,14%	100,00%
	2	27,22%	12,22%	12,22%	48,33%	100,00%

11 Evolution des Ecart de Changement d'Heure de Départ selon le temps de transport. Moyennes et Ecart Types.

Moyenne ecart cht HD		id xp		choix_i		hétéro-P4		Moyenne hétéro-P4		hétéro-P8		Moyenne hétéro-P8		homo-P4		Moyenne homo-P4		homo-P8		Moyenne homo-P8		
TT	période	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
1	1	0,83	-1,00	-0,59	0,80	0,38	1,17	0,18	0,53	0,73	-0,05	0,22										
	2	1,00	0,21	0,39	0,43	0,52	0,33	-0,04	0,08	0,67	0,69	0,68										
	3	0,88	0,69	0,74	0,41	0,45	0,00	0,58	0,42	0,00	-0,28	-0,19										
	4	0,18	-0,15	-0,05	0,05	0,23	-0,27	0,21	0,03	0,57	0,09	0,28										
	5	0,67	0,36	0,43	0,13	0,29	2,18	0,40	1,03	0,50	0,11	0,21										
	6	0,56	0,16	0,29	-0,11	0,44	0,00	0,04	0,03	0,56	0,24	0,35										
	7	-0,56	0,41	0,08	0,38	0,39	0,75	0,06	0,21	-0,14	-0,15	-0,15										
	8	0,44	0,33	0,36	0,25	0,42	0,44	0,11	0,19	0,82	0,21	0,48										
	9	0,80	0,05	0,21	0,21	0,60	-0,78	-0,09	-0,28	0,00	-0,08	-0,07										
	10	0,50	0,27	0,38	-0,09	0,03	-0,08	0,14	0,08	0,44	0,05	0,17										
	11	0,27	0,62	0,46	0,05	0,19	0,30	-0,09	0,03	-0,56	0,06	-0,15										
	12	0,20	0,19	0,19	0,20	0,24	0,14	0,14	0,14	0,50	0,12	0,24										
	13	0,10	0,17	0,15	-0,08	0,03	0,50	0,09	0,19	0,20	0,00	0,06										
	14	0,11	0,25	0,19	-0,14	0,14	0,25	0,07	0,11	0,17	0,00	0,07										
Moyenne 1		0,38	0,17	0,23	0,19	0,31	0,35	0,12	0,19	0,34	0,05	0,15										
2	1	0,40	1,50	0,71	0,67	-1,40	-0,25	-0,17	-0,21	0,20	-0,50	-0,06										
	2	0,00	0,30	0,25	-0,67	-0,67	-0,25	-0,25	-0,25	1,00	-0,46	0,00										
	3	0,20	-1,17	-0,55	1,20	-1,20	0,20	-0,43	-0,06	2,00	-1,00	0,20										
	4	0,25	0,00	0,14	-0,38	-1,22	-0,82	-0,33	-0,67	-0,67	-1,00	-0,78										
	5	-0,09	-0,50	-0,24	0,00	-0,57	-0,24	0,00	-1,00	-0,75	0,09	-0,33	-0,06									
	6	0,50	0,00	0,10	-0,44	-0,92	-0,71	-0,33	-1,25	-0,86	-0,20	-0,29	-0,26									
	7	-0,63	0,00	-0,29	-0,71	-0,40	-0,53	-0,33	-0,33	-0,33	-0,40	-0,25	-0,31									
	8	-0,33	-0,80	-0,63	-0,10	-0,92	-0,55	1,20	-0,33	0,36	0,08	0,67	0,28									
	9	-0,18	-0,23	-0,21	-0,20	-1,13	-0,77	-0,20	0,17	0,00	0,29	0,29										
	10	-1,00	-0,74	-0,78	-0,09	-1,00	-0,29	0,00	-0,20	-0,13	-0,67	-0,60										
	11	-0,50	-0,32	-0,33	0,22	0,00	0,12	0,00	-0,67	-0,25	0,25	0,25										
	12	0,17	-0,80	-0,12	0,17	-0,22	-0,07	-0,14	0,00	-0,08	0,00	-0,50	-0,27									
	13	0,00	-0,44	-0,27	0,13	-0,67	-0,09	-0,20	-0,67	-0,50	0,25	-0,33	0,09									
	14	-0,88	-0,21	-0,41	0,67	-0,65	-0,45	0,29	0,00	0,20	-0,25	-0,27	-0,26									
Moyenne 2		-0,14	-0,31	-0,24	-0,18	-0,65	-0,42	-0,40	-0,22	0,04	-0,32	-0,14										
3	1	-0,25	-0,33	-0,29	0,17	0,17	0,00	0,00	0,00	1,75	1,75											
	2				0,20	0,20	0,00	-0,40	-0,40	-0,67	-0,67											
	3	-0,67		-0,67	-1,60	-1,60				0,33	0,33											
	4	-2,33		-2,33						-0,57	-0,57											
	5	-1,00		-1,00	-0,40	-0,40	-1,22	-1,22	-1,22	-0,57	-0,57											
	6		-0,80	-0,80			-0,67	-0,67	-0,67	1,00	1,00											
	7		0,00	0,00	-0,33	-0,33	0,33	0,33	0,33	-0,50	-0,50											
	8	0,29		0,29						-0,33	-0,33											
	9				0,00	0,00			-1,00	-1,00	-0,33	-0,33										
	10				-0,40	-0,40				0,00	0,00											
	11									0,33	0,00	0,18										
	13				-1,00	-1,00	-0,67	-0,67	-0,67	0,00	0,00											
	14				0,17	0,17	-0,67	-0,67	-0,67													
	Moyenne 3		-0,55	-0,38	-0,48	-0,16	-1,60	-0,31	-0,70	-0,68	0,05	0,00	0,04									
4	6	-0,80		-0,80																		
	8																					
	9																					
	11	-2,67		-2,67	1,00	1,00				-0,50	-0,50											
Moyenne 4		-1,50		-1,50	1,00	1,00																
Total		0,05	0,00	0,02	0,20	-0,06	0,05	0,13	0,01	0,05	0,16	-0,04	0,04									

Ecartypep ecart cht HD		id xp choix_i		Ecartypep hétéro-P4		hétéro-P8		Ecartypep hétéro-P8		homo-P4		Ecartypep homo-P4		homo-P8		Ecartypep homo-P8					
TT	période	A	B	Ecartypep hétéro-P4		hétéro-P8		Ecartypep hétéro-P8		homo-P4		Ecartypep homo-P4		homo-P8		Ecartypep homo-P8					
1	1	1,95	2,39	2,42		2,30 1,86		2,12		1,46 2,41		2,17		1,96 1,76		2,05 1,71					
Moyenne HA	1	1,95	2,39	2,42	2,30	1,86	2,12	1,46	2,41	2,17	1,96	1,76	2,05	1,71							
	hétéro-P4 3	0,60	Moyenne hétéro-P4	hétéro-P4	hétéro-P8	1,26	Moyenne hétéro-P8	homo-P4 1,07	1,24	Moyenne homo-P4	1,37	1,08	1,22								
période	A	4	B	1,27	0,76	A	0,94	B	0,80	1,13	A	0,7	B	1,14	0,87	1,14	1,35	B	1,08	1,22	
	1	-0,55	-1,10	0,71	-1,10	0,85	0,64	2,04	2,39	0,60	-1,48	1,16	-1,50	2,52	-1,82	0,66	-1,69	-1,19	-0,63	1,98	1,44
	2	-1,60	-1,71	0,59	-1,60	0,84	0,68	1,89	1,65	1,20	1,66	-1,13	2,66	-1,48	0,34	-1,35	-1,27	-0,88	1,00	1,08	
	3	-0,44	-2,19	1,24	-1,15	1,94	0,71	0,73	1,65	1,09	1,01	-1,06	0,97	-1,48	0,95	-1,09	-1,24	-1,03	1,01	0,91	
	4	-0,28	0,58	1,03	-0,88	0,95	0,71	1,27	0,94	0,83	-1,17	1,04	-1,06	1,07	-1,10	0,41	-0,65	-1,40	0,56	1,06	
	5	-0,30	0,23	0,51	-0,88	0,71	0,22	1,29	0,57	1,44	-0,81	1,47	-1,14	1,47	-1,41	0,28	-1,29	-1,00	0,78	1,04	
	6	-0,13	0,68	0,45	-0,83	0,54	0,44	0,49	0,65	0,42	-0,54	0,49	-0,59	0,86	-1,42	0,52	-1,04	-0,25	0,60	0,63	
	7	-0,32	0,56	0,74	-0,48	0,64	0,39	0,74	0,63	0,69	-0,92	0,72	-0,58	0,46	-1,28	0,51	-1,03	-1,07	-0,58	1,03	
	8	-0,32	0,77	0,85	-0,63	0,82	0,94	0,64	0,94	0,51	-0,94	0,55	-0,82	0,35	-1,36	0,69	-1,04	-0,58	-0,95	1,02	
	9	-0,58	0,93	0,64	-0,79	0,70	0,20	0,78	0,75	0,57	-0,94	0,66	-1,21	0,71	-0,97	0,41	-1,04	-0,20	-0,50	0,57	
	10	-0,44	0,87	0,43	-0,56	0,66	0,19	0,86	0,74	0,64	-0,94	0,81	-0,71	1,30	-0,56	0,38	-0,87	0,25	0,34	0,45	
	Moyenne	1	0,38	0,17	-0,50	0,57	0,58	0,92	0,19	-0,75	3,01	-1,13	0,35	1,19	1,12	-1,17	-0,24	0,24	0,05	0,73	
	11	-0,63	-0,75	0,50	-0,71	0,96	0,76	2,50	0,74	0,47	-0,75	1,03	-1,15	0,83	-0,82	0,83	-0,94	-0,98	-0,50	0,90	
	12	-1,00	0,75	1,10	-1,06	1,09	1,15	1,15	0,59	0,47	-0,81	1,17	-0,71	1,08	-1,24	0,73	-1,08	-1,41	-0,84	1,38	
	13	-1,19	0,84	0,82	-1,02	1,16	1,16	1,17	0,59	1,13	-0,63	1,29	-0,94	1,77	-0,80	0,47	-0,85	-0,75	0,89	0,93	
	14	-0,82	1,00	0,96	-0,75	1,00	0,53	1,67	0,29	0,90	-0,38	1,44	-0,56	0,00	-1,27	0,58	-1,06	-1,00	-2,15	1,07	
	15	-0,95	0,56	0,50	-0,96	0,54	0,60	0,83	0,54	0,86	-0,56	0,88	-1,08	0,94	-0,86	0,83	-0,92	-1,03	-0,57	0,81	
Total		-0,67	-0,98	0,47	-0,87	1,03	0,86	1,48	0,85	1,28	-0,85	1,38	-0,95	0,47	-1,16		-1,03	-0,73	-0,94	1,03	
	8	0,47	0,75		0,70	0,94	1,93				1,62	0,98	1,80			1,67	0,86	0,47	0,80		
	9	0,57	1,42		1,12	0,75	1,36				1,25	0,40	0,90			0,74	1,16		1,16		
	10	0,00	0,90		0,83	1,24	0,00				1,16	0,00	0,75			0,60	0,75	0,50	0,61		
	11	0,50	0,80		0,78	1,47	1,12				1,32	0,77	0,75			0,83	0,83	0,83	0,83		
Ecartypep HA	id xp	12	choix_i	1,40	0,75	1,32	0,37	0,79			0,68	0,64	0,00			0,47	0,63	0,76	0,75		
	hétéro-P4	0,82	Ecartypep hétéro-P4	hétéro-P8	0,78	Ecartypep hétéro-P8	homo-P4	0,75	1,15	Ecartypep homo-P4	1,12	homo-P8	0,47	Ecartypep homo-P8	0,68						
période	A	14	B	0,60	1,10	A	1,03	B	0,47	1,19	A	0,70	B	0,70	0,00	A	0,66	B	0,45	0,55	
Moyenne	2	1,75	-0,14	0,50	-0,31	1,67	2,40	-0,18	1,86	-0,65	2,33	1,77	0,04	1,68	1,40	1,71	0,29	-0,32	1,37		
	3	2,45	1,99	0,20	0,47	1,55	0,88	2,03	1,34	1,54	1,85	0,34	1,82	1,60	1,68	1,44	1,78		1,66		
	4	1,62	1,98			1,94		1,33	0,75	1,33	1,37	0,75	1,89	1,00	1,55	1,68	0,98	1,13	0,83		
	5	1,68	0,94	0,20		1,45	0,94	1,87	1,43	1,62	1,64	1,62	1,91	1,10	1,36	1,54	1,33	1,32	1,70		
	6	1,74	2,62	1,49		1,65	2,62	1,87	1,43	1,62	1,64	1,62	1,91	1,10	1,36	1,54	1,33	1,32	1,70		
	7	2,15	0,00	1,41		1,71	0,00	1,58	1,24	1,24	1,43	0,92	2,53	1,39	2,04	2,04	0,41	1,19	0,47		
	8	1,57	1,38		0,98	1,47	0,98	1,74	1,28	1,28	1,51	0,92	2,47	1,41	1,91	1,91	0,23	1,26	0,49		
	9	1,68	1,26		0,89	1,43	0,89	1,16	1,24	1,24	1,21	0,47	1,72	1,06	1,36	1,36	0,00	1,16	0,00		
	10	1,92	1,11		0,89	1,43	0,89	1,16	1,24	1,24	1,21	0,47	1,72	1,06	1,36	1,36	0,00	1,16	0,00		
	11	1,62	1,17		0,89	1,43	0,89	1,16	1,24	1,24	1,21	0,47	1,72	1,06	1,36	1,36	0,00	1,16	0,00		
	12	2,06	1,03		0,89	1,43	0,89	1,16	1,24	1,24	1,21	0,47	1,72	1,06	1,36	1,36	0,00	1,16	0,00		
	13	1,38	1,09		0,89	1,43	0,89	1,16	1,24	1,24	1,21	0,47	1,72	1,06	1,36	1,36	0,00	1,16	0,00		
	14	1,33	1,12		0,89	1,43	0,89	1,16	1,24	1,24	1,21	0,47	1,72	1,06	1,36	1,36	0,00	1,16	0,00		
	Moyenne	2	1,95	-0,59	-0,38	1,39	1,33	-0,16	1,02	-1,60	1,15	1,74	0,67	1,53	1,70	1,65	1,26	0,02	1,28		
	15	1,92	0,75	0,09		1,38	0,75	2,01	1,05	1,05	1,53	1,38	1,93		1,80	1,11	0,86	0,99			
Total		1,75	1,34		1,51	1,73	1,36				1,53	1,91	1,47		1,64	1,64	1,52	1,23	0,50		
	11	1,25			1,25	0,00					0,00					0,50			0,50		
Moyenne 4		-1,50				1,00										-0,50					
Total		1,38	1,24		1,29	1,41	1,20				1,30	1,46	1,03		1,21	1,16	1,08		2,13		

13 Distribution des Heures d'Arrivée pendant l'expérience. Calcul des fréquences par Itinéraire

NB ponctu	id xp choix_i		Somme hétéro-P4	hétéro-P8		Somme hétéro-P8	homo-P4		Somme homo-P4	homo-P8		Somme homo-P8
	hétéro-P4			A B			A B			A B		
ponctu	A	B		A	B		A	B		A	B	
Av	47,08%	56,16%	52,92%	54,82%	53,22%	53,89%	50,98%	63,66%	59,17%	51,60%	52,45%	52,08%
HO	27,24%	33,91%	31,53%	24,58%	33,65%	29,86%	27,45%	26,88%	27,08%	23,72%	37,01%	31,25%
Ret	25,68%	9,94%	15,56%	20,60%	13,13%	16,25%	21,57%	9,46%	13,75%	24,68%	10,54%	16,67%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

14 Impact de l'Heure d'Arrivée sur le changement d'itinéraire pendant l'expérience. Calcul des fréquences par type de changement pour chaque niveau de Ponctualité.

NB Sens chgt lti		Sens chgt lti				
id xp	ponctu	AA	AB	BA	BB	Total
hétéro-P4	Av	23,53%	7,84%	8,12%	60,50%	100,00%
	HO	21,84%	8,25%	18,93%	50,97%	100,00%
	Ret	25,69%	32,11%	11,01%	31,19%	100,00%
Somme hétéro-P4		23,36%	11,90%	11,90%	52,83%	100,00%
hétéro-P8	Av	30,79%	11,17%	10,35%	47,68%	100,00%
	HO	23,35%	12,69%	14,21%	49,75%	100,00%
	Ret	29,63%	22,22%	17,59%	30,56%	100,00%
Somme hétéro-P8		28,42%	13,39%	12,65%	45,54%	100,00%
homo-P4	Av	21,70%	8,98%	11,47%	57,86%	100,00%
	HO	20,22%	16,29%	12,36%	51,12%	100,00%
	Ret	33,33%	24,73%	13,98%	27,96%	100,00%
Somme homo-P4		22,92%	13,10%	12,05%	51,93%	100,00%
homo-P8	Av	32,38%	9,74%	9,46%	48,42%	100,00%
	HO	25,85%	7,80%	15,12%	51,22%	100,00%
	Ret	38,14%	25,42%	13,56%	22,88%	100,00%
Somme homo-P8		31,40%	11,90%	11,90%	44,79%	100,00%
Total		26,53%	12,57%	12,13%	48,77%	100,00%

15 Evolution des Ecart de Changement d'Heure de Départ selon la ponctualité. Calcul des Moyennes et des Ecart

Moyenne ecart cht HD		id xp choix_i															
ponctu	période	hétéro-P4		Moyenne hétéro-P4		hétéro-P8		Moyenne hétéro-P8		homo-P4		Moyenne homo-P4		homo-P8		Moyenne homo-P8	
		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Av	1	1,33	0,14	0,50	1,00	0,95	0,97	1,31	0,70	0,92	0,83	-0,13	0,19				
	2	2,25	0,32	0,54	0,56	0,58	0,57	0,67	0,17	0,31	1,67	1,07	1,35				
	3	0,63	0,95	0,86	1,00	0,55	0,70	0,89	0,67	0,74	0,75	0,13	0,33				
	4	0,86	0,00	0,23	0,80	0,33	0,52	0,17	0,25	0,22	1,10	0,40	0,68				
	5	0,80	0,50	0,57	0,27	0,40	0,33	2,40	0,30	1,00	0,50	0,40	0,44				
	6	0,83	0,38	0,53	1,08	0,07	0,52	0,80	0,05	0,29	0,75	0,50	0,60				
	7	0,44	0,62	0,55	0,17	0,55	0,41	1,00	0,35	0,48	0,00	0,22	0,12				
	8	0,50	0,73	0,65	0,64	0,36	0,48	1,25	0,30	0,57	1,00	0,44	0,78				
	9	0,43	0,28	0,32	1,25	0,75	1,00	0,00	0,05	0,04	0,57	0,00	0,19				
	10	0,56	0,30	0,42	0,67	-0,07	0,22	-0,11	0,20	0,10	0,40	0,15	0,26				
	11	0,33	0,57	0,48	0,83	0,40	0,59	0,36	0,07	0,19	-0,30	0,14	-0,04				
	12	0,58	0,24	0,38	0,42	0,31	0,36	0,17	0,26	0,24	0,82	0,31	0,52				
	13	0,10	0,26	0,21	0,50	0,00	0,20	0,67	0,11	0,25	0,42	0,00	0,17				
	14	0,22	0,31	0,28	0,78	0,11	0,44	0,38	0,11	0,19	0,08	0,00	0,04				
Moyenne Av		0,63	0,39	0,46	0,72	0,41	0,54	0,75	0,26	0,41	0,63	0,23	0,40				
HO	1	-0,25	-1,83	-1,20	0,00	-0,33	-0,20	-0,40	0,00	-0,33	0,00	-0,33	-0,11				
	2	-0,17	0,00	-0,08	0,00	-0,43	-0,19	0,00	-0,70	-0,58	-0,20	-0,64	-0,50				
	3	0,75	-0,63	-0,17	0,00	-0,17	-0,11	-0,80	-0,43	-0,58	-0,17	-1,00	-0,72				
	4	0,17	-0,36	-0,18	0,00	-0,25	-0,17	0,67	-0,14	0,10	0,00	-0,57	-0,27				
	5	0,29	-0,43	-0,07	0,33	-0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,50	0,00	-0,13				
	6	0,50	-0,15	-0,07	-0,25	-0,64	-0,53	0,00	0,00	0,00	0,50	-0,21	0,00				
	7	0,00	-0,08	-0,07	0,00	-0,17	-0,11	0,13	-0,75	-0,31	-0,63	-0,33	-0,43				
	8	0,67	-0,27	0,06	0,00	-0,13	-0,08	0,00	-0,36	-0,26	-0,40	0,40	0,13				
	9	0,00	0,00	0,00	0,20	-0,55	-0,31	-0,75	-0,17	-0,40	0,00	-0,20	-0,15				
	10	0,00	-0,43	-0,40	-0,20	-0,30	-0,25	0,00	-0,08	-0,06	-1,00	-0,40	-0,53				
	11	-0,25	-0,35	-0,33	-0,33	-0,22	-0,25	0,20	-0,43	-0,17	0,00	0,00	0,00				
	12	0,29	-0,25	0,00	0,00	-0,08	-0,05	-0,14	0,00	-0,05	-0,60	-0,17	-0,29				
	13	0,00	-0,20	-0,13	0,17	-0,22	-0,07	0,00	-0,13	-0,07	0,33	0,00	0,10				
	14	-1,00	-0,31	-0,44	0,40	-0,38	-0,19	0,17	0,00	0,06	0,00	-0,14	-0,09				
Moyenne HO		0,11	-0,34	-0,20	0,03	-0,30	-0,18	-0,08	-0,25	-0,19	-0,19	-0,29	-0,25				
Ret	1	-0,43	-8,00	-1,38	-2,67		-2,67	-1,50	-3,25	-2,67	0,00		0,00				
	2		-1,00	-1,00	-1,00		-1,00	-0,50		-0,50	0,00	-0,75	-0,50				
	3	-0,50	-1,33	-0,86		-1,17	-1,17	-0,67	-0,50	-0,56	-0,83		-0,83				
	4	-2,20		-2,20	-1,25	-1,86	-1,64	-2,17		-2,17	-1,20	-1,00	-1,13				
	5	-0,75	-0,33	-0,64	-0,63	-1,00	-0,75	-1,00	-1,33	-1,07	-0,50	-2,00	-0,85				
	6	-0,50	-0,67	-0,57	-1,00	-1,75	-1,50	-1,83	-1,25	-1,60	-0,67	-0,60	-0,63				
	7	-2,00	0,00	-1,17	-2,50	-1,20	-1,57	-0,67		-0,67	-0,33	-0,60	-0,50				
	8	-0,60	-1,33	-0,88	-0,25	-1,83	-1,20	0,00		0,00	-0,67	-1,00	-0,70				
	9	-0,25	-1,00	-0,73	-0,75	-2,00	-1,38	-1,25	-0,75	-0,92	-0,36		-0,36				
	10	-1,00	-1,10	-1,07	-1,00	-1,10	-1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
	11	-2,67	0,00	-2,00	0,17	-1,00	-0,22	-0,50	-0,67	-0,60	0,00	0,00	0,00				
	12	-1,67	-2,00	-1,75	0,00	-0,33	-0,25	0,00	-1,00	-0,50	0,00	-1,00	-0,75				
	13		-1,00	-1,00	-1,00	-0,67	-0,88	-0,75	-0,83	-0,80	-0,40	-0,33	-0,38				
	14	-1,00	-1,00	-1,00	-0,33	-1,33	-1,00	-0,50		-0,50	-0,33	-0,25	-0,27				
Moyenne Ret		-1,05	-1,02	-1,04	-1,04	-1,37	-1,19	-1,04	-1,05	-1,04	-0,44	-0,58	-0,49				
Total		0,05	0,00	0,02	0,20	-0,06	0,05	0,13	0,01	0,05	0,16	-0,04	0,04				

Annexe 4 : Test Statistiques Non Paramétriques, Comparaisons USAGERS HOMOGENES Péage 4 et Péage 8.

16 Analyse des Heures de départ : Comparaison des HD entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des HD entre homo p8 et homo p4							
Moyenne choix_h	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	-2,50	-2,90	-2,30	-2,20	-2,20	-2,40	-2,40
2it-P8-homo	-2,40	-2,30	-2,50	-2,00	-2,00	-2,40	-2,30
Total	-2,50	-2,60	-2,40	-2,10	-2,10	-2,40	-2,30
Test Wilcoxon Mann Whitney							
homo p4	35	6	alpha critique				
homo p8	43	6	1%	5%	10%		
p(homo p4 < homo p8)	0,2944		Ho	Ho	Ho		
p(homo p4 > homo p8)	0,7576		Ho	Ho	Ho		
Comparaison des HD entre homo p8 et homo p4 sur A							
Moyenne choix_h	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	-2,90	-2,80	-2,00	-2,70	-2,20	-2,10	-2,50
2it-P8-homo	-2,40	-2,40	-2,90	-2,00	-2,30	-2,70	-2,50
Total	-2,60	-2,60	-2,50	-2,40	-2,30	-2,50	-2,50
Test Wilcoxon Mann Whitney							
homo p4	39,5	6	alpha critique				
homo p8	38,5	6	1%	5%	10%		
p(homo p4 < homo p8)	0,56115		Ho	Ho	Ho		
p(homo p4 > homo p8)	0,5		Ho	Ho	Ho		
Comparaison des HD entre homo p8 et homo p4 sur B							
Moyenne choix_h	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	-2,40	-2,90	-2,40	-1,90	-2,20	-2,50	-2,40
2it-P8-homo	-2,40	-2,30	-2,20	-1,90	-1,50	-2,20	-2,10
Total	-2,40	-2,60	-2,30	-1,90	-1,90	-2,40	-2,30
Test Wilcoxon Mann Whitney							

17 Analyse des Heures de départ : Comparaison des Distributions des choix d'HD entre les traitements (Test de

Kolmogorv Smirnov)

Distribution des HD			
NB choix_h	id xp		
choix_h	homo p4	homo p8	homo p4-homo p8
-9	0,28%	0,14%	0,14%
-8	0,56%	0,14%	0,42%
-7	1,11%	0,28%	0,83%
-6	3,33%	0,97%	2,36%
-5	6,67%	2,92%	3,75%
-4	19,17%	15,69%	3,47%
-3	40,56%	38,61%	1,94%
-2	71,81%	70,28%	1,53%
-1	98,47%	98,89%	0,42%
0	99,72%	99,58%	0,14%
1	99,86%	100,00%	0,14%
4	100,00%	100,00%	0,00%
Total	720	720	1440
homo p4	720	Max des écarts	3,75%
homo p8	720	Décision à 10%	Ho
D calculé	2,025	Décision à 5%	Ho
alpha critique	0,363309569	Décision à 1%	Ho

Distribution des HD sur A				Distribution des HD sur B			
NB choix_h	id xp			NB choix_h	id xp		
choix_h	homo p4	homo p8	homo p4-homo p8	choix_h	homo p4	homo p8	homo p4-homo p8
-8	0,39%	0,00%	0,39%	-9	0,43%	0,25%	0,19%
-7	1,57%	0,32%	1,25%	-8	0,65%	0,25%	0,40%
-6	6,67%	1,92%	4,74%	-7	0,86%	0,25%	0,62%
-5	12,55%	5,77%	6,78%	-6	1,51%	0,25%	1,26%
-4	19,22%	19,23%	0,02%	-5	3,44%	0,74%	2,71%
-3	38,43%	48,40%	9,97%	-4	19,14%	12,99%	6,15%
-2	71,76%	74,68%	2,91%	-3	41,72%	31,13%	10,59%
-1	96,47%	97,76%	1,29%	-2	71,83%	66,91%	4,92%
0	99,61%	99,04%	0,57%	-1	99,57%	99,75%	0,19%
1	99,61%	100,00%	0,39%	0	99,78%	100,00%	0,22%
4	100,00%	100,00%	0,00%	1	100,00%	100,00%	0,00%
Total	255	312	567	Total	465	408	873

PREDIT 1996-2000

homo p4	255	Max des écarts	9,97%	homo p4	465	Max des écarts	10,59%
homo p8	312	Décision à 10%	H1	homo p8	408	Décision à 10%	H1
D calculé	5,5746678	Décision à 5%	Ho	D calculé	9,754277275	Décision à 5%	H1

18 Analyse des Choix d'itinéraire : Comparaison des itinéraires entre les traitements (Test du Khi²)

Choix ITI homo p8 et homo p4				Choix ITI homo p4 et théorie				Choix ITI homo p8 et théorie			
NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp		
choix_i	2it-P4-homo	2it-P8-homo	Total	choix_i	2it-P4-homo	théorique 50%	Total	choix_i	2it-P8-homo	théorique 50%	Total
A	255	312	567	A	255	360	567	A	312	360	567
B	465	408	873	B	465	360	873	B	408	360	873
Total	720	720	1440	Total	720	720	1440	Total	720	720	1440
Test du Khi ²				Test du Khi ²				Test du Khi ²			
Khi ² calculé		9,123074965		Khi ² calculé		30,6972949		Khi ² calculé		6,163504464	
alpha critique		0,002524053		alpha critique		3,01585E-08		alpha critique		0,01304126	
Décision à 10%		H1		Décision à 10%		H1		Décision à 10%		H1	
Décision à 5%		H1		Décision à 5%		H1		Décision à 5%		H1	
Décision à 1%		H1		Décision à 1%		H1		Décision à 1%		Ho	

19 Analyse des temps de Transport : Comparaison des temps de transport entre les traitements et les itinéraires (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des TT entre homo p8 et homo p4							
Moyenne TT	Groupe						
2it-P4-homo	1,30	1,30	1,30	1,30	1,40	1,40	1,30
2it-P8-homo	1,30	1,50	1,50	1,50	1,60	1,60	1,50
Total	1,30	1,40	1,40	1,40	1,50	1,50	1,40
Test Wilcoxon Mann Whitney							
homo p4	25	6	alpha critique				
homo p8	53	6	1% 5% 10%				
p(homo p4 < homo p8)	0,013		Ho H1 H1				
p(homo p4 > homo p8)	1		Ho Ho Ho				

Comparaison des TT entre homo p8 et homo p4 sur A								Comparaison des TT entre homo p8 et homo p4 sur B							
Moyenne TT	Groupe							Moyenne TT	Groupe						
2it-P4-homo	1,50	1,50	1,40	1,50	1,50	1,60	1,50	2it-P4-homo	1,20	1,20	1,20	1,10	1,30	1,30	1,20
2it-P8-homo	1,30	1,70	1,80	1,70	1,80	2,00	1,70	2it-P8-homo	1,30	1,30	1,20	1,40	1,40	1,30	1,30
Total	1,40	1,60	1,60	1,60	1,70	1,90	1,60	Total	1,20	1,20	1,20	1,20	1,30	1,30	1,30
Test Wilcoxon Mann Whitney								Test Wilcoxon Mann Whitney							
homo p4	27	6	alpha critique					homo p4	27,5	6	alpha critique				
homo p8	51	6	1% 5% 10%					homo p8	50,5	6	1% 5% 10%				

20 Comparaison des distributions des temps de transport entre les traitements (Test de Kolmogorov Smirnof)

NB TT	id xp		
TT	homo p4	homo p8	homo p4-homo p8
1	72,64%	61,81%	10,83%
2	94,58%	91,81%	2,78%
3	100,00%	98,33%	1,67%
4	100,00%	100,00%	0,00%
Total	720	720	1440
homo p4	720	Max des écarts	10,83%
homo p8	720	Décision à 10%	H1
D calculé	16,9	Décision à 5%	H1
alpha critique	0,0002139	Décision à 1%	H1

Distribution des TT sur A				Distribution des TT sur B			
NB TT	id xp			NB TT	id xp		
TT	homo p4	homo p8	homo p4-homo p8	TT	homo p4	homo p8	homo p4-homo p8
1	59,22%	47,44%	11,78%	1	80,00%	72,79%	7,21%
2	90,59%	82,69%	7,90%	2	96,77%	98,77%	2,00%
3	100,00%	96,15%	3,85%	3	100,00%	100,00%	0,00%
4	100,00%	100,00%	0,00%	Total	465	408	873
Total	255	312	567	homo p4	465	Max des écarts	7,21%
homo p4	255	Max des écarts	11,78%	homo p8	408	Décision à 10%	Ho
homo p8	312	Décision à 10%	H1	D calculé	4,513705276	Décision à 5%	Ho
D calculé	7,7883726	Décision à 5%	H1	alpha critique	0,104679431	Décision à 1%	Ho
alpha critique	0,0203599	Décision à 1%	Ho				

21 Impact du temps de Transport : Comparaison des changements d'itinéraire selon le temps de transport entre les

traitements (Test du Khi²)

change ITI homo p8 et homo p4 TT = 1				change ITI homo p8 et homo p4 TT = 2				change ITI homo p8 et homo p4 TT = 3			
NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp		
Sens chgt lti	2it-P4-homo	2it-P8-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P4-homo	2it-P8-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P4-homo	2it-P8-homo	Total
meme iti	392	353	745	meme iti	95	136	231	meme iti	16	17	33
change iti	94	60	154	change iti	57	64	121	change iti	18	30	48
	486	413	899		152	200	352		34	47	81
Test du Khi²				Test du Khi²				Test du Khi²			
Khi ² calculé	3,313228428			Khi ² calculé	0,927117794			Khi ² calculé	0,570316056		
alpha critique	0,068724374			alpha critique	0,335612994			alpha critique	0,450133356		
Décision à 10%	H1			Décision à 10%	Ho			Décision à 10%	Ho		
Décision à 5%	Ho			Décision à 5%	Ho			Décision à 5%	Ho		
Décision à 1%	Ho			Décision à 1%	Ho			Décision à 1%	Ho		

22 Impact du temps de Transport : Comparaison des changements d'heure de départ selon le temps de transport entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et homo p4, TT = 1							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	0,20	0,30	0,10	0,10	0,20	0,20	0,20
2it-P8-homo	0,10	0,10	0,00	0,00	0,30	0,40	0,20
Total	0,10	0,20	0,10	0,10	0,20	0,30	0,20
Test Wilcoxon Mann Whitney							
homo p4	43,5	6	alpha critique				
homo p8	34,5	6	1%	5%	10%		
p(homo p4 < homo p8)	0,7803		Ho	Ho	Ho		
p(homo p4 > homo p8)	0,2684		Ho	Ho	Ho		
Comparaison des chgt HD entre homo p8 et homo p4, TT = 2							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	-0,50	-0,30	-0,30	-0,20	0,10	-0,40	-0,20
2it-P8-homo	0,00	0,10	-0,10	0,10	-0,40	-0,40	-0,10
Total	-0,20	-0,10	-0,20	0,00	-0,20	-0,40	-0,20
Test Wilcoxon Mann Whitney							
homo p4	33	6	alpha critique				

Changement HD entre homo p8 et homo p4, TT = 1 sur A							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	0,30	0,60	0,20	0,40	0,40	0,30	0,40
2it-P8-homo	0,10	0,30	0,30	0,00	0,60	1,00	0,30
Total	0,20	0,50	0,20	0,20	0,50	0,60	0,30

Test Wilcoxon Mann Whitney						
homo p4	41,5	6	alpha critique			
homo p8	36,5	6	1%	5%	10%	
p(homo p4 < homo p8)	0,678	Ho	Ho	Ho		
p(homo p4 > homo p8)	0,37935	Ho	Ho	Ho		

Changement HD entre homo p8 et homo p4, TT = 2 sur A							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	-0,60	-0,10	-0,10	0,10	0,20	-0,50	0,00
2it-P8-homo	0,50	0,20	0,00	0,20	-0,20	0,00	0,00
Total	0,10	0,10	-0,10	0,10	0,00	-0,10	0,00

Test Wilcoxon Mann Whitney						
homo p4	30	6	alpha critique			
homo p8	48	6	1%	5%	10%	
p(homo p4 < homo p8)	0,0898	Ho	Ho	H1		
p(homo p4 > homo p8)	0,934	Ho	Ho	Ho		

Changement HD entre homo p8 et homo p4, TT = 3 sur A							
--	--	--	--	--	--	--	--

Changement HD entre homo p8 et homo p4, TT = 1 sur B							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	0,10	0,10	0,10	0,00	0,10	0,20	0,10
2it-P8-homo	0,10	0,00	-0,10	0,00	0,10	0,20	0,10
Total	0,10	0,10	0,00	0,00	0,10	0,20	0,10

Test Wilcoxon Mann Whitney						
homo p4	44,5	6	alpha critique			
homo p8	33,5	6	1%	5%	10%	
p(homo p4 < homo p8)	0,8241	Ho	Ho	Ho		
p(homo p4 > homo p8)	0,2197	Ho	Ho	Ho		

Changement HD entre homo p8 et homo p4, TT = 2 sur B							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	-0,40	-0,50	-0,70	-0,80	-0,10	-0,40	-0,40
2it-P8-homo	-0,40	0,10	-0,20	0,00	-0,70	-0,80	-0,30
Total	-0,40	-0,20	-0,40	-0,20	-0,40	-0,60	-0,40

Test Wilcoxon Mann Whitney						
homo p4	34	6	alpha critique			
homo p8	44	6	1%	5%	10%	
p(homo p4 < homo p8)	0,2424	Ho	Ho	Ho		
p(homo p4 > homo p8)	0,803	Ho	Ho	Ho		

23 Analyse des Heures d'Arrivée : Comparaison des heures d'arrivée entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des HA entre homo p8 et homo p4							
Moyenne HA	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	-1,20	-1,60	-1,00	-0,90	-0,80	-1,00	-1,10
2it-P8-homo	-1,20	-0,90	-1,10	-0,50	-0,40	-0,80	-0,80
Total	-1,20	-1,20	-1,00	-0,70	-0,60	-0,90	-0,90

Test Wilcoxon Mann Whitney			
homo p4	31,5	6	alpha critique
homo p8	46,5	6	1% 5% 10%
p(homo p4 < homo p8)	0,13745	Ho	Ho Ho
p(homo p4 > homo p8)	0,89505	Ho	Ho Ho

Comparaison des HA entre homo p8 et homo p4 sur A							
Moyenne HA	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	-1,40	-1,40	-0,60	-1,10	-0,60	-0,50	-1,00
2it-P8-homo	-1,10	-0,70	-1,20	-0,40	-0,50	-0,70	-0,70
Total	-1,30	-1,00	-0,90	-0,80	-0,50	-0,60	-0,80

Test Wilcoxon Mann Whitney			
homo p4	35	6	alpha critique
homo p8	46	6	1% 5% 10%

24 Analyse des Heures d'Arrivée : Comparaison des distributions des heures d'arrivée entre les traitements (Test de Kolmogorov Smirnov)

Distribution des HA			
NB HA	id xp		
HA	homo p4	homo p8	homo p4-homo p8
-8	0,28%	0,14%	0,14%
-7	0,56%	0,14%	0,42%
-6	1,11%	0,28%	0,83%
-5	3,33%	0,97%	2,36%
-4	6,67%	2,22%	4,44%
-3	18,19%	11,81%	6,39%
-2	36,67%	31,39%	5,28%
-1	59,17%	52,08%	7,08%
0	86,25%	83,33%	2,92%
1	96,67%	97,64%	0,97%
2	99,86%	99,44%	0,42%
3	99,86%	100,00%	0,14%
5	100,00%	100,00%	0,00%
Total	720	720	1440
homo p4	720	Max des écarts 7,08%	
homo p8	720	Décision à 10% H1	
D calculé	7,225	Décision à 5% H1	

25 Impact des Heures d'Arrivée : Comparaison des changements d'itinéraire selon l'heure d'arrivée entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann-Whitney)

change ITI homo p8 et homo p4 HA = AV				change ITI homo p8 et homo p4 HA = HO				change ITI homo p8 et homo p4 HA = RET			
NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp		
Sens chgt lti	2it-P4-homo	2it-P8-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P4-homo	2it-P8-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P4-homo	2it-P8-homo	Total
meme iti	319	282	601	meme iti	127	158	285	meme iti	57	72	129
change iti	82	67	149	change iti	51	47	98	change iti	36	46	82
	401	349	750		178	205	383		93	118	211
Test du Khi ²				Test du Khi ²				Test du Khi ²			
Khi ² calculé 0,113309831				Khi ² calculé 1,353061523				Khi ² calculé 0,010361147			
alpha critique 0,736406954				alpha critique 0,244743762				alpha critique 0,918923585			
Décision à 10% Ho				Décision à 10% Ho				Décision à 10% Ho			
Décision à 5% Ho				Décision à 5% Ho				Décision à 5% Ho			
Décision à 1% Ho				Décision à 1% Ho				Décision à 1% Ho			

26 Impact de l'heure d'arrivée : Comparaison des changements d'heure de départ selon l'heure d'arrivée entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Changement HD entre homo p8 et homo P4, ponctu = AV							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	0,40	0,30	0,60	0,20	0,60	0,30	0,40
2it-P8-homo	0,20	0,50	0,30	0,30	0,50	0,60	0,40
Total	0,30	0,40	0,50	0,30	0,60	0,50	0,40
Test Wilcoxon Mann Whitney							
homo p4	39,5	6	alpha critique				
homo p8	38,5	6	1%	5%	10%		
p(homo p4 < homo p8)	0,56115		Ho	Ho	Ho		
p(homo p4 > homo p8)	0,5		Ho	Ho	Ho		

Changement HD entre homo p8 et homo P4, ponctu = HO								Changement HD entre homo p8 et homo P4, ponctu = RET							
Moyenne ecart cht HD	Groupe							Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total	id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	-0,40	-0,30	-0,10	0,00	-0,30	-0,10	-0,20	2it-P4-homo	-0,90	-1,20	-2,30	-0,60	-0,80	-0,60	-1,00
2it-P8-homo	-0,20	-0,40	-0,20	-0,20	-0,10	-0,50	-0,30	2it-P8-homo	-0,40	-0,30	-0,40	-0,40	-0,50	-0,90	-0,50
Total	-0,30	-0,40	-0,10	-0,10	-0,20	-0,30	-0,20	Total	-0,60	-0,60	-1,90	-0,50	-0,60	-0,70	-0,70
Test Wilcoxon Mann Whitney								Test Wilcoxon Mann Whitney							
homo p4	43,5	6	alpha critique					homo p4	24,5	6	alpha critique				
homo p8	34,5	6	1%	5%	10%			homo p8	53,5	6	1%	5%	10%		
p(homo p4 < homo p8)	0,7803		Ho	Ho	Ho			p(homo p4 < homo p8)	0,0103		Ho	H1	H1		
p(homo p4 > homo p8)	0,2684		Ho	Ho	Ho			p(homo p4 > homo p8)	1		Ho	Ho	Ho		

Changement HD entre homo p8 et homo P4, ponctu = AV, Sur A							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	0,60	0,70	1,10	0,40	1,10	0,60	0,70
2it-P8-homo	0,40	0,50	0,80	0,50	0,70	1,00	0,60
Total	0,50	0,60	0,90	0,40	0,90	0,80	0,70
Test Wilcoxon Mann Whitney							
homo p4	43	6	alpha critique				
homo p8	35	6	1%	5%	10%		
p(homo p4 < homo p8)	0,7576		Ho	Ho	Ho		
p(homo p4 > homo p8)	0,2944		Ho	Ho	Ho		

Changement HD entre homo p8 et homo P4, ponctu = AV, Sur B							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	0,30	0,10	0,40	0,10	0,40	0,30	0,30
2it-P8-homo	0,10	0,40	-0,10	0,30	0,30	0,40	0,20
Total	0,20	0,20	0,20	0,20	0,40	0,30	0,30
Test Wilcoxon Mann Whitney							
homo p4	40	6	alpha critique				
homo p8	38	6	1%	5%	10%		
p(homo p4 < homo p8)	0,5909		Ho	Ho	Ho		
p(homo p4 > homo p8)	0,4686		Ho	Ho	Ho		

Changement HD entre homo p8 et homo P4, ponctu = HO, sur A							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	0,60	0,70	1,10	0,40	1,10	0,60	0,70
2it-P8-homo	0,40	0,50	0,80	0,50	0,70	1,00	0,60
Total	0,50	0,60	0,90	0,40	0,90	0,80	0,70

Changement HD entre homo p8 et homo P4, ponctu = HO, sur B							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-homo	0,30	0,10	0,40	0,10	0,40	0,30	0,30
2it-P8-homo	0,10	0,40	-0,10	0,30	0,30	0,40	0,20
Total	0,20	0,20	0,20	0,20	0,40	0,30	0,30

Annexe 5: Test Statistiques Non Paramétriques, Comparaisons USAGERS HOMOGENES et HETEROGENES Péage 4.

27 Analyse des Heures de départ : Comparaison des HD entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des HD homo p4 et hétéro p4							
Moyenne choix_h	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	-2,40	-2,40	-2,20	-2,50	-2,30	-2,30	-2,30
2it-P4-homo	-2,50	-2,90	-2,30	-2,20	-2,20	-2,40	-2,40
Total	-2,40	-2,60	-2,20	-2,40	-2,20	-2,30	-2,40
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	39,5	6	alpha critique				
homo p4	38,5	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p4<homo p4)	0,56115		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p4>homo p4)	0,5		Ho	Ho	Ho		
Comparaison des HD homo p4 et hétéro p4 sur A							
Moyenne choix_h	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	-2,50	-2,40	-2,10	-2,70	-2,20	-1,80	-2,30
2it-P4-homo	-2,90	-2,80	-2,00	-2,70	-2,20	-2,10	-2,50
Total	-2,70	-2,60	-2,00	-2,70	-2,20	-1,90	-2,40
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	43,5	6	alpha critique				
homo p4	34,5	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p4<homo p4)	0,7803		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p4>homo p4)	0,2684		Ho	Ho	Ho		
Comparaison des HD homo p4 et hétéro p4 sur B							
Moyenne choix_h	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	-2,20	-2,30	-2,30	-2,50	-2,30	-2,50	-2,40
2it-P4-homo	-2,40	-2,90	-2,40	-1,90	-2,20	-2,50	-2,40
Total	-2,30	-2,60	-2,40	-2,20	-2,20	-2,50	-2,40
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	40,5	6	alpha critique				
homo p4	37,5	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p4<homo p4)	0,62065		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p4>homo p4)	0,43885		Ho	Ho	Ho		

28 Analyse des Heures de départ : Comparaison des Distributions des choix d'HD entre les traitements (Test de Kolmogorov Smirnov)

Distribution des HD			
NB choix_h	id xp		
choix_h	hétéro p4	homo p4	hétéro p4-homo p4
-9	0,28%	0,28%	0,00%
-8	0,56%	0,56%	0,00%
-7	0,83%	1,11%	0,28%
-6	1,53%	3,33%	1,81%
-5	3,19%	6,67%	3,47%
-4	14,58%	19,17%	4,58%
-3	40,56%	40,56%	0,00%
-2	74,72%	71,81%	2,92%

29 Analyse des Choix d'itinéraire : Comparaison des itinéraires entre les traitements (Test du Khi²)

Choix IT Hétéro PA et Hétéro PA				Choix IT Homo PA et Hétéro				Choix IT Hétéro PA et théorique			
NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp		
choix_i	2it-P4-hétéro	2it-P4-homo	Total	choix_i	2it-P4-homo	théorique 50%	Total	choix_i	2it-P4-hétéro	théorique 50%	Total
A	257	255	512	A	255	360	567	A	257	360	567
B	463	465	928	B	465	360	873	B	463	360	873
Total	720	720	1440	Total	720	720	1440	Total	720	720	1440

Test du Khi² 1996-2000

Khi ² calculé	0,003030711
alpha critique	0,95609712

Test du Khi²

Khi ² calculé	30,6972949
alpha critique	3,01585E-08

Test du Khi²

Khi ² calculé	29,50379191
alpha critique	5,58074E-08

30 Analyse des temps de Transport : Comparaison des temps de transport entre les traitements et les itinéraires (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des TT homo p4 et hétéro p4							
Moyenne TT	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	1,50	1,50	1,40	1,50	1,40	1,60	1,50
2it-P4-homo	1,30	1,30	1,30	1,30	1,40	1,40	1,30
Total	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,50	1,40
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	55	6	alpha critique				
homo p4	23	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p4<homo p4)	1		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p4>homo p4)	0,0043		H1	H1	H1		

Comparaison des TT homo p4 et hétéro p4 sur A								Comparaison des TT homo p4 et hétéro p4 sur B							
Moyenne TT	Groupe							Moyenne TT	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total	id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	1,80	1,70	1,40	1,60	1,40	1,90	1,60	2it-P4-hétéro	1,10	1,30	1,50	1,50	1,30	1,40	1,40
2it-P4-homo	1,50	1,50	1,40	1,50	1,50	1,60	1,50	2it-P4-homo	1,20	1,20	1,20	1,10	1,30	1,30	1,20
Total	1,70	1,60	1,40	1,60	1,50	1,80	1,60	Total	1,20	1,30	1,30	1,30	1,30	1,40	1,30
Test Wilcoxon Mann Whitney								Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	45,5	6	alpha critique					hétéro p4	49,5	6	alpha critique				
homo p4	32,5	6	1%	5%	10%			homo p4	28,5	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p4<homo p4)	0,86255		Ho	Ho	Ho			p(hétéro p4<homo p4)	0,9605		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p4>homo p4)	0,1759		Ho	Ho	Ho			p(hétéro p4>homo p4)	0,05625		Ho	Ho	H1		

31 Comparaison des distributions des temps de transport entre les traitements (Test de Kolmogorov Smirnov)

Distribution des TT			
NB TT	id xp		
TT	hétéro p4	homo p4	hétéro p4-homo p4
1	60,00%	72,64%	12,64%
2	93,75%	94,58%	0,83%
3	98,89%	100,00%	1,11%
4	100,00%	100,00%	0,00%
Total	720	720	1440
hétéro p4	720	Max des écarts 12,64%	
homo p4	720	Décision à 10% H1	
D calculé	23,00277778	Décision à 5% H1	
alpha critique	1,0116E-05	Décision à 1% H1	

Distribution des TT sur A				Distribution des TT sur B			
NB TT	id xp			NB TT	id xp		
TT	hétéro p4	homo p4	hétéro p4-homo p4	TT	hétéro p4	homo p4	hétéro p4-homo p4
1	50,97%	59,22%	8,24%	1	65,01%	80,00%	14,99%
2	87,55%	90,59%	3,04%	2	97,19%	96,77%	0,42%
3	96,89%	100,00%	3,11%	3	100,00%	100,00%	0,00%
4	100,00%	100,00%	0,00%	Total	463	465	928
Total	257	255	512	hétéro p4	463	Max des écarts 14,99%	
hétéro p4	257	Max des écarts 8,24%		homo p4	465	Décision à 10% H1	
homo p4	255	Décision à 10% Ho		D calculé	20,84984918	Décision à 5% H1	
D calculé	3,478771363	Décision à 5% Ho		alpha critique	2,96833E-05	Décision à 1% H1	
alpha critique	0,175628259	Décision à 1% Ho					

32 Impact du temps de Transport : Comparaison des changements d'itinéraire selon le temps de transport entre les traitements (Test du Khi²)

change ITI homo p4 et hétéro p4 avec TT = 1				change ITI homo p4 et hétéro p4 avec TT = 2				change ITI homo p4 et hétéro p4 avec TT = 3			
NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp		
Sens chgt lti	2it-P4-hétéro	2it-P4-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P4-hétéro	2it-P4-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P4-hétéro	2it-P4-homo	Total
meme iti	343	392	735	meme iti	146	95	241	meme iti	18	16	34
change iti	61	94	155	change iti	81	57	138	change iti	15	18	33
	404	486	890		227	152	379		33	34	67

Test du Khi ²	
Khi ² calculé	2,473755258
alpha critique	0,115761096
Décision à 10%	Ho
Décision à 5%	Ho
Décision à 1%	Ho

Test du Khi ²	
Khi ² calculé	0,063216399
alpha critique	0,801482669
Décision à 10%	Ho
Décision à 5%	Ho
Décision à 1%	Ho

Test du Khi ²	
Khi ² calculé	0,135728749
alpha critique	0,712564688
Décision à 10%	Ho
Décision à 5%	Ho
Décision à 1%	Ho

33 Impact du temps de Transport : Comparaison des changements d'heure de départ selon le temps de transport entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des chgt HD homo p4 et hétéro p4, TT = 1							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	0,30	0,30	0,20	0,30	0,20	0,10	0,20
2it-P4-homo	0,20	0,30	0,10	0,10	0,20	0,20	0,20
Total	0,20	0,30	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	45,5	6	alpha critique				
homo p4	32,5	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p4<homo p4)	0,86255		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p4>homo p4)	0,1759		Ho	Ho	Ho		
Comparaison des chgt HD homo p4 et hétéro p4, TT = 2							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	-0,10	-0,40	-0,30	-0,10	-0,50	-0,20	-0,20
2it-P4-homo	-0,50	-0,30	-0,30	-0,20	0,10	-0,40	-0,20
Total	-0,20	-0,40	-0,30	-0,10	-0,10	-0,30	-0,20
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	40,5	6	alpha critique				
homo p4	37,5	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p4<homo p4)	0,62065		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p4>homo p4)	0,43885		Ho	Ho	Ho		
Comparaison des chgt HD homo p4 et hétéro p4, TT = 3							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	-2,30	xxxx	xxxx	-0,40	-0,40	-0,20	-0,50
2it-P4-homo	0,30	-3,30	-1,00	-0,70	xxxx	-0,40	-0,70
Total	-0,60	-3,30	-1,00	-0,50	-0,40	-0,30	-0,60
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	22	4	alpha critique				
homo p4	23	5	1%	5%	10%		
p(hétéro p4<homo p4)	0,7222		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p4>homo p4)	0,3651		Ho	Ho	Ho		

Comparaison des chgt HD homo p4 et hétéro p4, TT = 1, sur A

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	0,60	0,50	0,20	0,40	0,10	0,40	0,40
2it-P4-homo	0,30	0,60	0,20	0,40	0,40	0,30	0,40
Total	0,40	0,60	0,20	0,40	0,20	0,30	0,40

Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p4	40	6	alpha critique
homo p4	38	6	1% 5% 10%
p(hétéro p4<homo p4)	0,5909		Ho Ho Ho
p(hétéro p4>homo p4)	0,4686		Ho Ho Ho

Comparaison des chgt HD homo p4 et hétéro p4, TT = 2, sur A

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	0,10	-0,60	0,00	-0,10	0,00	-0,50	-0,10
2it-P4-homo	-0,60	-0,10	-0,10	0,10	0,20	-0,50	0,00
Total	0,00	-0,30	-0,10	0,00	0,10	-0,50	-0,10

Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p4	38,5	6	alpha critique
homo p4	39,5	6	1% 5% 10%
p(hétéro p4<homo p4)	0,5		Ho Ho Ho
p(hétéro p4>homo p4)	0,56115		Ho Ho Ho

Comparaison des chgt HD homo p4 et hétéro p4, TT = 3, sur A

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	-2,30	xxxx	-0,50	-1,00	0,10	-0,60	xxxx
2it-P4-homo	0,30	-3,30	-0,70	xxxx	-0,40	-0,70	xxxx
Total	-0,60	-3,30	-0,60	-1,00	-0,20	-0,60	xxxx

Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p4	27	5	alpha critique
homo p4	28	5	1% 5% 10%
p(hétéro p4<homo p4)	0,5		Ho Ho Ho
p(hétéro p4>homo p4)	0,5794		Ho Ho Ho

Comparaison des chgt HD homo p4 et hétéro p4, TT = 1, sur B

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	0,10	0,20	0,20	0,20	0,30	0,00	0,20
2it-P4-homo	0,10	0,10	0,10	0,00	0,10	0,20	0,10
Total	0,10	0,20	0,10	0,10	0,20	0,10	0,10

Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p4	47	6	alpha critique
homo p4	31	6	1% 5% 10%
p(hétéro p4<homo p4)	0,9102		Ho Ho Ho
p(hétéro p4>homo p4)	0,1201		Ho Ho Ho

Comparaison des chgt HD homo p4 et hétéro p4, TT = 2, sur B

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	-0,70	-0,30	-0,40	-0,10	-0,70	0,00	-0,30
2it-P4-homo	-0,40	-0,50	-0,70	-0,80	-0,10	-0,40	-0,40
Total	-0,50	-0,40	-0,50	-0,20	-0,40	-0,20	-0,30

Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p4	44,5	6	alpha critique
homo p4	33,5	6	1% 5% 10%
p(hétéro p4<homo p4)	0,8241		Ho Ho Ho
p(hétéro p4>homo p4)	0,2197		Ho Ho Ho

34 Analyse des Heures d'Arrivée : Comparaison des heures d'arrivée entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des HA homo p4 et hétéro p4							
Moyenne HA	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	-0,90	-0,90	-0,80	-1,00	-0,90	-0,80	-0,90
2it-P4-homo	-1,20	-1,60	-1,00	-0,90	-0,80	-1,00	-1,10
Total	-1,10	-1,20	-0,90	-1,00	-0,80	-0,90	-1,00
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	48,5	6	alpha critique				
homo p4	29,5	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p4<homo p4)	0,94375		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p4>homo p4)	0,0779		Ho	Ho	H1		
Comparaison des HA homo p4 et hétéro p4 sur A							
Moyenne HA	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	-0,80	-0,70	-0,70	-1,00	-0,70	0,10	-0,70
2it-P4-homo	-1,40	-1,40	-0,60	-1,10	-0,60	-0,50	-1,00
Total	-1,00	-1,00	-0,70	-1,10	-0,70	-0,20	-0,80
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	42	6	alpha critique				
homo p4	36	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p4<homo p4)	0,7056		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p4>homo p4)	0,3496		Ho	Ho	Ho		
Comparaison des HA homo p4 et hétéro p4 sur B							
Moyenne HA	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	-1,00	-1,00	-0,80	-1,00	-1,00	-1,10	-1,00
2it-P4-homo	-1,20	-1,70	-1,20	-0,80	-0,80	-1,20	-1,20
Total	-1,10	-1,40	-1,00	-0,90	-0,90	-1,10	-1,10
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p4	46	6	alpha critique				
homo p4	32	6	1%	5%	10%		

35 Impact des Heures d'Arrivée : Comparaison des changements d'itinéraire selon l'heure d'arrivée entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

change ITI homo p4 et hétéro p4 avec HA = AV				change ITI homo p4 et hétéro p4 avec HA = HO				change ITI homo p4 et hétéro p4 avec HA = Ret			
NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp		
Sens chgt lti	2it-P4-hétéro	2it-P4-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P4-hétéro	2it-P4-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P4-hétéro	2it-P4-homo	Total
meme iti	300	319	619	meme iti	150	127	277	meme iti	62	57	119
change iti	57	82	139	change iti	56	51	107	change iti	47	36	83
	357	401	758		206	178	384		109	93	202

Test du Khi²		Test du Khi²		Test du Khi²	
Khi² calculé	2,243558432	Khi² calculé	0,042299249	Khi² calculé	0,24152888
alpha critique	0,134171952	alpha critique	0,837050404	alpha critique	0,623104052
Décision à 10%	Ho	Décision à 10%	Ho	Décision à 10%	Ho
Décision à 5%	Ho	Décision à 5%	Ho	Décision à 5%	Ho
Décision à 1%	Ho	Décision à 1%	Ho	Décision à 1%	Ho

36 Impact de l'heure d'arrivée : Comparaison des changements d'heure de départ selon l'heure d'arrivée entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des chgt HD homo p4 et homo p4, ponct = AV							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro	0,50	0,50	0,30	0,30	0,50	0,60	0,50
2it-P4-homo	0,40	0,30	0,60	0,20	0,60	0,30	0,40
Total	0,50	0,40	0,50	0,30	0,60	0,40	0,40

Test Wilcoxon Mann Whitney					
hétéro p4	42	6	alpha critique		
homo p4	36	6	1%	5%	10%
p(hétéro p4 < homo p4)	0,7056		Ho	Ho	Ho
p(hétéro p4 > homo p4)	0,3496		Ho	Ho	Ho

Comparaison des chgt HD homo p4 et homo p4, ponct = HO								Comparaison des chgt HD homo p4 et homo p4, ponct = RET							
Moyenne ecart cht HD	Groupe							Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total	id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P4-hétéro								2it-P4-hétéro							
2it-P4-homo								2it-P4-homo							
Total								Total							

Comparaison des chgt HD homo p4 et homo p4, ponctu = AV, sur A

Moyenne ecart cht HD id xp	Groupe						Total
	1	2	3	4	5	6	
2it-P4-hétéro	1,10	0,50	0,50	0,30	0,50	1,40	0,60
2it-P4-homo	0,60	0,70	1,10	0,40	1,10	0,60	0,70
Total	0,90	0,60	0,80	0,40	0,80	0,90	0,70

Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p4	35	6	alpha critique
homo p4	43	6	1% 5% 10%
p(hétéro p4<homo p4)	0,2944		Ho Ho Ho
p(hétéro p4>homo p4)	0,7576		Ho Ho Ho

Comparaison des chgt HD homo p4 et homo p4, ponctu = HO, sur A

Moyenne ecart cht HD id xp	Groupe						Total
	1	2	3	4	5	6	
2it-P4-hétéro	0,20	-0,10	0,00	0,20	-0,10	0,50	0,10
2it-P4-homo	-0,70	-0,30	0,20	0,20	-0,10	-1,00	-0,10
Total	-0,10	-0,20	0,10	0,20	-0,10	0,30	0,00

Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p4	48	6	alpha critique
homo p4	30	6	1% 5% 10%
p(hétéro p4<homo p4)	0,934		Ho Ho Ho
p(hétéro p4>homo p4)	0,0898		Ho Ho H1

Comparaison des chgt HD homo p4 et homo p4, ponctu = RET, sur A

Moyenne ecart cht HD id xp	Groupe						Total
	1	2	3	4	5	6	
2it-P4-hétéro	-1,70	-0,80	-0,50	-0,60	-1,40	-0,90	-1,00

Comparaison des chgt HD homo p4 et homo p4, ponctu = AV, sur B

Moyenne ecart cht HD id xp	Groupe						Total
	1	2	3	4	5	6	
2it-P4-hétéro	0,20	0,50	0,20	0,30	0,60	0,40	0,40
2it-P4-homo	0,30	0,10	0,40	0,10	0,40	0,30	0,30
Total	0,30	0,30	0,30	0,20	0,50	0,30	0,30

Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p4	45	6	alpha critique
homo p4	33	6	1% 5% 10%
p(hétéro p4<homo p4)	0,8452		Ho Ho Ho
p(hétéro p4>homo p4)	0,197		Ho Ho Ho

Comparaison des chgt HD homo p4 et homo p4, ponctu = HO, sur B

Moyenne ecart cht HD id xp	Groupe						Total
	1	2	3	4	5	6	
2it-P4-hétéro	-0,10	-0,60	-0,20	-0,20	-0,60	-0,30	-0,30
2it-P4-homo	-0,30	-0,30	-0,30	-0,10	-0,40	-0,10	-0,20
Total	-0,20	-0,50	-0,30	-0,20	-0,50	-0,20	-0,30

Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p4	36,5	6	alpha critique
homo p4	41,5	6	1% 5% 10%
p(hétéro p4<homo p4)	0,37935		Ho Ho Ho
p(hétéro p4>homo p4)	0,678		Ho Ho Ho

Comparaison des chgt HD homo p4 et homo p4, ponctu = RET, sur B

Moyenne ecart cht HD id xp	Groupe						Total
	1	2	3	4	5	6	
2it-P4-hétéro	-1,00	-1,50	-0,90	-1,00	-0,70	-1,30	-1,00

Annexe 6 : Test Statistiques Non Paramétriques, Comparaisons USAGERS HOMOGENES et HETEROGENES Péage 8.

37 Analyse des Heures de départ : Comparaison des HD entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des HD entre homo p8 et hétéro p8							
Moyenne choix_h	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	-2,30	-2,30	-2,20	-2,50	-2,50	-2,30	-2,30
2it-P8-homo	-2,40	-2,30	-2,50	-2,00	-2,00	-2,40	-2,30
Total	-2,30	-2,30	-2,40	-2,20	-2,20	-2,40	-2,30

Test Wilcoxon Mann Whitney					
hétéro p8	36,5	6	alpha critique		
homo p8	41,5	6	1%	5%	10%
p(hétéro p8<homo p8)	0,37935		Ho	Ho	Ho
p(hétéro p8>homo p8)	0,678		Ho	Ho	Ho

Comparaison des HD entre homo p8 et hétéro p8 sur A							
Moyenne choix_h	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	-2,30	-2,80	-2,80	-2,80	-2,30	-2,40	-2,60
2it-P8-homo	-2,40	-2,40	-2,90	-2,00	-2,30	-2,70	-2,50
Total	-2,30	-2,60	-2,80	-2,40	-2,30	-2,60	-2,50

Test Wilcoxon Mann Whitney

38 Analyse des Heures de départ : Comparaison des Distributions des choix d'HD entre les traitements (Test de Kolmogorv Smirnof)

Distribution des HD

NB choix_h	id xp		
choix_h	hétéro p8	homo p8	hétéro p8-homo p8
-9	0,14%	0,14%	0,00%
-8	0,28%	0,14%	0,14%
-7	0,56%	0,28%	0,28%
-6	1,39%	0,97%	0,42%
-5	3,75%	2,92%	0,83%
-4	16,94%	15,69%	1,25%
-3	41,53%	38,61%	2,92%
-2	71,81%	70,28%	1,53%
-1	98,61%	98,89%	0,28%
0	99,03%	99,58%	0,56%
1	99,31%	100,00%	0,69%
2	99,72%	100,00%	0,28%
3	99,86%	100,00%	0,14%
4	100,00%	100,00%	0,00%
Total	720	720	1440
hétéro p8	720	Max des écarts	2,92%
homo p8	720	Décision à 10%	Ho
D calculé	1,225	Décision à 5%	Ho
alpha critique	0,54199419	Décision à 1%	Ho

PREDIT 1996-2000

Distribution des HD sur A				Distribution des HD sur B			
NB choix_h	id xp			NB choix_h	id xp		
choix_h	hétéro p8	homo p8	hétéro p8-homo p8	choix_h	hétéro p8	homo p8	hétéro p8-homo p8
-7	0,33%	0,32%	0,01%	-9	0,24%	0,25%	0,01%

39 Analyse des Choix d'itinéraire : Comparaison des itinéraires entre les traitements (Test du Khi²)

Choix IT - homo p8 et Hétéro p8				Choix IT - homo p8 et théorique				Choix IT - Hétéro p8 et théorique			
NB choix_i		id xp		NB choix_i		id xp		NB choix_i		id xp	
choix_i	2it-P8-hétéro	2it-P8-homo	Total	choix_i	2it-P8-homo	théorique 50%	Total	choix_i	2it-P8-hétéro	théorique 50%	Total
A	301	312	613	A	312	360	567	A	301	360	567
B	419	408	827	B	408	360	873	B	419	360	873
Total	720	720	1440	Total	720	720	1440	Total	720	720	1440
Test du Khi ²				Test du Khi ²				Test du Khi ²			
Khi ² calculé	0,284051121			Khi ² calculé	6,163504464			Khi ² calculé	9,407615567		
alpha critique	0,59405818			alpha critique	0,01304126			alpha critique	0,002160861		
Décision à 10%	Ho			Décision à 10%	H1			Décision à 10%	H1		
Décision à 5%	Ho			Décision à 5%	H1			Décision à 5%	H1		
Décision à 1%	Ho			Décision à 1%	Ho			Décision à 1%	H1		

40 Analyse des temps de Transport : Comparaison des temps de transport entre les traitements et les itinéraires (Test

Comparaison des TT entre homo p8 et hétéro p8							
Moyenne TT	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	1,50	1,40	1,50	1,50	1,60	1,40	1,50

de Wilcoxon Mann Whitney)

41 Comparaison des distributions des temps de transport entre les traitements (Test de Kolmogorov Smirnov)

Distribution des TT			
NB TT	id xp		
TT	hétéro p8	homo p8	hétéro p8-homo p8
1	61,67%	61,81%	0,14%
2	92,08%	91,81%	0,28%
3	98,75%	98,33%	0,42%
4	100,00%	100,00%	0,00%
Total	720	720	1440
hétéro p8	720	Max des écarts	0,42%
homo p8	720	Décision à 10%	Ho
D calculé	0,025	Décision à 5%	Ho
alpha critique	0,9875778	Décision à 1%	Ho

Distribution des TT sur A				Distribution des TT sur B			
NB TT	id xp			NB TT	id xp		
TT	hétéro p8	homo p8	hétéro p8-homo p8	TT	hétéro p8	homo p8	hétéro p8-homo p8
1	48,84%	47,44%	1,40%	1	70,88%	72,79%	1,91%
2	82,72%	82,69%	0,03%	2	98,81%	98,77%	0,03%
3	97,01%	96,15%	0,86%	3	100,00%	100,00%	0,00%

42 Impact du temps de Transport : Comparaison des changements d'itinéraire selon le temps de transport entre les traitements (Test du Khi²)

change ITI homo p8 et hétéro p8 TT = 1				change ITI homo p8 et hétéro p8 TT = 2				change ITI homo p8 et hétéro p8 TT = 3			
NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp		
Sens chgt lti	2it-P8-hétéro	2it-P8-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P8-hétéro	2it-P8-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P8-hétéro	2it-P8-homo	Total
meme iti	347	353	700	meme iti	128	136	264	meme iti	21	17	38
change iti	67	60	127	change iti	78	64	142	change iti	27	30	57
	414	413	827		206	200	406		48	47	95
Test du Khi ²				Test du Khi ²				Test du Khi ²			
Khi ² calculé 0,317970128				Khi ² calculé 1,287358113				Khi ² calculé 0,296524084			
alpha critique 0,572830088				alpha critique 0,256535555				alpha critique 0,58606976			
Décision à 10% Ho				Décision à 10% Ho				Décision à 10% Ho			
Décision à 5% Ho				Décision à 5% Ho				Décision à 5% Ho			
Décision à 1% Ho				Décision à 1% Ho				Décision à 1% Ho			

43 Impact du temps de Transport : Comparaison des changements d'heure de départ selon le temps de transport entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, TT = 1							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	0,30	0,40	0,10	0,30	0,50	0,40	0,30
2it-P8-homo	0,10	0,10	0,00	0,00	0,30	0,40	0,20
Total	0,20	0,20	0,10	0,10	0,40	0,40	0,20

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, TT = 1, sur A							
Moyenne écart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	0,10	1,20	0,30	0,30	1,10	0,60	0,60
2it-P8-homo	0,10	0,30	0,30	0,00	0,60	1,00	0,30
Total	0,10	0,80	0,30	0,10	0,80	0,70	0,50

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, TT = 1, sur B							
Moyenne écart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	0,30	-0,10	-0,10	0,20	0,30	0,30	0,20
2it-P8-homo	0,10	0,00	-0,10	0,00	0,10	0,20	0,10
Total	0,20	0,00	-0,10	0,10	0,30	0,20	0,10

44 Analyse des Heures d'Arrivée : Comparaison des heures d'arrivée entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann

Whitney)

Comparaison des HA entre homo p8 et hétéro p8							
Moyenne HA	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	-0,80	-0,90	-0,70	-1,00	-0,80	-0,90	-0,90
2it-P8-homo	-1,20	-0,90	-1,10	-0,50	-0,40	-0,80	-0,80
Total	-1,00	-0,90	-0,90	-0,70	-0,60	-0,90	-0,80
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p8	39	6	alpha critique				
homo p8	39	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p8<homo p8)	0,5314		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p8>homo p8)	0,5314		Ho	Ho	Ho		
Comparaison des HA entre homo p8 et hétéro p8 sur A							
Moyenne HA	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	-0,60	-1,30	-1,10	-0,90	-0,40	-0,90	-0,90
2it-P8-homo	-1,10	-0,70	-1,20	-0,40	-0,50	-0,70	-0,70
Total	-0,80	-1,00	-1,10	-0,60	-0,40	-0,80	-0,80
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p8	36	6	alpha critique				
homo p8	42	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p8<homo p8)	0,3496		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p8>homo p8)	0,7056		Ho	Ho	Ho		
Comparaison des HA entre homo p8 et hétéro p8 sur B							
Moyenne HA	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	-0,90	-0,50	-0,30	-1,00	-1,20	-1,00	-0,80
2it-P8-homo	-1,20	-1,00	-1,00	-0,60	-0,20	-1,00	-0,80
Total	-1,00	-0,80	-0,70	-0,80	-0,80	-1,00	-0,80
Test Wilcoxon Mann Whitney							
hétéro p8	40,5	6	alpha critique				
homo p8	37,5	6	1%	5%	10%		
p(hétéro p8<homo p8)	0,62065		Ho	Ho	Ho		
p(hétéro p8>homo p8)	0,43885		Ho	Ho	Ho		

45 Impact des Heures d'Arrivée : Comparaison des changements d'itinéraire selon l'heure d'arrivée entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

change ITI homo p8 et hétéro p8, HA = Av				change ITI homo p8 et hétéro p8, HA = HO				change ITI homo p8 et hétéro p8, HA = RET			
NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp			NB choix_i	id xp		
Sens chgt lti	2it-P8-hétéro	2it-P8-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P8-hétéro	2it-P8-homo	Total	Sens chgt lti	2it-P8-hétéro	2it-P8-homo	Total
Décision	2it-P8-hétéro	2it-P8-homo	Total	Décision	2it-P8-hétéro	2it-P8-homo	Total	Décision	2it-P8-hétéro	2it-P8-homo	Total
meme iti	288	282	570	meme iti	144	158	302	meme iti	65	72	137
change iti	79	67	146	change iti	53	47	100	change iti	43	46	89
	367	349	716		197	205	402		108	118	226

Test du Khi²		Test du Khi²		Test du Khi²	
Khi² calculé	0,462510377	Khi² calculé	0,650656348	Khi² calculé	7,1267E-05
alpha critique	0,496453077	alpha critique	0,419878116	alpha critique	0,993264358
Décision à 10%	Ho	Décision à 10%	Ho	Décision à 10%	Ho
Décision à 5%	Ho	Décision à 5%	Ho	Décision à 5%	Ho
Décision à 1%	Ho	Décision à 1%	Ho	Décision à 1%	Ho

46 Impact de l'heure d'arrivée : Comparaison des changements d'heure de départ selon l'heure d'arrivée entre les traitements (Test de Wilcoxon Mann Whitney)

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, ponctu = AV							
Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	0,50	0,60	0,30	0,60	0,70	0,50	0,50
2it-P8-homo	0,20	0,50	0,30	0,30	0,50	0,60	0,40
Total	0,40	0,50	0,30	0,50	0,60	0,60	0,50

Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p8	48	6	alpha critique
homo p8	30	6	1% 5% 10%
p(hétéro p8<homo p8)	0,934	Ho	Ho Ho
p(hétéro p8>homo p8)	0,0898	Ho	Ho H1

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, ponctu = HO								Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, ponctu = RET							
Moyenne ecart cht HD	Groupe							Moyenne ecart cht HD	Groupe						
id xp	1	2	3	4	5	6	Total	id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	-0,30	0,20	0,00	-0,60	-0,10	-0,30	-0,20	2it-P8-hétéro	-1,00	-1,80	-0,70	-1,00	-1,70	-0,80	-1,20
2it-P8-homo	-0,20	-0,40	-0,20	-0,20	-0,10	-0,50	-0,30	2it-P8-homo	-0,40	-0,30	-0,40	-0,40	-0,50	-0,90	-0,50
Total	-0,30	-0,20	-0,10	-0,40	-0,10	-0,40	-0,20	Total	-0,70	-1,20	-0,70	-0,60	-0,90	-0,90	-0,80

Test Wilcoxon Mann Whitney				Test Wilcoxon Mann Whitney			
hétéro p8	42,5	6	alpha critique	hétéro p8	23	6	alpha critique
homo p8	35,5	6	1% 5% 10%	homo p8	55	6	1% 5% 10%
p(hétéro p8<homo p8)	0,7316	Ho	Ho Ho	p(hétéro p8<homo p8)	0,0043	H1	H1 H1
p(hétéro p8>homo p8)	0,322	Ho	Ho Ho	p(hétéro p8>homo p8)	1	Ho	Ho Ho

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, ponctu = AV, sur A

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	0,50	1,00	0,50	0,60	1,10	0,70	0,70
2it-P8-homo	0,40	0,50	0,80	0,50	0,70	1,00	0,60
Total	0,40	0,80	0,60	0,50	0,90	0,80	0,70

Test Wilcoxon Mann Whitney

hétéro p8	43	6	alpha critique		
homo p8	35	6	1%	5%	10%
p(hétéro p8<homo p8)	0,75767		Ho	Ho	Ho
p(hétéro p8>homo p8)	0,2944		Ho	Ho	Ho

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, ponctu = HO, sur A

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	-0,40	1,00	0,10	-0,10	-0,10	0,10	0,00
2it-P8-homo	0,00	0,10	-0,20	-0,30	-0,10	-0,90	-0,20
Total	-0,20	0,30	-0,10	-0,20	-0,10	-0,30	-0,10

Test Wilcoxon Mann Whitney

hétéro p8	46	6	alpha critique		
homo p8	32	6	1%	5%	10%
p(hétéro p8<homo p8)	0,8799		Ho	Ho	Ho
p(hétéro p8>homo p8)	0,1548		Ho	Ho	Ho

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, ponctu = RET, sur A

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	-0,90	-1,40	-0,70	-0,40	-1,70	-0,80	-1,00
2it-P8-homo	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,60	-0,40
Total	-0,70	-1,00	-0,60	-0,40	-0,70	-0,70	-0,70

Test Wilcoxon Mann Whitney

hétéro p8	24,5	6	alpha critique		
homo p8	53,5	6	1%	5%	10%
p(hétéro p8<homo p8)	0,0103		Ho	H1	H1
p(hétéro p8>homo p8)	1		Ho	Ho	Ho

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, ponctu = AV, sur B

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	0,60	0,20	0,00	0,60	0,50	0,40	0,40
2it-P8-homo	0,10	0,40	-0,10	0,30	0,30	0,40	0,20
Total	0,30	0,30	0,00	0,40	0,40	0,40	0,30

Test Wilcoxon Mann Whitney

hétéro p8	47	6	alpha critique		
homo p8	31	6	1%	5%	10%
p(hétéro p8<homo p8)	0,9102		Ho	Ho	Ho
p(hétéro p8>homo p8)	0,1201		Ho	Ho	Ho

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, ponctu = HO, sur B

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	-0,20	0,00	-0,10	-0,70	-0,20	-0,40	-0,30
2it-P8-homo	-0,30	-0,80	-0,20	-0,10	-0,10	-0,30	-0,30
Total	-0,30	-0,40	-0,10	-0,40	-0,10	-0,40	-0,30

Test Wilcoxon Mann Whitney

hétéro p8	41	6	alpha critique		
homo p8	37	6	1%	5%	10%
p(hétéro p8<homo p8)	0,6504		Ho	Ho	Ho
p(hétéro p8>homo p8)	0,4091		Ho	Ho	Ho

Comparaison des chgt HD entre homo p8 et hétéro p8, ponctu = RET, sur B

Moyenne ecart cht HD	Groupe						Total
id xp	1	2	3	4	5	6	Total
2it-P8-hétéro	-1,10	-2,20	-0,80	-1,80	-1,70	-0,90	-1,40
2it-P8-homo	-0,30	0,00	xxxx	-0,30	-0,80	-1,50	-0,60
Total	-0,70	-1,50	-0,80	-0,80	-1,20	-1,10	-1,00

Test Wilcoxon Mann Whitney

hétéro p8	24,5	6	alpha critique		
homo p8	41,5	5	1%	5%	10%
p(hétéro p8<homo p8)	0,0011		H1	H1	H1
p(hétéro p8>homo p8)	1		Ho	Ho	Ho

Glossaire

- **HO** : traitement Homogène. Les sujets testés ont la même valeur de coût unitaire de temps de transport (α)
- **HE** : traitement Hétérogène. Les sujets testés ont des valeurs différentes de coût unitaire de temps de transport (α)
- **P4** : Traitement dans lequel le prix du péage est de 4 points
- **P8** : Traitement dans lequel le prix du péage est de 8 points
- **HD** : Heure de Départ, variable de décision. Peut prendre les valeurs suivantes $\{-9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$
- **ITI** : Itinéraire, variable de décision. Peut prendre les valeurs $\{A, B\}$
- **TT** : Temps de Transport, variable de conséquence. Peut prendre les valeurs suivantes $\{1, 2, 3, 4\}$
- **HA** : Heure d'Arrivée, variable de conséquence. Somme de HD et TT. Peut prendre les valeurs suivantes $\{-8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$
- **PONCTU** : Position de HA par rapport à l'objectif (t^*), variable de conséquence. Peut prendre les valeurs suivantes $\{Av, Ho, Ret\}$. « Av » pour « Avance », « Ho » pour « Heure 0 », « Ret » pour « Retard ».

Bibliographie

1. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. (1989), « Schedule Delay and Departure Time Decisions with Heterogeneous Commuters », *Transportation Research Record*, 1197, 56-67.
2. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. (1990a), « Departure time and route choice for the morning commute », *Transportation Research*, 24B, 209-228.
3. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. (1990b), « Economics of bottleneck », *Journal of Urban Economics*, 27, 11-30.
4. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. (1991), « Does providing information to drivers reduce traffic congestion? », *Transportation Research*, 25A, 5, 309-318.
5. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. (1993a), « Properties of dynamic traffic equilibrium involving bottlenecks, including a paradox and metering », *Transportation Science*, 27, 2, 148-160
6. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. (1993b), « A structural model of peak-period congestion : a traffic bottleneck with elastic demand », *American Economic Review*, 83, 1, 161-179.
7. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. (1996a), *Congestion : A dynamic Approach*, MIT Press, Cambridge
8. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. (1996b), « information and usage of free-access congestible facilities with stochastic capacity and demand », *International Economic Review*, 37, 1, 181-203.
9. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. (1998), « Recent developments in bottleneck model », in Button, Verhoef, *Road pricing, traffic congestion and the environment: survey - Issues of Efficiency and Social Feasibility*, Aldershot: Edward Elgar, 79-110
10. Arnott R., de Palma A., Lindsey R. (1999), « Information and time-of-usage decisions in the bottleneck model with stochastic capacity and demand », *European Economic Review*, 43, 525-548.
11. Ben-Akiva M., de Palma A., Kaysi I. (1991), « Dynamic network models and driver information systems », *Transportation Research*, 25A, 5, 251-266.
12. Ben-Akiva M., de Palma A., Kanaroglou P. (1986), « Dynamic Model of Peak Period Traffic Congestion with Elastic Arrival Rates », *Transportation Science*, 20, 2, 164-181.
13. Commissariat Général du Plan (2001), *Transports : choix des investissements et coût des nuisances*, rapport présidé par Marcel Boiteux.
14. Emmerink R.H.M. (1998), *Information and pricing in road transportation*, Berlin, Springer, 294 p.

15. Emmerink R.H.M., Axhausen K.W., Nijkamp P., Rietveld P. (1995), « Effects of information in road transport networks with recurrent congestion », *Transportation*, 22, 21-53.
16. Emmerink R.H.M., Verhoef E.T., Nijkamp P., Rietveld P. (1998), « Information policy in road transport with elastic demand: Some welfare economic considerations », *European Economic Review*, 42, 71-95.
17. Hendrickson C., Kocur G. (1981), « Schedule delay and departure time decisions in a deterministic model », *Transportation Science*, 15, 1, 62-77.
18. Henry, C. (1974), « Investment under Uncertainty: the "Irreversibility Effect" », *American Economic Review*, 64, 1006-1012.
19. Jaraz-Diaz S., Videla J. (1989), « Detection of income effect in mode choice: Theory and application », *Transportation Research*, 23B, 6, 393-400.
20. Khan A.M., Rustichini A. (1993), « Cournot-Nash equilibrium distributions of games with uncertainty and imperfect information », *Journal of Mathematical Economics*, 22, 35-59.
21. Laih C.-H. (1994), « Queuing at a Bottleneck with Single and Multi-step Tolls », *Transportation Research*, 28A, 3, 197-208.
22. Marshak J., Misayawa K. (1968), « Economic Comparability of Information System », *International Economic Review*, 9, 9-36.
23. Newell G.F. (1987), « The Morning Commute for Nonidentical Tavelers », *Transportation Science*, 21, 2, 74-88.
24. De Palma A., (1992), « A game-theoretic approach to the analysis of simple congested networks », *American Economic Review, Papers and proceedings*, 82, 2, 494-500.
25. De Palma A., Fontan C. (2001), Choix modal et valeur du temps en Ile de France, Cergy-Pontoise, Document de travail THEMA n°2001-20, 32 p.
26. Quinet E. (1998), *Principes d'économie des transports*, Paris, Economica, 419 p.
27. Schneider K., Weimann J. (1997), Against all odds : Nash Equilibria in a Road Pricing Experiment », Preprint n°30, Fakultät für Wirtschaftswissenschaft, Universität Magdeburg.
28. Small K.A. (1982), « The Scheduling of Consumer Activities: Work Trips », *American Economic Review*, 72, 3, 467-479,
29. Verhoef E.T. (2001), « An integrated dynamic model of road traffic congestion based on simple car-following theory: exploring hypercongestion », *Journal of Urban Economics*, 49, 505-542.
30. Vickrey W. (1969), « Congestion theory and transport investment », *American Economic Review, Papers and Proceedings*, 59, 251-260.

SOMMAIRE

CHAPITRE PRELIMINAIRE – Une introduction : congestion routière endogène et jeux expérimentaux	p3
CHAPITRE 1. Un bilan de la littérature sur les modèles structurels de congestion	p11
CHAPITRE 2. Les modèles de base : Un jeu de coordination a 1 ou 2 itinéraires	p45
CHAPITRE 3. Information des usagers et hétérogénéité des préférences	p129
CONCLUSION GENERALE	p194
ANNEXES	p 196